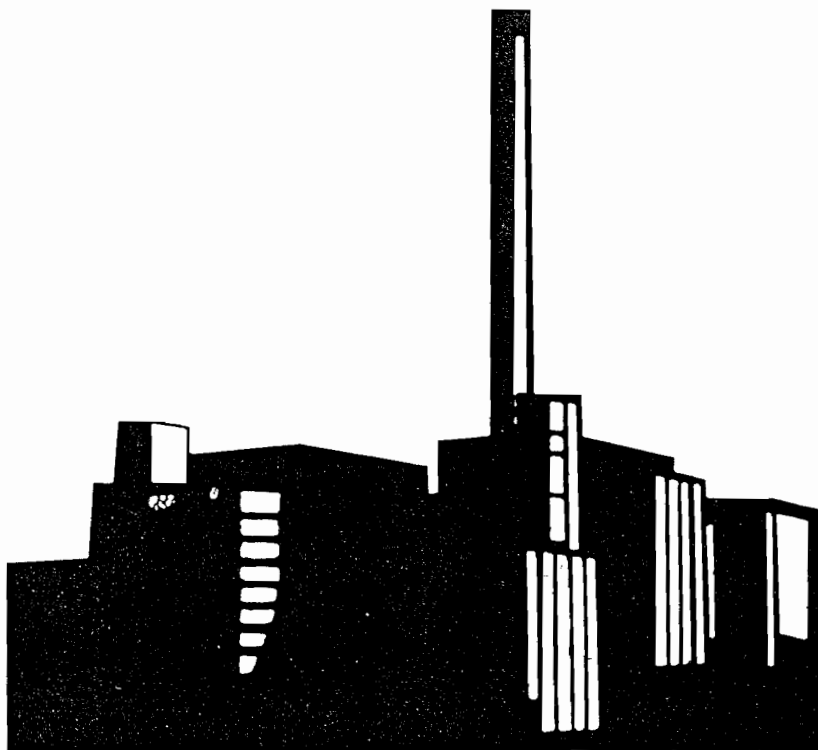




TUHKAPROJEKTI VÄLIRAPORTTI

Jorma Havukainen

KIVIHIILIVOIMALAN TUHKAN KÄYTTÖ
MAARAKENTEISSA

Geoteknisen osaston tiedote 18 27.1.1981

ALKUSANAT

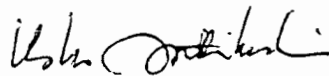
Tämä väliraportti on laadittu geoteknisessä osastossa vuoden 1980 joulukuussa. Se perustuu geoteknisen osaston v. 1979 kiinteistölautakunnan kehotuksesta käynnistämän, kaupungin rakentamista palvelevan kivihiilituhkien hyötykäyttötutkimuksen yhteydessä tehtyyn kirjallisuusselvitykseen sekä vuosien 1979 ja 1980 aikana tehtyihin rakentamiskokeiluihin ja näihin liittyviin laboratorio-kokeisiin. Raportin on laatinut dipl.ins. Jorma Havukainen.

Tutkimuksen päämääränä on koko kaupungin kivihiilituhkan tuotannon saaminen hyötykäyttöön. Siinä on keskitytty tuhkatyyppien ominaisuuksien ja oikean käsittelytekniikan selvittämiseen. Asian laajuuden vuoksi tämä tutkimus ei käsittele tuhkien sekoittamista muihin kiviaineksiin, vaan paneutuu tuhkiin joko sellaisenaan tai eräillä sideaineilla stabiloituna.

Raportin alkuosa käsittelee Helsingin tuhkien tuotantoa ja ominaisuuksia sekä loppuosa tuhkarakentamista. Raporttiin on laadittu käytännön rakentamista palvelevat suunnittelu- ja työohjeet, jotka saatetaan vuoden 1981 aikana saatavan lisäkokemuksen pohjalta parannettuun muotoon vuoden 1982 alussa.

Kivihiilituhkien kokonaisvaltainen hyötykäyttö merkitsee Helsingin kaupungille useiden miljoonien markkojen vuosisäästöjä ja on osana kaupungin rakentamista ja massataloutta kehitettäessä.

Helsingissä 19.1.1981



Usko Anttikoski
Osastopäällikkö

Dipl.ins. Jorma H a v u k a i n e n

K I V I H I I L I V O I M A L A N T U H K A N
K Ä Y T T Ö . M A A R A K E N T E I S S A

T u h k a p r o j e k t i n v ä l i r a p o r t t i

TUHKAPROJEKTIN HENKILÖSTÖ

Valvova ryhmä

Usko Anttikoski (puh.joht.)	Kv/GEO
Risto Alkio	VTT/TIE
Osmo Arponen	Energialaitos
Martti Eerola	VTT/TIE
Pertti Eklund	Espoo/tekn.vir./geotekn.os.
Juhani Hietanen	HKR/PUO
Erkki Karjalainen	HKR/KRO/tielab.
Hannu Koponen	Satamalaitos
Erkki Koskinieniemi	HKR/PUO
Hannu Kärki	Satamalaitos
Veikko Lahti	Energialaitos
Leo Liusvaara	UUV
Olavi Louko	HKR/KRO
Aimo Oksanen	HKR/KRO
Matti Sallinen	HKR/KRO
Heikki Somervuo	Ksv/yleiskaavaosasto

Rakenneryhmä

Jorma Havukainen (joht.)	Kv/GEO
Alpo Hämäläinen	Kv/GEO
Jorma Kemppinen	Kv/GEO
Juha Siitonen	Kv/GEO
Ulla Smolander	Kv/GEO

Korroosioryhmä

Pertti Nieminen (joht.)	TTKK/rakennustekn.os.
-------------------------	-----------------------

SISÄLLYSLUETTELO

	sivu
1. JOHDANTO.....	1
1.1 <u>Yleistä</u>	1
1.2 <u>Tuhkien hyötykäytön merkitys Helsingille</u>	2
1.3 <u>Tuhkaprojektin tehtävät ja organisaatio</u>	3
2. TUHKIEN TUOTANTO	4
2.1 <u>Kivihiilivoimalaitokset</u>	4
2.2 <u>Tuhkatyypit, tuotanto ja saatavuus</u>	5
2.3 <u>Varastointivaihtoehdot</u>	6
2.31 <u>Ulkovarastointi kasaan</u>	6
2.32 <u>Kalliokuoppaan varastointi</u>	7
2.33 <u>Suursäkkivarastointi</u>	8
3. TUHKIEN OMINAISUUDET.....	8
3.1 <u>Kemialliset ominaisuudet</u>	8
3.11 <u>Kemiallinen koostumus</u>	8
3.12 <u>Potsolaanisuus</u>	9
3.13 <u>Korroosiovaikutukset</u>	10
3.14 <u>Vaikutukset pohjaveteen</u>	11
3.15 <u>Vaikutukset kasveihin</u>	11
3.16 <u>Muut vaikutukset</u>	14
3.2 <u>Geotekniset ominaisuudet</u>	14
3.21 <u>Raekoko, raemuoto ja kiintotiheys</u>	14
3.22 <u>Irtotiheys, vesipitoisuus ja tiiviys</u>	16
3.23 <u>Vedenläpäisevyys, kapillaarisuus ja routivuus</u>	16
3.24 <u>Lämmöneristyskyky</u>	17
3.25 <u>Kokoonpuristuvuus</u>	17
3.26 <u>Lujuus, säänkestävyys ja kantavuus</u>	18
3.3 <u>Työskentelyominaisuudet</u>	20
3.31 <u>Saatavuuden vaikutus työskentelyyn</u>	20
3.32 <u>Käsiteltävyys</u>	20
<u>Pölyäminen</u>	20
<u>Liettyminen</u>	21
<u>Levitettävyys</u>	21
<u>Tiivistettävyys</u>	21
<u>Lujittumisen vaikutus</u>	22
4. KÄYTTÖKOHTEET.....	22
4.1 <u>Yleistä</u>	22
4.2 <u>Penkereet</u>	22
4.3 <u>Liikenneväylät ja pysäköintialueet</u>	23
4.4 <u>Taustatäytöt</u>	24
4.5 <u>Pientalojen perustaminen</u>	24
4.6 <u>Rumpujen, viemäreiden ja putkijohtojen perustaminen</u> ...	25
4.7 <u>Kanavatäytöt ja salaojat</u>	26
4.8 <u>Urheilukentät</u>	27

4.9	<u>Piha- ja varastoalueet</u>	27
4.10	<u>Vettäpidättävät rakenteet</u>	27
4.11	<u>Injektointi</u>	28
4.12	<u>Muut käyttökohteet</u>	29
5.	SUUNNITTELUOHJEET.....	29
5.1	<u>Tuhkarakenteiden sijoittaminen</u>	29
5.11	<u>Pohjasuhteiden huomioonottaminen</u>	29
5.12	<u>Pohjaveden huomioonottaminen</u>	30
5.2	<u>Ympäristövaikutukset</u>	30
5.3	<u>Rakenteelle asetettavat vaatimukset</u>	30
5.31	<u>Lujuusvaatimukset</u>	30
5.32	<u>Kuivatustarve</u>	30
5.33	<u>Lämmöneristystarve</u>	31
5.34	<u>Käytönaikainen suojaaminen eroosiolta ja pölyhaitoilta</u>	31
5.35	<u>Korjattavuus</u>	31
5.4	<u>Työnsuunnittelu</u>	31
5.41	<u>Tuhkan saatavuus ja työn ajoitus</u>	31
5.42	<u>Kaluston käytön suunnittelu</u>	32
5.43	<u>Sään ja vuodenaikojen huomioonottaminen</u>	32
5.44	<u>Jälkiseurannan suunnittelu</u>	32
6.	TYÖOHJEET.....	33
6.1	<u>Kuljetus</u>	33
6.2	<u>Välivarastointi työmaalla</u>	33
6.3	<u>Levittäminen</u>	33
6.4	<u>Tiivistäminen</u>	33
6.41	<u>Tiivistyskalusto</u>	33
6.42	<u>Tiivistystyön suoritus</u>	34
6.5	<u>Rakentamisen aikaisten häirtatekijöiden eliminoiminen</u>	34
6.51	<u>Pölyäminen</u>	34
6.52	<u>Liettyminen</u>	34
6.6	<u>Talvirakentaminen</u>	34
6.7	<u>Valvonta</u>	35
6.71	<u>Tuhkan laatu</u>	35
6.72	<u>Tiiviyden tarkkailu</u>	35
6.73	<u>Kantavuuden ja lujuudenkasvun tarkkailu</u>	36
7.	TUHKARAKENTAMISEN KUSTANNUKSET.....	36
7.1	<u>Materiaalikustannukset</u>	36
7.2	<u>Rakentamiskustannukset</u>	36
7.3	<u>Muut kustannuksiin vaikuttavat tekijät</u>	36
7.4	<u>Tuhkaprojektin säästöt</u>	36
8.	JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTOIMENPITEET.....	37
	AIHETTA KÄSITTELEVÄÄ KIRJALLISUUTTA.....	38
	LIITTEET	

1.

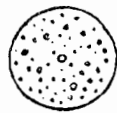
JOHDANTO

1.1

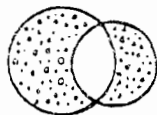
Yleistä

Vanhastaan rakentamiseen käytettävien luonnonkiviainesten rajallisesta määrästä, kuljetusmatkojen pidentymisestä ja luonnonsuojelullisten näkökoh-
tien huomioonottamistarpeesta johtuen joudutaan
jo 1980-luvulla tehokkaasti hyödyntämään materiaa-
leja, joita on tähän saakka ilman tarkempia perus-
teluja pidetty kaatopaikkatavarana.

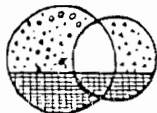
Suomessa käytetään rakennustoiminnassa vuosittain
50 - 70 miljoonaa m³ kiviaineksia. Tällä, kuten
kaikkialla teollistuneessa maailmassa, kehitys on
kuvan 1 mukainen.



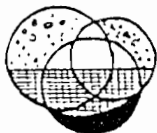
1. LUONNON KIVIAINEKSET
(sora ja hiekka)



2. KORVAAVAT LUONNON KIVIAINEKSET + 1.
(esim. murske, pesty moreeni)



3. STABILOIDUT KIVIAINEKSET + 1. + 2.
(esim. sementti- ja kalkkistabilointi)



4. SIVUTUOTTEET + 1. + 2. + 3.
(esim. voimalaitostuhkat, rauta- ja
terästeollisuuden kuonat)

Kuva 1. Kiviainesten käytön kehitys.

Tällä hetkellä Suomessa eletään pääosin kahta
ensimmäistä vaihetta, mutta jo nyt joudutaan
harkitsemaan siirtymistä yhä määrätietoisemmin
vaiheisiin 3 ja 4. Muutoksen tarve on suurin
alueilla, missä

- rakentaminen on vilkasta,
- soran ja hiekan kuljetusmatkat ovat pitkät,
- lähistöllä on saatavissa korvaavia materiaaleja,
- sivutuotteiden vanha sijoittamistapa aiheuttaa huomattavia kustannuksia.

Yksi monipuolisimpia sivutuotteita on kivihiili-voimalaitosten tuhka. Sitä on käytetty rakentamiseen mm. Isossa-Britanniassa, Yhdysvalloissa ja Ranskassa jo noin 20 vuoden ajan. Kuitenkin vasta 1970-luvulla energian hinnan noustua jyrkästi on kaikkialla kivihiiltä polttavissa maissa alettu suunnata huomattavia voimavaroja sivutuotteiden, mm. voimalaitostuhkien hyödyntämiseen.

Suomessa syntyvästä lähes 0,5 milj. tuhkatonnista tuottavat suurimman osan Imatran Voima Oy ja Helsingin kaupunki. Suurin osa tuhkista on mennyt 1970-luvun lopulle saakka joko kaatopaikoille tai toisarvoisiin täyttötarkoituksiin.

Helsingin kaupungissa syntyvien tuhkien hyötykäytön tehostamiseksi geotekninen osasto käynnisti kesällä 1979 kiinteistölautakunnan kehotuksesta (495 § 13.3.1979) tuhkatutkimusprojektin. Tutkimuksen lähtökohtana voidaan pitää kiinteistöviraston virastopäällikön Kalevi Korhosen, geoteknisen osaston päällikön Usko Anttikosken ja rakennusviraston katurakennusosaston rakentamistoimiston päällikön Matti Sallisen matkaa Pariisissa marraskuussa 1978 pidettyyn sivutuotteita ja jätteitä rakennustekniikassa käsittelevään kokoukseen sekä tästä laadittua matkakertomusta ja kirjallisuustutkimusta (geoteknisen osaston tiedote 13).

Helsingin kaupungin tuhkaprojektin eräänä tavoitteena on olla muualla maassamme, mm. VTT:ssä ja Imatran Voima Oy:ssä, suoritettujen tutkimusten täydentäjänä, nimenomaan käytännön kokemusten kartuttajana, kivihiilituhkista rakennettaessa.

1.2

Tuhkien hyötykäytön merkitys Helsingille

Helsingin kaupunki on tuhkien hyötykäyttäjänä koko Suomea ajatellen erikoisasemassa. Kaupungissa käytetään rakennustoiminnassa maa-aineksia vuosittain noin 1,5 milj. m³, joista tulee Helsingin ulkopuolelta noin 1,1 milj. m³. Soran ja hiekan kuljetusmatkat ovat keskimäärin noin 50 km. Kaupungilla on oma arvokas rakennusmateriaalinsa, kivihiilivoimalaitosten tuottama tuhka, jota syntyy vuodessa noin 150 000 irto-m³. Tuhkien ajo kaatopaikoille ja täyttömäkiin ei ole mielekasta, kun otetaan huomioon, että rakentamiseen kelpaamattomien ylijäämämäässojen, joita syntyy vuosittain noin 0,8 milj. m³, sekä lisääntyvien jätemäärien sijoituspaikkojen tarve kasvaa jatkuvasti.

Mikäli Helsingin kaupunki käyttää kaiken tuottamansa tuhkan järkiperaisesti omaan rakennustoimintaansa, arvioitu rahallinen säästö kaupungille on vähintään 3-5 milj. mk vuodessa.

Helsingin tuhkien tuotanto kasvaa lähes kolmanneksella 1980-luvun puolivälissä, kun Salmisaaren laajennusosa valmistuu. On huomattava myös Espoon Sähkö Oy:n 40 000 tonnin vuotuinen tuhkantuotanto.

1.3

Tuhkaprojektin tehtävät ja organisaatio

Tutkimukset käynnistyivät 1.8.1979. Ne koostuvat laboratoriotutkimuksista sekä kentällä suoritettavista tutkimuksista. Laboratoriotutkimuksista keskeisellä sijalla ovat olleet tuhkien geoteknisten ominaisuuksien sekä lentotuhkien lujittumiso-minaisuuksien selvittäminen. Kentällä on pyritty saamaan käytännön kokemusta tuhkien käsittelystä sekä vertaamaan laboratoriossa saatuja tuloksia kentätuloksiin. Tuhkasta on rakennettu kaikkina vuodenaikoina, jotta saataisiin selville sään vaikutukset käytännön rakentamiseen. Myös ympäristövaikutuksia on pyritty selvittämään.

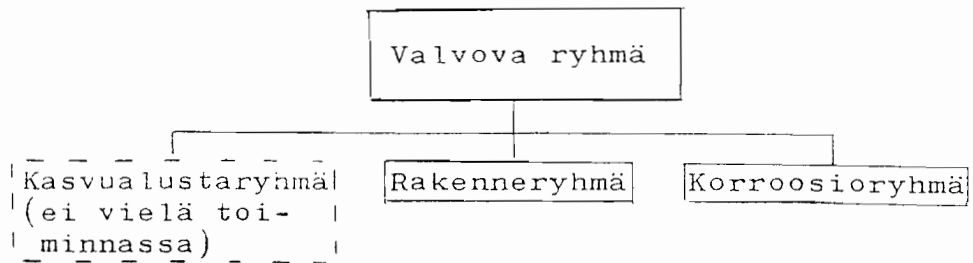
Projekti tukeutuu jo olemassa oleviin organisaatioihin. Sitä valvoo kaupungin virastojen ja laitosten, VTT:n ja Espoon kaupungin edustajista koottu asiantuntijaryhmä. Valvovan ryhmän puheenjohtajana on geoteknisen osaston päällikkö Usko Anttikoski.

Tutkimusten tekeminen on keskittynyt rakenneryhmän osalle. Sitä johtaa DI Jorma Havukainen. Muut jäsenet ovat geoteknisen osaston palveluksessa virastotyöntekijöinä olevat kolme insinööriä sekä tutkimussihteeri. Tutkimuspaikkana ovat rakennusviraston katurakennusosaston tielaboratorion ja vesilaboratorion tilat.

Valvovan ryhmän ja rakenneryhmän kokouksia on pidetty noin kahden kuukauden välein. Kokouksissa rakenneryhmä on raportoinut valvovalle ryhmälle tekemiään tutkimuksia. Valvovan ryhmän jäsenet ovat antaneet toimialueensa asiantuntemusta rakenneryhmälle sekä järjestäneet mahdollisuudet käytännön rakentamiskokeiluihin.

Rakenneryhmän rinnalla toimii ns. korroosioryhmä, jonka tehtävänä on selvittää tuhkien korroosiovaikutuksia rakentamisessa käytettäviin materiaaleihin. Ryhmää johtaa Tampereen teknillisen korkeakoulun rakennustekniikan osastolta Fil. lis. Pertti Nieminen. Rakenneryhmä on avustanut korroosioryhmää asentamalla tuhkarakenteisiin materiaaleja, jotka ylöskaivamisen jälkeen tutkitaan Tampereen teknillisessä korkeakoulussa.

Alkuperäisen suunnitelman mukainen kasvualustaryhmän toiminta ei ole käynnistynyt odotetulla tavalla. Rakenneryhmä on tutustunut kansainväliseen alan kirjallisuuteen sekä koonnut ja suomentanut sitä tuhkien oleellisimpien vaikutusten selvittämiseksi kasvillisuuteen sekä mahdollisen tulevan kasvualustaryhmän työn käynnistymisen helpottamiseksi.



Kuva 2. Tuhkaprojektin organisaatiokaavio (henkilöluettelo raportin alussa).

2.

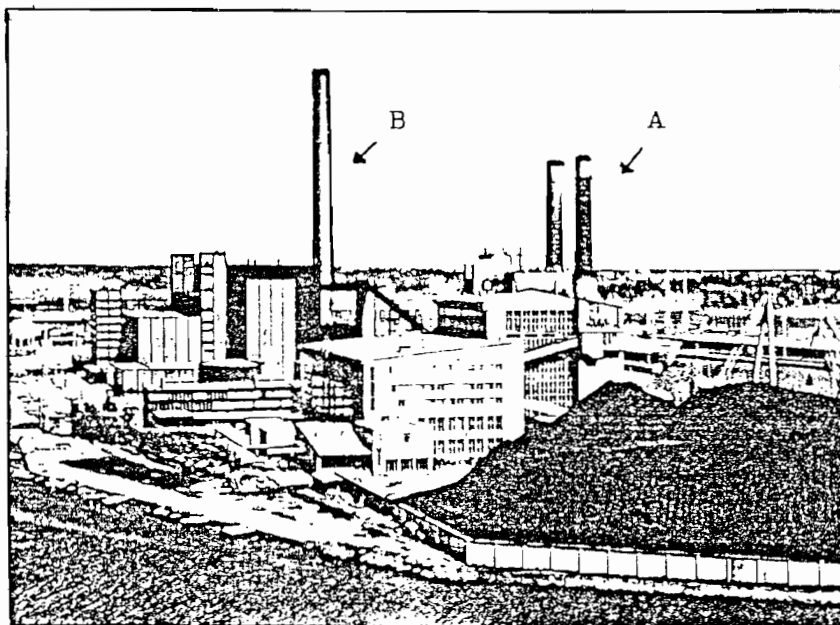
TUHKIEN TUOTANTO

2.1

Kivihiilivoimalaitokset

Helsingin kaupungin energialaitoksella on kolme kivihiiltä polttoaineenaan käyttävää voimalaitosta: Hanasaaren (A ja B), Salmisaaren ja Myllypuron laitokset. Niiden yhteinen teho on noin 1700 MW, kun otetaan huomioon sekä sähkön että kaukolämmön tuotanto. Laitoksissa on myös öljynpolttomahdollisuus.

Kivihiili on ollut pääosin puolalaista. Laitokset poikkeavat toisistaan mm. kivihiilen polttotavan perusteella. Hanasaaren voimalaitokset polttavat hienoksi jauhettua murskahiiltä, Salmisaaren voimalaitos karkeaa arinahiiltä ja Myllypuron voimalaitos karkeaa murskahiiltä. Yhteensä Helsingin kaupunki polttaa kivihiiltä noin 1,1 milj. tonnia vuodessa. Määrä kasvaa noin kolmanneksella 1980-luvun puolivälissä, kun Salmisaaren uusi voimalaitos valmistuu.



Kuva 3. Hanasaaren voimalaitokset.

2.2

Tuhkatyypit, tuotanto ja saatavuus

Poltettavasta kivihiilestä syntyy keskimäärin noin 15 painoprosenttia tuhkaa. Tuhkan laatu riippuu mm. kivihiilityypistä, kivihiilen karkeudesta, voimalaitoksen polttolaitteiston tyypistä sekä polttolämpötilasta.

Kivihiilituhkat jaetaan kolmeen päätyyppiin:

- 1 Savukaasuista sähköisin ja/tai mekaanisin erottimin talteen otettava lentotuhka.
- 2 Kuivapohjatyypisten, pölynä hiiltä polttavien laitosten pohjatuhka.
- 3 Murskeena hiiltä polttavien arinapolttolaitosten pohjakuona.

Hanasaaren voimalaitokset ovat nykyaikaisia pölypolttolaitoksia, joissa syntyy lentotuhkaa 70-80 % koko tuhkamäärästä ja pohjatuhkaa vastaavasti 20-30 %.

Salmisaaren voimalaitos on kuivapohjatyypinen arinapolttolaitos, jossa syntyy pohjakuonaa.

Myllypuron voimalaitos on myös kuivapohjatyypinen arinapolttolaitos, jossa syntyy lentotuhkaa noin 45 % tuhkan kokonaismäärästä ja pohjakuonaa n. 55 %.

Taulukossa 1 on esitetty Helsingin voimalaitosten polttamat vuotuiset kivihiilimäärät sekä syntyvät tuhkamäärät, joista nähdään selvä ero talvi- ja kesäkauden välillä.

Taulukko 1. Helsingin voimalaitosten polttamat kivihiilimäärät ja tuhkien tuotanto.

LAITOS	HANASAARI A		HANASAARI B		SALMISAARI	MYLLYPURO		YHT.
HIILI	Hienoksi jauhettu murskahiili				Arinahiili	Murskahiili		
MAÄRA	230 000 t		550 000 t		200 000 t	90 000 t		1 070 000 t
TUHKA	Lentot	Pohjat	Lentot	Pohjat	Pohjakuona	Lentot	Pohjak	
KK	TUOTANTOMÄÄRÄT KUUKAUSITTAIN (tonneina)							YHT.
TAMMI	3 200	800	7 600	1 900	2 600	1 000	1 200	18 300
HELMI	2 700	700	6 400	1 600	2 400	900	1 000	15 700
MAALIS	2 200	600	5 200	1 300	2 100	800	900	13 100
HUHTI	1 800	400	4 300	1 100	1 900	800	900	11 200
TOUKO	1 600	400	3 800	1 000	1 700	600	700	9 800
KESÄ	1 500	400	2 500	900	1 300	300	300	7 200
HEINÄ	1 400	300	3 000	600	1 200	300	300	7 100
ELO	1 500	400	3 800	900	1 600	300	300	8 300
SYYS	1 600	400	4 000	1 000	1 700	600	700	10 000
LOKA	1 700	400	4 000	1 000	2 000	700	800	10 600
MARRAS	2 000	500	4 700	1 100	2 100	800	900	12 100
JOULU	2 800	700	6 700	1 600	2 400	900	1 000	16 100
YHT.	24 000	6 000	56 000	14 000	23 000	8 000	9 000	140 000

Tuhkan saatavuus riippuu voimalaitosten käyttöasteesta ja sen vuoksi sitä syntyy eniten kylmänä vuodenaikana, jolloin energiaa tuotetaan eniten. Taulukosta nähdään, että kesä kautena (touko-lokakuu) tuhkaa syntyy vain noin 38 % koko tuotannosta. Saatavuutta kaupungin omaan käyttöön kesä aikana pienentää lisäksi lentotuhkan myyminen sementti- ja betoniteollisuudelle. Koska rakentaminen on vilkkaimmillaan juuri kesällä, kaupungin olisi rakennettava varastoja, joihin ylimääräinen talvikauden tuhka kuljetettaisiin tulevaa käyttöä varten. Voimalaitostuhkia varastoitaessa tulee ottaa huomioon, että varastotilan ei tarvitse olla suuruudeltaan kuin korkeintaan puolet vuoden tuotannosta, koska tuhkaa kuljetetaan ympäri vuoden voimalaitokselta myös suoraan käyttöön.

2.3

Varastointivaihtoehdot

Nykyisin Hanasaaressa on lyhyen ajan varastointia varten siilot, joiden lisäksi olisi rakennettava kaupunkiin keskitetty pitkän ajan varasto. Tuhkan varastointitapa olisi valittava tuhkatyyppin mukaan siten, että sen toivotut ominaisuudet säilyisivät parhaiten. Lisäksi kukin tuhkatyyppi on varastoitava erillään toisistaan.

Varastointivaihtoehtoja ovat:

- ulkovarastointi kasaan,
- kalliokuoppaan varastointi,
- suursäkkivarastointi.

2.31

Ulkovarastointi kasaan

Pohjatuhka ja -kuona voidaan varastoida tiivistämättömänä kasaan sellaisenaan lämpimänä vuodenaikana. Varsinkin pohjatuhkalle tästä varastointitavasta on jopa hyötyä, koska siitä pääsee tällöin liika vesi ($w \approx 40\%$ kuivapainosta voimalaitokselta tuottaessa) poistumaan parhaiten. Veden poistumisen varmistamiseksi on huolehdittava pohjamaan kuivatuksesta. Pohjatuhka ja -kuona eivät aiheuta pölyhaittoja ympäristölleen, joten niitä ei tarvitse sen vuoksi suojata. Kuitenkin sateisina aikoina kasa on suojattava kastumiselta. Kylmänä vuodenaikana pohjatuhkia ja -kuonia ei voida varastoida ilman lämmöneristystä. Asentamalla yhtenäinen veden- ja lämmöneristys varastokasan päälle tuhka voidaan pitää talven yli kesää varten. Kasaa ei tällöin voida talvisaikaan täyttää lisää eikä siitä voida ottaa tuhkaa. Ulkovarastointi kasaan soveltuukin joko toimivaksi kesäajan varastoksi tai talven yli varastointiin. Kuormaus tapahtuisi kauhakuormaajalla.

Lentotuhkan lujittumisominaisuuksien säilyttäminen vaatii materiaalin varastoimista kuivana, minkä vuoksi ulkovarastointi kasaan ei sovi silloin kun nämä ominaisuudet halutaan säilyttää, koska näin on mahdotonta estää täysin kosteuden pääsy lentotuhkaan. Lisäksi kuivan lentotuhkan käsittely aiheuttaa pölyhaittoja.

Mikäli lentotuhkaa tullaan käyttämään sellaisissa rakenteissa, missä pääkriteerinä ei ole mahdollisimman suuren lujuuden saavuttaminen, voimalaitoksella kostutetun ($w =$ hieman yli 10 %) tuhkan varastoinnissa voidaan käyttää samanlaisia menetelmiä kuin pohjatuhkan ja -kuonan kohdalla. Tällöin on kuitenkin estettävä myös veden kapillaarinen nousu pohjamaasta.

Varastoiminen keskikorkeudeltaan 10 m paksuksi ka-saksi vaatisi esim. 80 000 tonnin tuhkamäärälle hehtaarin (1 ha) suuruisen maa-alueen, eikä siten ole Helsingin alueella mielekäs tapa varastoida keskitetysti tuhkaa. Menetelmä sopiikin parhaiten paikalliseen välivarastointiin.

2.32

Kalliokuoppaan varastointi

Varastointitavan edullisuus perustuu louheen hyötykäyttömahdollisuuteen. Tuhkat varastoitaisiin menetelmässä kuivana kallioon louhittuun kuoppaan, josta ne kuljetettaisiin yhteen tai useampaan kallioon louhittuun jakelusiiloon. Näistä tuhka kuljetettaisiin edelleen sopivasti kustutettuna työmaille. Siilot voitaisiin rakentaa myös kallionpinnalle kuopan reunalle. Tuhka kuljetettaisiin jatkuvakiertoisilla laahainkauhoilla kuopasta siiloihin.

Kalliokuoppa tulisi kattaa vedeltä ja tuulelta suo-jaamiseksi. Pohjavedenpinta pidettäisiin vaadit-tuun tasoon sijoitetun keräilyputkiston ja pump-pauksen avulla tuhkakerroksen pohjan ja kuoppaa ympäröivän vedenpinnan alapuolella, jolloin taat-taisiin tuhkan pysyminen kuivana sekä virtaussuun-nan pysyminen aina kaivantoon päin, jolloin mah-dollinen tuhkien ainesosien pääsy ympäristöön estettäisiin.

Kullekin tuhkatyypille voitaisiin tehdä oma kuop-pansa ottamalla huomioon materiaalin ominaisuuksista johtuvat erityisvaatimukset.

Louhintakustannukset 50 000 m³:n lentotuhkakuopalle olisivat noin 1 milj. mk. Kallioulouheen käyttöarvo on jatkuvasti nousemassa, ja se on tällä hetkellä, v. 1980, 5-15 mk/m³. Louheen käyttöarvo saattaa olla jo v. 1985 15-25 mk/m³. Tämän mukaisesti

saadun louheen käyttöarvolla katettaisiin vähintään puolet louhintakustannuksista. Kun otetaan vielä huomioon, että varastoitavan lentotuhkan arvo on vähintään 15 mk/m³, jäisi pumppausjärjestelmien, katoksen, kuljettimien ja sillojen rakentamiseen vielä noin 1 milj. mk.

2.33

Suursäkkivarastointi

Tässä menetelmässä tuhka varastoidaan suureen noin 1 m³:n vetoiseen nailonkudoksiseen, tiiviiseen säkkiin. Säkin täyttö tapahtuu suoraan voimalaitoksen siilon tuhkansyöttöputkesta. Menetelmä soveltuu vain kuivan lentotuhkan varastointiin ja parhaiten tapauksiin, joissa lentotuhka kuljetetaan moneen pisteeseen suhteellisen pieninä määrinä varastoitavaksi. Tällaisesta on esimerkkinä käyttö asfaltin fillerinä yksittäisissä päällystystöissä.

Suursäkit voidaan käyttää moneen kertaan, mutta menetelmä ei ole kuitenkaan taloudellinen kohteissa, joissa tarvitaan suuria määriä tuhkaa. Myös voimalaitoksen kannalta menetelmä on hidas ja epäkäytännöllinen.

3.

TUHKIEN OMINAISUUDET

3.1

Kemialliset ominaisuudet

Kivihiilituhkat koostuvat pääosin kivihiilen seassa olevasta sivukivestä ja muista hiilen seassa olleista mineraaleista. Polttolämpötila ylittää mineraalien sulamispisteen, joten ne eivät ole tuhkassa alkuperäisessä muodossaan. Suurin osa aineksesta on lasimaista, lentotuhkilla lähes 90 %. Muu osa on kiteistä ainesta, mm. jäännöshiiltä (1-12 %).

3.11

Kemiallinen koostumus

Lentotuhkien ja pohjatuhkien sekä pohjakuonien kemialliset koostumukset poikkeavat syntytapansa vuoksi jonkin verran toisistaan, mutta pääpiirteissään ne ovat saman raaka-ainealkuperänsä vuoksi samanlaiset. Kaikissa on pääainesosina piidioksidia (SiO₂), ferrioksidia (Fe₂O₃) ja aluminiumoksidia (Al₂O₃). Niissä on myös pienempiä määriä kalsiumoksidia (CaO), magnesiumoksidia (MgO), natriumoksidia (Na₂O), kaliumoksidia (K₂O), rikkiatrioksidia (SO₃) ja muita yhdisteitä. Taulukossa 2 nähdään Hanasaaren tuhkien kemiallinen koostumus.

Taulukko 2.

Hanasaaren voimalaitoksen tuhkien kemiallinen koostumus (%), hienomminpitoisuus (%), hehkutusväliä (%), liukotettavien suolien (%), vesiliukoksen pH sekä puristuslujuudet (14 ja 28 vrk, MN/m²). Sulatusa käytettävien lukumäärä.

	LENTOTUHKA												POHJATUHKA					
	min	ka	max	min	ka	max	min	ka	max	min	ka	max	min	ka	max	min	ka	max
SiO ₂	41,9 (5)	45,5 (5)	48,3 (5)	46,0 (1)	48,8 (1)	50,2 (1)	42,7 (16)	46,4 (16)	50,2 (16)	50,1 (1)	50,1 (1)	50,2 (1)	43,1 (12)	46,1 (12)	50,2 (12)	42,5 (4)	44,4 (4)	45,9 (4)
Al ₂ O ₃	16,6 (5)	18,5 (5)	21,1 (5)	16,6 (1)	16,7 (1)	19,6 (1)	19,6 (16)	20,9 (16)	22,6 (16)	19,6 (1)	19,6 (1)	20,9 (1)	19,5 (12)	20,9 (12)	22,6 (12)	11,0 (4)	11,8 (4)	12,1 (4)
TiO ₂	0,80 (5)	0,88 (5)	1,00 (5)	0,80 (1)	0,80 (1)	0,90 (1)	0,90 (16)	1,10 (16)	1,30 (16)	0,90 (1)	0,90 (1)	1,10 (1)	0,90 (12)	1,10 (12)	1,30 (12)	0,60 (4)	0,70 (4)	0,80 (4)
Fe ₂ O ₃	10,9 (5)	11,6 (5)	12,2 (5)	10,9 (1)	10,9 (1)	12,2 (1)	10,0 (16)	11,2 (16)	13,6 (16)	11,0 (1)	11,0 (1)	12,2 (1)	10,2 (12)	11,1 (12)	13,6 (12)	6,3 (4)	7,7 (4)	8,5 (4)
CaO	7,2 (5)	7,3 (5)	7,6 (5)	7,2 (1)	7,2 (1)	7,2 (1)	6,7 (16)	8,1 (16)	9,4 (16)	6,7 (1)	6,7 (1)	8,1 (1)	7,3 (12)	8,1 (12)	9,4 (12)	3,5 (4)	4,1 (4)	5,2 (4)
MgO	4,3 (5)	4,6 (5)	5,0 (5)	4,3 (1)	4,6 (1)	5,0 (1)	4,3 (16)	5,0 (16)	5,9 (16)	4,3 (1)	4,3 (1)	5,0 (1)	4,4 (12)	5,1 (12)	5,9 (12)	2,1 (4)	2,5 (4)	3,1 (4)
Na ₂ O	0,90 (5)	0,90 (5)	1,00 (5)	0,90 (1)	0,90 (1)	1,00 (1)	0,80 (16)	0,95 (16)	1,10 (16)	0,90 (1)	0,90 (1)	1,10 (1)	0,80 (12)	0,95 (12)	1,10 (12)	0,40 (4)	0,50 (4)	0,50 (4)
K ₂ O	1,8 (5)	1,9 (5)	2,2 (5)	1,8 (1)	1,8 (1)	2,2 (1)	1,7 (16)	1,7 (16)	2,3 (16)	2,1 (1)	2,1 (1)	2,3 (1)	1,7 (12)	2,2 (12)	2,3 (12)	1,3 (4)	1,2 (4)	1,3 (4)
P ₂ O ₅	0,20 (5)	0,26 (5)	0,40 (5)	0,20 (1)	0,20 (1)	0,20 (1)	0,20 (16)	0,26 (16)	0,30 (16)	0,20 (1)	0,20 (1)	0,20 (1)	0,20 (12)	0,27 (12)	0,30 (12)	0,10 (4)	0,10 (4)	0,10 (4)
SO ₃	0,60 (5)	1,14 (5)	1,50 (5)	1,10 (1)	1,10 (1)	1,50 (1)	0,60 (16)	0,86 (16)	1,20 (16)	0,60 (1)	0,60 (1)	1,20 (1)	0,70 (12)	0,90 (12)	1,20 (12)	0,10 (4)	0,20 (4)	0,30 (4)
Cl							0,07 (11)	0,07 (11)					0,07 (11)	0,07 (11)		0,09 (4)	0,12 (4)	0,17 (4)
≤0,075 mm	58,8 (21)	72,2 (17)	81,9 (17)	68,1 (9)	72,4 (9)	77,3 (9)	58,8 (20)	72,3 (20)	81,9 (20)	71,6 (24)	71,6 (24)	82,7 (24)	82,0 (10)	82,2 (10)	89,0 (10)	58,2 (9)	72,4 (9)	81,9 (9)
≤0,05 mm	50,7 (17)	68,6 (17)	77,3 (17)	62,7 (8)	68,3 (8)	72,7 (8)	50,7 (20)	67,9 (20)	77,3 (20)	67,1 (20)	67,1 (20)	82,1 (20)	67,1 (10)	80,8 (10)	88,2 (10)	75,8 (9)	82,4 (9)	88,0 (9)
Hehkutusväliä	3,3 (21)	4,4 (21)	12,6 (21)	7,4 (9)	10,4 (9)	12,6 (9)	4,0 (20)	6,9 (20)	10,3 (20)	1,0 (24)	3,3 (24)	7,1 (24)	2,8 (11)	4,1 (11)	5,1 (11)	1,0 (9)	3,4 (9)	7,1 (9)
Vesiliukoksen pH	12,0 (5)	12,2 (5)	12,6 (5)	12,0 (1)	12,0 (1)	12,6 (1)	12,4 (16)	12,5 (16)	12,6 (16)	12,5 (1)	12,5 (1)	12,6 (1)	12,4 (12)	12,5 (12)	12,6 (12)		12,6 (4)	12,6 (4)
Liukotettavien suolien	2,1 (4)	2,4 (4)	2,8 (4)	2,1 (1)	2,2 (1)	2,2 (1)	1,6 (16)	2,3 (16)	3,4 (16)	2,8 (1)	2,8 (1)	3,4 (1)	1,6 (12)	2,3 (12)	3,4 (12)		2,4 (4)	3,4 (4)
Pur.luj. 14 vrk	1,0 (18)	1,2 (18)	7,1 (18)	2,3 (8)	3,5 (8)	5,4 (8)	1,0 (20)	2,2 (20)	3,1 (20)	1,1 (24)	1,1 (24)	3,1 (24)	1,1 (10)	2,1 (10)	3,1 (10)	1,5 (9)	2,1 (9)	3,1 (9)
Pur.luj. 28 vrk	1,5 (19)	3,7 (19)	8,2 (19)	2,4 (8)	3,7 (8)	5,2 (8)	1,5 (20)	2,3 (20)	3,4 (20)	1,1 (24)	1,1 (24)	3,4 (24)	1,1 (10)	2,3 (10)	3,4 (10)	1,3 (9)	3,1 (9)	4,7 (9)

3.12

Potsolaanisuu

Lentotuhka on luonteeltaan potsolaaninen. Se lujittuu, kun siihen lisätään vettä ja tuhka tiivistetään. Joskus tuhkan aktiivisuuden herättämiseen tarvitaan pieni määrä lisäsideainetta, esim. sementtiä tai kalkkia. Suuriin lujuuksiin pyrittäessä on lisäsideaineen käyttö lähes aina tarpeen. Potsolaanisuuuteen vaikuttavat ennen muuta Al₂O₃:n, Fe₂O₃:n ja SiO₂:n sekä reaktiivisen vapaan CaO:n olemassaolo, mutta myös pieninä pitoisuuksina ollessaan saattaa sitoutumaton SO₃ vaikuttaa kipsin muodostumisen seurauksena lujittavasti.

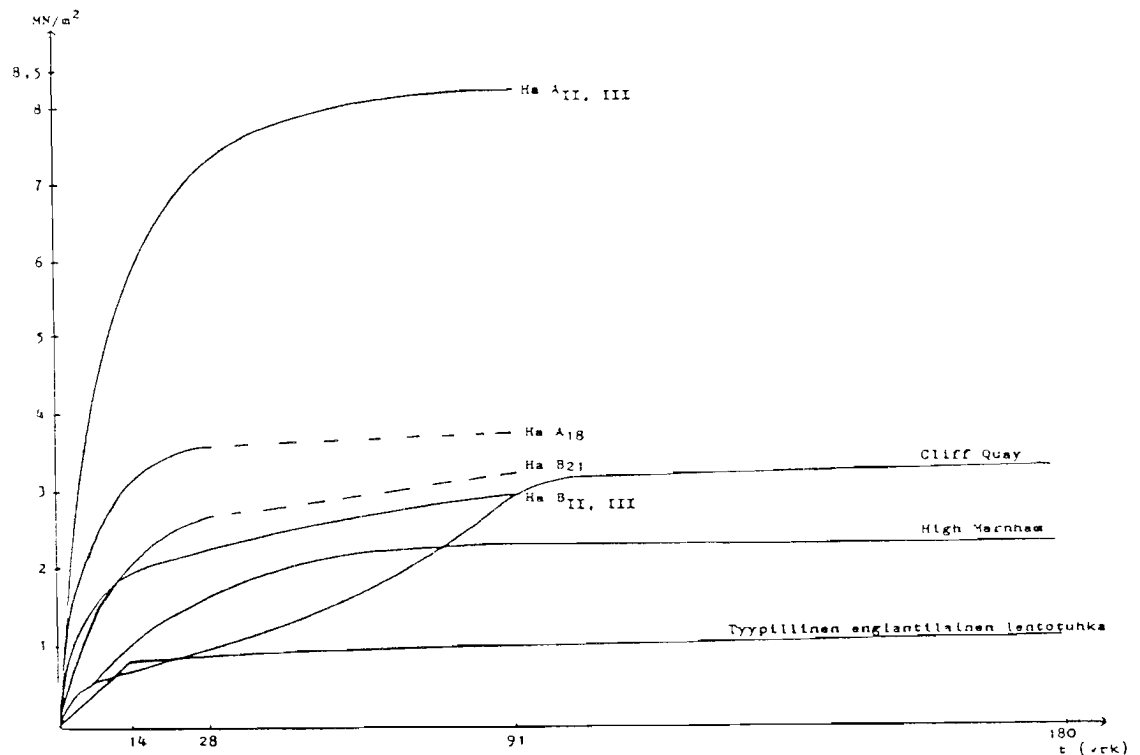
Kun lentotuhkaan sekoitetaan vettä, vapaa kalkki (CaO) reagoi tämän kanssa muodostaen kalsiumhydroksidia (Ca(OH)₂). Kalsiumhydroksidi reagoi pitkän ajan kuluessa SiO₂:n, Fe₂O₃:n ja Al₂O₃:n kanssa muodostaen lujittavia sidoksia.

Lujittumiseen vaikuttaa myös lentotuhkan hienomman aineksen määrä. Mitä hienompaa tuhka on sitä enemmän siinä on reagoivaa pinta-alaa. Hienomman aineksen määrä voidaan määrittää joko seulomalla tai ominaispinta-alan määrittämisellä.

Jäännöshiilipitoisuuden sanotaan yleisesti vaikuttavan lentotuhkan lujittumiseen. Projektin yhteydessä 40 eri tuhkanäytteellä tehdyssä noin 200 puristuskokeessa ei tällaista kuitenkaan voitu havaita. Hanasaaren A laitoksen 1. kattilan

tuhkanäytteet sisälsivät keskimäärin eniten hiiltä, mutta niillä saavutettiin keskimäärin paras puristuslujuus (taulukko 2).

Hanasaaren lentotuhkat ovat moniin muiden maiden tuhkiin verrattuna erittäin potsolaanisia. Esimerkkinä on kuvassa 4 esitetty lujittumiskäyrät Hanasaaren tuhkiille ja eräille Ison-Britannian tuhkiille. On huomattava kuitenkin, ettei koemenetelmä ole sama. Puristuslujuutta käsitellään tarkemmin kohdassa 3.26.



Kuva 4. Indeksit II ja III ilmoittavat kyseessä olevan tuhkaerän. Katkoviivalla osoitetaan arvioitu käyrän kulku.

3.13

Korroosiovaikutukset

Tuhkien korroosiovaikutuksia ei tunneta vielä aivan tarkkaan. Tämänhetkisten ulkomaisten tietojen mukaan ainakaan lentotuhka ei syövytä betonia eikä teräksiä. Lentotuhkaa käytetään esimerkiksi sementin ainesosana betonin sulfaatinkestävyyden parantamiseksi. Tällöin lentotuhkan SO_3 -pitoisuudelle on asetettu eri maiden normeissa yläraja, joka vaihtelee yleensä välillä 2,5-5,0 %. Helsingin Hanasaaren lentotuhkien SO_3 -pitoisuus vaihtelee välillä 0,5-1,5 %.

Lentotuhkan pH-luku on > 10 ja on tunnettua, että kun pH-luku on yli 9,5 %, teräksen pinnalle muodostuu passiivinen korroosiosähköparin muodostumista estävä suojakalvo. Kokeilla ei ole myöskään

voitu osoittaa, että tiivistetty lentotuhka olisi aiheuttanut korroosiota. Isossa-Britanniassa suoritettujen lentotuhkien korroosiovaikutusta selvittävän tutkimuksen mukaan lentotuhka ei aiheuta syöpymistä valurauta-, sinkki-, kupari-, PVC- ja keramiikkaputkiin.

Tuhkaprojektin korroosioryhmä selvittää voimalaitostuhkien korroosiovaikutuksia, ja tutkimustulokset julkaistaan vuoden 1982 alussa.

Mikäli tuhkillä todetaan olevan syövyttäviä vaikutuksia tiettyihin materiaaleihin, nämä voidaan korroosiosuojata. Tämänhetkisten tietojen mukaan ja silmämääräisten havaintojen perusteella lentotuhka ei syövytä betonia lainkaan eikä metallejakaan ainakaan enempää kuin luonnon maa-ainekset, esim. moreeni.

3.14

Vaikutukset pohjaveteen

Lentotuhka sisältää muutamia prosentteja veteen liukenevia yhdisteitä, pääosin kalsium- ja sulfaattioneja. Tuhkan vesiliuos on alkalinen. Hanasaaren lentotuhkan pH-arvo on n. 12 ja pohjatuhkan n. 10. Osa liukenevista suoloista reagoi lentotuhkan sitoutumisprosessin yhteydessä, eikä siten pääse ympäristöön.

Useimmiten tuhkarakenteet joudutaan sijoittamaan erilleen pohjavedestä jo teknisten vaatimustenkin vuoksi, jolloin mahdolliset vaikutukset pohjaveteen vähenevät.

3.15

Vaikutukset kasveihin

Yleensä tuhkarakenteet sijoitetaan siten, että kasvit eivät joudu tuhkan sisään, vaan välissä on multakerros, jolloin taataan kasvillisuuden moitteeton kasvu. Kasvilajit oikein valitsemalla voidaan kuitenkin myös tuhkassa saada kasvu aikaan.

Alkuainekoostumukseltaan tuhkat sisältävät mm. kasvien tarvitsemia ravinteita (taulukko 3). Kuitenkin tuhkat sisältävät myös pieniä määriä haitallisia alkuaineita, kuten kadmiumia, kromia, elohopeaa, nikkeliä ja lyijyä, mutta niiden pitoisuudet ovat niin pieniä, että mitään vaaraa ei esiinny. Taulukossa 3 on esitetty myös tuhkan sisältämät tärkeimmät haitalliset aineet sekä vertailuna lannoitteena yleisesti käytettävälle viemärilietteelle määrättyt maksimipitoisuudet.

Kivihiilen mineraalikoostumus vastaa sen maan mineraalikoostumusta, jossa kivihiiliesiintymän kasvit muinoin kasvoivat. Kivihiilen palamisen tuloksena siinä oleva boori muuttuu alkuperäistä vesiliukoisemmaksi, minkä on havaittu olevan joillekin

kasveille haittaava tekijä. Booripitoisuus voi olla jopa 20-kertainen luonnon maahan verrattuna.

Toinen kasveille epäedullinen ominaisuus on liika alkalisuus. Lisäksi haittaavana tekijänä on yleensä typen ja fosfaatin puute. Sen sijaan kaliumia ja muita hivenaineita on yleensä riittävästi (taulukko 3).

Taulukko 3.

Ravinteet ja hivenaineet (%)	Kivihiilituhka keskimäärin ¹⁾	Hanasaaren lentotuhka ²⁾
Ca	4,4	5,1
Mg	2,5	2,2
K	1,3	0,39
P	0,15	0,11
Cu	0,01	0,01
B	0,011	0,022
Mn	0,11	0,112
Zn	0,03	0,025

- 1) Keskiarvoanalyysit 19 voimalaitoksen kivihiilituhkasta, Tuhkaprojektin loppuraportti, Kemira Oy
- 2) Maatalouskemian laitos, Tutkimustodistus n:o 4367-4368/68.

Haitalliset aineet (mg/kg)	Cd	Cr	Hg	Ni	Pb
Viemäriletteen sallittu max-pit.	30	1000	25	500	1200
Kivihiilituhka, IVO, puolalainen kivihiili ³⁾	2	46	0,3	56	80
Hanasaaren lentotuhka ⁴⁾	2	56	ei määr.	56	ei määr.

- 3) Tuhkaprojektin loppuraportti, Kemira Oy.
- 4) Maatalouden tutkimuskeskus, Maanviljelyskemian ja fysiikan laitos, Lausunto, 1975.

Booriongelma on ratkaistavissa kasvattamalla tuhkasella sellaisia kasveja, jotka sietävät runsasta booripitoisuutta. Näitä ovat mm. nuotiosammal, leveälehtimalta, apilat, rehumailanen ja raiheinä.

Typpi on sekoitettava maahan lannoitteena, mieluummin nitraatteina kuin ammoniumsuoloina, koska jälkimmäiset menettävät typen alkalisessa tuhassa. Typen saantia voidaan tehostaa apiloiden ja rehumailasen viljelyllä. Nämä voivat käyttää hyödyksi ilman typpeä juurissaan olevien typpibakteerien avulla.

Tavallisen maa-aineksen sekoittaminen tuhkan joukkoon antaa tuhkalle puuttuvia kolloidisia partikkeleita ja parantaa lannoitteen pysymistä tuhassa.

Vanha, säänkuluttama tuhka on kasveille parempi kuin tuore tuhka. Lentotuhka on parempi kosteuden pidättäjä kuin normaali maa, mistä on hyötystä kasvistolle.

Viljelykasveista kasvavat tuhkassa parhaiten juurikas- ja kaalisukuun kuuluvat, etenkin sokeri-juurikas, rehujuurikas ja lehtijuurikas. Myös ruis kasvaa hyvin lentotuhkassa. Kaura, ohra, herne, papu ja peruna eivät siedä lentotuhkaa.

Taulukossa 4 on luettelo niistä puu- ja pensaslajeista, jotka sietävät hyvin tai kohtalaisesti lentotuhkaa.

Taulukko 4. Puut ja pensaat, joita voidaan kasvat-
taa lentotuhkapaikoilla.

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

Pohjatuhkien vaikutukset kasveihin lienevät koostumuksensa perusteella samansuuntaiset kuin lentotuhkalla. Kuitenkin niiden karkearakeisuudesta johtuen vedenpidätyskyky on heikko ja joukkoon vaaditaan hienoaainesta, mikäli niitä aiotaan kasvu-
alustaksi. Pohjakuonan tiedetään aiheuttaneen Helsingissä erään ruoholajin muuttumisen punertavaksi, mikä osoittaa sen olevan sopimaton kyseiselle kasville.

Helsingin tuhkien vaikutukset kaupungissa kasveille kasvilajeille tulisi selvittää erillisellä tutkimuksella ja tämän vuoksi on tärkeää, että tuhkaprojektin kasvualustaryhmä käynnistyy.

3.16

Muut vaikutukset Lentotuhka saattaa kuivana ollessaan pölyämisen seurauksena aiheuttaa hengityselimistölle va-
hinkoa, niin kuin mikä tahansa hieno mineraalimateriaali. Tämän vuoksi on tärkeää, että lentotuhkaa ei ilman hengityssuojaimia käsitellä kuivana. Siitä voi olla haittaa myös koneille ja ympäristölle. Jo 10 %:n vesipitoisuus poistaa haittavaikutukset.

Pohjatuuhka ja -kuona eivät aiheuta karkeana ja runsaasti vettä sisältävinä materiaaleina samantyyppisiä haittavaikutuksia kuin kuiva lentotuhka.

3.2

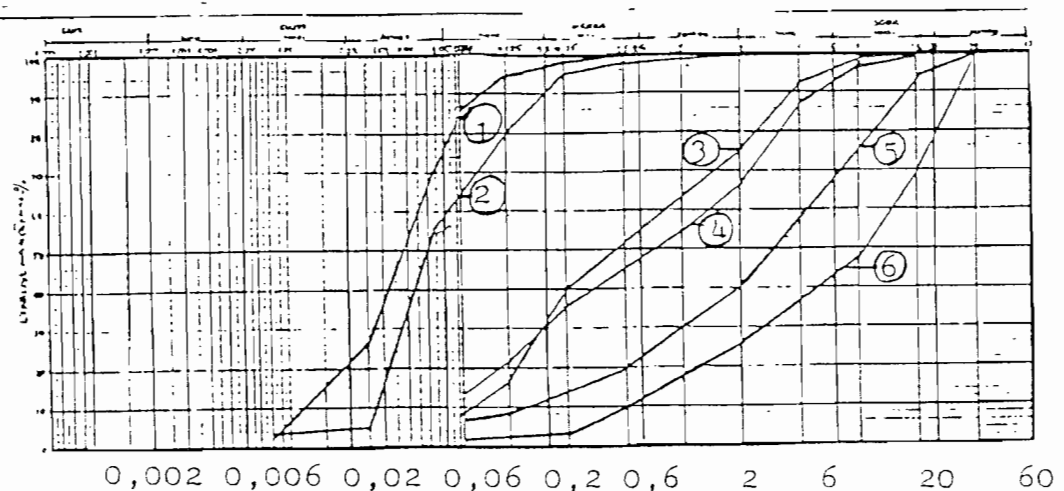
Geotekniset ominaisuudet

3.21

Raekoko, raemuoto ja kiintotiheys

Lentotuhka vastaa raekooltaan silttiä, pohjatuuhka vastaa keskikarkeaa tai karkeaa soraa. Helsingin pohjakuona vastaa hienoa tai keskikarkeaa soraa. Sulapesätyyppisten laitosten pohjakuona on yleensä jonkin verran hienompaa ja sen rakeisuus on lähellä pohjatuuhkan rakeisuutta.

Kuvassa 5 on esitetty Helsingin tuhkien rakeisuus-
käyrät lukuunottamatta Myllypuron lentotuhkaa.



Kuva 5. Helsingin tuhkien erään otoksen rakeisuus-
käyrät (yhdestä tuhkaerästä tehdyn kolmen
määrityksen keskiarvokäyrät).

1	Hanasaari B	lentotuhka
2	Hanasaari A	lentotuhka
3	Hanasaari A	pohjatuuhka
4	Hanasaari B	pohjatuuhka
5	Salmisaari	pohjakuona
6	Myllypuro	pohjakuona

Lentotuhkarakeet ovat pääasiassa lasimaisia, onttoja palloja. Pieni osa palloista jää tuhkaa veteen kaadettaessa kellumaan veden pinnalle. Lentotuhkassa on myös kiinteitä lasipalloja ja särmikkäitä mineraalirakeita sekä palamatonta hiiltä.

Pohjatuhkarakeet ovat särmikkäitä ja niillä on huokoinen pinta, joka on havaittavissa jopa pienimmissä rakeissa. Lasimaisia, lentotuhkapallojen kaltaisia rakeita esiintyy jonkin verran myös pohjatuhkassa, varsinkin sen hienoaineksessa. Joukossa on myös suurehkoja kuonautuneita rakeita.

Pohjakuonaraket ovat pinnaltaan lasittuneita ja särmikkäitä. Varsinkin suurimmat rakeet ovat huokoisia "popcorn"-maisia ja pinnaltaan sulaneita. Myös pohjatuhkan ja -kuonan joukossa on palamatonta hiiltä.

Helsingin tuhkien kiintotiheys vaihtelee välillä 1800-2300 kg/m³. Lentotuhkien kiintotiheys vaihtelee välillä 2100-2300 kg/m³. Pohjatuhkien kiintotiheys vaihtelee välillä 1850-2000 kg/m³. Pohjakuonien vastaava vaihteluväli on 1800-2050 kg/m³. (taulukko 5).

Taulukko 5.

Tuhkalaji	Kiintotiheys (kg/m ³)	W _{opt} (%)	$\gamma_d \max$ (kg/m ³)	Kapill. nousuk. (mm)	Vedenläp. kerroin (m/s)
Hana A1 lt	2150	22,4	1250	2100	$2,2 \times 10^{-7}$
A2 lt	2300	16,0	1500		
A3 lt	2100	25,2	1300		
Hana B1 lt	2150	16,2	1500	3550	$1,4 \times 10^{-7}$
B2 lt	2250	17,5	1550		
B3 lt		15,2	1550		
Hana A pt	1850	20,1	1300	700	$3,0 \times 10^{-6}$
B pt	2000	24,4	1250	650	$1,1 \times 10^{-6}$
Myllyp. pk	1800	25,1	1200	600	$2,3 \times 10^{-6}$
Salmis. pk	2050	21,6	1400	650	$6,4 \times 10^{-6}$

3.22

Irtotiheys, vesipitoisuus ja tiiviys

Lentotuhkien maksimikuivairtoteiheys vaihtelee välillä $\gamma_{dmax} = 1250-1550 \text{ kg/m}^3$. Optimivesipitoisuus vaihtelee välillä $w_{opt} = 15-25 \%$ kuivapainosta. Lentotuhkilla, joilla on suuri γ_{dmax} on pieni w_{opt} ja päinvastoin (taulukko 5). Kuivairtoteiheys rakenteessa on käytännössä noin 90 % maksimiarvosta, jolloin märkäirtoteiheys optimivesipitoisuudessa on noin $1450-1600 \text{ kg/m}^3$. Lentotuhkarakenne imee kuitenkin ajan kuluessa itseensä vettä, ja sen vesipitoisuus voi olla lähes 30 %. Tällöin märkäirtoteiheys on välillä $1450-1750 \text{ kg/m}^3$. Lentotuhkan irtoteiheys on lavalla kuljetettaessa keskimäärin n. 900 kg/m^3 . Levitetty, tiivistämätön kerros puristuu tiivistyksen yhteydessä kokoon noin 45 % alkuperäisestä paksuudestaan eli 30 cm:n löyhä kerros on tiivistyksen jälkeen noin 17 cm:n paksuinen.

Pohjatuhkien ja -kuonien γ_{dmax} ja w_{opt} ilmenevät taulukosta 5. Tiivistysominaisuuksiltaan ne vastaavat suunnilleen samanlaisen rakeisuuskäyrän omaavia luonnonkiviaineksiä. On huomattava kuitenkin, että w_{opt} on selvästi suurempi kuin hiekalla ja soralla. Erona on lisäksi se, että pohjakuona- ja tuhkarakenteet rikkoutuvat jonkin verran kovan dynaamisen rasituksen, esim. tiivistyksen seurauksena.

Tuhkat ovat selvästi kevyempiä kuin teknisesti samantasoiset luonnon kiviainekset. Metrin paksuinen tiivistetty tuhkapenger painaa $1450-1750 \text{ kg/m}^2$, kun vastaavan korkuinen sorapenger painaa $2100-2300 \text{ kg/m}^2$. Tällä on huomattava merkitys korkeita penkereitä pehmeiköille rakennettaessa.

3.23

Vedenläpäisevyys, kapillaarisuus ja routivuus

Tiivistetty lentotuhka on huonosti vettäläpäisevää, $k \approx 10^{-7} \text{ m/s}$ (taulukko 5). Tästä on etua vettäpidättäviä rakenteita tehtäessä. Lisäksi vedenläpäisevyyskerroin pienenee iän mukana.

Pohjatuhkan ja -kuonan vedenläpäisevyyskertoimet ovat noin kymmenkertaiset lentotuhkaan verrattuna ($k \approx 10^{-6} \text{ m/s}$). Nekin tosin läpäisevät huomommin vettä kuin sora ja hiekka.

Tuhkien kapillaarisuudet poikkeavat suuresti toisistaan. Lentotuhkan kapillaarinen nousukorkeus $h_c > 2 \text{ m}$. Pohjatuhkien ja -kuonien $h_c < 1 \text{ m}$.

Luonnon kiviainesten eräänä routivuuskriteerinä pidetään kapillaarista nousukorkeutta. Routimattomilla materiaaleilla se on alle 1 m. Tämän mukaan lentotuhka olisi routivaa, samoin muiden

rakeisuuteen perustuvien kriteereiden mukaan lentotuhka olisi routivaa. Kuitenkaan käytännön kokeissa hyvin tiivistetyllä tuhalla ei ole havaittu routimismousuja. Havaintoja on tehty mm. vaaitsemalla Salmisaaren koekenttään asennettuja routanousulevyjä talven 1979-1980 ajan. Lisäksi samasta kentästä poratuissa sydännäytteissä ei ole havaittu routalinssejä. Tämä johtuu ilmeisesti lentotuhkan lujiuudesta sekä pienestä vedenläpäisykyvystä. Vedenläpäisykyky on lujittuneella tuhalla pienempi kuin taulukon 5 tuoreilla tuhkillä saadut arvot osoittavat.

Pohjatuhka ja -kuona eivät ole routivia.

3.24

Lämmöneristyskyky

Tuhkien lämmöneristysominaisuuksien tutkiminen on vielä kesken. Salmisaaren koekenttään asennettiin marraskuussa 1979 lämpötilanmittausantureita 6 tasoon 4 eri pisteeseen yhteensä 24 kpl. Suhteellisen kovan pakkastalven 1979-1980 aikana rakenne jäätyni pinnasta lukien 0,5 m:n syvyyteen. Rakenne ja lämpötilat näkyvät liitteessä 1.

Pohjakuona on jo vanhastaan tunnettu lämpöä eristävä materiaali huokoisen rakenteensa vuoksi. Myös lento- ja pohjatuhka eristävät paremmin lämpöä kuin sora ja hiekka.

Talven 1980-1981 aikana tehdään lämmöneristyskokeita lisää ja riittävän mittaustulosaaineiston perusteella määritetään tuhkien lämmöneristysominaisuudet.

3.25

Kokoonpuristuvuus

Tiivistetyn lentotuhkarakenteen kokoonpuristuvuusominaisuuksia ei tuhkaprojektin yhteydessä ole vielä kokeellisesti selvitetty. Muualla, mm. Imatran Voima Oy:ssä tehtyjen kokeiden mukaan tuoreen lentotuhkan kokoonpuristumistapahtuma on melko nopea, kuten kitkamailla. Optimivesipitoisuudessa tiivistetyn näytteen kokoonpuristuma oli kuormituksella 0,8 MN/m² noin 3 %.

Lujittuminen vaikuttaa pienentävästi lentotuhkan kokoonpuristumiseen. Kokoonpuristuvuusmoduli kasvaa lujittumisen seurauksena. Lentotuhkaa käytetäänkin mm. Isossa-Britanniassa ja Yhdysvalloissa rakenteissa, joissa vaaditaan mahdollisimman pieniä painumia, esim. öljysäiliöiden pohjissa ja siltojen maatuissa.

Pohjatuhkan ja -kuonan kokoonpuristuvuus on ilmeisesti niiden huokoisesta rakenteesta johtuen jonkin verran suurempi kuin soran ja hiekan.

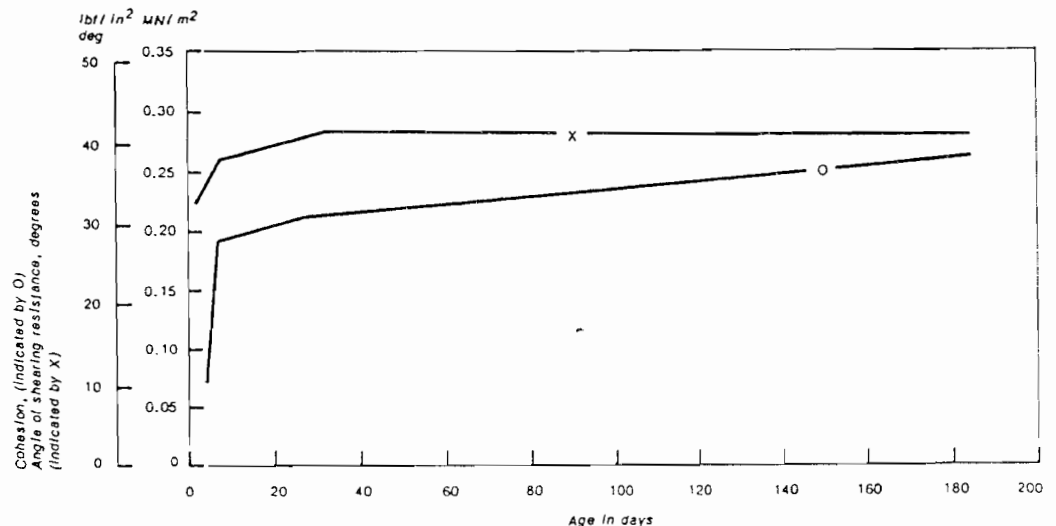
3.26

Lujuus, säänkestävyys ja kantavuus

Tuhkaprojektin laboratoriotutkimuksissa on ollut keskeisellä sijalla Hanasaaren lentotuhkien lujittumisominaisuuksien määrittäminen käyttäen yksiaksiaalista puristuskoetta lieriömäisille koekappaleille. Geotekniikassa yleisesti käytettävien parametrien, kitkakulman (ϕ) ja koheesion (c), määrittäminen kuuluu projektin tulevaan tehtäväkenttään.

Muulla tehtyjen kokeiden perusteella lentotuhkan leikkauslujuus koostuu sekä koheesiosta että kitkasta. Molemmat kasvavat iän mukana. Englantilaisen mukaan ϕ on alussa noin 32° ja c noin 50 kN/m^2 . Laboratorio-olosuhteissa lujittuneen tuhkan ϕ on jo seitsemän vuorokauden jälkeen noin 38° ja c noin 190 kN/m^2 , kuten kuvassa 6 on esitetty. Tämän jälkeen parametrit suurenevät hyvin hitaasti. Kitkakulma ϕ on kuukauden ikäisenä noin 41° , minkä jälkeen se pysyy vakiona. Koheesio c on kuukauden ikäisenä noin 210 kN/m^2 ja kohoaa vähitellen ajan mukana ollen puolen vuoden ikäisenä noin 250 kN/m^2 .

Pohjatuhkan ja -kuonan leikkauslujuus koostuu pelkästään kitkasta. Kitkakulma ϕ vaihtelee välillä $38-43^\circ$. Arvoon vaikuttaa tietenkin myös tiiviys.



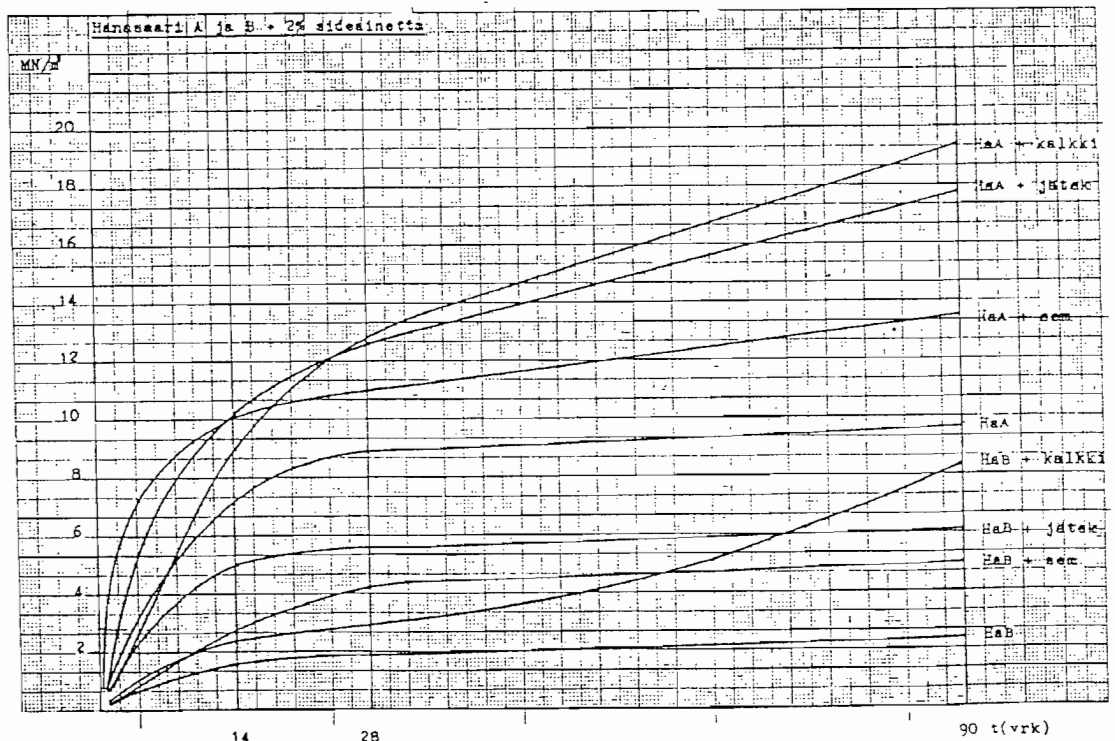
Kuva 6. Tyypillisen englantilaisen lentotuhkan lujuusparametrien suureneminen iän mukana laboratorio-olosuhteissa määritettynä.

Helsingin tuhkillä suunta on varmasti sama, ja parametrit vähintään samaa luokkaa päätellen kuvan 4 käyristä. Kuitenkin on varottava luulemasta, että kehitys on yhtä nopeaa kenttäolosuhteissa. Lujittumiseen vaikuttavat ratkaisevasti mm.:

- rakenteen tiiviys,
- rakenteen vesipitoisuus,
- lämpötila.

Laboratoriokokein on todettu, että tiiviysasteen nostaminen 90 %:sta 95 %:iin nostaa 14 vrk:n lujuuden lähes kaksinkertaiseksi. Paras vesipitoisuus lujittumisen kannalta on optimivesipitoisuus tai 1-2 % sen alle. Lujittumisreaktioita ei tapahdu ainakaan alle $\pm 0^{\circ}\text{C}$:n lämpötilassa. Yleisimmin pidetään rajalämpötilana $+4^{\circ}\text{C}$. Mitä enemmän lämpötila on yli tämän rajan sitä nopeampaa lujittuminen on. Lentotuhka jatkaa lujittumistaan reaktiot pysähdyttäneen pakkassään lämmettyä. Hyvälaatuinen lentotuhka jatkaa lujittumistaan tietyn lujuuden saavutettuaan myös vedessä, kun alkulujittuminen on saanut ensin tapahtua ihan neolosuhteissa. Käytännössä kuitenkin riittävän lujuuden saavuttaminen lyhyessä ajassa on epävarmempaa.

Tuhkaprojekti on tehnyt puristuskokeita yli 1000 koekappaleella. Kokeita on tehty useilla lentotuhkanäytteillä käyttämällä sekä pelkkää tuhkaa että lisäsideaineita: sementtiä, sammutettua kalkkia ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ja Kemira Oy:n Uudenkaupungin fosfaattitehtaan jättekipsiä. Kuvassa 4 ja taulukossa 2 on esitetty tietoja Hanasaaren lentotuhkien lujittumisesta. Kuvassa 7 on esitetty lisäksi 40 tuhkanäytteen joukosta erään heikoimmin lujittuneen tuhkanäytteen (B) ja parhaimmin lujittuneen näytteen (A) käyrät ilman sideainetta ja yhden sideaineen kanssa (pitoisuus 2 %). Kaikki lujittumiskäyrät on esitetty liitteessä 2.



Kuva 7.

Tuhkan ominaisuuksien vaikutuksista lujittumiseen on kerrottu jo kohdassa 3.12.

Lujittuminen vaikuttaa lentotuhkarakenteen kantavuuteen lisäävästi suurentaen sen kokoonpuristuvuusmodulia.

Tuhkaprojekti on tehnyt muutamissa kohteissa kantavuusmittauksia levykuormituskokeella ja pudotuspainolaitteella. Tarkoitus on jatkaa kantavuuskokeiden tekemistä jatkossa, kun tuhkarakentamistekniikkakin on entistä paremmin hallinnassa.

VTT:n tie- ja liikennelaboratorio on tehnyt tuhka-projektin tilauksesta tutkimuksen, jossa on selvitetty Hanasaaren lentotuhkien lujittumista sekä säänkestävyyttä märkä-kuiva- ja jäätymis-sulamiskokein. Lisäksi selvitettiin eräiden lisäaineiden vaikutusta ko. ominaisuuksiin. Tutkimustulokset on esitetty liitteessä 3.

3.3

Työskentelyominaisuudet

3.31

Saatavuuden vaikutus työskentelyyn

Tuhkien joustava saanti rakennuspaikalle on onnistuneen työn perusedellytys. Tällä hetkellä, kun tuhkien käyttö on vielä kokeiluvaiheessa, on tuhkien saannissa esiintynyt joskus vaikeuksia, koska työmaat ovat kaukana toisistaan, kysyntä on vilkasta eikä varastointia ole järjestetty.

Nykyisellään kireätä aikataulua noudattavat rakennustyömaat eivät voi vielä tehokkaasti hyödyntää tuhkia. Kokeiluvaiheessa tuhka-kohteet ovatkin olleet pääosin sellaisia, joissa on pystytty noudattamaan välttämättä aikataulua.

Varastointi, suunnitelmallinen työkohteiden ennakointi ja tehokas jakelujärjestelmä takaavat Helsingissä tuhkien järkipäraseen ja kustannuksia säästävän hyötykäytön.

3.32

Käsiteltävyys

Tuhkien käsittelytekniikan tunteminen on välttämätöntä niiden parhaiden ominaisuuksien hyväksikäytölle.

Pölyäminen

Lentotuhkien pölyäminen voidaan estää kastelulla. Tuhka on mahdollista kastella jo voimallaitokselta autoon kuormattaessa. Kuitenkin kastelu optimivesipitoisuuteen aiheuttaa tuhkan tarttumisen helposti kuorma-auton lavaan kiinni. Sen vuoksi tuhka kostutetaan vain n. 10 %:n kosteuteen estämään kuljetuksen aikainen pölyäminen. Yleensä tämä riittää pölyhaitan eliminoimiseksi myös työmaalla.

Pölyhaittojen estämiseksi on työntekijöillä oltava tarvittaessa hengityssuojaimet.

Pohjatuhka ja -kuona eivät pölyä niistä rakennettaessa.

Liettyminen

Kun lentotuhka kastuu liikaa joko sateesta, pohjavedestä tai harkitsemattomasta kastelusta johtuen, se liettyy täysin kantamattomaksi velliksi. Pahimmassa tapauksessa, silloin kun vettä ei pystytä poistamaan, tuhka voidaan joutua ottamaan pois ja tekemään uusi rakenne liettymisvaara huomioonottaen. Yleensä liettynyt lentotuhkakerros on kuitenkin muutaman päivän kuivumisen jälkeen saavuttanut kantavuutensa.

Pohjatuhkalla ja -kuonalla ei esiinny liettymistä.

Levitettävyyys

Lentotuhkan levittäminen onnistuu optimikosteudessa erittäin hyvin. Kalustona voidaan käyttää normaaleja koneita. Lentotuhkakerrosta levitettäessä on kuitenkin kiinnitettävä huomiota kerroksen suureen ohenemiseen tiivistettäessä (kohta 3.22).

Pohjatuhka ja -kuona voidaan levittää kuten sora ja hiekka.

Tiivistettävyyys

Lentotuhkan tiivistettävyyteen vaikuttavat:

- vesipitoisuus,
- kerrospaksuus,
- sää.

Vesipitoisuus on tärkein tekijä. Liian kuiva tuhka pölyää, eikä tiivisty. Liian kostea tuhka liettyy ja sitä on mahdoton tiivistää.

Kerrospaksuuden on oltava riittävän ohut, korkeintaan 300 mm löyhänä, jolloin se tiivistyy noin 170 mm:n kerrokseksi. Yleensä kuitenkin jo levityskone esitiivistää tuhkan, jolloin tämä on otettava huomioon kerrospaksuutta tarkkailtaessa. Mikäli kerros on liian paksu, ei koko kerros tiivisty.

Tiivistyskalustoksi sopivat samat koneet kuin luonnon kiviaineksillekin.

Pitkäaikainen sadesää tai voimakas rankkasade voivat liettää lentotuhkan edellä mainituin seurauksin. Kova pakkanen taas aiheuttaa lentotuhkan osittaisen jäätymisen, jolloin tiivistettävyyys ei ole hyvä.

Kaikki tiivistettävyyteen epäedullisesti vaikuttavat tekijät voidaan poistaa lähes kokonaan, kun levitys- ja tiivistystyö suoritetaan välittömästi lentotuhkan paikalle tuonnin jälkeen.

Pohjatuhka ja -kuona voidaan tiivistää kuten sora ja hiekka.

Lujittumisen vaikutus

Lentotuhkasta rakennettaessa tuhkan lujittuminen ei häiritse työsken- telyä, mikäli työohjeita noudatetaan. Kuitenkin mahdollisen seisokin seurauksena välivarastokasassa useita viikkoja oleva tuhka voi paakkuuntua. Levityskoneen, lapioiden ja lopuksi tiivistyskoneen avulla asia saadaan kuitenkin korjatuksi, joskin tuhkan reaktiiviset ominaisuudet eivät ole aivan yhtä hyvät kuin tuoreella tuhalla.

Mikäli vanhaa lentotuhkarakennetta joudutaan kairamaan korjaus- tai muutostöiden vuoksi, esiintyy yleensä kaivuvaikeuksia. Riittävän järeää kaivuria käyttäen pystytään tuhkarakenne kuitenkin rikkomaan.

4. KÄYTTÖKOhteet

4.1

Yleistä

Voimalaitostuhkia voidaan käyttää hyvin monenlaisiin tarkoituksiin rakentamisessa. Tässä käsitellään maarakenteita ja niihin läheisesti liittyviä rakenteita sekä lopuksi vain luetellaan muita käyttömahdollisuuksia.

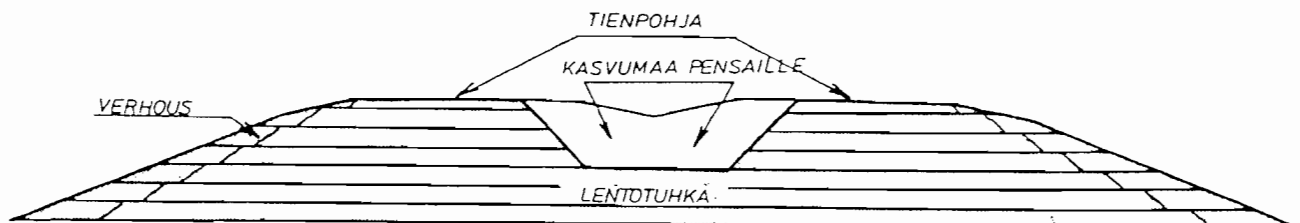
4.2

Penkereet

Voimalaitostuhkia on käytetty esim. Isossa-Britanniassa ja Yhdysvalloissa runsaasti pengerrakentamiseen. Tavanomaisiin materiaaleihin verrattuna niiden etuja ovat:

- ne ovat n. 25 % kevyempiä kuin sorat ja louhe,
- ne ovat taloudellisia,
- lentotuhka lujittuu ajan kuluessa.

Parhaiten korkeiden penkereiden rakentamiseen soveltuvat lentotuhka ja pohjakuona. Pohjakuona ei soveltune paksuina kerroksina erittäin suurta kantavuutta vaativiin penkereisiin sellaisenaan.



Kuva 8. Kaksiajoratainen lentotuhkapenger.

Maissa, joissa lentotuhkamäärät ovat suuria, voidaan rakentaa kilometrejä kuvan 8 kaltaisia penkereitä.

Helsingissä ei ole rakennettu tuhasta varsinaisia tiepenkereitä, mutta Salmisaaren koekenttä on esimerkki eräänlaisesta pengerrakentamisesta (liite 1).

4.3

Liikenneväylät ja pysäköintialueet

Tuhkat soveltuvat liikenneväylien ja pysäköinti-alueiden rakentamiseen joko sellaisenaan, muihin kiviaineksiin sekoitettuna tai lisäsideaineella stabiloituina.

Lentotuhka vähentää ja tasaa alapuolisten maakerrosten mahdollisia routanousuja. Soraa parempana lämmöneristeenä se pienentää myös roudan tunkeutumisvyöhykettä.

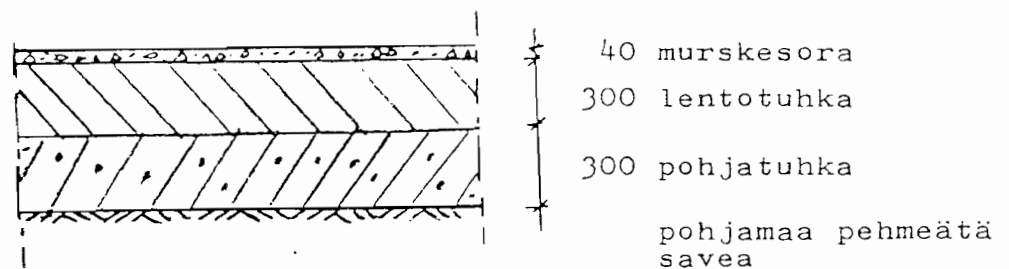
Jakavana kerroksena lentotuhkarakenne täyttää erinomaisesti tehtävänsä jakamalla kuormat alempana olevalle rakenteelle.

Kantavaan kerrokseen käytettäessä lentotuhkan lujuuttuminen on vaativimmissa rakenneluokissa varmistettava lisäsideainetta käyttäen.

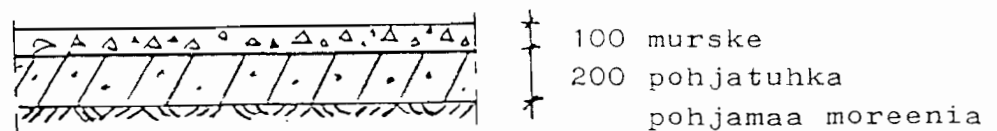
Lentotuhkarakenne ei sovi kulutuskerrokseksi, mutta sitä voidaan käyttää päällystemassojen täytejauheena.

Pohjatuhkaa ja -kuonaa voidaan käyttää eristyskerroksessa tai jakavassa kerroksessa. Lisäksi pohjakuonaa voidaan käyttää kantavassa kerroksessa sellaisenaan tai stabiloituna riippuen rakenneluokasta. Pohjatuhka ja -kuona ovat myös edullisia lämpöä eristävien ominaisuuksiensa vuoksi.

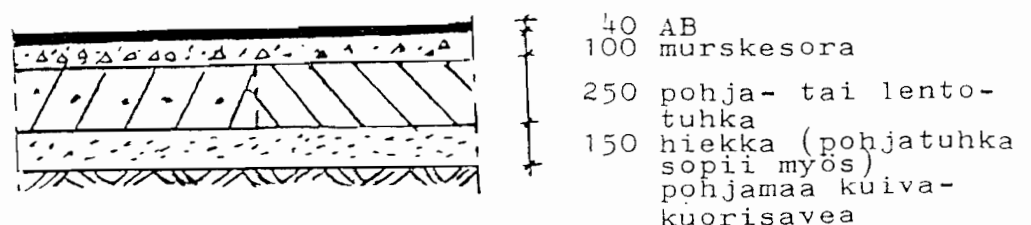
Tuhkaprojektin yhteydessä on rakennettu kokeiluvaiheessa kevyenliikenteen väyliä (kuvat 9-11).



Kuva 9. Kevyenliikenteentie (100 m), Itäkeskus.



Kuva 10. Kevyenliikenteentie (100 m), Pakila, rakennettu suoraan humuskerroksen päälle.

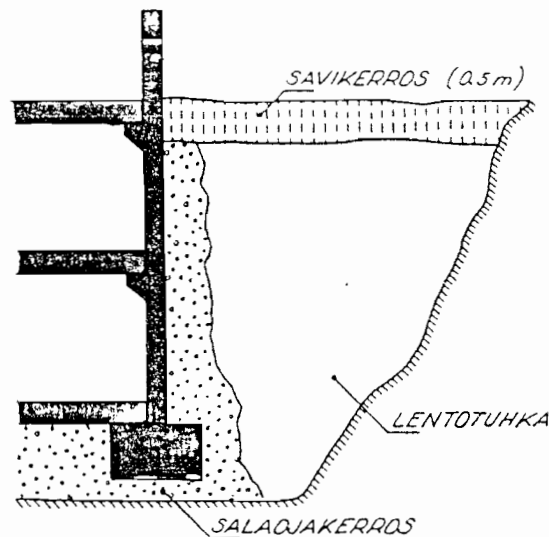


Kuva 11. Kevyenliikenteentie (300 m), Malminkartano.

4.4

Taustatäytöt

Tuhkia voidaan käyttää tukimuurin ja siltojen päätyjen taustatäyttyihin. Vaativimmissa koh-teissa, missä ei sallita suuria painumia, on syytä käyttää lentotuhkaa, joka lujittumisensa seurauksena on erittäin kantavaa ja vähän kokoon-puristuvaa sekä yleensä keveytensä vuoksi aiheut-taa pienempiä sivupaineita kuin esimerkiksi sora. Kuvassa 12 nähdään eräs sovellutus lentotuhkan käytöstä taustatäytössä.



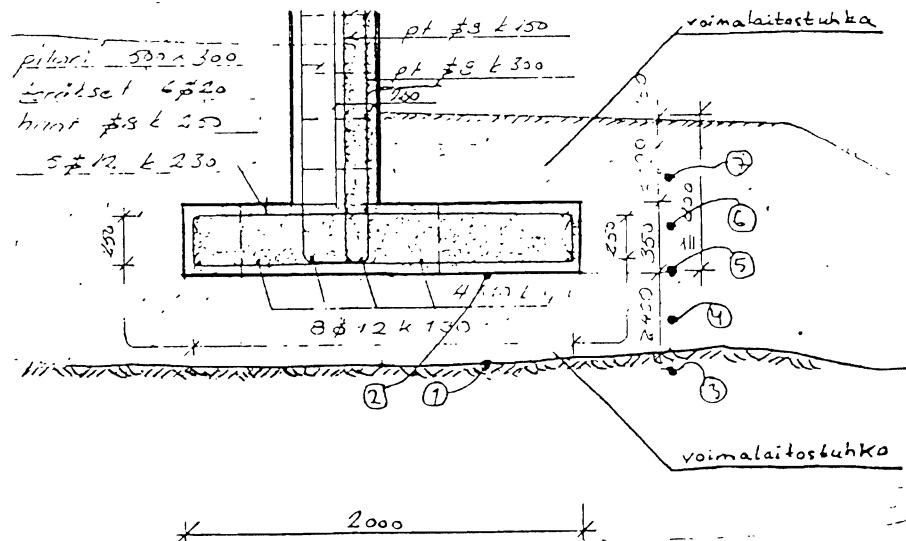
Kuva 12. Lentotuhka tukimuurin taustatäytössä.

4.5

Pientalojen perustaminen

Pientalo voidaan perustaa lentotuhkatäytön varaan, kun on huolehdittu siitä, että lentotuhkarakenne ei ole yhteydessä pohjaveteen ja siitä, että routivan pohjamaan ja perustusten välissä on lentotuhkaa vähintään 0,8 m.

Tuhkaprojekti valvoo parhaillaan kahdessa kohteessa olevien, lentotuhkalle perustettujen talojen rakenteiden käyttäytymistä talven 1980-1981 aikana Myllypurossa ja Tuomarinkartanossa. Kuvassa 13 esitetään Tuomarinkartanon työkeskuksen työkone- ja tarvikevaraston perustusrakenteiden poikkileikkaus. Lentotuhkaan on asennettu 14 lämpötilanmittausanturia, joita säännöllisesti mittaamalla saadaan tietää roudan tunkeutumissyvyys talven aikana. Lisäksi perustusten liikkeitä seurataan vaaitsemalla.

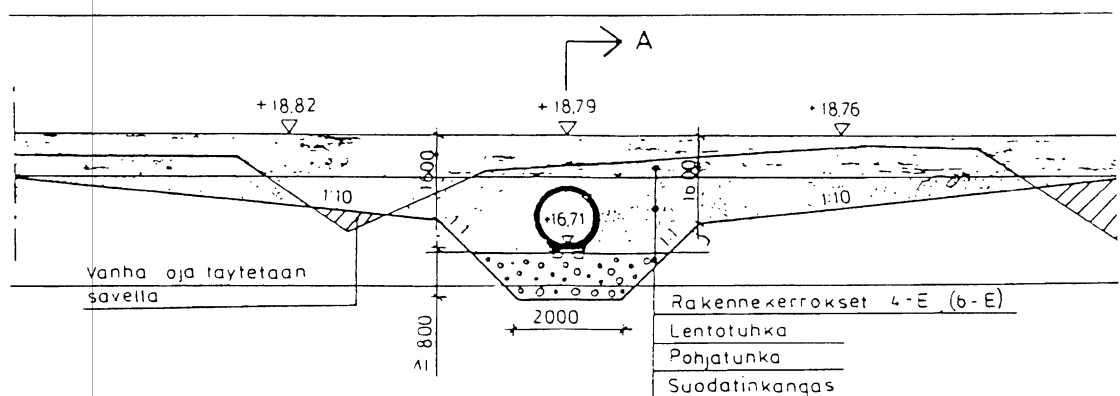


Kuva 13. Rakennuksen perustaminen lentotuhkatäytön varaan (1-7 ovat lämpötilanmittausantureita).

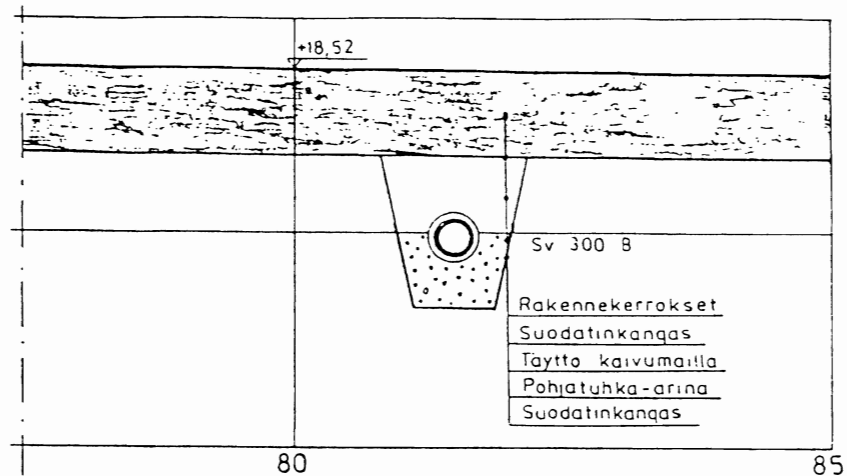
4.6

Rumpujen, viemäreiden ja putkijohtojen perustaminen

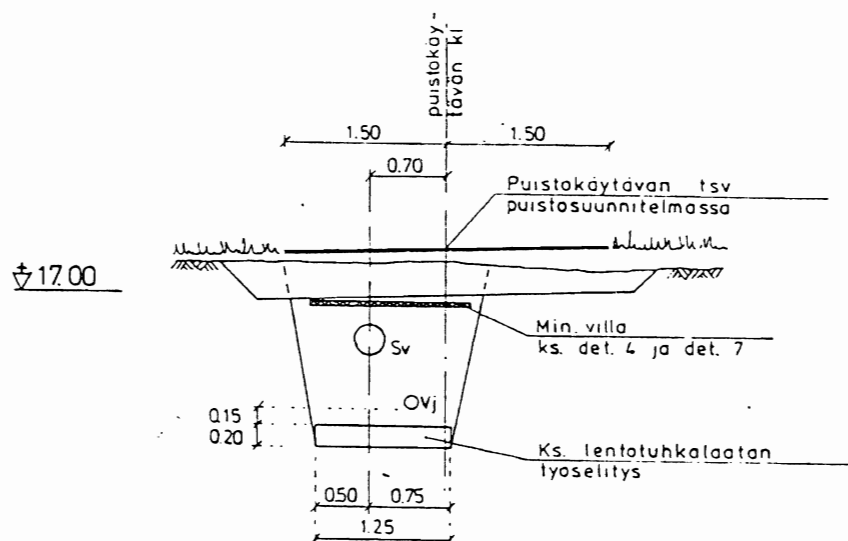
Torpparinmäessä sijaitsevilla PIKO-alueella on sadevesirumpuja, viemäreitä ja vesijohtoja perustettu voimalaitostuhkakerrosten varaan. Kuvissa 14-16 nähdään joitakin tyyppipiloikkileikkauksia näistä.



Kuva 14. Pohjatuhka-arinalle perustettu betoninen sadevesirumpu $\varnothing 1000$. Siirtymäkiilat ovat lentotuhkaa.



Kuva 15. Pohjatuhka-arinalle perustettu sadevesi-viemäri.



Kuva 16. Sadevesiviemärin ja vesijohdon perustaminen lentotuhkalaatalle.

4.7

Kanavatäytöt ja salaojat

Pohjatuhkia ja -kuonia voidaan käyttää kanavatäytöihin luonnonmateriaalien asemasta. Lentotuhkan käyttöä tässä tarkoituksessa pitäisi kuitenkin välttää, koska se lujittuu ja aiheuttaa vaikeuksia korjaustöiden yhteydessä.

Pohjatuhkaa ja -kuonaa on käytetty Yhdysvalloissa ainakin kolmessa rakennusprojektissa salaojituksen suodatimateriaalina. Kaikki kokemukset osoittavat, että ne ovat täysin hyväksyttäviä salaojitusmateriaaleja edellyttäen, että ne täyttävät suodatimelle asetetut rakeisuusvaatimukset. Ympäristövaikutukset on todettu pohjatuhkaa ja -kuonaa käytettäessä merkityksettäviksi.

4.8

Urheilukentät

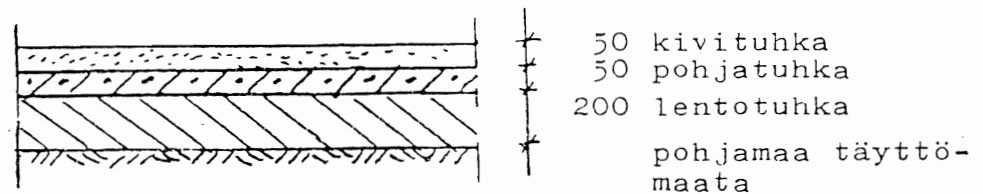
Helsingin kaupungin urheilu- ja ulkoiluvirasto on rakentanut pohjakuonasta jo aikaisempina vuosina mm. tenniskenttiä ja lisäksi käyttänyt sitä ratsastuskentissä yhdessä hiekan kanssa.

Kesällä 1980 rakennettiin Hämeenkylässä koemielessä ratsastuskenttä pelkästä pohjatuhkasta tiivistämättä rakennetta muuten kuin levityskoneella. Rakenne onnistui hyvin, ja kimmo-ominaisuudet ovat sopivat hevosen kavioille.

Kesällä 1980 aloitti urheilu- ja ulkoiluvirasto Myllypurossa kahden suuren pallokentän rakentamisen käyttäen pintakerroksia lukuunottamatta pelkkää pohjakuonaa. Rakenne on onnistunut erittäin hyvin.

Myös lentotuhkaa voidaan käyttää urheilukenttien rakentamiseen yhdistelmärakenteissa.

Kuvassa 17 esitetään Kyläsaareen rakennetun lentopallokentän rakennepoikkileikkaus.



Kuva 17. Lentopallokenttä, Kyläsaari.

4.9

Piha- ja varastoalueet

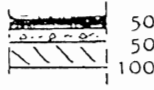
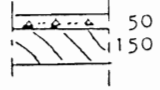
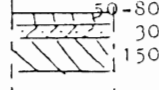
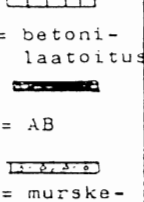
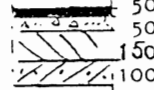
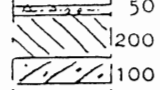
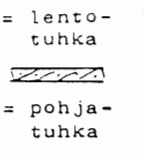
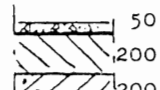
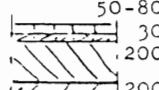
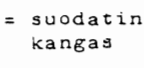
Voimalaitostuhkien yksi hyvä käyttökohde on piha- ja varastoalueiden rakennekerroksissa. Piha-alueiden kerrospaksuuksina voidaan käyttää kuvan 18 mukaisia paksuuksia. Rakenteet kestävät kevyttä ajoneuvoliikennettä ja vain vähän raskasta liikennettä. Suurten kuormitusten alaisilla varastoalueilla joudutaan kerrospaksuuksia suurentamaan.

4.10

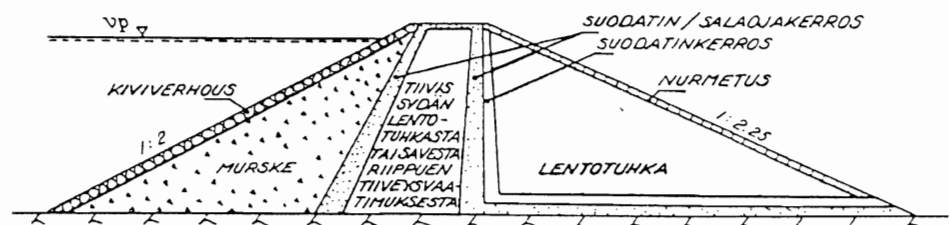
Vettäpidättävät rakenteet

Lentosuhkan pientä vedenläpäisevyyttä voidaan käyttää hyväksi vettäpidättävien rakenteiden tekemisessä.

Suomenlinnaan rakennettiin kesällä 1980 kaksi vettäpidättävää patoa viemärikaivantoon. Tarkoituksena on estää lähistöllä sijaitsevan lammen kuivuminen, mikä aiheutuisi viemärikaivannon toimimisesta salaojana.

PÄÄLLYSTE	AB	MURSKESORA	BETONILAAT.	SELITYS
POHJAMAA				
I kallio sora louhe karkea				
II hieno hiek- ka moreeni siltti kuivakuori				
III lieju savi				

Kuva 18. Piha-alueiden rakennepaksuudet käyttäen voimalaitostuhkaa.



Kuva 19. Maapato, jossa on rakennusmateriaalina lentotuhkaa.

4.11

Injektointi

Lentotuhkaa on käytetty mm. Isossa-Britanniassa monia vuosia injektointaessa perustuksia painumisen estämiseksi, aukkojen täyttämiseksi ja muissa talojen rakentamiseen liittyvissä kohteissa. Lisäksi sitä on käytetty lukuisissa tienrakentamiskohteissa. Yleinen sekoitussuhde on 1 osa sementtiä 10 osaan lentotuhkaa, veden ja kiintoaineksen suhde on 1:1.

Lentotuhkan etuja injektointimassan komponenttina ovat:

- keveys (kiintotiheys 2100-2300 kg/m³, sementillä 3150 kg/m³, vähentää erottumista)

- rakeiden pyöreä muoto (hyvät pumppausominaisuudet)
- taloudellisuus.

4.12

Muut käyttökohteet

Tuhkaprojektin ulkopuolelta voimalaitostuhkien muista käyttökohteista on seuraavassa lueteltu lentotuhkan eräitä käyttömahdollisuuksia osoitussena materiaalin monipuolisuudesta:

- betonin ja sementin ainesosana
- autoklaavituotteissa
- laastin ainesosana
- kevytsoratuotannossa
- tiilituotannossa
- tuhkan sisältämien mineraalien käyttö metalliteollisuudessa, mm. magnetiitin, piiraudan ja alumiinin valmistuksessa
- ympäristönsuojelussa mm. sekoittamalla yhdyskuntien jätevesilietteisiin, selluloosa- ja puunjalostusteollisuuden jätevesien puhdistuksessa ja rehevöityneiden vesien parantamiseen
- eristysmateriaaleissa ja muoveissa.

5.

SUUNNITTELUOHJEET

5.1

Tuhkarakenteiden sijoittaminen

Kaiken rakentamisen tavoin rakenteen sijoittamisella on tärkeä merkitys myös tuhkarakenteita tehtäessä. Etenkin syvyyssuunnassa on tasot harkittava tarkoin ottaen huomioon pohjasuhteet ja pohjavedenpinta. Edellytyksenä on riittävien pohjatutkimusten tekeminen. Ohjeet tähän löytyvät pohjarakennusohjeista (RIL 121).

5.11

Pohjasuhteiden huomioonottaminen

Tuhkarakentamisen päämäärät ovat siinä mielessä erilaiset kuin yleensä rakentamisen, että tuhkia käyttäen pyritään parantamaan rakentamisen onnistumista silloin kun on pakko rakentaa huonolle pohjamaalle, kun taas yleensä rakenne pyritään sijoittamaan, mikäli mahdollista, hyvälle pohjamaalle. Tuhkien hyviä ominaisuuksia hyödynnetään rakennusprojektissa.

Rakenteen sijoittamistasolla on tärkeä merkitys. Lentotuhkista on esim. vaikea rakentaa, jos kuivakuorisavi rikotaan. Rakennuspaikan maakerrosten tunteminen on suunnitteluvaiheessa tärkeää, jotta osataan valita oikea tuhkatyyppi oikeaan paikkaan, mahdollinen suodatinkankaan asentamistarve jne.

Märälle pohjamaalle ei voida levittää lentotuhkaa suoraan, vaan alle on rakennettava eristävä kerros karkeasta materiaalista, esim. pohjatuhkasta, pohjakuonasta, hiekasta tai sorasta.

5.12

Pohjaveden huomioonottaminen

Pohjavedenpinnan tasolla on tärkeä merkitys suunniteltaessa tuhkarakenteen korkeustasoja. Mikäli joudutaan menemään pohjavedenpinnan alapuolelle, on alaosassa käytettävä karkeata materiaalia noin 0,4 m pohjavedenpinnan yläpuolelle.

Kohdissa 3.14 ja 3.32 on myös käsitelty pohjaveteen liittyviä kysymyksiä.

5.2

Ympäristövaikutukset

Sekä työskentelyn että käytönaikaisten haittatekijöiden poistamiseksi suunnittelijan on tärkeää kiinnittää huomiota muiden seikkojen ohella myös ympäristökysymyksiin. Kohdissa 3.13, 3.14, 3.15, 3.16 ja 3.32 on käsitelty näitä asioita.

5.3

Rakenteelle asetettavat vaatimukset

Valittaessa tuhkatyyppejä rakennetta suunniteltaessa on pyrittävä ottamaan huomioon ne seikat, jotka vaikuttavat oleellisesti rakenteen onnistumiseen.

5.31

Lujuusvaatimukset

Mikäli rakenteelta vaaditaan suurta lujuutta, (leikkauslujuus, puristuslujuus, vetolujuus) esimerkiksi painumien tasaamiseksi, on käytettävä lentotuhkaa sellaisenaan tai sideaineella stabiloituna. Myös vetolujuutta parantavia kuituja tai teräksiä voidaan sijoittaa lentotuhkarakenteeseen.

Jos kriteerinä on esimerkiksi pelkkä kantavuus, voidaan käyttää pohjakuonaa tai -tuhkaa. Näidenkin lujuutta voidaan tarvittaessa lisätä sideaineita käyttäen.

5.32

Kuivatustarve

Tuhkarakenteen kuivatustarve on ratkaistava tapauskohtaisesti. Pohjamaan kuivatustavan määrää käytettävä tuhkatyyppi. Lentotuhkarakenteita suunniteltaessa on aina selvitettävä salaojituksen

tarve. Yleensä tarvitaan ainakin jollekin sivulle avo-oja. Lentotuhkarakenteen kuivatusta suunniteltaessa on otettava huomioon lentotuhkan pieni vedenläpäisevyys. Pintavesien kuivatus onkin hoidettava käyttämällä kallistuksia. Pohjatuhka ja -kuona läpäisevät paremmin vettä, eikä niillä esiinny liettymisvaaraa. Niiden kuivatusta suunniteltaessa voidaan käyttää tavanomaisia ohjeita.

5.33

Lämmöneristystarve

Tuhkat eristävät paremmin lämpöä kuin sorat ja hiekat. Ne eivät nykyisten tietojen mukaan roudi. Lämmöneristyksen tarpeen määrää pohjamaan routivuus. Mikäli routivan pohjamaan päällä oleva tuhkakerros on paksumpi kuin 0,8 m eikä päällä ole muita maakerroksia, pohjamaa on suojattu roudalta. Lämmöneristyskysymyksiin saadaan lisää valaistusta tuhkaprojektin edistytessä.

5.34

Käytönaikainen suojaaminen eroosiolta ja pölyhaitoilta

Lentotuhkarakennetta ei voi jättää suojaamatta pölyhaittojen ja pinnan mahdollisen liettymisen vuoksi. Suojaamisella estetään myös lujittumiselle välttämättömän veden haihtuminen rakenteesta.

Suojakerrokseksi riittää 50 mm:n murskesora- tai kivituhkakerros. Nurmettaminen on myös tehokas eroosiosuoja. Tuhkakerroksen päälle on levitettävä nurmen juurtumisen takaava, vähintään 200 mm:n multakerros. Kohdassa 3.15 on käsitelty tuhkien vaikutuksia kasveihin.

Pohjakuonarakenteen pinta voidaan jättää suojaamatta. Pohjatuhkan pinta saattaa kuivuessaan pölytä jonkin verran liikenteen rasituksen seurauksena. Lisäksi pohjatuhkalla on se ominaisuus, että täysin kuivuessaan sen stabiliteetti heikkenee.

5.35

Korjattavuus

Tuhkarakenteita suunniteltaessa on otettava huomioon myös myöhempi korjaustarve. Lujaa lentotuhkarakennetta ei pidä sijoittaa paikkaan missä lujittumista ei vaadita ja missä rakenne joudutaan mahdollisesti aukaisemaan. Esimerkkinä tällaisesta on viemärikaivantojen täyttö, mihin lentotuhkaa paremmin soveltuvat pohjatuhka ja -kuona.

5.4

Työnsuunnittelu

5.41

Tuhkan saatavuus ja työn ajoitus

Tuhkien saatavuudella on tärkeä merkitys rakentamisen onnistumiselle. Niin kauan kuin keskusvarastointi jakelujärjestelmineen puuttuu, tuhkarakenteiden suunnittelijalta vaaditaan huomattavasti

enemmän huomion kiinnittämistä työn ajoitukseen kuin vanhoja materiaaleja käyttäen. Myös suunnittelu vaatii säännöllistä yhteydenpitoa tuhkien tuottajaan, Energialaitokseen.

5.42

Kaluston käytön suunnittelu

Käytettävä kalusto ei poikkea normaalikalustosta paljoakaan. Kokemuksen karttuessa on kuitenkin mahdollista, että tietyt välineet sopivat tarkoitukseen muita paremmin. Esimerkiksi ulkomailla on kumipyöräjäyrä todettu parhaaksi tiivistämisvälineeksi. Juuri tiivistäminen onkin tällä hetkellä vaikeimmin hallittavia asioita, etenkin lentotuhkaa käytettäessä (kts 6.41).

5.43

Sään ja vuodenaikojen huomioonottaminen

Sään ja vuodenaikojen vaikutusta on käsitelty kohdissa 2.2, 3.24, 3.26 ja 3.32. Talvella rakennettaessa on kiinnitettävä erityistä huomiota vesipitoisuuteen ja tiivistämiseen. Jäätynyt, näennäisesti kantava rakenne voi aiheuttaa keväällä yllätyksen liettyessään täysin. On tärkeää, että tuhka levitetään ja tiivistetään heti paikalle tuonnin jälkeen.

5.44

Jälkiseurannan suunnittelu

Tuhkarakenteiden jälkiseuranta on tuhkatuntemuksen tässä vaiheessa yhtä tärkeää kuin varsinainen suunnittelu ja rakentaminen.

Lentotuhkarakenteiden lujittumisen kehitystä on tarkkailtava ottamalla sydännäytteitä. Samoin kantavuuden lisääntymistä on seurattava levykantavuus- ja pudotuspainokokein. Vesipitoisuutta, routimisnousuja ja painumia on myös syytä tarkkailla. Muita tarkkailtavia seikkoja ovat mm. rakenteen lämpötilavaihtelut eri vuodenaikoina, pH-mittaukset korroosiovaaran seuraamiseksi jne.

Kantavuusmittausten suunnittelua lukuunottamatta jälkiseurannan tarkkailu ei kuulu tavalliselle suunnittelijalle. Erikoismittausten ohjelmointi soveltuu paremmin tutkijoille ja alaan erikoistuneille.

Soveltuvien osien samoja asioita on seurattava myös pohjatuhkan ja -kuonan kohdalla.

6. TYÖOHJEET

6.1

Kuljetus

Voimalaitostuhkat voidaan kuljettaa yleensä kuten sorat ja hiekat. Lentotuhkan kuljetuksessa on kuitenkin huomattava, että tuhkan on oltava kosteaa (n. 10 %) ja lavan reunojen korkeuden on oltava suurempi kuin muilla materiaaleilla on tarpeen. Mikäli lentotuhka kuljetetaan kuivana, vaaditaan umpisäiliöauto.

6.2

Välivarastointi työmaalla

Tuhkia voidaan varastoida väliaikaisesti kasaan työmaalla. Lentotuhkalla on kuitenkin huolehdittava, ettei se pääse kastumaan yli optimin. Lentotuhkakasa on eristettävä pohjamaan kosteudelta ja suojattava tarvittaessa tuulelta, vedeltä ja pakaselta.

6.3

Levittäminen

Levittäminen tehdään normaalia kalustoa käyttäen. Levitetty kerrospaksuus ei saa lentotuhkalla ylittää 300 mm, mikä vastaa tiivistettynä 150-200 mm:n kerrosta. Pohjatuhkille ja -kuonille pätee sama paksuusvaatimus (≤ 300 mm löyhänä). Ne puristuvat vähemmän kokoon. Maksimikerrospaksuus on tiivistettynä 250 mm.

6.4

Tiivistäminen

6.41

Tiivistyskalusto

Tiivistyskaluston valintaan vaikuttaa:

- pohjamaan laatu
- tuhkatyyppi
- rakenteen pinta-ala.

Seuraavassa on koottu tiivistyskaluston valintaan ja tiivistystyön suorittamiseen liittyviä seikkoja.

Suosittelavin on 10-20 t kumipyöräjyvä, mieluummin itsekulkeva.

- Yleensä riittää 6 jyräyskertaa 90 %:n suhteelliseen tiiviyyteen.
 - Rengaspaine ≤ 250 kPa.
- 1-1,5 t täryvalssijyvä (vedettävä)
- 4-8 jyräyskertaa riittää
 - jyräysnopeus 3-5 km/h

Englannissa on suosituin 1,0 t kaksoistäryvalssijyrä (8 jyräyskertaa).

6-10 t täryvalssijyrä (vedettävä tai itsekulkeva)

- ei saa ylikuormittaa pintaa
- 4-8 jyräyskertaa
- jyräysnopeus 3-5 km/h

Tärylevyt ovat sopivia pieniin kohteisiin.

Sorkkajyrät eivät ole hyviä lentotuhkaa tiivistettäessä.

Pohjatuhkan tiivistämiseen voidaan käyttää 30 t kumipyöräjyrää (4-6 jyräyskertaa).

6.42

Tiivistystyön suoritus

Tuhkan tulee ennen levittämistä olla kosteudeltaan n. 2 %:n tarkkuudella optimivesipitoisuudessa, koska oikea vesipitoisuus on hyvin tärkeää tiivistymisen kannalta.

Kerralla tiivistettävän kerroksen paksuus on 150-200 mm tiivistettynä ja 200-300 mm tiivistämättömänä.

Ennen jyräystä on hyvä suorittaa ns. esitiivistys levityskalustolla. Tällöin estetään tiivistyskaluston "vajoaminen" tuhkaan ja päästään hyviin tuloksiin nopeammin.

Tiivistys on suoritettava heti levityksen jälkeen, ettei pinta pääse kuivumaan.

Ennen seuraavan kerroksen ajoa ei tuhkan pinta saisi päästä kuivumaan.

Seisokin jälkeen on syytä "karhentaa" pinta oikeaan muotoon, minkä jälkeen tiivistys suoritetaan 1-2 kertaa.

6.5

Rakentamisen aikaisten häirtatekijöiden eliminointi

6.51

Pölyäminen

Asiaa on käsitelty kohdissa 3.16, 3.32 ja 5.2.

6.52

Liettyminen

Asiaa on käsitelty kohdissa 3.32, 5.12 ja 5.32.

6.6

Talvirakentaminen

Talvirakentamisessa on kiinnitettävä huomiota töiden suorittamiseen onnistuneen tuloksen aikaansaamiseksi. Tuhkia ei saa päästää jäätymään. Levitys ja tiivistystyö on suoritettava heti paikalle tuonnin jälkeen. Veden käyttöä on tarkkailtava huolella. Liika vesi keväällä sulaessaan aiheuttaa rakenteen stabiliteetin menettämisen.

Liian vähäisellä vesimäärällä rakenne jää löyhäksi.

6.7

Valvonta

Tuhkarakennustöiden valvojan on tunnettava tuhkatyypit, niiden tärkeimmät ominaisuudet ja työtekniikka.

Työn laadunvalvonnasta vastaa suunnittelija tai muu asiantuntija.

6.71

Tuhkan laatu

Pohjatuhkien ja -kuonien laatu vaihtelee vain vähän. Sen sijaan lentotuhkan laatu voi vaihdella siten, että eri päivinä tuodut samasta polttokattilasta peräisin olevat tuhkat voivat olla maksimiirtotiheydeltään, optimivesipitoisuudeltaan ja lujittumisominaisuuksiltaan erilaisia. Lisäksi kunkin kattilan tuhkat poikkeavat toisistaan (taulukko 2). Tämän vuoksi paikalle tuodun lentotuhkuorman laadun silmämääräinen tutkiminen on mahdollista. Myöskään tavanomaiset menetelmät, esim. seulonta eivät paljasta lentotuhkan hyvyyttä.

Tärkein ja ainoa luotettava tieto tuhkuormasta saadaan mittaamalla sen vesipitoisuus nopealla menetelmällä. Tuhkaprojekti on koesarjalla todennut karbidometrin ("Speedy") luotettavaksi vesipitoisuuden määrittämenetelmäksi. Suurin virhe on todettu välillä 5-30 % olevan 0,5 %-yksikköä. On huomattava, että "Speedy" näyttää kosteuden märkäpainosta, ja optimivesipitoisuudet ilmoitetaan prosentteina kuivapainosta. Tulos on helposti korjattavissa kaavalla

$$w = \frac{100 \cdot w_m}{100 - w_m},$$

missä w = vesipitoisuus prosentteina kuivapainosta ja w_m = vesipitoisuus prosentteina märkäpainosta.

Koe on suoritettava erittäin huolellisesti ja kärsivällisesti. Kalsiumkarbidin (CaC_2) määrä on oltava riittävä, yleensä vähintään kolme annoslusikallista, yli 20 %:n kosteuksissa aina neljä lusikallista. Kokeen suoritus kestää 10-30 min vesipitoisuudesta riippuen. Käytännön ohjeet kokeen suorittamiselle löytyvät kirjasta: TVH, Maarakennusalan tutkimus- ja suunnitteluohteita, osa III.

6.72

Tiiviiden tarkkailu

Tiiviiden tarkkailu voidaan suorittaa volymetrikokeella ja verrata tulosta vastaavasta materiaalista Proctor-kokeella saatuun maksimikuivairtotiheyteen. Käytännössä on kuitenkin osoittautunut, että tämä menetelmä on lentotuhkilla erittäin huono, mikä johtuu tuhkaerien suuresta maksimikuivairtotiheyden vaihtelusta. On kohtuuton urakka

tehdä joka kuormasta Proctor-koe. Tämän vuoksi on löydettävä parempi ja nopeampi lentotuhkan tiiviyydentoteamismenetelmä. Tuhkaprojekti selvittää asiaa parhaillaan. Eräs mahdollisuus on yhdistetty "Speedy"-penetrometrikoe, koska lentotuhkan tunkeutumisvastus riippuu suuresti sen vesipitoisuudesta. Tätä ennen on kuitenkin ko. riippuvuus tarkoin selvitettävä.

6.73

Kantavuuden ja lujuudenkasvun tarkkailu

Asiaa on käsitelty kohdassa 5.44.

7.

TUHKARAKENTAMISEN KUSTANNUKSET

7.1

Materiaalikustannukset

Tuhkan hinta on tällä hetkellä kaupungin alueelle kuljetettuna 15-20 mk/rakenne-m³. Soran ja hiekan hinta paikalle tuotuna on noin 40 mk/rakenne-m³. Säästö rakenne-m³:ä kohden on vähintään 20 mk/rakenne-m³ tuhkien eduksi.

7.2

Rakentamiskustannukset

Varsinaiset rakentamiskustannukset ovat samaa luokkaa kuin sorasta ja hiekasta rakennettaessa, kun ei oteta huomioon vielä tällä hetkellä kustannuksia jonkin verran nostavia toimitusvaikeuksia.

7.3

Muut kustannuksiin vaikuttavat tekijät

Tuhkarakentamiskustannuksiin vähentävästi vaikuttavat:

- kaatopaikallekuljetuskustannusten sekä kaatopaikkamaksun (20 mk/kuorma) poistuminen,
- rakennekerrosten oheneminen lentotuhkaa käytettäessä,
- pohjarakennuskustannusten säästäminen rakenteen keventyessä,
- sekundaarimateriaalien hyödyntäminen sekoittamalla tuhkia niihin.

7.4

Tuhkaprojektin säästöt

Tuhkaprojekti on toimintansa aikana 1.8.1979 lukien aiheuttanut kustannuksia noin 400.000 mk. Helsingin kaupungin rahoja on kulunut n. 250.000 mk.

Samana aikana kaupunki on kohtien 7.1 ja 7.2 mukaan laskien saavuttanut tuhkarakenteita tekemällä säästöjä noin 500.000 mk (liite 4).

Edellä olevasta todetaan, että tuhkaprojekti on kannattava. Se osoittaa, että tuhkarakentamista ja tutkimuksia entistä parempien ratkaisujen löytämiseksi kannattaa jatkaa.

8. JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTOIMENPITEET

Tuhkatutkimuksesta saatujen kokemusten mukaan kivihiilituhkia voidaan käyttää maarakenteissa korvaamaan hiekka ja sora joko kokonaan tai osittain.

Etuina Helsingissä luonnon kiviaineksiin verrattuna ovat mm. tuhkien keveys, lyhyet kuljetusmatkat, parempi lämmöneristyskyky sekä lentotuhkan lujittumisominaisuus. Haittapuolia ovat mm. lentotuhkan vaikeampi käsiteltävyys, tuhkien epäedullisemmat ympäristövaikutukset ja tuotantovaihtelut. Nämä ovat kuitenkin korjattavissa hyvän suunnittelun, huolellisen valvonnan ja tuhkien ominaisuuksien tuntemisen sekä keskitetyn varastoinnin avulla.

Tuhkista voidaan rakentaa mm. penkereitä, teitä, vettäpidättäviä rakenteita, pientalojen pohjia, putkijohtojen perustuksia, siltojen maatukia sekä muita näihin verrattavia rakenteita.

Vaikka voimalaitostuhkilla ei pystytä kattamaan kuin pieni osa Helsingin kiviainestarpeesta, niiden järkiperaisella käytöllä on huomattava taloudellinen merkitys.

Tuhkaprojektin rakenneryhmän tutkimusten jälkimmäisessä osassa 1981 keskitytään lisäämään tietoutta tuhkien ominaisuuksista ja käsittelytekniikasta sekä määrittämään rakennetyypit, joihin kukin tuhka parhaiten soveltuu. Saatujen kokemusten pohjalta laaditaan parannetut tuhkarakenteiden suunnittelu- ja rakentamisohjeet.

Jatkotutkimuksissa on pääpaino mm. routivuus-, lämmöneristävyys-, leikkauslujuus-, kantavuus- ja kokoonpuristuvuusominaisuuksien sekä ympäristövaikutusten selvittämisellä.

AIHETTA KÄSITTELEVÄÄ KIRJALLISUUTTA

- 1 Eerola, M., Alkio, R., Voimalaitostuhkat ja niiden hyväksikäyttö, VTT, Tie- ja liikennelaboratorio, Tiedonanto 54, Espoo, 1980.
- 2 Oikarinen, P., Lentotuhkan käyttömahdollisuuksista pengertäytteenä, Diplomityö, Oulu, 1971.
- 3 Savolainen, R., Voimalaitostuhka ja sen hyötykäyttö, Imatran Voima, Rakennusosasto, Betoni- ja maa- teknillinen toimisto, 1978.
- 4 Torrey, S., Coal Ash Utilization, Fly Ash, Bottom Ash and Slag, Pollution Technology Review No 48, NDC, U.S.A., 1978.
- 5 Valanne, I., Lentotuhkan korroosiovaikutuksista, Diplomityö, Oulu, 1971.
- 6 CEGB, PFA Utilization, London, 1972.
- 7 Helsingin kaupungin geotekninen osasto, Voimalaitostuhkan ja polttolaitoskuonan hyötykäyttö rakentamisessa, Geoteknisen osaston tiedote 13, 1979.
- 8 International conference on the use of by-products on waste in civil engineering, Volume I, II, III, Paris, 1978.
- 9 National Cooperative Highway Research Program, Report 166, Waste Materials as Potential Replacements for Highway Aggregates.
- 10 OECD, Use of waste materials and by-products in road construction, Paris 1978.
- 11 United States Department of the Interior Bureau of Mines Information Circular/1974, Ash Utilization, Proceedings: Third International Ash Utilization Symposium, Sponsored by National Coal Association, Edison Electric Institute, American Public Power Association, National Ash Association, and Bureau of Mines, Pittsburgh, Pa., March 13-14, 1973.
- 12 U.S. Department of Commerce, National Technical Information Service, Ash Utilization proceedings of the fourth International Ash Utilization Symposium, St. Louis, Missouri, 1976.
- 13 U.S. Department of Commerce, National Technical Information Service, Fly Ash as a Construction Material for Highways, A Manual, GAI Consultants, Inc, Monroeville, Pa, 1976.

SALMISAAREN TUHKAKENTTÄ

Rakennepoikkileikkaus 1:20/1:200

Betonimuuri

+ 2,50

+ 2,00

+ 1,50

+ 1,00

+ 0,0 = merenpinta

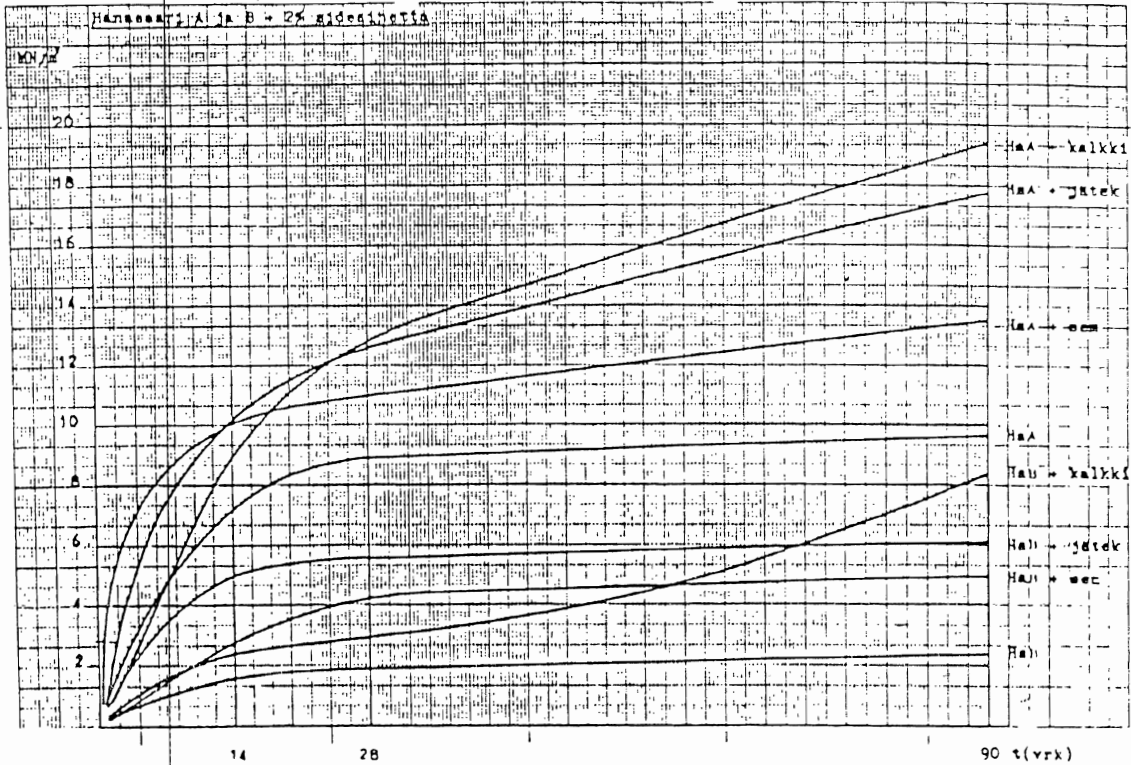
Salmisaaren pohjakuona

Hanasaari
A lentotuhkaHanasaari
B lentotuhkaLouhe-
täyttö

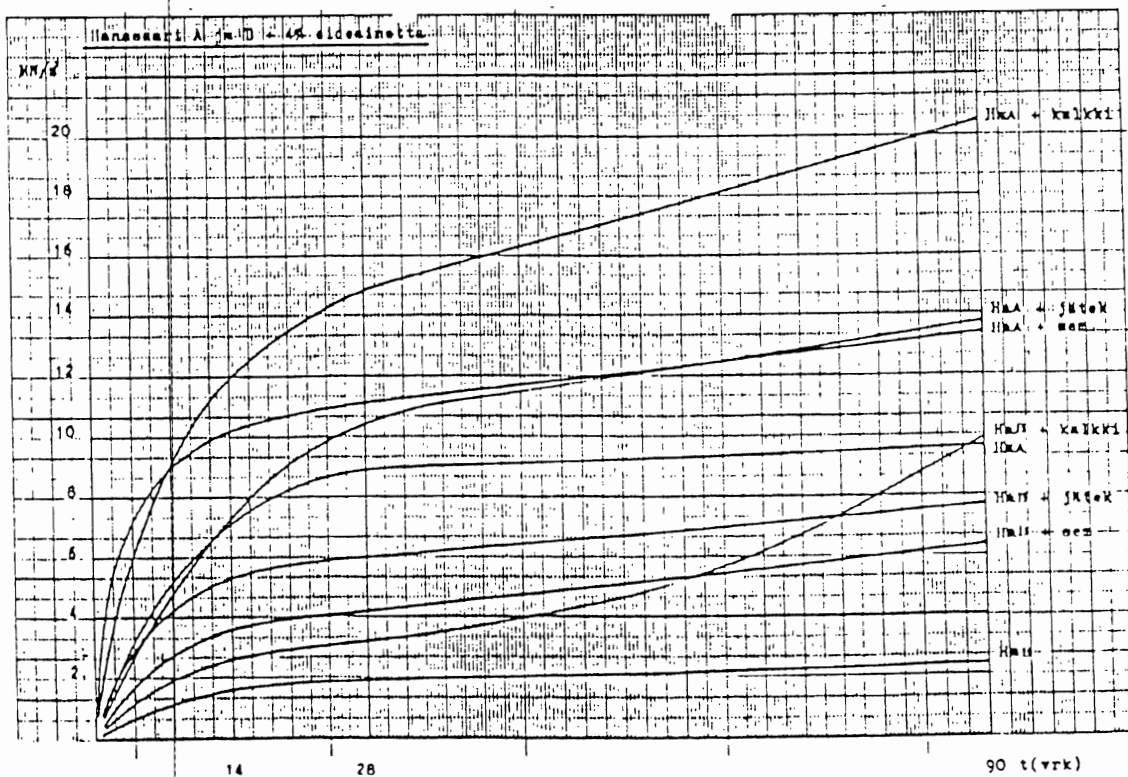
Kitkamaatäyttö

Lämpötilojen kehitys Salmisaaren tuhkakentässä
26.11.1979-27.10.1980

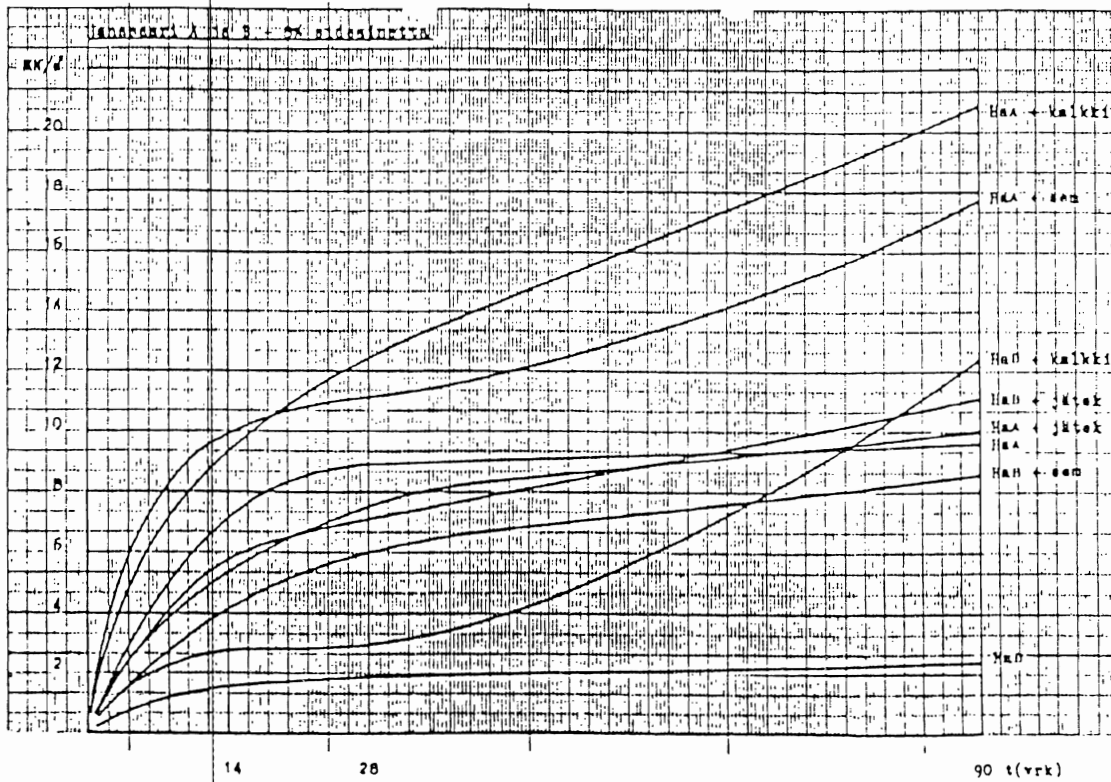
Pvm	H a n a s a a r i A				H a n a s a a r i B			
	Lämpötilat °C eri korkeustasoissa				Lämpötilat °C eri korkeustasoissa			
	+2,30	+2,10	+1,90	+1,70	+2,30	+2,10	+1,90	+1,70
26.11.	23	28	28	26	-	-	18	22
29.11.	15	20	23	20	11	9	16	18
10.12.	7	11	13	13	5	7	9	11
21.12.	4	6	7	8	1	3	5	7
2.01.	4	5	6	7	2	3	5	5
17.01.	3	4	5	5	1	2	4	4
24.01.	2	4	5	5	1	2	3	4
31.01.	0	3	4	4	0	1	3	4
7.02.	-1	2	4	3	-1	0	2	3
14.02.	-1	2	3	3	-3	-1	2	3
21.02.	-1	2	3	3	-2	-1	1	3
6.03.	-1	2	3	2	-2	-1	2	3
14.03.	-1	2	2	2	-2	-1	2	3
3.04.	0	1	2	2	-1	-1	1	2
17.04.	-1	1	2	2				
24.04.	0	1	2	2				
2.05.	5	5	3	3				
9.05.	6	6	5	5				
29.07.	22	21	17	16				
21.08.	19	19	17	17				
27.08.	15	17	16	15				
2.09.	14	17	16	15				
30.09.	11	13	13	13				
20.10.	10	13	10	11				
27.10.	6	9	9	11				



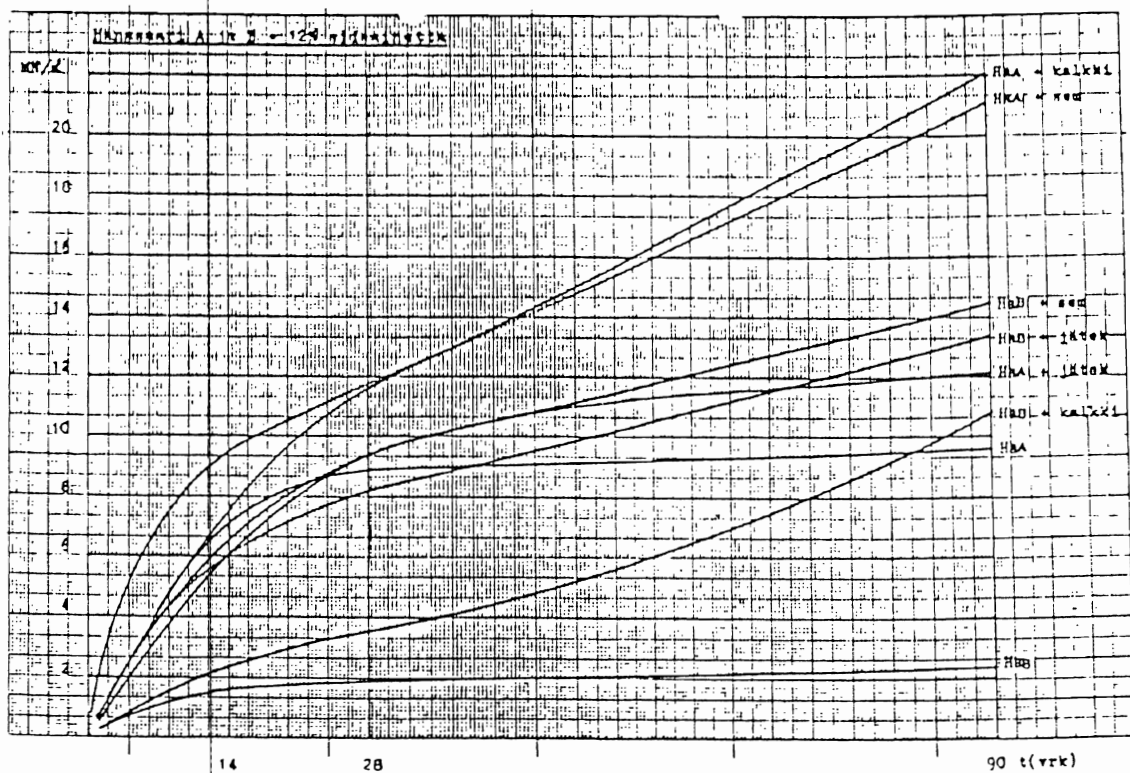
Hanasaari A ja B + 2 % sideainetta.



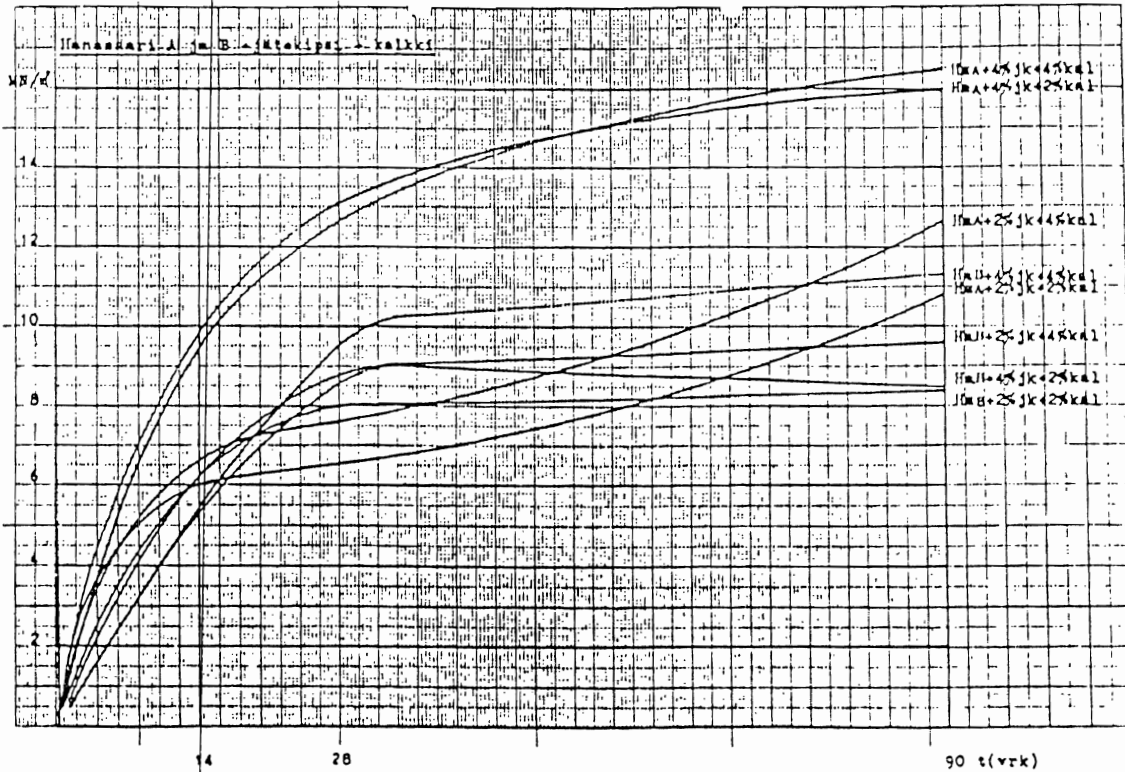
Hanasaari A ja B + 4 % sideainetta.



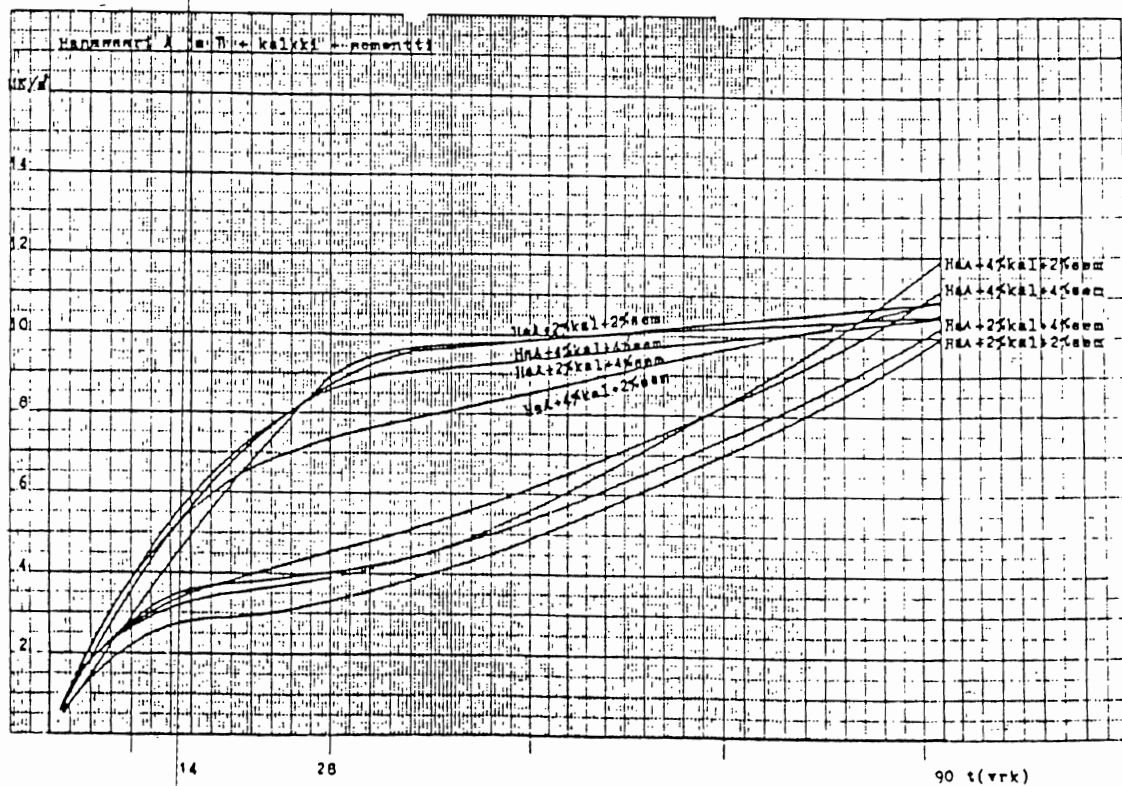
Hanasaari A ja B + 8 % sideainetta.



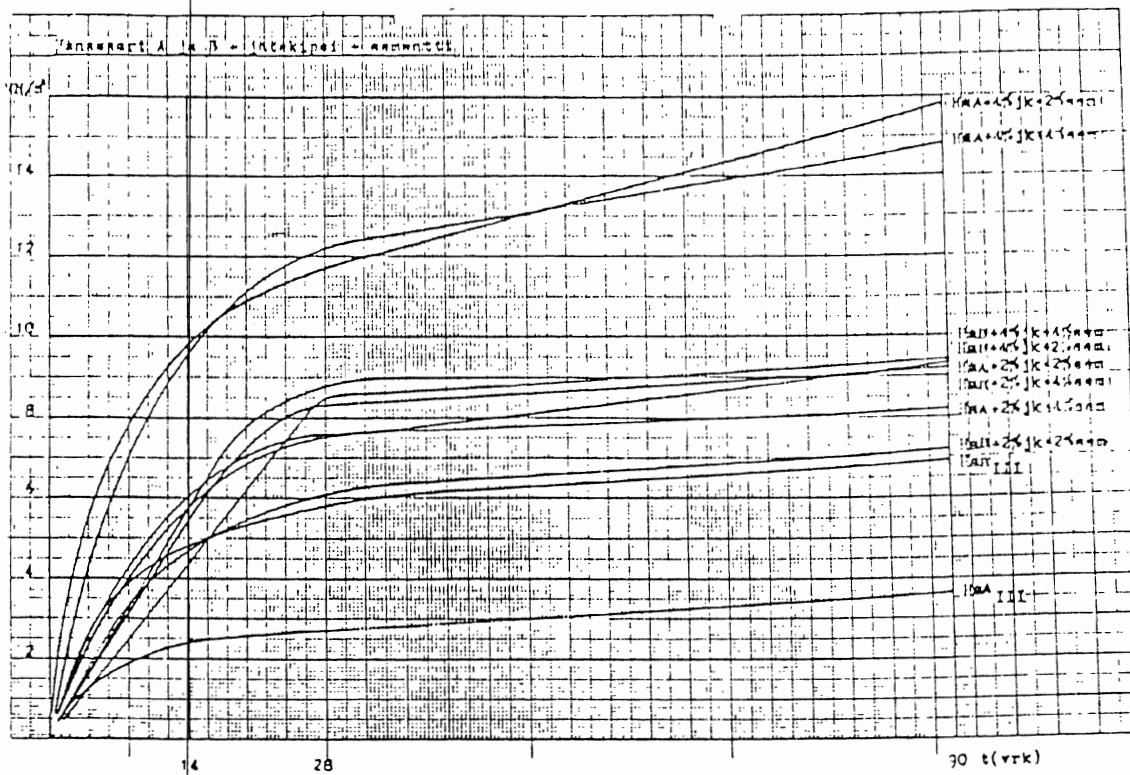
Hanasaari A ja B + 12 % sideainetta.



Hanasaari A ja B + jättekipsi + kalkki.



Hanasaari A ja B + kalkki + sementti.



Hanasaari A ja B + jättekipsi + sementti.

VALTION TEKNILLINEN
TUTKIMUSKESKUS

TUTKIMUSSELOSTUS

N:o TIE0533 Liite 3(5)

Tie- ja liikennelaboratorio

Tilaaaja:

Helsingin kaupungin kiinteistövirasto, Geotekninen toimisto/
J. Havukainen, Kyläsaarenkatu 10 00550 Helsinki 55.

Tilaus:

Suullinen tilaus J. Havukainen

Tehtävä:

Tutkittava Hanasaari A:n ja Hanasaari B:n lentotuhkan lujittumista sekä säänkestävyyttä märkä - kuiva ja jäätymis - sulamiskokein. Lisäksi selvitettävä sovittujen lisäaineiden vaikutus.

KOEJÄRJESTELYT

Tarvittavat koekappaleet valmistettiin pienellä (4") Proctor-muotilla parannetun menetelmän mukaisesti. Vesipitoisuutena käytettiin kullekin tuhkaerälle optimikosteutta paria prosenttiyksikköä pienempää vesipitoisuutta. Koekappaleet pakattiin muovipusseihin ja niitä säilytettiin suljetuissa muovilaatikoissa. Laatikkotila pidettiin kosteana.

Puristuslujuus määritettiin koekappaleista 7, 14, 28 ja 90 d:n ikäisinä. Ennen puristamista kappaleiden päät tasattiin kipsillä. Puristusnopeutena oli 0,14 mN/m²/sek.

Seosten säänkestokyky testattiin märkä - kuiva- ja jäätymis-sulamiskokeella, joissa ei suoritettu normien mukaista harjausta teräsharjalla. Jäätymis - sulamiskokeessa harjaus korvattiin pituuden mittauksella.

Märkä - kuivakoe suoritettiin AASHTO T135-70 mukaisesti harjausta lukuunottamatta. Koekappaleet upotettiin 7 d:n ikäisinä 5 tunniksi huoneenlämpöiseen veteen, jonka jälkeen ne sijoitettiin 42 tunnin ajaksi kuivauskaappiin 71 °C lämpötilaan. Tällainen kierto suoritettiin 12 kertaa.

Jäätymis - sulamiskoe suoritettiin 7 d:n ja 28 d:n ikäisille näytteille. Testattavat kappaleet sijoitettiin astioihin, joiden pohjalla oli kostea vaahtomuovi. Astiat näytteineen siirrettiin 24 tunniksi pakkahuoneeseen -20 °C lämpötilaan. Tämän jälkeen niiden annettiin sulaa 24 tuntia huoneenlämpöisessä kosteassa suljetussa tilassa. Vaahtomuovista koekappaleet voivat sulamisen kuluessa imeä itseensä kapillaarisesti vettä. Kokeeseen kuului kaikkiaan 12 kiertoa ja se noudatteli pääosin normia AASHTO T136-70.

Koekappaleiden harjaus korvattiin pituuden mittauksella. Pituuden muutos oli tarkoitus mitata venymäliuskoilla. Koekappaleiden pinnan puuterimaisuuden takia liuskojen liimaus ei onnistunut, vaan mittaus jouduttiin suorittamaan koekappaleeseen upotetuista ruuveista työntötulkilla, jonka erotustarkkuus oli 0,005 cm. Mittaus suoritettiin koekappaleista kierroittain niiden ollessa sulina ja jäätyneinä.

TULOKSET

Lujittuminen

Lujittumiskokeet tehtiin sekä Hanasaari A:n että Hanasaari B:n lentotuhkista liitteen 1 mukaisilla seossuhteilla. Tässä kokeessa käytettiin lentotuhkalähetyksiä II ja III. Seokset HA ja HB ovat aikaisemmasta selvityksestä ja on otettu mukaan vertailun vuoksi. Lujittumistulokset selviävät liitteistä 1 - 4.

Eri tuhkalaatujen ja erien optimivesipitoisuudet ja maksimikuivairtotehiydet selviävät taulukosta 1.

Taulukko 1. Lentotuhkien optimivesipitoisuus ja maksimikuivairtotehiys.

Tuhka Ominaisuus	Hanasaari A			Hanasaari B	
	I	II	III	I	II
Optimivesipitoisuus, (%)	21,6	22,8	21,8	17,5	17,0
Maksimikuivairtotehiys, (g/cm ³)	1,325	1,325	1,330	1,450	1,555

Käytetyt tuhkalaadut poikkesivat lujittumisen osalta toisistaan merkittävästi. Hanasaari A:n lentotuhka oli sellaisenaan huomattavasti aktiivisempaa kuin Hanasaari B:n lentotuhka. Sideaineita käyttäen tuhkien erot pienenevät. Harkittaessa eri sideainevaihtoehtoja ja niiden käyttöä on pyrittävä siihen, että massoista saadaan taloudellisia ja helppokäyttöisiä, toisin sanoen on pyrittävä yksinkertaisiin seoksiin ja alhaisiin sideainepitoisuuksiin varsinkin kalliiden sideaineiden osalta.

Sideaineita käyttäen saatiin Hanasaari A:n lentotuhkalla sekä lujittumisnopeus että loppulujuus nousemaan. Parhaimman lujittumisnopeuden antoi seos, jossa oli sideaineena kalkkia ja jätkeksiä, vaikka aivan varhainen lujuus hieman laski pelkällä lentotuhkalla saatuun lujuuteen verrattuna. Eri sideaineilla saadut seosten loppulujuudet eivät poikenneet toisistaan kovin paljon ja olivat 14 - 33 % suuremmat kuin pelkällä lentotuhkalla saatu lujuus.

Hanasaari B:n lentotuhkaa sidottaessa ei sideaineiden vaikutuksessa ollut huomattavia eroja lujittumisnopeuden osalta. Sideaineet nostivat loppulujuutta erittäin paljon pelkällä tuhalla saatuun lujuuteen verrattuna ja näytteet olivat joissain tapauksissa lujempia kuin vastaavat Hanasaari A:n lentotuhkasta valmistetut. Suurimmat varhaislujuudet saatiin sementtiä sekä kalkkia ja jätkeksiä käyttäen. Muilla sideaineilla ja -yhdistelmillä lujittumisnopeus oli heikompi, mutta käyrien muodon mukaan lujittuminen olisi ilmeisesti vielä jatkuva 90 d:n jälkeenkin. Poikkeuksena tästä oli sideaineyhdistelmä kalkki-jätkeksi, jolla maksimilujuustaso saavutettiin jo 28 d:n ikäisenä.

Hanasaari A:n kolmannella näyte-erällä tehdyt lujittumiskokeet vastaavat aikaisempia kokeita. Niistä voidaan todeta sementillä saatu 28 d:n suhteellisen huono arvo (liite 4).

Märkä - kuivakoe

Koekappaleet tehtiin toisesta tuhkaerästä ja Hanasaari A:n koesarjassa olivat mukana seokset HC, HE, HF, HG ja HH sekä Hanasaari B:n koesarjassa seokset HD, HI, HJ, HK ja HL. Kaikki koekappaleet kestivät käsittelyn erinomaisesti. Missään koekappaleessa ei ollut havaittavissa kappaleiden irtoamista eikä aineksen pehmenemistä. Ainoastaan koekappaleiden pinnoissa oli muutamia pitkittäisiä ja poikittaisia hiushalkeamia.

Kokeen loputtua koekappaleita liotettiin vedessä vuorokausi, jonka jälkeen ne puristettiin. Puristustulokset ilmenevät liitteestä 5. Eri sideaineilla ei ollut kovin suurta merkitystä saatuihin lujuuksiin, koska koe osittain vastaa lämpökäsittelyä ja edistään siten huomattavasti lujittumista.

Jäätymis - sulamiskoe

Kokeen yhteydessä suoritettujen koekappaleiden pituuden mittaukset on esitetty liitteissä 6 - 9. Koekappaleet olivat mitattaessa 7 d:n ja 28 d:n ikäisiä. Pysyvä laajeneminen oli kaikilla muilla paitsi toisella 7 d:n ikäisen seoksen HF kappaleella pienempi kuin 0,1 %, jota pidetään maabetoneilla raja-arvona. Kaikkia koekappaleita ei voitu mitata kokeen loppuun asti koekappaleiden rikkoutumisen vuoksi. Liitteistä 6 - 9 ilmenevät kokeissa käytetyt seokset.

Jäätymis - sulamiskokeessa Hanasaari A:n koesarjan koekappaleet 7 d:n ikäisinä kestivät 3 - 5 kiertoa vaurioitta (liite 10). Pisimpään kestivät kappaleet HC ja HF. Ensimmäiset vauriot ilmestyivät koekappaleiden siihen päähän, joka sullotaan viimeksi Proctor-muotissa. Vauriot alkoivat pään hilseilyllä, joka jatkui koko kokeen ajan. Myös pohjan pinnan pehmenemistä tapahtui kokeen kestäessä. Kappaleiden sivuihin ilmestyivät vauriot viimeiseksi. Käytetyillä sideaineilla ei ollut merkitystä Hanasaari A:n lentotuhkan osalta eikä myöskään seosten 7 d:n lujuuksilla, vaan kaikki koesarjan koekappaleet vaurioituivat samalla tavalla ja lähes samanaikaisesti. Sen sijaan tiiveydellä tuntui kokeen perusteella olevan suuri merkitys vaurioitumiseen, sillä kappaleiden alapinnat (suurin tiivistystyö) kärsivät huomattavasti pienempiä vaurioita kuin kappaleiden yläpinnat.

Suoritettaessa koe 28 d:n ikäisillä näytteillä tuli sideaineiden säänkestokykyä parantava vaikutus esiin puristuslujuuden kasvun myötä (liitteet 1 ja 11). Pelkästä lentotuhkasta tehtyjen 7 d:n ja 28 d:n ikäisten koekappaleiden vaurioitumisella ei ollut havaittavissa merkittävää eroa. Muita sideaineita selvästi paremmin vaikuttivat Hanasaari A:n lentotuhkakappaleiden kestävyys kalkki yksin sekä yhdessä jauhetun granuloidun masuunikuonan kanssa. Näiden koekappaleiden vaurioituminen alkoi vasta kuudennen kierron jälkeen, kun se sideaineettomalla lentotuhkalla alkoi kolmannen kierron jälkeen. Myös muut

käytetyt sideaineet paransivat säänkestokykyä. Kokeen mukaan sideaineiden paremmuus parhaimmästä huonoimpaan oli Hanasaari A:n lentotuhkalla seuraava: kalkki, kalkki ja kuona, kalkki ja jätäkipsi, sementti sekä jätäkipsi. Arvostelussa otettiin huomioon koekappaleen saamat vauriot pohjissa ja sivuilla sekä puristuslujuus. Tässäkin kokeessa tiiviyyden ja lujuuden merkitys tuli hyvin esiin verrattaessa 7 d:n ja 28 d:n ikäisten samojen näytteiden säänkestokykyä keskenään.

Hanasaari B:n lentotuhkasta tehdyt koekappaleet vaurioituivat 7 d:n ikäisinä samalla tavalla kuin Hanasaari A:n koesarjan vastaavat kappaleet (liite 12). Suurimpana erona oli koesarjan seosten suuret keskinäiset erot. Vaurioituminen alkoi kaikilla kappaleilla jo ensimmäisen kierron jälkeen, mutta sen nopeus vaihteli huomattavasti. Koekappaleet HJ ja HK hajosivat melkein täysin. Vaurioitumisen aiheutti päissä tapahtunut voimakas pajojen lohkeilu. Sivuilla ei ollut vaurioita. Parhaiten kestivät seoksesta HI valmistetut kappaleet, joiden saamat vauriot olivat vähäisimmät myös Hanasaari A:n koesarja huomioiden. Käytetyillä sideaineilla oli suuri merkitys Hanasaari B:n tuhkakappaleisiin. Uudenkaupungin jätäkipsillä saatiin erinomainen tulos. Kalkki sekä kalkki ja jauhettu granuuli heikensivät säänkestokykyä.

Puristuslujuuden kasvu paransi sideaineiden vaikutusta säänkestävyyteen Hanasaari B:n lentotuhkakoe-kappaleilla katsottaessa 28 d:n ikäisen koesarjan tuloksia (liite 13). Pelkistä lentotuhkasta tehdyt koekappaleet kärsivät nyt suurempia vaurioita varsinkin sivujen osalta kuin 7 d:n ikäisinä. Sideaineiden keskinäinen järjestys pysyi samana kuin 7 d:n kokeessakin. Tässäkin tapauksessa saatiin aivan erinomainen tulos jätäkipsillä. Sideaineseoksella kalkki - jauhettu granuuli saatiin huonompi tulos kuin ilman sideainetta.

Kokeen jälkeen määritettiin 28 d:n ikäisistä koekappaleista puristuslujuus (liite 14). Hanasaari A:n koesarjassa kalkilla, kalkilla ja jauhetulla granuulilla sekä kalkilla ja jätäkipsillä saadut puristuslujuudet olivat noin kaksi kertaa niin suuret kuin pelkällä lentotuhkalla saatu lujuus. Jätäkipsin käyttö ei lisännyt lujuutta ja sementtiä käyttäen saatiin noin 1,3 - kertainen lujuus. Saadut lujuudet ja vauriot vastasivat kääntäen toisiaan.

Hanasaari B:n koesarjalla jätäkipsi antoi selvästi parhaimman kestokyvyn, kuten voitiin odottaa aikaisempien kokeiden perusteella. Kalkilla, sementillä sekä kalkilla ja jätäkipsillä saatiin saman suuruiset tulokset, jotka olivat paremmat kuin pelkällä lentotuhkalla saatu tulos.

Kokeiden perusteella voidaan lentotuhkaseosten säänkestokyvystä todeta, että märkä - kuivakokeen seokset kestivät erittäin hyvin 7 d:n ikäisinä. Jäätymis - sulamiskokeen kestossa eri seosten ja tuhkatyypin välillä oli huomattavia eroja. Pakkaskestokyky riippui tuhkatyypistä, sideaineesta, saavutetusta lujuudesta sekä tiiveydestä. Kullakin lentotuhkalla sideaine näyttää ensi sijaisesta määrävän pakkaskestokyvyn ja toiseksi se riippuu ko. sideaineilla saavutetusta lujuudesta.

Tie- ja liikennelaboratorio

Tiiveydellä havaittiin olevan myös suuri merkitys ko. ominaisuuteen.

Kentällä lentotuhkarakenne tuskin joutuu näin kovaan rasitukseen mitä se oli jäätymis - sulamiskokeessa. Mikäli on aihetta olettaa ko. olosuhteita, on estettävä runsaiden vesimassojen pääsy rakenteeseen. Jatkotutkimusta ajatellen olisi selvitettävä lentotuhka - kiviainesseoksen säänkestävyys, koska se ilmeisesti poikkeaa pelkän lentotuhkaseoksen säänkestävyydestä.

Espoo 1980-10-23

VALTION TEKNILLINEN TUTKIMUSKESKUS

Tie- ja liikennelaboratorio

Tutkija

Esko Kankare
Esko Kankare

Tutkija

Risto Alkio
Risto Alkio

RA/TK

Tämän selostuksen osittainen julkaiseminen on sallittu vain Valtion teknillisestä tutkimuskeskuksesta saadun kirjallisen luvan perusteella.
Geotekninen osasto julkaisu 18

HELSINGIN KAUPUNGIN TUHKAPROJEKTI

Rakennetut kohteet

- | | |
|----|---|
| 1 | Koekenttä, Salmisaaren voimalaitosalue |
| 2 | Kevyenliikenteen väylät |
| - | Malminkartano |
| - | Itäkeskus |
| - | Pakila |
| 3 | Veneiden talvisäilytyspaikka, Koivusaari |
| 4 | Pysäköintialueet |
| - | Tuomarinkartano |
| - | Paloheinä |
| - | Haaga |
| 5 | Urheilukentät |
| - | Jääkiekko-, tennis- ja jalkapallokentät, Myllypuro |
| - | Lentopallokenttä, Kyläsaari |
| 6 | Ajoluiska, Kyläsaaren asfalttiasema |
| 7 | Pientalojen pohjat, Myllypuro |
| 8 | Sadevesirumpujen perustukset ja siirtymäkiilat, Torpparinmäki |
| 9 | Kadun kevennys, Torpparinmäki |
| 10 | Jk-tiet, Torpparinmäki |
| 11 | Viemärien perustaminen, Torpparinmäki |

Helsingin kaupunki on käyttänyt rakentamiseen 1.10.1979-1.10.1980 noin 20.000 m³ voimalaitostuhkia. Arvioitu rahallinen säästö on noin 0,5 milj. mk.