

# TUHKAPROJEKTI VÄLIRAPORTTI 2

Jorma Havukainen

---

KIVIHIIILIVOIMALAN TUHKIEN HYÖTY-  
KÄYTTÖSELVITYS KUNNALLISTEKNIKKASSA

---

Geoteknisen osaston tiedote 23 1.7.1982

Jorma Havukainen

KIVIHIILIVOIMALAN TUHKIEN HYÖTYKÄYTTÖ-  
SELVITYS KUNNALLISTEKNIKKASSA

Tuhkaprojektin väliraportti 2

Geoteknisen osaston tiedote 23

Helsinki 1.7.1982



## TIIVISTELMÄ

Kivihiilivoimalan tuhkien hyötykäyttöselvitys kunnallistekniikassa. Geoteknisen osaston tiedote 23. Helsinki 1.7.1982. 90 s.

Kivihiilituhkia voidaan käyttää maarakentamisessa korvaamaan murskaamattomia luonnonkiviaineksia. Helsingin kivihiilivoimalaitokset sijaitsevat Hanasaarella, Salmisaarella ja Myllypurossa. Ne tuottavat sivutuotteenaan tuhkia vuosittain noin 140 000 t. Tuhkatyypit voidaan jaotella lentotuhkiin, pohjatuhkiin ja pohjakuoniin.

Tuhkat vastaavat lujuusominaisuuksiltaan välimalajeja, joiden leikkauslujuus muodostuu sekä kitkasta että koheesiosta. Hanasaaren voimalaitosten lentotuhkat lujittuvat, kun ne tiivistetään optimivesipitoisuudessa. Lujittumisominaisuudet vaihtelevat kuitenkin suuresti eri lentotuhkanäytteillä. Muut tuhkatyypit eivät lujitu. Tuhkat ovat kanta-vedeltaan samaa luokkaa kuin murskaamattomat luonnonkiviainekset mutta näitä kevyempiä ja lämmöneristyskyvyltään parempia.

Tuhkia voidaan käsitellä tavanomaista kalustoa käyttäen. Pohjatuhka ja pohjakuona ovat käsiteltävyydeltään samanlaisia kuin sora ja hiekka. Lentotuhkaa tiivistettäessä on erityisesti valvottava, että sen vesipitoisuus ei ylitä optimia. Tuhkat imevät käyttötilassa itseensä vettä. Niiden ei ole todettu kuitenkaan routivan. Lujittunut lentotuhkarakenne voi keväällä sulamisen yhteydessä menettää osan lujuudestaan, mikä ei kuitenkaan aiheuta vaaraa rakenteelle. Lentotuhkia<sub>2</sub> ei voida levittää avoveteen. Vasta noin 1 MN/m<sup>2</sup> purituslujuus takaa lentotuhkarakenteen stabiliteetin avovedessä.

Tuhkista voidaan rakentaa muun muassa penkereitä, katuja, pysäköintialueita, ulkoiluteitä, urheilukenttiä, putkijohtojen perustuksia sekä täytteitä. Tuhkista on tehty tuhkaprojektin aikana koarakenteita Helsingissä yhteensä yli 60 000 m<sup>3</sup> rtr. Pienten kuljetuskustannusten ansiosta tuhkarakenteen materiaali maksaa levitettynä ja<sub>3</sub> tiivistettynä kaupungille vain 19...25 mk/m<sup>3</sup> rtr, mikä on noin puolet sorarakenteen kustannuksista. Kun otetaan lisäksi huomioon tuhkien kaatopaikalle ajon vähentyminen, tuhkatutkimukseen sijoitetut markat on saatu takaisin jo tässä vaiheessa. Tutkimus jatkuu ja selvityksen alaisena ovat muun muassa eräät tuhkien rakennustekniset ominaisuudet, varastointijärjestelmän kehittäminen ja ympäristövaikutukset.



## SAMMANDRAG

"Kivihillivoimalan tuhkien hyötykäyttöselvitys kunnallistekniikassa". Geotekniska avdelningens meddelande 23. Helsingfors 1.7.1982. 90 s.

Stenkolsaska kan användas i jordkonstruktioner till att ersätta okrossade naturliga stenmaterialer. De med stenkol drivna kraftverken i Helsingfors är belägna i Kvarnbäcken, Hanaholmen och Sundholmen. De producerar som biprodukt aska årligen sammanlagt cirka 140 000 t. Asktyperna kan indelas i flygaska, bottenaska och bottenslagg.

Till sina hållfasthetsegenskaper motsvarar askan främst mellanjordarter, vilkas skjuvhållfasthet bildas av både friktion och kohesion. Flygaska från Hanaholmenverken hårdnar då de packas vid optimal vattenkvot. De olika flygaskprovernars hårdningsegenskaper varierar dock mycket. De andra asktyperna hårdnar inte. Aska är till sin bärighet av samma klass som de okrossade naturliga stenmaterialerna, men aska har bättre värmeisoleringsförmåga och är lättare än de.

Aska kan hanteras med sedvanliga maskiner. Bottenaska och bottenslagg kan hanteras på samma sätt som grus och sand. Man skall speciellt övervaka, att flygaskans vattenkvot inte överstiger den optimala vattenkvoten då man packar den. Aska i en färdig konstruktion suger i sig vatten. Man har dock inte kunnat märka tjälbildning i aska. En konstruktion av flygaska som har hårdnat, kan under våren förlora en del av sin hållfasthet. Detta skadar dock inte konstruktionen. Flygaska kan inte spridas i öppet vatten. Först en skjuvhållfasthet på  $1 \text{ MN/m}^2$  garanterar att en konstruktion som är gjord av flygaska är stabilt i öppet vatten.

Av aska kan man bygga bland annat bankar, gator, parkeringsplatser, friluftsvägar, idrottsplaner, rörledningars grundläggningar och fyllningar. Under askaprojektets tid har man byggt i Helsingfors mer än 40 provkonstruktioner av över 60 000  $\text{tam}^3$  aska. Tack vare låga transportkostnader kostar en konstruktion, som är gjord av aska, material, spridd och packad, åt Helsingfors stad endast 19...25  $\text{mk/tam}^3$ , vilket är cirka hälften av gruskonstruktionens kostnader. Då man ytterligare tar i beaktande, att körningarna till avstjälpningplatserna har minskat, märker man, att de kostnader som askaprojektet har orsakat, har redan nu blivit täckta. Man fortsätter med forskningsarbetet, och håller på att utreda bland annat vissa av askans byggnadstekniska egenskaper, lagringssystemets utvecklingsarbete och miljöinverknningar.



ALKUSANAT

Geoteknisen osaston vuonna 1979 kiinteistölautekunnan kehotuksesta käynnistämän, Helsingin kaupungin maarakentamista palvelevan kivihiilituhkien hyötykäyttötutkimuksen ensimmäinen väliraportti julkaistiin 27.1.1981 geoteknisen osaston tiedotteena 18 nimellä "Kivihiilivoimalan tuhkan käyttö maarakenteissa". Tutkimuksen edistyessä tieto tuhkien teknisistä ominaisuuksista ja niiden käyttöön liittyvistä kustannustekijöistä on lisääntynyt siinä määrin, että on tarpeen julkaista projektin toinen väliraportti.

Tämän raportin on laatinut tutkimustyötä johtava dipl.ins. Jorma Havukainen geoteknisessä osastossa keväällä 1982. Tuhkien tiivistämisestä, lentotuhkan puristuslujuusominaisuuksista, lujuuttuneen lentotuhkan säänkestävyyttä sekä varastoinnin vaikutuksia lentotuhkan ominaisuuksiin on selvittänyt ins. Alpo Hämäläinen. Tuhkien leikkauslujuutta ja kokoonpuristumiso ominaisuuksia on tutkinut dipl.ins. Ahti Latvala. Tuhkarakentamisen kustannuksia on selvittänyt dipl.ins. Antti Sulamäki. Tutkimussihteerinä on toiminut merkon. Yeasmine Blomqvist, joka on vastannut raportin puhtaaksi- kirjoitus- ja piirtämistyöstä.

Tutkimusta valvoo kivihiilituhkien käytön kanssa tekemisissä olevista kaupungin virastojen ja laitosten sekä Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen ja Espoon kaupungin geoteknisen osaston edustajista koottu asiantuntijaryhmä. Sen puheenjohtajana toimii Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geoteknisen osaston päällikkö dipl.ins. Usko Anttikoski.

Raportissa esitetyt tiedot perustuvat pääasiassa tuhkaprojektin omiin laboratorio- ja kenttätutkimustuloksiin lukuunottamatta eräitä erillisselvityksiä, jotka on tilattu ulkopuolisilta. Helsingin kaupungin alueelle rakennetuista yli 40 koekohteesta on saatu runsaasti käytännön rakentamisen kannalta tärkeää tietoa. Suunnittelua ja rakentamista palvelevat ohjeet julkaistaan syksyllä 1982. Tuhkien ympäristövaikutusten ja kasvualusta-asioiden selvitystyö on parhaillaan käynnissä ja niistä julkaistaan tiedot vuoden 1983 kuluessa.

Helsingissä 23.6.1982



Usko Anttikoski  
Osastopäällikkö





## SISÄLLYSLUETTELO

	sivu
1.	JOHDANTO ..... 7
2.	TUHKATYYPIT JA NIIDEN TUOTANTO ..... 11
3.	TUHKIEN GEOTEKNISET OMINAISUUDET ..... 12
3.1	<u>Raeominaisuudet</u> ..... 12
3.2	<u>Tiiviysominaisuudet</u> ..... 14
3.3	<u>Lujuusominaisuudet</u> ..... 21
3.3.1	<u>Leikkauslujuus</u> ..... 21
3.3.2	<u>Lentotuhkan puristuslujuus</u> ..... 26
3.3.3	<u>Lentotuhkan vetolujuus</u> ..... 48
3.4	<u>Kokoonpuristuvuus ja kantavuus</u> ..... 48
3.4.1	<u>Painumatarkastelun periaatteet</u> ..... 48
3.4.2	<u>Ödometrikokeet</u> ..... 50
3.4.3	<u>Kantavuus</u> ..... 54
3.5	<u>Säänkestävyys</u> ..... 54
3.5.1	<u>Lujittuneen lentotuhkan säänkestävyys</u> ..... 55
3.6	<u>Routivuus ja lämmöneristyskyky</u> ..... 65
3.6.1	<u>Routimisen pääperiaatteet</u> ..... 65
3.6.2	<u>Kivihiiplituhkien routiminen</u> ..... 68
3.6.3	<u>Kivihiiplituhkien lämmöneristyskyky</u> ..... 69
4.	KIVIHIIPLITUHKISTA RAKENNETUT KOHTEET ..... 71
5.	KIVIHIIPLITUHKIEN MERKITYS HELSINGIN KAUPUNGIN MASSATALOUDESSA ..... 76
5.1	<u>Maarakentamiseen käytettävät kiviainekset</u> ..... 76
5.2	<u>Tuhkaprojektin kustannukset ja saavutetut kustannussäästöt</u> ..... 78
5.3	<u>Esimerkkejä tuhkasta tehtyjen koerakenteiden ja vastaavien normaalirakenteiden kustannuksista</u> .... 81
5.4	<u>Säästöt toiminnan vakiintuessa</u> ..... 82
5.5	<u>Tuhkien varastointi</u> ..... 83
6.	YHTEENVETO ..... 86
7.	JATKOTOIMENPITEET ..... 87
7.1	<u>Rakennustekniset ominaisuudet</u> ..... 87
7.2	<u>Taloudellisuus</u> ..... 88
7.3	<u>Tuhkien ympäristövaikutukset ja ominaisuudet kasvualustana</u> ..... 88
7.4	<u>Korroosiovaikutukset</u> ..... 90
	KIRJALLISUUTTA
	LIITE



# 1. JOHDANTO

Helsingin kaupungin maarakentamisprojekteihin käytetään vuosittain kiviaineksia 1...1,3 milj. t, mikä on irtoaineksena 650 000...850 000 m<sup>3</sup>itd ja tiivistettyinä maarakenteina 500 000...700 000 m<sup>3</sup>rtr. Tämän lisäksi kiviaineksia käytetään muussa rakennustoiminnassa, kuten betonin ja päällystemassojen valmistamisessa. Esimerkiksi Helsingin katujen päällystämiseen käytetään vuosittain noin 160 000 t kiviaineksia. Suurimpia maarakennusmateriaalien käyttäjiä ovat rakennusvirasto, satamalaitos, urheilu- ja ulkoiluvirasto, metrotoimisto sekä energialaitos. Tärkeimmät materiaalit ovat:

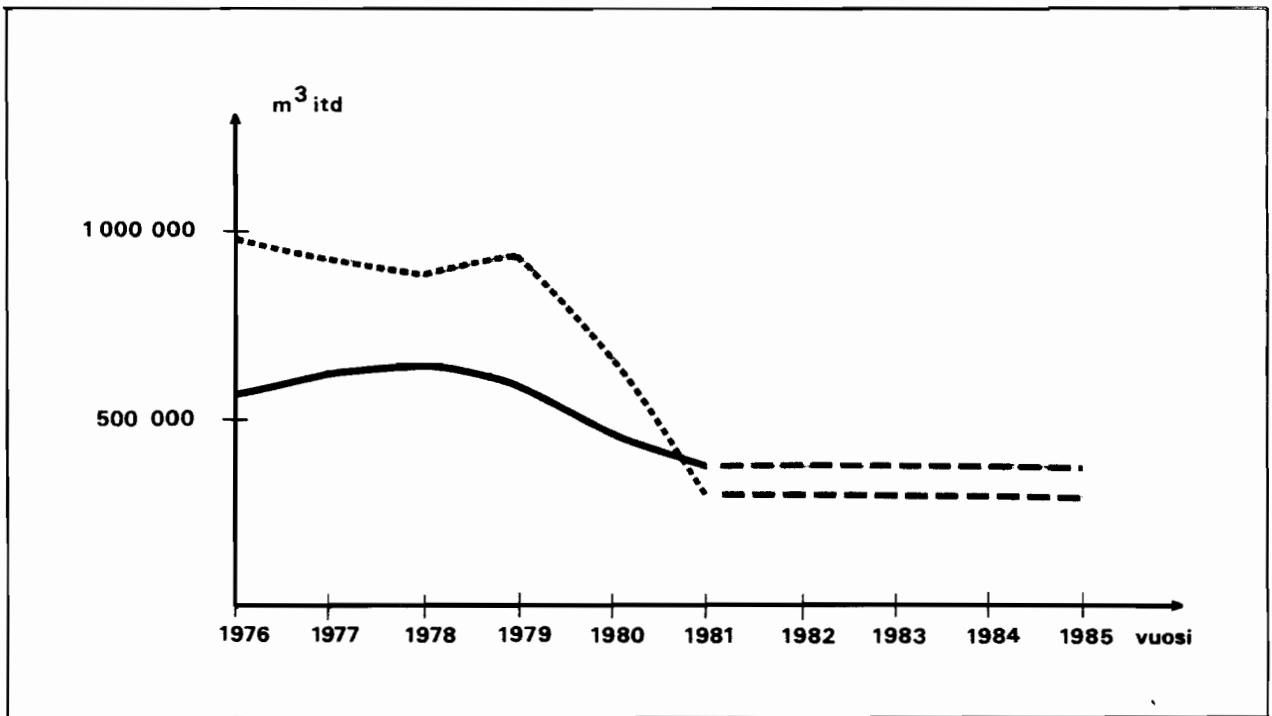
- murskaamattomat luonnonkiviainekset
- murskeet
- louhe.

Pääosa murskaamattomista luonnonkiviaineksista tuodaan kaupungin ulkopuolelta useiden kymmenien kilometrien päästä. Murskeet saadaan murskauttamalla louhetta tai tilaamalla ulkopuolisilta. Louhe saadaan kaupungin alueella olevilta työmailta.

Helsingin alueella käytetään lisäksi kiviaineksia valtion ja yksityisten maarakentamiskohteisiin 30...50 % kaupungin käyttämästä määrästä. Kaupungin alueella syntyy vuosittain 300 000...900 000 m<sup>3</sup>itd rakentamiseen kelpaamattomia maa-aineksia, jotka joudutaan sijoittamaan täyttöalueille tai kaatopaikoille.

Kaupungin maamassojen käytön taloutta edelleen kehitettäessä on kaikki hyödynnettävissä oleva materiaali ohjattava käyttöön kuormittamasta kaatopaikka- ja täyttöaluetilaa. Helsingin kaupungilla on käytettävissään muiden ainesten rinnalla arvokas maarakennusmateriaali, kivihiilivoimalaitoksissa syntyvä tuhka, jota vielä 1970-luvun lopulle saakka pidettiin kaatopaikkatavarana. Sen poiskuljettaminen maksoi vuosittain noin 1 milj. mk.

Helsingin kaupungin voimaloissa syntyvien tuhkien hyötykäytön tehostamiseksi geotekninen osasto käynnisti 1979 kiinteistölautakunnan kehotuksesta, klk 495§ 13.3.1979, tuhkantutkimusprojektin. Tavoitteeksi asetettiin koko 140 000 t tuhkantuotannon ohjaaminen kaupungin maarakentamiseen.



Kuva 1. — Helsingin kaupungin maarakentamisessa käytettyjen murskaamattomien luonnonkiviainesten ja murskeiden yhteismäärät 1976...1981 (Asuntotuotantotoimiston (ATT) käyttämät määrät puuttuvat) sekä arvio vuosille 1982...1985.

..... Helsingin alueella 1976...1981 syntyneiden kaupungin täyttö- ja kaatopaikka-alueille ohjattujen ylijäämämaamassojen määrän kehitys sekä arvio vuosille 1982...1985.

Tutkimus koostuu käytännön koerakentamisesta, kentällä tehtävistä tutkimuksista sekä näitä täydentävistä laboratoriokokeista. Apuna on käytetty myös sekä kotimaista että ulkomaista aihetta käsittelevää kirjallisuutta. Eräitä erillisiä selvityksiä on tilattu muun muassa Valtion teknilliseltä tutkimuskeskukselta ja Tampereen teknilliseltä korkeakoululta. Tutkimuksessa on keskitytty tuhkien käyttöön sellaisenaan ilman sekoittamista muihin kiviaineksiin. Lentotuhkan ominaisuuksia selvitetäessä on tutkittu laboratoriossa myös eräiden sideaineiden vaikutusta lujittumiseen.

Ensimmäinen väliraportti julkaistiin 27.1.1981 geoteknisen osaston tiedotteena 18 nimellä "Kivihiilivoimalan tuhkan käyttö maarakenteissa". Toisessa väliraportissa keskitytään maarakentamisen kannalta tärkeimpiin tekijöihin ja täydennetään näiden osalta edellisen raportin tietoja. Korroosiovaikutusten, kasvu-alusta-asioiden ja muiden ympäristövaikutusten tutkimukset ovat parhaillaan käynnissä ja tiedot niistä julkaistaan myöhemmin. Erilliset ohjeet suunnittelijalle ja rakentajalle valmistuvat loppukesällä 1982.

Vuoden 1981 loppuun mennessä oli Helsingissä rakennettu jo noin 35 koekohdetta, joihin on käytetty tuhkia yhteensä noin 60 000 m<sup>3</sup> rtr. Toukokuussa 1982 kohteiden määrä oli jo yli 40. Tuhkilla on korvattu pääasiassa täytesoraa ja -hiekkaa sekä tukikerroksen materiaaleja. Arvioitu säästö kiviaineskustannuksissa 1.10.1979...31.12.1981 on noin 1,0 milj. mk. Lisäksi säästöä on saavutettu kaatopaikalle ajon vähentymisen vuoksi noin 0,6 milj. mk. Tutkimuksesta on samana aikana aiheutunut laskettavissa olevia kustannuksia noin 0,8 milj. mk, mistä suurin osa on palkkakustannuksia. Koska valtio on antanut palkkoihin tukea noin 140 000 mk, on laskennallinen kokonaissäästö Helsingille noin 1,0 milj. mk, mikä vastaa noin 0,4 milj. mk vuosisäästöä.

Tuhkien etuina soraan ja hiekkaan verrattuna ovat muun muassa lyhyet kuljetusmatkat, keveys ja parempi lämmöneristyskyky. Tuhkien käytön taloudellinen merkitys kasvaa entisestään, kun niiden ominaisuudet hyödynnetään tehokkaasti.

Kaikki Helsingin kivihiilituhkat menevät jo nyt hyötykäyttöön, joten tärkein osatavoite on saavutettu. Seuraava tavoite on löytää kullekin tuhkatyypille ympäristöllisesti, taloudellisesti ja teknisesti mielekkäin käyttötapa. Siihen kaupungilla lienee valmius 1980-luvun puoliväliin mennessä. Jotta tähän päästäisiin, tarvitaan vielä paljon tutkimus- ja kehitystyötä. Keskeinen tehtävä on jatkossa muun muassa edullisen ja joustavan varastointijärjestelmän kehittäminen, mikä takaa tuhkien tasaisen saannin ja mahdollistaa niiden liittämisen hallitusti Helsingin kaupungin massojen kokonaisohjaukseen.

**Miljoonien tappiot vuodessa?**  
**Lohja Oy sai Helsingiltä**  
**lentotuhkan pilkkahintaan**

Tuomiokäräkkö...  
 Helsingin kaupunki...  
 Lohja Oy...  
 Lentotuhka...  
 Pilkkahinta...  
 Miljoonien tappiot...  
 Vuodessa...  
 Helsingin kaupunki...  
 Lohja Oy...  
 Lentotuhka...  
 Pilkkahinta...  
 Miljoonien tappiot...  
 Vuodessa...

ILTA-SANOMAT  
9.5.1981

TILIDIAN  
TIEITO JA  
UUTTIEN  
10.5.1981

**Helsingin miljonaarista**  
**Voimalaitostuhkaa**  
**katurakentamiseen**

Helsingin kaupunki...  
 Voimalaitostuhka...  
 Katurakentamiseen...  
 Miljonaarista...  
 Helsingin kaupunki...  
 Voimalaitostuhka...  
 Katurakentamiseen...  
 Miljonaarista...

UUSI SUOMI  
24.3.1979

PAIKKAUUKKI 29.10.1981

**Keskustelu nousi tuhkasta**

**Helsinki saa sen minkä tarvitsee**

Helsingin kaupunki...  
 Keskustelu...  
 Tuhkasta...  
 Helsinki...  
 Sen minkä...  
 Tarvitsee...

Helsingin kaupunki...  
 Keskustelu...  
 Tuhkasta...  
 Helsinki...  
 Sen minkä...  
 Tarvitsee...  
 Mikat Helsinki...  
 Vaad...  
 Oikaisu...  
 Televideoit?

Lentoalueen myyntiohjelma  
**Kunnallislain ja kaupungin edun vastainen**

Mikat Helsinki...  
 Vaad...  
 Oikaisu...  
 Televideoit?

**Energialaitos ja Lohja-yhtiö**  
**pelaavat meitä vastaan**

Energialaitos...  
 Lohja-yhtiö...  
 Pelaavat meitä vastaan...  
 Energia...  
 Lohja...  
 Yhtiö...  
 Meitä vastaan...  
 Energia...  
 Lohja...  
 Yhtiö...  
 Meitä vastaan...



PAIKKAUUKKI  
8.10.1981

**Tarkoituksen ja kaupungin edun mukainen**

Tarkoituksen ja kaupungin edun mukainen...  
 Kaupungin edun...  
 Tarkoituksen...  
 Mukainen...  
 Kaupungin edun...  
 Tarkoituksen...  
 Mukainen...

HELSINGIN  
SANOMAT  
11.2.1981

**Helsinki hyödyntää kivihiilivoimaloiden jätettä**  
**Tuhka korvaa rakennuslietan**

Helsinki hyödyntää kivihiilivoimaloiden jätettä...  
 Tuhka korvaa rakennuslietan...  
 Kivihiilivoimaloiden...  
 Jätettä...  
 Tuhka...  
 Korvaa rakennuslietan...

**Täytteenä jo 30 urheilukentässä**  
**Jätetuhkan terveys-**  
**vaarat tutkimatta**

Täytteenä jo 30 urheilukentässä...  
 Jätetuhkan terveysvaarat tutkimatta...  
 Urheilukentässä...  
 Jätetuhkan...  
 Terveysvaarat...  
 Tutkimatta...



UUSI SUOMI  
5.8.  
1981

Kuva 2. Kiinnostus tuhkien hyötykäyttöä kohtaan on lisääntynyt.

## 2. TUHKATYYPIT JA NIIDEN TUOTANTO

Kivihiilen polton yhteydessä syntyy yhdestä tonnista kivihiiltä noin 140 kg tuhkaa. Helsingin kaupunki polttaa kolmessa voimalaitoksessaan vuosittain noin 1 milj. t kivihiiltä, joten vuotuinen tuhkantuotanto on noin 140 000 t. Tuhkan laatu riippuu muun muassa kivihiilityypistä, kivihiilen karkeudesta, voimalaitoksen polttolaitteiston tyyppistä sekä polttolämpötilasta. Helsingin kaupungin tuottamat kivihiilituhkat voidaan jakaa päätyyppeihin taulukon 1 mukaisesti.

Taulukko 1. Helsingin kivihiilituhkatyyppit ja niiden tuotanto 1981.

VOIMALAITOS	TEHO (MW)	KIVIHIILEN POLTTOTAPA	TUHKA-TYYPPI	VOUSITUOTANTO (t)	RAKEISUUS-VASTAAVUUS
Hänasaari A - B	1 000	hienoksi jauhattuna	lentotuhka <sup>1</sup> pohjatuhka <sup>2</sup>	80 000 20 000	karkea siltti keskikarkea tai karkea hiekka
Salmisaari	370	surskeena	pohjakuona <sup>2</sup>	20 000	hieno tai keskikarkea sora
Myllypuro	260	surskeena	lentotuhka <sup>2</sup> pohjakuona <sup>2</sup>	10 000 10 000	hieno hiekka hieno tai keskikarkea sora
Y H T E E N S Ä				140 000	

1 = lujittuu veden kanssa tiivistettyinä  
2 = ei lujitu ilman liissideaineita

Kun Salmisaaren uusi voimalaitos otetaan käyttöön, Helsingin tuhkantuotanto on noin 200 000 t/a. Pääkaupunkiseudun toinen suuri tuhkan tuottaja on Espoon Sähkö Oy:n Suomenojan voimalaitos, jossa syntyy tuhkaa noin 40 000 t/a. Kun lisäksi otetaan huomioon Vantaalle rakennettavan kivihiilivoimalaitoksen tuleva tuotanto, pääkaupunkiseudulla syntyy jo 1980-luvun loppupuolella tuhkaa lähes 300 000 t/a.

Koko maan kivihiilituhkantuotanto on noin 0,5 milj. t/a ja sen odotetaan nousevan vuoteen 2000 mennessä 1 milj. tonniin. Suurin tuottaja on Imatran Voima Oy.



## 3.

## TUHKIEN GEOTEKNISET OMINAISUUDET

## 3.1

Raeominaisuudet

Helsingin voimalaitoksissa poltettava kivihiili on tyypiltään bituminiittia, joka sisältää 75...93 % hiiltä. Loppu on sivukiveä ja muita mineraaleja sekä maatumisasteeltaan vielä tunnistettavia kasvinjäännöksiä. Polttamisen tuloksena syntynyt tuhka sisältää pääasiassa lasimaiseksi sulanutta sivukiveä sekä palamatta jäänyttä hiiltä. Geoteknisessä mielessä tärkeitä raeominaisuuksia ovat

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

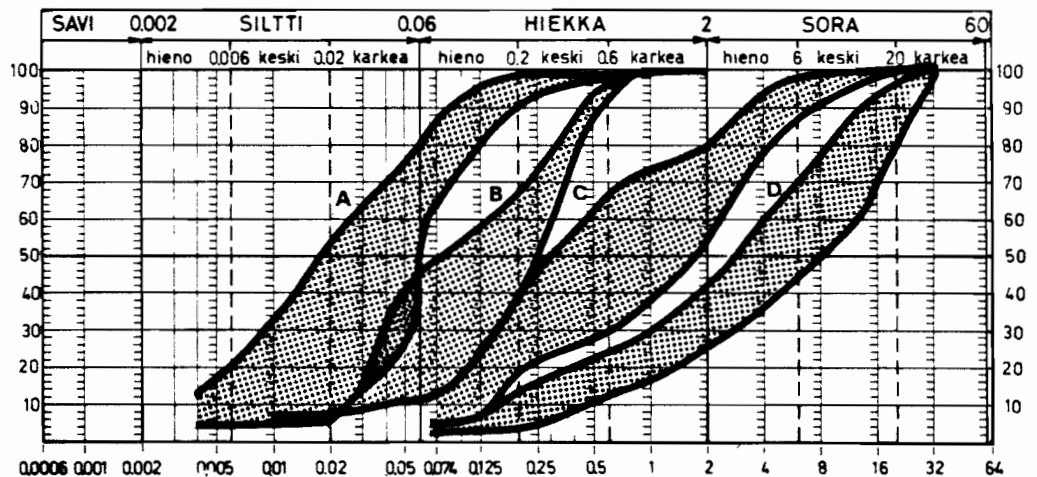
Tuhkarakeiden muotoa ja pintastrukturia on tarkasteltu silmämääräisesti ja mikroskoopin avulla. Raekoko on määritetty seulomalla ja areometrianalyysin avulla. Kiintotiheydet on määritetty pyknometrinenetelmällä alipainetta käyttäen. Tuhkien koostumuksesta on saatu tietoa energialaitoksen kemian laboratorion tekemistä analyyseistä. Koostumusmäärittäjiä lukuunottamatta tutkimukset on tehty Kyläsaaren laboratoriossa. Standardin mukaisia rakeiden muotoarvoa, Los Angeles-lukua ja haurausarvoa ei ole toistaiseksi määritetty.

Lentotuhkarakeet ovat pääasiassa lasimaisia palloja, joista useimmat ovat onttoja. Joukossa on myös särmikkäitä rakeita ja palamantonta hiiltä. Kiintotiheys vaihtelee  $\varrho_s = 1,9...2,4 \text{ t/m}^3$ , joten ne ovat kevyempiä kuin luonnonkiviainesrakeet, joiden kiintotiheys  $\varrho_s$  on keskimäärin noin  $2,7 \text{ t/m}^3$ . Tuhkan pääainesosat ovat piin, alumiinin, raudan, kalsiumin ja magnesiumin oksidit. Palamattoman hiilen määrä vaihtelee yleensä 1 ja 12 painoprosentin välillä. Poikkeuksena on Myllypuron lentotuhka, joka sisältää jopa 30 % palamatta jäänyttä hiiltä.

Pohjatuhkarakeet ovat särmikkäitä ja niillä on nuokoinen pinta. Hienoaineksessa esiintyy lentotuhkarakeiden kaltaisia hiukkasia. Joukossa on myös joitakin suurehkoja sorarakeen kokoisia, pinnaltaan lasimaisia kuonakappaleita. Palamatta jääneen hiilen määrä on noin 1 %. Pohjatuhkalla on samat pääainesosat kuin lentotuhkalla. Kiintotiheys vaihtelee  $\varrho_s = 1,9...2,0 \text{ t/m}^3$ .

Pohjakuonarakeet ovat keskimäärin kooltaan pohjatuhkarakeita suurempia, osaksi pinnaltaan kuonamaiseksi sulaneita, osaksi huokoisia ja särmikkäitä. Pääainesosat ovat samat kuin lentotuhkalla ja pohjatuhkalla. Kiintotiheys vaihtelee  $\rho_s = 1,8 \dots 2,1 \text{ t/m}^3$ .

Tuhkien väri vaihtelee vaalean kellertävästä harmaaseen ja mustaan. Väriin vaikuttavat tuhkan sisältämän hiilen ja raudan määrä, sekä kosteuspitoisuus. Raudan liissäntyessä tuhka muuttuu kellertävämmäksi.

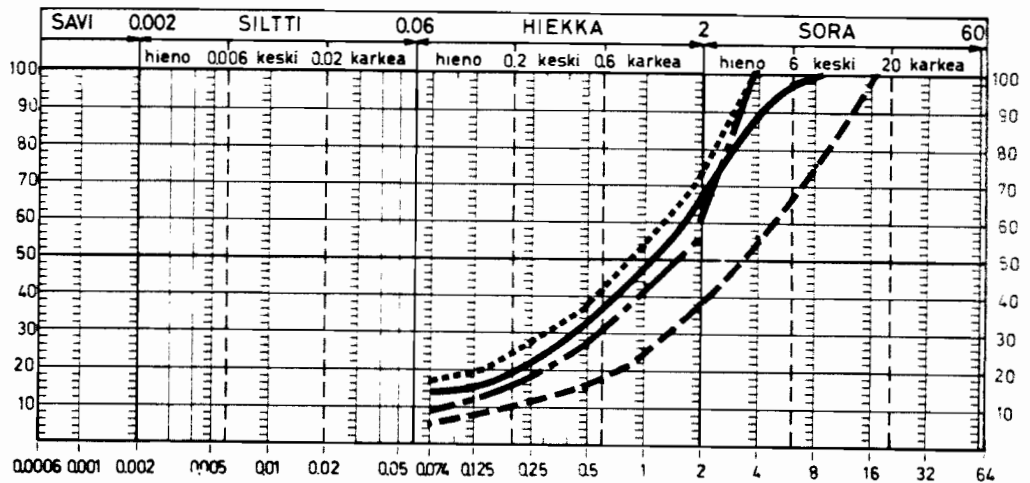


Kuva 3. Helsingin voimalaitostuhkien rakeisuusalueet.

- a) Hanasaaren lentotuhka
- b) Myllypuron lentotuhka
- c) Hanasaaren pohjatuhka
- d) Salmisaaren ja Myllypuron pohjakuona.

Pohjatuhka ja -kuonarakeet hienontuvat jonkin verran dynaamisen kuormituksen alaisena. Myllypuron pohjakuonanäytteestä määritettiin rakeisuus ennen parannettua proctor-koetta ja sen jälkeen, kuva 4. Käytännössä ei murskauminen ole kuitenkaan ilmeisesti näin suurta, joten rakeisuuden muuttuminen lienee todellisuudessa vähäisempää.

Pohjatuhkan ja -kuonan kiintotiheyden arvot ovat näennäiskiintotiheyksiä, joiden arvot ovat todennäköisesti todellista pienempiä. Tämä johtuu siitä, että huokoiset rakeet sisältävät umpeen lasittuneita huokosia, joihin ei alipaineesta huolimatta kokeessa käytetty neste, trikloorietyleeni tai vesi, ole päässyt tunkeutumaan.



Kuva 4. Myllypuron pohjakuonan rakeisuuden muuttuminen proctor-kokeessa, joka on tehty alle 16 mm näytteille.

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

Areometrikokeen luonteesta johtuen saattaa lentotuhkien rakeisuuskäyrässä olla epätarkkuutta. Lentotuhkarakeiden kiintotiheyden arvo  $1,9 \dots 2,4 \text{ t/m}^3$  on vain keskimääräinen. Todellisuudessa pienten lasipallohiukkasten kiintotiheys on selvästi keskiarvoa suurempi, noin  $2,6 \dots 2,7 \text{ t/m}^3$ , kun taas suuret, huokoiset hiukkaset ovat keskiarvoa kevyempiä. Pienet hiukkaset laskeutuvat mittalasin pohjalle hyvin nopeasti osoittaen todellista suurempaa raekokoa. Suuret hiukkaset sen sijaan osoittavat todellista pienempiä raekokoja. Lentotuhkien todellinen hienoinpien aineiden osuus lienee siten suurempi ja suurten hiukkasten pienempi kuin areometrikoe osoittaa. Mikäli lentotuhkan rakeisuuden luotettavampi määrittäminen on tarpeen, on käytettävä jotain tarkempaa menetelmää, esimerkiksi mikroskooppilaskentaa.

### 3.2 Tiiviysominaisuudet

Kivihiilituhkista rakennettaessa on niiden tiiviyteen ja tiivistettävyyteen liittyvillä seikoilla keskeinen merkitys. Tilavuuspainon, veden tarpeen, kerralla tiivistettävän kerroksen paksuuden ja materiaalimenekin tunteminen on välttämätöntä rakennetta suunniteltaessa.

Tiiviysaste vaikuttaa ratkaisevasti rakenteen kokoonpuristuvuuteen, lujuusominaisuuksiin ja kantavuuteen. Huokoisuus, vedenläpäisevyys ja kapillaarisuus riippuvat myös tiiviyydestä. Näillä taas on merkitystä rakenteen kuivatus-tekniisiin seikkoihin, routivuuteen sekä erityisesti lujittuvan lentotuhkan lujuudenkehitykseen ja säänkestävyysominaisuuksiin.

Tuhkien tiiviysominaisuuksia on tutkittu koe-rakentamisen aikana sekä kentällä että laboratoriossa. Pääpaino on ollut lentotuhkan tutkimisella, koska sen tiivistämiseen liittyy eniten ongelmia.

Tilavuuspainon maksimiarvon ja optimivesipitoisuuden määrittämiseen on käytetty parannettua proctor-koetta ja kentällä suoritettavaan tiiviiden tarkkailuun mäntävesivolymetriä. Myös kombrimetriä ja proctor-neulaa on kokeiltu. Näillä ei kuitenkaan ole pystytty kehittämään luotettavaa tiiviiden tarkkailumenetelmää. Tiivistämisvälineinä on pinta-alaltaan suurissa kohteissa käytetty perässä vedettävää 30...60 kN valssitäryjyrää. Pienissä kohteissa on käytetty 1...4 kN tärylevyä. Myös itsekulkevaa kaksivalssi-jyrää on kokeiltu. Se ei kuitenkaan kulje tuhkan päällä hyvin, vaan jää helposti pyörimään paikalleen.

Tuhkien vesipitoisuus on määritetty yleensä kuivatusmenetelmällä. Lentotuhkan vesipitoisuuden määrittäminen on kuitenkin tapahduttava kentällä nopeasti, joten kuivatusmenetelmä soveltuu tähän huonosti. Sen vuoksi vesipitoisuuden tarkkailussa on ryhdytty käyttämään karbidometriä.

Karbidometri on todettu luotettavaksi lentotuhkan vesipitoisuutta määritettäessä. Kokeen vaatiman ajan määrää näytteen vesipitoisuus. Se vaihtelee 10 ja 30 minuutin välillä.

Taulukko 2. Karbidometri- ja kuivatusmenetelmän vertailu lentotuhkan vesipitoisuuden määrittämisessä.

NÄYTE N:0	1	2	3	4	5	6
Tavoitekosteus w %	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0	25,0
Kuivatus w %	9,8	12,6	15,0	17,4	19,9	24,9
Karbidometri w %	10,0	13,0	15,3	17,0	20,1	24,4



Kuva 5. Karbidometri.

Tuhkien tiivistämisessä on otettava huomioon levitetyn kerroksen kokoonpuristuminen. Luonnonkiviaineksilla tiivistetyn kerroksen paksuus on 0,8...0,9 kertaa vastaavan tiivistämättömän kerroksen paksuus. Lentotuhka puristuu tiivistettäessä kokoon selvästi enemmän, mikä on otettava massalaskelmissa huomioon. Seuraavassa esitetään päätuhkatyyppien tiivistämiseen liittyviä suunnittelun ja rakentamisen kannalta keskeisiä asioita.

Lentotuhka levitetään tavanomaista kalustoa käyttäen enintään 300 mm paksuina kerroksina. Tiivistetyn kerroksen paksuus on vain 0,4...0,6 kertaa vastaavan tiivistämättömän kerroksen paksuus, joten 300 mm kerroksen paksuus on tiivistämisen jälkeen keskimäärin noin 150 mm.

Tiivistyskoneen valinta riippuu pohjamaan laadusta ja rakenteen pinta-alasta. Kantavalle pohjamaalle soveltuu laajoissa kohteissa traktorivetoinen 30...80 kN täryttävä valssiyrä.

Kumipyöräjiä ei ole tutkimuksen aikana ko-keiltu. Maissa, joissa niitä käytetään, pi-  
detään 150 kN kumipyöräjiä erittäin hyvänä  
lentotuhkan tiivistämiseen. Pehmeillä pohja-  
mailla on parempi käyttää traktorin asemesta  
vetokoneena esimerkiksi telapuskutraktoria.  
Pienehköissä ja ahtaissa kohteissa on 1...4  
kN tärylevy sopiva. Kaikkien tiivistyskonei-  
den ajokertojen vähimmäismäärä on kuusi.  
Lentotuhkan tiivistymistä parantaa esitiivis-  
täminen esimerkiksi levityskalustoa käyttäen.  
Ennen uuden kerroksen levittämistä on tiivist-  
etty pinta syytä karhentaa, jotta estetäi-  
siin saumakohtien syntyminen lentotuhkaraken-  
teeseen.



Kuva 6. Lentotuhka voidaan levittää ja tiivistää vakiokalustoa käyttäen.

Lentotuhkan optimivesipitoisuus vaihtelee  $w = 14...28\%$  ja maksimikuivatilavuuspaino noin  $\gamma_{dmax} = 12...15 \text{ kN/m}^3$ . Poikkeuksena on Myllypuron lujittumaton lentotuhka, jonka  $\gamma_{dmax}$  voi olla joillakin tuhkaerillä vain  $10 \text{ kN/m}^3$ . Lentotuhka tuodaan voimalaitokselta kustutettuna noin 10 % vesipitoisuuteen. Paikalle tuodun tuhkan vesipitoisuutta on valvottava ja puuttava vesimäärä on lisättävä levittämisen jälkeen tasaisesti koko rakenteen alalle. Jo 3...4 % optimivesipitoisuuden ylittäminen aiheuttaa yleensä lentotuhkarakenteen pehmenemisen ja työn keskeytymisen.

On todettu, että vesipitoisuus voi olla 2...5 % alle optimin tiivistystyön siitä kärsimättä, joten on varmuuden vuoksi syytä käyttää tämän verran alhaisempia vesipitoisuuksia. Velliytymisen vuoksi ei lentotuhkasta voi rakentaa veteen, ei myöskään suoraan yhteyteen pohjaveden kanssa. Valmista lentotuhkainta ei pidä jättää paljaaksi useiksi päiviksi, vaan se on suojattava pölyämisen tai mahdollisen liettymisen estämiseksi.

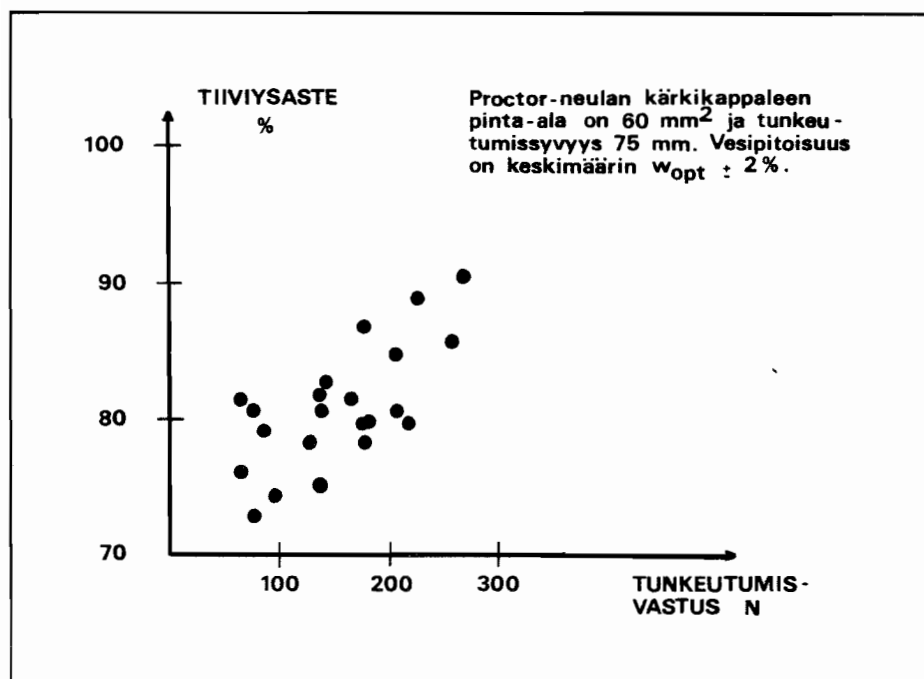
Pakkassäällä levittäminen, kastelu ja tiivistäminen on suoritettava välittömästi tuhkan paikalle tuonnin jälkeen, jolloin se on vielä lämmintä. Tiivistämisen jälkeinen jäätyminen ei pilaa lentotuhkarakennetta, kun vesipitoisuus on tiivistettäessä pidetty lähellä optimia tai sen alapuolella. Liika vesi aiheuttaa talviolloissa näennäisesti kantavan rakenteen velliytymisen roudan sulamisen jälkeen.

Lentotuhkan huokoisuus vaihtelee rakenteessa  $n = 35...46$  % tiiviysasteen mukaan. Rakenne imee käyttötilassa lisävettä, jolloin vesipitoisuus saattaa olla jopa 30...35 % eli lähellä lentotuhkan maksimikyllästysastetta. Mitoitustilavuuspainona voidaan lentotuhkalle käyttää arvoa  $\gamma_d = 16 \text{ kN/m}^3$ . Vaadittava vähimmäistiiviysaste on lujittuvalla lentotuhkalla  $D = 90$  % ja lujittumattomalla 92 %. Suurta lujuutta vaativissa kohteissa vastaava arvo on lujittuvalla tuhkalla 95 %.

Taulukko 3. Helsingin kivihiilituhkien geoteknisiä ominaisarvoja.

Tuhkattyyppi	$\gamma_{dmax}$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$w_{opt}$ (%)	Kapillaarinen nousukorkeus $h_c$ (m)	Vedenläpäisevyyskerroin $k$ (m/s)	Huokoisuus $n$ (%) ( $D = 85 - 100$ %)
Ha A lt	11.9-14.8	16.0-28.0	2.0-3.5	$1.4-2.2 \times 10^{-7}$	36 - 46
Ha B lt	12.6-15.6	14.0-25.0	2.0-3.5	$1.4-2.2 \times 10^{-7}$	35 - 45
My lt	9.6-15.0	19.5-19.7	0.8	$3.6 \times 10^{-7}$	-
Ha A,B pt	12.4-14.5	20.1-24.4	0.6-0.7	$1.1-3.0 \times 10^{-6}$	34 - 44
My, Sa pk	11.8-13.7	21.6-26.0	0.6-0.7	$2.3-6.4 \times 10^{-6}$	33 - 43

Lentotuhkan tiiviydentarkkailuun voidaan käyttää vesivolymetrikoeetta yhdistettynä parannettuun proctor-kokeeseen. Tämä vaatii kuitenkin runsaasti työtä, koska tuhkan kuivapainon suurten vaihtelujen vuoksi tarvittava proctor-kokeiden määrä on suuri. Karbidometrin käyttö vesipitoisuuden määrittämiseen nopeuttaa kuitenkin työtä. Luotettavaa ja nopeaa tiiviydentarkkailumenetelmää ei vielä lentotuhkalle kehitetty. Penetrometrinä käytettävällä proctor-neulalla saadaan kyllä välillisesti suuntaa antavia tuloksia, mikäli vesipitoisuus ei vaihtelee rakenteessa paljon. Valvonta voidaan hoitaa myös menetelmätarkkailuna.



Kuva 7. Proctor-neulan tunkeutusvastuksen ja tiivisyysasteen välinen riippuvuus lentotuhkassa.

Pohjatuhka ja pohjakuona levitetään ja tiivistetään samaa kalustoa käyttäen kuin hiekasta ja sorasta rakennettaessa. Kerrospaksuus saa olla ennen tiivistämistä enintään 400 mm. Tiivistetyn kerroksen paksuus on 0,7...0,8 kertaa vastaavan tiivistämättömän kerroksen paksuus, joten 400 mm kerroksen paksuus on tiivistämisen jälkeen keskimäärin noin 300 mm. Kaikilla tiivistuskoneilla on ajokertojen vähimmäismäärä kuusi.



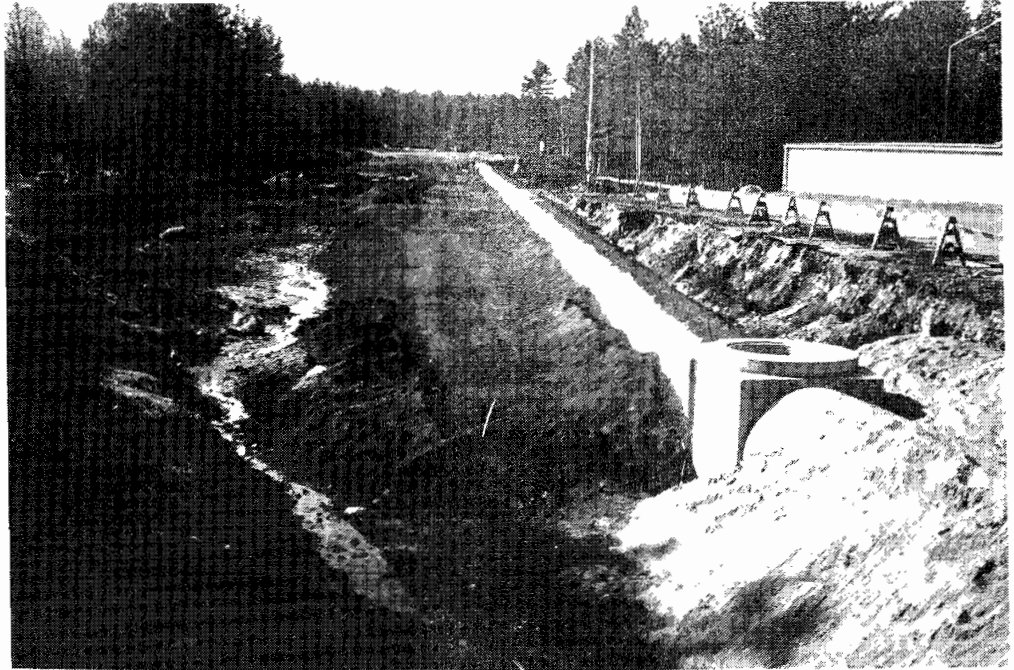
Pohjatuhkan optimivesipitoisuus vaihtelee  $w = 20...24$  % ja maksimikuivatilavuuspaino  $\gamma_{dmax} = 12,5...14,5$  kN/m<sup>3</sup>. Pohjakuonalla vastaavat arvojen vaihtelut ovat  $w = 22...26$  % ja  $\gamma_{dmax} = 12...13,5$  kN/m<sup>3</sup>. Korkeat optimivesipitoisuudet johtuvat ilmeisesti pääasiassa rakeiden huokoisuudesta.

Pohjatuhkan näennäinen huokoisuus vaihtelee rakenteessa 34...44 % ja pohjakuonan vastavasti 33...43 %. Koska rakeet sisältävät myös osittain lasittuneita umpihuokosia, lienee todellinen kokonaishuokoisuus suurempi. Suurista huokoisista rakeista johtunee myös tiivistymisen yhteydessä tapahtuva rakeisuuden muuttuminen, kuva 4.

Mitoitustilavuuspainona voidaan pohjatuhkalle käyttää arvoa  $\gamma_d = 16$  kN/m<sup>3</sup> ja pohjakuonalle  $\gamma_d = 15$  kN/m<sup>3</sup>. Vaadittava vähimmäistiiviysaste on molemmilla 92 %. Tiiviyden tarkkailuun voidaan käyttää samoja menetelmiä kuin lentotuhkalle, mutta näilläkin materiaaleilla vaikeutena on kuivapainon melko suuri vaihtelu. Valvonta voidaan hoitaa myös menetelmätarkkailuna.

Pohjatuhka ja pohjakuona jäädytetään voimailaitoksella vedessä, minkä vuoksi ne ovat rakentamispaikalle tuotaessa hyvin märkiä, vesipitoisuus voi olla jopa  $w = 45$  %. Tämä ei aiheuta kuitenkaan haittaa levittämisen- ja tiivistämistyölle, vaan liika vesi poistuu ympäristöön.

Näistä karkeista materiaaleista voidaan rakentaa myös pohjamaalle, jonka päällä on vettä, mutta veden syvyys ei saa olla rakentamisen aikana suurempi kuin noin 0,1...0,2 m. Tällöin saatetaan joutua tekemään ensimmäinen kerros paksummaksi kuin 300 mm. Seuraava kerros on tehtävä siinä tapauksessa ohuena, 100...200 mm, jotta riittävä tiivistyminen taataan. Kun veteen rakennetaan, on kuitenkin ehdottomasti huolehdittava täytönaikaisesta kuivauksesta avo- tai salaojittamalla paikka. Vesi ei saa päästä jäätymään rakentamisen aikana.



Kuva 8. Pohjatuhkan käyttö 3 E-luokan kadun alusrakenteessa ja sadevesiviemärin  $\varnothing$  1 200 B perustamisessa.

Kivihiilituhkista rakennettaessa on käytettävä tarvittaessa kuitukangasta erottamaan rakeisuudeltaan erilaiset materiaalit toisistaan. Usein kuitukankaiden käyttö on perusteltua myös työtekniisessä mielessä, esimerkiksi pehmeiköllä liikkumisen helpottamiseksi. Lujuuden parantamiseen kuitukankaat eivät sovellu suuren venyvyyden vuoksi. Tätä varten on markkinoilta saatavissa lujitekankaita ja -verkkoja. Kapillaariveden nousun katkaiseminen voidaan tarvittaessa hoitaa esimerkiksi muovikelmulla. Tällöin on kuitenkin huolehdittava, että vesi pääsee poistumaan kelmun pinnalta.

### 3.3

#### Lujuusominaisuudet

##### 3.3.1

##### Leikkauslujuus

Maa- ja tuhka-ainesten lujuusominaisuuksien tunteminen on vakavuus-, kantavuus- ja maanpamelaskelmien tekemiseksi välttämätöntä. Geoteknisessä mielessä tärkein lujuusarvo on maan leikkauslujuus, joka riippuu maan tiiviyydestä, raakoostumuksesta, raemuodosta, vesipitoisuudesta ja kuormitusnopeudesta.

Sen oletetaan koostuvan kahdesta komponentista

- 1 sisäisestä kitkasta, joka aiheutuu maarakeiden hankauksesta toisiaan vastaan
- 2 koheesiosta, joka aiheutuu maarakeiden välisistä molekyylilynnämuista kiinnevoimista.

Leikkauslujuuden ( $s$ ) oletetaan yleensä kasvavan kokonaisnormaalijännityksen ( $\sigma$ ) kasvavassa seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$s = c + \delta \tan \phi \quad (1)$$

jossa  $c$  on näennäinen koheesio ja  $\phi$  on näennäinen kitkakulma. Leikkauslujuus voidaan ilmaista vastaavasti myös tehokkaan jännityksen ( $\delta' = \delta - u_w$ ) ja tehokkaiden lujuusparametrien  $c'$  ja  $\phi'$  avulla, kun  $u_w$  on huokosvedenpaine.

Karkearakeisilla maalajeilla (kitkamailla) leikkauslujuus muodostuu pääasiassa kitkasta, jolloin

$$s = \delta \tan \phi \quad (2)$$

Taulukko 4. Kitkamaiden keskimääräisiä kitkakulmien ominaisarvoja.

Maakerros	Kitkakulman $\phi$ ominaisarvo
Louhe (hyvin tiivistettynä)	45°
Sora	36°
Hiekka	34°
Karkea siltti	30°

Hienorakeisten maalajien (koheesiomaiden) leikkauslujuus on vedellä kyllästetyssä tilassa

$$s = c \quad (3)$$

jolloin kitkakulma  $\phi = 0$ , eikä leikkauslujuus riipu normaalijännityksestä  $\sigma$ . Kuivassa tai vain osittain vedellä kyllästetyssä koheesiomaassa vaikuttaa leikkauslujuuteen myös kitka. Esimerkiksi täysin kuivan saven kitkakulman arvo voi olla jopa  $\phi = 30^\circ$ .

Keskirakeisten välimaalajien leikkauslujuus riippuu sekä koheesiosta että kuormituksesta ja näinollen myös kitkakulmasta. Vedellä kyllästetyssä tilassa välimaalajien kitkakulma on suuruusluokkaa  $\phi = 20...22^\circ$  tiiviissä tilassa ja täysin kuivana vastaavasti  $\phi = 30...35^\circ$ .

#### Kivihiilituhkat

Kirjallisuuden mukaan lentotuhkien leikkauslujuus muodostuu välimaalajien tavoin sekä kitkasta että koheesiosta. Sen sijaan sekä pohjatuhan että pohjakuonan leikkauslujuuden ilmoitetaan muodostuvan pääasiassa vain kitkasta.

Useilla lentotuhkilla sanotaan myös olevan itsekovettamisominaisuuksia, jonka ansiosta tiivistetyn lentotuhkarakenteen leikkauslujuus kasvaa ajan kuluessa.

Helsingin kivihiilituhkien leikkauslujuuden selvittämiseksi on Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen geotekniikan laboratoriolta tilattu tutkimus, jossa määritettiin tuhkien leikkauslujuusparametrit useissa kosteus- ja tiiviystiloissa, tutkimus n:o GEO 1171. Kivihiililyyppin vaihduttua välillä puolalaisesta amerikkalaiseen ja englantilaiseen hiileen, tilattiin täydentävä tutkimus n:o GEO 1226.

Määrittämissä menetelmäksi valittiin suora leikkauskoe rasialeikkauslaitteella, koska lujuuttuneet lentotuhkanäytteet vaativat järeää leikkaustapaa ja kokeiden vertailtavuus vaatii saman menetelmän kaikille näytteille. Kaikki kivihiilituhkat konsolidoituvat nopeasti, joten näytteiden annettiin konsolidoitua ennen koetta 15 minuuttia ja leikkausnopeutena käytettiin 0,1 mm/minuutti. Koe vastasi siten lähinnä cu-koetta. Pystykuormitukset olivat 50, 100 ja 200 kN/m<sup>2</sup>.

Hanasaaren lentotuhkan kitkakulman arvo vaihteli tuoreilla, lujittamattomilla näytteillä  $\phi = 28...43^\circ$ , kun tiiviysaste vaihteli  $D = 80...100\%$  ja vesipitoisuus  $w = 10...30\%$ .

Vastaavasti koheesion arvo vaihteli  $c = 5...67 \text{ kN/m}^2$ . Kivihiilityyppi ei vaikuttanut merkittävästi kitkakulman arvoon, sen sijaan koheesion arvo oli tuoreella puolalaisella lentotuhkalla keskimäärin vain puolet muiden lentotuhkien vastaavista arvoista.

Myllypuron lentotuhkan kitkakulman arvo vaihteli  $\phi = 30...40^\circ$  ja koheesion arvo  $c = 6...17 \text{ kN/m}^2$ , kun tiiviysaste vaihteli  $D = 80...100 \%$  ja vesipitoisuus  $w = 10...30 \%$ .

Lujittuneiden lentotuhkanäytteiden vesipitoisuus oli tekovaiheessa  $w_{opt} + 2 \%$ . Ne säilytettiin huoneen lämpötilassa tiiviisti muovikelmuun käärittyinä lujittumisen edellytyksenä olevan kosteuden säilyttämiseksi. Hanasaaren lentotuhkan kitkakulman arvo vaihteli 14 vuorokauden ikäisillä näytteillä  $\phi = 36...70^\circ$  ja koheesion arvo  $c = 67...355 \text{ kN/m}^2$ , kun kappaleiden tiiviysaste vaihteli  $D = 90...100 \%$ . Alhaisimmat kitkakulman arvot olivat Hanasaaren B-laitoksen puolalaisella lentotuhkalla ja suurimmat A-laitoksen puolalaisella lentotuhkalla. Alhaisimmat koheesion arvot olivat B-laitoksen tuhkalla, joka oli peräisin joko amerikkalaisesta tai englantilaisesta kivihiilestä. Suurimmat koheesion arvot olivat A-laitoksen puolalaisella tuhkalla.

Hanasaaren lentotuhkan kitkakulman ja koheesion arvo määritettiin 28 vuorokauden ikäisille näytteille vain puolalaisella tuhkalla. Kitkakulman arvo vaihteli  $\phi = 57...77^\circ$ . Koheesion arvo vaihteli  $c = 64...490 \text{ kN/m}^2$ . Kitkakulman arvot eivät merkittävästi riippuneet siitä, oliko kyseessä A- vai B-laitoksen tuhka. B-laitoksen näytteiden kitkakulman arvot olivat kasvaneet selvästi 14 vuorokauden arvoista. Koheesion arvot olivat suurimmat A-laitoksen näytteillä.

Pohjatuhkanäytteen kitkakulman arvo vaihteli  $\phi = 39...52^\circ$  ja koheesion arvo  $c = 5...79 \text{ kN/m}^2$ , kun tiiviysaste vaihteli  $D = 80...100 \%$  ja vesipitoisuus vaihteli  $10...30 \%$ . Erityisesti kiinnitti huomiota koheesion voimakas kasvu lähestyttäessä optimivesipitoisuutta ja selvä koheesion pieneneminen, kun  $w_{opt}$  ylitettiin  $5...10$  prosenttiyksiköllä.

Myllypuron pohjakuonanäytteen kitkakulman arvo vaihteli  $\phi = 36...39^\circ$  ja koheesion arvo vaihteli  $c = 5...7 \text{ kN/m}^2$ . Tiiviysaste vaihteli  $D = 90...95 \%$  ja vesipitoisuus oli  $w = w_{opt} + 2 \%$ .

Tuloksia tarkasteltaessa voidaan tehdä johtopäätös, että Helsingin kivihiilituhkat ovat luokiteltavissa välimaalajeiksi, joiden leikkauslujuuteen vaikuttavat sekä kitka että koheesio. Koheesio on pieni Myllypuron lentotuhkalla ja pohjakuonalla, samoin kaikilla muillakin tuhilla, joiden vesipitoisuus oli reilusti alle optimin, kuten oletettavaa onkin. Taulukossa 5 esitetään lujittumattomien tuhkien leikkauslujuusparametrien arvoja, kun tiiviysaste  $D = 90$  ja  $95$  % ja vesipitoisuus  $w = w_{opt} \pm 2$  %. Alempia arvoja voidaan käyttää suunnittelussa.

Taulukko 5. Helsingin kivihiilituhkien leikkauslujuusparametrien ominaisarvoja.

Tuhka- tyyppi	$\phi_0$ vrk <sup>(o)</sup> D = 90 % $w = w_{opt} \pm 2$ %	$\phi_0$ vrk <sup>(o)</sup> D = 95 % $w = w_{opt} \pm 2$ %	$C_0$ vrk (kN/m <sup>2</sup> ) D = 90 % $w = w_{opt} \pm 2$ %	$C_0$ vrk (kN/m <sup>2</sup> ) D = 95 % $w = w_{opt} \pm 2$ %
Ha A lt	31...39 <sup>1)</sup>	37...43 <sup>1)</sup>	28 <sup>1)</sup> ...61	23 <sup>1)</sup> ...67
Ha B lt	28...37 <sup>2)</sup>	33...37 <sup>2)</sup>	27 <sup>2)</sup> ...51	30 <sup>2)</sup> ...49
My lt	37	39	9	9
Ha A, B pt	42...51	45...52	15...70	32...77
My, Sa pk	36	39	5	7

1) ja 2) Sama tuhkanäyte (kts. taulukko 6)

Lujittuneen lentotuhkan leikkauslujuuden selittäminen lienee mutkikkaampaa kuin lujittumattomien tuhkien, eikä se ilmeisesti koostu pelkästään kitkasta ja koheesiosta. Ainakaan koheesio on luonne ei ole sama kuin esimerkiksi savella, jossa rakeet ovat vesivaippojen ympäröimänä. Lujittavat silikaattikemian piiriin kuuluvat monimutkaiset sidokset muistuttavat sementin sitoutumista. Kuitenkin niilläkin leikkauslujuuden voidaan käytännössä olettaa koostuvan kitkasta ja koheesiosta samalla tavoin kuin kiviaineksilla yleensä.

Havaitaan, että kitka ja koheesio lisääntyvät yleensä voimakkaasti lujittumisen edistyessä ja saavutettavat arvot ovat erittäin korkeat. Tällä on merkitystä suurta lujuutta vaativien maarakenteiden tekemisessä. Kuitenkaan tutkimuksessa saatuja 14 tai 28 vuorokauden arvoja ei pidä ottaa lähtökohdaksi käytännön suunnittelussa, koska laboratorio-olosuhteissa saavutetut lujuudet ovat suurempia kuin kentällä, jossa vuodenaika ja muut sääolot vaikuttavat ratkaisevasti lujittumisprosessiin.

Taulukko 6. Hanasaaren lujittuneen lentotuhkan leikkauslujuusparametrien arvoja.

Tuhka- tyyppi	$\emptyset$ 14 vrk <sup>(0)</sup>	$\emptyset$ 14 vrk <sup>(0)</sup>	C 14 vrk (kN/m <sup>2</sup> )	C 14 vrk (kN/m <sup>2</sup> )
	D = 90 % w = w <sub>opt</sub> ± 2 %	D = 95 % w = w <sub>opt</sub> ± 2 %	D = 90 % w = w <sub>opt</sub> ± 2 %	D = 95 % w = w <sub>opt</sub> ± 2 %
Ha A 1t Ha B 1t	55...67 <sup>1)</sup> 36 <sup>2)</sup> ...53	56...69 <sup>1)</sup> 37 <sup>2)</sup> ...55	106...265 <sup>1)</sup> 66...185 <sup>2)</sup>	134...291 <sup>1)</sup> 69...195 <sup>2)</sup>
Tuhka- tyyppi	$\emptyset$ 28 vrk <sup>(0)</sup>	$\emptyset$ 28 vrk <sup>(0)</sup>	C 28 vrk (kN/m <sup>2</sup> )	C 28 vrk (kN/m <sup>2</sup> )
Ha A 1t Ha B 1t	71 <sup>1)</sup> 74 <sup>2)</sup>	64...73 <sup>1)</sup> 57...77	312 <sup>1)</sup> 64 <sup>2)</sup>	347 <sup>1)</sup> ...490 95 <sup>2)</sup> ...228

1) ja 2) Sama tuhkanäyte (kts. taulukko 5)

### 3.3.2 Lentotuhkan puristuslujuus

Lentotuhkien lujittuminen avaa niin suuria mahdollisuuksia geotekniikan alueella, että tätä ominaisuutta ja siihen vaikuttavia tekijöitä on syytä pohtia tarkemmin. Muualla maailmassa asiaa on tutkittu jo noin 20 vuotta, erityisesti sementti- ja betonitutkimuksen yhteydessä. Lentotuhkassa on lujittumisominaisuuden lisäksi muitakin betoniteollisuutta kiinnostavia tekijöitä, joilla betonin ominaisuuksia voidaan parantaa ja valmistuskustannuksia vähentää. Kuitenkin lujittumisprosessiin liittyy niin monia tekijöitä, että asia ei liene vielä täysin hallinnassa.

Tuhkaprojektin tutkimusryhmä on käyttänyt huomattavan osan laboratoriotyöajastaan lentotuhkan lujittumiseen vaikuttavien tekijöiden selvittämiseen pitäen etusijalla kuitenkin käytännön maarakentamisen tarpeita. Lentotuhkan lujittumisella on geoteknisessä mielessä merkitystä muun muassa seuraavilla osa-alueilla:

#### Lujittunut tiivis lentotuhkakerros

- 1 Tasaa painumia pehmeiköllä jakaessaan kuormitukset pohjamaalle tasaisemmin kuin tavanomainen maarakenne.
- 2 Muuttaa liukupintojen sijainnin syvemmälle lujempiin maakerroksiin parantaen varmuutta maapohjan murtumista vastaan.
- 3 Pientää painumia vähentäessään maapohjaan kohdistuvaa painetta, mikäli lentotuhkalaatta on pinta-alaltaan suurempi kuin kuormittava pinta ja vaihtoehtoisena perustustapana on maa-arina.
- 4 Korvaa tavanomaisesti paksumman maarakenteen säilyttäen kuitenkin kantavuuden, jolloin materiaalia voidaan säästää.
- 5 Vähentää maanpainetta.
- 6 Toimii vettä pidättävänä rakenteena.

#### Muihin kiviaineksiin sekoitettuna lujittuva lentotuhka

- 7 Hienoaineksena parantaa tasarakeisten kiviainesten stabiliteettiä mekaanisesti.
- 8 Sideaineena parantaa kiviainesten stabiliteettiä kemiallisesti lujittaen.
- 9 Parantaa injektointimassojen ominaisuuksia.

Tuhkaprojektin työ tähtää tällä alueella ensisijaisesti hyödyntämään lentotuhkan lujittumisominaisuuksia tapauksiin 1...6. Lentotuhkan tekninen ja taloudellinen merkitys kasvaa tässä välillä aivan toisiin mittoihin kuin pelkästään kiviaineksen korvaajana. Tämän lisäksi on muistettava kaikille tuhkatyypeille ominainen keveys ja hyvä lämmöneristyskyky.



## Lujittuminen

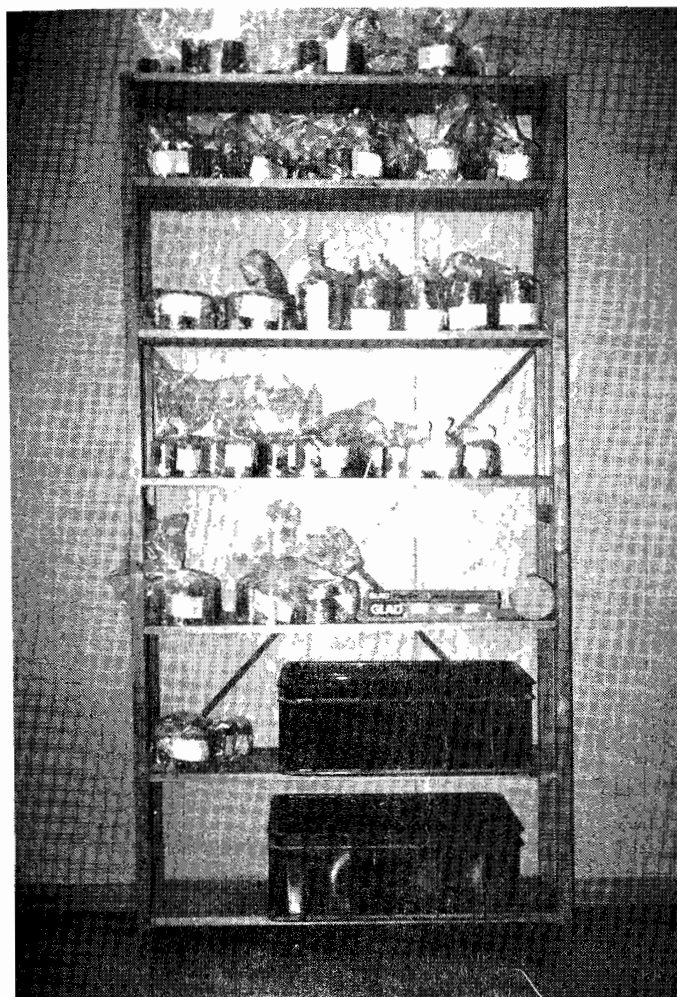
Tuhka-alan kirjallisuudessa käsitellään lentotuhkan lujittumista ja siihen vaikuttavia syitä melko runsaasti. Koska lujittumistekijöiden määrä on suuri lähtien kivihiilen syntytavasta riippuvasta kemiallisesta koostumuksesta ja polttoprosessin yksityiskohdista päätyen lopulta tuhkan käsittelytapaan, on mahdollista, että kaikkea oleellistakaan asiaan liittyvää ei ole vielä lopullisesti selvitetty.

Yleisesti tunnettua on, että lentotuhka lujittuu sitä enemmän, mitä enemmän se sisältää lujittumiselle välttämätöntä hydratoituvaa kalkkia, niin sanottua vapaata kalkkia. Samoin kirjallisuudessa mainitaan, että lujittuminen riippuu kolmen pääoksidin,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ja  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , yhteismäärästä. Ilmoitetaan myös, että mitä hienompaa lentotuhka on, toisin sanoen mitä suurempi on sen ominaispinta-ala, sitä paremmin lentotuhka lujittuu. Edelleen jäännöshiilipitoisuuden on sanottu vaikuttavan lujittumiseen huonontavasti sitä enemmän, mitä enemmän sitä on. Lisäsideaineilla on tunnetusti lujuutta parantava vaikutus. Tiedetään myös, että runsaasti rikkiä sisältävissä tuhkissa voi sulfaateista ja kalkista veden kanssa reagoidessaan syntyä kipsiä, jonka toiminta yhdessä aineksen mahdollisesti sisältämien kalsiumalumiinaattiliuosten kanssa synnyttää ettringiittiä. Ettringiitin tilavuus on suurempi kuin reaktioiden lähtöaineiden yhteistilavuus, jolloin lujittunut rakenne rikkoutuu ja menettää lujuuttaan.

Kaikkiin näihin kysymyksiin ei tuhkaprojektin yhteydessä ole pyritty löytämään vastausta. Kuitenkin lujuusominaisuuksia selvitettyä on kerätty aineistoa helposti kontrolloitavista tekijöistä.

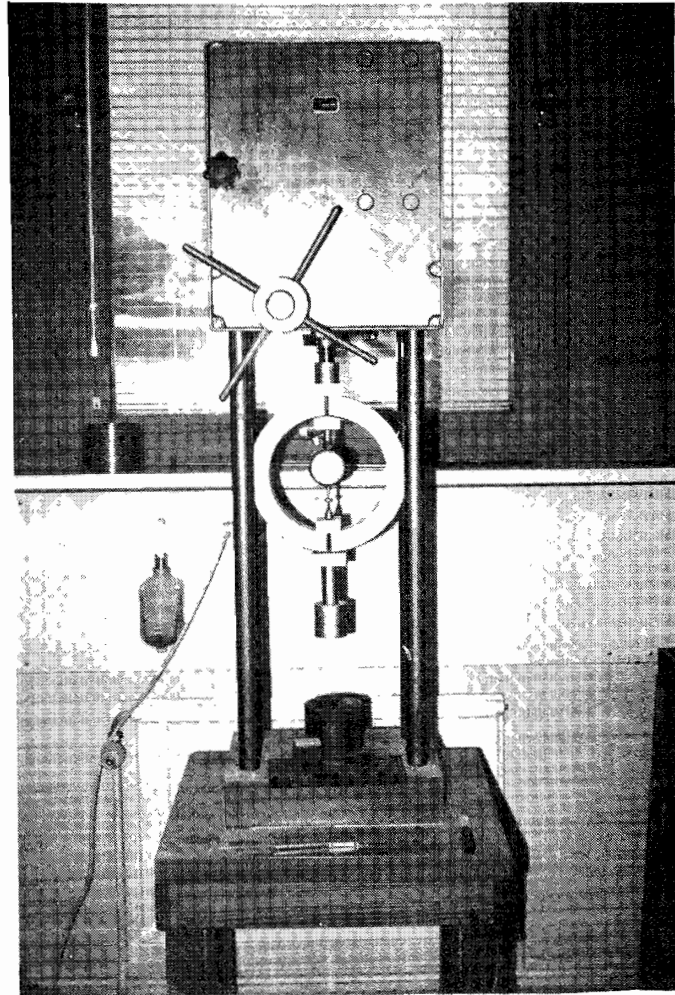
## Puristuslujuuskokeet

Kokeet on tehty rakennusviraston katurakennusosaston Kyläsaaren tielaboratoriossa. Menetelmänä on käytetty yksiakseli-puristuskoetta. Koekappaleet ovat olleet lieriömuotoisia, korkeus  $h = 70 \dots 80$  mm ja halkaisija  $d = 62$  mm. Ne on tiivistetty katurakennusosaston pudotusvasaralaitteella. Vesipitoisuutena on käytetty  $w_{\text{opt}} \dots w_{\text{opt}} - 2$  %. Tiivistämisenergiana on käytetty samaa kuin parannetussa proctor-menetelmässä,  $2,65 \text{ J/cm}^3$ . Saavutettu tiiviysaste on ollut  $90 \dots 95$  % parannetun proctor-kokeen tiiviyydestä, mikä vastaa hyvin käytännön tilannetta.



Kuva 9. Pudotusvasaralaitteella tehtyjen koekappaleiden säilyttäminen.

Proctor-sullontaa ei ole käytetty kuin vertailumielessä koekappaleiden valmistamiseen, koska kappaleiden yhteismäärä on suuri (noin 1 500) ja näin on sekoittamistyötä pystytty helpottamaan ja materiaalimenekkiä vähentämään. Toinen tärkeä syy on puristuslaitteena käytetyn katurakennusosaston CBR-laitteen melko alhainen maksimipuristusvoima (50 kN). Poikkipinta-alaa pienentämällä on pystytty melkein kaikki lujatkin kappaleet ( $P < 15 \text{ MN/m}^2$ ) puristamaan. Kaikkein lujimmat kappaleet on puristettu Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen tielaboratoriossa.



Kuva 10. CBR-puristuslaite.

Koekappaleet on säilytetty puristamiseen saakka tiiviisti muovikelmuun käärittynä huoneen lämpötilassa, jolloin lujittumisreaktiolle välttämätön kosteus on säilynyt. Koska lie-riöpuristuslujuuskoe olisi suositeltavinta tehdä kappaleelle, jonka  $h/d = 2$ , ja käytetyn kappaleen  $h/d \approx 1,2$ , on tulosta korjattu kertoimella, joka on saatu Meyersin, Pichumanin ja Kapplesin teoksesta "Fly Ash as a Construction Material for Highways".

Taulukko 7. Lentotuhkan puristuslujuustulosten korjaamisessa käytetyt kertoimet.

h/d	Korjauskerroin K
2.00	1.00
1.75	0.99
1.50	0.97
1.25	0.94
1.00	0.91

Korjattu lujuus = mitattu lujuus x K

Kokeilla on pyritty selvittämään sekä pelkän lentotuhkan lujittumista että sideaineiden vaikutusta tähän. Puristusiat ovat olleet 7, 14, 28, 90, 180 ja 360 vuorokautta. Paremmuuskriteerinä käytettiin alkuvaiheessa 28 vuorokauden lujuutta, koska lentotuhkan tiedettiin lujittuvan melko hitaasti ja ajateltiin että erot eivät tule vielä esille 7 tai 14 vuorokauden lujuuksilla. Käytännössä saattaa kuitenkin varhaislujuus olla määräävä.

Lujuutta lisäävinä sideaineina on kokeiltu rakennushienokalkkia, tavallista portlandsementtiä ja Kemiran Uudenkaupungin fosfaattitehtaan jätekipsiä. Pitoisuudet ovat olleet 2...12 % tuhkan kuivapainosta. Myös alle 2 % pitoisuuksia on kokeiltu, mutta käytännössä näin pieniin pitoisuuksiin ei voida mennä, koska stabiloinnin onnistumisen epävarmuustekijöiden määrä lisääntyy suuresti. Taulukoissa 8...14 on esitetty tuhkaprojektin aikana tehtyjen puristuslujuuskokeiden keskeisin tulosaineisto. Kuvissa 11...13 on esitetty eräitä lujittumiskäyriä. Puristuslujuuskokeita on tehty myös erillisselvitysten, muun muassa säänkestävyyteen liittyvien kokeiden yhteydessä. Lisäksi on kokeiltu pohjatuhkan ja lentotuhkan sekoittamista keskenään. Käytetty lentotuhka oli näytteestä A II, joka on erittäin voimakkaasti sitoutuvaa.

Puristuslujuuskokeiden alkuvaiheessa jokainen koe tehtiin kolmella kappaleella, joiden tuloksen keskiarvoa käytettiin lopullisena tuloksena. Kun huomattiin, että hajonta on vakio-olosuhteiden ansiosta erittäin pieni, siirryttiin käyttämään ainoastaan kahta koe-kappaletta luotettavuuden kärsimättä edelliseen verrattuna. Tietenkään tulokset eivät tilastollisessa mielessä ole täysin varmoja, mutta ne ovat enemmän kuin vain suunta-antavia.

Puristuslujuuskokeissa käytettyjen lentotuhkänäytteiden määrä oli 61. Niistä olivat puolalaisesta kivihiilestä peräisin näytteet A I...IV, Ak 1 1...8, Ak 2 9...16, B I...IV, Bk 3 1...10 ja Bk 4 16...24 sekä amerikkalaisesta tai englantilaisesta kivihiilestä A V, Ak 2 17...21, B V, Bk 3 11...15 ja Bk 4 25...30.

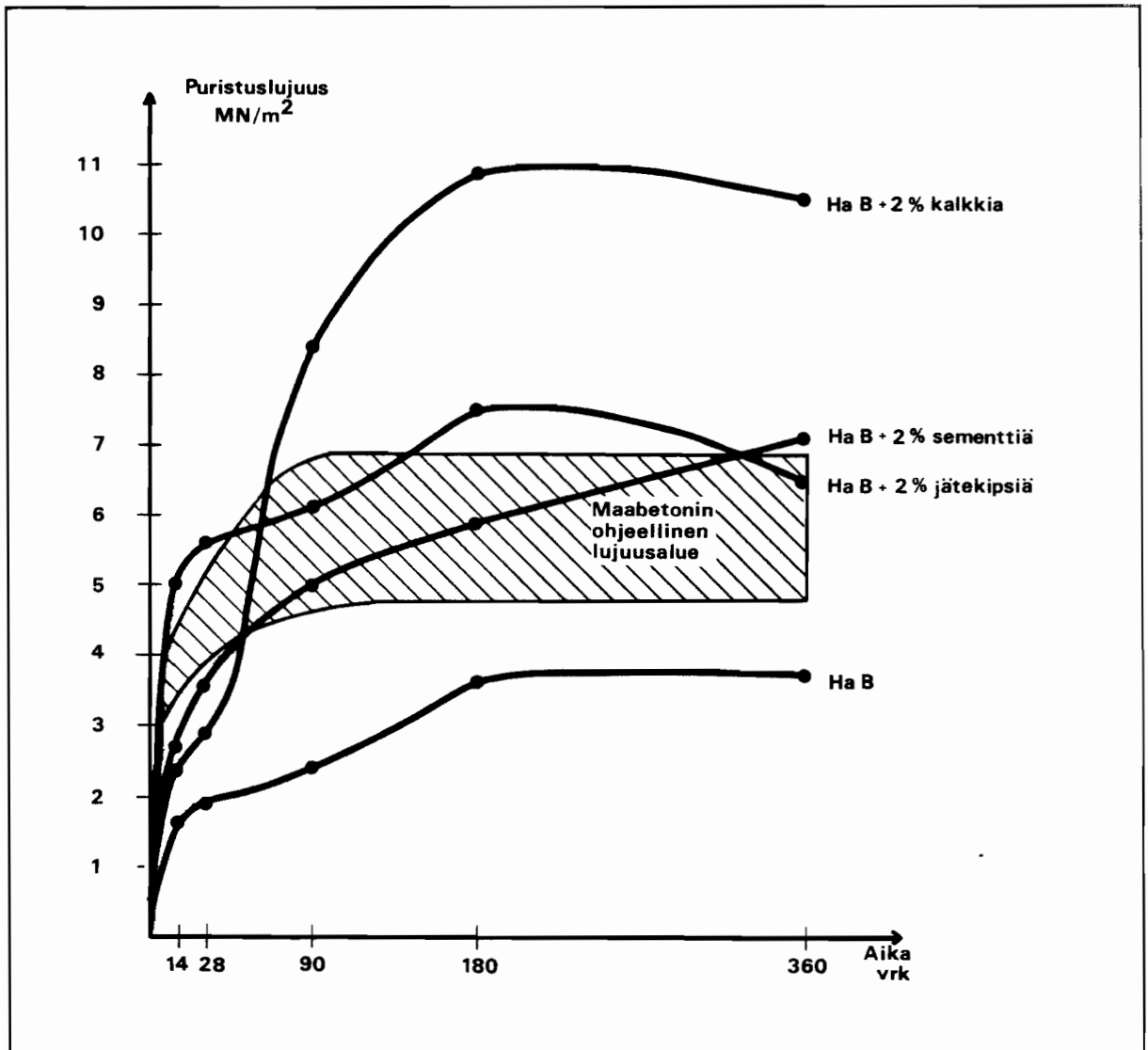
## Hanasaaren lentotuhkien lujuudenkehitys

Taulukko 8. Hanasaaren A-laitoksen lentotuhkanäytteen A II puristuslujuudet ilman lisäsideaineita ja sideaineita käyttäen.

KOEKAPPALEEN KOOSTUMUS	PURISTUSLUJUUS (MN/m <sup>2</sup> )				
	14 vrk	28 vrk	90 vrk	180 vrk	360 vrk
A	7.1	8.9	9.6	12.0	10.5
A + 2 % kalkkia	3.7	12.3	19.-	16.5	19.7
A + 4 % kalkkia	11.9	14.3	20.5	24.6	
A + 3 % kalkkia	9.3	12.4	20.9	25.4	27.5
A + 12 % kalkkia	7.5	11.6	22.1	23.3	27.0
A + 2 % sementtiä	10.0	11.0	13.5	13.0	20.5
A + 4 % sementtiä	10.2	11.1	13.4	23.4	
A + 3 % sementtiä	9.9	11.1	17.7	18.2	19.7
A + 12 % sementtiä	9.5	11.8	21.1	22.3	
A + 2 % jätäkipsiä	10.1	12.6	17.3	19.4	22.6
A + 4 % jätäkipsiä	7.3	10.4	13.6	18.4	20.0
A + 3 % jätäkipsiä	5.3	7.5	10.0	13.2	13.9
A + 12 % jätäkipsiä	6.5	9.4	12.2	15.3	

Taulukko 9. Hanasaaren B-laitoksen lentotuhkanäytteen B II puristuslujuudet ilman lisäsideaineita ja sideaineita käyttäen.

KOEKAPPALEEN KOOSTUMUS	PURISTUSLUJUUS (MN/m <sup>2</sup> )				
	14 vrk	28 vrk	90 vrk	180 vrk	360 vrk
B	1.6	1.9	2.4	3.6	3.7
B + 2 % kalkkia	2.4	2.9	3.4	10.9	10.5
B + 4 % kalkkia	2.6	3.2	9.9	18.8	
B + 3 % kalkkia	2.3	3.0	12.4	15.4	18.3
B + 12 % kalkkia	2.4	3.5	10.8	14.1	
B + 2 % sementtiä	2.7	3.6	5.0	5.9	7.1
B + 4 % sementtiä	3.6	4.2	6.4	7.1	6.5
B + 3 % sementtiä	4.1	6.0	3.6	10.1	11.4
B + 12 % sementtiä	6.1	9.4	14.5	17.7	
B + 2 % jätäkipsiä	5.0	5.6	6.1	7.5	6.5
B + 4 % jätäkipsiä	5.3	6.0	7.7	8.7	10.2
B + 3 % jätäkipsiä	5.3	7.1	11.1	12.4	17.3
B + 12 % jätäkipsiä	6.0	3.2	13.4	15.6	



Kuva 11. Hanasaaren B-laitoksen lentotuhkanäytteen B II puristuslujuuden kehitys ilman lisäsideaineita ja sideaineita käyttäen, sideaineina kalkki, sementti ja jättekipsi, pitoisuus 2 %.

Taulukko 10. Hanasaaren A- ja B-laitoksen lentotuhkanäytteiden A III ja B III puristuslujuudet ilman lisäsideaineita ja sideaineita käyttäen.

KOEKAPPALEEN KOOSTUMUS	PURISTUSLUJUUS (MN/m <sup>2</sup> )		KOEKAPPALEEN KOOSTUMUS	PURISTUSLUJUUS (MN/m <sup>2</sup> )	
	14 vrk	28 vrk		14 vrk	28 vrk
A	4.8	5.8	B	2.4	2.7
A+2 % kalkkia	5.3	6.9	B+2 % kalkkia	2.7	3.1
A+4 % kalkkia	4.7	7.9	B+4 % kalkkia	2.8	3.2
A+8 % kalkkia	5.8	8.8	B+8 % kalkkia	3.5	4.1
A+12 % kalkkia	5.8	6.7	B+12 % kalkkia	3.1	3.5
A+2 % sementtiä	4.2	5.1	B+2 % sementtiä	2.5	3.1
A+4 % sementtiä	4.9	6.1	B+4 % sementtiä	2.8	3.0
A+8 % sementtiä	4.7	5.9	B+8 % sementtiä	4.2	5.1
A+12 % sementtiä	7.3	7.6	B+12 % sementtiä	5.6	7.6
A+2 % jätäkipsiä	4.9	5.9	B+2 % jätäkipsiä	5.2	6.8
A+4 % jätäkipsiä	5.1	5.8	B+4 % jätäkipsiä	7.0	8.4
A+8 % jätäkipsiä	4.6	6.1	B+8 % jätäkipsiä	7.1	8.6
A+12 % jätäkipsiä	4.0	5.9	B+12 % jätäkipsiä	7.5	9.9

Taulukko 11. Hanasaaren A- ja B-laitoksen lentotuhkanäytteiden A V ja B V puristuslujuudet ilman lisäsideaineita ja sideaineita käyttäen.

KOEKAPPALEEN KOOSTUMUS	PURISTUSLUJUUS (MN/m <sup>2</sup> )		
	7 vrk	14 vrk	28 vrk
A	0.5	1.7	2.0
A + 2 % kalkkia	1.0	3.3	3.9
A + 4 % kalkkia	1.6	3.6	4.6
A + 6 % kalkkia	2.0	4.1	7.5
A + 8 % kalkkia	2.3	4.4	7.1
A + 2 % sementtiä	0.6	2.0	2.4
A + 4 % sementtiä	1.0	2.7	3.2
A + 6 % sementtiä	1.2	3.1	3.5
A + 8 % sementtiä	1.4	3.4	4.0
B	0.4	0.4	0.5
B + 2 % kalkkia	1.6	2.5	3.0
B + 4 % kalkkia	2.7	4.1	4.4
B + 6 % kalkkia	3.1	5.2	5.9
B + 8 % kalkkia	3.8	5.9	7.6
B + 2 % sementtiä	0.2	0.5	0.6
B + 4 % sementtiä	0.3	0.7	0.9
B + 6 % sementtiä	0.4	1.3	1.6
B + 8 % sementtiä	0.5	1.6	2.1

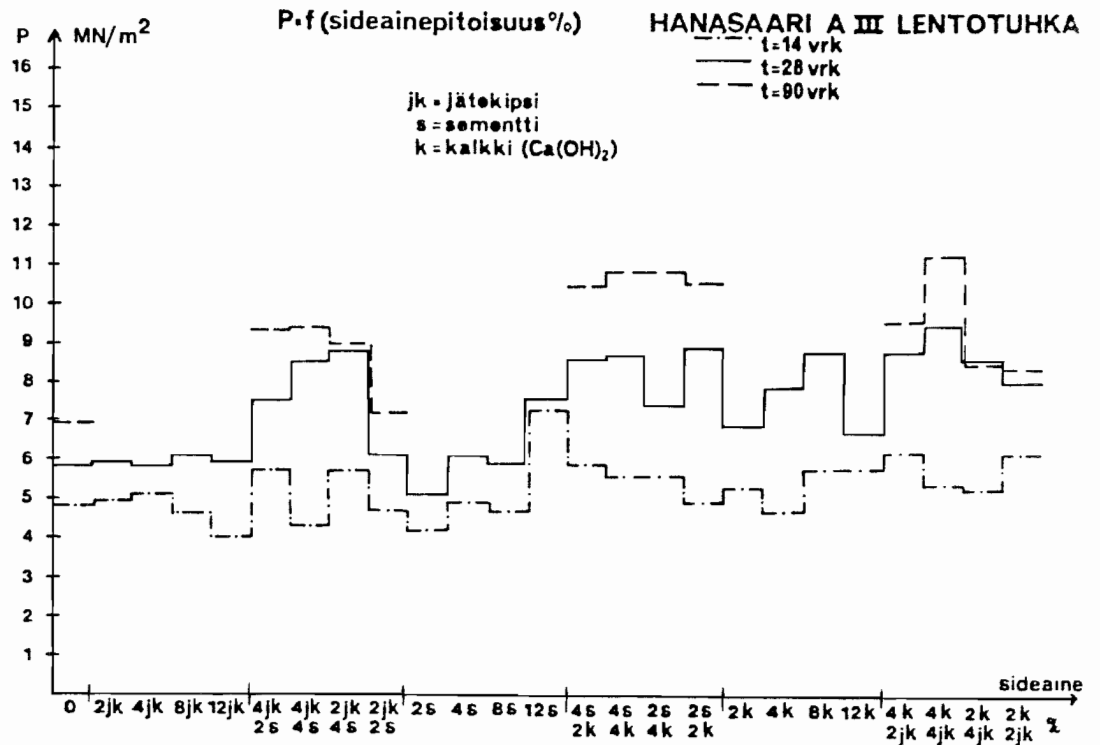
Taulukko 12. Hanasaaren A-laitoksen lentotuhkanäytteen A III puristuslujuudet ilman lisäsideaineita ja kahden sideaineen seoksia käyttäen.

KOEKAPPALEEN KOOSTUMUS	PURISTUSLUJUUS (MN/m <sup>2</sup> )		
	14 vrk	28 vrk	90 vrk
A	4.8	5.8	6.9
A + 2 % kalkkia + 2 % sementtiä	4.9	8.9	10.6
A + 2 % kalkkia + 4 % sementtiä	5.9	8.6	10.5
A + 4 % kalkkia + 2 % sementtiä	5.6	7.4	10.9
A + 4 % kalkkia + 4 % sementtiä	5.6	8.7	10.9
A + 2 % jätäkipsiä + 2 % kalkkia	6.2	8.0	8.4
A + 2 % jätäkipsiä + 4 % kalkkia	6.2	8.8	9.6
A + 4 % jätäkipsiä + 2 % kalkkia	5.3	8.6	8.5
A + 4 % jätäkipsiä + 4 % kalkkia	5.4	9.5	11.3
A + 2 % jätäkipsiä + 2 % sementtiä	4.7	6.1	7.2
A + 2 % jätäkipsiä + 4 % sementtiä	5.7	8.3	9.0
A + 4 % jätäkipsiä + 2 % sementtiä	5.7	7.5	9.3
A + 4 % jätäkipsiä + 4 % sementtiä	4.3	8.5	9.4

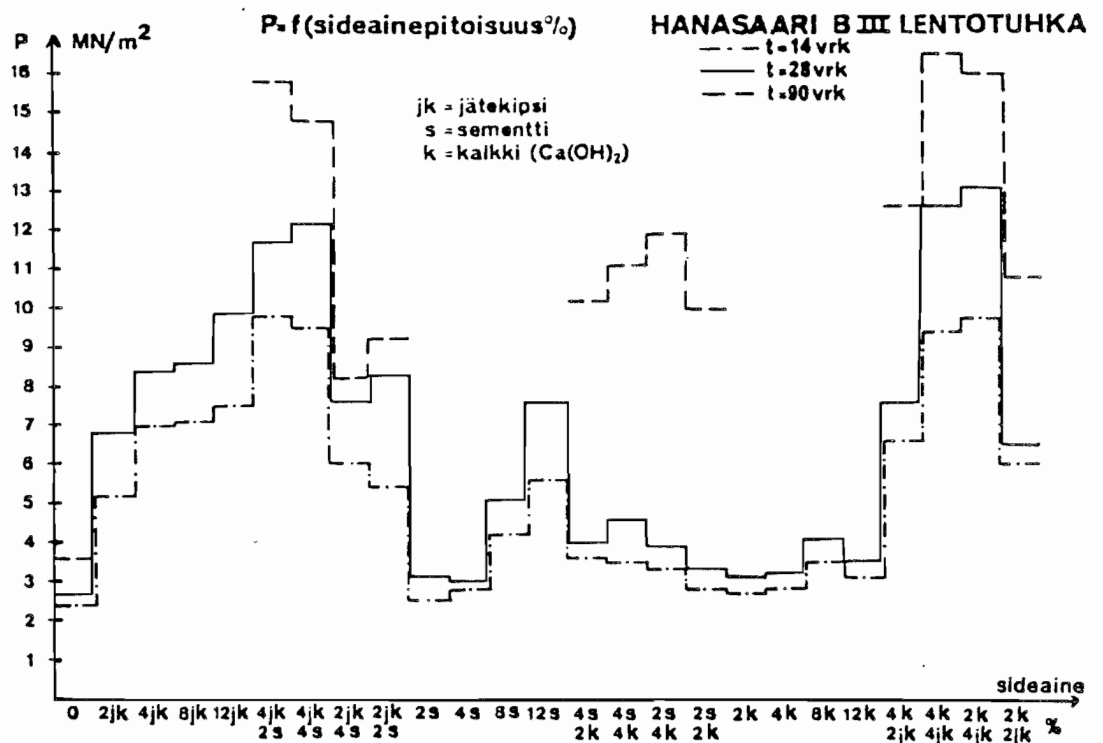
Taulukko 13. Hanasaaren B-laitoksen lentotuhkanäytteen B III puristuslujuudet ilman lisäsideaineita ja kahden sideaineen seoksia käyttäen.

KOEKAPPALEEN KOOSTUMUS	PURISTUSLUJUUS (MN/m <sup>2</sup> )		
	14 vrk	28 vrk	90 vrk
B	2.4	2.7	3.6
B + 2 % kalkkia + 2 % sementtiä	2.8	3.3	10.0
B + 2 % kalkkia + 4 % sementtiä	3.6	4.0	10.2
B + 4 % kalkkia + 2 % sementtiä	3.3	3.9	11.9
B + 4 % kalkkia + 4 % sementtiä	3.5	4.6	11.1
B + 2 % jätäkipsiä + 2 % kalkkia	6.0	6.5	10.8
B + 2 % jätäkipsiä + 4 % kalkkia	6.6	7.6	12.6
B + 4 % jätäkipsiä + 2 % kalkkia	9.8	13.1	16.0
B + 4 % jätäkipsiä + 4 % kalkkia	9.4	12.6	16.5
B + 2 % jätäkipsiä + 2 % sementtiä	5.4	8.3	9.2
B + 2 % jätäkipsiä + 4 % sementtiä	6.0	7.6	8.2
B + 4 % jätäkipsiä + 2 % sementtiä	9.8	11.7	15.8
B + 4 % jätäkipsiä + 4 % sementtiä	9.5	12.2	14.8





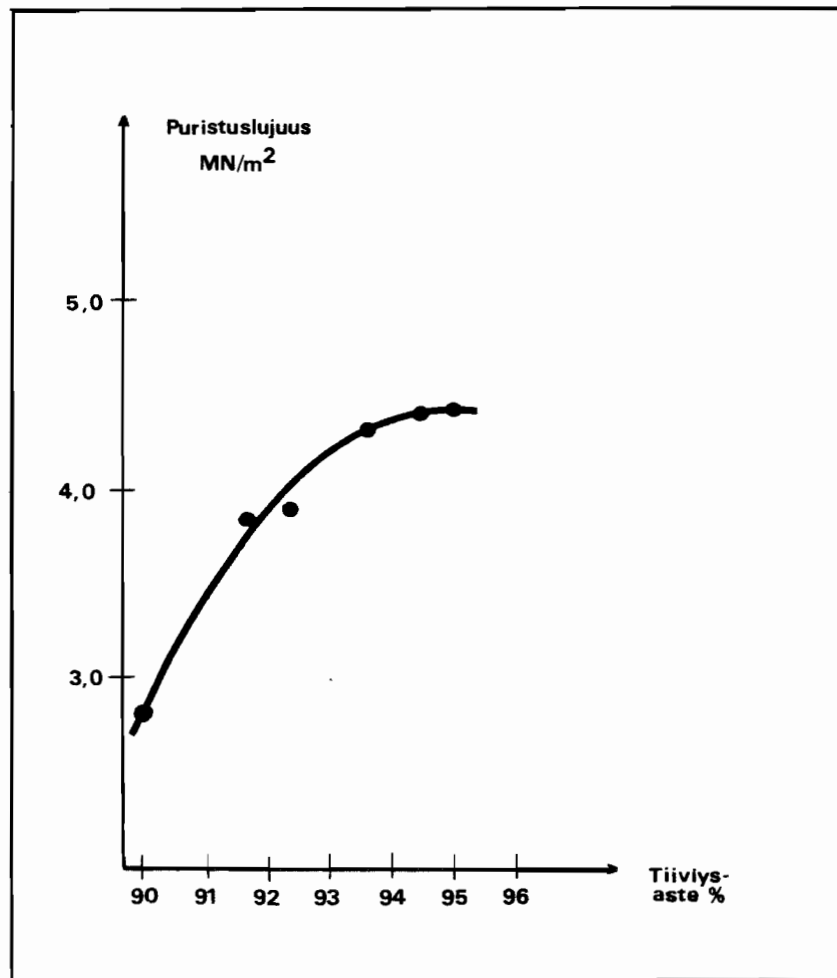
Kuva 12. Hanasaaren A-laitoksen lentotuhka-näytteen A III puristuslujuudet käytetyillä sideainevariaatioilla.



Kuva 13. Hanasaaren B-laitoksen lentotuhka-näytteen B III puristuslujuudet käytetyillä sideainevariaatioilla.

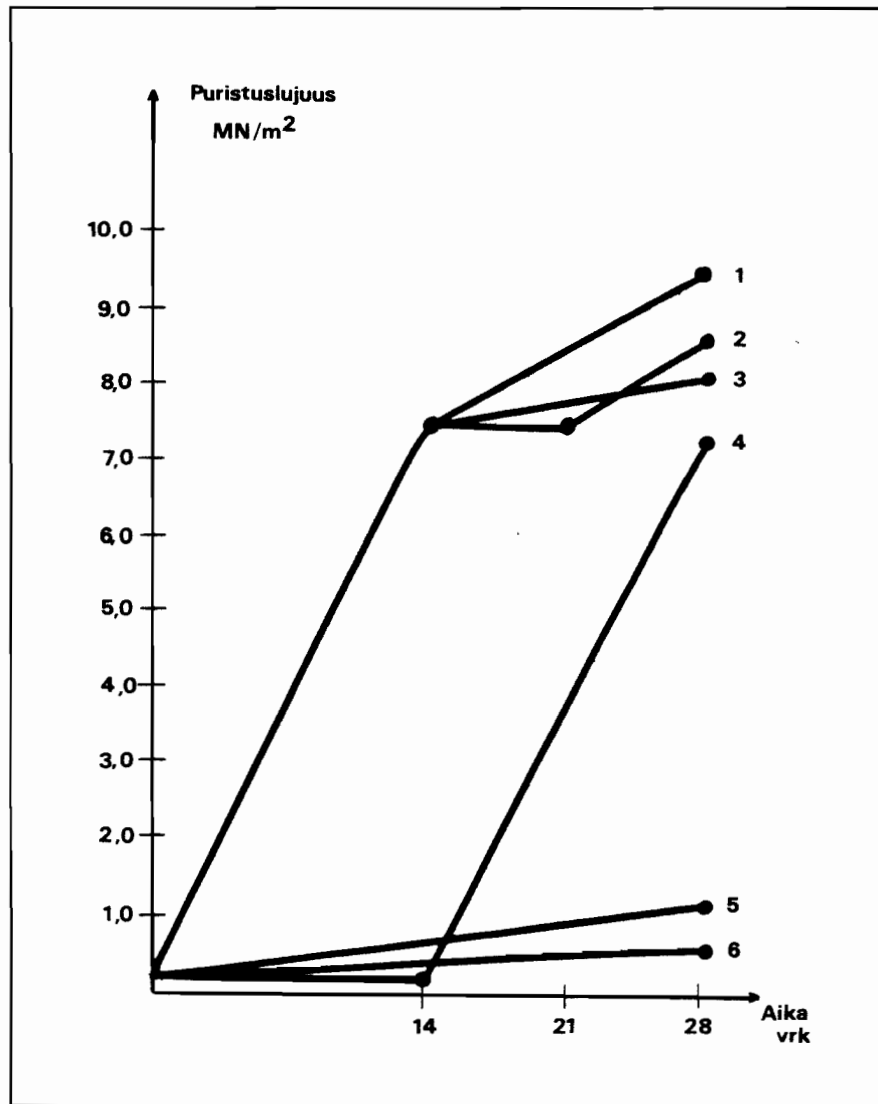
Taulukko 14. Hanasaaren lentotuhkien 14 ja 28 vuorokauden puristuslujuudet ja eräitä lujuudenkehitykseen mahdollisesti vaikuttavia tekijöitä. Näytteillä A I...A IV, Ak 1 1...8, Ak 2 9...16, B I...B IV, Bk 3 1...10 ja Bk 4 16...24 tiiviysaste D = 94...95 % parannetun proctor-kokeen maksimitiiveydestä, näytteillä A V, Ak 2 17...21, B V, Bk 3 11...15 ja Bk 4 25...30 D = 90...92 %.

Näyte Luokka / pvm	Herkustus- näytös (%)	$\lambda_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	<0,075 (%)	<0,053 (%)	Alaigoluu (cm <sup>2</sup> /g)	SO <sub>2</sub> (%)	CaO (%)	P <sub>16</sub> (kg/m <sup>2</sup> )	P <sub>28</sub> (kg/m <sup>2</sup> )	
A I	12.7.1979	-	13.0	80.2	-	-	-	4.2	4.8	
A II	11.1979	3.3	14.1	80.0	(75.0)	-	-	7.1	8.9	
A III	10.1.1980	9.3	12.0	78.1	(71.3)	1.50	0.54	4.8	5.8	
A IV	25.3.1980	9.0	-	78.4	75.4	1.17	0.95	4.4	5.3	
A V	1.9.1981	-	-	79.3	-	1.34	-	1.7	2.0	
AK 1	1	1.1980	7.4	12.0	73.9	2800	1.38	0.91	3.4	4.7
	2	30.1.1980	8.2	11.5	77.3	2800	1.22	0.81	3.3	3.7
	3	1.2.1980	11.5	11.2	71.4	3400	0.95	1.10	3.4	3.5
	4	25.1.1980	12.6	10.8	70.0	3400	1.40	1.05	3.0	3.4
	5	28.1.1980	9.2	11.2	74.7	3600	1.09	0.82	3.3	3.4
	6	1.1980	10.1	11.2	74.2	4100	1.48	0.83	3.4	3.9
	7	1.1980	11.6	11.8	71.5	3400	1.16	0.97	3.9	4.9
	8	1.1980	12.4	10.3	68.1	3400	1.40	0.70	2.3	2.4
AK 2	9	24.1.1980	10.3	12.2	81.9	3200	0.96	1.15	2.5	2.7
	10	31.1.1980	8.1	12.0	75.7	3300	1.02	1.18	3.1	3.4
	11	29.1.1980	4.0	11.7	70.7	2100	0.66	1.55	2.4	2.8
	12	1.2.1980	6.4	12.1	73.2	2900	0.95	1.21	2.4	2.6
	13	25.1.1980	10.1	11.6	77.3	3200	1.04	0.83	1.9	2.0
	14	28.1.1980	5.5	12.6	63.9	2600	0.85	0.88	2.4	2.7
	15	1.1980	7.6	12.5	75.8	3200	1.08	1.44	2.4	3.1
	16	23.1.1980	4.1	12.4	58.8	2000	0.65	1.52	1.0	1.5
	17	14.5.1981	6.4	11.9	70.7	-	0.47	0.07	0.1	0.1
	18	15.5.1981	4.6	11.0	77.6	-	0.37	0.18	0.1	0.1
	19	18.5.1981	8.1	10.5	74.0	-	0.56	0.12	0.2	0.2
	20	19.5.1981	12.3	11.3	68.8	-	0.52	0.24	0.2	0.3
	21	20.5.1981	10.3	11.2	59.2	-	0.67	0.27	0.1	0.1
B I	12.7.1979	-	14.2	81.0	-	-	-	3.4	3.1	
B II	11.1.1979	5.5	14.4	77.0	74.2	-	0.70	-	1.6	1.9
B III	21.1.1980	2.8	14.7	85.6	(82.5)	-	0.74	0.51	2.4	2.7
B IV	15.4.1980	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B V	1.9.1981	-	-	81.1	-	-	-	0.4	0.5	
Bk 3	1	27.2.1980	3.8	13.7	77.3	76.1	0.66	0.24	2.1	2.3
	2	27.2.1980	4.6	13.6	71.6	67.1	0.42	0.07	1.1	1.1
	3	29.2.1980	5.1	14.3	86.3	85.9	0.64	0.29	2.0	2.0
	4	3.3.1980	4.0	14.4	89.0	88.2	0.82	0.16	2.2	2.6
	5	4.3.1980	3.6	14.7	84.9	79.1	0.82	0.04	2.1	2.4
	6	5.3.1980	3.9	13.8	85.4	84.6	0.73	0.39	2.6	2.8
	7	6.3.1980	4.2	13.8	83.7	80.1	0.65	0.08	2.0	1.6
	8	7.3.1980	4.3	14.2	82.0	76.0	0.63	0.07	1.4	1.6
	9	11.3.1980	3.5	14.1	88.5	84.9	0.79	0.21	2.1	3.0
	10	12.3.1980	2.8	15.0	86.9	86.1	0.94	0.76	3.1	5.4
	11	18.5.1981	5.6	12.6	84.8	80.8	0.50	0.16	0.4	0.6
	12	19.5.1981	4.8	12.2	87.0	82.8	0.42	0.22	0.1	0.2
	13	20.5.1981	3.5	12.3	84.6	79.5	0.34	0.25	0.3	0.4
	14	21.5.1981	2.9	13.0	83.0	78.1	0.26	0.25	0.3	0.4
	15	22.5.1981	2.6	13.1	87.8	83.3	0.29	0.29	0.3	0.4
Bk 4	16	27.2.1980	1.4	15.0	87.6	82.0	0.58	0.06	1.6	4.4
	17	28.2.1980	1.6	14.9	91.2	88.0	0.63	0.14	2.0	2.2
	18	29.2.1980	2.6	14.7	86.1	78.1	0.60	0.11	1.8	2.5
	19	3.3.1980	3.5	14.9	87.4	85.0	1.02	1.13	2.6	3.7
	20	5.3.1980	1.2	15.2	90.1	86.6	0.80	0.27	2.8	2.7
	21	6.3.1980	1.0	15.3	91.0	84.1	0.67	0.24	1.3	2.0
	22	7.3.1980	1.4	15.0	89.2	84.3	0.46	0.12	1.9	1.8
	23	11.3.1980	2.2	15.0	82.2	75.8	0.90	0.36	1.5	3.9
	24	12.3.1980	2.1	15.6	93.1	86.9	(1.05)	0.93	3.1	4.7
	25	18.5.1981	1.0	12.8	80.3	85.3	0.43	0.20	0.8	0.7
	26	19.5.1981	1.9	13.1	79.7	73.9	0.29	0.29	0.9	1.0
	27	20.5.1981	2.3	12.9	82.3	76.7	0.26	0.29	0.3	0.5
	28	21.5.1981	2.0	13.0	85.8	82.8	0.41	0.23	1.0	1.1
	29	22.5.1981	7.2	11.5	88.7	82.9	0.61	0.37	0.4	0.6
	30	1.1981	-	13.6	-	-	-	0.13	0.1	0.1



Kuva 14. Tiiviyysasteen vaikutus 14 vuorokauden puristuslujuuteen, lentotuhkanäyte A III.

Kuvasta 14 nähdään, että tiiviyysasteella  $D = 94 \dots 95 \%$  saavutetaan 14 vuorokauden maksimipuristuslujuus, eikä tätä suuremmilla  $D$ :n arvoilla liene enää merkitystä. Sen sijaan tiiviyysasteen laskeminen vähentää voimakkaasti puristuslujuuden arvoja ja tiiviyysasteella  $D = 90 \%$  nämä ovat enää vain noin 60 % maksimiarvosta. Koe tehtiin vastaavasti myös 28 vuorokauden ikäisille koe-kappaleille, joilla tiiviyysaste vaikutti samalla tavoin.



Kuva 15. Lämpötila- ja sääolojen vaikutus lentotuhkan lujuudenkehitykseen, näyte A II.

#### Säilytysaika ja -tapa

- |   |   |
|---|---|
| 1 | 28 vuorokautta (N)  |
| 2 | 14 vuorokautta (N) + 7 vuorokautta (-20 °C) + 7 vuorokautta (N)                             |
| 3 | 14 vuorokautta (N) + 14 vuorokautta (veden sisässä, 22...24 °C)                             |
| 4 | 14 vuorokautta (-20 °C) + 14 vuorokautta (N)  |
| 5 | 28 vuorokautta (huoneenilmassa, 22...24 °C)   |
| 6 | 28 vuorokautta (ulkoilmassa talvella, ± 0,5...-22 °C)                                       |
| N | = normaalisäilytys tiiviisti muovikelmuun käärittynä kosteuden säilyttämiseksi, 22...24 °C. |

Kuvasta 15 voidaan muun muassa päätellä, että lentotuhkan lujittumisreaktiot käynnistyvät uudestaan pakkaskauden loputtua. Reaktiot käynnistyvät tiivistämisen jälkeen siinäkin tapauksessa, että juuri tiivistetty rakenne on välittömästi jäänyt. Lujittumista tapahtuu myös veden sisässä, kunhan ennen veteen asettamista rakenteella on riittävän suuri lujuus. Lujuus jää lähes olemattomaksi, mikäli tiivistetty tuhkarakenteen huokosten vesi pääsee haihtumaan välittömästi rakentamisen jälkeen, mutta todennäköistä on, että reaktiot vilkastuvat kun kosteutta lisätään. Lujittumista ei tapahdu pakkasessa. Suoran 6 lievästi nouseva trendi voi johtua siitä, että koekappaleet joutuivat sekä valmistamisen että sulamisen jälkeen olemaan yhteensä muutamia tunteja huoneen lämpötilassa ja kyseessä on erittäin voimakkaasti lujittuva lentotuhkanäyte.

Taulukossa 14 esitetyistä ominaisuuksista hehkutushäviö, hienoainespitoisuudet  $< 0,074$  ja  $< 0,053$  sekä  $SO_2$ -pitoisuudet on määritetty energialaitoksen kemian laboratoriossa. Blaine-luvun määrittäminen on tilattu Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen betoni- ja silikaattitekniikan laboratoriolta. Kuivatilavuuspaino  $\rho_d$  on määritetty koekappaleiden tekemisen yhteydessä Kyläsaaren laboratoriossa. Lentotuhkien sisältämät vapaan kalkin (CaO) pitoisuudet on määritetty Kyläsaaren laboratoriossa liuottamalla vapaa kalkki vedettömään glykoliin, jolloin syntyy emäksinen liuos, jonka emäksisyys vastaa CaO:n määrää. Suodattamisen jälkeen liuos on titrattu käyttämällä 0,1 normaalista suolahappoa (0,1n HCl). Vapaan kalkin määrä painoprosentteina on laskettu käyttäen seuraavaa yhtälöä:

$$\text{Vapaa CaO} = \frac{V \times K \times 0,0028 \times 100}{a} \quad (4)$$

jossa

- V = titraukseen käytetyn 0,1n HCl:n määrä millilitroina (ml)
- a = kuivan lentotuhkan määrä grammoina (g)
- 0,0028 = CaO:n määrä grammoina vastaten 1 ml:aa 1n HCl:a

K = kerroin  $\frac{n}{0,1}$

n = HCl-titrientin normaalisuus.

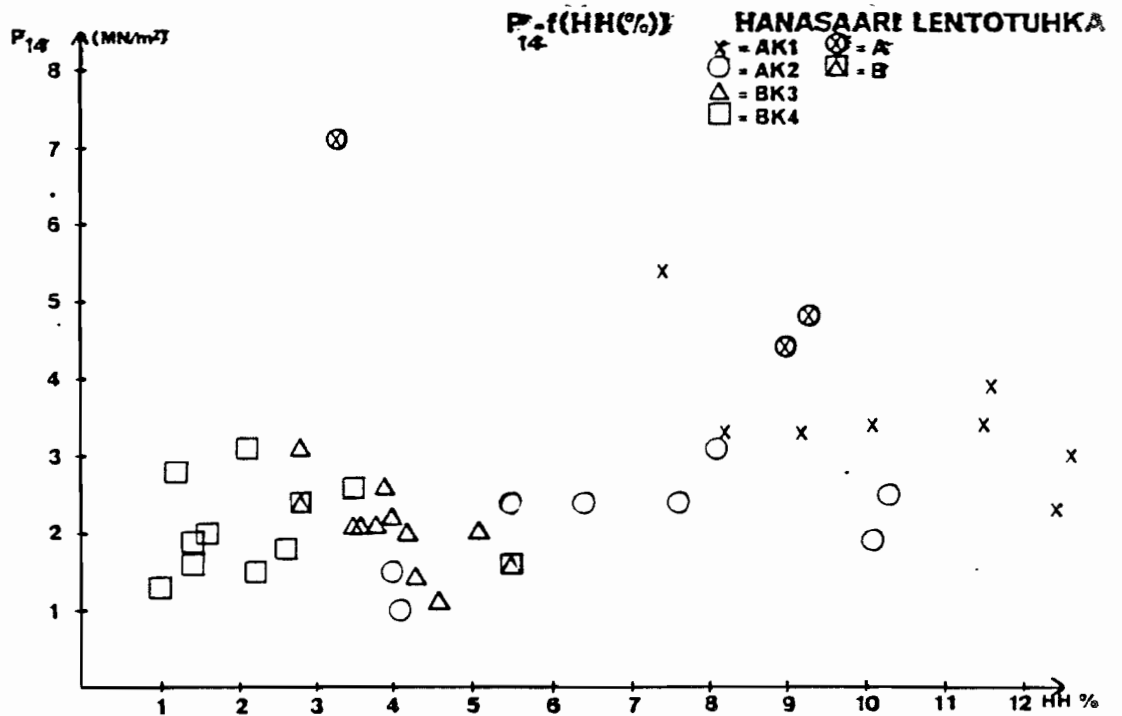
Menetelmä esitetään puolalaisessa standardissa n<sup>o</sup> BN-63/6722-02: Motorways. Application of fly ash to soil stabilization.

Kuvissa 16...21 on esitetty puolalaisen lentotuhkan puristuslujuuksien ja tutkittujen ominaisuuksien mahdollinen riippuvuus pistejoukkoina. Todetaan aikaisemmasta käsityksestä poiketen, että jäännöshiili ei lisääntyessään heikennä lujittumista, kun sen määrä vaihtelee 0 ja 12 painoprosentin välillä. Lisäksi havaitaan, että puolalaisella lentotuhkalla SO<sub>3</sub>-pitoisuuden lisääntyessä kasvavat puristuslujuudet selvästi, kun SO<sub>3</sub>-pitoisuus vaihtelee 0 ja 1,5 painoprosentin välillä. Vapaan kalkin määrä ei näytä vaikuttavan odotetulla tavalla.

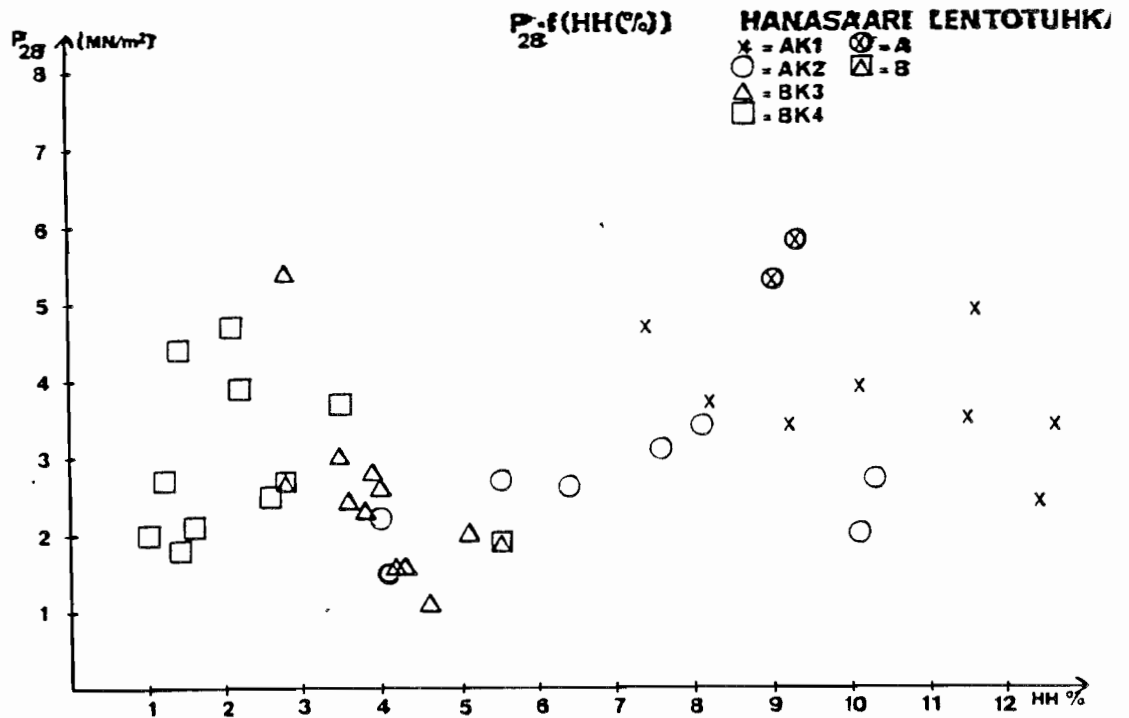
Syy-yhteydet ovat ilmeisesti niin monista tekijöistä riippuvia, että yhden muuttujan vaikutusta ei voida tarkastella erillisenä. Kuvien tärkein anti lienee siinä, että havaitaan konkreettisemmin ongelmakentän laajuus. Käytännön kannalta on tärkeintä tietää lentotuhkatyyppien lujuuksien vähimmäisarvot ja menetelmät, joilla näitä voidaan nostaa kentällä vaaditulle tasolle.

Amerikkalaisen ja englantilaisen lentotuhkan SO<sub>3</sub>-pitoisuudet ovat pienempiä kuin puolalaisen lentotuhkan ja ne vaihtelevat tutkituilla näytteillä 0,3 ja 0,7 painoprosentin välillä, taulukko 14. Niillä ja kyseisten lentotuhkanäytteiden puristuslujuuksilla ei näytä olevan samanlaista keskenäistä riippuvuutta kuin puolalaisilla tuhkillä, mutta kuvien 18 a ja 18 b pistejoukkoihin sijoitettuna ne vahvistavat SO<sub>3</sub>:n ja puristuslujuuden riippuvuutta.

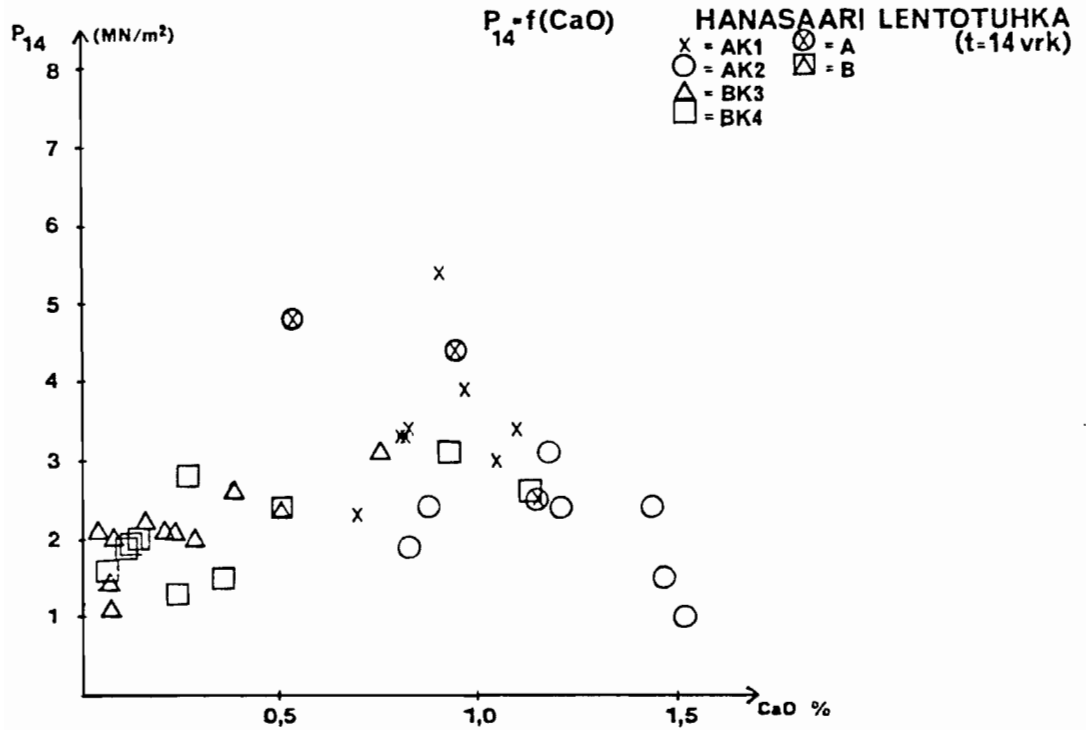
Vapaan kalkin määrä on amerikkalaisilla ja englantilaisilla lentotuhkanäytteillä selvästi alhaisempi kuin puolalaisilla. Niillä saavutettavat puristuslujuudet ovat myös selvästi alhaisempia kuin puolalaisilla, mikä tukee odotetusti vapaan kalkin tärkeyttä lujittumisprosessissa, taulukko 14.



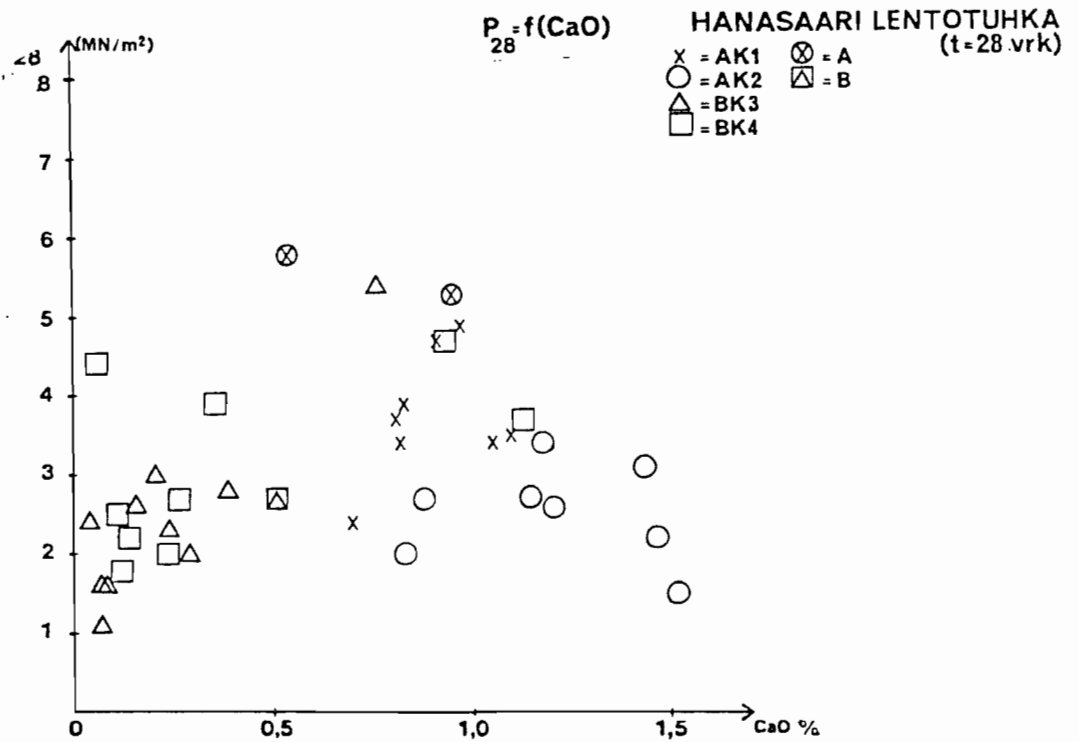
Kuva 16 a. Puolalaisen lentotuhkan 14 vuorokauden puristuslujuuden riippuvuus heikutushäviöstä (jäännöshiilipitoisuudesta).



Kuva 16 b. Puolalaisen lentotuhkan 28 vuorokauden puristuslujuuden riippuvuus heikutushäviöstä (jäännöshiilipitoisuudesta).

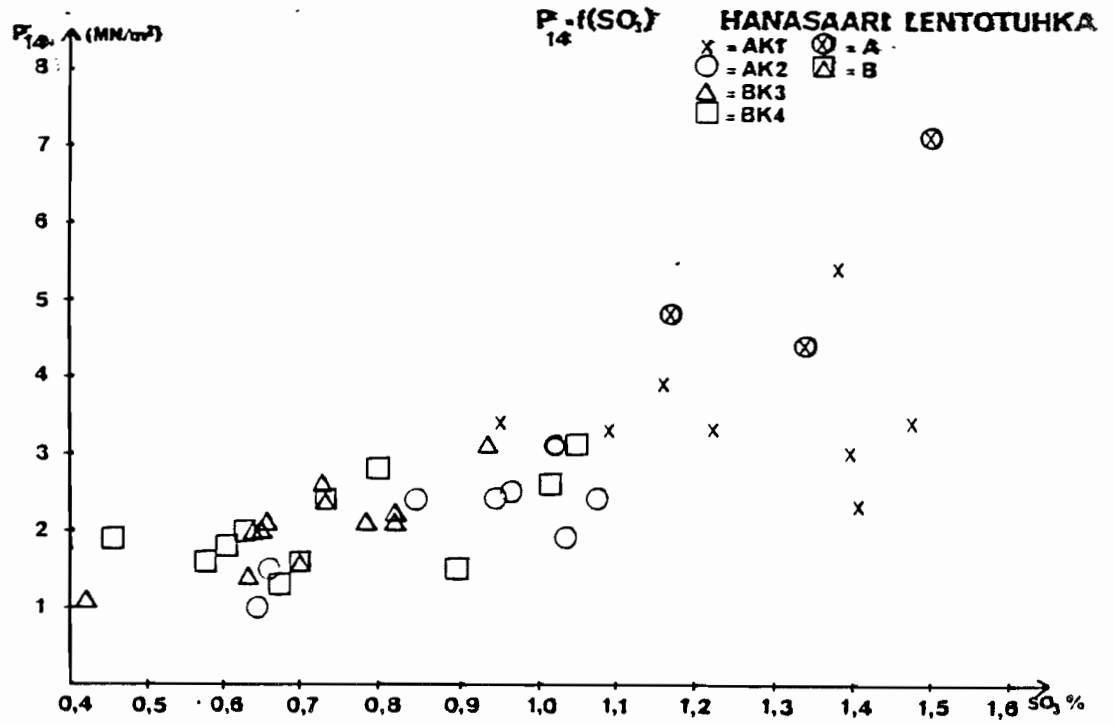


Kuva 17 a. Puolalaisen lentotuhkan 14 vuorokauden puristuslujuuden riippuvuus vapaan kalkin määrästä.

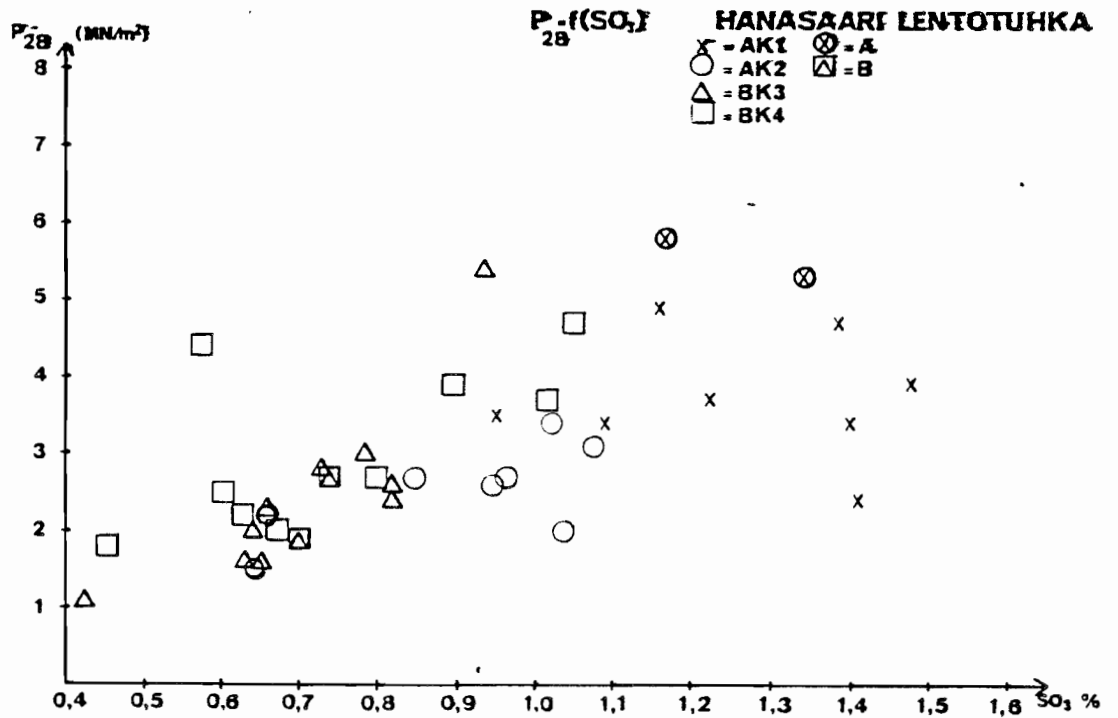


Kuva 17 b. Puolalaisen lentotuhkan 28 vuorokauden puristuslujuuden riippuvuus vapaan kalkin määrästä.

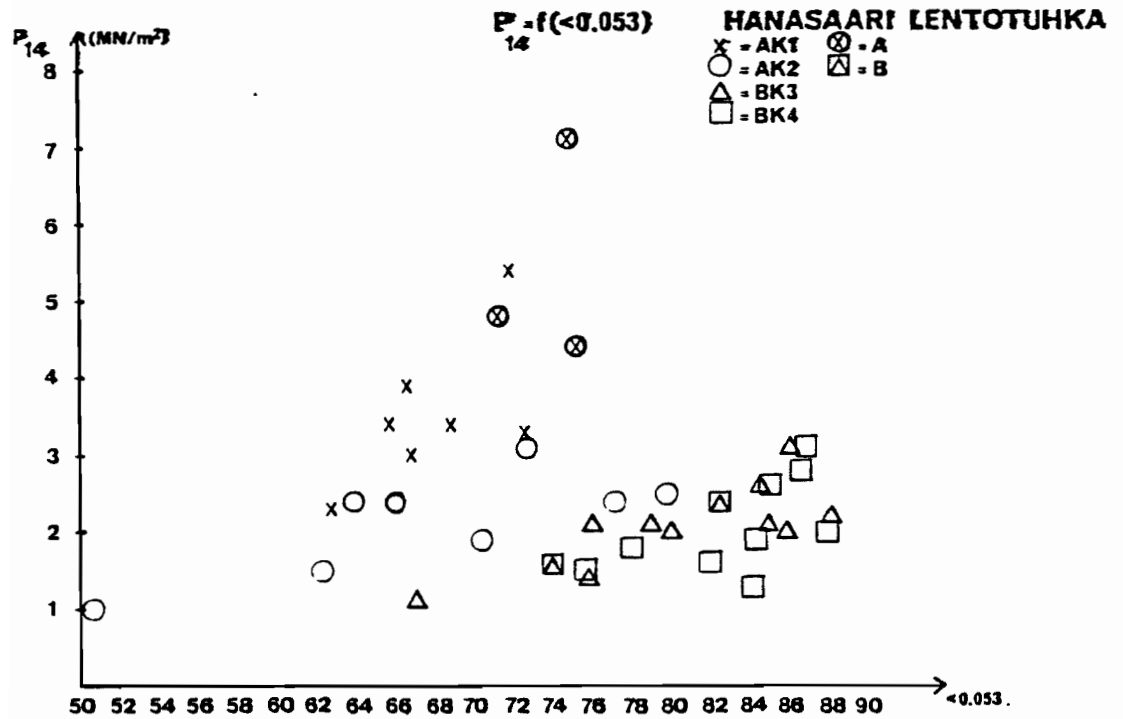




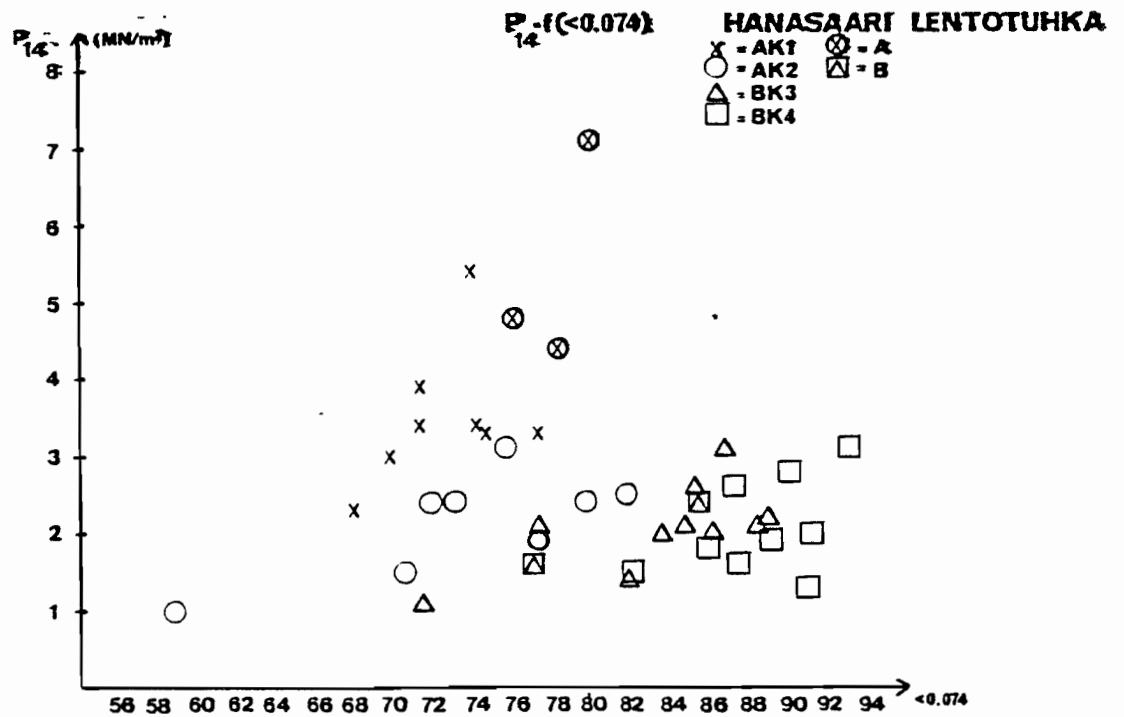
Kuva 18 a. Puolalaisen lentotuhkan 14 vuorokauden puristuslujuuden riippuvuus SO<sub>3</sub>-pitoisuudesta.



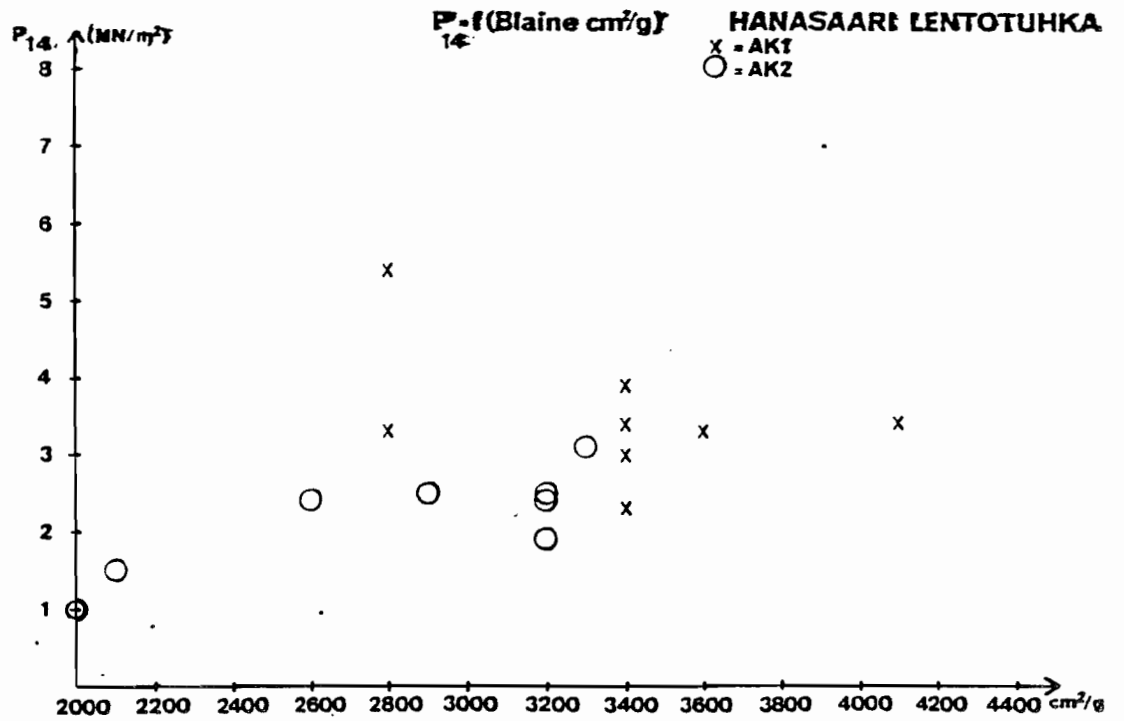
Kuva 18 b. Puolalaisen lentotuhkan 28 vuorokauden puristuslujuuden riippuvuus SO<sub>3</sub>-pitoisuudesta.



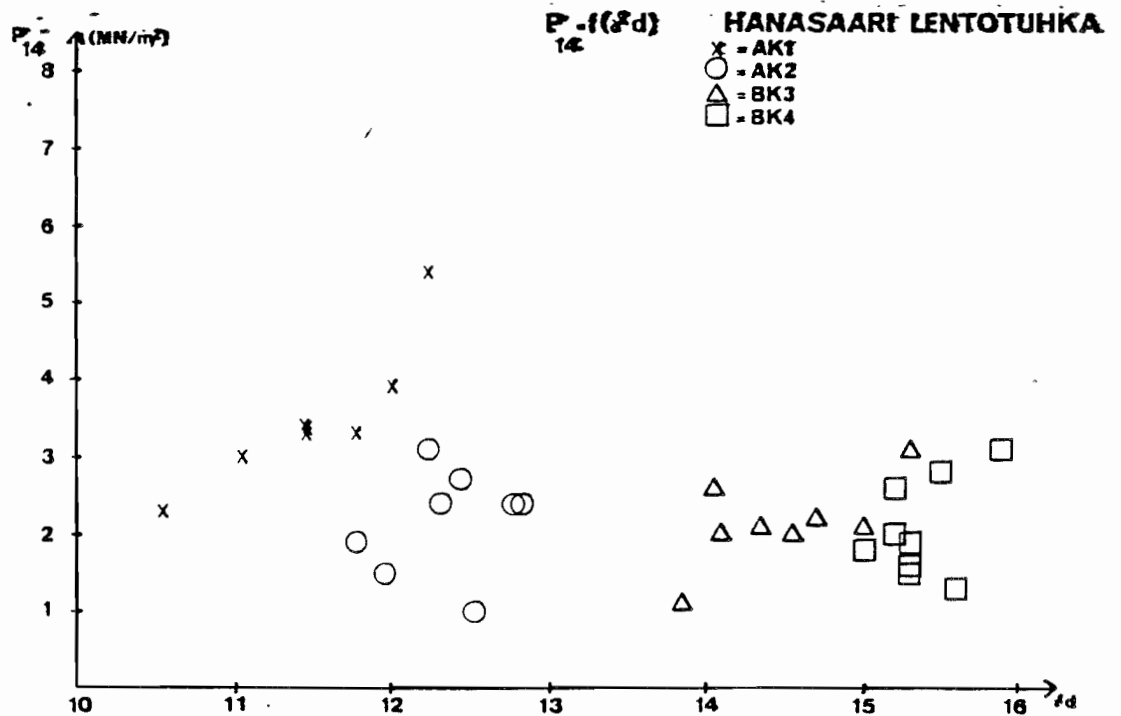
Kuva 19 a. Puolalaisen lentotuhkan 14 vuorokauden puristuslujuuden riippuvuus hienoainespitoisuudesta ( $< 0,053$ ).



Kuva 19 b. Puolalaisen lentotuhkan 14 vuorokauden puristuslujuuden riippuvuus hienoainespitoisuudesta ( $< 0,074$ ).



Kuva 20. Puolalaisen lentotuhkan 14 vuorokauden puristuslujuuden riippuvuus Blaine-luvusta.



Kuva 21. Puolalaisen lentotuhkan 14 vuorokauden puristuslujuuden riippuvuus kuivatilavuuspainosta.

Yhteenvedona puristuslujuuskokeiden tuloksista voidaan todeta, että saman voimalaitoksen polttoprosessissa syntyvien lentotuhkien lujittumisominaisuudet voivat vaihdella erittäin paljon samaakin kivihiilityyppiä käytettäessä. Hanasaaren voimalaitoksen 28 vuorokauden puristuslujuus on tutkituilla näytteillä vaihdellut 0,1 ja 8,9 MN/m<sup>2</sup> välillä. Puolalaisen lentotuhkan 28 vuorokauden lujuus on vaihdellut 1,1 ja 8,9 MN/m<sup>2</sup> välillä. Amerikkalaisen ja englantilaisen tuhkan lujuudet ovat keskimäärin selvästi alhaisemmat vaihdellen 0,1 ja 2,0 MN/m<sup>2</sup> välillä. Jälkimmäisten puristuslujuustuloksiin vaikuttavat jonkin verran heikentävästi edellisiä alhaisempi tiiviysaste, kuva 14.

Käytännön kannalta tärkein lujuuden kehitysaika on laboratorio-oloissa  $\leq 7$  vuorokautta, mikä vastaa lämpösummia  $\leq 126$  vrk °C, kun oletetaan, että lujittumista tapahtuu vain lämpötiloissa  $\geq +4$  °C. Kenttäoloissa saavutetaan Helsingissä toukokuussa 7 vuorokauden laboratoriolujuus aikaisintaan 1,5...3 viikon, kesä- elokuussa 1...2,5 viikon ja syyskuussa 2...3 viikon kuluessa.

Mikäli lentotuhkarakenteelta vaaditaan jo varhaisessa vaiheessa suurta alkulujuutta, on tuhkan joukkoon syytä lisätä sideainetta. Kalkki on tutkimusten mukaan parempi yleisideaine kuin sementti ja jo 2...4 % pitoisuudella saavutetaan kaikilla Hanasaaren lentotuhkilla vähintään 7 vuorokauden laboratoriolujuus 1,0 MN/m<sup>2</sup>. Jätekipsi on ilmeisesti vielä parempi alkulujittaja, kuva 9. Sideaineyhdistelmien käyttäminen ei liene hyvistä lujittamisominaisuuksista huolimatta kenttätöissä useinkaan tarkoituksenmukaista.

Erittäin aktiivisella lentotuhkalla voidaan stabiloida pohjatuhkaa, taulukko 15, mutta tarvittava lentotuhkamäärä on oltava ilmeisesti vähintään puolet koko seoksesta. Koska lentotuhka ei yleensä ole niin aktiivista kuin kokeessa käytetty tuhka, on käytännön seoksissa käytettävä jotain aktivoivaa lisäsideainetta, esimerkiksi kalkkia. Lentotuhkalla lienee sopivassa suhteessa pohjatuhkan kanssa käytettäessä hienoaaineksena pohjatuhkaa myös mekaanisesti stabiloiva vaikutus. Pelkästään rakeisuuden parantamiseen käytettävät lentotuhkamäärät ovat kuitenkin pienemmät kuin kemialliseen lujittumiseen käytettävät.

Taulukko 15. Hanasaaren A-laitoksen lentotuhkan ja B-laitoksen pohjatuhan seoksen 14 ja 28 vuorokauden puristuslujuudet. Lentotuhka on erittäin hyvin lujittuvasta näytteestä A II.

KOEKAPPALEEN KOOSTUMUS	PURISTUSLUJUUS (MN/m <sup>2</sup> )	
	14 vrk	28 vrk
Ha A lt	7.1	8.9
Ha A lt + Ha B pt 1:2	0.5	0.8
Ha A lt + Ha B pt 1:1	1.2	1.8
Ha A lt + Ha B pt 2:1	1.9	2.1

### 3.3.3

#### Lentotuhkan vetolujuus

Kiinteiltä rakenteilta vaaditaan kykyä kestää taivutuksen yhteydessä syntyvät vetojännitykset. Tämän vuoksi esimerkiksi betoniin sijoitetaan vetoteräkset. Lujittuneen lentotuhkan vetolujuuden ja puristuslujuuden suhde on samaa luokkaa kuin betonilla eli 0,18...0,20.

Koska lujittuneen lentotuhkan vetolujuus ei riitä vaativissa perusrakenteissa, sitä on pyrittävä lisäämään. Eräs keino on asentaa lentotuhkan sisään teräsverkot molemmin puolin laattaa. Nykyään on saatavissa myös muoviverkkoja, joiden vetolujuus on teräksen luokkaa. Nämä saattavat soveltua teräksiä paremmin lentotuhkarakenteisiin.

### 3.4

#### Kokoonpuristuvuus ja kantavuus

##### 3.4.1

#### Painumatarkastelun periaatteet

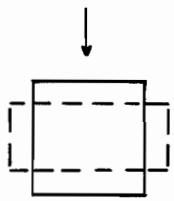
Maapohjan painumistapahtuma on hyödyllistä jakaa fysikaalisesti erilaisiin komponentteihin, osapainumiin. Kun näiden komponenttien luonne tunnetaan, painuman matemaattinen laskeminen hallitaan paremmin. Kokonaispainuma voidaan kaavamaisesti esittää neljän osapainuman summana.

$$S = S_i + S_p + S_s + S_t \quad (5)$$

jossa

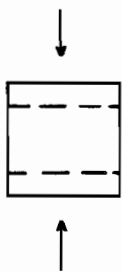
$S$  = kokonaispainuma  
 $S_i$  = alkupainuma  
 $S_p$  = konsolidaatiopainuma  
 $S_s$  = jälkipainuma  
 $S_t$  = maan osittaisesta plastisoitumisesta johtuva hitaasti tapahtuva painuma.

Alkupainuma



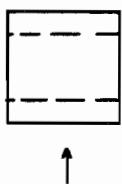
Alkupainuma on fysikaaliselta luonteeltaan leikkausjännityksistä aiheutuvaa painumaa. Sen tapahtuessa pysyy painuvan aineksen tilavuus muuttumattomana, vertaa oheinen kuva. Alkupainuman laskemiseksi on tunnettava aineksen kyseisiä painumisolosuhteita vastaava kimmomoduuli.

Konsolidaatiopainuma



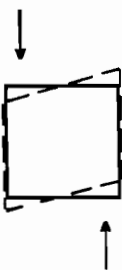
Konsolidaatiopainuma aiheutuu kuormitetun aineksen tiivistymisestä. Tällöin painuvan aineksen tilavuus pienenee. Konsolidaatiopainuma voidaan laskea ödometrikokeessa määritettyjen kokoonpuristuvuusparametrien avulla.

Jälkipainuma



Jälkipainuma on myös kuormitetun aineksen tilavuuden pienenemisestä aiheutuva painuma. Sen katsotaan alkavan silloin, kun kuormituksen johdosta syntynyt huokosveden ylipaine on hävinnyt. Jälkipainuma voidaan määrittää pitkäaikaisten ödometrikokeiden perusteella.

Maan osittaisesta plastisoitumisesta johtuva hitaasti tapahtuva painuma



Painuma aiheutuu leikkausjännityksistä. Tällöin kuormitetussa aineksessa tapahtuu oheisen kuvan mukainen muodonmuutos. Tällaisen painuman laskeminen on hankalaa. Plastisoitumisen johdosta hitaasti tapahtuva painuma tulee yleensä merkittäväksi silloin, kun varmuus rakennuspohjan murtumista vastaan on pieni.

## 3.4.2

## Ödometrikokeet

Kivihiilituhkista on määritetty ödometrikokeessa tapahtuvat painumat, kun kuormitus vaihtelee 0 ja 400 kN/m<sup>2</sup> välillä. Näytteet on valmistettu optimivesipitoisuudessa tiivistäen pudotusvasaralaitteen muotissa. Tiiviysaste on vaihdellut 90 ja 95 % välillä. Kaikkien tuhkien kokoonpuristuminen tapahtuu nopeasti, yli 75 % painumasta tapahtui ödometrikokeessa jo 15 sekunnin kuluessa.

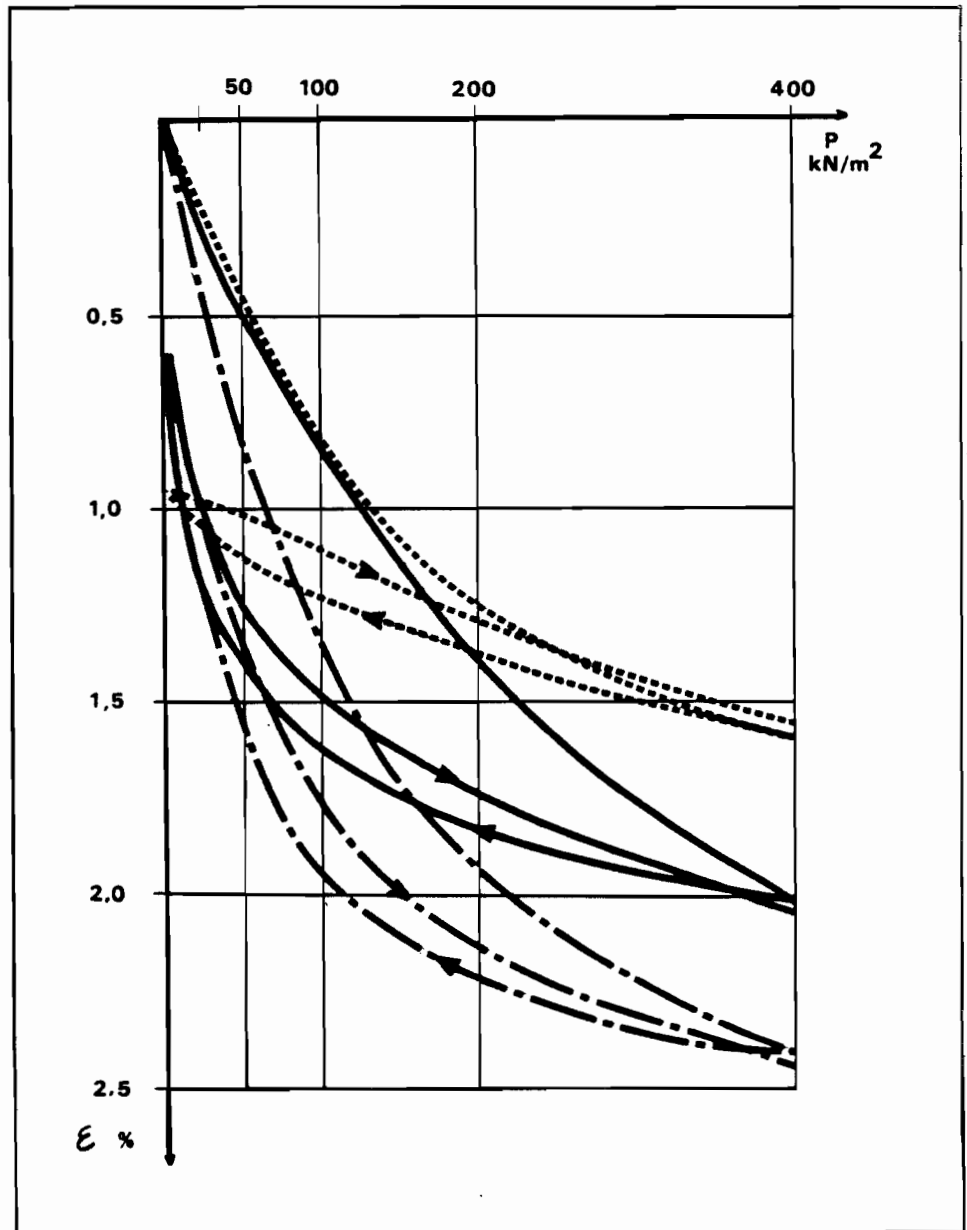
Tiivistetyn lentotuhkan kokoonpuristuminen oli 400 kN/m<sup>2</sup> kuormituksella 1...3 %. Pohjatuhkan kokoonpuristuminen oli 2...3 %. Pohjakuonan vastaavasti 5...5,5 %. Jälkimmäisten suuremmat arvot selittyvät osaksi rakeiden hauraudesta ja huokoisuudesta. Vastaavan dynaamisen kuormituksen alaisena pohjatuhkan ja pohjakuonan kokoonpuristuminen on ilmeisesti suurempi rakeiden osittaisesta rikkoutumisesta johtuen.

Kuvissa 22...24 nähdään tuhkien kokoonpuristumista esittäviä käyriä. Vertailumateriaalina on käytetty eristyshiekkää.

Tiivistetyn lentotuhkan kokoonpuristuminen on alustavien ödometrikokeiden tulosten perusteella arvioituna vähäistä. Pohjatuhkalla ja -kuonalla se on lentotuhkaan verrattuna 1,5...2,5-kertainen. Kokoonpuristuminen tapahtuu nopeasti kuormituksen lisäämisen jälkeen. Kokoonpuristuvuuteen voimakkaimmin vaikuttava tekijä on kitkamaalajien tapan materiaalin tiiviys (huokoisuus).

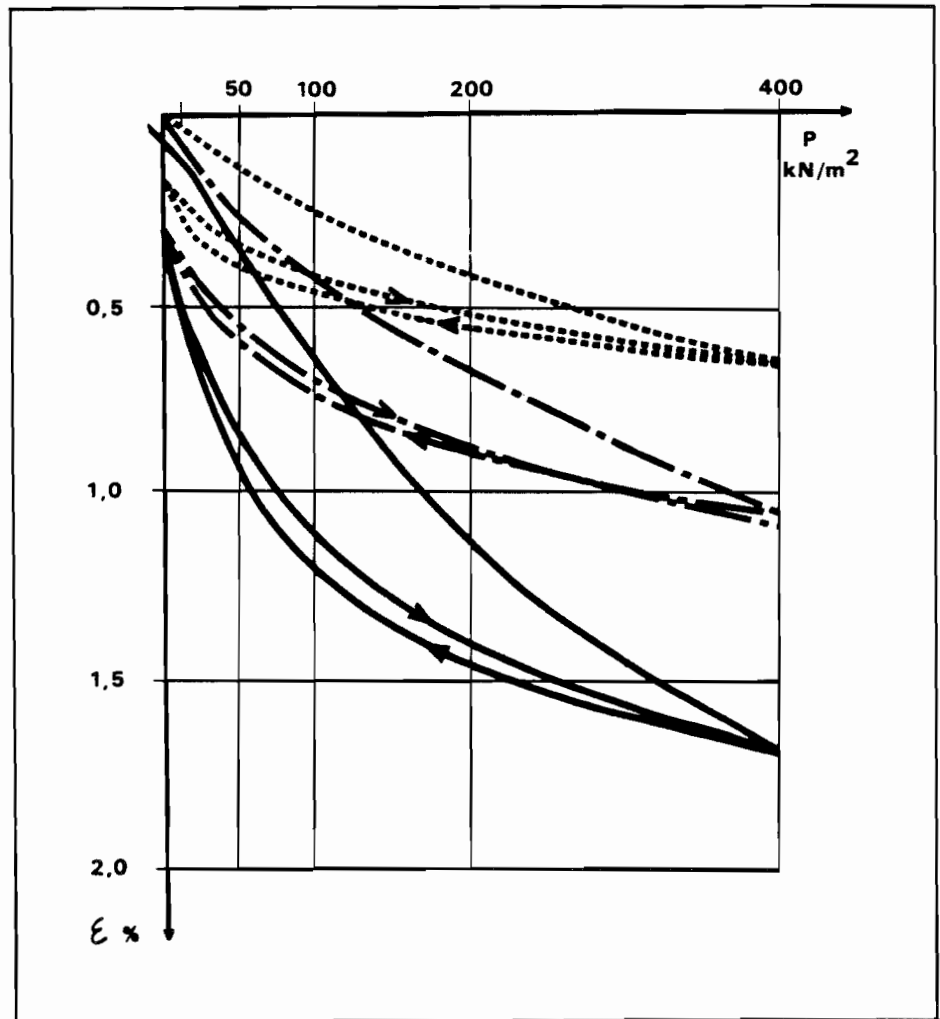
Kuvissa 22 ja 23 lentotuhkan kokoonpuristumista esittävässä käyrissä huomio kiinnittyy erityisesti siihen, että 0 vuorokauden näytteiden kokoonpuristuminen on pienempää kuin 14 ja 28 vuorokautta lujittuneiden näytteiden. Lisäksi lujittuneilla näytteillä kokoonpuristumiskäyttäytyminen on erilaista. Kuvan 22 heikosti lujittuvan tuhkan kokoonpuristuminen on 28 vuorokauden näytteellä suurempaa kuin 14 vuorokauden näytteellä, kun taas kuvan 23 hyvin lujittuvan tuhkan kohdalla asia on päinvastoin.

Tuhkan rakenteessa tapahtuu lujittumisen aikana muutoksia. Tuhkarakeiden välille syntyy muodonmuutoksia vastustavia sidoksia. Osa huokosvedestä kuluu näiden sidosten muodostamiseen. Tämä huokosveden vähentyminen on yksi mahdollinen selitys sille, että kokoonpuristuvuus saattaa lisääntyä tuhkan lujittuessa.



Kuva 22. Hanasaaren A-laitoksen lentotuhkan, näyte Ak 2 16, kokoonpuristuminen alustavassa ödometrikokeessa 0 (-----), 14 (—) ja 28 (---) vuorokauden ikäisenä. Näytteen 14 vuorokauden puristuslujuus on  $1,0 \text{ MN/m}^2$  ja 28 vuorokauden puristuslujuus  $1,5 \text{ MN/m}^2$ .

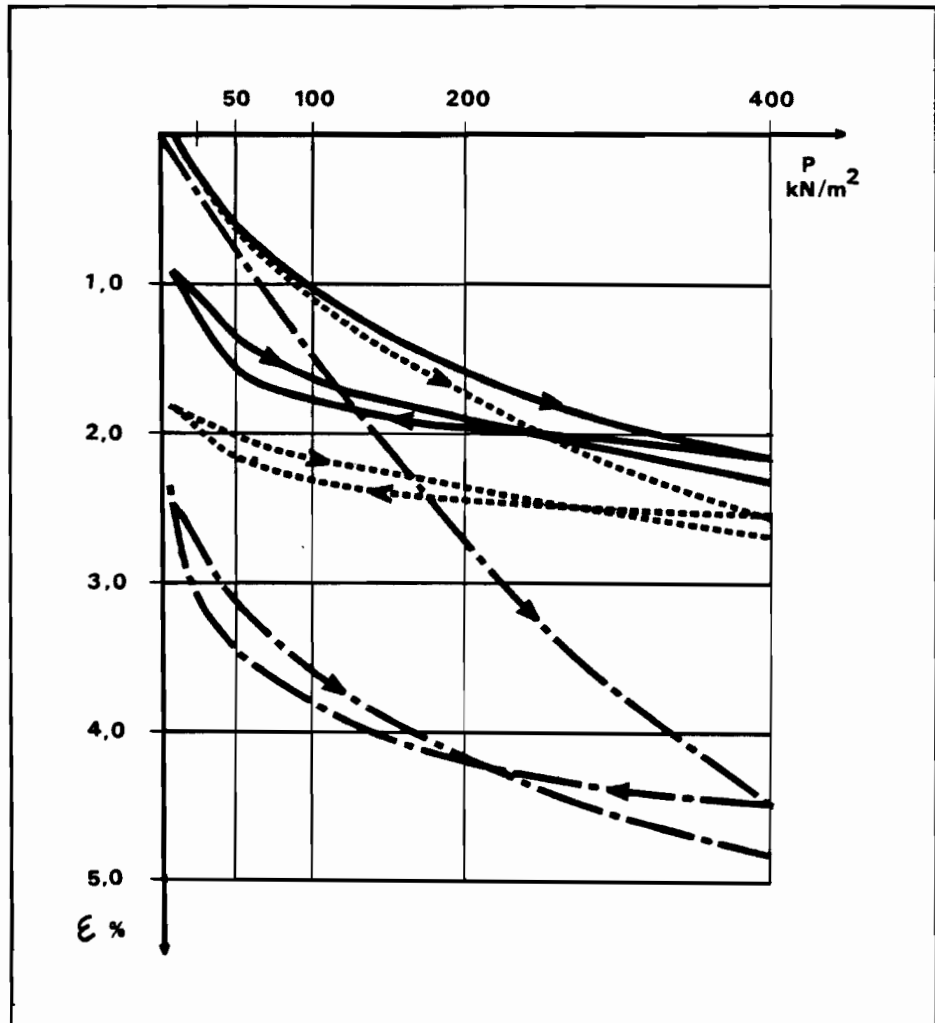




Kuva 23. Hanasaaren B-laitoksen lentotuhkan, näyte Bk 3 10, kokoonpuristuminen alustavassa ödometrikokeessa 0 (-----), 14 (—) ja 28 (---) vuorokauden ikäisenä. Näytteen 14 vuorokauden puristuslujuus on  $3,1 \text{ MN/m}^2$  ja 28 vuorokauden puristuslujuus  $5,4 \text{ MN/m}^2$ .

Tehdyissä ödometrikokeissa kaikki 14 vuorokauden tuhkat painuivat maksimikuormituksella enemmän kuin sama tuhka 0 vuorokauden ikäisenä. Ilmeisesti tuhkarakeiden välisistä sidoksista tai rakeiden sisäisestä joustavuudesta johtuen suurin osa lujittuneen tuhkan painumasta on kimmoista.

Lujittumisen edelleen jatkuessa tuhkarakeiden väliset sidokset voimistuvat ja toisaalta lisää vettä kuluu lujittumisreaktioihin. Kokoonpuristumiseen vaikuttaa tällöin ilmeisesti oleellisesti tuhkan lujuus. Tähän viittaa se, että ödometrikokeissa puristuslujuudeltaan heikot tuhkat painuivat maksimikuormituksella 28 vuorokauden ikäisinä enemmän kuin 14 vuorokauden ikäisinä. Puristuslujuudeltaan hyvän tuhkan painumat sen sijaan vähenivät.



Kuva 24. Hanasaaren B-laitoksen pohjatuikka (—), Myllypuron voimalaitoksen pohjakuonan (---) ja eristyshiekan (— · —) kokoonpuristuminen alustavassa ödometrikokeessa.

Taulukko 16. Hanasaaren lentotuhkalle alustavien ödometrikokeiden tulosten perusteella lasketut kokoonpuristuvuusparametrit.

Tuhka- näyte	Koekappaleen ikä (vrk)		
	t = 0	t = 14	t = 28
Ha Ak 2 n:o 16	m = 214 $\beta$ = 0.44 $m_2$ = 789	m = 173 $\beta$ = 0.57 $m_2$ = 362	m = 146 $\beta$ = 0.35 $m_2$ = 248
Ha Bk 3 n:o 8	m = 262 $\beta$ = 0.07 $m_2$ = 1064	m = 189 $\beta$ = 0.55 $m_2$ = 372	m = 172 $\beta$ = 0.44 $m_2$ = 324
Ha Bk 3 n:o 10	m = 525 $\beta$ = 0.65 $m_2$ = 991	m = 207 $\beta$ = 0.62 $m_2$ = 357	m = 340 $\beta$ = 0.61 $m_2$ = 616

### 3.4.3 Kantavuus

Tuhkarakenteilla on tehty kantavuuskokeita pääasiassa levykantavuuslaitteella. Myös pudotuspainolaitetta on kokeiltu. Tämä so-  
pii ainakin lentotuhkarakenteen kantavuuden  
mittaamiseen. Tulokset ovat vaihdelleet  
suuresti rakenteen tiiviyydestä, vesipitoi-  
suudesta, pohjamaan kantavuudesta ja raken-  
teen paksuudesta riippuen, eikä tässä vai-  
heessa ole pystytty saamaan aikaan luotet-  
tavaa vertailua luonnonkiviainesten ja tuh-  
kien kantavuuden välillä.

Tuhkat ovat kuitenkin käytännön havaintojen  
mukaan kantavuudeltaan samaa luokkaa kuin  
luonnonkiviainekset, lujittuneella lento-  
tuhkalla kuitenkin moninkertaiset näihin  
verrattuna. Käytännössä hyvien kantavuus-  
arvojen saavuttamiseksi on tiivistäminen  
suoritettava huolella ja lentotuhkilla li-  
säksi huolehdyttävä siitä, että vesipitoisuus  
pidetään rakentamisen aikana lähellä optimia  
tai muutaman prosentin tämän alapuolella.

Esimerkkinä lentotuhkan vaikutuksesta muun  
kiviaineksen kantavuuden parantajana voidaan  
mainita satamalaitoksen rakentama satamanos-  
turin perustuksen alainen pengeri Jätkäsa-  
ressa. Penkereen pinta-osa oli tehty murske-  
sorasta, josta hienoaines oli seulottu pois.  
Levykuormituslaitteella mitatut  $E_2$ :n arvot  
olivat 145 ja 230 MN/m<sup>2</sup> välillä ja ensim-  
mäisen kuormituksen (700 kN/m<sup>2</sup>) painuman  
arvot olivat 2,9 ja 5,9 mm välillä. Kun  
pinta stabiloitiin noin 0,2 mm syvyyteen  
täyttämällä murskekerroksen huokoset le-  
vityskonetta ja tärylevyä käyttäen Hana-  
saaren lentotuhkalla,  $E_2$ :n arvot olivat 415  
ja 760 MN/m<sup>2</sup> välillä ja ensimmäisen kuormi-  
tuksen painuman arvot olivat 1,0 ja 1,6 mm  
välillä. Lentotuhkalla pystyttiin näin paran-  
tamaan huomattavasti sekä tiivistettävyyttä  
että kantavuutta.

### 3.5 Säänkestävyys

Rakenteen säänkestävyysominaisuuksilla on  
merkitystä rakenteen pitkän ajan kestävyiden  
kannalta. Niillä tarkoitetaan muun muassa  
pakkasen, lämmönvaihtelujen ja veden aiheut-  
tamien rasitusten kestävyyttä. Säänkestävyys-  
ominaisuuksien tunteminen on tärkeää var-  
sinkin lujittuneen lentotuhkarakenteen kan-  
nalta. Lujittamattomilla tuhka-aineksilla  
näillä on merkitystä sen sijaan rakeiden  
mahdolliseen rapautumiseen. Säänkestävyys-  
ominaisuuksiin voidaan lukea myös routiminen,  
joka on yksi keskeisiä geotekniikan ongelmia.  
Sitä käsitellään kohdassa 3.6.

## 3.5.1

## Lujittuneen lentotuhkan säänkestävyys

Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen tie- ja liikennelaboratorio on tehnyt tuhkaprojektille selvityksen Hanasaaren lujitettujen lentotuhkanäytteiden säänkestävyydestä märkä - kuiva- ja jäätyminen - sulamiskokein, n:o TIE 0553. Myös lisäaineiden vaikutusta säänkestävyyteen selvitettiin.

Märkä - kuivakoe suoritettiin soveltaen normia AASHTO T135-70. Märkä - kuivakiertojen määrä oli 12. Jäätyminen - sulamiskoe noudatteli pääosin normia AASHTO T136-70. Tutkittavat tuhkanäytteet olivat hyvin lujittuvaa puolalalaista lentotuhkaa. Pienimmät 7 vuorokauden puristuslujuudet olivat noin  $2,5 \text{ MN/m}^2$ .

Märkä - kuivakokeessa kaikki koekappaleet kestivät käsittelyn. Missään koekappaleissa ei havaittu kappaleiden irtoamista eikä aineksen pehmenemistä. Ainoastaan joitakin hiushalkeamia esiintyi kappaleiden pinnoissa.

Jäätyminen - sulamiskokeessa kestävyys riippui tuhkatyypistä, sideaineesta, saavutetusta lujuudesta sekä tiiviyydestä. A-laitoksen lentotuhkasta tehdyn koesarjan 7 vuorokauden kappaleet kestivät 3...5 kiertoa vaurioitta, minkä jälkeen alkoi esiintyä hilseilyä ja pehmenemistä. B-laitoksen lentotuhkasta tehty 7 vuorokauden kappaleet vaurioituivat samalla tavoin kuin A-laitoksen tuhkalla, mutta vaurioituminen alkoi kaikilla kappaleilla jo ensimmäisen kierron jälkeen.

Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen tekemä koe on erittäin vaativa ja tulokset palvelevatkin hyvin maabetonin kaltaisten, suurta kestävyyttä vaativien maarakenteiden tekemistä.

Tuhkaprojektin tutkimusryhmä on myös selvittänyt lujittuneen lentotuhkan säänkestävyyttä. On pyritty muun muassa löytämään vastaus kysymykseen, heikkeneekö lujittunut lentotuhka, kun sen huokosissa oleva vesi jäätyy, ja mikä on vedelläkyllästysaste, jonka jäätyvä rakenne vielä sietää. Lisäksi on etsitty lentotuhkan vähimmäislujuus, jonka saavutettuaan se kestää hajoamatta veden alle joutumisen.

Vedelläkyllästysasteen vaikutus lujittuneeseen lentotuhkaan jäädytys - sulatuskokeessa;

#### Vedelläkyllästysaste

Vedelläkyllästysasteella,  $S$ , tarkoitetaan vedellä täyttyneiden huokosten suhteellista osuutta kokonaishuokostilavuudesta. Lukuarvoltaan vedelläkyllästysaste voi olla siis 0...1. Betonitekniikassa kriittinen vedelläkyllästysaste,  $S_{CR}$ , ilmoittaa kuinka suuri osa materiaalin kokonaishuokostilavuudesta voi enintään olla vedellä täyttynyt, jotta se kestäisi vaurioitumatta jäätymisen.

Vedelläkyllästysasteen vaikutusta lujittuneen lentotuhkan säänkestävyyteen tutkittiin laboratoriossa jäädytys - sulatuskokeessa. Kokeessa käytettiin Hanasaaren A- ja B-laitoksen lentotuhkanäytteitä A V ja B V.

Taulukko 17.

Lentotuhka	$\delta_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$w_{opt}$ (%)	$\delta_s$ (kN/m <sup>3</sup> )
Ha A V	11.9	28.0	18.5
Ha B V	12.6	25.0	20.5

#### Kokeen suoritus

Varsinaisia jäädytyskoe-kappaleita valmistettiin pudotusvasaralaitteella kummastakin lentotuhkalaadusta 16 kappaletta. Lisäksi tehtiin eräitä vertailukokeita varten 10 + 10 kappaletta. B-laitoksen lentotuhkaan lisättiin 2 % sammutettua kalkkia lujuuden parantamiseksi. Koe-kappaleiden tiiviysaste vaihteli 90 ja 92 % välillä.

Koekappaleiden annettiin lujittua 10 vuorokautta, jonka jälkeen ne kuivattiin yhden vuorokauden aikana uunissa +100 °C lämpötilassa. Tämän jälkeen koekappaleisiin imeytettiin vettä tarkoituksena saavuttaa kyllästysasteita pienin (0,1) eroin 0,3 ja 1,0 välillä. Jäädytysvaihe, joka kesti vuorokauden, tehtiin pakkahuoneessa -20 °C lämpötilassa. Koekappaleet sulatettiin huoneen lämpötilassa kahden vuorokauden aikana, minkä jälkeen ne puristettiin CBR-puristuskojeella. Puristusvaiheessa koekappaleet olivat 14 vuorokauden ikäisiä.

Myöhemmin tehtiin lisäksi Hanasaaren A-laitoksen lentotuhkasta 13 lisäkoekappaletta tulosten tarkentamiseksi. Nämä valmistettiin ja koestettiin vastaavalla tavalla.

## Koetulokset

Kriteerinä koetuloksia arvosteltaessa on käytetty CBR-puristuskojeella saatuja puristuslujuuksia.

Lentotuhkan kokonaishuokostilavuus, n, saadaan kaavasta

$$n = \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}\right) \times 100 \% \quad (6)$$

jossa

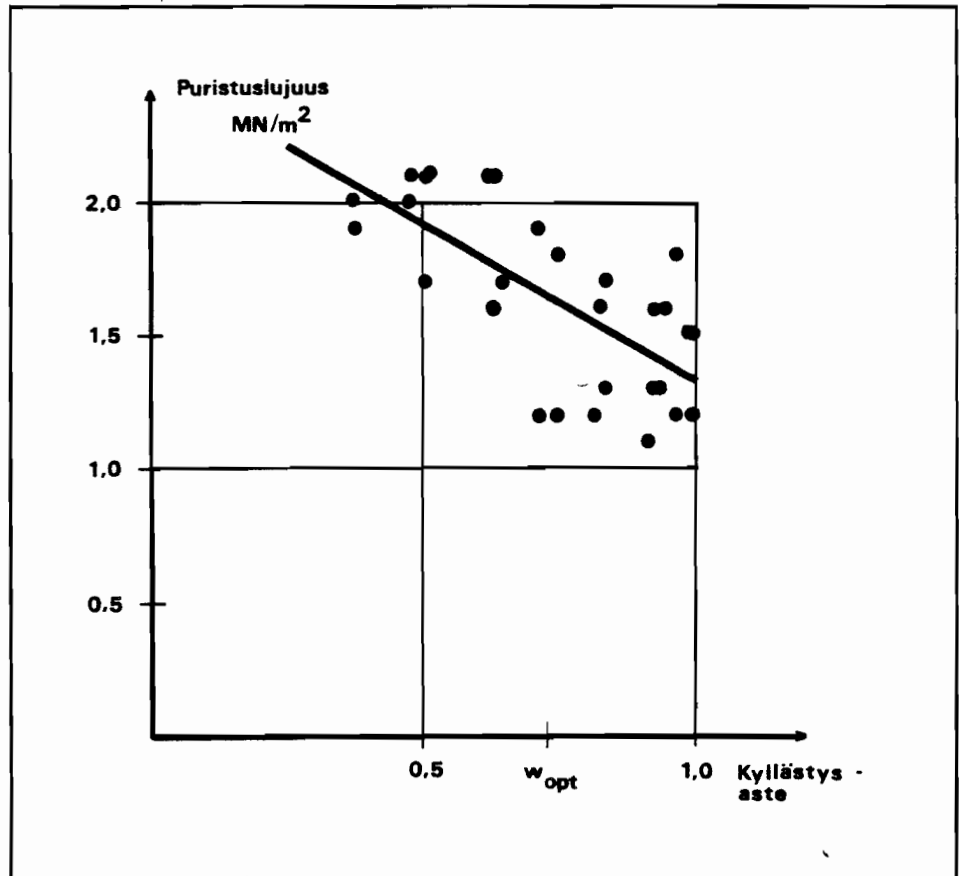
$$\rho_d = \text{kuivatilavuuspaino (kN/m}^3\text{)}$$

$$\rho_s = \text{kiintotiheys} \times 9,81 \text{ (kN/m}^3\text{)}.$$

Seuraavassa esitetään koetuloksia taulukoiden ja käyrien avulla.

Taulukko 18. Koekappaleiden mitatut ominaisuudet.

KOEKAPPALEET Ha A 1t				VUUNIKYIVÄN KOEKAPPA- LEEN VEPELLÄKYLLÄSTYS		PURISTUSLUJUUS JÄÄDYTYKSEN JÄLKEEN VÄIHEEN JÄLKEEN
N:o	w %	Tiivisyysaste %	n %	w %	Kyllästys- aste S	P <sub>2</sub> NI/m <sup>2</sup>
<b>KOE 1</b>						
1	24.5	90.3	42.1	14.6	0.38	1.9
2	24.8	90.8	41.7	14.4	0.38	2.0
3	24.7	91.0	41.6	18.3	0.48	2.0
4	24.6	90.7	41.8	19.6	0.51	2.1
5	24.8	90.7	41.8	19.9	0.52	2.1
6	24.5	91.7	41.1	18.2	0.49	2.1
7	24.7	91.1	41.6	23.6	0.63	2.1
8	24.7	90.5	42.0	24.4	0.64	2.1
15	23.9	90.2	42.1	28.0	0.72	1.2
16	24.2	90.7	41.8	28.7	0.75	1.2
17	24.1	90.6	41.9	32.2	0.84	1.3
18	24.8	90.2	42.1	31.8	0.82	1.2
19	24.4	90.3	42.1	35.5	0.92	1.1
20	24.5	91.2	41.5	35.4	0.94	1.3
21	24.7	90.0	42.3	37.1	0.96	1.6
22	24.6	90.7	41.8	36.8	0.97	1.8
<b>KOE 2</b>						
1	23.9	91.4	41.1	34.7	0.93	1.3
2	24.4	92.5	40.6	34.1	0.94	1.6
3	23.9	91.5	40.8	35.4	0.97	1.2
4	23.9	91.4	41.4	37.8	1.00	1.5
5	24.1	92.0	40.9	37.2	1.00	1.5
6	24.6	91.3	41.5	37.5	1.00	1.2
7	23.9	91.6	41.2	19.1	0.51	1.7
8	23.8	90.7	41.8	24.0	0.63	1.6
9	24.0	92.5	40.6	23.7	0.65	1.7
10	23.8	92.5	40.6	27.3	0.75	1.8
11	23.1	91.1	41.6	27.2	0.72	1.9
12	23.1	91.7	41.2	31.0	0.83	1.6
13	23.0	90.8	41.7	32.1	0.84	1.7
<b>KOEKAPPALEET Ha B 1t + 2 % Ca(OH)<sub>2</sub></b>						
1	20.4	91.1	44.1	15.2	0.40	1.5
2	20.6	91.4	43.9	15.0	0.40	1.4
3	20.9	91.7	43.7	19.4	0.52	1.5
4	20.9	91.8	43.6	19.0	0.51	1.5
5	20.5	91.1	44.1	22.5	0.60	1.1
6	20.6	91.8	43.6	23.0	0.62	1.1
7	20.5	91.7	43.7	28.4	0.77	1.7
8	20.4	91.8	43.6	28.2	0.76	1.3
15	20.3	92.3	43.3	25.8	0.70	1.6
16	20.4	92.0	43.5	25.9	0.71	1.5
17	20.8	92.0	43.5	32.2	0.87	1.2
18	20.8	91.5	43.8	32.7	0.88	1.3
19	20.8	91.7	43.7	34.0	0.92	1.2
20	20.5	91.3	43.9	34.5	0.92	1.3
21	21.3	91.2	44.0	34.4	0.91	1.0
22	21.9	92.1	43.4	33.9	0.92	1.1



Kuva 25. Hanasaaren A-laitoksen lentotuhkänäytteen A V vedelläkyllästysasteen ja sulamisen jälkeisen puristuslujuuden riippuvuus.

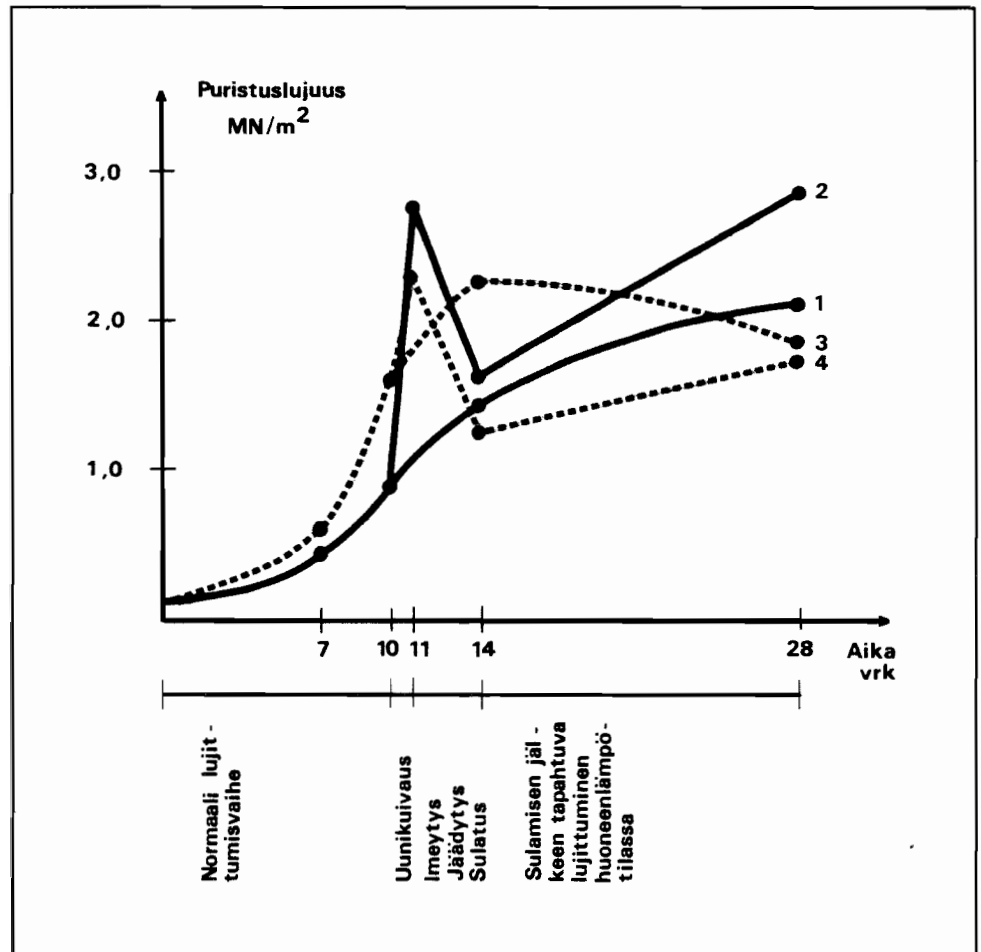
Kuvasta 25 havaitaan, että lujittunut A-laitoksen lentotuhka menettää suhteellisen tasaisesti lujuuttaan lähestyttäessä täysin kyllästettyä tilaa. Huomionarvoista kuitenkin on, ettei lujuus häviä kokonaan. Selvää kriittistä vedelläkyllästysastetta, jonka saavutettuaan lujittunut lentotuhka menettäisi äkillisesti lujuuttaan, ei tämän kokeen perusteella voida havaita.

Hanasaaren B-laitoksen lentotuhkien koetuloksia on vaikeampi arvioida saatujen puristuslujuustulosten pienen vaihteluvälin vuoksi. Lujisuuden täydellistä menettämistä ei näilläkään koekappaleilla ole havaittavissa.

#### Johtopäätöksiä

Lujittunut lentotuhka menettää jäätymisen ja sulamisen jälkeen osan lujuudestaan. Tämä on kuitenkin tilapäistä, sillä sulamisen jälkeen lujuus lämpötilan noustessa vähitellen ajan kuluessa palautuu lähes ennalleen. Tämä on tietenkin riippuvainen siitä, missä määrin kyseisellä lentotuhkalla on itselujittuvia ominaisuuksia.

Lämpötila vaikuttaa merkittävästi lujittumisnopeuteen. Parhaat tulokset tässä suhteessa saavutetaan yleensä, kun lentotuhkarakenteen lämpötila on 40...60 °C välillä. Tässä kokeessa havaittiin A-laitoksen lentotuhkan huomattava lujisuuden kasvu, kun 10 vuorokautta normaalisti lujittunut lentotuhkakoekeappale oli 24 tuntia 100 °C lämpötilassa. Lujuus kasvoi noin kaksinkertaiseksi.



Kuva 26. Hanasaaren A- ja B-laitoksen lentotuhkien puristuslujuuden kehitys uunikuivauksen, imeytyksen ja jäädytys - sulatuksen yhteydessä.

- |   |   |
|---|---|
| 1 | Ha A V normaali lujittuminen  |
| 2 | Ha A V jäädytys - sulatuskokeessa                                       |
| 3 | Ha B V + 2 % kalkkia (Ca(OH) <sub>2</sub> ) normaali lujittuminen       |
| 4 | Ha B V + 2 % kalkkia (Ca(OH) <sub>2</sub> ) jäädytys - sulatuskokeessa. |

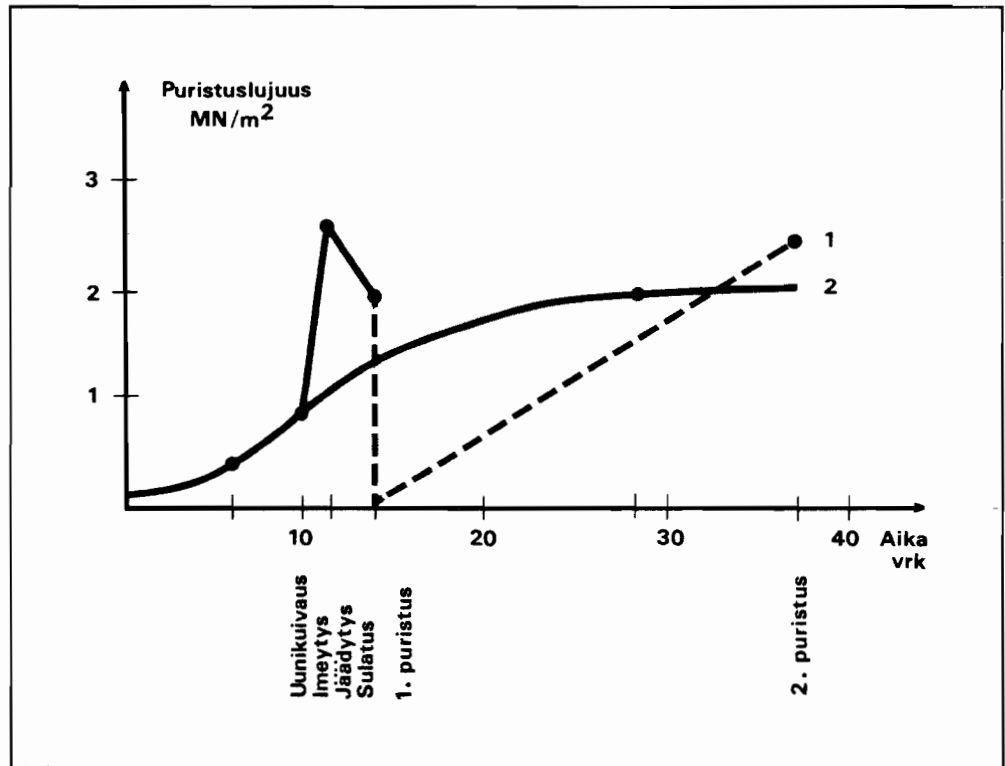


Koekappaleiden tilavuuden kasvu jäätyksen jälkeen on tässä kokeessa ollut 0,4...1,5 %. Hajonta johtuu lähinnä riittämättömästä mittaustarkkudesta. Lisäksi jäätyttömän koekappaleen mitat on otettu heti tekovaiheen jälkeen. Aikaisemmin tehtyjen havaintojen tavoin voidaan nytkin todeta, että koekappale laajenee jonkin verran vapauduttuaan tiivistämisen aiheuttamasta puristuksesta. Tämän perusteella voidaan sanoa, että tilavuuden kasvu jäätysvaiheessa on tässä kokeessa käytetyillä lentotuhkilla vesipitoisuudesta riippumatta pienempi kuin 1 %.

Kokeesta saatujen tulosten perusteella voidaan päätellä, että lujittunut lentotuhkarakenne menettää osan lujuudestaan jäätyksen - sulamisvaiheen aikana. Lujuuden menetys on merkittävä silloin, kun vesipitoisuus ylittää optimivesipitoisuuden, kuva 25. Lujuuden palautuminen tämän jälkeen vienee ihanneolosuhteissakin useita viikkoja. Koska kuormituksen pienentäminen tänä aikana ei liene useinkaan mahdollista, on vaativissa rakenteissa aina syytä käyttää eristyskerrosta, jos kapillaarista veden imeytymistä on odotettavissa.

#### Vaurioituneen lentotuhkarakenteen itsestäänkorjautuminen

Kun kovettunut lentotuhkarakenne kuormituksen vaikutuksesta murtuu, se luonnollisesti menettää lujuutensa lähes kokonaan. Kuitenkin on havaittu, että murtumisen jälkeen lentotuhkarakenne voi vähitellen saavuttaa entisen lujuutensa. Rakenteen rikkoontumista tapahtuu myös jäätyksen - ja sulamisvaiheiden aikana. Tämän tutkimuksen yhteydessä tehty erillinen koe antaa aiheen olettaa, että lujuuden palautumista todella tapahtuu. Tämä koe tehtiin koekappaleella, joka ensimmäisen puristamisen jälkeen säilytti muotonsa suhteellisen hyvin. Tämä koekappale oli läpikäynyt varsinaiseen tutkimukseen liittyen uunikuivaus - vedelläimeytys - jäädytys - sulatusvaiheen. Ensimmäisen puristuksen jälkeen koekappale oli muovikelmuun käärittynä lujittumassa uudelleen noin kolmen viikon ajan, jonka jälkeen se puristettiin toisen kerran, kuva 27.

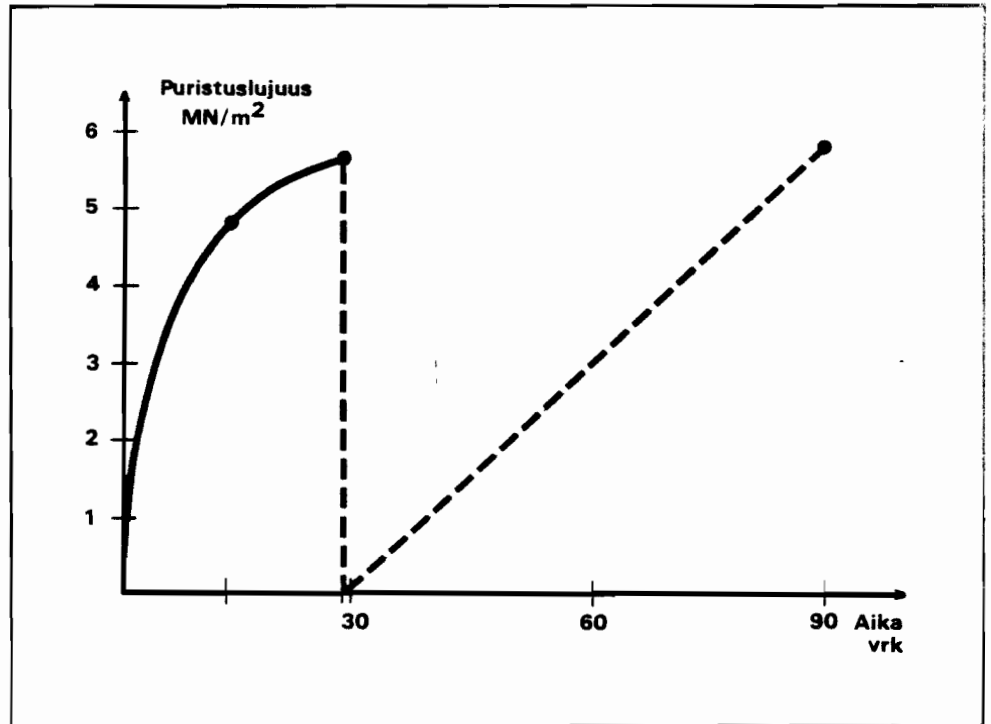


Kuva 27. Hanasaaren A-laitoksen lentotuhkan itsestäänkorjautumisen rikkoutumisen jälkeen.

- |   |   |
|---|---|
| 1 | Ha A V normaali lujittuminen              |
| 2 | Ha A V lujittuminen puristamisen jälkeen. |

Toinen esimerkki lentotuhkan itsestäänkorjautumisesta on kuvassa 28, jossa esitetään kahden Hanasaaren A-laitoksen lentotuhkasta tehdyn koekappaleen puristuslujuuksien keskiarvo 28 vuorokauden ikäisenä ja samojen kappaleiden keskilujuus 62 vuorokaudelta ensimmäisen puristamisen jälkeen, kun niiden säilytysaika on yhteensä 90 vuorokautta ja säilytystapa on koko ajan sama.

Tarkempien tietojen saamiseksi lentotuhkan itsestäänkorjautumisesta vaaditaan kuitenkin lisäkokeita. Ominaisuus (engl. autogenous healing) tunnetaan myös kansainvälisessä kirjallisuudessa, esimerkiksi Mayersin, Pichumanin ja Kapplesin teoksessa "Fly Ash as a Construction Material for Highways".



Kuva 28. Hanasaaren A-laitoksen lentotuhkan itsestäänkorjautuminen, 14 puolalaisen lentotuhkanäytteen seos.

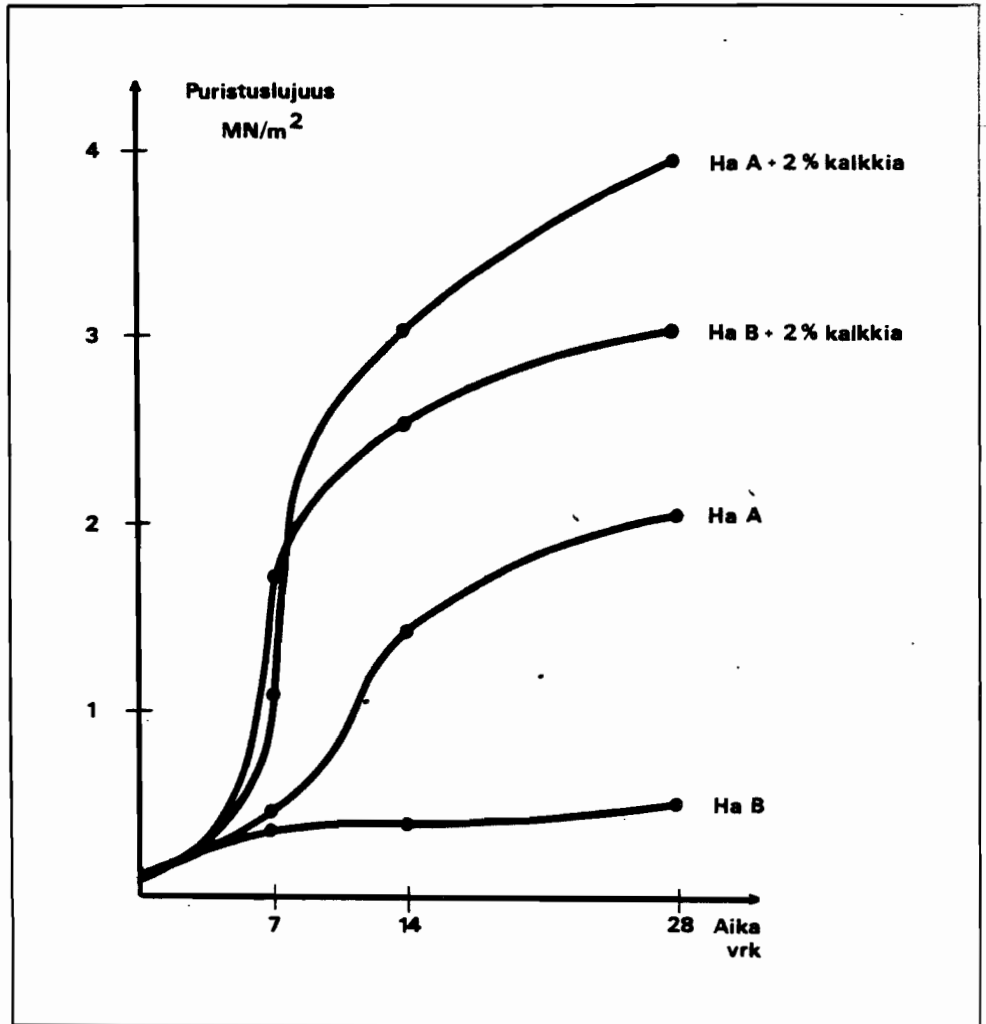
Lujittuneen lentotuhkan vedenkestävyyden määrittäminen;

Kokeen tarkoituksena oli selvittää Hanasaaren lentotuhkilla minimipuristulusuus, jossa tiivistetty koekappale kestää veden vaikutusta hajoamatta. Kokeessa käytettiin Hanasaaren A- ja B-laitoksen lentotuhkia, näyte B V.

Kokeen suoritus

Koekappaleet tiivistettiin pudotusvasaralaitteella kosteuspitoisuudessa, joka oli 2...3 % optimivesipitoisuuden alapuolella. Niiden tiiviysaste vaihteli 90 ja 92 % välillä. Kokeessa selvitettiin lisäksi kalkin (2 %) vaikutusta lujutta ja lujittumisnopeutta lisäävänä ja siten vedenkestokykyä parantavana tekijänä. B-laitoksen lentotuhkanäytteen B V ei katsottu aikaisempien kokeiden perusteella saavuttavan sellaista lujutta, joka kestäisi veden vaikutusta.

Koekappaleita oli kaksi kutakin määrittystä kohden. Niiden annettiin lujittua normaalisti huoneen lämpötilassa. Tämän jälkeen ne upotettiin eri ikäisinä vesiastiaan vuorokaudeksi. Ehjinä säilyneille koekappaleille määritettiin puristuslujuudet. Lisäksi määritettiin vertailulujuudet normaalisti huoneen lämpötilassa lujittuneille samanikäisille koekappaleille.



Kuva 29. Vedenkestävyyskokeessa käytettyjen Hanasaaren lentotuhkanäytteiden A V ja B V lujuudenkehitys.

## Koetulokset

Koekappaleet, jotka eivät kestäneet veden vaikutusta, hajosivat varsin nopeasti (3...5 minuuttia). Pientä pintahilseilyä esiintyi koekappaleissa, jotka kestivät muuten ehjinä veden vaikutuksen.

Taulukko 19. Vedenkestävyyskokeessa ehjänä säilyneiden koekappaleiden lujuudet.

Tuhka- tyyppi	Koekappale			Vedenkestokoe			Vertailulujuudet			
	w %	$f_d$ (kN/m <sup>2</sup> )	Tiiviys- aste %	Ikä vrk	w %	Puristus- lujuus MN/m <sup>2</sup>	Ikä vrk	MN/m <sup>2</sup>	Ikä vrk	MN/m <sup>2</sup>
Ha A v	25.3	11.0	91.0	7 + 1	39.7	0.4	7	0.5	8	0.6
	26.2	11.1	91.6	10 + 1	39.1	0.7	10	0.8	11	1.0
Ha A v + 2 % k	26.6	11.2	92.5	5 + 1	38.0	0.7	5	0.5	6	0.7
	26.6	11.3	93.2	8 + 1	37.1	2.0	8	1.6	9	2.2
Ha B V + 2 % k	22.8	11.9	92.8	6 + 1	35.4	1.4	6	0.9	7	1.6

Kokeessa käytetyillä lentotuhkilla on tämän kokeen perusteella puristuslujuuden minimiarvo noin 0,5 MN/m<sup>2</sup>, jonka ne vaativat kestääkseen ympäröivän veden vaikutuksen. Ajat, jonka kuluttua kokeessa käytetyt lentotuhkat tämän puristuslujuuden saavuttavat, ovat seuraavat:

Ha A V 7 vuorokautta  
 Ha A V + 2 % kalkkia  
 (Ca(OH)<sub>2</sub>) 5 vuorokautta  
 Ha B V + 2 % kalkkia  
 (Ca(OH)<sub>2</sub>) 5 vuorokautta.

Lisäksi voidaan tehdä havainto, että lujuudenkehityksen ollessa nopeimmillaan lentotuhka jatkaa lujittumistaan myös veden alla. Kokeessa käytetyillä lentotuhkilla, jotka eivät ole kovin hyviä lujittumisominaisuuksiltaan, tätä tapahtui vain kun käytettiin lujittavia ominaisuuksia herättävää lisäsideainetta, tässä tapauksessa kalkkia. Lujuudenkehitys tapahtuu tällöin jonkin verran hitaammin.

Vähäisestä koekappalemäärästä huolimatta voitaneen tehdä johtopäätös, että 1,0 MN/m<sup>2</sup> puristuslujuus riittää pitämään veden ympäröimän lentotuhkarakenteen ehjänä. Dynaamisen kuormituksen vaikutusta tähän tulisi tutkia erikseen.

### 3.6

#### Routivuus ja lämmöneristyskyky

##### 3.6.1

##### Routimisen pääperiaatteet

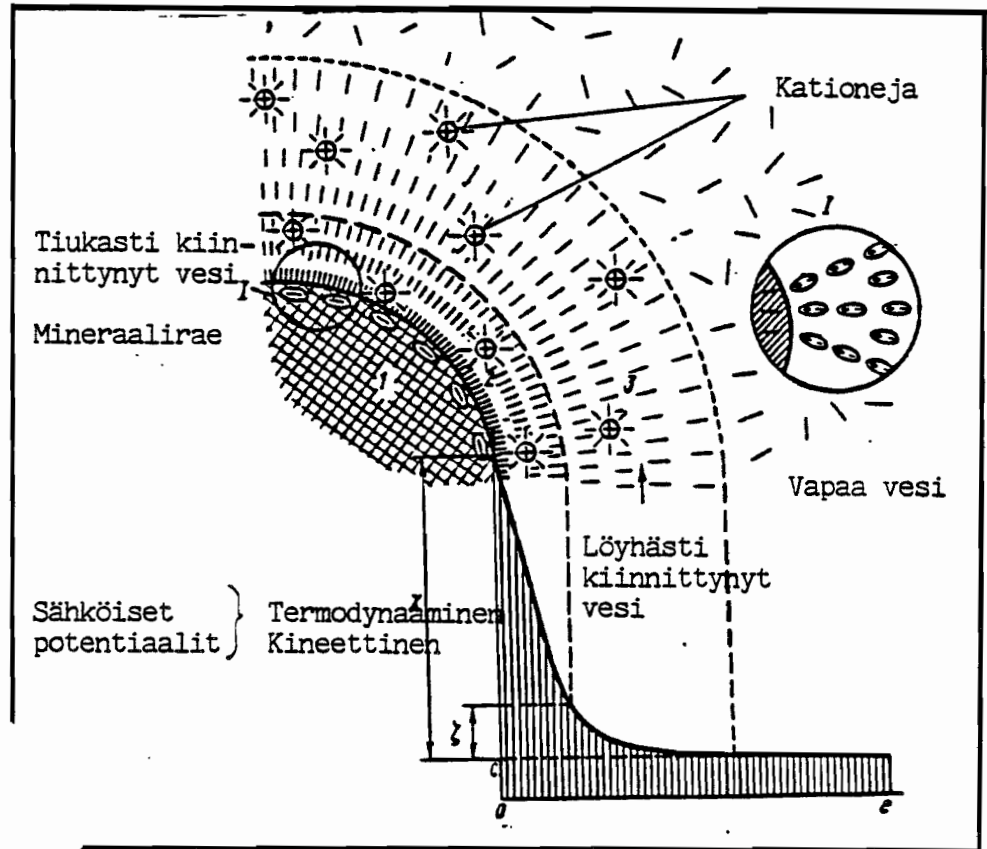
Maarakenteen routaantumisprosessi ja routimiseen liittyvät ilmiöt ovat monimutkaisia. Suomessa kaikki maalajit routaantuvat (niissä oleva vesi jäätyy), mutta vain tietyt routivat (aiheuttavat jäätyessään ja/tai sulassa haittaa rakenteille). Varsinaisia maaroutatyyppejä ovat massiivinen routa ja kerrosrouta. Muut tyytit, rouste ja onkalorouta ovat vain huokosissa esiintyviä pintailmiöitä.

Massiivista routaa esiintyy pääasiassa karkeissa maalajeissa, sorassa ja hiekassa, mutta myös turve ja lieju jäätyvät massiiviseen routaan. Tämä routatyyppi ei yleensä aiheuta vaurioita rakenteelle, koska liika vesi pääsee helposti tunkeutumaan sulaan maahan päin jäätyvän veden tieltä. Kuitenkin tapauksessa, jossa vettä pääsee suuria määriä virtaamaan kriteerien mukaan routimattomaan maakerrokseen, voi tähän syntyä rakenteille haitallinen, vähitellen pakkasen vaikutuksesta paksuneva jääkerros. Tällainen tilanne voi esiintyä esimerkiksi mäenrinteen alapuolella olevassa sorakerroksessa, jos rinteessä oleva lämpöputki sulattaa ympäristönsä jäätä, joka virtaa vetenä sorakerrokseen.

Kerrosroutaa esiintyy tavallisesti vain hienorakeisissa maalajeissa, kuten silteissä, savissa ja moreenissa joissa on runsaasti hienoaainesta. Sen syntymekanismista on esitetty monia teorioita. Pääpiirteissään kerrosroudan syntyminen voidaan selittää seuraavasti.

Hienojen maarakeiden ja veden välillä vallitsee veto- ja poistovoimia, joista osa on sähköisiä, osa hydrodynaamisia. Näiden vaikutuksesta syntyy maarakeiden ympärille kiinnittynyt adsorptiovesivaippa. Mineraalirakeen pinta on negatiivisesti varautunut. Dipolisen luonteensa vuoksi vesimolekyylit järjestyvät rakeen pinnalle siten, että positiivinen napa on suuntautunut rakeeseen päin. Vallitseva sähköinen kenttä kiinnittää vesimolekyylit lujasti mineraalirakeen pinnalle. Mitä kauempana vesimolekyylit ovat rakeen pinnasta sitä löyhempi on vetovoima.

Maahuokosissa oleva vesi voidaan jakaa tiukasti kiinnittyneeseen ja löyhästi kiinnittyneeseen adsorptioveteen, joista jälkimmäinen on kauempana rakeen pinnasta.



Kuva 30. Huokosveden ja maarakeen välinen sähköinen potentiaali etäisyyden funktiona Tsytovin mukaan.

Lämpötilan laskiessa hienorakeisessa maassa veden jäätymispisteen alapuolelle jääkiteitä alkaa muodostua aluksi sinne, missä on vapaata huokosvettä. Jääkiteen kasvaessa siihen liittyvät adsorptiovesivaipan uloimmat molekyylit, jolloin vesivaippa ohenee. Adsorptiovesivaipan mekaaniset ominaisuudet ovat kuitenkin sellaiset, että se pyrkii säilyttämään alkuperäisen paksuutensa, jotta tasapaino vallitsevan paineen kanssa säilyisi. Adsorptiovesivaipan oheneminen aiheuttaa imuvaikutuksen ja viereisestä huokosvedestä kulkee vesimolekyylejä jääkiteen ja maapartikkelin väliin täydentäen vesivaippaa. Siten jääkerros voi routarajalla kasvaa niin kauan kuin veden kulku routarajan alapuolella olevasta huokosysteemistä on riittävän nopea. Lisäveden nousua jäätymiskohtaan edistää vielä se, että vesi virtaa lämpögradientin suuntaan lämpimämmästä kylmempään päin. Pakkaskauden edistyessä jäätymisrintama tunkeutuu yhä syvemmälle ja uusia jääkerroksia syntyy.

Kerrosroudan syntyminen ja rakenne riippuvat maalajin raekoosta, sen vesipitoisuudesta ja pohjaveden sijainnista, routaantumisen nopeudesta sekä routivan kohdan kuormituksesta. Mitä suurempi on maalajin kapillaarisuus, sitä syvemmällä olevasta varastosta voi vettä imeytyä routivaan kerrokseen. Maan runsas vesipitoisuus luo paremmat edellytykset routimisen alkamiselle kuin vähäinen vesipitoisuus. Routiminen vaatii kuitenkin lisäveden saannin muualta. Mitä suurempi on routaantumisen nopeus, sitä vähemmän ja ohuempia jääkerroksia maahan ehtii muodostua, koska nopeasti aletessaan routaraja estää ylempien kerrosten vedensaantimahdollisuudet. Routaantumisen nopeuteen vaikuttaa maan lämmönjohtokyky. Maan sisältämä vesi hidastaa routaantumista. Sen sijaan runsas kivipitoisuus nopeuttaa sitä. Kasvava kuormitus nopeuttaa routaantumista tiivistäessään maata ja parantaessaan täten maan lämmönjohtokykyä. Tiivistämisen johdosta veden pääsy jäätymisrintamaan hidastuu, jolloin jääkerrokset jäävät ohuiksi.

Roudan syvyys riippuu muun muassa lämpötilasta, lumipeitteen paksuudesta, maan kosteussuhteista sekä maalajista. Se on suurin kuivissa moreeni- maissa ja karkearakeisissa kivennäismaissa. Roudan syvyys voidaan määrittää mittaamalla tai matemaattisilla laskelmilla. Jälkimmäistä menetelmää käytettäessä on tiedettävä talven pakkasumma ( $h$  °C). Roudan syvyys (mm) lumesta raivatulla alueella on likimäärin:

$$d = 10 \times c \sqrt{F} \quad (7)$$

jossa

$F$  = pakkasumma ( $h$  °C) ja

$c$  = niin sanottu maalajikerroin, jonka arvo riippuu muun muassa vesipitoisuudesta ja tiiviyydestä (soralla ja hiekalla  $c \approx 1,16$ ).

Roudan sulamisen aikana ei maan pintaosaan muodostuva vesi pääse poistumaan, koska alla olevat kerrokset ovat vielä jäässä. Tällöin pintamaa kyllästyy vedellä ja sen kantavuus vähenee huomattavasti. Varsinkin vanhoilla maanteillä ovat yleisiä routapuhkeamat. Ne syntyvät siten, että pintamaan kuivuessa ja pintamaan sulamisen jatkuessa pohjaroudan päällä olevan maakerroksen huokosveden paine on vesiylimäärästä johtuen kasvanut niin suureksi, että vähäinkin liikenne aiheuttaa pintakerroksen rikkoutumisen.



## 3.6.2

## Kivihiilituhkien routiminen

Tuhkaprojekti pyrkii selvittämään Helsingin kivihiilituhkien routimiskäyttäytymistä. Kivennäismaa-aineksille on useita rakeisuuteen perustuvia routivuuskriteerejä. Niiden mukaan pohjatuhka ja pohjakuona eivät roudi. Sen sijaan jotkut Myllypuron lentotuhkista ja kaikki Hanasaaren lentotuhkat routivat. Edellisten kapillaarisuuskin on reilusti yli 1 m, mikä on erään kriteerin mukaan routimattomien kiviainesten kapillaarisuuden enimmäisarvo. Kuitenkin, kohdassa 3.6. esitetyt rakeiden ja huokosveden väliset vuorovaikutukset voivat olla täysin erilaiset tuhkillä kuin tavallisilla kiviaineksilla.

Tampereen teknillisen korkeakoulun rakennusgeologian sekä maamekaniikan ja pohjarakennuksen laboratorioissa on selvitetty tuhkaprojektin tilauksesta Helsingin kivihiililento-  
tuhkien routivuutta. Hanasaaren voimalaitoksen lentotuhkista on tutkittu A- ja B-laitoksen tuhkanäytteitä sekä lujittamattomina että lujitettuina. Kokeet on tehty routanousua mittaavalla laitteistolla, jolla on pyritty laboratorio-oloissa saamaan aikaan lähellä käytäntöä oleva tilanne. Näytteet on ennen koetta tiivistetty lähellä optimivesipitoisuutta 90...95 % tiiviysasteeseen lukuunottamatta yhtä lentotuhkanäytettä, joka jätettiin noin 80 % tiiviysasteeseen. Kappaleiden annettiin kyllästyä täysin vedellä ennen jäädyttämistä.

Saatujen routanousukäyrien perusteella lentotuhkat olivat routimattomia. Lausunnon mukaan ominaispinta-alalla on tärkeä merkitys routimisilmiön kannalta ja ominaispinta-ala on osoittautunut luotettavaksi routivuuden arviointiperusteeksi. Sen oletetaan vaikuttavan nimenomaan rakeiden fysikaalisia ominaisuuksia muuttavana tekijänä jääkerrosten muodostumiseen. Moreenien, joiden ominaispinta-ala on suuri (noin 8 000 m<sup>2</sup>/kg), on todettu routivan voimakkaasti kun taas moreenit, joiden ominaispinta-ala on pieni, eivät kokeiden mukaan roudi. Koska lentotuhkien ominaispinta-ala on korkeintaan 4 000 cm<sup>2</sup>/g, useimmiten kuitenkin lähellä 2 000 cm<sup>2</sup>/g, voidaan olettaa, että ne eivät roudi, ainakaan voimakkaasti, edellyttäen että ne käyttäytyvät samalla tavoin kuin moreenit.

Tuhkaprojektin tutkimusryhmän tekemien kenttähavaintojen perusteella huolella tiivistetyt lentotuhkat eivät roudi. Näytekairalla otetuissa näytteissä ei ole näkynyt varsinaisia jäälinsejä. Kuitenkin rakenteen tiivistämisen yhteydessä muodostuneisiin saumakohtiin on todettu joissakin tapauksissa muodostuneen ohut jääkerros, josta suotuisissa oloissa olisi voinut routiminen käynnistyä. Tämän välttämiseksi ennen uuden kerroksen tiivistämistä on edellisen kerroksen pinta karhennettava, jotta saumoja ei pääsisi syntymään.

Huolellisella tiivistämisellä on siis routimisvaaraa vähentävä vaikutus. Lisäksi lujuuttuminen vähentää routimisvaaraa muodostuvien sidosten vähentäessä myös rakenteen vedenläpäisykykyä. Kentällä tapahtuva havaintojen tekeminen on ainoa varma tapa todeta mahdollinen routiminen ja tämän vuoksi kerätään jatkossa lisää käytännön tutkimusaineistoa.

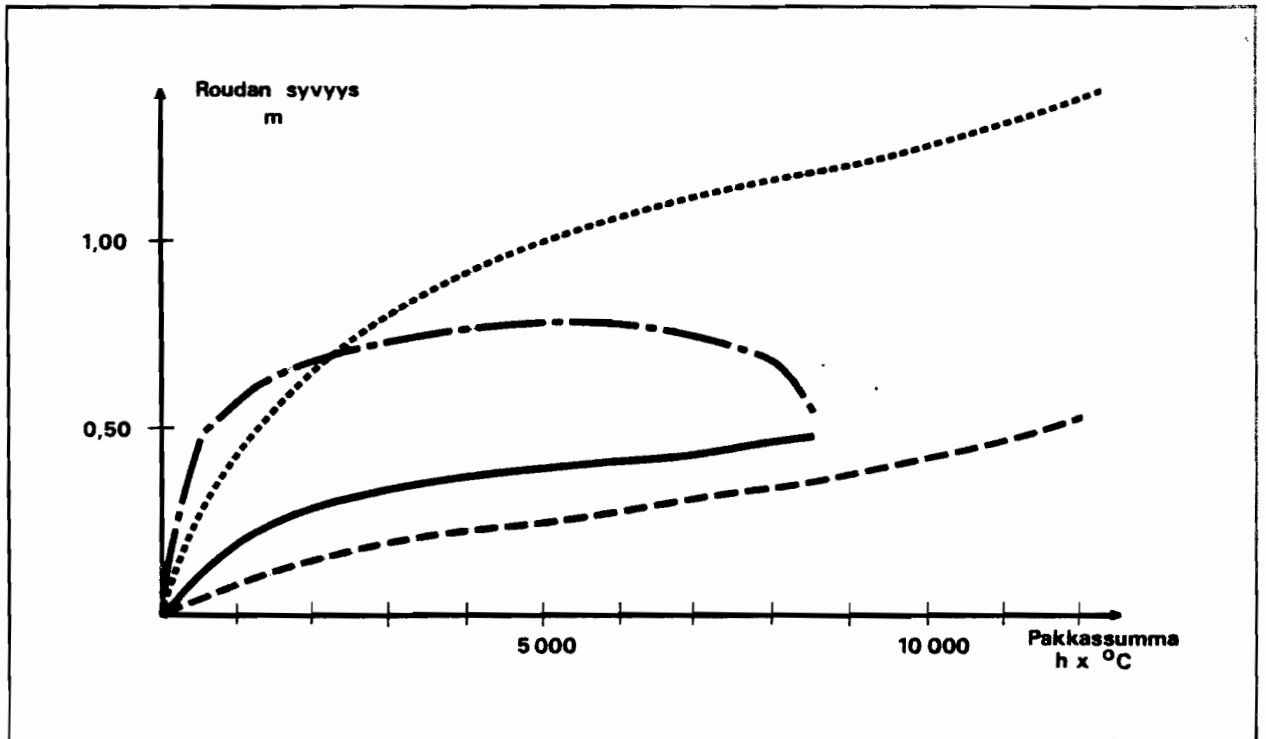
### 3.6.3

#### Kivihiilituhkien lämmöneristyskyky

Tuhkaprojektin tutkimusryhmä on asentanut tuhkarakenteisiin lämpötilanmittausantureita useilla alueilla Helsingissä. Lämpötilanmittauksia on tehty syksystä 1979 lähtien. Suurin osa antureista asennettiin kuitenkin vasta syksyllä 1981. Kuluneen talven 1981... 1982 mittauksia ja tulosten tulkintaa on vaikeuttanut suuresti erittäin runsas lumen tulo, koska kalustoa ei ole aina riittänyt koaluiden auraamiseen.

Kuvassa 31 on esitetty havaittuja roudan tunkeutumissyvyyskäyriä Hanasaaren lentotuhkassa ja Salmisaaren pohjakuonassa sekä vertailumateriaaleina olevassa sorassa. Siinä on esitetty lisäksi Tie- ja vesirakennushallituksen (TVH) Helsingin lähistöllä tekemien mittausten kahden talven keskiarvokäyrä.

Roudan tunkeutumissyvyydellä on käytännön merkitystä, kun arvioidaan tuhkien käyttökelpoisuutta lämpöä eristävänä materiaalina esimerkiksi soraan verrattuna. Lämmöneristävyysselvitystä jatketaan.



Kuva 31. Roudan tunkeutumissyvyydet lentotuhkassa, pohjakuonassa ja sorassa pakkassumman funktiona.

- Sora (2 vuoden keskiarvokäyrä, TVH) 10.12.1979... 15.3.1980, 10.11.1980... 15.3.1981
- · — Sora (Kurkimäki) 23.1.1980... 24.4.1981
- Hanasaaren lentotuhka (Kurkimäki) 23.1.1980...24.4.1981
- Salmisaaren pohjakuona 26.11.1979...31.3.1980

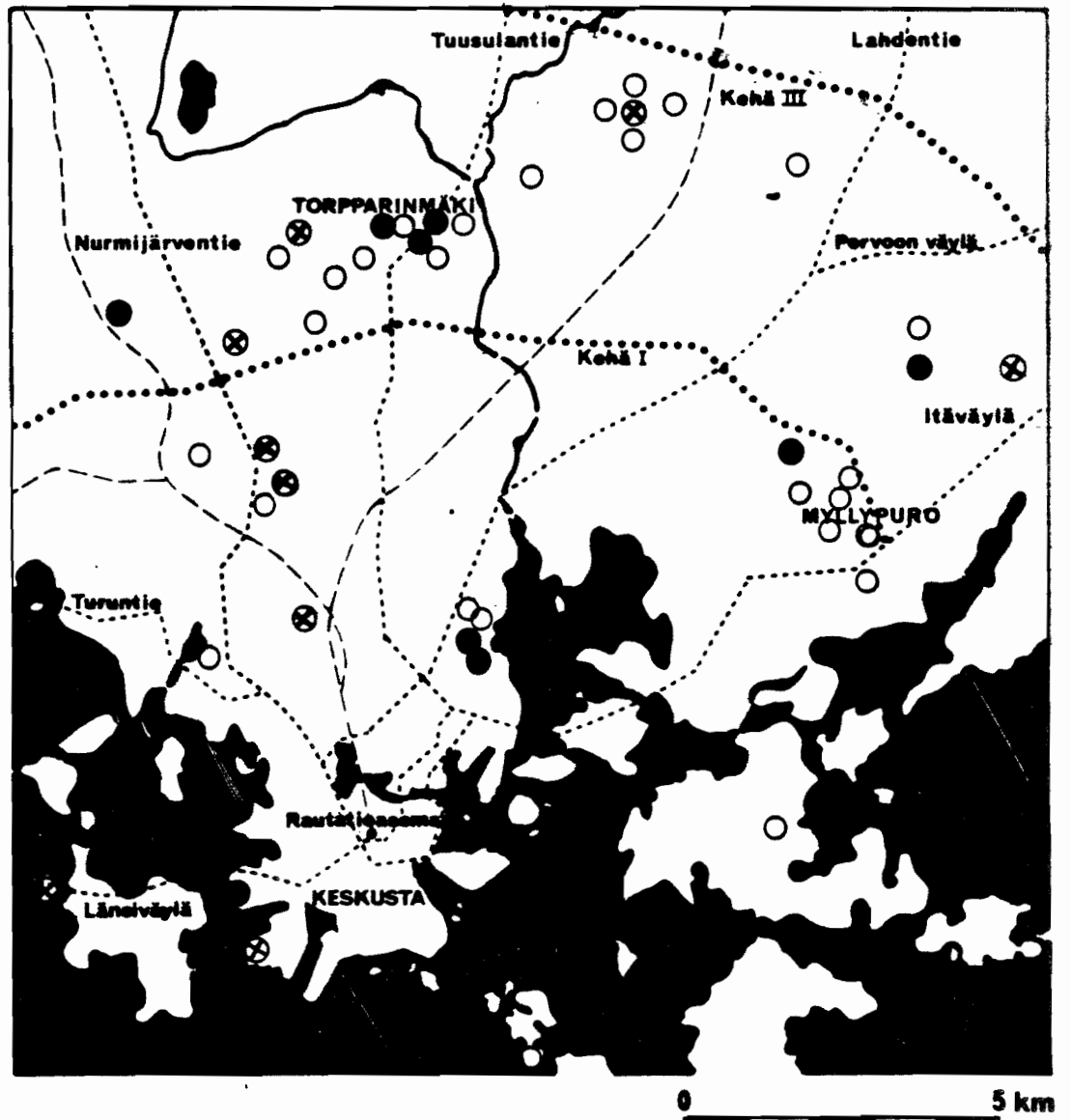
Kuvassa 31 esitetyt Helsingin Kurkimäessä mitatut roudan tunkeutumissyvyydet tiivistetyssä lentotuhkassa ja sorassa ovat vertailukelpoisia, koska ne on rakennettu samanaikaisesti ja mittaukset on tehty samanaikaisesti. Jos käytetään yhtälöä (7) saadaan soralle ( $c = 1,16$ ) F:n arvolla 5 000 h °C roudan syvyydeksi  $d = 820$  mm, mikä on lähellä mitattua ( $\approx 780$  mm). Vastaavasti lentotuhkalle mitattu  $d \approx 400$  mm, jolloin sille saadaan maa-lajikertoimeksi  $c = 0,57$ . Myös Salmisaaren pohjakuona näyttää olevan erittäin hyvä lämmöneristäjä soraan verrattuna, mikä tuntuu-kin luonnolliselta sen huokoisten rakeiden vuoksi. Kuvan käyrä ei ole kuitenkaan täysin luotettava, koska tulokset on mitattu rakenteessa, jossa lentotuhkan päällä olevan pohjakuonan paksuus oli vain 300 mm ja ylin mittanturi oli pohjakuonan alapinnassa.

#### 4. KIVIHIILITUHKISTA RAKENNETUT KOHTEET

Tuhkaprojektin toiminnan aikana on rakennettu Helsingin alueella jo lähes 50 kohdetta (toukokuu 1982), joiden likimääräinen sijainti nähdään kuvan 32 kartasta. Tarkoin seurattuja kohteita on tällä hetkellä noin 20. Kussakin kohteessa on pyritty käyttämään siihen parhaiten soveltuvaa tuhkatyyppiä (lentotuhka/pohjatuhka/pohjakuona). Rakennetyypeittäin kohteet jakautuvat seuraavasti:

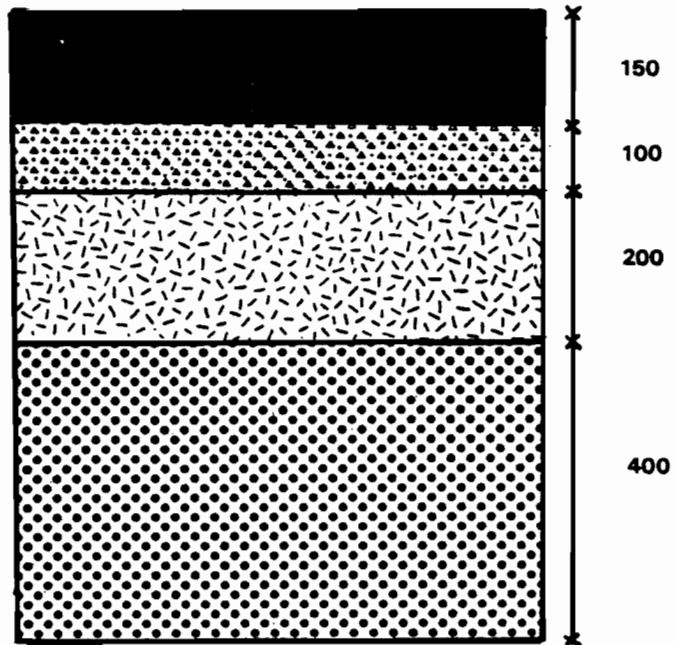
- 1 Katujen rakennekerrokset
  - 1 a Ajoradat
    - alusrakenteet
    - päällysrakennekerrokset kantavaa kerrosta tai sen yläosaa lukuunottamatta.
  - 1 b Jalankulku- ja pyörätiet ynnä muut sellaiset
    - alusrakenteet
    - päällysrakenne päällystettyä lukuunottamatta.
- 2 Pysäköintialueiden rakennekerrokset
  - alusrakenteet
  - päällysrakennekerrokset kantavaa kerrosta tai sen yläosaa lukuunottamatta.
- 3 Putkijohtojen perustukset
  - arinat
  - siirtymäkiilat
  - kaivantojen täytteet.
- 4 Rakennusten pohjatäytteet.
- 5 Tukimuurien taustatäytteet.
- 6 Penkereet.
- 7 Vettäpidättävät rakenteet.
- 8 Urheilukenttien rakennekerrokset
  - palloilukentät
  - ratsastuskentät.

Tuhkasta tehtyjen maarakenteiden paksuutta ei ole voitu optimoida tuhkien teknisten ominaisuuksien mukaisesti, koska tarvittava tietous lisääntyy vasta varovaisen kokeilun kautta. Usein on määräävänä tekijänä myös rakenteen pinnan korkeustaso, joka edellyttää tietyn paksuisen maarakenteen tekemistä.



Kuva 32. Helsingin alueelle rakennettujen tuhkakohteiden sijainti.

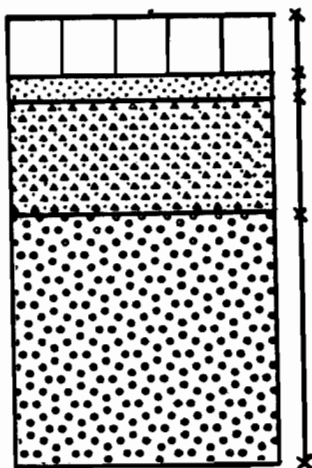
- Työ tuhkaprojektin tutkijoiden valvoma, kohteessa säännöllinen jatkoseuranta
- ⊗ Työ osittain tuhkaprojektin tutkijoiden valvoma, kohteessa jatkoseurantamittauksia
- Työ pääasiallisesti muiden valvoma, kohteessa tarvittaessa jatkoseurantamittauksia.



Kuva 33. Tuhkan käyttö 3 E-luokan ajoradan rakennekerroksissa (Kurkimäki).

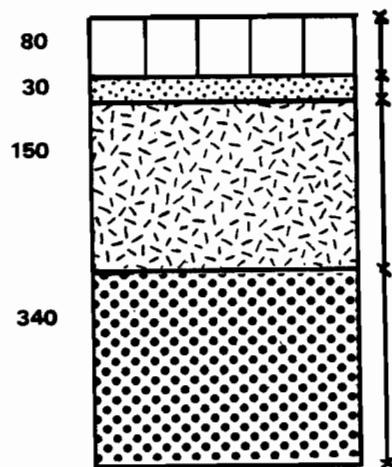
**NORMAALIRAKENNE**

piv 100 ... 151



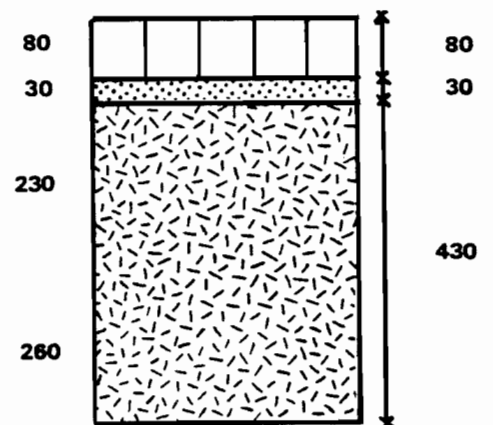
**KOERAKENNE**

piv 57 ... 100



**KOERAKENNE**

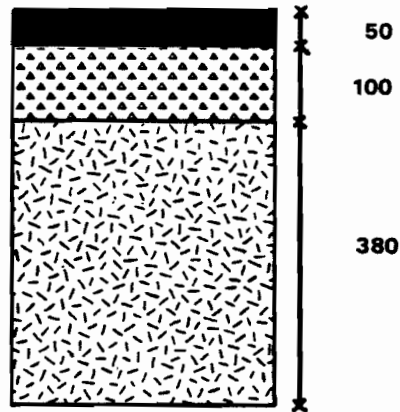
piv 10 ... 50



Kuva 34. Jalankulku tie pehmeikköalueella (Torpparinmäki).

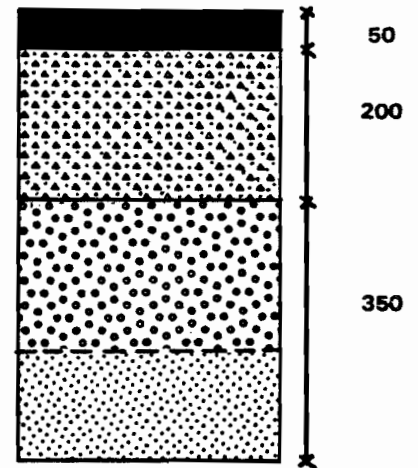
**KOERAKENNE**

**LP - ALUE 1**



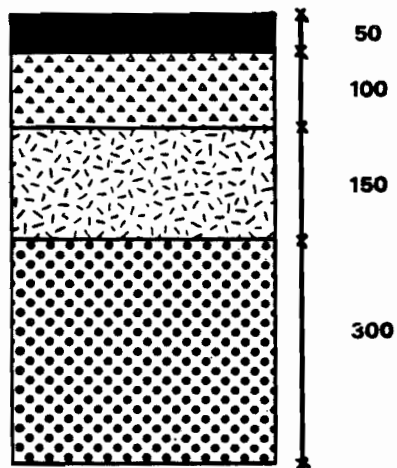
**NORMAALIRAKENNE**

**LP - ALUE 2**



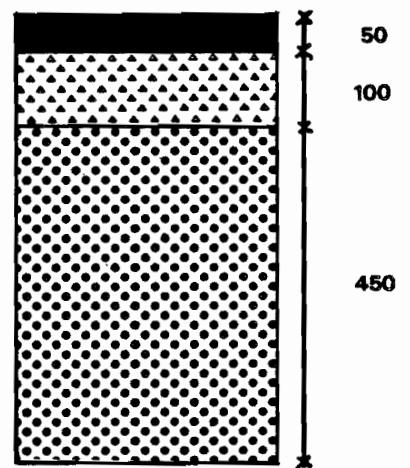
**KOERAKENNE**

**LP - ALUE 3**

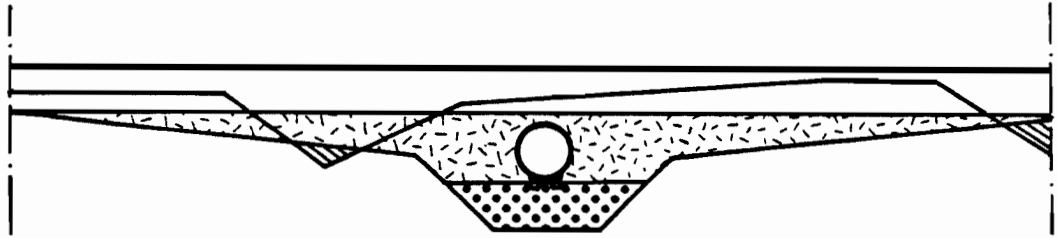


**KOERAKENNE**

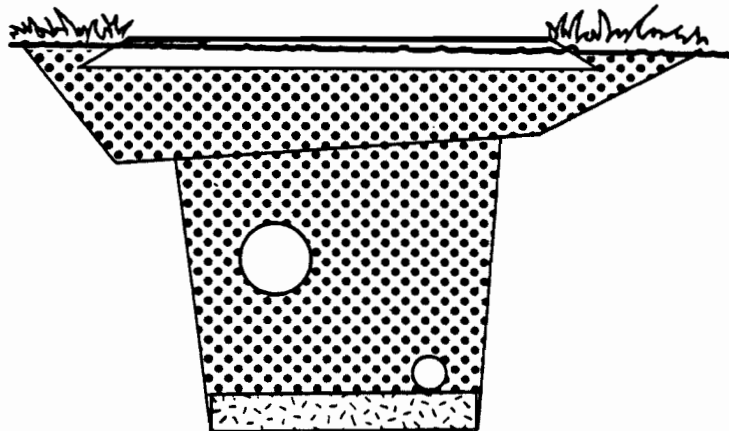
**LP - ALUE 4**



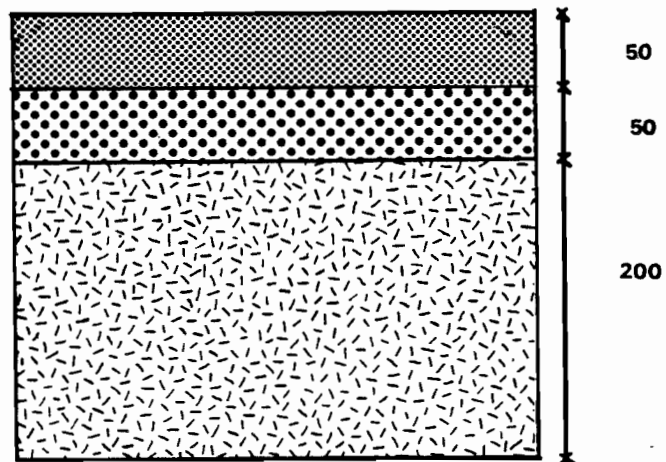
Kuva 35. Pysäköintialueita pehmeikkö-  
alueella (Torpparinmäki).



Kuva 36. Kadun alitse rakennettu sadevesirumpu  $\varnothing$  1 000 B pehmeikköalueella (Torpparinmäki).



Kuva 37. Sadevesi- ja jätevesiviemärin perustaminen pehmeikköalueella (Torpparinmäki).



Kuva 38. Lentopallokenttä, Kyläsaari.



5.  
KIVIHIIILITUHKIEN MERKITYS HELSINGIN  
KAUPUNGIN MASSATALOUDESSA

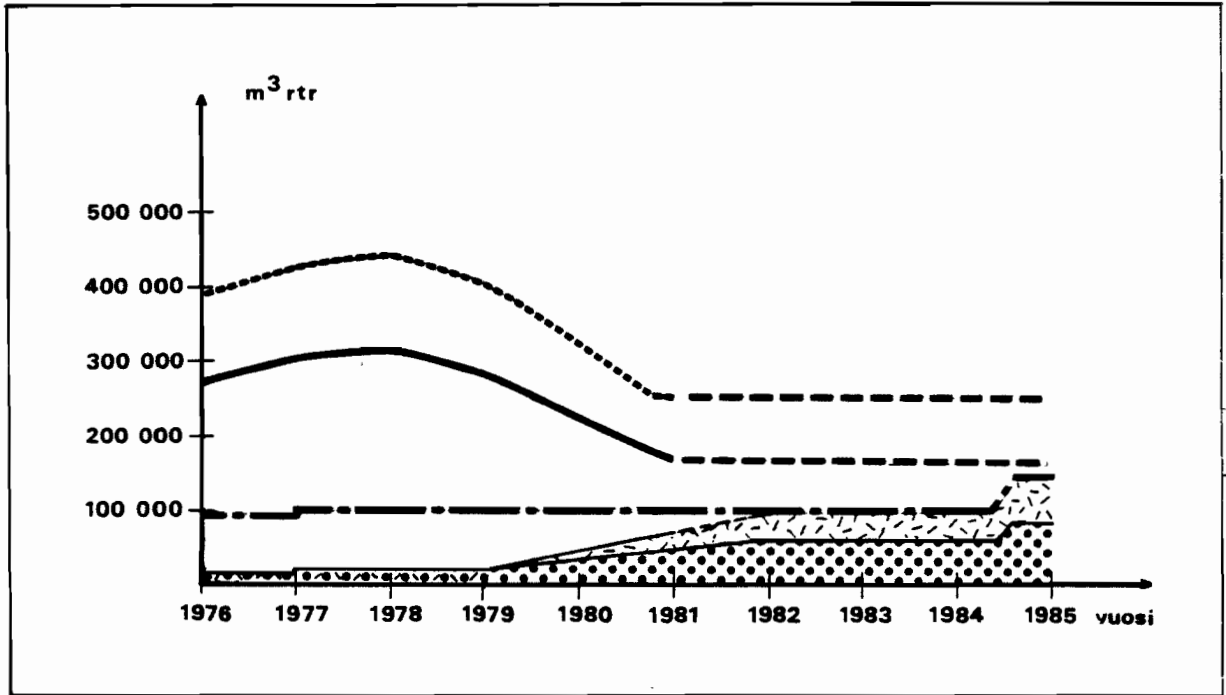
5.1

Maarakentamiseen käytettävät  
kiviainekset

Helsingin kaupungin maarakennustoiminnassa on käytetty kiviaineksia vuosina 1976...1981 keskimäärin noin 650 000 m<sup>3</sup>rtr/a, josta murskaamattomia luonnonkiviaineksia on noin 280 000 m<sup>3</sup>rtr/a, murskeita noin 110 000 m<sup>3</sup>rtr/a ja loput louhetta. Murskaamattomien luonnonkiviainesten käyttö on vähentynyt viiden viimeksi kuluneen vuoden aikana noin kolmanneksella. Murskeiden käyttö on pysynyt melko vakiona. Louheen käyttömäärät ovat vaihdelleet louheen saatavuuden mukaan.

Tuhkilla voidaan korvata lähinnä murskaamattomia luonnonkiviaineksia. Kuvassa 39 esitetään näiden käyttömäärät 1976...1981. Tuhkien käyttö oli vähäistä vuoteen 1979 saakka ja on lisääntynyt tuhkaprojektin toiminnan aikana siten, että 1982 niistä suurin osa ohjataan kaupungin kunnallistekniikan maarakentamiseen, loput myydään betoni- ja sementtiteollisuudelle. Kuvasta 39 nähdään likimäärin tuhkien hyötykäyttöaste 1976...1982. Mikäli kiviainesten käyttö pysyy tulevana vuosina nykyisellä tasolla, tuhkillla voidaan korvata lähes puolet maarakenteisiin tarvittavista murskaamattomista luonnonkiviaineksista. Vuoden 1985 paikkeilla tuhkien potentiaalinen osuus kasvaa Salmisaaren uuden voimalaitoksen valmistuttua noin kolmanneksella.

Hanasaaren lentotuhkilla saattaa olla monipuolisten ominaisuuksiensa vuoksi lähitulevaisuudessa useita taloudellisia käyttömuotoja maarakentamisessa. Sen lujittumisen ansiosta voidaan muun muassa säästää kiviaineksia, kun sitä käytetään normaalia ohuempien kantavien maarakenteiden tekemiseen, lämmöneristävyyttä kuitenkin vähentämättä. Lähi-vuosina nähdään mikä osuus lentotuhkasta ohjataan maarakentamiseen ja mikä osuus sen käytöstä suuresti hyötyväälle betoni- ja sementtiteollisuudelle.



Kuva 39. Helsingin kaupungin maarakentamiseen käytetyt kiviainesmäärät ilman louheita 1976...1981 (Asuntotuotantomiston (ATT) käyttämät määrät puuttuvat) sekä vastaavat arviot vuosille 1982...1985. Helsingissä syntyneiden kivihiilituhkien määrät ja niiden hyötykäytön kehitys 1976...1981 sekä vastaavat arviot vuosille 1982...1985.

- murskaamattomat luonnonkiviainekset
- .... murskaamattomat luonnonkiviainekset + murskeet
- syntyvät kivihiilituhkat
- ▧ hyötykäyttöön (Helsingin kaupungin maarakentamiseen + betoni- ja sementtiteollisuudelle) ohjatut lentotuhkat
- hyötykäyttöön (Helsingin kaupungin maarakentamiseen) ohjatut pohjatuhkat + pohjakuonat.

## 5.2

Tuhkaprojektin kustannukset ja saavutetut kustannussäästöt

## Palkat

Tuhkaprojektin tutkimuksia suorittaneiden henkilöiden palkkakustannukset ovat olleet sosiaalipalkat mukaan lukien 1.8.1979... 31.12.1981 noin 670 000 mk, josta Helsingin kaupunki on saanut valtion tukena noin 140 000 mk. Kaupungin osuus palkkakustannuksista on siten noin 530 000 mk.

Projektia valvova kaupungin virastoista ja laitoksista koottu asiantuntijaryhmä on hoitanut tehtävänsä normaaliin työhön kuuluvana, joten tämän ei voida laskea aiheuttaneen kaupungille lisämenoja.

## Ulkopuolisilta tilatut tutkimukset

Tuhkatutkimuksiin liittyviä erillisselvityksiä on tilattu Valtion teknilliseltä tutkimuskeskukselta ja Tampereen teknilliseltä korkeakoululta. Ne ovat maksaneet 1.8.1979...31.12.1981 yhteensä noin 60 000 mk.

Erillisselvityksiä on tehty myös energia-laitoksen kemian laboratoriossa, jonka työn ei ole laskettu aiheuttaneen kaupungille lisämenoja.

## Tutkimusvälineet ja -materiaalit

Tutkimukseen tarvittavien laitteiden, välineiden ja muun tarvittavan materiaalin hankkimiseen on käytetty 1.8.1979...31.12.1981 noin 40 000 mk.

Kenttätutkimuksiin tarvittavat koneet, välineet ja laitteet ovat kaupungin käytössä ennestään olevia, eikä niiden käytöstä ole laskettu aiheutuneen erillisiä lisäkustannuksia.

## Työskentelytilat

Työskentelytiloina toimivat katurakennusosaston vesi- ja tielaboratorio sekä geoteknisen osaston tilat, joille ei ole laskettavissa tarkkoja käytöstä aiheutuneita kustannuksia.

## Kokonaiskustannukset

Tuhkaprojektin toiminnasta 1.8.1979...31.12.1981 kaupungille aiheutuneet laskettavissa olevat kokonaiskustannukset ovat eriteltynä seuraavat

Palkat	530 000 mk
Ulkopuolisilta tilatut tutkimukset	60 000 mk
Tutkimusvälineet ja materiaalit	40 000 mk
Yhteensä	<u>630 000 mk</u>

## Kiviaineskustannussäästöt

Mikäli 1.10.1979...31.12.1981 tuhka- rakennetut kohteet olisi tehty tavanomaisesti käytetyistä materiaaleista, kiviaineskustannukset olisivat olleet sivulla 80 esitettävään laskelman mukaan noin 2,3 milj. mk. Tuhkaa käytettäessä vastaavat kustannukset ovat olleet noin 1,3 milj. mk. Kustannussäästö on siten noin 1,0 milj. mk, mikä vastaa noin 450 000 mk vuotuista säästöä.

## Säästöt kaatopaikalle ajon vähentyessä

Kun otetaan huomioon, että tuhkaprojektin työn aikana on tuhkien hyötykäyttö lisääntynyt ja samanaikaisesti kaatopaikalle ja täyttömäkiin ajaminen vähentynyt on keskimääräinen vuosisäästö kuljetuskustannuksissa 1.10.1979...31.12.1981 entiseen verrattuna varovaisesti arvioiden noin 250 000 mk.

## Menot ja säästöt

Kun lasketut vuosimenot ja -säästöt 1.8.1979...31.12.1981 yhdistetään, saadaan

Tutkimus-			
kustannukset	-	770 000 mk	= - 320 000 mk/a
Kiviaineskus-			
tannussäästöt	+	1 000 000 mk	= + 450 000 mk/a
Säästöt kaato-			
paikalle ajon			
vähentymisenä	+	560 000 mk	= + 250 000 mk/a
Säästöt yhteensä	+	<u>790 000 mk</u>	= + 380 000 mk/a

Helsingin kaupunki on saanut käytännössä tuhkaprojektin tutkimustoiminnasta aiheutuneet kustannukset takaisin vaikka oletettaisiin, että todellisista kustannuksista pystytään laskemaan vain puolet. Kun lisäksi otetaan huomioon valtiolta palkkoihin saatu tuki 140 000 mk, havaitaan projektin kannattavuus Helsingin kaupungille vielä selvemmin.

## TUHKA- JA SORARAKENTEIDEN KUSTANNUSVERTAILU

(kustannukset joulukuun 1981 hintatasossa)

## KUSTANNUKSET (kuljetus, levitys, tiivistys)

RAKENNUSKOHDJE	Toteelliset			Teoreettiset		
	lt	pt	pk	lt	pt	pk
1. Koivusaaren veneiden talvisäilytyspaikka	27 010,00			33 630,00		
2. Jätkäsaaren satamanosturipenkereiden pinnan stabilointi ja täyttö	6 675,00			10 140,00		
3. Ruosilantie - Kartanonkaari kevyenliikenteen tie	3 368,00	4 955,00		13 650,00		
4. Kyläsaaren puhdistamon lentopallokenttä	1 776,00	516,00		5 120,00		
5. KRO kylmämassa-aseman ajoluiska Mertakadulla	1 775,00		1 243,00	3 130,00		
6. GEO varasto Mertakadulla	2 892,00		48 650,00	6 340,00		
7. Tuomarinkartano ratsastuskenttä	13 220,00	7 585,00	13 990,00	116 820,00		
8. Tuomarinkartano pysäköintialue	63 270,00			67 100,00		
9. Tuomarinkartano pysäköintialue	68 120,00			90 410,00		
10. Tuomarinkartano pysäköintialue	55 825,00	25 807,00		97 480,00		
11. Torpparinmäki PIKO-alue	33 196,00	28 540,00		146 810,00		
12. Torpparinmäki palloilukenttä	68 420,00	56 908,00		66 320,00		
13. Paloheinä pysäköintialue		1 770,00		172 800,00		
14. Paloheinä lietevarasto				92 550,00		
15. Sysimiehentie kevyenliikenteen tie	127 460,00			4 230,00		
16. Pakilantie - Kenä I palloilukenttä	71 120,00	56 000,00		161 120,00		
17. Kompostointivarasto Kaarelantieellä	12 760,00			135 620,00		
18. Maunulan kevyenliikenteen tie	39 110,00			108 600,00		
19. Maunulan kyykkäkenttä	33 760,00			19 750,00		
20. Mersäläntie - Nurmijärventie pysäköintialue	3 145,00	2 265,00	46 300,00	57 460,00		
21. Myllypuro, talojen pohjatäytöt (5 kpl)			4 520,00	42 810,00		
22. Myllypuro, palloilukentät I ja II				169 540,00		
23. Myllypuro, pysäköintialue				17 130,00		
24. Itäkeskus kevyenliikenteen tie	74 190,00	6 730,00	172 000,00	9 690,00		
25. Ipanilan pysäköinti- ja palloilukentät (4 kpl)				357 070,00		
26. Tattarisuon kevyenliikenteen tie	129 650,00			90 720,00		
27. Kyläsaaren puhdistamon tenniskenttä			11 370,00	20 580,00		
28. Pohjois-Haagan palloilukenttä				174 460,00		
29. Myllypuro ulkoilutiet				42 540,00		
YHT.	836 742,00	191 076,00	298 073,00	2 333 620,00		

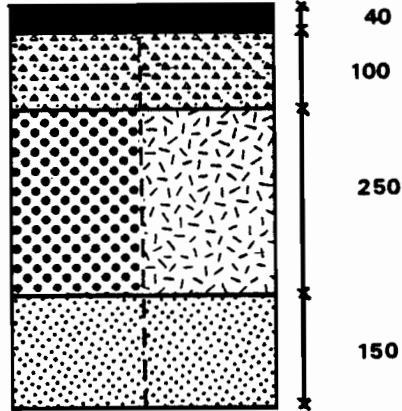
Kokonaiskustannukset 1 326 000,000 mk

SÄÄSTÖT 1,008 Mmk

5.3

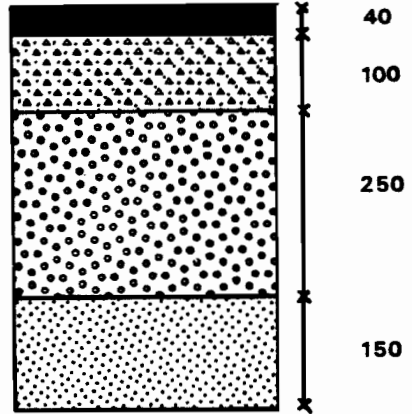
Esimerkkejä tuhkasta tehtyjen koe-  
rakenteiden ja vastaavien normaali-  
rakenteiden kustannuksista

**TUHKARAKENNE**



Pohjamaa kuivakuorisavea  
 Rakenteen hinta ilman  
 AB:a 17,80 mk/m<sup>2</sup>  
 Tuhkien hinta 5,90 mk/m<sup>2</sup>

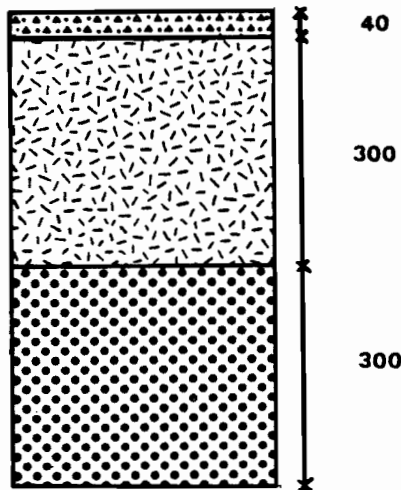
**NORMAALIRAKENNE**



Rakenteen hinta ilman  
 AB:a 21,60 mk/m<sup>2</sup>

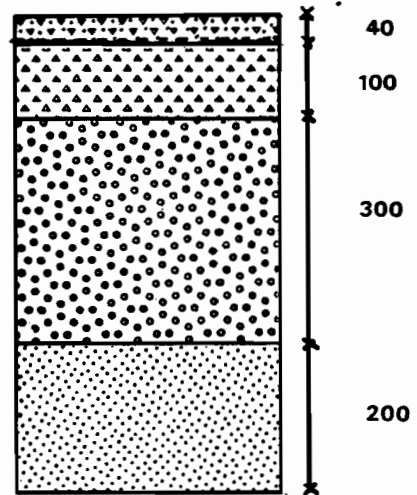
Kuva 40. Kevyenliikenteen tie, Malminkartano.

**TUHKARAKENNE**



Pohjamaa pehmeätä savea  
 Rakenteen hinta 16,90 mk/m<sup>2</sup>  
 Tuhkien hinta 13,50 mk/m<sup>2</sup>

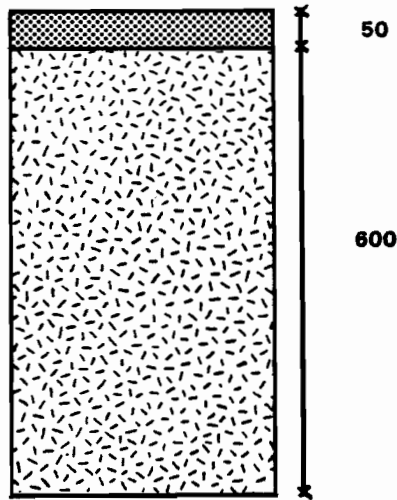
**NORMAALIRAKENNE**



Rakenteen hinta 27,60 mk/m<sup>2</sup>

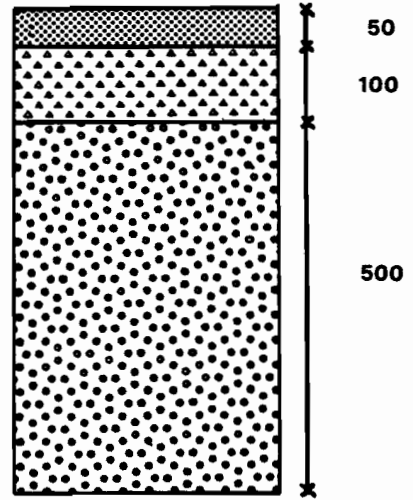
Kuva 41. Kevyenliikenteen tie, Itäkeskus.

## TUHKARAKENNE



Pohjamaa kuivakuorisavea  
 Rakenteen hinta 20,70 mk/m<sup>2</sup>  
 Tuhkan hinta 16,90 mk/m<sup>2</sup>

## NORMAALIRAKENNE



Rakenteen hinta 29,70 mk/m<sup>2</sup>

Kuva 42. Kevyenliikenteen tie, Maunula.

## 5.4

Säästöt toiminnan vakiintuessa

Kun tuhista rakentaminen vakiintuu, niiden hinta lienee, kevään 1982 hintatason mukaan 19...25 mk/m<sup>3</sup> rtr, kun mukaan lasketaan levittämisestä ja tiivistämisestä aiheutuvat kustannukset. Lentotuhkan hinta on tällöin noin 25 mk/m<sup>3</sup> rtr, pohjakuonan ja pohjatuhkan vastaavasti noin 19 mk/m<sup>3</sup> rtr.

Lentotuhkan pohjatuhkaa ja -kuonaa korkeampi hinta maarakenteessa johtuu sen suuremmasta kokoonpuristumisesta tiivistettäessä ja siten suuremmista levittämisen- ja tiivistämiskustannuksista.

Soran ja hiekan korvaajana tuhkia käytettäessä on Helsingillä mahdollisuus säästää vuosittain 2...3 milj. mk, jos toisena vaihtoehtona on kaatopaikoille ja täyttömäkiin ajaminen. Kun tuhkien käyttö suunnataan kohteisiin joissa niiden ominaisuudet voidaan täysin hyödyntää, voi säästö olla vielä suurempi.

Tuhkarakentamisen kustannusvaikutuksia arvioidessa on otettava myös huomioon muun muassa tuhkien saatavuus ja ympäristövaikutukset, jotka saattavat epäedullisissa oloissa vähentää kustannussäästöjä.

## 5.5

Tuhkien varastointi

Tuhkien edullisuus johtuu ensisijassa lyhyistä kuljetusmatkoista. Toinen tärkeä seikka on niiden saatavuus. Koska tuhkia syntyy rakentamista ajatellen melko hitaasti, on kiinnitettävä erityistä huomiota tuhkien jakelujärjestelmään ja tuhkan käytölle sopivien työmaiden ennakoimiseen. Tässä on keskeisessä asemassa tuhkien välivarastoinnin kehittäminen.

Varastointimenetelmän on oltava halpa ja joustava, jotta tuhkat olisivat kilpailukykyisiä muihin kiviaineksiin verrattuna. Halvin vaihtoehto on ilmeisesti tuhkien varastointi kasaan jo ennakolta tiedossa olevien työmaiden välittömään läheisyyteen, edellyttäen, että tarkoitukseen on vapaata maa-aluetta edullisesti käytettävissä. Se ei lisäisi kalliin siirtokuljetuksen osuutta kuin sen verran, minkä tuhkien sijoittelu rakentamispaikalla vaatii.

Kuitenkaan Helsingin kaupungissa ei kallista maa-alaa voida aina etukäteen varata varastopaikaksi. Tämän vuoksi tulisi tuhkien varastointiin löytää joustava välimuoto, jossa osa maarakenteisiin käytettävistä tuhista varastoidaan etukäteen tulevan työmaan läheisyyteen. Alueille, joille tuhkaa ei voida varastoida etukäteen, toimitettaisiin loput tuhkat suoraan voimalaitokselta rakentamisen aikana.

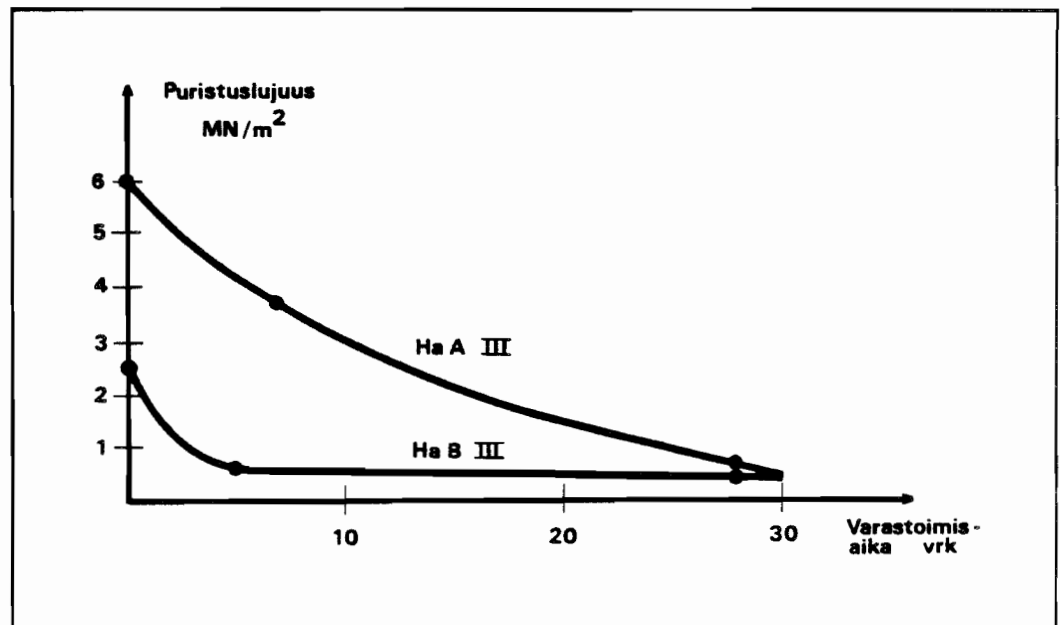
Pohjatuhan ja pohjakuonan varastoiminen kasaan ei vaadi mitään erityisiä toimenpiteitä, kunhan huolehditaan talvella rakennettaessa siitä, että kasan jäätyneitä pinta-aineksia ei käytetä rakenteisiin. Myllypuron lentotuhkakin voidaan lyhyeksi ajaksi varastoida samalla tavoin.

Hanasaaren lentotuhkaa voidaan varastoida avoimella kuljettamisen vaatimassa kosteudessa ( $w \approx 10\%$ ) kasaan, mikäli sitä käytetään rakenteissa, joissa siltä ei vaadita suurta lujuutta. Kuitenkin on huolehdittava, ettei lentotuhka pääse kastumaan lisää kasassa ollessaan. Pohjan kautta tulevan kapillaariveden ja sateiden aiheuttama veden pääsy lentotuhkaan on estettävä. Parhaiten tämä voidaan tehdä levittämällä kasan alle muovikelmu ja päälle sopiva kate, esimerkiksi jatkuvakäyttöinen, luja ja helposti ankkuroitava muovipeite tai ruiskutettava emulsiokate.



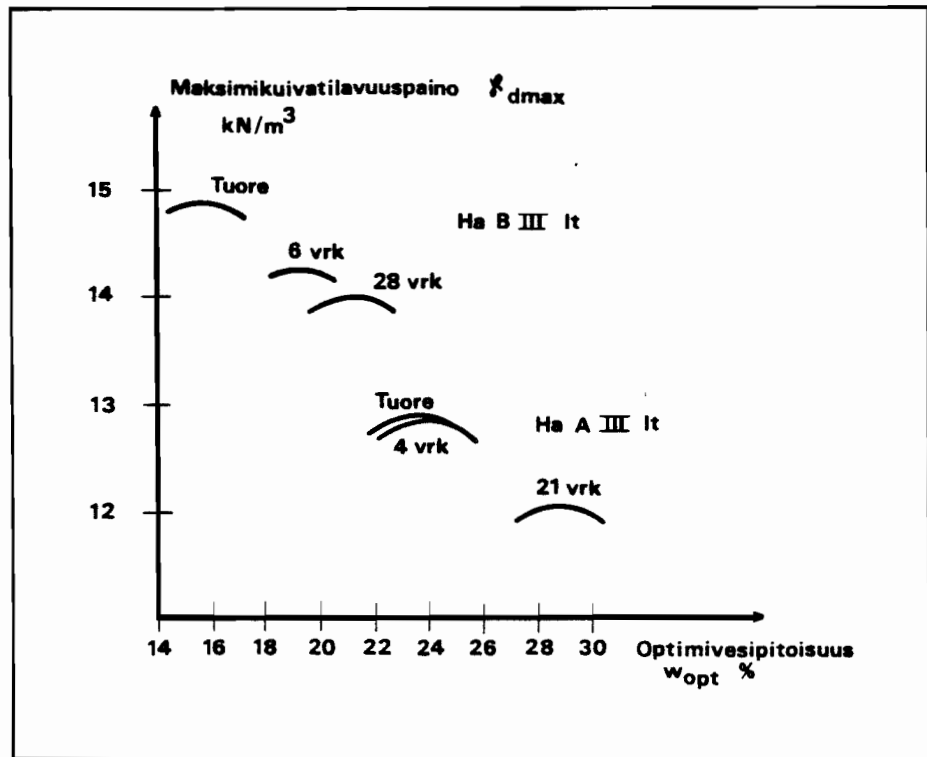
Näin saadaan poistetuksi myös pölyämisiongelma. Kattaminen aiheuttaa kuitenkin jonkin verran lisäkustannuksia, jotka on selvitettävä ennen menetelmän käyttöönottamista. Kuivalla säällä lentotuhkaa voidaan kuitenkin varastoida kostutettuna lyhyeksi ajaksi, korkeintaan muutamaksi päiväksi, ilman suojaamista.

Kun Hanasaaren lentotuhkaa käytetään maabetonin tavoin suurta lujuutta vaativissa rakenteissa, on lentotuhka toimitettava rakentamispaikalle joko suoraan voimalaitokselta tai välivarastosta, jossa sitä säilytetään kuivana. Kosteana säilyttäminen heikentää jo muutamassa vuorokaudessa lentotuhkan lujittumisominaisuuksia merkittävästi, kuva 43.

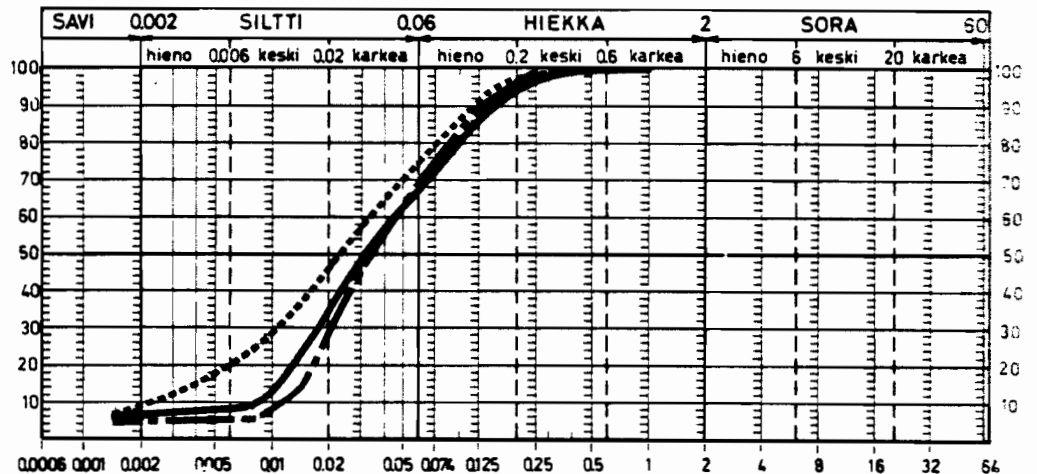


Kuva 43. Hanasaaren A- ja B-laitoksen lentotuhkien, näytteet A III ja B III, 28 vuorokauden puristuslujuuden riippuvuus varastoimisajasta laboratoriotokokeessa. Näytteen A III varastoimiskosteus  $w = 17,0 \%$ , näytteen B III  $w = 12,0 \%$ .

Lujuusominaisuuksien heikkeneminen johtuu siitä, että kosteassa lentotuhkassa potsolaanireaktiot käynnistyvät jo välivarastointivaiheessa riittävän (+24 °C) lämpötilan vallitessa. Tällöin osa sitoutumis-kyvystä on menetetty, kun varastokasa siirretään lopulliseen rakenteeseen. Samasta syystä pienenee lentotuhkan kuivatilavuuspaino, koska lentotuhkapartikkelit ovat muodostaneet keskenään sidoksia, jolloin rakeisuus ja samalla myös tiivistetyn lentotuhkan rakenne on muuttunut, kuvat 44 ja 45. Optimivesipitoisuus kasvaa lisääntyneen huokoisuuden johdosta.



Kuva 44. Varastoimisajan vaikutus Hanasaaren A- ja B-laitoksen lentotuhkien maksimikuivatilavuuspainoon ja optimivesipitoisuuteen, näytteet A III ja B III.



Kuva 45. Varastoimisen vaikutus Hanasaaren B-laitoksen lentotuhkanäytteen B V rakeisuuteen

- ..... ilmakuiva näyte
- - - - - näytteen vesipitoisuus  
w = 8...10 %, varastoitamisaika 5 vuorokautta
- näytteen vesipitoisuus  
w = 8...14 %, varastoitamisaika 12 vuorokautta.

Tuhkien taloudellisen ja joustavan käytön edellytyksenä on varastointijärjestelmä, jossa rakentamisen tarpeet ja tuhkien tekniset ominaisuudet otetaan huomioon. Tämä onkin jatkossa yksi tärkeimpiä selvitettäviä asioita.

## 6. YHTEENVETO

Tuhkaprojekti on selvittänyt Helsingin kivihiilituhkien ominaisuuksia ja niiden soveltuvuutta kunnallistekniikan maarakentamiseen geoteknisen osaston 1979 käynnistämässä tutkimuksessa. Aikaisemmin Helsingissä huonosti rakennusmateriaalina tunnetun tuhkan ominaisuuksien selvittämiseksi on jouduttu tekemään melko paljon laboratoriotutkimuksia. Näistä saadut tiedot on pyritty soveltamaan heti käytäntöön tekemällä kaupungin alueelle koerakenteita, joiden rakentamista ja käytönaikaista toimivuutta on valvottu kenttämittauksin. Koe-kohteita oli vuoden 1981 lopussa jo noin 35 ja toukokuussa 1982 yli 40.

Kaikkien Helsingin kivihiilituhkatyyppien on todettu soveltuvan maarakentamiseen soran ja hiekan korvaajana. Tuhkilla on tärkeä merkitys Helsingin kaupungin massataloudessa ja niillä voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä, kun niiden edulliset ominaisuudet käytetään oikein hyödyksi. Jotta tähän päästäisiin, tarvitaan vielä runsaasti tuotekehittelyä.

Koerakentamiseen käytettiin vuoden 1981 loppuun mennessä tuhkia noin 60 000 m<sup>3</sup> rtr. Tutkimuksen aikana on kiviaineskustannusten ja kaatopaikalle ajon vähentymisen vuoksi saavutettu säästöä niin paljon, että tutkimuksesta aiheutuneet kustannukset on pystytty peittämään.

Pehmeiköillä ja lämmöneristyskykyä vaativissa kohteissa tuhkat ovat parempia materiaaleja kuin tavanomaisesti käytettävät kiviainekset. Tehdyissä kenttä- ja laboratoriotutkimuksissa niiden ei ole todettu routivan, mikä on Suomen oloissa niiden käytön välttämätön edellytys.

Koerakentamisen aikana on tuhkatyypeistä vaikeimmin käsiteltäväksi todettu lentotuhka, jonka vesipitoisuus on tiivistettäessä oltava lähellä optimia. Kuitenkin sen käyttö on yhtä helppoa kuin muidenkin materiaalien, kun sen ominaisuudet tunnetaan. Lentotuhkan lujittumisominaisuus saattaa avata uusia taloudellisia mahdollisuuksia geotekniikassa. Sen arvo voi nousta tällöin huomattavasti suuremmaksi kuin pelkästään soran ja hiekan korvaajana.

## 7.

### JATKOTOIMENPITEET

#### 7.1

#### Rakennustekniset ominaisuudet

Tuhkien käytön vakiintuessa on edelleen selvitettävä niiden rakennusteknisiä ominaisuuksia. Tutkimus painottuu tältä osin jatkossa rakennettujen kohteiden pitkän ajan seurantaan. Kuitenkin joudutaan tekemään uusia koerakenteita eräiden ominaisuuksien varmistamiseksi. Muun muassa kantavuusominaisuuksista, lämmöneristyskyvystä ja routivuudesta tarvitaan lisäkokeita. Lentotuhkan hyödyntämismahdollisuuksien laajentamista tullaan myös selvittämään. Kentällä tullaan kokeilemaan muun muassa kalkin lisäämistä lentotuhkaan. Lujittuneen lentotuhkan vetolujuuden parantamiseksi aiotaan kokeilla sen vahvistamista lujilla muoviverkoilla, joiden vetolujuus on samaa luokkaa kuin teräksellä.

## 7.2

Taloudellisuus

Tuhkarakentamisen kustannuksia pyritään seuraamaan entistä tarkemmin. Samalla tuhkia pyritään käyttämään sellaisissa rakentamiskohteissa, joissa niiden edulliset ominaisuudet voidaan taloudellisessa mielessä parhaiten hyödyntää.

## 7.3

Tuhkien ympäristövaikutukset ja ominaisuudet kasvualustana

Tärkeä osa-alue jatkotutkimuksissa tulee olemaan kivihiilituhkien ympäristövaikutusten selvittäminen. Lisäksi tuhkien soveltuvuus kasvualustaksi aiotaan erikseen tutkia, jotta varmistutaan niiden vaikutuksista kunnallisteknisten rakenteiden yhteydessä istutettavaan kasvillisuuteen.

Tuhkaprojektin nykyisellä henkilöstöllä ei kuitenkaan ole ammatillista pätevyyttä ympäristövaikutusten ja kasvualusta-asioiden tutkimiseen. Tämän vuoksi työ kuuluu lähinnä rakennusviraston katurakennusosaston ja puistoosaston tehtäväkenttään. Katurakennusosaston vesilaboratorion tutkija Ilkka Viitasalo on laatinut selvityksen käynnistämiseksi seuraavan suunnitelman.

## Tuhkien ympäristövaikutukset

Tuhkien ympäristövaikutukset liittyvät niiden kemiallisiin ominaisuuksiin ja näissä tapahtuviin muutoksiin eri käyttömuotojen yhteydessä. Muutokset ovat yleensä hitaita, joten niiden tutkiminen vie pitkän ajan. Joitakin tutkimuksia voidaan alustavina tehdä myös laboratoriossa, joskin tulokset tulisi varmistaa kenttäkokein. Useimmat ympäristövaikutukset kohdistuvat pohjaveteen ja kasvillisuuteen.

## Tutkimuskohde-esimerkkejä

- 1 Tuhkien avulla rakennetun ulkoilutien vaikutus alueen pohjaveden laatuun. Kenttätutkimus, geoteknisen osaston pohjavesiputkia noin 20 kappaletta, näytteenotto kuusi kertaa vuodessa. Tutkimusaika 1...2 vuotta. Suorittajat geotekninen osasto ja katurakennusosasto.

- 2 Tuhkien avulla rakennetun ulkoilutien vaikutus ympäristön kasvillisuuteen. Kasvillisuusanalyysit kentällä, mahdollisesti täydennettynä kemiallisilla lehti- ja neulasanalyysillä. Tutkimusaika kaksi vuotta. Suorittajat kaupunkisuunnitteluvirasto ja katurakennusosasto.
- 3 Tuhkien uuttotutkimus. Laboratorio-  
koe, 20 uuttokolonnia. Kemialliset analyysit uuttovedestä. Tutkimusaika kuusi kuukautta. Suorittajat geotekninen osasto ja katurakennusosasto.
- 4 Tuhkien kemialliset analyysit. Tarjoavat perustietoa edellä mainituille tutkimuksille, samoin kasvualustatutkimuksille. Tilaustyönä Valtion teknilliseltä tutkimuskeskukselta tai Viljavuuspalvelu Osakeyhtiöltä. Noin 10 näytettä.

#### Tuhkat kasvualustana

Tuhkia voidaan käyttää kasvualustana tai sen osana, jos niillä voidaan osoittaa olevan edullista vaikutusta kasvien kasvuun tai maaperään. Vaikutus voi olla:

- lannoitusvaikutus
- kalkitusvaikutus
- maanparannusvaikutus.

Samanaikaisesti on huomioitava mahdolliset haittavaikutukset, joita voivat aiheuttaa:

- raskaat metallit
- tuhkan palamattomat ainesosat (rikki, terva).

Tuhkat ovat useimmiten emäksisiä, joten niitä voidaan käyttää neutralointiaineina. Tällöin jouduttaneen käyttämään kuitenkin niin suuria annoksia, että tuhkien sisältämien haitta-aineiden (raskaat metallit) vaikutus saattaa kasvaa merkitseväksi.

Karkearakeisella kuonalla ja pohjatuhkalla saattaa joissakin tapauksissa olla myös maan rakennetta parantava vaikutus.

Tuhkan ja kuonan yhteiskäyttö saattaa olla mahdollista kompostin lisäaineena. Kompostin karkea materiaali voidaan mahdollisesti korvata kuonalla ja sen pH-arvoa voidaan nostaa lentotuhkalla.

#### Tutkimuskohde-esimerkkejä

- 1 Lentotuhkan vaikutus havupuiden kasvuun turvemaidella. Kenttätutkimus. Tutkimusaika viisi vuotta. Suorittajana Metsäntutkimuslaitos.
- 2 Lento- ja pohjatuhan käyttö kompostissa. Suorittajina puisto-osasto ja katurakennusosasto. Tutkimusaika kaksi vuotta.
- 3 Pohjakuonan vaikutus peltomaiden rakenteeseen. Kenttätutkimus. Tutkimusaika kolme vuotta. Suorittajina metsä- ja maatalousosasto ja katurakennusosasto.

Suunnitelman edellyttämän tutkimuksen kokonaiskustannusarvio on vähintään 200 000 mk, kun käytetään kaupungin omia resursseja ja työ tehdään virkatyönä. Mikäli työ tilataan ulkopuolisilta, kokonaiskustannukset ovat vähintään 600 000 mk. Varsinainen koetoiminta tulisi saada käyntiin ennen syksyä 1982. Rahoitus on sen vuoksi järjestettävä kesän kuluessa.

#### 7.4

#### Korroosiovaikutukset

Kivihiilituhkien ympäristövaikutusten piiriin kuuluvien rakennusmateriaaleja syövyttävien vaikutusten selvitystyö on käynnissä. Sen yhteydessä selvitetään muun muassa kunkin tuhkatyyppin korroosion kannalta oleellisten aineiden pitoisuudet sekä sähkönjohtokyky. Vertailumateriaaleina käytetään soraa ja täytemaata. Jotta syövyttävyydestä voitaisiin varmistua, on tuhista ja vertailumateriaaleista tehtyihin rakenteisiin asennettu metalli- ja betonikappaleita, joiden syöpyminen voidaan todeta kun ne kaivetaan ylös. Tiedot tutkimuksesta julkaistaan myöhemmin.

## KIRJALLISUUTTA

- 1 BARBER, E.G., JONES, G.T., KNIGHT, P.G.K, MILES, M.H., PFA Utilization, CEGB, London 1972, 104 s.
- 2 BESKOW, G., Tjälproblem, I Bygg 1, Allmänna grunder, AB Byggmästarens förlag, Stockholm 1959, ss. 840...853.
- 3 EEROLA, M., ALKIO, R., Voimalaitostuhkat ja niiden hyväksikäyttö, osa 7, VTT:n Tie- ja liikennelaboratorio, Tiedonanto 54, Espoo 1980, 67 s.
- 4 FABER, J.H., BABCOCK, A.W., SPENCER, J.D., Ash Utilization, St. Louis, Missouri, March 24...25, 1976. Energy Research and Development Administration, West Virginia 1976, 688 s.
- 5 FABER, J.H., ECKARD, W.E., SPENCER, J.D., Ash Utilization, Pittsburgh, March 13...14, 1973, U.S. Department of The Interior, Bureau of Mines Information Circular, Washington 1974, 317 s.
- 6 HAVUKAINEN, J., Kivihiilivoimalan tuhkan käyttö maa- rakenteissa, Helsingin kaupungin geoteknisen osaston tiedote 18, Helsinki 1981, 50 s.
- 7 International Conference on the use of by-products and waste in Civil Engineering, Paris 28...30 Novembre 1978, Volume I, II, III, Association Anicale des Ingénieurs Anciens Elèves de I'E.N.P.C., Paris 1978, 705 s.
- 8 Kadunrakennuksen tekniset ohjeet, Suomen kunnallisteknillisen yhdistyksen julkaisu n:o 11, Helsinki 1976, 174 s.
- 9 KEPPO, M., YLINEN, P., Suomessa muodostuvat tuhkamäärät ja niiden laatu. Voimalaitostuhkat ja niiden hyväksikäyttö, osa 1, VTT:n Betoni- ja silikaattitekniikan laboratorio, Tiedonanto 61, Espoo 1980, 63 s.
- 10 MEYERS, J.F., PICHUMANI, R., KAPPLES, B.S., Fly Ash as a Construction Material for Highways, Pennsylvania 1976, 177 s.
- 11 MILLER, R.H., COLLINS, R.J., Waste Materials as Potential Replacements for Highway Aggregates, National Cooperative Highway Research Program Report 166, Washington D.C., 1976, 94 s.
- 12 OIKARINEN, P., Lentotuhkan käyttömahdollisuuksista pengertäytteessä, Diplomityö, Oulun Yliopisto, rakennusinsinööri-osasto, Oulu 1971, 67 s.



- 13 Pohjarakennus, RIL 95, Suomen rakennusinsinöörien liitto, Helsinki 1974, 459 s.
- 14 Pohjarakennusohjeet, RIL 121, Suomen rakennusinsinöörien liitto, SFS 4315, Helsinki 1979, 74 s.
- 15 SAVOLAINEN, R., Voimalaitostuhka ja sen hyötykäyttö, Imatran Voima Oy, Rakennusosasto, Betoni- ja maateknillinen toimisto, Helsinki 1978, 35 s.
- 16 SCHEFFEY, C.F., The Application of Brown Coal Fly Ash to Road Base Courses, Federal Highway Administration, Washington D.C., 1979, 145 s.
- 17 Stabilointiohjeet, Kalkki- ja sementtistabilointi, Tie- ja vesirakennushallitus, maantutkimustoimisto, Helsinki 1973, 58 s.
- 18 TORREY, S., Coal Ash Utilization. Fly Ash, Bottom Ash and Slag, Pollution Technology Review No 48, NDC, U.S.A., 1978, 370 s.
- 19 TSYTOVICH, N.A., The mechanics of frozen ground, U.S.A. 1975
- 20 Use of waste materials and by-products in road construction, OECD Road Research Group, OECD, Paris 1977, 168 s.
- 21 VALANNE, I., Lentotuhkan korroosiovaikutuksista, Diplomityö, Oulun yliopisto, rakennusinsinööriosasto, Oulu 1971, 57 s.
- 22 VESIKARI, E., Kriittinen vedelläkyllästysaste - uusi käsite betonin pakkasenkestävyyden arvioimisessa. Betonituote 3/81, ss 49...51.
- 23 Voimalaitostuhkan ja polttolaitoskuonan hyötykäyttö rakentamisessa, Helsingin kaupungin geoteknisen osaston tiedote 13, Helsinki 1979, 83 s.

## NIMITYKSIÄ JA MERKINTÖJÄ

Bituminiitti	Erään jaottelun mukainen bitumipitoinen kivihiililyyppi (muuta voimalaitoksissa käytettäviä tyyppejä ovat ligniitti ja ruskohiili)
Lentotuhka, lt	Savukaasuista sähköisin ja/tai mekaanisin erottimin talteen otettava hieno tuhka
Pohjatuhka, pt	Kuivapohjatyypisissä, pölynä hiiltä polttavissa laitoksissa palotilan pohjalle jäävä karkea tuhka
Pohjakuona, pk	Murskeena hiiltä polttavien arinapolttolaitosten arinalle jäävä karkea kuonainen tuhka
Ha lt	Hanasaaren voimalaitosten lentotuhka
Ha A lt	Hanasaaren A-laitoksen lentotuhka
Ha Ak 2 10	Hanasaaren A-laitoksen lentotuhka, joka on kattilasta 2 peräisin oleva näyte n:o 10
Ha A III	Hanasaaren A-laitoksen lentotuhka, kattila ei tiedossa, näyte III
Ha B pt	Hanasaaren B-laitoksen pohjatuhka
My lt	Myllypuron voimalaitoksen lentotuhka
Sa pk	Salmisaaren voimalaitoksen pohjakuona
Murskaamattomat luonnonkiviainekset	Sorat ja hiekat
Murskeet	Louheesta tai luonnonkiviaineksista murskatut kiviainekset tai niiden seokset
Areometrikoe	Stokes'in lakiin perustuva hienorakeisten maalajien rakeisuuden määritysmenetelmä
CBR-laite	Maarakenteen kantavuuden mittaamiseen kehitetyssä menetelmässä (California Bearing Ratio) käytettävä puristuslaite
cu-koe	Konsolidoitu nopea koe (consolidated undrained-test); maan leikkauslujuuden määritysmenetelmä, jossa kuormitus tahtuu hitaasti mutta leikkaus nopeasti
Karbidometri	Maa-aineksen vesipitoisuuden määrityslaite, jonka toiminta perustuu kalsiumkarbidin ja maa-aineksessa olevan veden reaktion yhteydessä syntyvän kaasun paineen mittaamiseen

Kombrimetri	Tiiviydenmittauslaite, jonka toiminta perustuu tiivistyvän maan muodonmuutokseen
Proctor-koe	Aineksen tiivistämisominaisuuksien selvittämiseksi proctor-sullointa ja -muottia käyttäen laboratorioissa suoritettava koe
Proctor-neula	Laite, jolla mitataan välillisesti maan leikkauslujuutta, voidaan käyttää myös homogeenisen maan likimääräiseen tiiviyden arvioimiseen
Pyknometri	Lasinen mittapullo, jota käytetään maa-ainesten kiintotiheyden määrittämisessä
Vesivolymetri	Maarakenteen tiiviyden tarkkailussa käytettävä aineksen kokonaistilavuuden rakenteessa mittaava laite
Ödometri	Maakerrosten kokoonpuristuvuusominaisuuksien arvioimiseksi kehitetty laite
$\beta$	Jännityseksponentti, lasketaan ödometrikokeen tuloksista, käytetään painumalaskelmissa tangentialmoduulimenetelmän yhteydessä
Blaine-luku	Aineksen rakeiden kokonaispinta-alan ja aineksen massan suhde eli ominaispinta-ala ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )
$\gamma$	Tilavuuspaino = irtotiheys x maan vetovoiman aiheuttama kiihtyvyys $9,81 \text{ m/s}^2$ ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )
$\gamma_d$	Kuivatilavuuspaino = tilavuuspaino, kun huokosveden massaa ei oteta huomioon ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )
$\gamma_m$	Märkätilavuuspaino = tilavuuspaino, kun huokosveden massa otetaan huomioon ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )
c	Maa-aineksen näennäinen koheesio ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )
$c_{14 \text{ vrk}}$	14 vuorokautta laboratorioissa lujittuneen lentotuhkakappaleen näennäinen koheesio ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )
D	Tiiviysaste, ilmoittaa aineksen kuivatilavuuspainon prosentuaalisen osuuden maksimikuivatilavuuspainosta
$\phi$	Maa-aineksen näennäinen kitkakulma ( $^\circ$ )
$\phi_{14 \text{ vrk}}$	14 vuorokautta laboratorioissa lujittuneen lentotuhkakappaleen näennäinen kitkakulma ( $^\circ$ )

F	Pakkassumma, saadaan kun vuorokauden keskilämpötilojen summa kerrotaan luvulla $-24$ ( $h^{\circ}C$ )
$h_c$	Kapillaarinen nousukorkeus (m,mm), korkeus, jolle vesi nousee maa- tai tuhka-aineksessa kapillarivoimien vaikutuksesta
HH	Hehkutushäviö = hehkuttamalla tuhkalle määritettävä palamattomien ainesten osuus painoprosentteina
itd	Irtotodellinen, $m^3$ itd ilmoittaa aineksen tilavuuden kuutiometreinä esimerkiksi kuorma-auton lavalla
k	Vedenläpäisevyyskerroin (m/s), ilmoittaa pintayksikön suuruisen poikkileikkauksen kautta aikayksikössä virtaavan veden määrän hydraulisen putouksen ollessa 1, veden todellinen virtaamisnopeus rakenteessa on $\frac{k \times i}{n}$ , kun n on huokoisuus ja i on hydraulinen putous
Los Angeles-luku	Ilmoittaa kiviaineksen kulutuskestävyyden
m , $m_2$	Moduulilukuja, jotka lasketaan ödometrikokeen tuloksista, käytetään painumalaskelmissa tangenttimoduulimenetelmän yhteydessä
n	Huokoisuus (%), maa- tai tuhka-aineksen sisältämän huokostilavuuden osuus aineksen kokonaistilavuudesta
P	Puristuslujuus = yksiakselinen lieriöpuristuslujuus ( $MN/m^2$ )
$\rho_s$	Kiintotiheys = kiinteän aineksen massan ja tilavuuden suhde ( $t/m^3$ ), näennäiskiintotiheys = kiinteän aineksen massan ja rakeiden kokonaistilavuuden (kiinteä aines + rakeiden sisäiset huokokset) suhde ( $t/m^3$ )
$\rho$	Irtotiheys = kiinteän aineksen massan ja kokonaistilavuuden (kiinteä aines + rakeiden sisäiset huokokset + rakeiden väliset huokokset) suhde ( $t/m^3$ )
rtr	Rakenneteoreettinen, $m^3$ rtr ilmoittaa aineksen teoreettisen tilavuuden kuutiometreinä rakenteessa
$\delta$	Maa-aineksen leikkauspintaa vastaan kohtisuoraan vaikuttava normaalijännitys ( $kN/m^2$ )

s	Leikkauslujuus ( $s = c + \tan \phi$ ) ( $\text{kN/m}^2$ )
S	Vedelläkyllästysaste
$S_{CR}$	Kriittinen vedelläkyllästysaste
w	Vesipitoisuus prosentteina kuivapainosta
$w_{opt}$	Vesipitoisuus (%), jolla proctor-kokeessa saavutetaan ainekselle maksimikuivatilavuuspaino

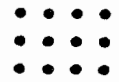
## TUHKA- JA MAALAJIMERKINNÄT



Lentotuhka



Pohjatuhka



Pohjakuona



Hiekka



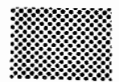
Sora



Murske



Murskesora



Hienomurske

## GEOTEKNISEN OSASTON TIEDOTTEET

N:o			Hinta
1	15. 1.1973	GEOTEKNILLISET KARTAT JA NIIDEN KÄYTTÄMINEN	30,-
2	1.11.1973	KAUPUNKISUUNNITTELUN GEOTEKNILLINEN TUTKIMUS JA SUUNNITTELU	50,-
3	1. 3.1974	KUNNALLISTEKNIIKAN GEOTEKNILLINEN TUTKIMUS JA SUUNNITTELU	50,-
4	1. 8.1974	TÄYTTÖMÄKIEN RAKENTAMINEN KAUPUNKIALUEELLA	50,-
5	1.12.1974	MELUSUOJARAKENTEIDEN PERUSTAMIS- TAPASELVITYS	30,-
6	12. 1.1976	KITKAPAALUJEN KANTAVUUS	30,-
7	15. 2.1977	PUTKIJOHTOJEN POHJARAKENTEIDEN MITOITTAMINEN	50,-
8	1. 4.1977	METROTUNNELLEIDEN INJEKTOINTI	120,-
9	15.11.1977	KALLIOTUNNELIEN KÄYTTÖ VARASTOINTIIN	50,-
10	10.10.1978	RAKENTAMISEN VAIKUTUS POHJAVETEEN HELSINGIN KESKUSTASSA, Heikki Tikkanen	70,-
11	15.10.1978	KLUUVIN RUHJEEN JÄÄDYTYKSI, Olli Arkima	120,-
12	20. 1.1979	PUISET PERUSRAKENTEET, Pekka Raudasmaa	50,-
13	1. 3.1979	VOIMALAITOSTUHKAN JA POLTTOLAITOSKUONAN HYÖTYKÄYTTÖ RAKENTAMISESSA	50,-
14	1. 6.1979	PEHMEIKÖLLE PERUSTETTAVAN PIENTALON PAINUMIEN LASKEMINEN, Ilkka Vähäaho	50,-
15	1. 5.1980	POHJAVESITARKKAILU -80	50,-
16	1. 9.1979	KATSAUS TUNNELIEN RAKENTAMISTEKNIIKAN NYKYTILAAN ATLANTAN KANSAINVÄLISEN TUNNELIKONFERENSSIN PERUSTEELLA	-
17	30. 3.1981	MATKAKERTOMUS TUTUSTUMISMATKALTA TUKHOLMAN YHTEISKÄYTTÖTUNNELLEIHIN, Jarmo Roinisto	50,-

N:o			Hinta
18	27. 1.1981	KIVIHIILIVOIMALAN TUHKAN KÄYTTÖ MAARAKENTEISSA, Jorma Havukainen	50,-
19	30. 3.1981	YHTEISKÄYTTÖTUNNELEIDEN TEKNIS- TALOUDELLINEN SELVITYS, Jarmo Roinisto	50,-
20	11. 9.1981	TALONRAKENNUKSEN MAARAKENTEET JA NIIDEN LAADUNVALVONTA, Pekka Vuola	50,-
21	23. 9.1981	TONTTIALUEIDEN MAARAKENTEET, Osmo Korhonen, Jorma Havukainen	30,-
22	11.12.1981	ESIMERKKEJÄ JÄTTEIDEN HYÖTYKÄYTÖSTÄ RAAKA-AINEENA JA ENERGIANLÄHTEENÄ, Jorma Havukainen	-
23	1. 7.1982	KIVIHIILIVOIMALAN TUHKIEN HYÖTYKÄYTTÖ- SELVITYS KUNNALLISTEKNIKKASSA, Jorma Havukainen	50,-