



Kivihiilivoimaloiden rikinpoistotuotteet ja lentotuhka maarakentamisessa

Jatkotutkimus

Esa Mäkelä, Margareta Wahlström,
Miina Pihlajaniemi & Ulla-Maija Mroueh

VTT Kemiantekniikka

Martti Keppo & Pia Rämö

Lohja Rudus Ympäristöteknologia Oy



ISBN 951-38-5419-1 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-5420-5 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1999

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Kemiantekniikka, Ympäristötekniikka, Betonimiehenkuja 5, PL 1403, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 7022

VTT Kemiteknik, Miljöteknik, Betongblandargränden 5, PB 1403, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 7022

VTT Chemical Technology, Environmental Technology,
Betonimiehenkuja 5, P.O.Box 1403, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 7022

Toimitus Leena Ukssoski

Libella Painopalvelu Oy, Espoo 1999

Mäkelä, Esa, Wahlström, Margareta, Pihlajaniemi, Miina, Mroueh, Ulla-Maija, Keppo, Martti & Rämö, Pia. Kivihiilivoimaloiden rikinpoistotuotteet ja lentotuhka maarakentamisessa. Jatkotutkimus [Use of coal combustion residues in earthworks. A follow-up study]. Espoo 1999, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1952. 61 s. + liitt. 3 s.

Avainsanat electric power plants, coal combustion, earthwork, flue gases, fly ash, road construction, desulfurization

TIIVISTELMÄ

Tutkimuksen tavoitteena oli kehittää kivihiilivoimaloiden lentotuhkasta ja puolikuivamenetelmän rikinpoistotuotteesta teknisesti toimivia ja ympäristökelpoisia maarakennuskäyttöön sopivia tuotteita. Tuotteiden soveltuvuutta tutkittiin sekä laboratoriokokein että käytännön koekohteissa. Lentotuhkasta ja lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen seoksista tehtiin useita kymmeniä koekappaleita, joista osassa kokeiltiin myös erilaisia lisäaineita. Tavoitteena oli selvittää parhaat lentotuhka- ja rikinpoistotuoteseossuhteet sekä lisäaineiden vaikutukset seosten ominaisuuksiin.

Teknistä kelpoisuutta arvioitiin määrittämällä koekappaleiden puristuslujuudet ja tiheydet. Lentotuhkien lujuudenkehityksessä havaittiin selviä eroja. Tuhkamassojen ominaisuuksia pystyttiin muuntelemaan ja parantamaan huomattavasti sideaineita käyttämällä. Myös rikinpoistotuote toimii massan lujuutta parantavana sideaineena. Lentotuhka-rikinpoistotuoteseokset lujittuivat parhaiten, kun rikinpoistotuotteen osuus oli 5–30 %.

Ympäristökelpoisuuden selvittämiseksi tutkittiin sulfaatin, kloridin ja molybdeenin liukoisuudet hollantilaisella diffuusioliukoisuustestillä (NEN 7345). Jatkotutkimuksessa selvitettiin lisäksi tuhkien ja rikinpoistotuotteiden laatuvaihtelun sekä koekappaleiden iän ja tiiviyden vaikutusta liukenemiseen. Massoista käytännön olosuhteissa liukenevia määriä seurattiin koekohteeseen rakennetuista lysimetreistä yhteensä noin neljän vuoden ajan. Tutkittavat aineet valittiin aikaisempien kokemusten ja vanhoista kenttäkohteista otettujen näytteiden perusteella. Ympäristökelpoisuuden arvioinnissa käytettiin testeille Hollannissa esitettyjä ohjeellisia arvoja.

Lentotuhkassa kriittisin liukeneva aine oli molybdeeni. Sekä eri laitosten välisen tuhkien laatuvaihtelun että laitoksen sisäisen laatuvaihtelun, mm. pitoisuustason, todettiin vaikuttavan selvästi molybdeenin liukoisuuteen. Tuhkamassojen todettiin kuitenkin soveltuvan joko vettä heikosti läpäisevällä materiaalilla pintaeristettyinä tai joissakin tapauksissa pelkästään peitettyinä maarakentamisessa käytettäväksi.

Lentotuhkaa ja rikinpoistotuotetta sisältävissä koekappaleissa kriittisin haitta-aine oli kloridi. Sulfaatin ja molybdeenin liukoisuuksiin pystyttiin vaikuttamaan selvästi side- ja lisäaineilla. Myös rikinpoistotuotelisäys vaikutti molybdeenin liukoisuutta vähentävästi. Kloridin ja mahdollisesti joissakin tapauksissa myös

sulfaatin liukenemisen vuoksi rikinpoistotuotteen osuus maarakenteissa käytettävissä massoissa voi yleensä olla vain 10–20 %. Meren rannalla sijaitsevissa kohteissa, joissa valumavedet kanavoituvat suoraan mereen, voidaan kuitenkin tapauskohtaisen arvioinnin perusteella käyttää runsaammin rikinpoistotuotetta sisältäviä seoksia.

Kehitettyjen seosten teknistä toimivuutta käytännön olosuhteissa tutkittiin kahdessa kenttäkohteessa, pysäköintialueen ja raskaasti liikennöidyn tien rakentamisessa. Massojen kosteuden ja seossuhteen todettiin vaikuttavan merkittävästi lujittumiseen ja kantavuuteen. Myös riittävään tiivistämiseen on kiinnitettävä erityistä huomiota. Optimaalisen vesipitoisuuden selvittäminen ennakkokokeilla ja rakentamisen aikainen laadunvalvonta ovat erittäin tärkeitä.

Mäkelä, Esa, Wahlström, Margareta, Pihlajaniemi, Miina, Mroueh, Ulla-Maija, Keppo, Martti & Rämö, Pia. Kivihiilivoimaloiden rikinpoistotuotteet ja lentotuhka maarakentamisessa. Jatko-tutkimus [Use of coal combustion residues in earthworks. A follow-up study]. Espoo 1999, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1952. 61 p. + app. 3 p.

Keywords electric power plants, coal combustion, earthwork, flue gases, fly ash, road construction, desulfurization

ABSTRACT

The goal of this project was to develop useful products from the fly ash and flue gas desulphurisation (FGD) residues produced by pulverized-coal-fired power plants employing semi-dry scrubbing technology. To allow their use in earthworks, products of this type must satisfy both technical and environmental specifications. The acceptability of the products was evaluated both in laboratory tests and in field conditions. Several tens of specimens were prepared using fly ash, mixtures of fly ash and FGD residues, and various additives. The objective was to assess optimum fly ash - FGD ratios and the impact of additives on the characteristics of the mixtures.

Technical acceptability was evaluated by determining the compressive strengths and densities of the specimens. The development of compressive strength of the fly ashes varied significantly. The properties of masses containing fly ash may be altered and improved by using cementing agents. Also FGD residue acts as a binding agent, and improves the compressive strength of the mixture. The maximum strength was observed when the fly ash-residue mixture contained 5-30 per cent of FGD product.

The environmental compatibility of the test specimens was evaluated using the Dutch Tank Leaching Test for Monolithic Waste Materials (NEN 7345). During the follow-up study the impact on leaching due both quality variation in the fly ash and FGD residue, and ageing and compacting of the specimens was investigated. The leaching rates of molybdenum, chromium, chloride and sulphate in field conditions were monitored for four years from lysimeters built under the test road section. The compounds to be investigated were selected on the basis of earlier investigations and the results of field trials. The environmental compatibility was assessed on the basis of Dutch non-official leaching test guide values.

With regard to the environmental acceptability of fly ash, molybdenum was the most critical compound. The leaching rate of molybdenum depended on the quality (e.g molybdenum content) of the fly ash, which varied both from one power plant to another and from one batch to another from the same plant. It was, however, concluded that fly ash may be used to produce materials suitable for earthwork applications, provided that these materials are protected by a slightly permeable coating, or in special cases only covered.

In the test specimens prepared from the mixtures containing fly ash and FGD product, the leaching rate of chloride was the most critical factor. The leaching rates of sulphate and molybdenum could be altered by using additives and binders. The addition of FGD residue also reduced the leaching rate of molybdenum. Because of the leaching of chloride and in some cases also the leaching of sulphate, the mixtures containing FGD residue meet environmental specifications only when the proportion of FGD residue is not greater than 10–20 per cent. In coastal locations where the runoff is directed into the sea, the use of materials containing more FGD product may be possible on the basis of case-by-case assessments.

The technical characteristics of the mixtures developed were investigated in two field cases: the construction of a parking area and the construction of a road for heavy traffic. Both the strength and bearing capability are significantly affected by the moisture content and mixing ratio of the mixtures. Particular attention must also be paid to compaction. Tests to evaluate the optimum water content as well as quality control during the construction work are essential.

ALKUSANAT

Suomessa syntyy vuosittain useita satoja tuhansia tonneja kivihiilen pölypolton tuhkia ja rikinpoiston lopputuotteita, joista yli 200 000 t pääkaupunkiseudulla. Vuonna 1992 näiden sivutuotteiden hyödyntämisyhteysaste oli alle 30 %. Vuonna 1996 kivihiilen lentotuhkien hyödyntämisyhteysaste oli energia-alan keskusliiton Finergyn selvityksen mukaan noussut 60 %:iin.

Voimassa oleva jätelaki velvoittaa hyödyntämään jätteet, jos se on teknisesti mahdollista eikä siitä aiheudu kohtuuttomia lisäkustannuksia. Lisäksi voimaloiden sivutuotteille on yhä vaikeampi löytää uusia lähellä kaupunkialueita sijaitsevia sijoitusalueita eikä läjitysalueita muutenkaan voida pitää ympäristölle haitattomana vaihtoehtona. Maarakennuksessa tuhkia käyttämällä pystytään korvaamaan luonnon kiviaineksia, joiden otto saattaa aiheuttaa ympäristölle korvaamatonta haittaa.

Sivutuotteiden hyödyntäminen edellyttää, että pystytään osoittamaan, että käyttö on teknisesti mahdollista eikä aiheuta vaaraa tai haittaa ympäristölle tai terveydelle. Siksi osana Tekesin Energia- ja ympäristötekniikan tutkimusohjelmaa SIHTI 2 käynnistettiin vuonna 1993 tutkimus, jonka tavoitteena oli kehittää kivihiilivoimaloiden lentotuhkasta ja puolikuivamenetelmän rikinpoistotuotteesta maarakentamisessa ympäristöä haittaamatta hyödynnettäviksi soveltuvia tuotteita. Tutkimusta jatkettiin tuotteista rakennettujen koekohteiden pitkäaikaisseurannalla sekä täydentävillä laboratoriotutkimuksilla.

Tutkimuksen vastuuyksikkönä oli Helsingin Energia. Muita rahoittajia olivat Teknologian tutkimuskeskus (Tekes), ABB Power Oy, Espoon Sähkö Oy, Lahden Lämpövoima Oy ja Vantaan Energia Oy. Projektin toteuttajina olivat Lohja Rudus Ympäristötekniikka Oy Ab ja VTT Kemiantekniikka. Projektiryhmään kuuluivat tekn.lis. Martti Keppo ja dipl.ins. Pia Rämö Lohja Rudus Ympäristötekniikka Oy Ab:sta sekä dipl.ins. Esa Mäkelä, dipl.ins. Margareta Wahlström, laboratorioteknikko Miina Pihlajaniemi ja dipl.ins. Ulla-Maija Mroueh VTT Kemiantekniikasta.

Projektin vastuunalaisena johtajana oli kiinteistöpäällikkö Olavi Saarinen Helsingin Energiasta. Johtoryhmään kuuluivat kiinteistöpäällikkö Olavi Saarinen Helsingin Energiasta, rakennuttajapäällikkö Kyösti Oasmaa Helsingin Energiasta, dipl.ins. Timo Ahonen Espoon Sähkö Oy Ab:sta, toimistopäällikkö Jouko Helenius Vantaan Energiasta, toimistopäällikkö Max Hallikainen ABB Power Oy:stä, tutkimusinsinööri Matti Kivelä Lahden Lämpövoima Oy:stä, tekn. lis. Martti Keppo Lohja Rudus Oy Ab:sta ja dipl.ins. Esa Mäkelä VTT Kemiantekniikasta. Tekijät kiittävät johtoryhmää tutkimuksen ohjauksesta. Lisäksi kiitämme kaikkia, jotka osallistuivat tutkimuksen johtopäätöksenä esitettävien suositusten valmisteluun.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	5
ALKUSANAT	7
SYMBOLILUETTELO	10
1 JOHDANTO.....	11
2 SIVUTUOTTEIDEN OMINAISUUDET JA NIIDEN MAARAKENNUSKÄYTÖN EDELLYTYKSET	13
2.1 Lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen koostumus ja ominaisuudet.....	13
2.2 Lainsäädännön vaatimukset	15
2.2.1 Jätelupa	16
2.2.2 Tuotteistamismenettely.....	16
2.2.3 Kaatopaikkasijoitus.....	17
3 TUTKIMUKSEN TOTEUTUS.....	18
3.1 Tutkimusvaihe 1.....	18
3.2 Tutkimusvaihe 2.....	19
3.3 Tutkimusmenetelmät.....	19
3.3.1 Tekniset ominaisuudet	19
3.3.2 Ympäristökelpoisuus	20
4 LABORATORIOTUTKIMUSTEN TULOKSET	24
4.1 Tutkitut seoskoostumukset.....	24
4.1.1 Uusien seosten kehitystyö.....	24
4.1.2 Laatuvaihtelun, iän ja tiiviynen vaikutukset	24
4.2 Lentotuhkamassat.....	27
4.2.1 Seosten kehitystyön tulokset.....	27
4.2.2 Lentotuhkan laatuvaihtelun vaikutus	29
4.3 Lentotuhka-rikinpoistotuoteseokset	31
4.3.1 Seosten kehitystyön tulokset.....	31
4.3.2 Rikinpoistotuotteen laatuvaihtelun vaikutukset.....	36
4.3.3 Tiivistämisen ja lujittumisajan vaikutus puristuslujuuteen ja vedenläpäisevyyteen	37
4.3.4 Laatuvaihtelun, lujittumisajan ja tiiviynen vaikutus liukoisuuteen.....	39
5 KENTTÄKOKEET	43
5.1 Suomenojan pysäköintialue	43
5.1.1 Koekohteen rakenteet	43
5.1.2 Rakennetekniset ominaisuudet	44
5.1.3 Liukoisuustutkimusten tulokset.....	46

5.2	Vuosaaren koetie.....	48
5.2.1	Rakennetekniset ominaisuudet	48
5.2.2	Lysimetrien vesinäytteet.....	49
6	SUOSITUS YMPÄRISTÖKELPOISUUDESTA MAARAKENTAMISESSA	53
6.1	Tutkimusten tulokset.....	53
6.2	Massojen sijoitettavuuden arviointi	54
6.2.1	Karakterisointitestit.....	54
6.2.2	Sijoituskohteet	55
6.3	Raportointi- ja laadunvalvontamenettelyt.....	57
6.3.1	Laadunvalvonnan perusteet.....	57
6.3.2	Laadunvalvonta- ja raportointimenetelmät	57
	LÄHDELUETTELO.....	61
LIITE 1	Liukoisuustuloksia	
LIITE 2	Lysimetrien seurantatuloksia	

SYMBOLILUETTELO

AAS	Atomiabsorptiospektrometria
As	Arseeni
Cl ⁻	Kloridi
Cr	Kromi
ICT	Intensive Compact Tester =
k-arvo	Materiaalin vedenläpäisevyys, m/s
LT	Lentotuhka
L/S-suhde	Neste–kiinteä (liquid–solid) -suhde liukoisuustestissä
RPT	Rikinpoistotuote
Mo	Molybdeeni
Se	Seleeni
SO ₄ ²⁻	Sulfaatti

1 JOHDANTO

Suomessa tuotettavasta sähköstä noin 20 % tuotetaan hiilivoimaloissa, joissa nykyisin käytetään lähes pelkästään pölypolttotekniikkaa. Kivihiilen pölypoltossa syntyy vuosittain noin 400 000 tonnia lentotuhkaa ja yli 30 000 tonnia puolikuivamenetelmän rikinpoistotuotetta, joista noin 200 000 t pääkaupunkiseudulla. Kivihiilen polton sivutuotteiden hyödyntämistä oli vuonna 1992 alle 30 %. Vuonna 1996 kivihiilen lentotuhkasta hyödynnettiin energia-alan keskusliiton Finergyn selvityksen mukaan 60 % ja puolikuivan rikinpoistomenetelmän lopputuotteesta 40 % (Walsh 1997). Käyttökohteita olivat maa- ja merialueiden täyttö, maisemointi ja rakennusteollisuuden käyttö.

Jätelainsäädännön mukaan voimaloiden sivutuotteet ovat jätteitä, ja niiden sijoittaminen maaperään edellyttää jätelupaa. Lupa-anomuksessa on esitettävä mm. selvitys tuotteiden ympäristökelpoisuudesta. Toisaalta jätelaki velvoittaa hyödyntämään jätteet, jos se on teknisesti mahdollista eikä siitä aiheudu kohtuuttomia lisäkustannuksia. Voimaloiden sivutuotteille on vaikea löytää uusia lähellä kaupunkialueita sijaitsevia sijoitusalueita, eikä läjitysalueita voida pitää ympäristölle haitattomana vaihtoehtona. Varsinaisen sijoituksen lisäksi haittaa aiheutuu esimerkiksi kuljetusten päästöistä, jotka kasvavat voimakkaasti alueiden sijaitessa yhä kauempana voimaloista. Lisäksi läjityskustannukset ovat todennäköisesti edelleen kasvamassa.

Maarakennuksessa on suuren mineraaliainesten tarpeen vuoksi hyvät mahdollisuudet tuhkien ja rikinpoistotuotteiden hyödyntämiseen, ja viime aikoina onkin tehty paljon työtä tämän käyttöalueen kehittämiseksi. Tuhkia käyttämällä pystytään korvaamaan luonnon kiviaineksia, joiden otto saattaa aiheuttaa ympäristölle korvaamatonta haittaa. Hyödyntäminen edellyttää kuitenkin sitä, että pystytään osoittamaan, että käyttö on teknisesti mahdollista eikä aiheuta vaaraa tai haittaa ympäristölle tai terveydelle.

Koska selkeitä menettelytapoja ympäristökelpoisuuden osoittamiseksi ei ollut, aloitettiin vuonna 1993 osana Tekesin Energia- ja ympäristöteknologian tutkimusohjelmaa SIHTI 2 tutkimus, jonka tavoitteena oli kehittää kivihiilivoimaloiden lentotuhkasta ja puolikuivamenetelmän rikinpoistotuotteesta teknisesti toimivia ja ympäristökelpoisia maarakennuskäyttöön soveltuvia tuotteita. Laboratoriossa kehitettyjen ja tutkittujen seoskoostumusten soveltuvuuden arvioimiseksi rakennettiin myös käytännön koekohteita. Tutkimuksen tulokset on julkaistu raportissa ”Kivihiilivoimaloiden rikinpoistotuotteiden ja lentotuhkan hyötykäyttö maarakentamisessa” (Mäkelä et al. 1995).

Tutkimusta jatkettiin tuotteista rakennettujen koekohteiden pitkäaikaisseurannalla sekä täydentävillä laboratoriotutkimuksilla, joiden tavoitteena oli selvittää tuhkien koostumusvaihtelujen sekä tuotteiden lujittumisajan ja tiiviiden vaikutuksia tekniseen ja ympäristökelpoisuuteen. Tässä julkaisussa esitetään tutkimuksen ensimmäisen ja toisen vaiheen tärkeimmät tulokset sekä niiden perusteella laaditut suositukset kivihiilivoimaloiden sivutuotteiden ympäristökelpoisuudesta maarakentamisessa.

Täydentävää tietoutta voimalaitosten sivutuotteiden soveltuvuudesta maarakennuskäyttöön tuotetaan myös useissa muissa projekteissa. Näitä ovat mm.

- *Teollisuuden sivutuotteiden maarakennuskäytön riskinarviointi*, joka on osa Tekesin ympäristögeotekniikkaohjelman projektikonaisuutta ”Sivutuotteet maarakenteissa – käyttökelpoisuuden arviointi”. Projektin päätavoitteena on laatia ohje maarakentamisessa hyödynnettävien sivutuotteiden riskinarvioinnista. Projektin esimerkkikohteena on lentotuhkan käyttö tierakennuksessa, jolle tehtävässä riskinarvioinnissa käydään läpi kaikki sijoitukseen liittyvät työvaiheet ja arvioidaan niiden mahdolliset ympäristöriskit.
- *Teollisuuden jätteiden ulkoisen hyödyntämisen ympäristökriteerit* (Tekes) kuuluu myös edellä mainittuun projektikonaisuuteen. Sen päätavoitteena on määrittää sivutuotteiden sijoituksessa Suomessa hyväksyttävän riskitason arviointiperusteet.
- *Tuhkat hyötykäyttöön* (Tekes, SIHTI 2 -tutkimusohjelma), jonka tavoitteena on kirjallisuuden, aikaisempien tutkimusten ja koerakentamiskohteesta saatujen kokemusten perusteella laatia ohjeet tuhkarakentamisesta ja lisäksi tukea sivutuotteiden hyötykäyttöä koskevan valtioneuvoston päätöksen laatimista kokoamalla aineistoa tuhkien ympäristökelpoisuudesta.
- *Ylijäämämaiden ja kivihiilivoimaloiden sivutuotteiden hyötykäyttöraentamamisessa* (Tekes, ympäristögeotekniikkaohjelma), jonka tavoitteena on ollut kehittää sivutuotteiden maarakennuskäyttö- ja välivarastointitekniikkaa. Tutkimuskohteina olivat myös sivutuotteiden mahdolliset korroosiovaikutukset ja sivutuotteiden käytön elinkaaren aikaiset ympäristövaikutukset verrattuna luonnonmateriaalien käyttöön.

2 SIVUTUOTTEIDEN OMINAISUUDET JA NIIDEN MAARAKENNUSKÄYTÖN EDELLYTYKSET

2.1 LENTOTUHKAN JA RIKINPOISTOTUOTTEEN KOOSTUMUS JA OMINAISUUDET

Hiilen muodostumisprosessin aikana siihen on sitoutunut monia maaperän kasvien ja pohjaveden alkuaineita. Hiiltä poltettaessa palamattomat alkuaineet sitoutuvat tuhkaan. Karkeampi ja heikommin höyrystyvä aines jää pohjatuhkaan, kun taas kevyempi aines kulkeutuu kaasuvirran mukana ja erottuu pääosin suotimilla lentotuhkana. Tuhkien pääainesosat ovat piidioksidi, alumiinioksidi sekä raudan, kalsiumin ja magnesiumin oksidit. Nämä ovat myös luonnon maa- ja kiviaineksissa yleisimmin esiintyviä aineosia.

Lisäksi kivihiilituhka sisältää pieniä määriä useimpia muita alkuaineita, joista haitallisimpina on pidetty raskasmetalleja. Lentotuhkan koostumukseen ja metallipitoisuuksiin vaikuttavat mm. hiilen koostumus, palamisolosuhteet ja savukaasujen puhdistustekniikka (Clarke & Sloss 1992). Hiilen alkuainepitoisuudet voivat vaihdella huomattavasti eri alueilla. Myös samassa esiintymässä saattaa olla muodostumiskauden mukaisia vaihteluja. Palamislämpötila ja polton tehokkuus vaikuttavat mm. alkuaineiden jakautumiseen eri poistovirtoihin ja niiden sitoutumisasteeseen.

Puolikuivamenetelmän rikinpoiston lopputuote sisältää pääasiassa kalsiumsulfidia ja -sulfaattia sekä 2–7 % kalsiumkloridia. Raskasmetallien pitoisuudet ovat huomattavasti pienempiä kuin lentotuhkissa. Myöskään orgaanista ainesta ei esiinny merkittävästi. Ympäristön kannalta haitallisimpia rikinpoistotuotteessa esiintyviä epäpuhtauksia ovat liukoiset kloridit ja sulfaatit, jotka voivat aiheuttaa haittaa pohjavesiin joutuessaan.

Taulukossa 1 esitetään kivihiililentotuhkien ja rikinpoistotuotteiden koostumustietoja kotimaisissa voimaloissa tehdyissä tutkimuksissa. Tässä tutkimuksessa seurattiin lisäksi muutamien aineiden pitoisuusvaihteluita Salmisaaren voimalaitoksen tuhkissa ja rikinpoistotuotteissa. Tulokset ovat taulukossa 7.

Fysikaaliselta koostumukseltaan lentotuhka on hienojakoista, pallomaisista hiukkasista ja neulasmaisista kiteistä muodostuvaa materiaalia. Sen tyypillinen raekoko on 2–100 µm. Sopivaan vesipitoisuuteen tiivistettynä lentotuhka on lujittuvaa ja sitä on käytetty katu- ja maarakenteissa esimerkiksi pääkaupunkiseudulla jo 1970-luvulta lähtien. Puolikuivamenetelmän rikinpoistotuotetta on käytetty lentotuhkan kanssa lujutusta parantavana aineena.

Taulukko 1. Kivihiilen polton lentotuhkien ja rikinpoistotuotteiden koostumustietoja puolikuivamenetelmää käyttävistä Espoon Suomenojan ja Helsingin Salmisaaren (SS) laitoksista. LT = lentotuhka, RPT = rikinpoistotuote.

	Yksik- kö	Suomenoja joulukuu 1992 (VTT 1993)		SS 1988 (Ranta et al. 1990)		SS 1991 (Siitonen 1991)	SS 1993 (Hahkala et al. 1993)
		RPT + LT	LT	RPT	LT	RPT	LT
Kuiva-ainepitoisuus	p-%	99,4	100				
Hehkutusjäännös, 550 °C	p-%	96,2	96,2		97,0		
Kalsiumoksidi (CaO)	p-%	4,1	2,8	4,2	3,6		
Kalsiumsulfitti, CaSO ₃ x ½ H ₂ O	p-%	8,5		55,0		49,3	
Kalsiumsulfaatti, CaSO ₄ x 2 H ₂ O	p-%	16,1		22,0		8,3	
Kalsiumkloridi	p-%	1,0		6,7		3,6	
Piioksidi (SiO ₂)	p-%	45,8	54,8	1,2	51,0	1,5	
Alumiinioksidi (Al ₂ O ₃)	p-%	15,4	18,7	0,6	14,0	0,5	26,2
Rautaoksidi (Fe ₂ O ₃)	p-%	5,5	6,3	0,3	7,6	0,4	
Kaliumoksidi (K ₂ O)	p-%	1,7	2,0	0,1	2,1	0,1	
Natriumoksidi (Na ₂ O ₃)	p-%	0,8	0,8	1,6	1,1	1,2	
Magnesiumoksidi (MgO)	p-%	1,5	1,5		1,7	0,9	
Titaanioksidi (TiO ₂)	p-%	0,8	0,9				
Rikki (S)	p-%	3,0		17,8		13,8	
Kloridi (Cl)	p-%	0,2		2,6		2,3	
Arseeni (As)	mg/kg			1	21		34
Barium (Ba)	mg/kg			< 100	1 600		
Beryllium (Be)	mg/kg						17
Kadmium (Cd)	mg/kg			0,5	<5		1,0
Koboltti (Co)	mg/kg			< 4	39		49
Kromi (Cr)	mg/kg	110	150	< 100	170	< 300	206
Kupari (Cu)	mg/kg						144
Elohopea (Hg)	mg/kg						0,3
Mangaani (Mn)	mg/kg			100	430		792
Molybdeeni (Mo)	mg/kg	< 40	< 40	< 1	30		
Nikkeli, (Ni)	mg/kg			< 100	110		137
Lyijy (Pb)	mg/kg			< 1	80		140
Antimoni (Sb)	mg/kg			< 1	10		
Seleeni (Se)	mg/kg			16	5		2,3
Vanadiini (V)	mg/kg	140	140	7	140		306
Tallium (Tl)	mg/kg						1,5
Uraani (U)	mg/kg			1	12		
Sinkki (Zn)	mg/kg			27			251

2.2 LAINSÄÄDÄNNÖN VAATIMUKSET

Energiantuotannon sivutuotteet on Suomen lainsäädännössä, joka perustuu EU:n säännöksiin, määritelty jätteiksi. Ympäristöministeriön päätöksessä yleisimpien jätteiden ja ongelmajätteiden luettelosta (867/1996) mainitaan mm. hiilen poltossa syntyvä lentotuhka, pohjatuhka ja savukaasujen rikinpoistossa syntyvät kalsiumin reaktioihin perustuvat kiinteät jätteet ja lietteet. Ongelmajätteiksi on tuhkista määritelty vain öljyn polton lentotuhka ja raskasta polttoöljyä käytettäessä syntyvä pohjatuhka.

Koska kivihiilen tuhkat on määritelty jätteiksi, niiden hyötykäyttöä koskevat ympäristölupalain ja jätelain (1072/1993) säädökset, joiden mukaan jätteen laitostai ammattimaiseen käsittelyyn tai hyödyntämiseen on oltava ympäristölupa. Jäteasetuksessa (1390/1993) on kuitenkin määritelty eräitä poikkeuksia, jolloin jätteiksi määriteltyjen materiaalien maarakennuskäyttöön ei tarvita ympäristölupaa. Tällaisia poikkeuksia ovat:

- Jätteitä hyödynnetään koeluontoisesti, jolloin tavoitteena on menetelmän tai laitteiston käyttökelpoisuuden tms. selvittäminen. Koerakentamisesta on tehtävä ilmoitus kunnan ympäristölupaviranomaiselle, joka voi antaa toimintaa koskevia määräyksiä tai ohjeita ympäristövaaran tai haitan ehkäisemiseksi tai tarvittaessa myös kieltää toiminnan. Koerakentamisen on aina oltava määräaikaista, lyhytkestoista toimintaa. Jos toiminta jatkuu, sille on haettava jätelupaa.
- Valtioneuvosto antaa jätteiden hyödyntämistä tai käsittelyä koskevat yleiset määräykset ja samalla määrännyt, ettei jätelupaa tarvita.
- Voidaan osoittaa, että kyseessä on tuote eikä jäte. Tällöin materiaalin on täytettävä tietyt tuotekriteerit, joiden noudattamista seurataan laadunvalvontajärjestelmän avulla.

Valmisteilla on uusi ympäristönsuojelulaki, jossa annetaan yhtenäiset säännökset maaperän, vesien ja ilman suojelusta. Kaikki päästöjä koskevat luvat yhdistetään samaan hallinnolliseen menettelyyn ja lupasäännökset poistetaan vesilaista, jätelaista, terveydensuojelulaista ja naapuruussuhdelaista. Tavoitteena on ottaa ympäristön eri osiin kohdistuvat pilaantumisvaikutukset tasaveroisesti huomioon lupakäsittelyssä. Päästöjä rajoittavien toimien on perustuttava parhaaseen käytettävissä olevaan tekniikkaan (BAT). Lailla pannaan täytäntöön neuvoston direktiivi 96/61/EY ympäristön pilaantumisen ehkäisemisen ja vähentämisen yhtenäistämiseksi (IPCC-direktiivi), jonka edellyttämät muutokset on jäsenmaissa saatettava voimaan 31.10.1999 mennessä.

Samalla tulee voimaan myös laki jätelain muuttamisesta. Siinä on tarkoitus lupasäännösten poistamisen lisäksi ottaa huomioon myös muut EU:n jätedirektiivin (Council Directive 75/442/EEC) vaatimat muutokset. Lainmuutos ei kuitenkaan poista tai olennaisesti muuta nykyisen (vuonna 1998) lainsäädännön mukaista jätteiden hyödyntämistä koskevaa lupavelvollisuutta.

Jätteen laitos- tai ammattimainen hyödyntäminen tai käsittely tullaan edelleen määrittelemään luvanvaraiseksi. Jätteiden hyötykäytön lupavelvollisuudesta voidaan direktiivin mukaan poiketa vain, jos asianomainen viranomainen on antanut hyödyntämistä koskevat yleiset määräykset, joissa määritellään jätetyypit ja -määrät sekä edellytykset, joilla jätteet voidaan vapauttaa lupavaatimuksista. Tällöin on osoitettava, että ei vaaranneta ihmisten terveyttä tai ympäristöä, erityisesti

- ei vaaranneta vesiä, ilmaa, maaperää, kasveja tai eläimiä
- ei tuoteta melu- tai hajuhaittoja
- ei vahingoiteta maaseutua tai erityisalueita
- jätteitä ei hylätä tai sijoiteta hallitsemattomasti.

2.2.1 Jätelupa

Jätelupaa haetaan paikalliselta viranomaiselta, jos vuosittain käsiteltävä, hyödynnettävä tai sijoitettava määrä on alle 10 000 tonnia. Jos määrä on yli 10 000 tonnia, luvan myöntää alueellinen ympäristökeskus. Yli 20 000 tonnin sijoitus on katsottu kaatopaikkasijoitukseksi, joka vaatii ympäristövaikutusten arviointimenettelyn. Koska lupahakemus käsitellään ympäristölupamenettelylain mukaisessa järjestyksessä, edellytetään yleensä, että jokaiselle sijoituskohteelle haetaan lupaa erikseen. Syynä tähän on laissa määritetty tiedottamis- ja kuulemisvelvollisuus. Lupaviranomaisen on tiedotettava hakemuksesta yleisesti ja erikseen sijoituskohteen naapureille. Alueellinen ympäristökeskus pyytää hakemuksesta lausunnot myös paikalliselta viranomaiselta. Tiedottamis- ja kuulemisvelvollisuuden vuoksi lupamenettelyyn kuuluva aika on suhteellisen pitkä. Vähimmäisaika on noin neljä kuukautta, mutta usein on tarpeen varautua tätäkin pitempään käsittelyaikaan.

Ympäristölupa-anomuksessa hakijan on esitettävä riittävät tiedot sijoitettavan materiaalin fysikaalisista ja kemiallisista ominaisuuksista, tutkittava sen tekninen ja ympäristökelpoisuus, selvitettävä sijoituskohteen ja sen ympäristön ominaisuudet ja laadittava rakennekuvat ja suunnitelmat sijoituskohteesta, laadittava suunnitelmat mahdollisten ympäristö- ja työterveyshaittojen ehkäisemiseksi ja työnaikaisen laadunvalvonnan toteuttamiseksi.

Lain mukaan hyödyntäjän on pidettävä kirjaa käsiteltyjen jätteiden laadusta, määrästä, synty- ja sijoituspaikoista sekä käsittelytavasta. Lupapäätöksissä edellytetään tämän vuoksi, että hakija toimittaa sijoittamisen toteututtua lupaviranomaiselle tiedot sijoitetuista materiaaleista, niiden määrästä ja sijoitusratkaisun teknisestä toteutuksesta.

2.2.2 Tuotteistamismenettely

Jätteen ja tuotteen välistä eroa ei jätelainsäädännössä ole selkeästi määritelty. Jätelain mukaan jäte on aine tai esine, jonka sen haltija on poistanut, aikoo poistaa tai on velvollinen poistamaan käytöstä. Hyötykäyttö tai hinnan periminen ei vielä tee jätteestä tuotetta, vaan teollisuuden sivutuotteen on lisäksi täytettävä tietyt

tuotekriteerit. Tuotteella on oltava tuotenimi ja tuoteseloste, jossa esitetään tuotteen käyttötarkoitus, käyttöohje ja tietyt olennaiset tuoteominaisuudet. Ominaisuudet, jotka tuotteelta vaaditaan, määritetään tuotteistamisprosessin aikana. Lisäksi tuottajalla on oltava laadunvalvontajärjestelmä, jolla seurataan, että tuote pysyy tuotekriteerien mukaisissa rajoissa.

Tuotteistamisprosessissa määritetään tuotteen käyttöalue ja sen perusteella materiaaliominaisuudet ja teknisen käytön edellyttämät vaatimukset, jotka tuotteen on täytettävä. Teollisuuden sivutuotteiden tuotekriteereihin on sisällytettävä sekä tarvittavat tekniset ominaisuudet että ympäristöominaisuudet, esimerkiksi haitta-aineiden suurimmat sallitut pitoisuudet ja liukoisuudet. Lisäksi määritetään tuotteen laadunvalvonnalle asetettavat vaatimukset, seurattavat parametrit ja niiden seurannassa käytettävät menetelmät. Laadunvalvonta voidaan edellyttää suoritettavaksi valmistajan oman laaturjestelmän puitteissa tai siten, että ulkopuolinen laadunvalvoja tekee ainakin tietyt tarkistumääritykset.

Ympäristöministeriön alustavan kannan mukaan materiaalit voidaan osoittaa tuotteiksi ainoastaan virallisesti asetettujen kansallisten tai kansainvälisten tuotevaatimusten pohjalta. Tällaisia tuotevaatimuksia ei maarakentamisessa käytettäville sivutuotteille tai tuotetyypeille ole toistaiseksi määritetty. Koska selkeitä kriteerejä tai virallisia ohjeita tuotteistuksesta ei ole, toistaiseksi ainoa vaihtoehto on luoda materiaaleille oma tuotteistamisjärjestelmä, joita jo nykyisin on muutamilla tuottajilla. Käytännössä tuotteistaminen on pitkäaikainen useiden vuosien prosessi, joka edellyttää laboratoriotutkimusten lisäksi myös käytännön koerakentamista sekä teknisten ja käyttöohjeiden laatimista.

2.2.3 Kaatopaikkasijoitus

Valtioneuvoston päätöksessä kaatopaikoista (861/1997) kaatopaikat luokitellaan ongelmajätteen, tavanomaisen jätteen tai pysyvän jätteen kaatopaikoiksi, joille saa sijoittaa vain kaatopaikan luokituksen mukaisia jätteitä. Pysyvän jätteen kaatopaikkojen pohjan tiiviysvaatimukset ja pintarakenteille asetettavat vaatimukset ovat huomattavasti lievemmat kuin muilla kaatopaikoilla.

Kivihiilivoimaloiden sivutuotteita on tähän asti sijoitettu vaatimustasoltaan pysyvän jätteen kaatopaikkoja vastaaville läjitysalueille. Pysyvän jätteen kriteerejä ei toistaiseksi ole yksityiskohtaisesti määritelty. Vnp kaatopaikoista määrittelee pysyvän jätteen jätteeksi, joka ei liukene, pala tai hajoa biologisesti eikä reagoi muiden aineiden kanssa ja jonka sisältämien haitallisten aineiden kokonaishuuhoutuminen ja myrkyllisyys sekä jätteistä muodostuvan kaatopaikkaveden myrkyllisyys ympäristölle on merkityksetön. Nykyisin lupaviranomaiset luokittelevat yleensä tuhkat tavanomaiseksi jätteeksi. Jatkossa nykyisille kaatopaikkaluokille on tulossa alaluokkia, joille on suunniteltu asetettavan erilaiset vaatimustasot.

3 TUTKIMUKSEN TOTEUTUS

3.1 TUTKIMUSVAIHE 1

Tutkimuksen vuosina 1993–1995 toteutetun ensimmäisen vaiheen tavoitteena oli kehittää kivihiilivoimaloiden lentotuhkasta ja puolikuivamenetelmän rikinpoistotuotteesta maarakentamisessa käytettäväksi soveltuvia massakoostumuksia, jotka täyttävät tekniset ja ympäristökriteerit. Lisäksi tavoitteena oli arvioida kehitettyjen seosten ympäristövaatimukset täyttävän sijoituksen edellytyksiä.

Uusien seoskoostumusten kehitystyön pohjaksi porattiin 1980-luvulla pääkaupunkiseudun voimaloiden sivutuotteista rakennetuista koekenttäkohteista koekappaleita, joista tutkittiin sulfaatin, kloridin, molybdeenin, kromin ja berylliumin liukoisuudet. Tuloksia käytettiin jatkokokeissa lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen seossuhteiden ja liukoisuuskokeissa tutkittavien haitta-aineiden määrittelyn perustana.

Teknisiä ja liukoisuustutkimuksia varten tehtiin useita kymmeniä koekappaleita, jotka sisälsivät lentotuhkaa, lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen seoksia suhteissa 95/5, 70/30, 50/50 ja 33/67 sekä erilaisia sideaineita ja lisäaineita. Tarkoituksena oli selvittää parhaimmat lentotuhka- ja rikinpoistotuotesuhteet sekä lisä- ja sideaineiden vaikutukset lujouden kehitykseen ja ympäristökelpoisuuteen. Massat valmistettiin pääasiassa Helsingin Salmisaaren kivihiilivoimalaitoksen lentotuhkasta ja puolikuivamenetelmän rikinpoistotuotteesta. Erä oli kerätty syyskuun alussa 1993. Myös Helsingin Hanasaaren, Vantaan Martinlaakson, Espoon Suomenojan ja Lahden kivihiilivoimalaitosten lentotuhkia tutkittiin.

Koekappaleet tehtiin ICT-laitteella laastisekoittimella valmistetuista koemassoista ja niistä määritettiin puristuslujuudet ja tiheydet 7, 28, 91 ja 182 vuorokauden ikäisinä. Koekappaleiden ympäristökelpoisuutta arvioitiin selvittämällä sulfaatin, kloridin ja molybdeenin liukoisuus hollantilaisella diffuusioliukoisuustestillä (NEN 7345). Tutkittavat aineet valittiin aikaisempien kokemusten ja vanhojen kenttäkohteiden tulosten perusteella.

Kehitettyjä seoksia kokeiltiin myös kenttäolosuhteissa huhtikuussa 1994 Espoon Suomenojalla pysäköintialueen rakentamisessa ja marraskuussa 1994 Helsingin Vuosaarella raskaasti liikennöidyn tien oikaisussa. Pysäköintialueella käytettiin Martinlaakson, Hanasaaren ja Salmisaaren voimalaitosten lentotuhkia ja rikinpoistotuotteita. Vuosaarella tien rakenteisiin käytettiin Hanasaaren ja Salmisaaren voimalaitosten lentotuhkaa ja rikinpoistotuotetta. Tarkoituksena oli selvittää massojen tekninen toimivuus käytännössä ja jatkaa ympäristövaikutusten selvittämistä. Tätä varten Vuosaaren koetien alle rakennettiin kaksi lysimetriä, joihin kerääntyneiden vesien Mo-, Cr-, Cl⁻ ja SO₄⁻ -pitoisuuksia on seurattu noin neljän vuoden ajan.

Tutkimuksen tuloksena laadittiin suositus lentotuhka- ja lentotuhka-rikinpoistotuoteseosten sijoittamisesta sekä sijoitukseen liittyvästä ympäristökelpoisuuden arvioinnista ja ympäristölaadunvalvonnasta.

3.2 TUTKIMUSVAIHE 2

Vuosina 1995–1998 toteutetun jatkotutkimuksen tavoitteena oli seurata valittujen kivihiilivoimaloiden rikinpoistotuotetta ja lentotuhkaa sisältävien materiaalien käyttäytymistä pidemmän ajan kuluessa sekä käytännön koekohteissa että laboratorionkokein ja varmistaa näin tuotteiden tekninen toimivuus ja ympäristökelpoisuus. Lisäksi selvitettiin laboratorionkokein lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen laadunvaihtelun vaikutuksia rakenne- ja ympäristötekniisiin ominaisuuksiin ja koekappaleiden iän ja tiiviyden vaikutusta haitta-aineiden liukoisuuteen. Tavoitteena oli myös selvittää, voidaanko jo ennestään likaantuneessa kaupunkiympäristössä, kuten satama-alueilla, käyttää erityiskriteerejä lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen sijoitukselle.

Laboratorionkokeisiin valittiin lähtöaineiksi neljä Salmisaaren voimalaitoksesta eri aikoina otettua lentotuhkanäytettä ja kolme rikinpoistotuotenäytettä. Taulukkoon 7 on koottu tiedot käytetyistä tuotteista. Side- tai lisäaineellisia seoksia ei tässä vaiheessa tutkittu, sillä tutkimussuunnitelmassa olleisiin kysymyksiin haluttiin saada vastaukset mahdollisimman yksinkertaisella ja luotettavalla koesarjalla.

Kenttäkoekohteet olivat tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa Suomenojalle huhtikuussa 1994 tehty pysäköintialue ja Vuosaaren marraskuussa 1994 rakennettu tieosuus. Koekohteita seurattiin poraamalla niistä näytteitä, joiden puristuslujuuksia, tiheyksiä ja liukoisuuksia tutkittiin laboratoriossa. Vuosaaren koetien alle rakennettujen lysimetrien keräämistä vesistä otettiin näytteitä koko tutkimuksen ajan ja näytteet analysoitiin laboratoriossa. Myös kaivoihin kertyneitä vesimääriä seurattiin.

3.3 TUTKIMUSMENETELMÄT

3.3.1 Tekniset ominaisuudet

Tutkittavat koekappaleet tehtiin ICT (Intensive Compactive Tester) -laitteella käyttämällä neljän baarin painetta ja 160 tiivistyskierrosta. Yhden koekappaleen massamäärä oli 630–700 g. Massat olivat maakosteita, niin kutsuttuja pengermassoja. Jokaisesta seoksesta valmistettiin 12 koekappaletta siten, että yhdellä sekoituskerralla tehdystä massasta tehtiin aina kolme rinnakkaista koekappaletta. ICT-tiivistyksen jälkeen koekappaleet säilytettiin huoneenlämpötilassa olevassa säilytysastiasse kosteudessa RH 90 %.

ICT-laitteella on mahdollista hakea aineksen optimivesipitoisuus, kuten Proctor-testillä. Tutkimuksessa selvitettiin myös, miten ICT-laitteen ja parannetun Proctor-laitteen korrelaatio toimii lentotuhka-rikinpoistotuote (LT/RPT) -massoilta. Tällöin todettiin ICT-laitteen antavan paria prosenttiyksikköä suuremman optimikosteuden kuin parannettu Proctor.

Koekappaleiden puristuslujuudet ja tiheydet määritettiin Controlls-puristimella 7, 28, 91 ja 182 vuorokauden ikäisinä. Joistakin koekappaleista määritettiin myös 365 vuorokauden puristuslujuus.

3.3.2 Ympäristökelpoisuus

Karakterisointitestit

Ympäristökelpoisuuden arvioinnissa käytettiin erityisesti kiinteytetyille materiaaleille soveltuvaa hollantilaista diffuusioliukoisuustestiä (NEN 7345). Testi valittiin, koska se on kehitetty maarakentamisessa käytettävien materiaalien liukoisuuden arviointiin ja sillä saatavat tulokset kuvaavat sekä sijoituspaikkaolosuhteita että liukenemista ajan funktiona paremmin kuin muut aikaisemmin liukoisuuden arvioinnissa käytetyt testit. Käytetty testimenettely on Suomessa vakiintunut kiinteytettyjen hyötykäyttömateriaalien ensisijaiseksi ympäristökelpoisuuden arviointimenetelmäksi.

Diffuusioliukoisuustestin käyttö edellyttää sitä, että liukenemisen sijoituspaikassa voidaan arvioida olevan diffuusioliukenemista. Tämä ehto täyttyy, jos veden pääsyä materiaaliin on rajoitettu eristämällä se heikosti vettä läpäisevällä materiaalilla ($k < 10^{-8}$) tai jos eristämättä sijoitettavasta materiaalista valmistetun koekappaleen puristuslujuus > 1 MPa ja vedenläpäisevyys $< 10^{-9}$ m/s. Lisäksi koekappaleen on kestettävä testissä, minkä aikana koekappaleesta irronneiden partikkelien määrä saa olla enintään 30 g/m^2 . Jos koekappaleen puristuslujuus on alle $0,5$ MPa, se ei kokemusten perusteella juuri koskaan kestä testiä.

Jos materiaalille ei voida käyttää diffuusioliukoisuustestiä, sen liukoisuusominaisuudet tutkitaan rakeisille materiaaleille soveltuvalla kolonnitestillä. Testien periaatteet ja niistä saatavat tulostiedot esitetään taulukoissa 2 ja 3.

Koska seosten kehitystyö vaati runsaasti aikaa koekappaleiden pitkien kovettumisaikojen (vähintään 28 d) ja diffuusioliukoisuustestin keston (64 d) vuoksi, liukoisuustestin kestoajaa lyhennettiin 16 vuorokauteen. Jotta liukoisuustuloksia voitaisiin verrata sijoituskriteereihin, lyhennetyssä testissä liuenneet määrät kerrottiin kahdella. Aikaisemmissa tutkimuksissa oli todettu haitta-aineiden liukoisuuden 16 vuorokauden testissä olevan suunnilleen puolet 64 vuorokauden testissä liukenevasta määrästä. Vastaavia tuloksia saatiin tätä tutkimusta varten tehdyissä alustavissa kokeissa, joissa seitsemästä testatusta näytteestä liukeni 16 vuorokaudessa 50-75 % molybdeenista ja 35-71 % sulfaattista verrattuna 64 vuorokauden testissä liukeneviin määriin. Koekappaleiden kloridipitoisuus vaikuttaa sulfaatin liukoisuuteen siten, että runsaasti kloridia sisältävistä koekappaleista liukenee vähän sulfaattia testin alussa. Siksi sulfaatin vertailutulosten hajonta on suurempi kuin muiden tutkittujen liukenevien aineiden.

Taulukko 2. Kiinteytetyille materiaaleille soveltuvan standardoidun diffuusio-liukoisuustestin periaate (Wahlström & Laine-Ylijoki 1996).

Testi	Periaate	Testissä saatu tieto
Hollantilainen diffuusiotesti NEN 7345	<p>Näytekappaletta säilytetään 64 vuorokautta vedessä, jonka pH-arvo on ennen näytekappaleen upotusta säädetty hapolla arvoon 4. Veden määrä suhteessa näytekappaleen tilavuuteen on 5. Vettä ei sekoiteta kokeen aikana. Vesi vaihdetaan 6 h:n, 1 d:n, 2,25 d:n, 4 d:n, 9 d:n, 16 d:n, 36 d:n ja 64 d:n kuluttua kokeen aloittamisesta.</p> <p>Hollantilaisen diffuusiotestin koekappaleena tulee olla mieluiten lieriö, jonka korkeus ja halkaisija ovat vähintään 4 cm. Koekappale voi olla myös prisma (monisärmiö), jonka sivut ovat vähintään 4 cm. Koekappaleiden tulee olla mahdollisimman säännöllisiä ja tasaisia. Kappaleissa ei saa olla murtumia ja halkeamia.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - liukenevien aineiden määrä tietyn ajan kuluessa esim. pinta-alaa kohden laskettuna - liukenevien aineiden liukoisuusmekanismit (esim. diffuusioluukeminen) - liukenevien aineiden kemiallinen ja fysikaalinen sitoutuminen

Taulukko 3. Rakeisille materiaaleille soveltuvat standardoidut kolonnitestit. L/S-suhde on nesteen ja kiinteän materiaalin määräsuhde (liquid/solid) testissä (Wahlström & Laine-Ylijoki 1996).

Testi	Periaate	Testissä saatu tieto
Hollantilainen kolonnitesti NEN 7343 ja Nordtest-menetelmä ENVIR 002	<p>Typpihapolla happamaksi tehty vesi, jonka pH-arvo on 4, pumpataan tutkittavalla materiaalilla (raekoko < 4 mm) täytettyyn kolonniin alakautta ja vesifraktiot kerätään kolonnin yläosasta. Testin aikana kerätään seitsemän eri vesifraktioita L/S-suhteen funktiona.</p> <p>Hollantilaisessa testissä virtausnopeus on suurempi (0,5 L/S per päivä) kuin Nordtest-menetelmässä (lentotuhkalle 0,1 L/S per päivä ja karkeille materiaaleille 0,03 L/S per päivä). Hollantilaisen testistandardin mukaan jatketaan L/S arvoon 10, mikä kestää noin 20 d. Nordtest-menetelmän mukaan testi lopetetaan L/S-suhteessa 2.</p>	<p>Materiaalista liukenevien aineiden määrä ja sijoituspaikalla muodostuvan suotoveden laatu eri ajanjaksoina.</p> <p>Kaatopaikoilla L/S-suhde < 2.</p> <p>Täytöissä ja pengerrakenteissa L/S-suhde < 10.</p>

* L/S (liquid/solid) -suhde Nesteen ja kiinteän aineen määrien suhde testissä.

Sijoituskriteerit

Diffuusio- ja kolonnitesteille on Hollannissa esitetty ohjeellisia enimmäisliukoisuusarvoja esimerkkitapauksille (Aalbers et al. 1993). Rakeisille materiaaleille on esitetty ohjearvot sijoitukselle eristämättömänä (sijoituspaikkaluokka 1) ja eristettynä (sijoituspaikkaluokka 2) ja kiinteytetyille materiaaleille ohjearvot sijoitukselle eristämättömänä jatkuvasti kosteisiin sijoituskohteisiin (sijoituspaikkaluokka 1A) ja ajoittain kosteisiin sijoituskohteisiin (sijoituspaikkaluokka 1B). Aikaisemmin oli julkaistu myös ohjearvot kiinteytetyjen materiaalien sijoitukselle eristettynä (sijoituspaikkaluokka 2). Tässä tutkimuksessa sovelletaan näitä hollan-tilaisia ohjeellisia arvoja (taulukot 4 ja 5), koska vastaavia suomalaiset olosuhteet huomioon ottavia ohjearvoja ei toistaiseksi ole laadittu.

Taulukko 4. Diffuusiotestin (NEN 7345) enimmäisliukoisuusohjearvoehdotukset (mg/m²/64 d) kiinteytetyille maarakennusmateriaaleille.

	Kiinteä rakennusmateriaali (V > 50 cm ³)		
	Sijoituspaikkaluokka 1 A	Sijoituspaikkaluokka 1 B	Sijoituspaikkaluokka 2 (vanhat ohjearvot)
As	41	140	300
Ba	600	2 000	4 500
Cd	1,1	3,8	7,5
Co	29	95	200
Cr	140	480	950
Cu	51	170	350
Hg	0,4	1,4	3,5
Mo	14	48	95
Ni	50	170	350
Pb	120	400	800
Sb	3,7	12	25
Se	1,4	4,8	9,5
Sn	29	95	200
V	230	760	1 500
Zn	200	670	1 500
Br	29	95	200
Cl	18 000	54 000	150 000
CN - kompleksi	7,1	24	50
CN - vapaa	1,4	4,8	9,5
F	1 300	4 400	9 500
SO ₄	27 000	80 000	200 000

Laadunvalvontatellit

Laadunvalvontatesteillä seurataan, täyttääkö käyttöön hyväksytty materiaali jatkuvasti sallitut vaatimukset. Rakeisille materiaaleille soveltuu CEN-testi (prEN 12457 CEN), jossa näytemateriaalia (raekoko < 4 mm) ravistellaan 6 tuntia L/S-suhteella 2. Suodatuksen jälkeen kuivaamatonta materiaalia ravistellaan vielä 18 tuntia L/S-suhteella 8 (ts. kumulatiivinen L/S-suhde 10). Kiinteytetyille materiaaleille soveltuvan laadunvalvontatestin kehittytyö on edelleen kesken. Hyvin tunnetuille materiaaleille voidaan laadunvalvonnassa käyttää myös muiden ominaisuuksien seuranta. Esimerkiksi liukenevan aineen pitoisuusseuranta saattaa olla mahdollinen, jos pitoisuuden ja liukoisuuden välinen korrelaatio tunnetaan.

Taulukko 5. Kolonnitestin NEN 7343 (kumulatiivinen L/S 10) enimmäisliukoisuusohjearvoehdotukset rakeisille maarakennusmateriaaleille, kun materiaalin paksuus on 0,7 m. Esimerkkitapauksessa suotautuneen veden määrä on 300 mm/vuosi (Sijoituspaikkaluokka 1) ja 6 mm/vuosi (Sijoituspaikkaluokka 2).

Aine	Enimmäispitoisuusohjearvot, mg/kg	
	Sijoituspaikkaluokka 1	Sijoituspaikkaluokka 2
As	0,88	7,0
Cd	0,032	0,066
Cr	1,3	12
Cu	0,72	3,5
Mo	0,28	0,91
Ni	1,1	3,7
Pb	1,9	8,7
Se	0,044	0,10
V	1,6	32
Cl ⁻	600	8 800
SO ₄ ²⁻	750	22 000

4 LABORATORIOTUTKIMUSTEN TULOKSET

4.1 TUTKITUT SEOSKOOSTUMUKSET

4.1.1 Uusien seosten kehitystyö

Taulukossa 6 on yhteenveto teknisiä ja liukoisuustutkimuksia varten valmistetusta seoskoostumuksista. Kaikista seoksista tehdyistä koekappaleista seurattiin puristuslujuuden kehitystä ja tehtiin liukoisuustesti. Normaali 64 vuorokauden diffuusiotesti tehtiin vain pelkästä lentotuhkasta valmistetuille koekappaleille. Muiden seosten liukoisuus arvioitiin lyhennetyin 16 vuorokauden testin perusteella.

4.1.2 Laatuvaihtelun, iän ja tiiviyden vaikutukset

Tutkimuksen toisen vaiheen laboratoriokokeiden lähtöaineiksi valittiin neljä Salmisaaren voimalasta eri aikoina otettua lentotuhkanäytettä ja kolme rikinpoistotuotenäytettä. Kokeissa selvitettiin tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa epäselviksi jääneitä asioita, kuten työtekniikan eli tiivistämisen merkitystä ja kohteen iän vaikutusta teknisiin ominaisuuksiin ja liukoisuuteen. Taulukkoon 7 on koottu tiedot käytetyistä tuotteista. Side- tai lisäaineellisia seoksia ei tutkittu, sillä koesarja haluttiin saada mahdollisimman yksinkertaiseksi ja luotettavaksi.

Taulukko 7. Tutkittujen lentotuhka- ja rikinpoistotuotenäytteiden laatuvaihtelut. Taulukossa esitetään myös tutkimuksen ensimmäisen vaiheen lentotuhkanäytteiden (näytteet LT5, 57, 58 ja 59) molybdeenipitoisuudet.

Materiaali	Hehkutus-häviö (p-%)	Mo (mg/kg)	S _{kok.} (p-%)	SO ₄ (p-%)	Cl (p-%)
Salmisaaren lentotuhka					
LT1: 22.5.1996	4,9	12	0,3	0,41	0,002
LT2: 13.3.1996	4,2	9,8	0,3	0,46	0,002
LT3: 20.1.1997	7,3	10	-	-	-
LT4: 11.2.1997	7,4	15	-	-	-
LT5: 1994	-	8	-	-	-
Muut lentotuhkat					
57: Espoo 1994	-	8,7	-	-	-
58: Lahti: 1994	-	10,2	-	-	-
59: Vantaa: 1994	-	6,4	-	-	-
Salmisaaren rikinpoistotuote					
RPT1: 22.5.1996	-	< 5	16,8	0,83	4,0
RPT3: 20.1.1997	-	-	-	0,55	4,7
RPT4: 11.2.1997	-	-	-	0,74	2,4

- ei määritetty

Taulukko 6. Tutkimuksessa lentotuhkasta (LT), rikinpoistotuotteesta (RPT) ja sideaineista tehdyt koekappaleet.

Näyte	Näyte merkitty	sisältää
11	P 100/0	LT/RPT 100/0
12	P 70/30	LT/RPT 70/30
13	P 50/50	LT/RPT 50/50
14	P 33/67	LT/RPT 33/67
15	P 95/5	LT/RPT 95/5
16	PS 5/95/5	LT/RPT 95/5 ja sideainetta PS, 5 %
17	EKOS 5/95/5	LT/RPT 95/5 ja sideainetta EKOS, 5 %
18	EKOS 2/49/49	LT/RPT 50/50 ja sideainetta EKOS, 2 %
19	EKOS 5/47,5/47,5	LT/RPT 50/50 ja sideainetta EKOS, 5 %
20	EKOS 10/45/45	LT/RPT 50/50 ja sideainetta EKOS, 10 %
21	PS 2/49/49	LT/RPT 50/50 ja sideainetta PS, 2 %
22	PS 5/47,5/47,5	LT/RPT 50/50 ja sideainetta PS, 5 %
23	PS 10/45/45	LT/RPT 50/50 ja sideainetta PS, 10 %
24	EKOS 5/47,5/47,5	LT/RPT 50/50 ja sideainetta EKOS, 5 %
25	PS5 100/0	LT/RPT 100/0 ja sideainetta PS, 5 %
26	EKOS5 100/0	LT/RPT 100/0 ja sideainetta EKOS, 5 %
27	W4	LT/RPT 50/50 ja lisäainetta W, 4 %
28	W2	LT/RPT 50/50 ja lisäainetta W, 2 %
29	W1	LT/RPT 50/50 ja lisäainetta W, 1 %
30	UP 4	LT/RPT 50/50 ja lisäainetta UP, 4 %
31	W4EKO5	LT/RPT 50/50, sideainetta EKO, 5 % ja lisäainetta W, 4 %
32	UP4EKO5	LT/RPT 50/50, sideainetta EKO, 5 % ja lisäainetta UP, 4 %
33	EKO5 70/30	LT/RPT 70/30 ja lisäainetta EKO, 5 %
34	EKO5 33/67	LT/RPT 33/67 ja sideainetta EKO, 5 %
35	EKO5 HK	LT/RPT 50/50, hiekkaa ja sideainetta EKO, 5 %
36	P 100/0	LT/RPT 100/0
37	BIO5 7/3	LT/RPT 70/30 ja biosideainetta, 5 %
38	W2	LT/RPT 70/30 ja lisäainetta W, 2 %
39	W2	LT/RPT 70/30 ja lisäainetta W, 2 %
40	W2	LT/RPT 70/30 ja lisäainetta W, 2 %
41	W4L 70/30	LT/RPT 70/30 ja lisäainetta W, 4 %
42	W4 70/30	LT/RPT 70/30 ja lisäainetta W, 4 %
43	P 95/5	LT/RPT 95/5
44	P 70/30	LT/RPT 70/30
45	A5 70/30	LT/RPT 70/30 ja sideainetta A, 5 %
46	B2 70/30	LT/RPT 70/30 ja lisäainetta B, 2 %
47**	P 70/30	LT/RPT 70/30
48**	W1 70/30	LT/RPT 70/30 ja lisäainetta W, 1 %
49**	W4 70/30	LT/RPT 70/30 ja lisäainetta W, 4 %
50**	W10 70/30	LT/RPT 70/30 ja lisäainetta W, 10 %
51**	P 70/30	LT/RPT 70/30
52**	W4 70/30	LT/RPT 70/30 ja lisäainetta W, 4 %
53	F2 70/30	LT/RPT 70/30 ja lisäainetta F, 2 %
54	D1 70/30	LT/RPT 70/30 ja lisäainetta D, 1 %
55	MIX B	LT/RPT 70/30
56	VCS2 70/30	LT/RPT 70/30 ja lisäainetta VCS, 2 %
57*	E 100/0	LT/RPT 100/0 (Espoon Sähkön)
58*	L 100/0	LT/RPT 100/0 (Lahden voimalaitoksen)
59*	V 100/0	LT/RPT 100/0 (Vantaan Sähkön)

* Näytteille 12 - 56 tehtiin lyhennetty 16 vuorokauden diffuusiotesti, näytteille 57 - 59 normaali 64 vuorokauden testi.

** Näytteet 47 - 52 on valmistettu Proctor-tiivistyksellä muoviputkeen, jossa ne olivat testin aikana. Liukoisuustestitulokset eivät ole verrannollisia muiden näytteiden tuloksiin.

Tutkitut rakennetekniset ominaisuudet

Näytteistä tehdyistä koekappaleista tutkittiin seuraavia teknisiä ominaisuuksia:

- 1) Lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen laadun vaihtelun vaikutus koekappaleiden lujuuden kehitykseen lentotuhkanäytteistä ja LT/RPT (70/30) -seosnäytteistä.
- 2) Tiivistämisen vaikutus puristuslujuuteen ja vedenläpäisevyyteen 70/30- ja 90/10-seoksilla (LT/RPT)
- 3) Koekappaleiden iän vaikutus puristuslujuuteen ja vedenläpäisevyyteen 70/30- ja 90/10-seoksilla (LT/RPT).

Liukoisuustutkimukset

Liukoisuustutkimukset tehtiin taulukossa 8 esitetyn koeohjelman mukaisesti.

Taulukko 8. Liukoisuustutkimusohjelma.

Tutkimuksen tavoite	Näytteet	Tutkimus
1. Lentotuhkan ja rikinpoiston lopputuotteen koostumusvaihtelu	4 lentotuhkanäytettä 3 rikinpoistotuotenäytettä	<i>Lentotuhka:</i> Mo (sulatteen kautta) <i>Rikinpoistotuote:</i> Vesiliukoinen SO_4^{2-} ja Cl^- , muutamista näytteistä kokonaisriikki (Leco-määritys)
2. Koostumusvaihtelun vaikutus liukoisuuteen	4 koekappaletta 100 % lentotuhkaa 3 koekappaletta LT /RPT-seosta (70/30)	16 vrk diffuusiotesti, 3:lle koekappaleelle 64 vrk testi Tutkittavat komponentit: Mo (määritys AAS grafiittiuuniteknikalla), SO_4^{2-} ja Cl^- (ionikromatografisesti)
3. Lujittumisajan vaikutus liukoisuuteen	2 koekappalesarjaa (100 % lentotuhkaa ja 70/30-seosta)	16 vrk diffuusiotesti. Testiohjelma: Mo, SO_4^{2-} ja Cl^-
4. Tiivistämisen vaikutus liukoisuuteen	12 koekappaletta: - 2 seossarjaa (70/30 ja 90/10) - 3 tiiviysastetta - varastointiajat 1 ja 6 kk	16 vrk diffuusiotesti. Tutkittavat komponentit: Mo, SO_4^{2-} ja Cl^-
5. Koekohteiden seuranta	9 koekappaletta: - 4 näytettä tutkittu v. 1995 - 5 näytettä tutkittu v. 1997 Vuosaaren lysimetrien vesinäytteet	64 vrk testi. Tutkittavat komponentit: Mo, SO_4^{2-} ja Cl^- Tutkittavat komponentit: Mo, SO_4^{2-} ja Cl^-

4.2 LENTOTUHKAMASSAT

4.2.1 Seosten kehitystyön tulokset

Tutkimuksen ensimmäisen vaiheen koekappaleet tehtiin Salmisaaren, Hanasaaren, Martinlaakson, Suomenojan ja Lahden kivihiilivoimalaitosten lentotuhkanäytteistä. Lisäksi tehtiin kaksi sideaineita sisältävää koekappaletta, joista toiseen lisättiin 5 % portlandsementtiä ja toiseen 5 % Lohja Rudus Oy Ab:n Ekosideainetta. Portlandsementtiä sisältävän massan koostumus oli 780 kg/t lentotuhkaa, 41 kg/t sementtiä ja 179 kg/t vettä. Toisessa tutkimusvaiheessa tehtiin laatuvarianterin seurauksena koekappaleet neljästä Salmisaaren voimalaitokselta vuosina 1996 ja 1997 kerätystä näytteestä. Käytettyjen tuhkien koostumustietoja on esitetty taulukossa 7 ja rakenneteknisiä ominaisuuksia taulukossa 9.

Taulukko 9. Tutkittujen lentotuhkien rakennetekniset ominaisuudet. Tuhkanäytteestä LT 5 tehtiin koekappaleet sekä tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa vuonna 1994 (merkitty ”LT 5 edellisessä tutkimuksessa”) että vuonna 1997.

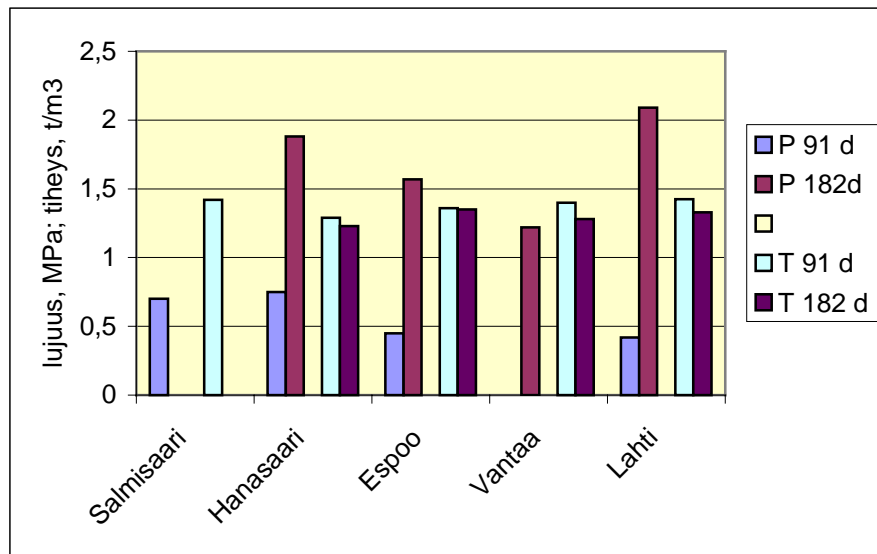
	Märkä- tiheys, kg/m³	Vesi- pitoisuus, %	Kuiva- tiheys, kg/m³	Puristus- lujuus 28d (n=2)	Puristus- lujuus 91d (n=3)
LT 1: Salmisaari	1 731	20,3	1 439	1,4	2,0
LT 3: Salmisaari	1 413	20,3	1 174	0,6	0,8
LT 4: Salmisaari	1 548	20,6	1 284	1,0	1,2
LT 5: Salmisaari		20,3		0,6	0,7
LT 5: Salmisaari, ed. tutkimuksessa	1 460	20	1 217	0,1	0,0
57: Espoo	1 602	23,2?	1 300		0,5
58: Lahti	1 571	27,1	1 237		0,45
59: Vantaa	1 538	27,9	1 202		-

Kaikkien lentotuhkamassojen puristuslujuuksia ja tiheyksiä seurattiin vähintään puolen vuoden ikään asti. Puristuslujuus- ja tiheysmittausten tuloksia 91 ja 182 vuorokauden iässä on esitetty kuvassa 1. Kaikki tuhkat lähtivät lujittumaan, ja 182 vuorokauden iässä näytteiden lujuuDET olivat 1,2–2,1 MPa. Tuhkan palamattoman aineen määrän ja lujisuuden välillä ei havaittu korrelaatiota, mikä saattaa johtua koestuksen, laitteiston, säilytyksen yms. aiheuttamasta hajonnasta tuloksiin. Sideainetta sisältävien massojen puristuslujuus kasvoi huomattavasti pelkkien lentotuhkamassojen puristuslujuutta nopeammin ja oli 3 kk iässä portlandsementtiä sisältävässä massassa jo 5 MPa ja vuoden iässä lähes 7 MPa.

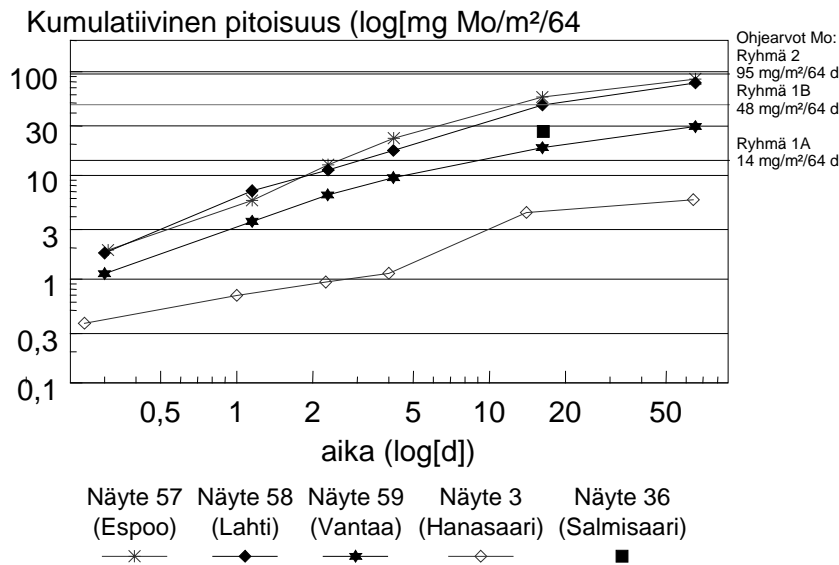
Ensimmäisessä vaiheessa tutkittiin molybdeenin, kromin ja sulfaatin liukoisuudet eri laitosten lentotuhkista tehdyissä koekappaleista (tuhkanäytteet: LT5, 57, 58 ja 59) sekä 5 prosenttia portlandsementtiä ja 5 prosentin Ekosideainetta (Lohja Rudus Oy Ab:n tuotemerkki) sisältävistä massoista. Lentotuhkanäytteille tehtiin

64 vuorokauden liukoisuustesti, kun taas kaikille muille näytteille tehtiin vain lyhennetty 16 vuorokauden testi.

Molybdeeni oli kriittisin tuhkista liukeneva aine, kuva 2. Sen liukoisuus alitti kuitenkin näissä koekappaleissa eristettynä sijoitettavaksi soveltuvien materiaalien (sijoituspaikkaluokka 2) ohjearvon. Sulfaatin liukoisuus oli kaikissa näytteissä alle sijoituspaikkaluokan 1 B ohjearvon ja kromin liukoisuus alitti kaikissa näytteissä 1A-luokan ylärajan. Näytteistä ei tutkittu kloridia, koska sen pitoisuus lentotuhkassa on yleensä pieni. Portlandsementti näytti pienentävän molybdeenin liukoisuutta. 5 % portlandsementtiä sisältävästä massasta liukenevan molybdeenin määrä oli noin puolet pelkästä lentotuhkasta liukenevasta määrästä. Vastaavia tuloksia saatiin lentotuhka-rikinpoistotuoteseoksilla, joissa tutkittiin useampia sideainepitoisuuksia (ks. kuva 7, sivu 34).



Kuva 1. Lentotuhkamassojen puristuslujuudet ja tiheydet 91 vuorokauden ja 182 vuorokauden iässä. P 91 - puristuslujuus 91d, P 182 - puristuslujuus 182 d, T 91 - tiheys 91d, T 182 - tiheys 182d.



Kuva 2. Molybdeenin liukoisuus eri voimalaitosten lentotuhkista vuonna 1995 valmistetuista massoista 64 vuorokauden diffuusiotestissä. Tuhkien molybdeeni-pitoisuudet: Lahti 10,2 mg/kg, Espoo 8,7 mg/kg, Salmisaari 8 mg/kg, Vantaa 6,4 mg/kg (Hanasaaren tuhkaa ei analysoitu).

4.2.2 Lentotuhkan laatuvahtelun vaikutus

Rakennetekniset ominaisuudet

Voimalaitoksen sisäisen laatuvahtelun vaikutus lentotuhkamassojen rakenneteknisiin ominaisuuksiin esitetään taulukossa 9. Verrattaessa Salmisaaren voimalasta eri aikoina otettuja tuhkanäytteitä havaitaan tuhkan ominaisuuksien vaikuttavan jonkin verran lujittumiseen (kuva 4, sivu 31). Suurin lujuus kuukauden ja kolmen kuukauden iässä oli tuhkillä, jotka tiivistettäessä saavuttivat suurimman tiheyden.

Haitta-aineiden liukoisuus

Eri laitosten lentotuhkien välillä havaittiin selviä eroja tutkittujen aineiden liukoisuudessa. Eroihin vaikuttavat muun muassa käytetyn kivihiilen laatu ja polttotekniikka. Yhdisteen liukoisuus ei kuitenkaan määräytynyt pelkästään pitoisuuden perusteella, minkä voi havaita esimerkiksi verrattaessa molybdeenin liukoisuutta kuvassa 2 tuhkien molybdeenipitoisuuksiin. Liukoisuudella ja tiheydellä puolen vuoden iässä oli positiivinen korrelaatio (korrelaatiokerroin 0,96).

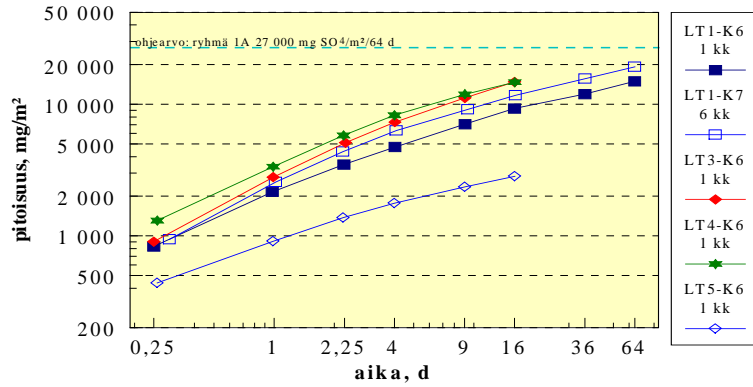
Tutkimuksen toisessa vaiheessa seurattiin Salmisaaren lentotuhkien laatuvahtelun vaikutusta sulfaatin, kloridin ja molybdeenin liukoisuuteen lentotuhkamassoista. Taulukon 7 mukaan lentotuhkanäytteiden molybdeenipitoisuudet olivat 8–15 mg/kg. Näytteiden koostumuksen vaikutus liukoisuustasoon on merkittävä (taulukko 10 ja kuva 3). Molybdeenin liukoisuus korreloi melko hyvin kokonaispitoisuuksien kanssa ja on tulosten mukaan yleensä alle sijoitusryhmän 2

ohjearvon, jos kokonaispitoisuus on alle 10 mg/kg. Lentotuhkista liukeni huomattavasti enemmän molybdeeniä kuin tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa.

Lentotuhkien laatu vaihtelu

Sulfaatti (SO₄)

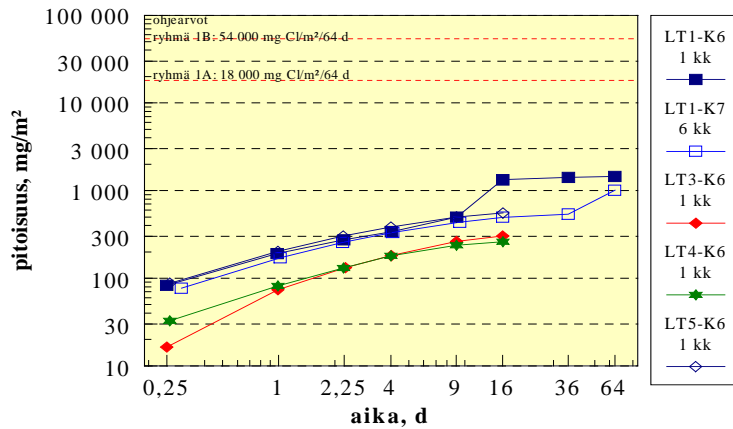
Diffuusiotesti



Lentotuhkien laatu vaihtelu

Kloridi (Cl)

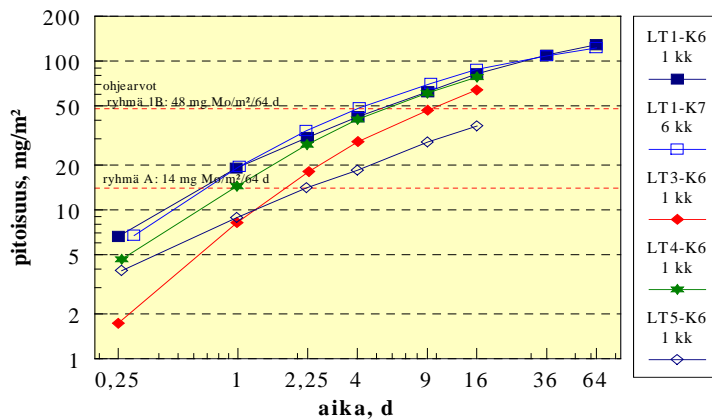
Diffuusiotesti



Lentotuhkien laatu vaihtelu

Molybdeeni (Mo)

Diffuusiotesti



Kuva 3. Salmisaaren lentotuhkan laatu vaihtelun vaikutus sulfaatin, kloridin ja molybdeenin liukoisuuteen.

Taulukko 10. Salmisaaren lentotuhkan laatuvaihtelun ja koekappaleiden lujittumisajan vaikutus liukoisuuteen. Tulokset 16 ja 64 vuorokauden testeistä, mg/m².

Koekappale	Lujittumis- aika ennen koetta	Sulfaatti (SO ₄)		Kloridi (Cl)		Molybdeeni (Mo)	
		16 vrk	64 vrk	16 vrk	64 vrk	16 vrk	64 vrk
LT1	1 kk	9 300	14 900	1 300	1 500	82	129
	6 kk	11 700	19 200		1 000	88	123
LT3	1 kk	15 000		300		64	
LT4	1 kk	14 700		260		78	
LT5	1 kk	2 800				37	
<i>Hollantilaiset sijoituskriteerit **):</i>							
Ryhmä IA			27 000		18 000		
Ryhmä IB			80 000		54 000		48
(Ryhmä 2)			200 000		150 000		95

**): Ryhmä 1A: sijoitus eristämättömänä pysyvästi kosteaan sijoituskohteeseen. Ryhmä 1B: sijoitus eristämättömänä ajoittain kosteaan sijoituskohteeseen. Ryhmä 2: sijoitus eristettynä.

4.3 LENTOTUHKA-RIKINPOISTOTUOTESEOKSET

4.3.1 Seosten kehitystyön tulokset

Lentotuhka-rikinpoistotuoteseokset tehtiin tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa Salmisaaren tuhista LT/RPT-seossuhteilla 95/5, 70/30, 50/50 ja 33/67. Osassa seoksista käytettiin erilaisia side- ja lisäaineita. Massojen vedentarve lisääntyi selvästi, kun rikinpoistotuotteen osuus massassa kasvoi. Massa tuli myös selvästi herkemäksi veden yliannostelulle rikinpoistotuotteen määrän lisääntyessä.

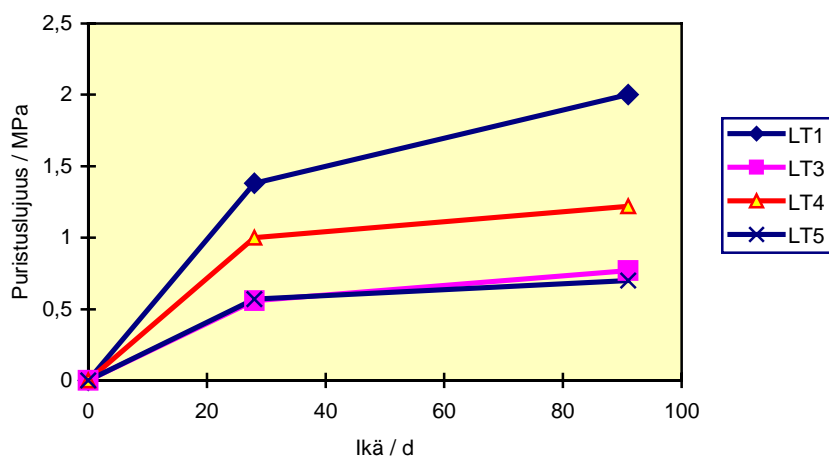
Lujuudenkehitys ja vedenläpäisevyys

Massojen lujuudenkehitystä seurattiin vähintään puolen vuoden ikään saakka. Kuvasta 5, jossa on esitetty massojen lujittumiskäyrät, voidaan havaita, että paras puristuslujuuden kehitys on 10 % rikinpoistotuotetta ja 90 % lentotuhkaa sisältävällä massalla. Seoksen koostumus oli:

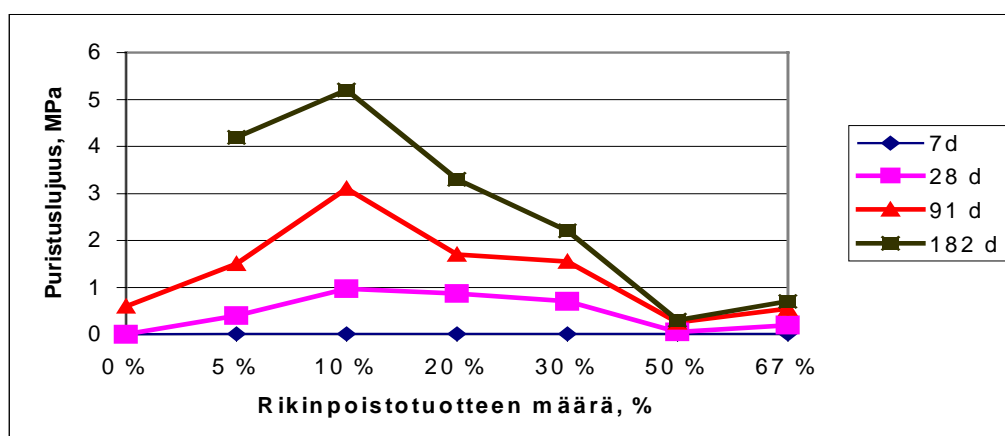
735 kg/t lentotuhkaa
82 kg/t rikinpoistotuotetta
183 kg/t vettä.

Koetulosten perusteella parhaat massaominaisuudet saavutetaan 5–30 % rikinpoistotuoteosuudella.

Lentotuhkien laadun vaikutus



Kuva 4. Salmisaaren voimalasta eri aikoina otettujen lentotuhkanäytteiden laadun vaikutus lujittumiseen.



Kuva 5. Lentotuhka-rikinpoistotuotemassojen lujittuminen rikinpoistotuotteen määrän kehittyessä

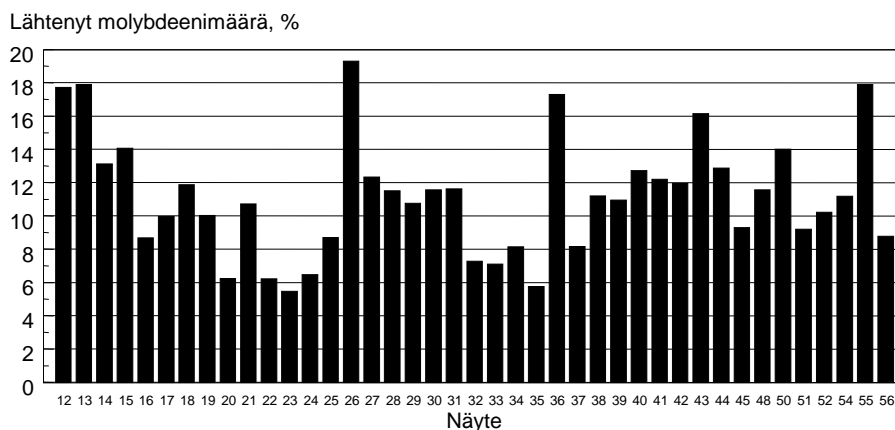
Vanhoista kenttäkohteista porattujen koekappaleiden vedenläpäisevyydet olivat huokostetuilla kevytmassoilla noin 10^{-8} m/s, lentotuhkarakenteilla 10^{-7} m/s ja 50/50-seoksella, jossa oli hieman sementtiä, k-arvo oli $10^{-6.4}$ m/s. Vuosaaren koetien rakentamisen yhteydessä rakenteesta mitattiin kenttämittausputkilla muuttuvan paineen menetelmällä k-arvoja. Mittauksen kesto oli noin 30 minuuttia. Taulukossa 11 on kokeen tulokset. Tuloksista voidaan havaita, että rikinpoistotuotteen määrän lisääntyessä massan vedenläpäisevyys pienenee.

Taulukko 11. Vuosaaren koetietä rakennettaessa tehdyt k-arvomittaukset. *H* = Hanasaaren massa, *S* = Salmisaaren massa.

Näyte ja seossuhde	Lentotuhkan määrä [%]	Rikinpoistotuotteen määrä, [%]	Vesipitoisuus w %	k-arvo
H 90/10	90	10	18.5	2×10^{-7} m/s
H 90/10	90	10	18.5	2×10^{-7} m/s
H 70/30	70	30	22.0	4×10^{-8} m/s
S 70/30	70	30	25.2	1×10^{-7} m/s

Haitta-aineiden liukoisuus

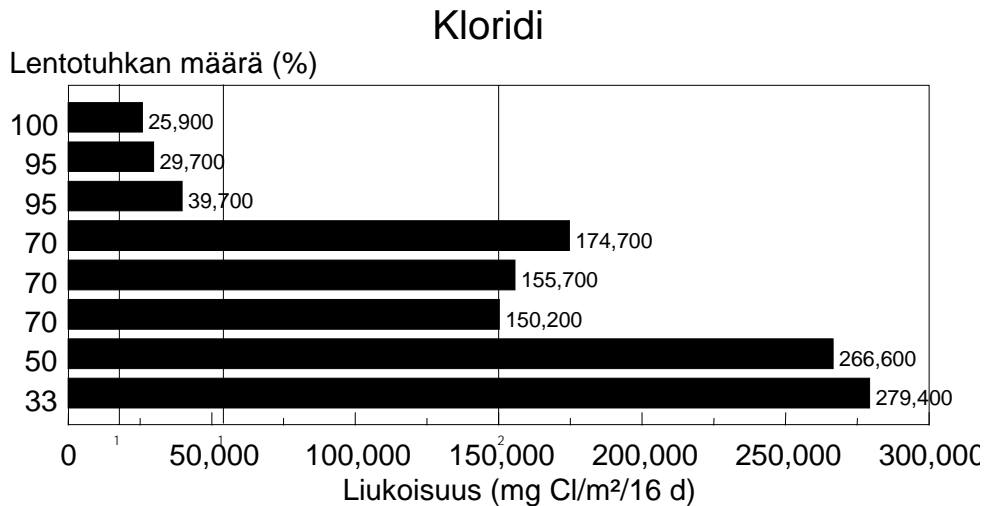
Seoksista tutkittiin molybdeenin, kloridin ja sulfaatin liukoisuuksia lyhennetyllä 16 vuorokauden diffuusiotestillä. Molybdeenia liukeni lisäaineettomista seoksista melko lineaarisesti suhteessa lentotuhkan määrään näytteessä. Liukeneva osuus jäi kaikissa koekappaleissa alle 20 %:iin koekappaleissa olleesta kokonaismäärästä (kuva 6). Side- ja lisäaineita sisältävissä seoksissa liunneen molybdeenin osuus oli sideainemäärästä riippuen yleensä 6 - 12 % kokonaismäärästä.



Salmisaaren lentotuhkassa 8 mg/kg molybdeenia

Kuva 6. Molybdeenin liukoisuus lyhennetyin 16 d diffuusiotestin koekappaleista koekappaleiden sisältämään kokonaismolybdeenimäärään verrattuna. 16 vuorokauden diffuusiotestissä liunnut määrä on noin 50 % pitkässä 64 d testissä liukenevasta määrästä.

Kloridia liukeni voimakkaasti kaikista rikinpoistotuotetta sisältävistä koekappaleista (kuva 7). Liukoisuus oli verrannollinen rikinpoistotuotteen määrään. Kaikista koekappaleista liukeni testiaikana yli 50 prosenttia koekappaleen kokonaiskloridimäärästä. Tulosten perusteella arvioituna kloridin liukoisuus jää 64 d testissä alle sijoituspaikkaluokan 2 ylärajan 5–10 % rikinpoistotuotetta sisältävissä LT/RPT-seoksissa.



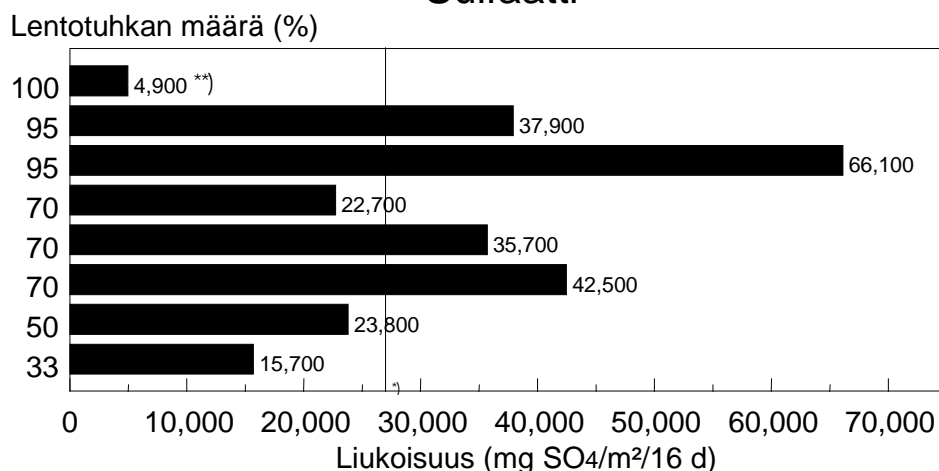
Kloridin ohjearvot: ryhmä 1 A 18 000 mg/m²/64 d ja ryhmä 1 B 54 000 mg/m²/64 d ja ryhmä 2 150 000 mg/m²/64 d

Kuva 7. Kloridin liukoisuus lentotuhkaa ja rikinpoistotuotetta sisältävistä koekappaleista lyhennetyssä 16 d diffuusiotestissä (liuennut määrä on n. 50 % pitkässä 64 d testissä liukenevasta määrästä). Sijoituspaikkaluokkien rajat on merkitty kuvaan pystyviivoilla.

Sulfaatin liukoisuuden ja koekappaleen sulfaattipitoisuuden välillä ei havaittu selvää yhteyttä. Liukoisuudet LT/RPT-seossuhteilla 50/50 ja 30/70 valmistetuista kappaleista olivat pienempiä kuin LT/RPT-seossuhteilla 95/5 ja 70/30 valmistetuista (kuva 8).

Rinnakkaisnäytteiden välillä oli suuria liukoisuuseroja. Molemmista puolen vuoden ikäisenä testatuista näytteistä (43 ja 44) liukeni enemmän sulfaattia kuin vastaavista parin kuukauden ikäisistä näytteistä. Myös muualla on todettu, että sulfaatti käyttäytyy toisin kuin useimmat muut haitta-aineet eli sen liukoisuus kasvaa koekappaleiden vanhetessa (Sloot et al. 1994). Lisäksi koekappaleen kloridipitoisuus saattaa erityisesti runsaasti rikinpoistotuotetta sisältävissä massoissa hidastaa alkuvaiheessa sulfaatin liukenemistä, koska kalsiumin liukeneminen kloridina hidastaa niukkaliukoisemman kalsiumsulfaatin liukenemistä.

Sulfaatti



*) Sulfaatin ohjearvot: ryhmä 1 A 27 000 mg/m²/64 d ja 1 B 80 000 mg/m²/64 d

**) näytekappale (36) ½ vuotta vanha ennen kuin tehtiin diffuusiotesti

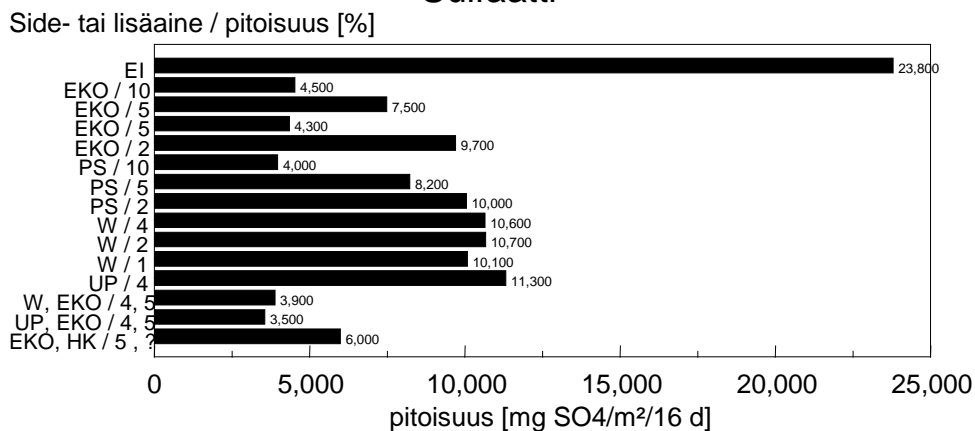
Kuva 8. Sulfaatin liukoisuus lentotuhkaa ja rikinpoistotuotetta sisältävistä koekappaleista lyhennyksessä 16 d diffuusiotestissä (liuennut määrä on 40 - 60 % pitkässä 64 vrk testissä liukenevasta määrästä).

Side- ja lisäaineiden vaikutukset

Side- ja lisäaineita kokeiltiin 50/50-seoksista (LT/RPT) sekä muutamiin 30/70 (LT/RPT) -seoksista valmistettuihin koekappaleisiin. Sideaineena käytettiin portlandsementtiä sekä useita muita sideainetyyppejä. Side- tai lisäaineen osuus seoksesta oli 1–10 %. Lujuudenkehitystä tutkittaessa todettiin 5–10 %:n sideainemäärän parantavan selvästi lujutta. Lisäaineilla ei yleensä havaittu lujuudenkehitystä parantavaa vaikutusta.

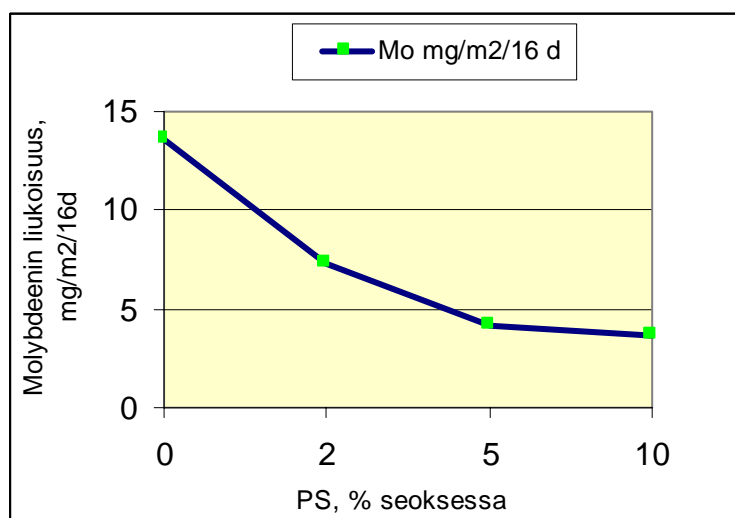
Side- ja lisäaineet vaikuttivat eniten sulfaatin liukenemiseen, joka oli kaikista sideainetta sisältävistä koekappaleista selvästi vähäisempää kuin vastaavista pelkästään lentotuhkaa ja rikinpoistotuotetta sisältävistä näytteistä (kuva 9). Molybdeenin liukoisuus pieneni selvästi esimerkiksi portlandsementtiä käytettäessä (kuva 10). Kloridia liukeni runsaasti myös sideainetta sisältävistä näytteistä. Liukoisuus niistä oli lähes samalla tasolla kuin vastaavista pelkästään lentotuhkaa ja rikinpoistotuotetta sisältävistä seoksista.

Sulfaatti



Ohjearvot sulfaattille ryhmä 1A 27 000 mg/m²/64 d, ryhmä 1B 80 000 mg/m²/64 d ja ryhmä 2 200 000 mg/m²/64 d

Kuva 9. Side- ja lisäaineiden vaikutus sulfaatin liukoisuuteen 16 d diffuusiotes-
tissä koekappaleista, joissa lentotuhka-rikinpoistotuotesuhde oli 50/50. 16 d tes-
tissä liukeneva määrä on noin puolet 64 d testissä liukenevasta määrästä.



Kuva 10. Portlandsementtilisäyksen (PS) vaikutus molybdeenin liukoisuuteen
LT/RPT (50/50) -seoksesta 16 vrk diffuusiotes-
tissä.

4.3.2 Rikinpoistotuotteen laatu vaihtelun vaikutukset

Salmisaaren rikinpoistotuotteen laadun vaihtelu aiheutti selviä muutoksia lento-
tuhkan ja rikinpoistotuotesekoksen lujuuteen. Tutkitun seoksen seossuhde oli

70/30, jossa lentotuhkan osuus oli 70%. Puristuslujuudet olivat kolmen kuukauden iässä 5,4–8,1 MPa. Taulukossa 12 esitetään rikinpoistotuoteseoksen rakennetekniset ominaisuudet, kun kaikissa seoksissa käytettiin samaa lentotuhkaa (Salmisaaren lentotuhka 22.5.1996).

Taulukko 12. Salmisaaren rikinpoistotuotteen koostumuksen vaikutus rakenneteknisiin ominaisuuksiin 70/30-seoksessa.

	Märkätiheys, kg/m³	W, %	Kuivatiheys, kg/m³	Puristus- lujuus 28d (n=2)	Puristus- lujuus 91d (n=3)
RPT 1	1 550	26,3	1 227	3,5	5,4
RPT 3	1 536	25,8	1 221	3,4	5,7
RPT 4	1 601	25,3	1 278	4,1	8,1

4.3.3 Tiivistämisen ja lujittumisajan vaikutus puristuslujuuteen ja vedenläpäisevyyteen

Tiivistäminen

Tiivistämisen vaikutusta tutkittiin 70/30- ja 90/10-seoksilla. Massoille tehtiin parannettu Proctor-koee, jonka perusteella koekappaleet tiivistettiin eri tiheyksiin. Tiivistäminen suoritettiin ICT-laitteella. Puristuslujuus koestettiin betonipuristimella ja vedenläpäisevyys mitattiin Suomen ympäristökeskuksen ohjeiden mukaisesti joustavaseinäisellä sellitekniikalla. Taulukossa 13 esitetään tiivistämisen vaikutuksen koesuunnitelma ja koekappaleiden toteutuneet ominaisuudet.

Taulukko 13. Tiivistämisen vaikutuksen tutkimista varten valmistetut koekappaleet.

Seos	Tiivysaste keskimäärin		Puristuslujuus 28d MPa (n= 2)	k-arvo 28d, m/s
	tavoiteltu	toteutunut		
70/30	100 %	89 %	2,7	$2,5 \times 10^{-7}$
	90 %	85 %	2,0	$6,2 \times 10^{-7}$
	80 %	80 %	1,4	$1,2 \times 10^{-6}$
90/10	100 %	92 %	2,3	ei tehty
	90 %	89 %	1,9	$6,1 \times 10^{-7}$
	80 %	82 %	1,0	$1,6 \times 10^{-6}$

Myös laboratoriokokeissa tiivistystason todettiin vaikuttavan selvästi koekappaleiden puristuslujuuteen ja vedenläpäisevyyteen. Parhaimmat lujuuudet saavutettiin suurimmilla tiiviyksillä. Saavutettavat tiiviydet pienenevät rikinpoistotuotteen osuuden kasvaessa.

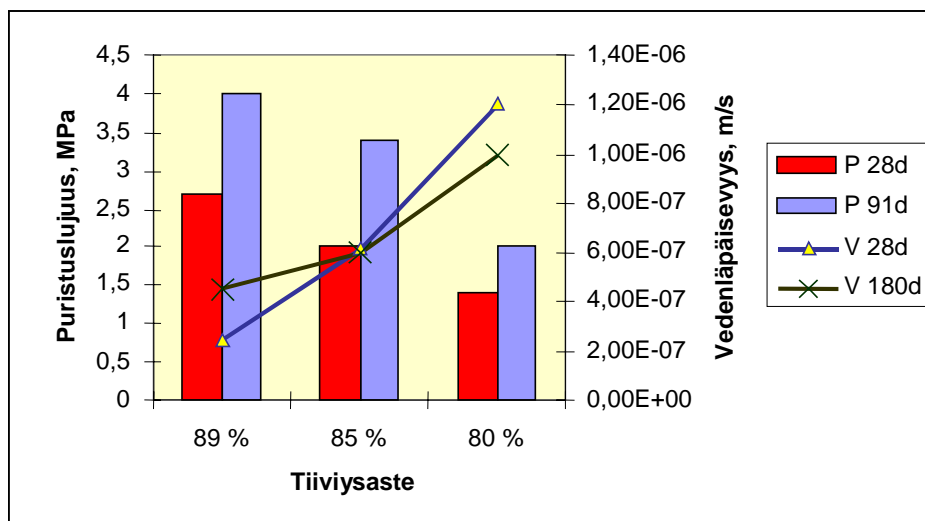
70/30-seoksen puristuslujuus nousee tiivistystason noustessa 10 % kaksinkertaiseksi. 90/10-seoksen lujuuden nousu on vielä suurempi. Vedenläpäisevyys taas pienenee melkein samassa suhteessa kuin tiivistystaso nousee prosentteissa, eli 70/30-seoksen vedenläpäisevyyden havaittiin olevan 80 %:n tiivistystasolla $1,2 \times 10^{-6}$ m/s ja 89 %:n tasolla $2,5 \times 10^{-7}$ m/s.

Lujittumisaika

Kaikki koekappaleet lujittuvat hitaasti lujittumisajan kuluessa, mutta tarkasteluai- kana lujittumisaika ei pienentänyt niiden vedenläpäisevyyttä. Tarkasteltu koeaika oli puoli vuotta. Taulukossa 14 esitetään koekappaleiden iän vaikutus puristuslujuuteen ja vedenläpäisevyyteen. Kuvassa 11 esitetään tiivistämisen ja iän vaikutus 70/30-seoksen puristuslujuuteen ja vedenläpäisevyyteen.

Taulukko 14. Koekappaleiden iän vaikutus rakenneteknisiin ominaisuuksiin.

Seos	Tiivysaste keskimäärin		Puristuslujuus, MPa		k-arvo, m/s	
	tavoiteltu	toteutunut	28 d (n=2)	91 d (n= 3)	28 d	91 d
70/30	100 %	89 %	2,7	4,0	$2,5 \times 10^{-7}$	$4,5 \times 10^{-7}$
	90 %	85 %	2,0	3,4	$6,2 \times 10^{-7}$	$6,0 \times 10^{-7}$
	80 %	80 %	1,4	2,0	$1,2 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-6}$
90/10	100 %	92 %	2,3	4,3	ei tehty	ei tehty
	90 %	89 %	1,9	3,6	$6,1 \times 10^{-7}$	$4,3 \times 10^{-7}$
	80 %	82 %	1,0	1,6	$1,6 \times 10^{-6}$	$1,4 \times 10^{-6}$



Kuva 11. Iän ja tiivistämisen vaikutus 70/30-seoksen lujuuteen ja vedenläpäisevyyteen.

4.3.4 Laatuvaihtelun, lujittumisajan ja tiivyyden vaikutus liukoisuuteen

Vesiliukoisen sulfaatin pitoisuudet olivat rikinpoistotuote- ja lentotuhkanäytteissä lähes samoja, vaikka rikinpoistotuotteen rikkipitoisuus on merkittävästi suurempi. Rikinpoistotuotteessa rikki on pääosin sitoutunut kalsiumsulfiittiin, jonka vesiliukoisuus on melko pieni ($\text{CaSO}_3 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$: 0,043 g/l) verrattuna kalsiumsulfaattiin ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$: 2,62 g/l). Rikinpoistotuotteen kloridipitoisuus oli 2,4–4,7 %.

Laatuvaihtelun ja lujittumisajan vaikutus liukoisuuteen

Rikinpoistotuotteen laatuvaihtelun vaikutusta liukoisuuteen tutkittiin lyhennetyllä 16 vuorokauden diffuusiotestillä Salmisaaren voimalasta kolmena eri ajankohtana otetusta rikinpoistotuotteesta valmistetuista koekappaleista (taulukko 15, kuva 12). Muutamia diffuusiotestejä jatkettiin loppuun asti.

Taulukko 15. Salmisaaren rikinpoistotuotteen laatuvaihtelun ja koekappaleiden lujittumisajan vaikutus liukoisuuteen. Tulokset 16 ja 64 vuorokauden testeistä, mg/m².

Koekappale	Lujittumisaika ennen koetta	Sulfaatti (SO_4)		Kloridi (Cl)		Molybdeeni (Mo)	
		16 vrk	64 vrk	16 vrk	64 vrk	16 vrk	64 vrk
RPT1 *)	1 kk	21 000		188 000		13	
RPT3 *)	1 kk	11 300	38 000	136 000	175 000	11	23
RPT4 *)	1 kk	17 400		98 000		16	
RPT5: Näyte 70/30	1 kk (N=3)	19 000 - 42 000		150 000 - 175 000		13-21	
	2,5 vuotta	65 500		148 000		19	
<i>Hollantilaiset sijoituskriteerit **):</i>							
Ryhmä IA			27 000		18 000		
Ryhmä IB			80 000		54 000		48
(Ryhmä 2)			200 000		150 000		95

*) seossuhde 70/30. Seoksessa käytetty lentotuhkaa LT1

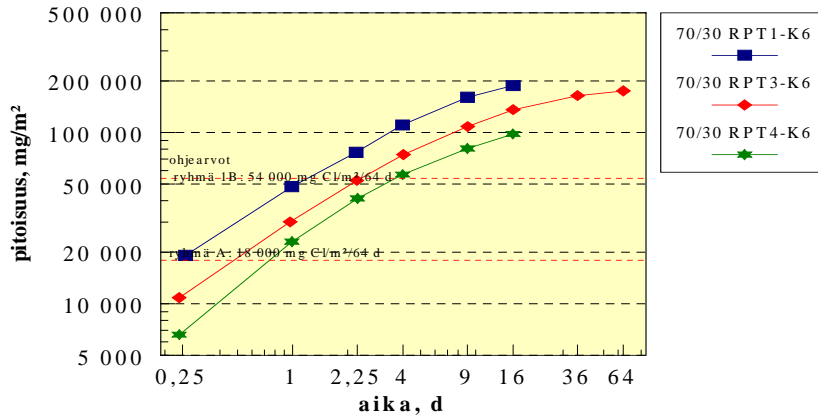
**) Ryhmä 1A: sijoitus eristämättömänä pysyvästi kosteaan sijoituskohteeseen. Ryhmä 1B: sijoitus eristämättömänä ajoittain kosteaan sijoituskohteeseen. Ryhmä 2: sijoitus eristettynä.

Kloridin liukoisuus korreloi hyvin kokonaispitoisuuden kanssa. Molybdeenin liukoisuus rikinpoistotuotteen ja lentotuhkan seoksesta oli suhteessa pienempi kuin liukoisuus lentotuhkasta. Sulfaatin liukoisuudessa oli merkittäviä vaihteluja. Koekappaleiden ja Suomenojan koekohteesta otettujen näytteiden tulosten perusteella voidaan olettaa, että sulfaatin liukoisuuteen vaikuttaa kloridimäärän ja kokonaisrikkipitoisuuden ohella merkittävästi kalsiumsulfiitin ja -sulfaatin suhde. Kalsiumsulfaatin liukoisuus on moninkertainen verrattuna kalsiumsulfiitin liukoisuuteen.

Rikinpoistotuotteen laatuvaihtelu

Kloridi (Cl)

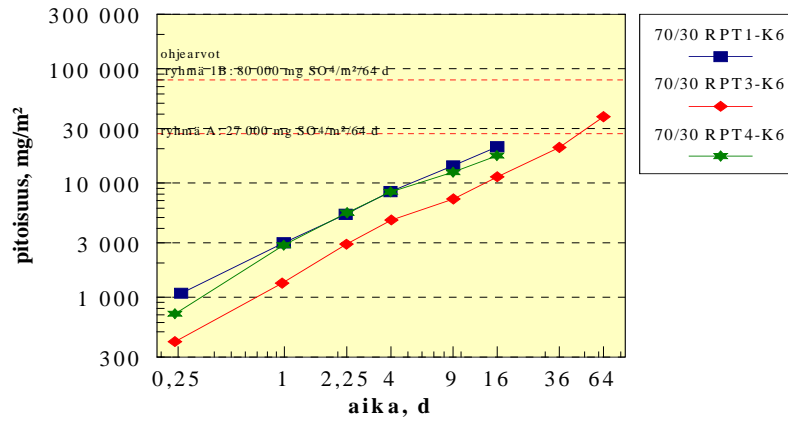
Diffuusiotesti; käytetty lentotuhka (LT1)



Rikinpoistotuotteen laatuvaihtelu

Sulfaatti (SO₄)

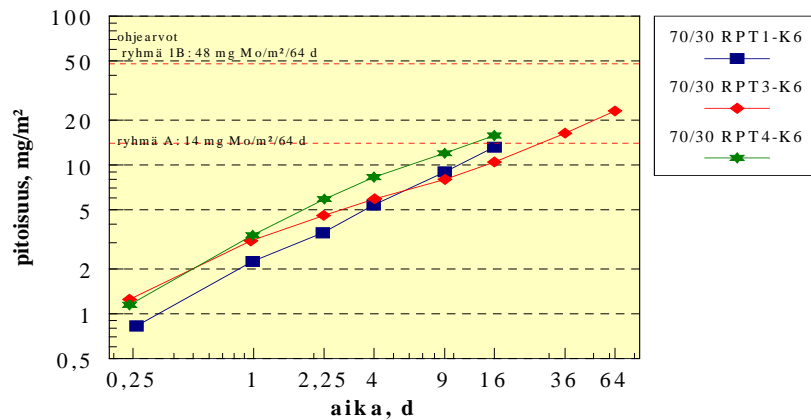
Diffuusiotesti; käytetty lentotuhka (LT1)



Rikinpoistotuotteen laatuvaihtelu

Molybdeeni (Mo)

Diffuusiotesti; käytetty lentotuhka (LT1)



Kuva 12. Salmisaaren rikinpoistotuotteen laatuvaihtelun vaikutus sulfaatin, kloridin ja molybdeenin liukoisuuteen.

Tiivistämisen ja lujittumisajan vaikutus liukoisuuteen

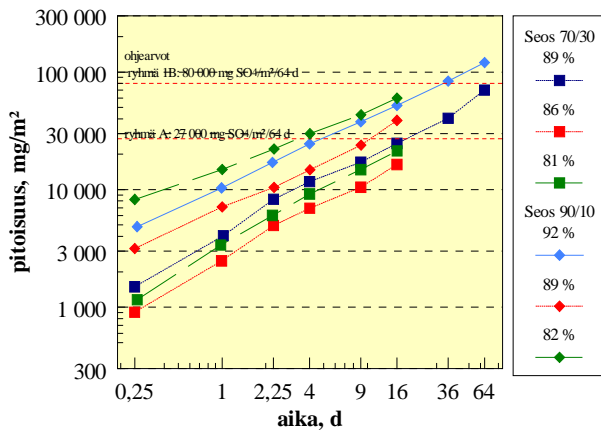
Kuvassa 13 ja liitteen 1 taulukossa on esitetty tiivistämisen ja lujittumisajan vaikutus liukoisuuteen. Tutkimuksissa tiivistettiin kahta seosmassaa, joissa rikinpoistotuotteen osuudet olivat 10 % ja 30 %, kolmeen eri tiiviyssasteeseen. Koekappaleita varastoitettiin 1 kk ja 6 kk ennen diffuusiotestiä.

Tulosten mukaan tutkitut tiiviyssasteet eivät vaikuttaneet liukoisuuteen. Kloridille ja sulfaatile todetut vaihtelut ovat diffuusiotestin luotettavuusrajojen sisällä. Yleensä kloridin ja sulfaatin toistettavuus diffuusiotestissä on muita komponentteja heikompi ja arviolta noin 20–30 %.

Tiiveyden vaikutus

Sulfaatti (SO₄)

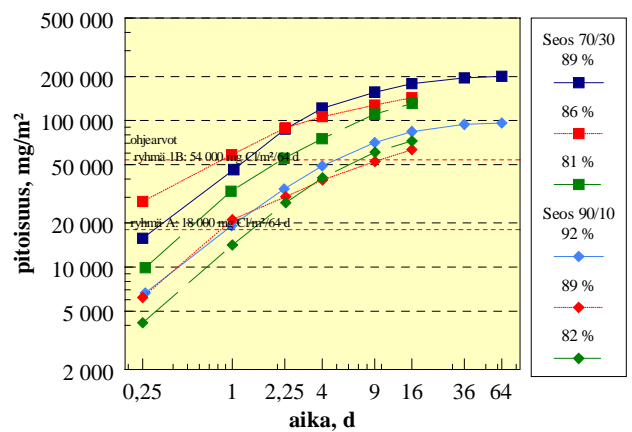
Diffuusiotesti; käytetty seoslentotuhkaa ja lopputuotetta 22.5.96 (RPT 1)



Tiiveyden vaikutus

Kloridi (Cl)

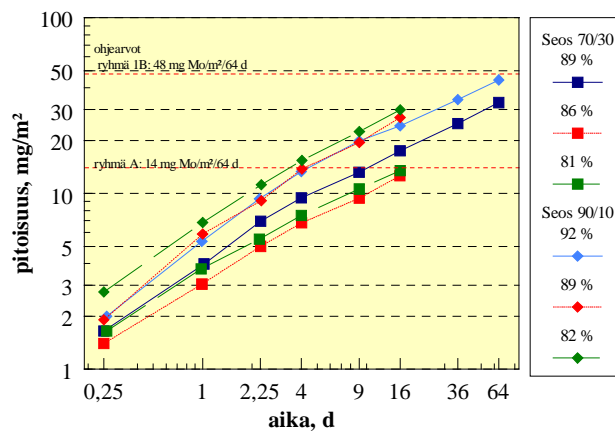
Diffuusiotesti; käytetty seoslentotuhkaa ja lopputuotetta 22.5.96 (RPT 1)



Tiiveyden vaikutus

Molybdeeni (Mo)

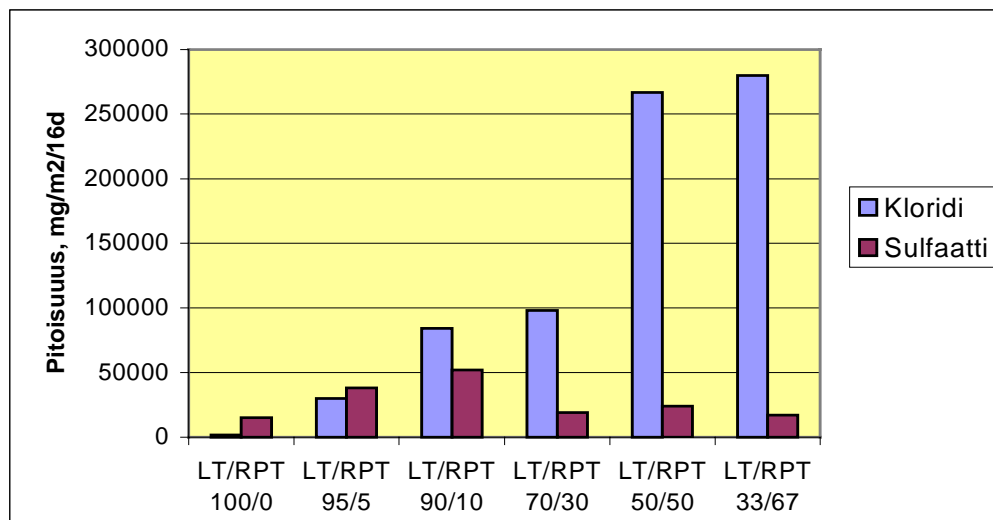
Diffuusiotesti; käytetty seoslentotuhkaa ja lopputuotetta 22.5.96 (RPT 1)



Kuva 13. Lentotuhka-rikinpoistotuotemassojen tiiviyden vaikutus liukoisuuteen.

Lujittumisaika ei pienentänyt tutkittujen aineiden liukoisuutta. Kloridin ja molybdeenin liukoisuustaso oli sama kuukauden ja kuuden kuukauden lujittumisajan jälkeen. Sulfaatin liukoisuus sen sijaan kasvoi. Kuten sivulla 34 mainitaan, myös muissa tutkimuksissa on havaittu sulfaatin liukoisuuden lisääntyneen, kun koekappaleita varastoidaan.

Sulfaatin liukoisuus rikinpoistotuotteista tehdyistä koekappaleista kasvaa testin loppuvaiheessa. Sulfaatin liukoisuus koekappaleista, joissa oli 10 % rikinpoistotuotetta, oli huomattavasti korkeampi kuin koekappaleista, joissa oli 30 % rikinpoistotuotetta. Tulokset vastaavat tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa saatuja tuloksia (ks. sivu 34). Sulfaatin liukoisuus saattaa kasvaa merkittävästi, kun näytteen kloridipitoisuus pienenee. Kuvassa 14 on esitetty rikinpoistotuotteen osuuden merkitys sulfaatin ja kloridin liukoisuuteen.



Kuva 14. Kloridin ja sulfaatin liukoisuus erilaisista lentotuhka-rikinpoistotuoteseoksista.

Tulosten perusteella voitiin todeta, että sijoituspaikkaluokan 2 (sijoitus eristettynä) ohjearvot eivät ylity, jos rikinpoistotuotteen osuus lisääineettomissa seoksissa on korkeintaan 10 %:n tasolla. Kloridia ja sulfaattia liukenee kuitenkin merkittävästi ja kloridin liukoisuudet ylittävät ohjearvon, jos rikinpoistotuotteen osuus ylittää 10 %. Myös sulfaatin liukoisuudet olivat lähellä ohjearvoa. Molybdeenin liukoisuudet alittivat selvästi sijoituspaikkaluokan 1B ohjearvon.

5 KENTTÄKOKKEET

Laboratoriokokeissa kehitettyjä massakoostumuksia kokeiltiin kenttäolosuhteissa huhtikuussa 1994 Espoon Suomenojalla pysäköintialueen rakentamisessa ja marraskuussa 1994 Helsingin Vuosaarella raskaasti liikennöidyn tien oikaisussa. Tavoitteena oli selvittää massojen käytännön toimivuus ja jatkaa ympäristövaikutusten tutkimusta.

5.1 SUOMENOJAN PYSÄKÖINTIALUE

5.1.1 Koekohteen rakenteet

Suomenojan lintupuiston alueelle rakennettiin koerakennuskohteena pysäköintipaikka. Kohteessa selvitettiin lentotuhka-rikinpoistoseosrakentamisen käytännön edellytyksiä ja seosten lujuudenkehitystä ja pitkäaikaiskestävyyttä kenttäolosuhteissa. Pysäköintialueen rakennekerrokset olivat seuraavat:

- 4 cm kestopäällyste, AB
- 10 cm kantava kerros, Murske 0–32
- 20 cm kantava kerros, tuhkan ja sementin seos
- 20–200 cm jakava kerros, lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen seos osittain terästettynä sideaineella.

Pengerryksessä käytettiin neljää erilaista lentotuhka-rikinpoistotuotemassaa, joista rakennettiin omat koalueet. Puolet massoista toimitettiin Martinlaakson voimalaitokselta, jonka rikinpoistotuote on matalakloridista, ja puolet Hanasaaren voimalaitokselta, jossa syntyy korkeakloridista rikinpoistotuotetta. Kantava tuhkarakenne tehtiin Salmisaaren lentotuhkasta.

Koalueiden lentotuhka-rikinpoistotuoteseoksesta tehtyjen jakavien kerrosten rakenne ja koko oli seuraava:

- | | |
|---------------------|---|
| Lohko I, RPL IA: | Seossuhde (LT/RPT) 70/30
RPT:n kloridipitoisuus 1–2 %
Ei lisäainetta V 70/30
Tilavuus 70 m ³ , pinta-ala 120 m ² |
| Lohko II, RPL IB: | Seossuhde (LT/RPT) 50/50
RPT:n kloridipitoisuus 1–2 %
Ei lisäainetta V 50/50
Tilavuus 260 m ³ , pinta-ala 150 m ² |
| Lohko III, RPL IIA: | Seossuhde (LT/RPT) 70/30
RPT:n kloridipitoisuus 4–5 %
Ei lisäainetta
Nk. 0-massa V 70/30
Tilavuus 220 m ³ , pinta-ala 150 m ² |

Lohko IV, RPL IIB: Seossuhde (LT/RPT) 70/30
 RPT:n kloridipitoisuus 4–5 %
 Lisäaine V 70/30 + L
 Tilavuus 140 m³, pinta-ala 195 m²

Työmaalla tehdyissä kenttäkokeissa tiiviys- ja kantavuustulokset heti massan tiivistämisen jälkeen olivat heikot. Tiiviysaste jäi selvästi alle tavoitellun 90 %:n. Syynä oli osittain massan liian suuri vesipitoisuus, osittain tiivistämisvaikeudet pienillä koalueilla. Massojen todettiin kuitenkin soveltuvan rakentamiseen, jos suunnittelussa otetaan huomioon lentotuhka-rikinpoistotuoteseoksen ominaisuudet. Rakentamisen aikaiseen laatu seurantaan on kiinnitettävä erityistä huomiota, koska hyvä tiivistyminen edellyttää oikeaa kosteutta. Riittävä tiivistäminen asianmukaisin laittein ja tarpeeksi ohuin kerroksin on erittäin tärkeää.

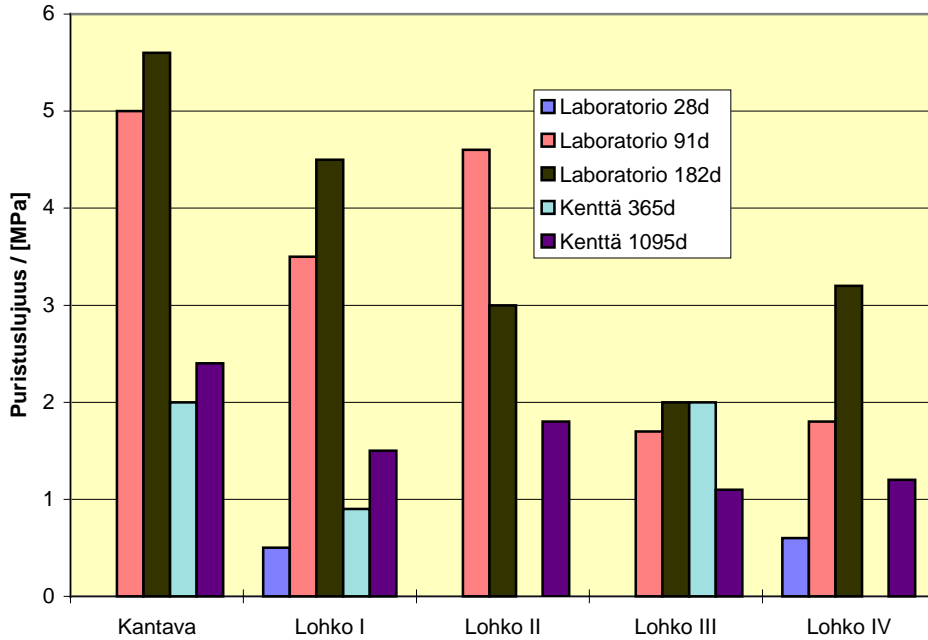
5.1.2 Rakennetekniset ominaisuudet

Koekohteen massojen lujittumista seurattiin poraamalla rakenteesta koekappaleet puolen vuoden, vuoden ja kolmen vuoden iässä. Koekohteen massoista tehtiin lisäksi laboratoriokoekappaleet rakentamisvaiheessa ja niiden lujuudenkehitystä seurattiin puolen vuoden ikään asti. Huomattavin muutos koekappaleita kentältä otettaessa havaittiin puolen vuoden ja vuoden välillä. Puolivuotiaasta koekentästä koekappaleiden ottaminen ei porauskalustolla vielä onnistunut. Vuoden ikäisenä poraus onnistui kaikista muista paitsi lisäainetta sisältäneestä massasta, ja kolmen vuoden ikäisenä massojen puristuslujuudet olivat tasoittuneet melko samankaltaisiksi.

Kuvassa 15 esitetään kentältä otettujen koekappaleiden puristuslujuuden kehitys lohkoittain verrattuna laboratoriokoekappaleiden puristuslujuuden kehitykseen. Laboratoriossa saatiin sementittömien massojen puristuslujuudeksi kolmen kuukauden iässä 1,7–4,5 MPa ja puolen vuoden iässä 2,0–4,5 MPa. Lujuudenkehitys on kentällä hitaampaa kuin laboratoriossa, mikä johtuu mm. suhteellisen alhaisesta vuoden keskilämpötilasta verrattuna laboratorioolosuhteisiin. Tätäkin tärkeämpänä voidaan pitää koekappaleiden tiheyttä. Laboratoriokoekappaleet on tiivistetty yli 90–95 % tiiviyteen ja kentällä tiivistysaste on 82–84 %.

Kuvassa 16 on selvästi havaittavissa tiivistysasteen ja puristuslujuuden suhde. Mitä paremmin tiivistys saadaan tehtyä, sitä paremmin alue lujittuu ja sivutuotemassojen kantavat ominaisuudet saadaan parhaiten käyttöön. Huonosti tiivistetyn massan lujittuminen on vielä kuvan esitystä heikompa, sillä kenttäkoekappaleiden ikä on 3 vuotta ja laboratoriokoekappaleiden ikä ½ vuotta. Seossuhteen ei tässä kohteessa havaittu vaikuttavan lujuuteen, sillä Martinlaakson voimalaitoksen 50/50-seoksen ja 70/30-seoksen lujuudet olivat vuoden ikäisinä noin 1 MPa ja kolmen vuoden ikäisinä noin 1,5 MPa. Liukoisuuksia pienentävällä lisäaineella oli lujuutta pienentävä vaikutus Hanasaaren voimalaitoksen massaan. Vuoden ikäisenä lisäainetta sisältävästä massasta ei saatu vielä porattua koekappaletta, mutta kolmen vuoden iässä lisäainetta sisältävän ja lisäaineettoman massan lujuudet olivat samalla tasolla eli noin 1,1 MPa. Sementtiä lisäämällä

saadaan selvästi kenttäolosuhteissakin lujempaa massaa; kantavan kerroksen puristuslujuus oli vuoden iässä noin 2 MPa ja kolmen vuoden iässä jo lähes 2,5 MPa.



Kuva 15. Suomenojan pysäköintialueen massojen lujittuminen.

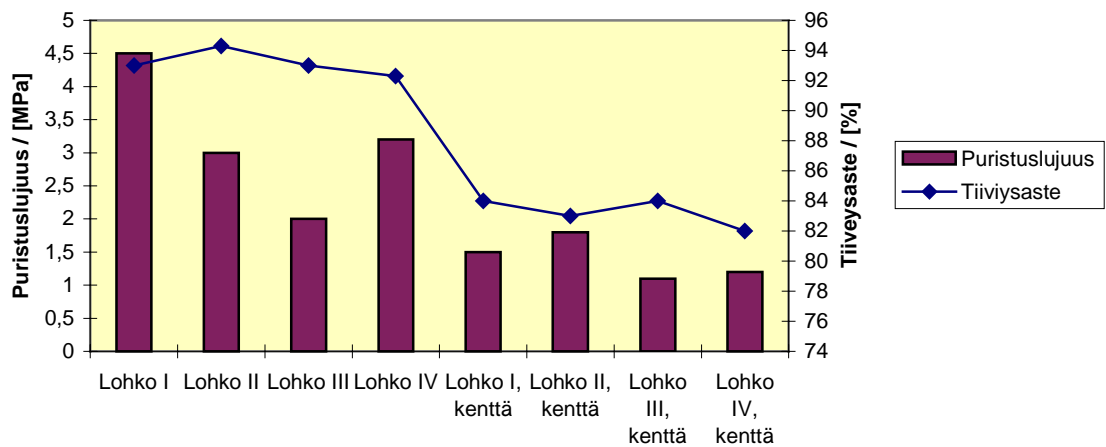
Kantava: Lentotuhkaa, sementtiä (Salmisaaren voimalaitos)

Lohko I: Lentotuhkaa 70 %, rikinpoistotuotetta 30 % (Martinlaakson voimalaitos)

Lohko II: Lentotuhkaa 50 %, rikinpoistotuotetta 50 % (Martinlaakson voimalaitos)

Lohko III: Lentotuhkaa 70 %, rikinpoistotuotetta 30 % (Hanasaaren voimalaitos)

Lohko IV: Lentotuhkaa 70 %, rikinpoistotuotetta 30 %, lisäainetta (Hanasaaren voimalaitos).

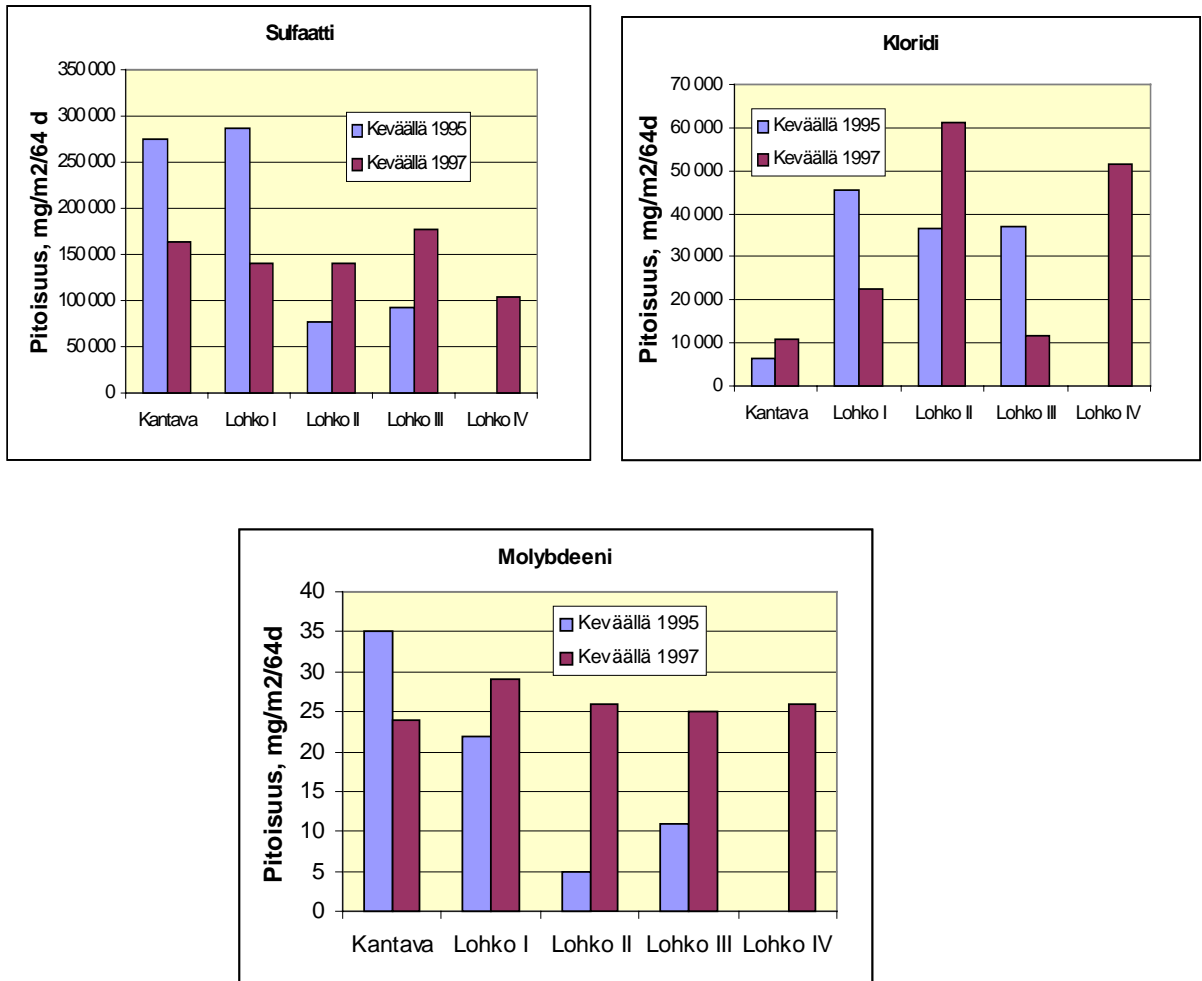


Kuva 16. Suomenojan pysäköintialueen massojen tiivistysasteen ja puristuslujuuden keskinäinen riippuvuus.

Pysäköintialueen lentotuhkamassojen pelättiin imevän itseensä kapillaarisesti huomattavia määriä vettä, koska pysäköintialue rakennettiin osittain saven päälle eikä alueen alle rakennettu suodatinkerrosta. Kolmen vuoden ikäisinä porattujen koekappaleiden vesipitoisuudesta voidaan kuitenkin päätellä, että rakennekerrokset ovat säilyneet suhteellisen samassa kosteudessa kuin rakennettaessakin. Mitatut vesipitoisuudet porauksen jälkeen olivat noin 25–35 %.

5.1.3 Liukoisuustutkimusten tulokset

Molybdeenin, kloridin ja sulfaatin liukoisuudet Suomenojan koekohteesta vuosina 1995 ja 1997 poratuista näytteistä on esitetty kuvassa 17 ja liitteen 2 taulukossa 1. Näytteiden liukoisuudet verrattuna kokonaispitoisuuksiin on koottu taulukkoon 16.



Kuva 17. Molybdeenin, kloridin ja sulfaatin liukoisuudet Suomenojan koekohteesta keväällä 1995 ja keväällä 1997 poratuista näytteistä 64 d diffuusiotestissä.

Samasta lohkosta vuosina 1995 ja 1997 otettujen näytteiden koostumuksessa on vaihteluja (liite 2). Kokonaispitoisuudet poikkeavat myös massojen valmistuksessa käytettyjen sekoitusasteiden perusteella arvioiduista pitoisuuksista. Kenttäolosuhteissa on suurten massamäärien sekoitusvaikeuksien vuoksi yleensä vaikeaa valmistaa tasalaatuisia massoja. Koska liukoisuustutkimuksissa käytettyjen näytteiden massakoko on pieni (noin 200 g), massojen laatu vaihtelut näkyvät helposti tuloksissa.

Kantava rakenne on todennäköisesti sisältänyt pieniä määriä rikinpoistotuotetta (vrt. molybdeeni-, sulfaatti- ja kloridituloksia muihin tuloksiin). Kloriditulosten perusteella tutkitut näytteet ovat sisältäneet 5–10 % rikinpoistotuotetta.

Sulfaatin liukoisuus kenttäkoekappaleista oli huomattavasti suurempi kuin vastaavista laboratoriokoekappaleista (taulukko 16). Lohkojen 2 ja 3 vuoden 1995 näytteistä liuenneet sulfaattipitoisuudet ovat muihin tuloksiin verrattuna pieniä eivätkä korreloi kokonaispitoisuuksien kanssa. Sulfaatin liukoisuuden on aikaisemmin todettu riippuvan kloridin liukenemistasosta, mutta tämä yhteys ei selitä näiden näytteiden alhaista liukoisuustasoa.

Taulukko 16. Suomenojan koekohteesta porattujen näytteiden kokonaispitoisuudet ja tulosten vertailu liukoisuustuloksiin.

Lohko (näytekerros) ja massojen koostumus	Näyte otettu (ikä)	Kromi (Cr)	Molybdeeni (Mo)	Sulfaatti (SO ₄)		Kloridi (Cl)	
		Kokonaispitoisuus, mg/kg	Kokonaispitoisuus, mg/kg	Kokonaispitoisuus, mg/kg	Osuus*)	Kokonaispitoisuus mg/kg	Osuus *)
Kantava kerros: Salmisaaren lentotuhka	1995 (1 v)	240	< 50	59 000	34 %	650	69 %
	1997 (3 v)	180	< 40	73 000	16 %	2 200	36 %
Lohko I: Martinlaakson LT/RPT (70/30). RPT:n kloridipit. 1–2 %	1995	51	2,5	164 000	15 %	5 900	70 %
	1997	150	< 40	100 000	10 %	2 100	75 %
Lohko II: Martinlaakson LT/RPT (50/50). RPT:n kloridipit. 1–2 %	1995	37	< 2	251 000	2 %	2 200	95 %
	1997	100	< 40	99 000	9 %	4 500	87
Lohko III: Hanasaaren LT/RPT (70/30). RPT:n kloridipit. 4–5 %	1995	170	< 50	191 000	6 %	6 000	67 %
	1997	170	< 40	103 000	13 %	2 300	39 %
Lohko IV: Hanasaaren LT/RPT (seossuhde 70/30). RPT:n kloridipit. 4–5 %. Lisäaine mukana.	1997	180	< 40	97 000	9 %	4 000	80 %

*) Diffuusiotestissä koekappaleesta liuenneen määrän osuus kokonaismäärästä.

Verrattaessa diffuusiotestissä liuenneiden kloridin ja sulfaatin pitoisuuksia koekappaleiden kokonaispitoisuuksiin havaitaan, että diffuusiotestin aikana liukeni merkittävä osa kloridista. Sulfaatin liukoisuus oli noin 10 % lähtöpitoisuuksista (taulukko 16).

Koekappaleista liuenneet pitoisuudet eivät ylitä sijoitusryhmän 2 ohjearvoa. Kloridipitoisuudet alittivat yhtä poikkeusta lukuun ottamatta sijoitusryhmälle 1B annetun ohjearvon. Tulokset ovat pienempiä kuin laboratoriokappaleiden tulokset. Tämä saattaa johtua siitä, että kloridi on jo osittain liennut materiaalista. Sulfaattipitoisuudet ylittävät sijoitusryhmän IB ohjearvon mutta eivät sijoitusryhmän 2 ohjearvoa. Kaikki molybdeenipitoisuudet alittavat selvästi sijoitusryhmälle 1B annetun ohjearvon.

5.2 VUOSAAREN KOETIE

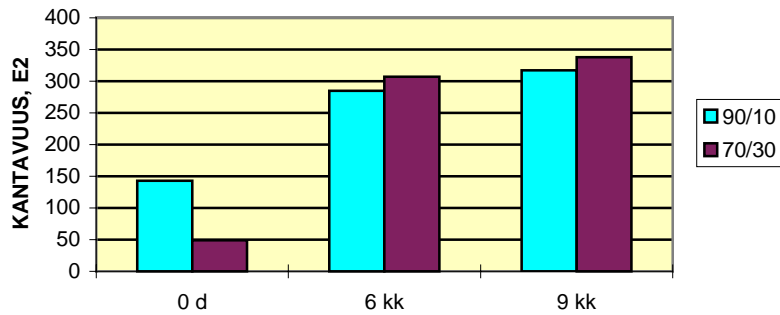
Vuosaaren maanläjitysalueelle vanhan yhdyskuntajätämäen rinteeseen rakennettiin koetie, jossa käytettiin kahta erilaista lentotuhka-rikinpoistotuoteseosta: RPL I ja RPL II. Hanasaaren voimalasta tuotu RPL I sisälsi 90 % lentotuhkaa ja 10 % rikinpoistotuotetta ja Salmisaaren voimalasta tuotu RPL II 70 % lentotuhkaa ja 30 % rikinpoistotuotetta. Koetie rakennettiin marraskuussa 1994, jolloin lämpötila vaihteli nollan molemmin puolin. Massat tuotiin työmaalle optimivesipitoisuudessa, levitettiin tiehöylällä 30 cm kerroksina ja tiivistettiin vähintään kuusi kertaa kuuden tonnin täryjyrällä.

5.2.1 Rakennetekniset ominaisuudet

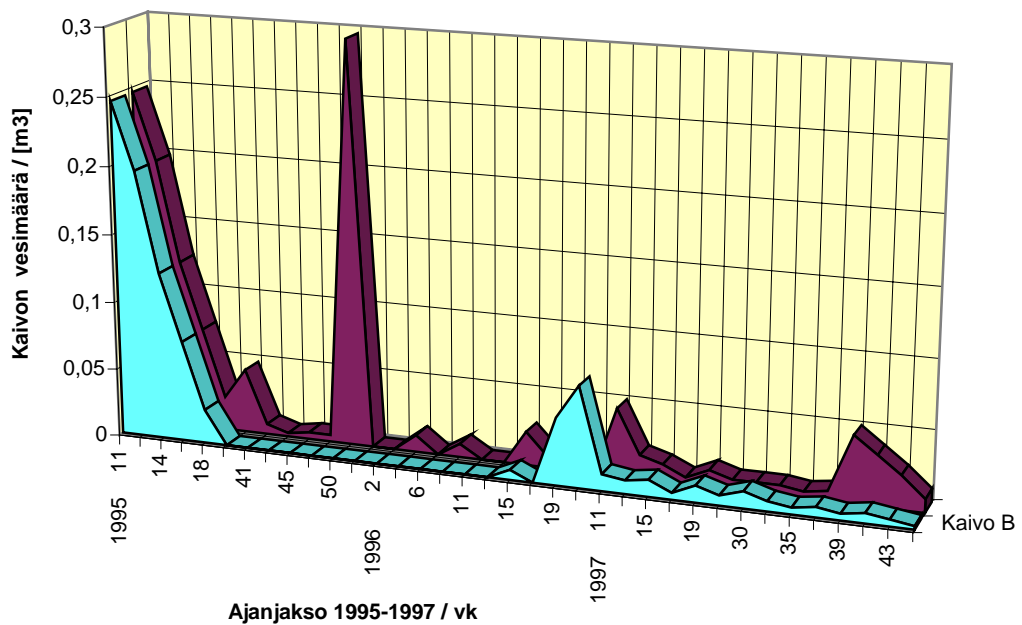
Lentotuhkamassojen kantavuudet ja puristuslujuudet kasvavat ajan myötä. Vuosaaren koetien kantavuusmittausten mukaan kantavuuden kasvu on merkittäväntä ensimmäisen puolen vuoden aikana. Seossuhde ei näyttäisi vaikuttavan kantavuuteen, jos puristuslujuudet ovat suunnilleen laihan maabetonin tasolla. Vuoden ikäisen tien 70/30-massan rakenteesta porattujen näytteiden puristuslujuudet olivat noin 1,6 MPa ja 90/10-seoksen 2,8 MPa. Kuvassa 18 on esitetty koetien kantavuuden kehitys molemmilla koeosuuksilla.

Vuosaaren koetien lävitse suotautuvaa vesimäärä seurattiin tien alle asennettujen lysimetrien avulla. Lysimetrien eli massojen alle rakennettujen keräilyaltaiden koko oli noin 30 m². Lysimetrit oli asennettu sekä seoksen 90/10 että seoksen 70/30 alle. Kuvasta 19 voidaan havaita, että seossuhteilla ei näyttäisi käytännössä olevan suurta vaikutusta massan läpi suotautuvan veden määrään. Kenttäkohteessa läpi suotautuva vesi on ollut ainoastaan tien päälle satanutta tai valunutta vettä. Minkäänlaista paineellistettua vesipatsasta tielle ei tutkimusajan kuluessa tehty, koska vettä tutkimuskaivoihin saatiin muutenkin.

VUOSAAREN KOETIE



Kuva 18. Vuosaaren koetien kantavuuden (E_2) kehitys eri koeosuuksilla.



Kuva 19. Vuosaaren koetien lysimetrien kaivoihin kertyneet vesimäärät 1995-1997.

5.2.2 Lysimetrien vesinäytteet

Liuenneiden aineiden pitoisuudet

Koetien lysimetreistä kerättyjen vesinäytteiden kloridi-, sulfaatti- ja molybdeenipitoisuudet on esitetty taulukossa 17 ja liitteen 2 kuvassa. Tuloksia ei voida suoraan verrata diffuusiotestituloksiin, koska koeolosuhteet eivät ole vertailukelpoisia. Tuloksista saadaan kuitenkin havaintoja pitoisuustasoista koeolosuhteissa.

Kaivojen vesinäytteiden pH-arvot olivat neutraaleja (pH 6–8). Laboratoriokokeissa vesisuodosten pH-arvot olivat yleensä noin 10. Tämä saattaa osittain johtua veden neutraloitumisesta (karbonoitumisesta) ilman hiilidioksidin vaikutuksesta. Kaivojen vesinäytteiden johtokykyarvot kuvaavat liuenneiden suolojen määrää. Koska vesimäärät olivat pieniä, johtokykyarvot olivat korkeita. Johtokykyarvot olivat odotetusti suuremmat seoksessa 70/30 kuin seoksessa 90/10. Diffuusiotestissä käytetään suurta vesimäärää, joten tuloksia ei voida verrata.

Taulukko 17. Vuosaaren koekohteen lysimetrien suotovesiin liunneet kloridi, sulfaatti ja molybdeeni vuosina 1995-1997.

Mittattu parametri	Kaivo A (LT/RPT-seos 90/10)					Kaivo B (LT/RPT-seos 70/30)				
	Suotovesien haitta-ainepitoisuudet, mg/l		Arvioitu kumulatiivinen pitoisuus			Suotovesien haitta-ainepitoisuudet, mg/l		Arvioitu kumulatiivinen tulos		
	Välillä	Keskim.	mg/m ²	mg/kg	Osuus ^{*)} , %	Välillä	Keskim.	mg/m ²	mg/kg	Osuus ^{**)} , %
pH-arvo	3,4 - 7,7	6,7				5,1 - 7,0	6,4			
Johtokyky, mS/m	280 - 3 600	2 000				630 - 8 600	6 400			
Kloridi (Cl)	120 - 13 000	6 400	320 000	160	4	820 - 47 000	29 000	500 000	250	2
Sulfaatti (SO ₄)	150 - 1 600	760	34 000	17	0,04	30 - 1 100	500	7 400	4	0,01
Molybdeeni (Mo)	< 0,002 - 0,032	0,008	0,2	0,0001	0,002	< 0,002 - 0,012	0,008	0,07		< 0,001

^{*)} Osuus arvioitu massan sisältämän (Cl noin 1,3 %, SO₄ noin 3,1 % ja Mo noin 5,6 mg/kg) kokonaismäärän perusteella.

^{**)} Osuus arvioitu massan sisältämän (Cl noin 0,4 %, SO₄ noin 3,8 % ja Mo noin 7,2 mg/kg) kokonaismäärän perusteella.

Kloridipitoisuudet olivat seoksesta 70/30 suotautuvissa vesissä 35–40 g/l ja seoksesta 90/10 suotautuvissa vesissä 5–15 g/l. Pitoisuudet olivat huomattavasti korkeammat kuin diffuusiotestin vesisuodoksissa (analysoitu maksimipitoisuus yleensä alle 1 g/l), mikä johtuu diffuusiotestissä käytetystä suuresta vesimäärästä. Tulosten perusteella arvioitiin, että kolmen vuoden aikana liukeni 2–4 % massan sisältämästä kloridista.

Sulfaattipitoisuudet olivat pienemmät seoksesta 70/30 suotautuneissa vesinäytteistä kuin seoksen 90/10 vesissä. Tämä selittyy, kuten aikaisemmin on todettu, sillä, että kloriditaso vaikuttaa sulfaatin liukenemiseen (ks. kuva 12, sivu 40).

Molybdeenin liukeneminen oli hyvin vähäistä. Pitoisuudet olivat yleensä alle 0,01 mg/l ja suurin mitattu tulos oli 0,032 mg/l. Eri seosten vesinäytteissä ei ollut merkittävää pitoisuuseroa. Diffuusiotestin vesinäytteissä on mitattu huomattavasti

korkeampia pitoisuuksia (pitoisuudet yleensä 0,02–0,05 mg/l). Kromin ja vanadiinin pitoisuudet eivät olleet merkittäviä.

Liuenneiden pitoisuuksien vertailu meriveden pitoisuuksiin

Lysimetrieihin suotautuneiden vesien liuenneiden aineiden pitoisuuksia verrattiin meriveden pitoisuuksiin, koska haluttiin arvioida mahdollisuuksia sijoittaa rikinpoistotuotetta sisältäviä seoksia kohteisiin, joissa suotovedet ohjautuvat suoraan mereen. Taulukossa 18 on esitetty meriveden suolapitoisuudet. Lysimetrivesien suolapitoisuudet eivät ole merkittäviä meriveden suolapitoisuuksiin verrattuna. Meriveden suolapitoisuudet alitetaan jo suotovesien laimennussuhteessa 10.

Taulukko 18. Meriveden suolapitoisuudet (Lähde: Merentutkimuslaitos, H. Hahti 1997).

	Kloridipitoisuus mg/l	Sulfaattipitoisuus mg/l
Suomenlahti	4 400 - 5 000	620 - 690
Pohjois-Itämeri	6 600 - 7 200	920 - 1 000
Etelä-Pohjanlahti	3 300 - 3 900	460 - 540
Pohjois-Pohjanlahti	2 200	310

Laboratoriokokeiden tuloksista voidaan karkeasti arvioida sijoituspaikalla muodostuvan veden keskimääräistä koostumusta sadan vuoden aikana. Aalbers *et al.* 1993 ovat esittäneet yhtälön (1), josta sadan vuoden aikana materiaalista liukenevat päästöt voidaan karkeasti arvioida, jos tutkittavien aineiden liukeneminen tapahtuu diffuusion kautta ja aineiden diffuusiokertoimet ovat alle 10^{-11} m/s:

$$E_{100\text{vuotta}} = 24 \times E_{64d} \times f_{\text{lämpötila}} \times f_{\text{kosteusjakso}}, \quad (1)$$

jossa

$E_{100\text{ vuotta}}$ on kiinteytetystä materiaalista liukenevat aineet sadan vuoden aikana

E_{64d} diffuusiotestin tulos (arvioitu diffuusiokertoimen avulla)

$f_{\text{lämpötila}}$ lämpötilan korjauskerroin (Hollannissa oletus 0,7)

$f_{\text{kosteajakso}}$ kosteiden ja kuivien jaksojen korjauskerroin.

Diffuusiotestien tuloksista voidaan arvioida liukoisuudet tietyn ajan kuluessa. Taulukossa 19 on esimerkkinä laskettu sadan vuoden aikana kiinteytetystä materiaalista liukenevien aineiden määriä. Kosteiden ja kuivien jaksojen korjauskerrointa ei käytetä yhtälössä (1), jos materiaali on jatkuvasti kostea. Kun materiaali on ajoittain kuiva, voidaan olettaa, että diffuusioliukeneminen hidastuu. Esimerkkilaskelmassa ei käytetty lämpötilan eikä kosteiden ja kuivien jaksojen korjauskerrointa.

Taulukon 19 arvoja voidaan verrata lysimetreistä kerättyjen vesinäytteiden pitoisuustasoihin. Lysimetritulokset ovat huomattavasti korkeampia kuin taulukossa esitetyt sadan vuoden keskimääräiset pitoisuudet, koska pitoisuustaso on yleensä suurin ensimmäisten vuosien aikana. Laskettuja keskimääräisiä pitoisuuksia voidaan karkeasti verrata sijoitusympäristön pitoisuuksiin. Laskennalliset pitoisuudet ovat hyvin pieniä verrattuna Suomenlahden suolapitoisuuksiin.

Taulukko 19. Karkea arvio sadan vuoden aikana liukenevista aineista. Laskelmat perustuvat taulukossa 14 ja liitteessä 1 esitettyihin tuloksiin, joissa oletetaan, että liukeneminen tapahtuu diffuusion kautta ja että diffuusiokertoimet ovat alle 10^{-11} m/s.

	Liukenemiskohde	LT1	RPT 10 %	RPT 30 %
Sulfaatti (SO ₄ ²⁻)	Diffuusiotestissä, mg/m ² /64d	14 900	120 000	70 200
	Arvio liukenevasta määrästä sadan vuoden aikana, mg/m ² /64d	358 000	2 880 000	1 680 000
	Arvio keskimääräisestä pitoisuudesta sadan vuoden aikana *, mg/l	12	96	56
Kloridi (Cl ⁻)	Diffuusiotestissä, mg/m ² /64d	1 500	96 000	201 000
	Arvio liukenevasta määrästä sadan vuoden aikana, mg/m ² /64d	36 000	2 300 000	4 800 000
	Arvio keskimääräisestä pitoisuudesta sadan vuoden aikana *, mg/l	1,0	77	160
Molybdeeni (Mo)	Diffuusiotestissä, mg/m ² /64d	129	44	33
	Arvio liukenevasta määrästä sadan vuoden aikana, mg/m ² /64d	3 900	1 060	790
	Arvio keskimääräisestä pitoisuudesta sadan vuoden aikana *, mg/l	0,1	0,03	0,03

*) Arvioitu sadevesimäärä: 300 mm/vuosi eli 0,3 m³/m²/vuosi (ts. 100 vuodessa 30 m³).

Hollantilaiset kloridin ja sulfaatin sijoitusohjeet perustuvat pintaveden pitoisuuksiin. Laskelmissa on käytetty kloridille arvoa 200 mg/l ja sulfaatille arvoa 100 mg/l. Jos satamaympäristössä hyväksyttäisiin taulukossa 18 esitetyt taustapitoisuudet, satamaympäristösijoituksessa voitaisiin hyväksyä kloridille ja sulfaatille huomattavasti korkeampia pitoisuuksia.

6 SUOSITUS YMPÄRISTÖKELPOISUUDESTA MAARAKENTAMISESSA

6.1 TUTKIMUSTEN TULOKSET

Tutkimuksen ensimmäisen vaiheen tavoitteena oli kehittää puolikuivaa rikinpoistomenetelmää käyttävien kivihilivoimaloiden sivutuotteista teknisesti toimivia ja ympäristökelpoisia maarakennuskäyttöön soveltuvia materiaaleja. Laboratoriossa kehitettyjen ja tutkittujen seoskoostumusten soveltuvuuden arvioimiseksi rakennettiin myös käytännön koekohteita. Tutkimuksen toisen vaiheen tavoitteena oli seurata maarakennuskäyttöön hyväksyttäviksi arvioitujen materiaalien käyttäytymistä pidemmän ajan kuluessa.

Tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa todettiin, että lentotuhkasta pystytään valmistamaan massoja, jotka ympäristökelpoisuustestien perusteella voidaan laadusta riippuen sijoittaa ajoittain kosteaan sijoituskohteeseen joko eristämättömänä tai eristettynä tietyin rajoituksin. Liukoisuuden kannalta kriittisin aine on molybdeeni. Eri laitosten tuhkien välillä on selviä eroja, joihin vaikuttavat muun muassa käytetyn kivihiiilen laatu ja polttotekniikka.

Lentotuhkasta ja rikinpoistotuotteesta valmistettiin koekappaleita seossuhteilla 95/5, 70/30, 50/50 ja 33/77 ja myös niitä tutkittiin liukoisuuskokeilla. Tavoitteena oli käyttää seoksissa mahdollisimman paljon rikinpoistotuotetta. Tutkimuksissa kuitenkin todettiin kloridin liukoisuuden rajoittavan rikinpoistotuotteen osuutta seoksessa. Kloridin liukoisuuden arvioitiin jäävän alle sijoituspaikkaluokan 2 rajan 10–15 % rikinpoistotuotetta sisältävissä seoksissa. Sulfaatin ja molybdeenin liukoisuudet alittivat joko sijoituspaikkaluokan 1 B tai 2 ylärajan. Niiden liukoisuuteen pystyttiin myös selvästi vaikuttamaan sideaineilla.

Tässä julkaisussa raportoidun jatkotutkimuksen tarkoituksena oli selvittää kenttäolosuhteiden vaikutusta rakenneteknisiin ominaisuuksiin ja ympäristökelpoisuuteen (liukenemiskäyttäytymiseen). Tavoitteena oli myös saatujen tulosten perusteella tarkentaa tutkimuksen ensimmäisen vaiheen raportissa (Mäkelä et al. 1995) esitettyä suositusta lentotuhka- ja lentotuhka-rikinpoistotuotemassoille soveltuvista sijoituskohteista ja sijoitusedellytyksistä.

Jatkotutkimuksen tulokset osoittivat selvästi, että massojen korkea tiiviysaste tai pidennetty lujittumisaika eivät vaikuta pienentävästi kloridin, sulfaatin ja molybdeenin liukoisuuteen. Massojen laatuvaihtelulla oli merkittävä vaikutus liukoisuustasoon. Kivihiiilen lentotuhkamassoissa molybdeeni on kriittisin komponentti ja sen liukoisuus on todennäköisesti yhteydessä kokonaispitoisuustasoon. Muut mahdollisesti joissakin kivihiiilen lentotuhkissa kriittiset komponentit ovat kirjallisuuden ja muualla tehtyjen tutkimusten perusteella kromi, arseeni ja seleeni (Hjelmar et al. 1991). Lentotuhkan ja rikinpoistotuotteen seoksissa kriittisimmät komponentit ovat kloridi ja sulfaatti. Molybdeenin liukoisuus oli rikinpoistotuotteen seoksesta yleensä pienempi kuin lentotuhkamassasta.

Tutkimuksen ensimmäisen ja toisen vaiheen tulosten perusteella esitetään seuraavassa suositus kivihillivoimalan sivutuotteiden ympäristökelpoisuuden arvioinnista ja seurannasta maarakentamisessa. **Suositus koskee vain kivihillivoimaloiden lentotuhkamassojen (LT) ja lentotuhka-rikinpoistotuoteseosten (LT/RPT-massojen) ympäristökelpoisuutta. Sen soveltaminen edellyttää, että rakenteet mitoitetaan siten, että tekniset toimivuusvaatimukset täyttyvät.**

6.2 MASSOJEN SIJOITETTAVUUDEN ARVIOINTI

6.2.1 Karakterisointitestit

Tutkimuksen tulosten ja aikaisempien kokemusten perusteella voimaloiden sivutuotteiden ympäristökelpoisuuden tutkimisessa käytettäviksi karakterisointitesteiksi suositellaan hollantilaista diffuusioliukoisuustestiä (NEN 7345) tai kolonnitestiä (NEN 7343). Testit tehdään sijoitettavasta massasta tai seoksesta.

Suositukset liukoisuustestimenetelmän valintakriteereiksi ovat taulukossa 20. Eristettyinä sijoitettavien sivutuotteiden karakterisointitestiksi suositellaan diffuusioliukoisuustestiä (NEN 7345). Jotta diffuusiotestin koekappale kestäisi testissä, sen lujuuden on oltava vähintään 0,5 MPa. Testissä irronneiden partikkelien määrä saa olla korkeintaan 30 g/m². Jos materiaali sijoitetaan eristämättömänä, koekappaleen on täytettävä tiukemmat vaatimukset (ks. taulukko 20). Materiaaleille, jotka eivät sovellu diffuusiotestiin, käytetään kolonnitestiä (NEN 7343).

Taulukko 20. Suositus liukoisuustestimenetelmän valintakriteereiksi.

Ominaisuus	Diffuusiotesti		Kolonnitesti
	Eristetyt kohteet	Eristämättömät kohteet	
Puristuslujuus	> 0,5 MPa	> 1 MPa	Materiaalit, jotka eivät täytä diffuusiotestin kriteereitä
Vedenläpäisevyys		< 10 ⁻⁹ m/s	
Irronneiden partikkeleiden määrä	Enintään 30 g/m ²	Enintään 30 g/m ²	

Diffuusio- ja kolonnitestille käytettiin tässä raportissa esitettyjen tutkimusten yhteydessä vastaaviin hollantilaisiin kriteereihin pohjautuvia sijoituskriteereitä, joissa esitetään ohjearvot sijoituspaikkaluokille (taulukot 22 ja 23). Näitä ohjearvoja suositellaan käytettäväksi ainakin niin kauan, kunnes on tutkimuksin arvioitu Suomen olosuhteisiin parhaiten soveltuvat sijoituskriteerit. Hollantilaisen kriteerien peruseriaatteena on se, että materiaalista arvioidut päästöt sadan vuoden aikana saavat aiheuttaa korkeintaan yhden prosentin lisäyksen materiaalin

alapuolella olevaan metrin paksuiseen maakerrokseen. Vertailuarvoina on käytetty hollantilaisia puhtaan maan pitoisuusarvoja.

Tutkittavat ominaisuudet

Tuotetta ensimmäistä kertaa käyttöön otettaessa, hiilen koostumuksen muuttuessa olennaisesti tai, jos polttoprosessissa tapahtuu tuotteen laatuun vaikuttavia muutoksia, tutkitaan sijoituspaikkaluokan varmistamiseksi aina molybdeenin (Mo) ja kromin (Cr) liukoisuudet diffuusio- tai kolonnitestillä. Silloin, kun massat sijoitetaan eristämättöminä (sijoituspaikkaluokat 1A ja 1B), tutkitaan myös arseenin (As) ja seleenin (Se) liukoisuudet. Rikinpoistotuotetta sisältävistä seoksista tutkitaan lisäksi aina kloridin (Cl⁻) ja sulfaatin (SO₄²⁻) liukoisuudet.

Laadunvalvonnassa tarvittavien vertailutasojen selvittämiseksi karakterisointitietien yhteydessä määritetään myös

- a) lentotuhkamassoista molybdeeni- ja kromipitoisuus. Jos massoja halutaan sijoittaa eristämättöminä, tutkitaan myös arseenin ja seleenin pitoisuudet. Uuttomenettelynä käytetään kuningasvesiuuttoa.
- b) lentotuhka-rikinpoistotuoteseoksista kloridi-, sulfaatti- ja molybdeenipitoisuus. Kloridille ja sulfaatille käytetään testimenettelynä vesiravistelua suhteessa 1:10 ja ionikromatografista määrittystä ja molybdeenille kuningasvesiuuttoa.

6.2.2 Sijoituskohteet

Kaikissa sijoituskohteissa tuhka- ja tuhka-rikinpoistotuotemassat on sijoitettava siten, että pohjavesi ei pääse kosketuksiin sivutuotteiden kanssa. Tällöin on otettava huomioon pohjaveden taso ja pohjaveden pinnan vaihtelu. Herkillä alueilla suositellaan metrin suojaetäisyyttä pohjaveden pintaan. Massojen sijoittaminen orsivesitason alapuolelle ei ole hyväksyttävää. Sijoitus tärkeille pohjavesialueille ei ole koskaan suositeltavaa. Projektin tulosten perusteella suositellaan, että sivutuoterakentaminen keskitetään isoihin massasijoituskohteisiin. Liiallisen hajasijoittamisen estämiseksi pienimmän yhteen kohteeseen sijoitettavan tuotemäärän tulisi olla 1 000 tonnia (kuiva-aineksena ilmoitettuna).

Testeihin liittyvät sijoituspaikkaluokat ja tavallisimmat niihin kuuluvat lentotuhkien ja rikinpoistotuotteiden käyttökohteet voidaan määritellä seuraavasti:

Sijoituspaikkaluokka 1A - Eristämättöminä pysyvästi kosteisiin sijoituskohteisiin soveltuvat materiaalit

Pysyvästi kosteisiin kohteisiin voidaan sijoittaa lentotuhkamassoja, joista liukenevien aineiden määrä on karakterisointitestissä alittanut luokan 1A ohjearvot. Edellytyksenä on, että kohdassa 2 esitettävät laadunvalvonta- ja raportointivaatimukset täyttyvät. Pysyvästi kosteita kohteita ovat esimerkiksi patorakenteet.

Sijoituspaikkaluokka 1B - Eristämättöminä ajoittain kosteisiin sijoituskohteisiin soveltuvat materiaalit.

Sijoituspaikkaluokan 1B (kolonnitestissä sijoituspaikkaluokka 1) kohteisiin voidaan sijoittaa lentotuhka- ja LT/RPT-massoja, joista liukenevien aineiden

määrä on karakterisointitestissä alittanut luokan 1B (kolonnitestille luokan 1) ohjearvot. Edellytyksenä on, että kohdassa 2 esitettävät laadunvalvonta- ja raportointivaatimukset täyttyvät.

Eristämättömänä 1B-luokan mukaisesti sijoitettavat voimalan sivutuotteet on peitettävä joko 0,3 m maakerroksella tai tierakenteissa tiiviillä pintarakenteella (esimerkiksi asfaltti ja murske), jonka käytön aikaisen vähimmäispaksuuden on oltava $>0,1$ m. Peittämisen tavoitteena on estää pääsy välittömään kosketukseen tuhkan kanssa ja ehkäistä tuhkan kulkeutumista sijoituskohteesta. Peitemateriaalille ei ole tarpeen asettaa vedenläpäisevyysvaatimuksia. Esimerkkejä mahdollisista sijoituskohteista ovat puistorakentaminen sekä sellaiset tie- ja kenttärakenteet ja meluvallit, joissa pintamateriaali ei täytä sijoituspaikkaluokan 2 vedenläpäisevyysvaatimusta.

Sijoituspaikkaluokka 2 - Vettä läpäisemättömällä materiaalilla eristettynä ajoittain kosteisiin sijoituskohteisiin soveltuva.

Sijoituspaikkaluokan 2 kohteisiin voidaan sijoittaa lentotuhka- ja LT/RPT-massoja, joista liukenevien aineiden määrä on karakterisointitestissä alittanut luokan 2 ohjearvot. Edellytyksenä on, että kohdassa 2 esitettävät laadunvalvonta- ja raportointivaatimukset täyttyvät.

Veden pääsyä materiaaliin on rajoitettava peittämällä se asfaltilla (AB) tai vastaavalla heikosti vettä läpäisevällä materiaalilla. Peitemateriaalin k-arvon on oltava vähintään tasolla 10^{-8} ja pinnan kaltevuuden > 1 %. Luiska-alueet on suojattava tiiviillä, vähintään 30 cm paksulla savi- tai moreenikerroksella (k-arvo $< 10^{-7}$ m/s) ja niiden kaltevuuden on oltava vähintään 1/3. Esimerkkejä sijoituskohteista ovat tie- ja kenttärakenteet sekä meluvallit, mikäli niiden pintasuojaukset täyttävät edellä esitetyt vaatimukset.

Erityiskohteet

Meren rannalla sijaitsevalla alueella, jolta valumavedet laskevat suoraan mereen (merisatamaympäristö), voidaan sallia myös sellaisten lentotuhka-rikinpoistotuoteseosten käyttö, joissa kloridin ja sulfaatin liukoisuudet ylittävät sijoituspaikkaluokan 2 kriteerit. Valumavesien kulkeutumismahdollisuudet on aina arvioitava tapauskohtaisesti. Muiden epäpuhtauksien liukoisuudet eivät saa ylittää sijoituskohteen mukaisen sijoituspaikkaluokan kriteereitä.

Sijoitettaessa lentotuhka-rikinpoistotuotemassoja meren rannalla sijaitsevalle alueelle, meren pinnan alapuolelle, on molybdeenin, arseenin, kromin ja seleenin liukoisuuksien alitettava diffuusiotestissä sijoituspaikkaluokan 1A kriteerit. Läjitys suoraan mereen ei ole sallittua.

Suurten kaupunkien kantakaupunkialueilla sijaitsevilla tiiviisti rakennetuilla kerrostaloalueilla ja teollisuusalueilla, joilla epäpuhtauksien joutuminen pohjavesiin ei nosta riskitasoa, voidaan sallia sijoituspaikkaluokan 2 ohjearvot 50 %:lla ylittäviä pitoisuuksia. Tuotteita ei kuitenkaan tällöin tule sijoittaa herkkiin kohteisiin, kuten leikkikenttä-, koulu- ja sairaala-alueille tai asutuille piha-alueille.

6.3 RAPORTOINTI- JA LAADUNVALVONTAMENETTELYT

6.3.1 Laadunvalvonnan perusteet

Tehtyjen tutkimusten mukaan sijoituksen kannalta kriittisimpiä ovat helposti liukenevat aineet. Käsittelemättömissä tuotteissa niiden liukoisuus voidaan melko hyvin arvioida pitoisuuden perusteella. Kriittisiä aineita ovat lentotuhkissa molybdeeni ja rikinpoistotuotteita sisältävissä seoksissa kloridi ja sulfaatti.

Lentotuhkamassat

Molybdeenin liukoisuus käsittelemättömistä lentotuhkista määräytyy yleensä pitoisuuden mukaan. Tuhkan muut ominaisuudet vaikuttavat kuitenkin jossain määrin liukoisuuteen. Molybdeenin liukoisuutta voidaan myös rajoittaa seostuksien tai muilla keinoin.

Molybdeenipitoisuuden seuranta voidaan tutkimuksen tulosten perusteella käyttää massojen laadunvalvonnassa, mutta pitoisuuden ja liukoisuuden välisen korrelaation määrittämiseksi ei vielä ole riittävästi seurantatietoa. Siksi esitetään, että karakterisointitestien yhteydessä määritetään myös molybdeenin pitoisuus sijoitettavassa massassa. Tätä pitoisuutta käytetään sen jälkeen laadunvalvonnassa vertailutasona.

Lentotuhka-rikinpoistotuote (LT/RPT) -massat

Rikinpoistotuotteen ja lentotuhkan seokset ovat yleensä sijoituskelpoisia, jos kloridin, sulfaatin ja molybdeenin liukoisuudet alittavat sijoituskohteen vaatiman sijoituspaikkaryhmän ohjearvot. Koska kloridin liukoisuus määräytyy pitoisuuden perusteella, massan kloridipitoisuuden seuranta soveltuu laadunvalvontamenetelmäksi.

Jos rikinpoistotuotteen kloridipitoisuus on 4–5 %, sijoituspaikkaluokan 1B ohjearvot yleensä alittuvat, kun rikinpoistotuotteen osuus seoksessa on alle 5 %. Sijoituspaikkaluokan 2 ohjearvot alittuvat vastaavasti rikinpoistotuotteen osuuden ollessa alle 15 %. Jos rikinpoistotuotteen kloridipitoisuus on alle 4 %, sen osuus seoksissa voi olla jonkin verran suurempi ilman, että liukoisuusohjearvot ylittyvät. Esimerkiksi kloridipitoisuuden ollessa alle 2,5 % rikinpoistotuotteen osuus voi sijoituspaikkaluokassa 1 nousta lähes 10 %:iin ja sijoituspaikkaluokassa 2 noin 25 %:iin. Liukoisuutta rajoittavia lisäaineita sisältävissä seoksissa rikinpoistotuotteen osuudet voivat olla korkeampia, jos liukoisuusohjearvojen alittuminen on osoitettu karakterisointitestillä.

6.3.2 Laadunvalvonta- ja raportointimenetelmät

Tuotteiden käyttäjä ja tuottaja vastaavat siitä, että seokset ja sijoitustavat täyttävät sovitut vaatimukset. Seuranta varten lupaviranomaiselle raportoidaan vuosittain sijoituspaikat, sijoitustapa (seossuhteet, rakennetyyppi) ja sijoitetut määrät kussakin kohteessa ja käytetyt seossuhteet. Lisäksi annetaan laadunvalvontaraportti, jossa esitetään mm. karakterisointitestien ja laadunvalvonnan tulokset.

Laadunvalvontaa varten otetaan näytteet kahden viikon välein. Joka toisesta laadunvalvontanäytteestä analysoidaan seuraavassa kappaleessa määriteltävien haitta-aineiden pitoisuudet. Joka toinen laadunvalvontanäyte jätetään varanäytteeksi. Jos karakterisointitestin yhteydessä määritetyt lentotuhkan tai LT/RPT-seoksen tavoitepitoisuustasot ylittyvät analysoidussa näytteessä yli 30 %, analysoidaan myös kaksi viikkoa aikaisemmin ja kaksi viikkoa myöhemmin otettu varanäyte. Jos tavoitepitoisuustaso ylittyy 30 % myös toisessa tai molemmissa varanäytteissä, on osoitettava karakterisointitestillä, ettei analysoitavien komponenttien liukoisuus sijoitettavassa massassa ylitä sijoituspaikkaluokan ohjearvoja.

Laadunvalvonnassa seurattavat komponentit ja niiden määrittymenetelmät ovat:

- 1) Lentotuhkamassoissa molybdeeni (Mo). Jos karakterisointitestissä jonkun muun komponentin (Cr, As, Se) liukoisuus on yli puolet sijoituskohteen tavoitearvosta, on laadunvalvonnassa seurattava myös sen pitoisuutta. Molybdeenin uuttomenetelmänä käytetään kuningasvesiuuttoa.
- 2) LT/RPT-seoksista kloridi, sulfaatti ja molybdeeni. Kloridin ja sulfaatin määrittymenetelmänä on vesiravistelu suhteessa 1:10 ja kloridin ja sulfaatin määrittäminen ionikromatografisesti. Molybdeenin uuttomenetelmänä käytetään kuningasvesiuuttoa.

Yhteenvedo lentotuhka- ja lentotuhka-rikinpoistotuotemassoille soveltuvista sijoituskohteista ja suositeltavista laadunvalvontamenetelmistä on esitetty taulukossa 21 ja karakterisointitestien enimmäisohjearvoehdotukset kivihiilivoimalaitosten sivutuotteille taulukoissa 22 ja 23.

Taulukko 21. Lentotuhka- ja lentotuhka-rikinpoistotuotemassoille soveltuvat sijoituskohteet ja sijoitusedellytykset. Mitkään massat eivät sovellu sijoitettaviksi tärkeille pohjavesialueille.

Materiaali	Karakterisointit estissä saavutettava taso	Vaatimukset sijoitustavalle	Laadunvalvontam enettely	Laadunvalvonnan tavoitepitoisuus
Lentotuhka	Mo- ja Cr-liukoi- suudet alle sijoituspaikkaluokan 2 ohjearvojen	Sijoitus vettä heikosti läpäisevällä asfalttikerroksella tai vastaavalla materiaalilla eristettynä	Mo, 1 näyte/kuukausi*, kuningasvesiuutto	Karakterisointitestin yhteydessä kuningasvesiuutolla määritetyt Mo- (Cr-, As-, Se-) pitoisuudet.
	Mo-, Cr-, As- ja Se-liukoisuudet alle sijoituspaikkaluokan 1B ohjearvojen	Sijoitus eristämättömänä, mutta peitettynä ajoittain kosteisiin kohteisiin	Mo sekä tarvittaessa Cr, As ja/tai Se, 1 näyte/kuukausi*, kuningasvesiuutto	Tavoitepitoisuuden ylittyessä yli 30 % osoitettava karakterisointitestillä, että sijoituspaikkaluokan liukoisuusohjearvot eivät ylitä.
	Mo-, Cr-, As- ja Se-liukoisuudet alle sijoituspaikkaluokan 1A ohjearvojen	Sijoitus eristämättömänä pysyvästi kosteisiin kohteisiin		
LT/RPT-massat	Mo-, Cr-, Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ -liukoisuudet alle sijoituspaikkaluokan 2 ohjearvojen.	Sijoitus vettä läpäisevämmällä asfalttikerroksella tai vastaavalla materiaalilla eristettynä	Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Mo, 1näyte/kuukausi*. Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ vesiravistelun 1:10 ja ionigromatografineen määrittäminen	Karakterisointitestin yhteydessä määritetyt Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ - ja Mo-pitoisuudet Tavoitepitoisuuksien ylittyessä yli 30 % osoitettava karakterisointitestillä, että sijoituspaikkaluokan liukoisuusohjearvot eivät ylitä
	Mo-, Cr-, Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ -liukoisuudet alle sijoituspaikkaluokan 1B ohjearvojen	Sijoitus eristämättömänä, mutta peitettynä ajoittain kosteisiin kohteisiin	Mo kuningasvesiuutto	

* Laadunvalvontanäytteet otetaan joka toinen viikko, mutta normaalitilanteessa analysoidaan vain 1 näyte/kuukausi.

Taulukko 22. Diffuusiotestin (NEN 7345) enimmäisliukoisuusohjearvoehdotukset ($\text{mg}/\text{m}^2/64 \text{ d}$) diffuusiotestiin soveltuville (taulukko 20) kivihiilivoimaloiden sivutuotteille.

	Kiinteä rakennusmateriaali ($V > 50 \text{ cm}^3$)		
	Ryhmä 1 A	Ryhmä 1 B	Ryhmä 2
As	41	140	300
Cr	140	480	950
Mo	14	48	95
Se	1,4	4,8	9,5
Cl^-	18 000	54 000	150 000
SO_4^{2-}	27 000	80 000	200 000

Taulukko 23. Kolonnitestin, NEN 7343 (kumulatiivinen L/S 10) enimmäisliukoisuusohjearvoehdotukset kivihiilivoimaloiden sivutuotteille.

Aine	Enimmäispitoisuusohjearvot, mg/kg	
	Ryhmä 1	Ryhmä 2
As	0,88	7,0
Cr	1,3	12
Mo	0,28	0,91
Se	0,044	0,10
Cl^-	600	8 800
SO_4^{2-}	750	22 000

LÄHDELUETTELO

- Aalbers, Th., Wilde, P. de, Rood, G., Vermij, P., Saft, R., Beek, A. van de, Broekman, M., Masereeuw, P., Kamphuis, Ch., Dekker, P. & Valentin, E. 1993. Milieuhygiënische kwaliteit van primaire en secundaire bouwmaterialen in relatie tot hergebruik en bodem- en oppervlaktewaterenbeschermin. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiene, RIVM-rapport no 771 402 006. 456 s.
- Clarke, L. & Sloss, L. 1992. Trace elements. London. IEA Coal Research. 112 p.
- Haahti, H. 1997. Merentutkimuslaitos. Suullinen tiedonanto 20.11.1997.
- Hahkala, M., Larjava, K., Laitinen, T., Tolvanen, M. & Hatanpää, E. 1993. Voimalaitosten haitalliset ainevirrat. Puolikuivalla rikinpoistolla varustetun hiilivoimalaitoksen haitalliset ainevirrat. Sihti 2 Vuosiseminaari, Espoo 8.– 9.12.1993. 12 s.
- Hjelmar, O., Hansen, E., Larsen, F. & Thomassen, H. 1991. Leaching and soil/groundwater transport of contaminants from coal combustion residues. EFP 1323/86-18 + 1323/86-19 + 1323/89-7 Elkraft A.m.b.A og EF (DGXII). Horsholm. Vandkvalitetsinstituttet. 176 s.
- Mäkelä, E., Wahlström, M., Mroueh, U-M., Keppo, M. & Rämö, P. 1995. Kivihiilivoimaloiden rikinpoistotuotteiden ja lentotuhkan hyötykäyttö maanrakentamisessa. Espoo. VTT Julkaisuja 809. 78 s + liitt. 8 s.
- Ranta, J., Wahlström, M., Lindroos, P. & Häkkinen, T. 1990. Kivihiilivoimaloiden rikinpoistojätteet: ympäristövaikutukset ja hyötykäyttö. Helsinki. Kauppa- ja teollisuusministeriö, Energiaosasto, Sarja D:182. 107 s.
- Siitonen, T. 1991. Voimalaitosten rikinpoistossa syntyvien kiinteiden tuotteiden ja kalkkikiven analytiikkaa. Helsinki. Imatran Voima Oy T& K Tiedotteita, IVO-B-08/9. 65 s.
- VTT 1993. Tutkimusselostus VTT/KEM No 1409/93.
- Wahlström, M. & Laine-Ylijoki, J. 1996. Standardoidut liukoisuustestimenetelmät maarakentamisessa hyötykäytettävien materiaalien ympäristötestauksessa. Espoo. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 1801. 44 s. + liitt. 16 s.
- Walsh, M. 1997. Kivihiili- ja turvevoimalaitosten sivutuotteet ja niiden hyötykäyttö. Helsinki, Energia-alan keskusliitto, Finergy. Tutkimusraportti nro 2. 89 s.
- van der Sloot, H.A., van der Wegen, G.J.L., Hoede, D. & De Groot, G.J. (1994), Intercomparison of leaching tests for stabilized materials. Netherlands Energy Research Foundation (ECN). Report ECN-C-94-062. 35 s.

LIUKOISUUSTULOKSIA

Tiivistämisen ja koekappaleiden lujittumisajan vaikutus liukoisuuteen.
Tulokset mg/m².

Koekappale (suluissa rikinpoisto- tuotteen osuus)	Tiiviys	Lujittu- misaika	Sulfaatti (SO ₄)		Kloridi (Cl)		Molybdeeni (Mo)	
			16vrk	64 vrk	16 vrk	64 vrk	16 vrk	64 vrk
RPT1 (30 %) *)	88 %	1 kk	24 700	70 200	179 000	201 000	18	33
	89 %	6 kk	52 000	141 000	181 000	207 000	18	33
	86 %	1 kk	16 300		143 000		13	
	86 %	6 kk	52 000		157 000			
	80 %	1 kk	21 300		131 000		14	
	80 %	6 kk	58 000		160 000		18	
RPT1 (10 %) *)	91 %	1 kk	51 900	120 000	84 000	96 000	24	44
	92 %	6 kk	92 900	198 000	82 100	98 000	23	45
	90 %	1 kk	39 000		63 000		27	
	90 %	6 kk	87 000		75 000		26	
	82 %	1 kk	60 000		73 000		30	
	82 %	6 kk	79 000		59 000		28	
Hollantilaiset sijoituskriteerit **):								
Ryhmä IA				27 000		18 000		14
Ryhmä IB				80 000		54 000		48
(Ryhmä 2)				200 000		150 000		95

*) Seoksessa käytetty seoslentotuhkaa ja rikinpoistotuotetta RPT1

***) Ryhmä 1A: sijoitus eristämättömänä pysyvästi kosteaan sijoituskohteeseen.
Ryhmä 1B: sijoitus eristämättömänä ajoittain kosteaan sijoituskohteeseen.
Ryhmä 2: sijoitus eristettynä.

*Sulfaatin, kloridin ja molybdeenin liukoisuudet Suomenojan koekohteesta pora-
tuista näytteistä. Tulokset on ilmoitettu mg:ina/m². Taulukkoon on myös koottu
vertailua varten tuloksia laboratoriokoekappaleista tehdyistä diffuusiotesteistä.*

Lohko (näytekerros) Massojen koostumus	Näyte otettu (ikä)	Sulfaatti (SO ₄)		Kloridi (Cl)		Molybdeeni (Mo)	
		16 vrk	64 vrk	16 vrk	64 vrk	16 vrk	64 vrk
Kantava kerros: Salmisaaren lentotuhka	1995 (1 v)	144 000*)	275 000	5 500 *)	6 300	24*)	
	1997 (3 v)	90 200	163 000	10 000	10 800	17	24
Lohko I: Martinlaakson lentotuhka ja rikinpoistotuote (seossuhde 70/30). RPT:n kloridipit. 1–2 %	1995	161 000*)	287 000	45 600 *)	47 700	18*)	22
	1997	77 800	141 000	22 500	23 100	23	29
Lohko II: Martinlaakson lentotuhka ja rikinpoistotuote (seossuhde 50/50). RPT:n kloridipit. 1–2 %	1995	45 000*)	76 000	34 600	36 600	5*)	8
	1997	73 300	140 000	59 400	61 200	18	26
Lohko III: Hansaaren lentotuhka ja rikin- poistotuote (seossuhde 70/30). RPT:n kloridipit. 4–5 %	1995	51 800*)	92 600	36 300 *)	36 900	11*)	15
	1997	109 000	177 000	10 600	11 800	18	25
Lohko IV: Hansaaren lentotuhka ja rikin- poistotuote (seossuhde 70/30). RPT:n kloridipit. 4–5 %. Lisäaine mukana.	1997	51 700	103 000	47 500	51 300	11	16
Vertailu laboratoriokoekappaleisiin, joissa vaihtelevia määriä rikinpoistotuotetta							
100 % lentotuhkaa (taulukosta 2)	(1 kk)	9 300 (2 800- 15 000)	14 900	1 300 (260 - 1 300)	1 500	82 (37-82)	129
100 % lentotuhkaa (SIHTI- raportista)	(6 kk)	4 900		25 900		27	
5 % RPT (SIHTI-raportti s. 44- 47)	(1 kk)	37 900, 66 100		29 700, 39 700		20, 24	
10 % RPT (taulukosta 3)	(1 kk)	51 900 (38 800 - 59 800)	120 000	84 000 (63 400 - 84 000)	96 000	24 (24-30)	44
30 % RPT (taulukosta 2)	(1kk)	11 300 (19 000 - 42 000)	38 000	136 000 (98 000- 190 000)	175 000	11 (13-21)	23
30 % RPT (SIHTI-raportista)		23 000 - 3 000		150 000- 175 000		15-21	
50 % RPT (SIHTI-raportista)	(1 kk)	23 800		267 000		14	
Hollantilaiset sijoituskriteerit **):							
Ryhmä IA			27 000		18 000		14
Ryhmä IB			80 000		54 000		48
(Ryhmä 2)			200 000		150 000		95

*) testiaika 10 vrk.

***) Ryhmä 1A: sijoitus eristämättömänä pysyvästi kosteaan sijoituskohteeseen.

Ryhmä 1B: sijoitus eristämättömänä ajoittain kosteaan sijoituskohteeseen.

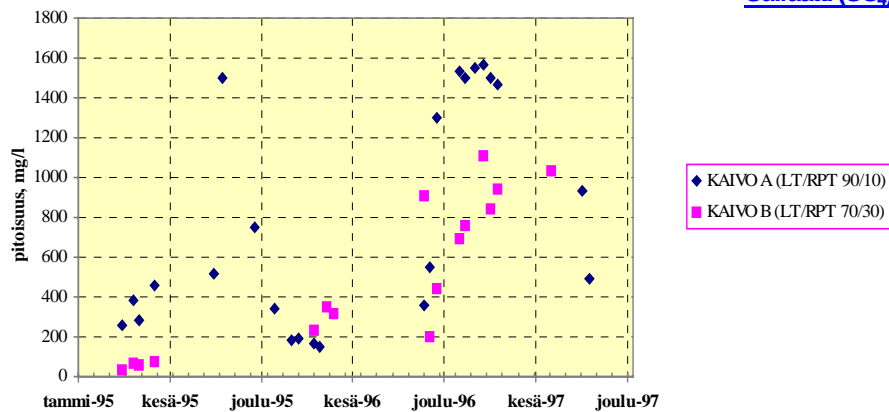
Ryhmä 2: sijoitus eristettynä.

LYSIMETRIEN SEURANTATULOKSIA

Vuosaaren koekohteen lysimetreihin vuosina 1995–1997 suotautuneisiin vesiin liuenneet kloridi, sulfaatti ja molybdeeni.

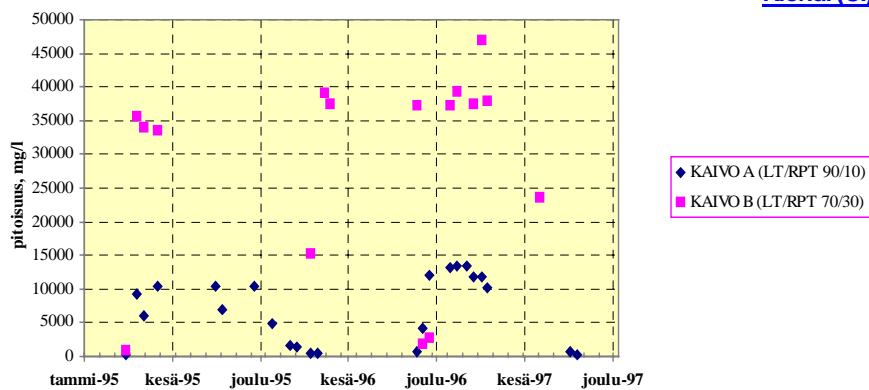
Vuosaaren lysimetrin kaivovedet 1995 – 1997

Sulfaatti (SO₄)



Vuosaaren lysimetrin kaivovedet 1995 – 1997

Kloridi (Cl)



Vuosaaren lysimetrin kaivovedet 1995 – 1997

Molybdeeni (Mo)

