

Vattenretentionsegenskaper hos askor

Kristian Hemström, Samir Ezziyani, David Bendz

Vattenretentionsegenskaper hos aska

Water retention properties of ashes

Kristian Hemström
Samir Ezziyani
David Bendz

Projektnummer
Q6-612

VÄRMEFORSK Service AB
101 53 STOCKHOLM · Tel 08-677 25 80
Maj 2009
ISSN 1653-1248

Abstract

I detta projekt har vattenretentionskurvor för fyra askor bestäms; ett slaggrus och en bottenaska från avfallsförbränning och två flygaskor från förbränning av biobränslen. Vattenretentionskurvan är en materialegenskap som beskriver materialets vattenhållande förmåga och potential för kapillärt upptag av vatten. Någon vattenretentionskurva för askor från förbränning av avfall eller biobränslen har oss veterligen inte presenterats tidigare trots att detta är en viktig parameter för att bl.a. förutsäga lakvattenbildning från bygg- och anläggningskonstruktioner och från deponerat avfall.

Sammanfattning

Ett materials vattenhållande egenskaper kan beskrivas av en så kallad vattenretentionskurva (även kallad pF kurva eller karakteristisk kurva). Denna materialegenskaps betydelse har hittills försumrats i avfalls- och restproduktsammanhang. Det finns ett angeläget behov av kunskap om de vattenhållande egenskaperna hos aska och restprodukter för att förbättra möjligheten att utföra ⁱ⁾bedömning av utlakning vid restproduktanvändning i bygg- och anläggningskonstruktioner, ⁱⁱ⁾dimensionering av täcksikt uppbyggda med restprodukter och ⁱⁱⁱ⁾bedömning av långtidsegenskaper hos deponerat avfall med avseende på lakvattenbildning, framförallt för stabiliserad aska av monolitiskt karaktär.

Syftet med föreliggande projekt är att öka kunskapen om askors vattenhållande egenskaper genom att med laborativa metoder bestämma vattenretentionskurvor för fyra askmaterial som har potential att användas i konstruktioner.

Inom projektet har fyra askor studerats; ett slaggrus från SYSAV, en åldrad bottenaska från Gärstadverket och två flygaskor från förbränning av biobränslen; en från SCA Ortviken och en från Jämtkraft AB. Som jämförelse presenteras även data från en siltjord som studerats i ett annat projekt. En vattenretentionskurva för ett specifikt material tas fram genom att fukt från det undersökta, sedan tidigare vattenmättade, provet avlägsnas under kontrollerade förhållanden i en tryckextraktionsapparat, s.k. övertryckskapillärimeter. Provet utsätts för övertryck i ökande grad vilket pressar ut överskottsvatten ur materialet. De utpressade vattenmängderna mäts för varje ökat trycksteg och den kvarvarande volumetriska vattenhalten i materialet kan beräknas. Resultaten från sådana mätningar presenteras i form av vattenretentionskurvor, där den volumetriska vattenhalten ritas som funktion av det kapillära trycket. Vattenretentionskurvorna visar hur olika material varierar i vatteninnehåll vid ett och samma tryck.

Resultaten från studien visade att askor har stor vattenhållande förmåga. Vidare visade studien att kornstorleksfördelning är en dålig indikator på vilka vattenhållande egenskaper man kan förvänta sig i bottenaskor; det studerade slaggrusets och bottenaskans vattenhållande egenskaper var betydligt större än naturmaterial med jämförbar kornstorleksfördelning. Detta beror förmodligen på att askpartiklarna är porösa, med en speciell struktur och sammansättning, vilket har stor betydelse för de vattenhållande egenskaperna. Vattenretentionsegenskaper för askor kunde bestämmas med hjälp av en övertryckskapillärimeter på ett tillfredställande sätt. För att förbättra bestämningen av den vattenhållande förmågan av bottenaskor och slaggrus är det emellertid angeläget att vidareutveckla testförfarandet och möjliggöra test av större partikelfraktioner än 2 mm, vilket var den övre gränsen i utförandet i denna studie.

De studerade flygaskorna uppvisade störst vattenhållande förmåga. Dessa askor var emellertid färska vid testutförandet och kan ha reagerat med tillsatt vattnet. En okänd del av den experimentellt bestämda vattenhalten vid olika tryck kan därför ha varit kemiskt bundet vatten. Hänsyn bör tas till detta om jämförelse av de vattenhållande

egenskaperna görs mellan de studerade färska flygaskorna och andra material. För att resultaten från de studerade flygaskorna ska få praktisk betydelse för dimensionering av konstruktioner kommer vattenretentionsegenskaperna för flygaskan från SCA Ortviken att bestämmas efter att askan härdats inom projekt *Säkra vägar i ett nytt klimat* (SGI diariernr 1-0712-0888).

Nyckelord: Vattenretentionskurva, pF-kurva, karakteristisk kurva, kapillär sugkraft, vattenhållande egenskaper, aska

Executive Summary

The water holding properties of a material can be described with a water retention curve (also called pF curve or characteristic curve). The importance of this material property has until now been neglected in waste and rest products contexts. There is an eminent need for knowledge of the water holding properties of ash and rest products in order to improve the possibility to perform ⁱ⁾ assessment of leaching from rest product used in constructions, ⁱⁱ⁾ dimensioning of covers built with rest products and ⁱⁱⁱ⁾ assessment of long term properties of land fill waste concerning leaching, especially for stabilized ash with a monolithic characteristics.

The aim of this project was to increase the knowledge of the water holding properties of ashes by determining water retention curves with laboratory methods on four ash materials with the potential to be used in constructions.

In the project, four ashes has been studied; one MSWI bottom ash from SYSAV, one aged MSWI bottom ash from Gärstadverket and two fly ashes from incineration of biofuels; one from SCA Ortviken and one from Jämtkraft AB. For comparison, data from a silt soil studied in another SGI project is presented. When determining a water retention curve for a specific material water from the examined, beforehand water saturated, sample is eliminated under controlled circumstances in a pressure plate extractor. The sample is exposed to a pressure, with increasing degree, squeezing excess water out of the material. The excess water is measured for each increased pressure step and the remaining volumetric water content in the material can be calculated. The results from such measurements are presented in water retention curves, in which the volumetric water content is plotted as a function of the capillary pressure. The water retention curves shows how various materials differ in water content at the same pressure.

The results from the study showed that ashes have great water holding capacity. The study also showed that particle size distribution is an inadequate indicator of what water holding properties that can be expected from bottom ashes; the studied MSWI bottom ashes' water holding properties were much greater than natural materials with comparable particle size distribution. This is probably due to the fact that the ash particles have a porous structure, and a special composition, which is of great importance for the water holding properties. The water retention properties of ashes could be determined with a pressure plate extractor in a satisfactory way. In order to improve the determination of the water holding properties of bottom ashes it would be of importance to develop the test procedure further in order to make it possible to test particle fractions larger than 2 mm, which was the upper limit in the test procedure used in this study.

Key words: Water retention curve, pF curve, water holding properties, capillary suction, ash

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	BAKGRUND	1
1.2	VATTENRETENTIONS-KURVAN	1
1.3	ANVÄNDNINGSSOMRÅDEN	3
1.4	BESKRIVNING AV FORSKNINGSSOMRÅDET	4
2	MATERIAL OCH METOD	5
2.1	STUDERADE ASKOR	5
2.2	PROVBEREDNING	6
2.3	BESTÄMNING AV VATTENRETENTIONSEGENS-KAPER	7
3	RESULTAT	12
3.1	KORNSTORLEKSFÖRDELNING	12
3.2	VATTENRETENTIONSEGENS-KAPER	15
4	RESULTATANALYS	19
5	SLUTSATSER	21
6	FÖRSLAG TILL FORTSATT FORSKNINGSSARBETE	22
7	LITTERATURREFERENSER	23

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Det finns ett stort behov av att kunna beräkna vattentransport i avfall och restprodukter under omättade förhållanden, bl.a. för att optimera användningen av aska så att rätt material används på rätt plats. Vid dimensionering och design av askkonstruktioner är materialets vattenhållande förmåga en viktig parameter, och kunskap om denna är viktigt för att kunna förutsäga lakvattenbildning och utlakning. Detta projekt är inriktat på att ta fram kunskap om en av de viktigaste materialparametrarna för omättad vattentransport hos avfall och restprodukter; vattenretentionskurvan. Vattenretentionskurvan (även kallad pF kurva eller karakteristisk kurva) beskriver materialets vattenhållande egenskaper och till skillnad mot kapillär stighöjd och fältkapacitet innehåller vattenretentionskurvan all information om ett materials potential för kapillärt upptag av vatten [33]. Kännedom om vattenretentionskurvan gör det t.ex. möjligt att beräkna den totala vattenhållande förmågan i en deponi genom att ta hänsyn till att det maximala kapillära upptaget varierar med avståndet till en grundvattenyta. Kunskaperna om olika avfalls vattenretentionsegenskaper och deras inverkan är emellertid mycket begränsade och hittills har de inte beaktats i någon större utsträckning. Baserat på experimentella data har empiriska modeller tagits fram för att beräkna vattenretentionskurvan utifrån en känd kornstorleksfördelning (se t.ex. [1] och [11] och referenser däri). De få undersökningar som har gjorts på rest- och byggprodukter indikerar emellertid att beräkningar utifrån kornstorleksfördelningen, baserat på erfarenheter från jordar med motsvarande kornstorleksfördelning, kan vara en dålig indikation på vilka vattenhållande egenskaper man kan förvänta sig hos dessa material [27][35]. De vattenhållande egenskaperna varierar mycket mellan olika material och kornen i t.ex. förbränningsaskor är porösa, med en speciell struktur och sammansättning vilket har stor betydelse för de vattenhållande egenskaperna.

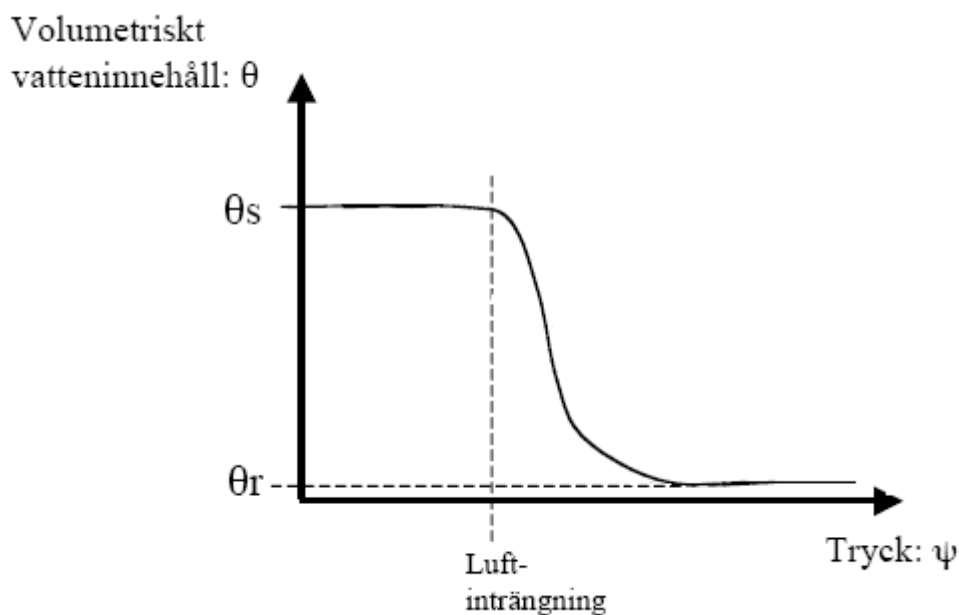
Tekniken för att bestämma vattenretentionskurva är känd sedan länge. Att bestämma ett materials vattenretentionskurva i laboratorium kräver emellertid speciell utrustning och är tidsödande, vilket delvis är anledningen till att så få mätningar har gjorts på avfall och restprodukter.

Syftet med föreliggande studie är att med laborativa metoder bestämma vattenretentionskurvor för fyra askor som har potential att användas i anläggningskonstruktioner; två bottenaskor från avfallsförbränning och två flygaskor från förbränning av biobränslen. I rapporten presenteras metoden och utrustningen som använts för bestämning av vattenretentionsegenskaper samt de framtagna vattenretentionskurvorna för de studerade askorna.

1.2 Vattenretentionskurvan

En vattenretentionskurva beskriver förhållandet mellan den volumetriska vattenhalten och porvattenundertrycket för ett specifikt material. Formen på vattenretentionskurvan reflekterar materialegenskaper som porositet, kornstorleksfördelning, innehåll av organiskt material m.m. Allt detta sammantaget påverkar den vattenhållande förmågan.

Vattenretentionskurvan kan bestämmas genom antingen uppfuktning eller avfuktning av ett materialprov. Kurvans form kan p.g.a. hysteresis variera något i utseende beroende på hur mätningen utförs. I föreliggande studie har vattenretentionskurvan bestämts genom avfuktning av materialprover. Vid bestämning genom avfuktning placeras ett vattenmättat materialprov i en tryckkammare där dess översida utsätts för stegvist ökande lufttryck. Lufttrycket pressar ut porvatten ur materialprovet. Det tryck som krävs för att tränga ut vattnet ur en specifik por visar hur hårt vattnet är bundet i materialet. Den kapillära sugkraften i en por minskar med radien på de individuella porerna. Volymen vatten som trängs ut mellan två trycksteg i tryckextraktorerna är ett mått på volymen av de porer med storlek motsvarande dessa tryck. Den kvarvarande vattenhalten i materialprovet vid de olika tryckstegen bestäms genom vägning. Det vatten som finns kvar i provet hålls av kapillära krafter som precis balanserar det porlufttryck som provet utsätts för. Resultaten från sådana mätningar presenteras i form av vattenretentionskurvor, där den volumetriska vattenhalten plottas som funktion av det kapillära trycket. Vattenretentionskurvorna visar hur de olika materialen varierar i vatteninnehåll vid ett och samma tryck. I Figur 1 visas ett exempel på en vattenretentionskurva bestämd genom avfuktning.



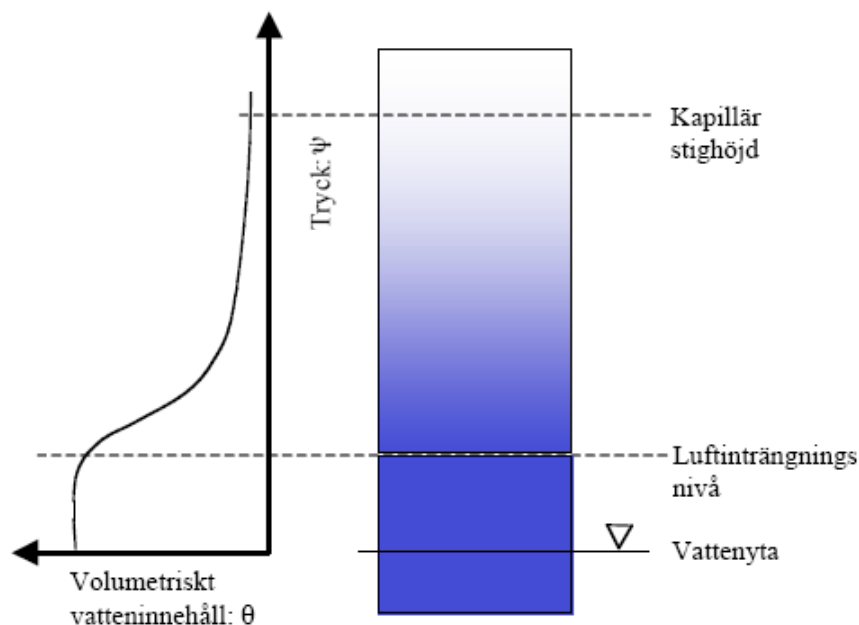
Figur 1. Exempel på en vattenretentionskurva bestämd genom avfuktning (efter Bendz [7]).

Figure 1. Example of a water retention curve (after Bendz [7]).

I figuren anger ψ det kapillära trycket, θ_s den mättade volumetriska vattenhalten, vilken är identisk med den effektiva porositeten. θ_r anger den kvarvarande volumetriska vattenhalten, vilket är den vattenhalt varunder en skillnad i porvattenundertrycket inte ger upphov till någon nämnvärd skillnad i vattenhalt. Luftinträngningspunkten är det porvattenundertryck där de största porerna börjar ta in luft vid en minskande vattenhalt. Luftinträngningsnivån är låg på ett grovkornigt material och hög på ett finkornigt. Lutningen på vattenretentionskurvan påverkas av materialets kornstorleksfördelning där

ett ensgraderat material har en brantare lutning än ett månggraderat material. Ju mer utdragen kurvan är desto högre är den kapillära stighöjden. Ju mer kurvan är förskjuten åt höger desto större är materialets vattenhållande förmåga.

I Figur 2 visas vilken punkt i vattenretentionskurvan som representerar den kapillära stighöjden i ett material.



Figur 2. Kapillär stighöjd och fördelning av vatten över djupet (efter Lu och Likos [33]).

Figure 2. Capillary rise and distribution of water with depth (after Lu and Likos [33]).

Grundvattenytan är den gräns under vilken vatten kan röra sig fritt utan att påverkas av kapillära krafter. Strax ovanför vattenytan finns en mättad zon som är påverkad av materialets kapillaritet. Höjden på denna zon motsvaras av den brytpunkt på vattenretentionskurvan där luft börjar tränga in och ersätta en del av vattnet (luftinträgningsnivån). Ovanför denna punkt avtar vatteninnehållet gradvis ned till θ_r (se Figur 1) vid en maximal kapillär stighöjd.

1.3 Användningsområden

Inom följande områden finns ett angeläget behov av kunskap om de vattenhållande egenskaperna hos avfall och restprodukter:

- Användning av aska i bygg- och anläggningskonstruktioner innebär att askan delvis är innesluten i en teknisk konstruktion vilket fördröjer exponeringen för vatten och den resulterande utlakningen av miljöstörande ämnen. I flera studier har behovet av att analysera hur vatten tar sig in i konstruktionen uppmärksamrats (se t.ex. [6]).

- Dimensionering av täckskikt uppbyggda med aska: Den omättade hydrauliska konduktiviteten och de vattenhållande egenskaperna styr täckskiktets funktion, d.v.s. andelen vatten som infiltrerar, magasineras, rinner av på ytan, avdunstar och som är tillgängligt för växter.
- Lakvattenbildning från deponerat avfall. Den omättade hydrauliska konduktiviteten, förekomsten av kanaler och sprickzoner och de vattenhållande egenskaperna styr fördelningen mellan vatten som magasineras i deponin respektive bildar lakvatten.
- Mängden vatten bundet i porerna påverkar andra materialegenskaper, som hållfasthet, packningsegenskaper och värmekonduktivitet [27]. Vattenretentionskurvorna kan därför användas för att uppskatta andra parametrar för det omättade materialet som beror av vatteninnehållet, som t ex (omättad-) hydraulisk konduktivitet och skjuvhållfasthet [33][45].

1.4 Beskrivning av forskningsområdet

Ett omfattande arbete har lagts ner på att undersöka tekniska och miljömässiga egenskaper hos enskilda restproduktmaterial – i ett internationellt perspektiv exemplifierat bl.a. av de återkommande WASCON-konferenserna med hundratals publicerade artiklar [44]. I Sverige har alternativa material för anläggningsbyggande studerats åtminstone sedan slutet av 1970-talet (se bl. a. [1][3][4][5][12][13][14][16][17][18][19][20][21][22][23][24][25][26][29][31][32][34][37][41])

Bestämning av vattenretentionsegenskaper hos aska har emellertid bara gjorts i undantagsfall. I Mudd [35] har en vattenretentionskurva för en kolaska presenterats, och denna kurva representerar en av de få publicerade studier som gjorts på typiska avfall. I Mudd [35] framgår tydligt kolaskans extrema vattenretentionsegenskaper vid jämförelse med vanlig jord med samma kornstorleksfördelning. Kolaskan har en betydligt högre vattenhållande förmåga än naturmaterialen. I Kazimoglu et al. [28] presenteras förslag på hur ett konventionellt testförfarande för bestämning av vattenretentionskurvor för naturmaterial kan modifieras för att bättre passa avfallsförbränningsaskor som har annorlunda partikel- och porstorleksfördelning. Någon vattenretentionskurva för avfallsförbränningsaskor har dock, oss veterligen, inte presenterats ännu. För konventionella byggmaterial finns däremot vattenretentionsdata tillgänglig (se t.ex. [27]). Även för naturliga jordar finns vattenretentionsdata väl dokumenterat. Som exempel kan nämnas UNSODA, en databas över omättade hydrauliska egenskaper hos jordar, där en mängd jordprover undersökts med avseende på bl.a. vattenretentionsegenskaper [36].

2 Material och metod

2.1 Studerade askor

Inom projektet har fyra askor studerats; ett slaggrus från SYSAV, en åldrad bottenaska från Gärstadverket, en flygaska från SCA Ortviken och en flygaska från Jämtkraft AB. För jämförelse med ett naturmaterial presenteras även data från en siltjord som studerats i ett annat SGI-projekt (SGI diarienumr 1-0508-0440) samt sand hämtad från jordkatalogen som ingår i modelleringsprogrammet HYDRUS [40].

2.1.1 Slaggrus från SYSAV

Slaggrus kallas den slutprodukt som återstår efter sortering och lagring av bottenaska från avfallsförbränning. Vid sorteringen avskiljs allt material med kornstorlek >50 mm samt magnetisk metall, icke-magnetiska metaller, plast och papper. Det slaggrus som testades i den här studien hade legat i ett upplag i minst 6 månader, men troligen närmare ett år.

Avfallsvärmeverkets linje 1 och 2 på SYSAV:s avfallsförbränningsanläggningar består av två identiska hetvattenpannor med rooster, P1 och P2. Kapaciteten är ca 13 t/h vardera och förbränning sker vid en temperatur på ca 1000 °C. Rökgasreningen på SYSAV:s avfallsförbränningsanläggningar består av flera steg med både torr och våt rening, innehållande bl.a. kväveoxidreduktion med ammoniak i vattenlösning, neutralisering av sura ämnen med släckt teknisk kalk, textilt spärrfilter samt ett skrubbersystem i fyra steg. Specifika driftsvärden på pannan då en viss bottenaska bildades kan ej fastställas.

2.1.2 Bottenaska från Gärstadverket

Bottenaskan producerades genom en grovsortering av bottenlagg från avfallsförbränning vid Gärstadverket år 1987 och användes för att anlägga en provväg i Nykvarn, Linköping. Slaggrus från vägen grävdes upp i schakt år 2003 och studerades bl.a. i *Värmeforskningsprojekt Q4 241* [8]. Ett samlingsprov från schakt 2 används i denna studie. Driftsvärden på pannan då askan togs från Gärstadverket är okända.

2.1.3 Flygaska från SCA Ortviken

Flygaskan från SCA Ortviken togs direkt efter elfilter, innan befuktning, från panna 1. Askans var torr och färsk då den skickades till SGI. Pannans driftsvärden vid provtagning visas i Tabell 1.

2.1.4 Flygaska från Jämtkraft AB

Flygaskan från Jämtkraft AB togs i stoftsändaren från elfiltret och var torr och färsk då den skickades till SGI. Pannans driftsvärden vid provtagning visas i Tabell 1.

Tabell 1. Driftsvärden på pannan då flygaskprover från SCA Ortviken och Jämtkraft AB togs.

Table 1. Operational values on the incineration plant when the fly ash samples from SCA Ortviken and Jämtkraft AB was taken.

	SCA Ortviken	Jämtkraft
Panna	Panna 1	Foster Wheeler compact CFB
Bränslemix	Bark 80 %, Fiber/bioslam 20 %, E05-olja för stödeldning	Bark 30 %, Grot 20 %, Spån 10 %, RT-flis 30 %, Torv 10 %
Lastkapacitet	80 % (34 MW)	90 % (113 MW)
Eldningstemp	ca 800 °C	ca 850 °C
Temp före elfilter	203 °C	–
Temp efter elfilter	–	137 °C
Reningstillsatser	Inga	25 % ammoniak 2500 l/dygn vid fullast (125 MW)

2.2 Provberedning

Slaggruset förvarades på SGI i 4 månader i rumstemperatur innan laboratorieprovningarna påbörjades. Den maximala partikelstorleken som kunde testas med avseende på vattenretentionsegenskaper var 2 mm med tillgänglig laboratorieutrustning, och partikelfraktioner > 2 mm sållades därför bort. Kornstorleksfördelningen på materialet < 2 mm bestämdes genom siktning på SGI:s jordlaboratorium. Bottenaskan har förvarats i rumstemperatur på SGI sedan den grävdes upp ur provvägen i Nykvarn år 2003. Bottenaskan provberedd på samma sätt som slaggruset. Neddelning av slaggruset och bottenaskan till lämpliga provmängder gjordes med hjälp av spaltneddelare.

Flygaskorna var färska och torra vid ankomst till SGI och förvarades i kylrum i 4-5 månader innan laboratorieprovningarna påbörjades. De var så finpartikulära att de inte behövde sållas. Kornstorleksfördelning, specifik yta och densitet på flygaskorna bestämdes på CEMENTA Research. Kornstorleksfördelningen bestämdes genom laserdiffraction och den specifika ytan med Blaine's metod. Med denna metod bestäms den specifika ytan hos ett pulverformigt material. Metoden är baserad på det samband som råder mellan en materialbädds luftgenomströmningsmotstånd och den totala ytan av de korn som bildar bädden. Denna yta kallas Blaine och uttrycks i m²/kg. Slaggruset och bottenaskan var för grovkorniga för att testas med Blaine's metod och analyserades inte med avseende på specifik yta. Den totala specifika ytan (BET) och interpartikulär porositet för SYSAVs slaggrus har bestämts i *Värmeforskningsprojekt Q4-215* [9] och motsvarande data för ett danskt slaggrus finns rapporterat i Bendz et al. [10].

Vattenretentionskurvor bestämdes på de färska, ohärdade, bioflygaskorna. För att resultaten från de studerade flygaskorna ska få praktisk betydelse för dimensionering av konstruktioner kommer vattenretentionsegenskaperna för flygaskan från SCA Ortviken att bestämmas inom projekt *Säkra vägar i ett nytt klimat* (SGI diariernr 1-0712-0888) efter att askan åldrats och härdats.

2.3 Bestämning av vattenretentionsegenskaper

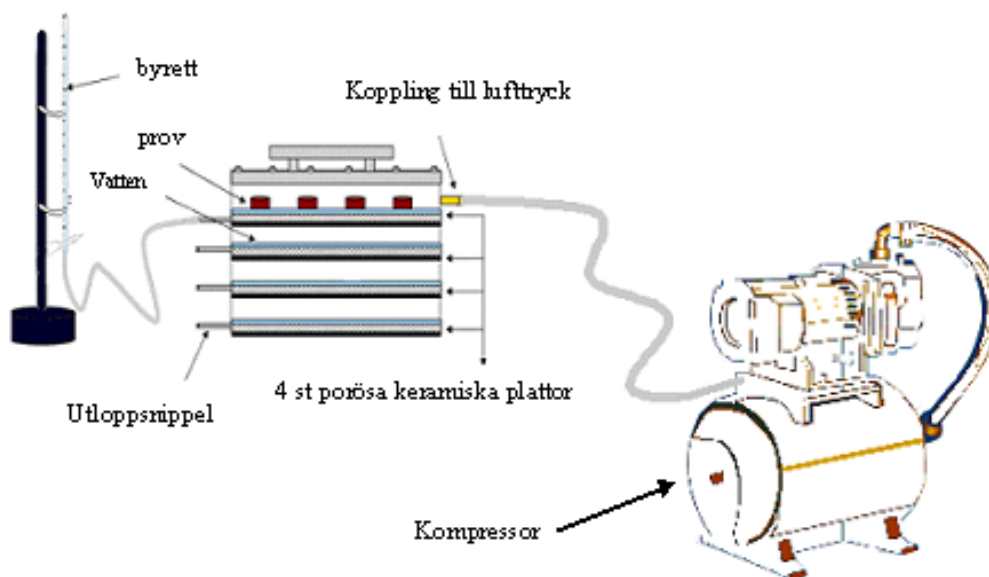
2.3.1 Metodbeskrivning

Apparaturen för att ta fram en vattenretentionskurva för ett specifikt material inkluderar porösa keramiska plattor eller cellulosamembran och tryckextraktionsapparater som under kontrollerade förhållanden avlägsnar fukt från de undersökta proverna. Under testförfarandet är materialets partiklar i kontakt med den keramiska plattan/cellulosa membranet inne i extraktionsapparaten. Både plattorna och materialet är vattenmättade vid försökets start. Materialet utsätts sedan för övertryck i ökande grad inne i extraktionskammaren vilket pressar ut överskottsvatten ur materialproverna genom den keramiska plattans/cellulosamembranets mikroskopiska porer. De utpressade vattenmängderna mäts för varje ökat trycksteg och det kvarvarande volumetriska vatteninnehållet i materialet kan beräknas.

Utförandet vid den laborativa studien har följt beskrivningen i Nordtest metod NT BUILD 481[39]. Två olika extraktionsapparater användes. Den ena extraktionsapparaten tål högst 150 m vattenpelare (vp) och den andra tål upp till 1000 m vp. Till 150 m vp apparaten används porösa keramiska plattorna som tål olika mycket övertryck beroende på porerna i plattans storlek. Ju mindre porer plattan har desto större övertryck krävs för att pressa ut vattnet igenom dessa. Till 1000 m vp extraktorn används ett membran som är tillverkad av cellulosa. Det kan användas från 150 m vp till 1000 m vp. De olika extraktionsapparaterna, < 150 m vp och < 1000 m vp, fungerar enligt samma princip.

2.3.1.1 Mättnad av de keramiska plattorna och cellulosamembranet

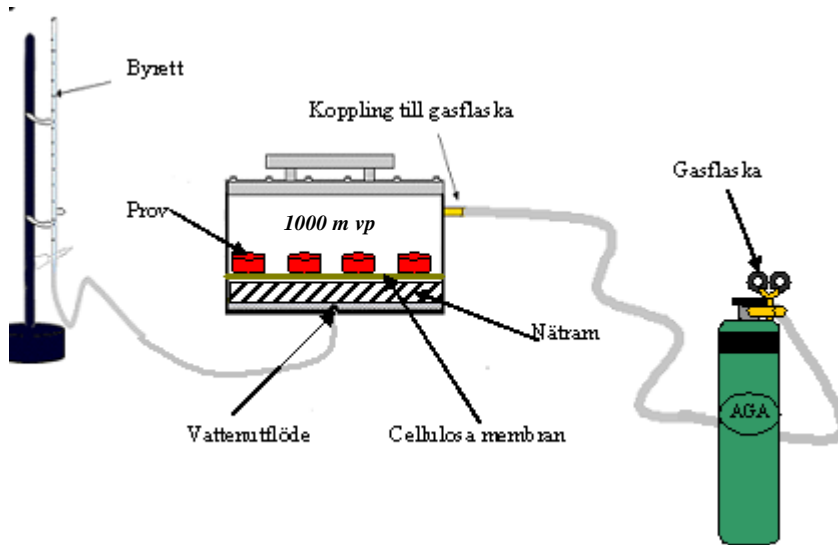
Vid vattenmättnad av de keramiska plattorna dränktes dessa först i destillerat vatten under några timmar för att absorbera vatten och placerades sedan i extraktionskammaren. Ett rör kopplades från plattan till extraktionskammarens utloppsnippel som är i sin tur kopplad till en byrett (se Figur 3).



Figur 3. Schematisk bild över extraktionsapparaten med keramiska plattor (<150 m vp).

Figure 3. Schematic picture of the extraction apparatus with ceramic plates (<150 m).

När allt var på plats hölls destillerat vatten över den dränkta plattan så att hela ytan täcktes. Sedan stängdes extraktionsapparaten och extraktionskammaren trycksattes med hjälp av en kompressor; med 10 m vp om 10 m vp-plattan används och med 30 m vp om 30 m vp-plattan används osv. Vid trycksättning utsätts den ena sidan av den keramiska plattan för ett övertryck, medan den andra sidan alltid har atmosfärtryck. Detta medför en tryckskillnad på den keramiska plattan och mättnadsprocessen av plattans porer startar. När vattennivån i byretten är konstant är hela systemet i jämvikt vilket indikerar att plattans porer är vattenmättade. När jämvikt är uppnådd kan övertrycket ur kammaren släppas ut och kammarlocket avlägsnades. Om vattenretentionstester inte ska utföras omedelbart efter att vattenmättnad av den keramiska plattan uppnåtts bör plattan snabbt tas ut och plastas in så att vattenmättnaden bevaras. Att vattenmätta de keramiska plattorna tog ca 8-14 h. Cellulosamembranet som används i 1000 m vp extraktionsapparaten vattenmättades på < 10 min genom att dränkas med vatten. I Figur 4 visas en schematisk bild över 1000 m vp extraktionsapparatus uppbyggnad.



Figur 4. Schematisk beskrivning på 1000 m vp extraktionsapparaten.

Figure 4. Schematic picture of the 1000 m extraction apparatus.

2.3.1.2 Vattenretentionsstudier

Efter att de keramiska plattorna eller cellulosa membranet är vattenmättade kan försöken på de studerade materialen påbörjas. Ett dubbelprov av varje materialtyp packades (löspackning) i en ring med en höjd på 10 mm och en diameter på 50 mm (se Figur 5). Volymen på provkroppen är densamma i alla utförda tester men massan material i provkroppen varierar och beror på materialets densitet och packningsgrad. I dubbelproverna av samma material var massan emellertid densamma mellan replikaten.



Figur 5. Bild på ett packat prov.

Figure 5. Picture of a packed sample.

Ett antal provringar packades för varje material; ett dubbelprov för varje undersökt trycksteg, och ett dubbelprov för bestämning av den mättade volumetriska vattenhalten (θ_s). Efter packning placerades proverna på en vattenmättad keramiska platta eller vattenmättat cellulosafilter i extraktionskammaren (se Figur 3 och Figur 4). Plattan/filtret fylls därefter med destillerat vatten så att proverna och provringarna täcks till ungefär hälften. Proverna fick sedan stå i vatten under några timmar tills konstant vikt uppnåts och proverna därmed var vattenmättade (se Figur 6). Påpekas bör emellertid att det kan vara svårt att bli av med all porluft i materialen och det är därför inte säkert att 100 % vattenmättnad uppnåddes. Efter vattenmättnad avlägsnades överskottsvattnet från plattans yta med hjälp av en pipett. Därefter stängdes extraktionsapparaten och extraktionskammaren trycksattes med ett givet övertryck. Beroende på vilket tryck som testas används olika keramiska plattor (10, 30, 50 eller 150 m vp). Endast ett tryck kan testas åt gången och testförfarandet måste därför upprepas för de olika studerade övertrycken. I föreliggande studie testades samtliga material med 1; 10; 30; 50; 150 och 1000 m vp övertryck. Vid 1 m vp användes den keramiska plattan avsedd för 10 m vp övertryck. Vid trycksättning pressas överskottsvatten ur proverna och försöket pågick tills vattennivån i byretten var konstant. Hela systemet är då i hydraulisk jämvikt vid det givna övertrycket. Jämvikt uppnås inom ungefär ett dygns trycksättning vid höga tryck. Vid låga tryck kan det emellertid ta dagar eller veckor att uppnå jämvikt. Även provets höjd (10 mm i föreliggande studie) är en avgörande faktor när det gäller hur lång tid det tar att nå jämvikt.



Figur 6. Vattenmättnad av prover i 150 m vp extraktorn.

Figure 6. Water saturation of samples in the 150 m extraction chamber.

Då jämvikt uppnåts avslutades försöken och övertrycket i kammaren släpptes ut och proverna vägdes. Därefter torkades proverna vid 105°C i 24 timmar varefter det torra provet vägdes. Det kvarvarande vatteninnehållet (volumetriskt) i proverna vid det specifika övertrycket användes sedan för att beräkna den volumetriska vattenhalten enligt ekvation 1. Vattenretentionskurvor ritades sedan för varje studerat material genom att de volumetriska vattenhalterna, bestämda vid 1; 10; 30; 50; 150 och 1000 m vp, ritades som funktion av det kapillära trycket. Vattenretentionskurvorna visar hur de olika materialen varierar i vattenhalt vid ett och samma tryck.

$$\theta = \frac{V_w}{V_r} = \frac{m_i - m_d}{V_r \times \rho_w} \quad (1)$$

där

θ = den volumetriska vattenhalten vid ett visst tryck

V_w = volymen för det vattnet som materialet kvarhåller vid ett visst tryck

V_r = materialets volym

m_i = materialets våtvikt vid ett visst tryck

m_d = materialets torrsvikt vid ett visst tryck

ρ_w = vattendensitet

2.3.2 Vattenretentionsmodell

Till experimentellt erhållna data anpassas ofta analytiska vattenretentionsmodeller (matematiska formler) och modellernas anpassade parametervärden används sedan för att beskriva materialets vattenretentionsegenskaper. I denna studie användes vattenretentionsmodellen som beskrivs i Van Genuchten [43] och som är en av de vanligaste. Det finns emellertid ett flertal andra modeller för beskrivning av vattenretentionsegenskaper och en sammanställning av ett flertal av dessa finns i Fredlund och Xing [15].

Van Genuchten [43] använde en statistisk modell över porstorleksfördelningen för att beskriva materialets vattenretentionsegenskaper och presenterade följande samband:

$$\theta(h) = \theta_r + \left[\frac{\theta_s - \theta_r}{1 + |\alpha\psi|^n} \right]^{1/m} \quad \text{gäller för } \psi < 0$$

där

θ_r och θ_s är den kvarvarande respektive den mättade volumetriska vattenhalten (m^3/m^3) (se även Figur 1), ψ är det kapillära trycket (m), α är nära besläktat med porvattenundertrycket då luft tränger in (m^{-1}). Parametern m är relaterad till symmetrin hos vattenretentionskurvan. Vid användning av Van Genuchters ekvation för att beräkna den omättade hydrauliska konduktiviteten förhåller sig m till n enligt:

$$m = 1 - 1/n \quad n > 1$$

där n är en parameter som reflekterar porstorleksfördelningen.

3 Resultat

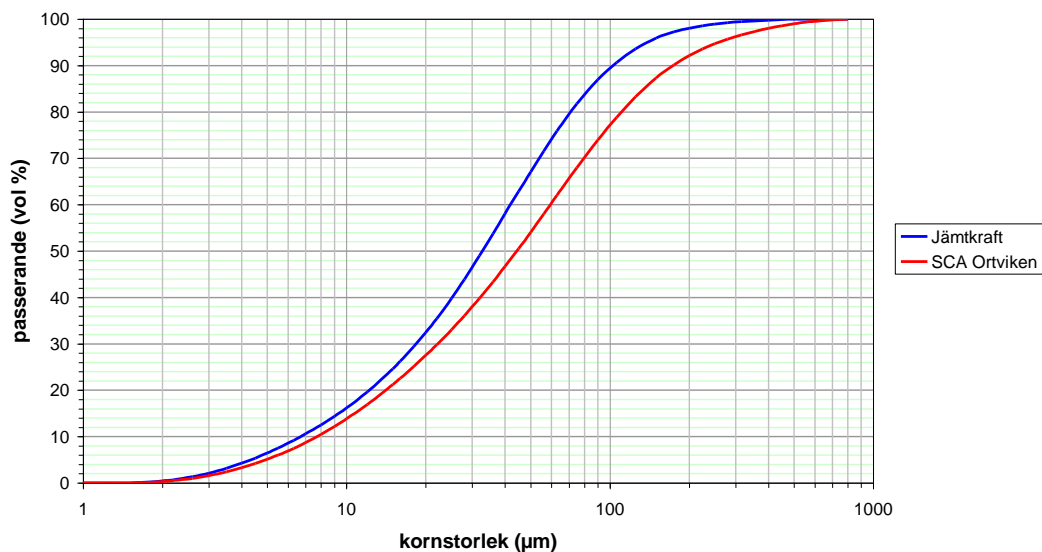
3.1 Kornstorleksfördelning

I Tabell 2 visas densitet och specifik yta (Blaine) för de färskas flygaskorna från Jämtkraft respektive SCA Ortviken. I Figur 7 visas kornstorleksfördelningen för samma askor och i Figur 8 visas kornstorleksfördelningen för silt från Fagervik bestämd i ett annat SGI-projekt (SGI diariernr 1-0508-0440).

Tabell 2. Korndensitet och specifik yta (Blaine) bestämd på flygaskorna från Jämtkraft och SCA Ortviken.

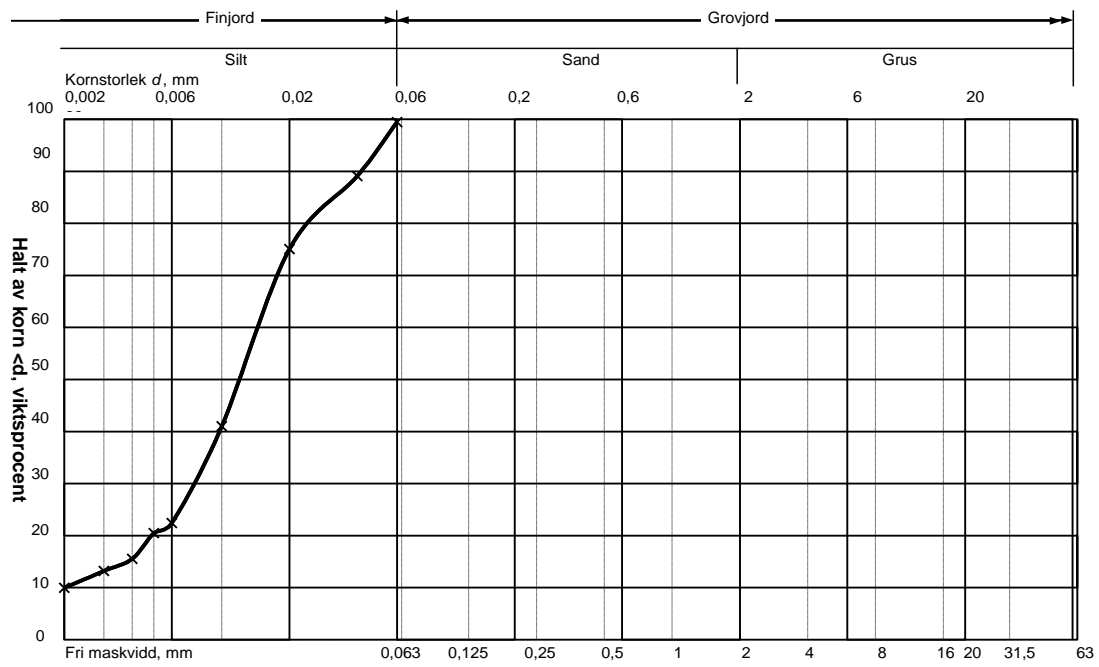
Table 2. Density and specific surface (Blaine) determined on the fly ashes from Jämtkraft and from SCA Ortviken.

	Flygaska Jämtkraft	Flygaska SCA Ortviken
Korndensitet: g/cm ³	2,71	2,91
Specifik yta (Blaine): m ² /kg	562	430



Figur 7. Kornstorleksfördelning av flygaskorna från Jämtkraft och SCA Ortviken bestämd genom laserdiffraktion.

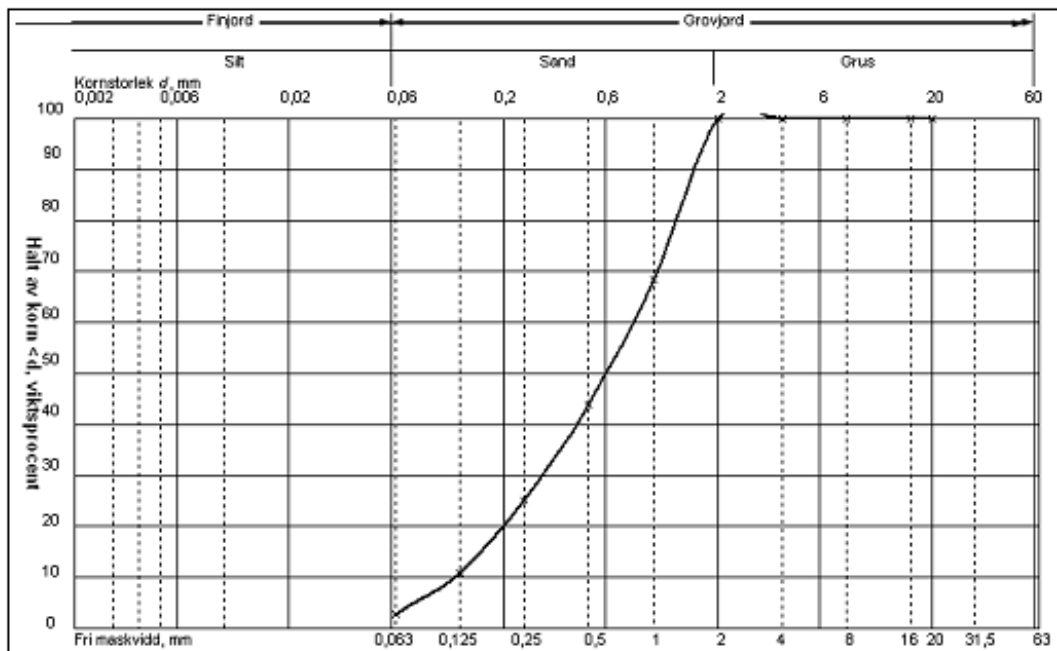
Figure 7. Particle size distribution of the fly ashes from Jämtkraft and from SCA Ortviken determined with laser diffraction.



Figur 8. Kornstorleksfördelning av silt från Fagervik bestämd genom siktning (SGI diariern I-0508-0440).

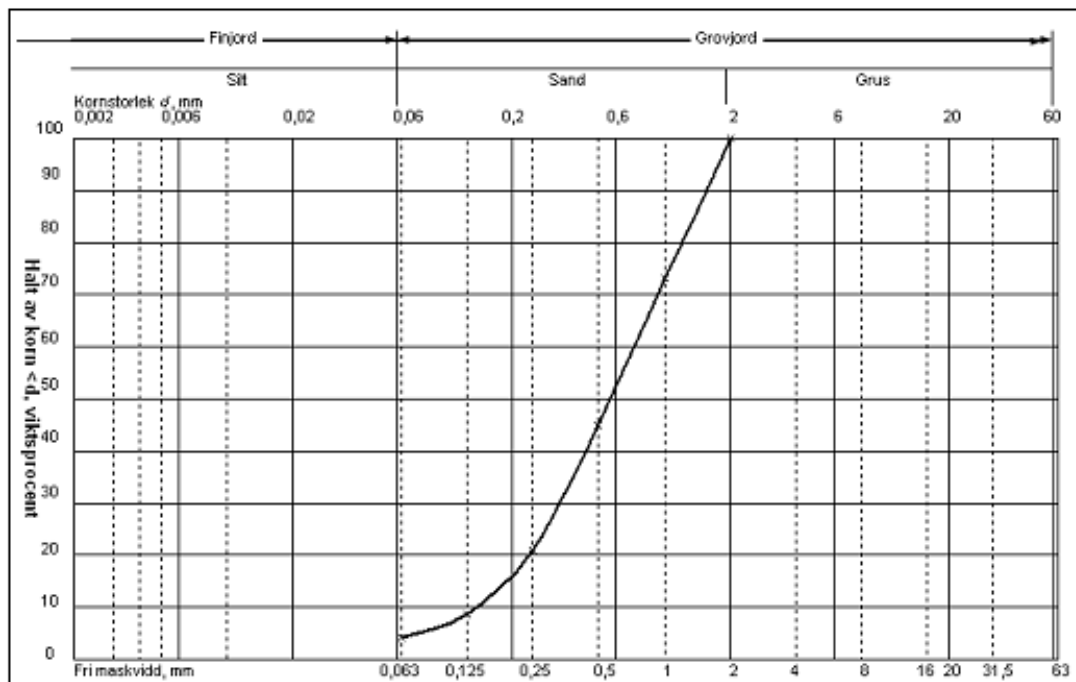
Figure 8. Particle size distribution of silt soil from Fagervik determined through sieving.

I Figur 9 och Figur 10 visas kornstorleksfördelningen för fraktionen < 2 mm av slaggruset från SYSAV samt från bottenaskan från Gärstadverket.



Figur 9. Kornstorleksfördelning av slaggrus från SYSAV bestämd genom siktning av partikelfraktioner < 2 mm.

Figure 9. Particle size distribution of MSWI bottom ash from SYSAV determined through sieving of particle fractions < 2 mm.



Figur 10. Kornstorleksfördelning av bottenaska från Gärstadverket bestämd genom siktning av partikelfraktioner <math>< 2</math> mm.

Figure 10. Particle size distribution of MSWI bottom ash from Gärstadverket determined through sieving of particle fractions <math>< 2</math> mm.

3.2 Vattenretentionsegenskaper

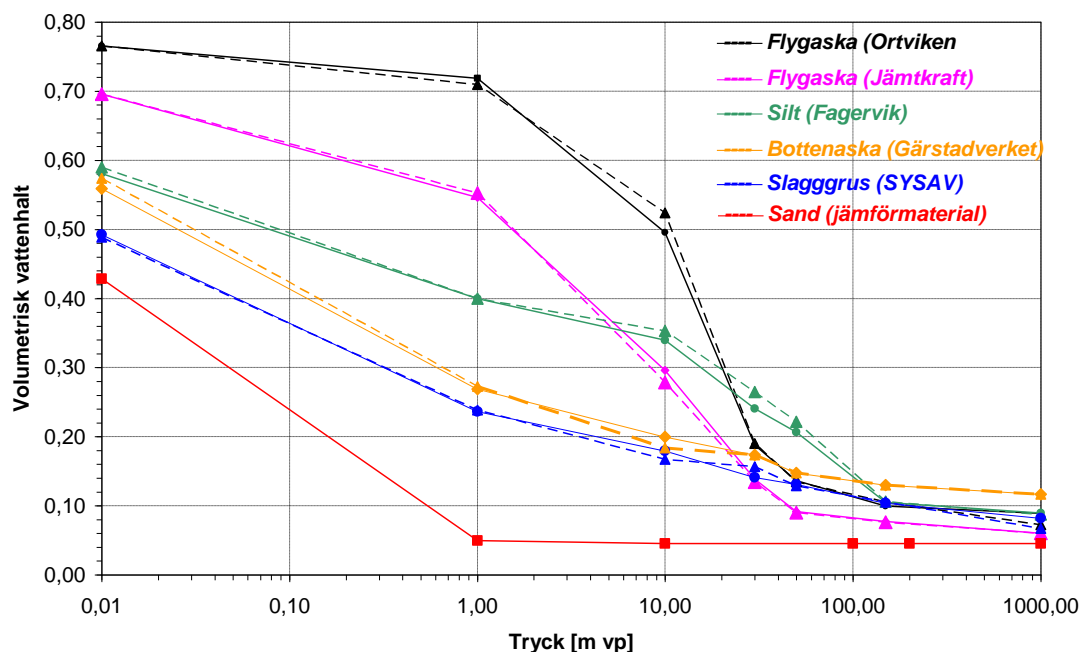
I Tabell 3 visas torrdensiteten av de undersökta askorna vid bestämning av vattenretentionsegenskaper.

Tabell 3. Torrdensitet av de undersökta askorna.

Table 3. Dry density of the studied ashes.

	Slaggrus SYSAV	Bottenaska Gärstadverket	Flygaska Jämtkraft	Flytgaska SCA Ortviken
Torrdensitet: g/cm^3	1,11	0,78	0,64	0,76

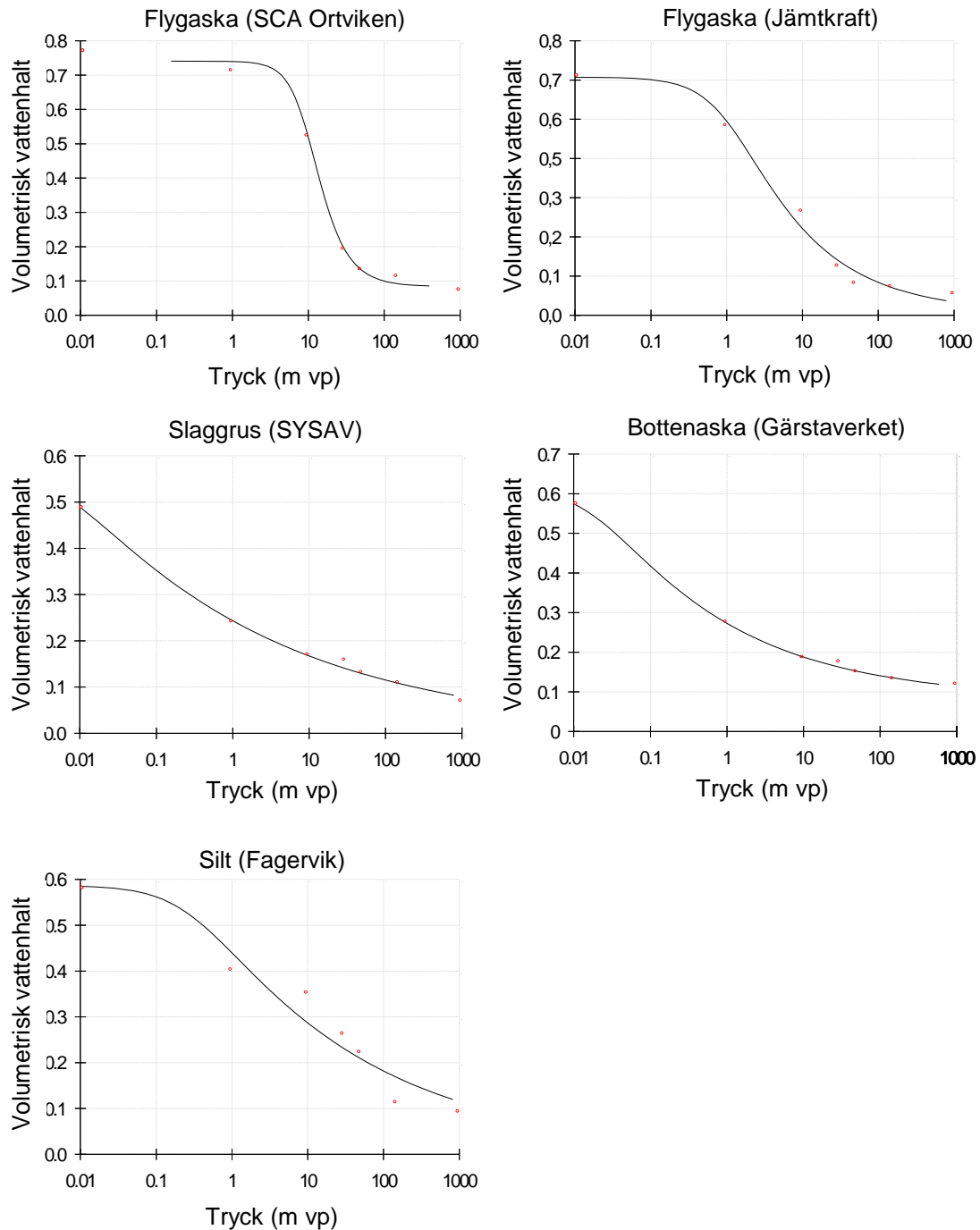
I Figur 11 visas experimentellt framtagna vattenretentionskuvorna bestämda utifrån det kvarvarande vatteninnehållet i materialen vid 1; 10; 30; 50; 150 och 1000 m vp övertryck, för de undersökta restprodukterna samt för siltjorden som studerats i ett annat SGI-projekt (SGI diari nr 1-0508-0440). För jämförelse visas även data från sand hämtad från jordkatalogen som ingår i modelleringsprogrammet HYDRUS [40].



Figur 11. Experimentellt bestämd vattenretentionskurva för färsk flygaska från SCA Ortvisen och från Jämtkraft, slaggrus från SYSAV, bottenaska från Gärstadverket samt för silt från Fagervik. Dubbelprover utfördes på varje material och resultaten från båda proverna visas i diagrammet (streckad respektive heldragen linje). I diagrammet visas även jämförvärden för sand. Värdena vid 0,01 m vp har ej bestämts i studien utan avser här den mättade volumetriska vattenhalten (θ_s). En del av flygaskornas vattenhalt kan vara kemiskt bundet, och inte kapillärt vatten eftersom dessa askor var fräska vid testutförandet och kan ha reagerat med tillsatt vatten.

Figure 11. Experimentally determined water retention curves of fresh fly ash samples from SCA Ortvisen and from Jämtkraft, of MSWI bottom ashes from SYSAV and from Gärstadverket and of silt soil from Fagervik. Duplicate samples were tested on each material and the results from both samples are shown in the diagram. In the diagram values for a typical sand is shown for comparison. The water content at 0,01 m vp has not been determined in this study but show the saturated volumetric water content (θ_s). Part of the fly ashes' water content might be chemically bound, and not capillary, water since the fly ashes were fresh when the tests were performed and might have reacted with added water.

I Figur 12 visas vattenretentionskurvor för de undersökta restprodukterna samt för ett siltprov bestämda genom anpassning av analytisk vattenretentionsmodell till de experimentellt framtagna data enligt Van Genuchten [43]. Det lägsta tryck som testades i studien var 1 m vp. Punkter vid lägre tryck hade behövts för att få en bra kurvanpassning till experimentella data; för alla material utom flygaskan från SCA Ortvisen blev kurvan en i princip rakt sluttande linje. För att förbättra modellenpassningen användes den mättade volumetriska vattenhalten (θ_s) som värde vid 0,01 m vp.



Figur 12. Vattenretentionskurva för färsk flygaska från SCA Ortviken och från Jämtkraft, för slaggrus från SYSAV, för bottenaska från Gärstaverket samt silt från Fagervik bestämd experimentellt (o) (medelvärde, $n=2$) samt genom anpassning av analytisk vattenretentionsmodell (–) enligt Van Genuchten [43]. Den volumetriska vattenhalten vid 0,01 m vp har ej bestämts i studien, utan den mättade vattenhalten (θ_s) användes istället. En del av flygaskornas vattenhalt kan vara kemiskt bundet, och inte kapillärt, vatten eftersom dessa askor var färska vid testutförandet och kan ha reagerat med tillsatt vatten.

Figure 12. Water retention curves of fresh fly ash samples from SCA Ortviken and from Jämtkraft, of MSWI bottom ashes from SYSAV and from Gärstadverket and of silt soil from Fagervik determined experimentally (\circ) (mean values, $n=2$) and by fitting of an analytical water retention model (–) to the experimental data in accordance to Van Genuchten [43]. The water content at 0,01 m has not been determined in this study but show the saturated volumetric water content (θ_s). Part of the fly ashes' water content might be chemically bound, and not capillary, water since the fly ashes were fresh when the tests were performed and might have reacted with added water.

Brytpunkten för luftinträning kom vid högst tryck i flygaskan från SCA Ortviken (Figur 12).

I Tabell 4 visas värdena på de modellparametrar som använts i anpassningen i Figur 12.

Tabell 4. Modellparametrarna θ_r , θ_s , α , och n bestämda enligt Van Genuchten [43].

Table 4. The model parameters θ_r , θ_s , α , and n determined in accordance to Van Genuchten [43].

	θ_r (m ³ /m ³)	θ_s (m ³ /m ³)	α ¹⁾ (1/m)	n ¹⁾	R ²
Slaggrus SYSAV	0,01	0,50	40,21	1,19	0,99
Bottenaska Gärstadverket	0,11	0,57	16,04	1,35	1,00
Flygaska Jämtkraft	0,01	0,70	0,97	1,45	0,99
Flygaska SCA Ortviken	0,08	0,77	0,10	2,64	1,00
Silt	0,08	0,59	3,81	1,20	0,94

¹⁾ Kalibrerade med RETC [42]

4 Resultatanalys

Det har gjorts ett antal studier på naturliga material och byggprodukter med avseende på vattenhållande egenskaper, men väldigt få studier på restprodukter. Askors vattenhållande egenskaper kan emellertid skilja sig kraftigt från andra material med samma kornstorleksfördelning p.g.a. att askkornen har annorlunda struktur och sammansättning.

Kornstorleksfördelningen på de undersökta fraktionerna av slaggruset och bottenaskan kan jämföras med sand (0,063-2 mm), med ett par viktprocent av vardera material < 0,063 mm (Figur 9 och Figur 10). De studerade flygaskorna var mer grovpartikulära än siltjorden från Fagervik, med en relativt stor andel > 0,063 mm (Figur 7 och Figur 8).

Flygaskan från Jämtkraft var mer finpartikulär och hade större specifik yta än flygaskan från SCA Ortviken (Figur 7 och Tabell 2). Den vattenhållande förmågan var emellertid större i flygaskan från SCA Ortviken (Figur 11). Flygaskorna hade störst vattenhållande förmåga av alla studerade material enligt de experimentellt framtagna vattenretentionskurvorna i Figur 11 (kurvan mer förskjuten åt höger). Eftersom dessa askor var färska vid testutförandet kan de emellertid ha reagerat med vatten och en okänd del av den kvarvarande vattenhalten vid olika tryck kan ha varit kemiskt bundet vatten. Hänsyn till detta behöver tas vid jämförelse med andra material.

De framtagna vattenretentionskurvorna visade att den vattenhållande förmågan var större i slaggruset och i bottenaskan än i sand med jämförbar kornstorleksfördelning, men lägre än i silt (se Figur 11). Anledningen till att slaggruset och bottenaskan har en högre vattenhållande förmåga än sand är förmodligen att deras specifika yta är stor och att askkornen är porösa. I Tabell 5 visas en jämförelse av specifik yta (BET), bestämd i Bendz et al. [10] och Maxe [38], mellan bottenaska och sand och grus vid olika partikelfraktioner. Partikelkornen i bottenaskan har betydligt större specifik yta vilket kan förklaras av att partiklarna i bottenaskan är porösa. Att bottenaskans kapillära sugkraft var större än ett naturmaterial med samma kornstorleksfördelning kan förklara att det i *Värmeforskprojekt Q4-241* [8] observerades en "horisontell" utlakning av lösliga ämnen från samma bottenaska i den provväg där den använts som förstärkningslager. Tydliga horisontella koncentrationsgradienter indikerade att den huvudsakliga transportmekanismen för lösta ämnen är diffusion och kapillär advektiv transport från vägens mitt ut mot vägens flanker.

Tabell 5. Specifik yta (BET) för en bottenaska från avfallsförbränning samt för naturmaterial vid olika partikelfraktioner. Värden för bottenaskan är hämtade från Bendz et al. [10] och värdena för sand och grus från Maxe [38].

Table 5. Specific surface (BET) for different particle fractions of a MSWI bottom ash and of natural materials. Values for MSWI bottom ash is taken from Bendz et al. [10] and values for sand are taken from Maxe [38].

Partikelfraktion [mm]	Specifik yta (BET) [m ² g ⁻¹]		
	Bottenaska	Sand och grus rostjord	Sand och grus C-horisont
8 – 11,8	3,249	-	-
4 – 8	4,941	-	-
2 – 4	6,318	-	-
1 – 2	15,49	1,23	1,02
0,5 – 1	15,49	2,00	1,27
0,25 – 0,5	17,45	2,80	1,47
0,125 – 0,25	20,31	4,17	1,71
0,045/0,074* – 0,125	25,71	6,04	2,08
<0,074	-	8,96	13,35

*0,045 mm avser bottenaskor och 0,074 mm sand & grus

Den karakteristiska S-formen på vattenretentionskurvorna (Figur 1) erhöles framförallt för flygaskan från SCA Ortviken, och till viss del för flygaskan från Jämtkraft och siltjorden (Figur 12). Brytpunkten för luftinträning i slaggruset och bottenaskan var förmodligen vid ett lägre tryck än 1 m vp vilket var det lägsta trycket som testades i denna studie. I framtida bestämningar av vattenretentionskurvor bör därför den vattenhållande förmågan bestämmas även vid 0,1 och 0,01 m vp.

5 Slutsatser

Vid genomgång av tillgänglig litteratur konstaterades att det finns en stor brist på kunskap om vattenhållande egenskaper hos olika avfall och restprodukter. Till skillnad mot vanliga parametrar som kapillär stighöjd och fältkapacitet, som t.ex. inte säger något om fukthaltens fördelning över djupet, kan all information om ett materials vattenhållande egenskaper erhållas genom bestämning av vattenretentionskurvor. Vattenretentionskurvan gör det möjligt att beräkna den totala vattenhållande förmågan över ett viss djup genom att ta hänsyn till att det maximala kapillära upptaget varierar med avståndet till en grundvattenyta eller annan vattenmättad zon.

Resultaten från denna studie visar att:

- Vattenretentionsegenskaper kan bestämmas för askor med hjälp av en övertryckskapillärimeter på ett tillfredställande sätt
- Askor har stor vattenhållande förmåga och hänsyn bör tas till detta vid dimensionering av konstruktioner.
- Kornstorleksfördelning är en dålig indikator på vilka vattenhållande egenskaper man kan förvänta sig i restprodukter; det studerade slaggrusets och bottenaskans vattenhållande förmåga var betydligt mycket större än naturmaterial med ungefär samma kornstorleksfördelning. Detta beror förmodligen på att askpartiklarnas är porösa, med en speciell struktur och stor specifik yta vilket har stor betydelse för de vattenhållande egenskaperna.

De studerade flygaskorna uppvisade störst vattenhållande förmåga. Dessa askor var emellertid färska vid testutförandet och kan ha reagerat med tillsatt vatten. En okänd del av den experimentellt bestämda vattenhalten vid olika tryck kan därför ha varit kemiskt bundet vatten. Hänsyn bör tas till detta om jämförelse av de vattenhållande egenskaperna görs mellan de studerade färska flygaskorna och andra material.

6 Förslag till fortsatt forskningsarbete

Metoden för att bestämma vattenretentionsegenskaper för askor med hjälp av en övertryckskapillärimeter har visat sig fungera på ett tillfredställande sätt. Det kvarstår ett behov av att:

- Bestämma vattenretentionskurvor på större provkroppar, framförallt för slaggrus och bottenaskor så att större partikelfraktioner än 2 mm kan testas.
- Bestämma vattenretentionskurvor vid olika packningsgrad och ned till 0,01 m tryck.
- Studera vattenretentionsegenskapernas förändring genom kemiska reaktioner i materialet över tiden. Hur snabbt ändras egenskaperna? Ger förändringarna generellt sett mer eller mindre genomsläppliga material? Kan någon generalitet fastställas?

För dimensionering av askkonstruktioner vore det värdefullt att:

- Studera och modellera tjäle, frys/tö-cykler i aska (med kända vattenhållande egenskaper) i en specifik tillämpning.
- Utföra modellsimuleringar av vattentransport i askkonstruktioner vid olika vattenretentionskurvor.
- Undersöka mättad och omättad hydraulisk konduktivitet för askmaterial.

7 Litteraturreferenser

- [1] Andersson, H., Arm, M., Carling, M., Schouenborg, B., *Provningsmetoder för alternativa material till vägbyggnad, undersökning av rostereldad kolbottenaska, slaggrus och krossad betong*, VTI, Linköping, 1999
- [2] Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussière, B., Chapuis, R.P., *A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties*, Canadian Geotechnical Journal, 4:1104-1122, 2003
- [3] Arell, L., *Sekundära ballastmaterial*, Lic.avhandling vid Avd för mark- och vattenresurser. TRITA-AMI LIC 2022. Inst för anläggning och miljö, KTH, Stockholm, 1997
- [4] Arm, M., *Egenskaper hos alternativa material – speciellt slaggrus, krossad betong och hyttsten*, Lic.avhandling, TRITA-AMI LIC 2063, Avdelningen för mark- och vattenresurslära, Institutionen för anläggning och miljö, KTH, Stockholm, 2000
- [5] Arm, M., *Mechanical properties of residues as unbound road materials*, TRITA-LWR PhD 1007, Department of land and water resources engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2003
- [6] Bendz, D., Flyhammar P., Hartlén, J., Elert, M., *Leaching from residues used in highway applications – a system analysis, I: Environmental Impact Assessment of Recycled Hazardous Waste Materials On Surface and Groundwaters: Chemodynamics, Toxicology, Modeling and Information System, Water Pollution Series*, (ISBN: 3-540-00268-5), Springer Verlag, 2004
- [7] Bendz, D., *Vattenretentionsegenskaper*, RVF:s Utvecklingsatsning, Rapport nr 7, 2005
- [8] Bendz D., Arm M., Flyhammar P., Westberg G., Sjöstrand K., Lyth M., Wik O., *Projekt Vändöra – En studie av långtidsegenskaper hos en väg anlagd med bottenaska från avfallsförbränning*, Värmeforsk Q4-241, 2006
- [9] Bendz, D., Jacobsson T., Svensson M., Flyhammar P., *Skumbitumenstabilisering av bottenaska från avfallsförbränning*, Värmeforsk Q4-215, rapport 975, 2006
- [10] Bendz, D., Tüchsen, P.L, Christensen, T.H., *The dissolution kinetics of major elements in municipal solid waste incineration bottom ash particles*, Journal of Contaminant Hydrology, 94:178-194, 2007
- [11] Campbell, G.S., *Soil physics with basic – Transport models for soil-plant systems*, Developments in soil science 14, Elsevier, Amsterdam, 1985
- [12] Evertsson, U., *Slaggrus som fyllnadsmaterial i terminalområden. Användning av alternativa material som fyllnings- och vägbyggnadsmaterial*, Seminarium, Lund 28-29 okt 1998, (Ed Sigfrid). AFR Rapport 276, Stockholm, 2000
- [13] Flyhammar, P., Bendz, D., *Delrapport I. Vatten- och masstransport i kantzonen av en vägkropp – Fält- och laboratiestudier*, ISRN LUTVDG/TVTGT-7026-SE, Avdelningen för Teknisk Geologi, LTH, 2003
- [14] Flyhammar, P., Bendz, D., Hartlén, J., *Emissioner från ballast- och fyllningsmaterial i vägkonstruktioner under en vägs livslängd – resultat och*

- erfarenheter från lysimeter- och fältförsök*, ISRN LUTVDG/TVTIG-7025-SE, Avdelningen för Teknisk Geologi, LTH, 2002
- [15] Fredlund D.G., Xing, A., *Equations for the soil-water characteristic curve*, Canadian Geotechnical Journal, 31(3): 521-532, 1994
- [16] Fällman, A-M., Hartlén, J., *Karakterisering och klassificering av avfall. Genomgång av olika länders system*, Rapport 4226, Naturvårdsverket, Stockholm, 1993
- [17] Fällman, A-M., Hartlén, J., *Kvalitetssäkring av sorterad bottenaska från avfallsförbränning*, FoU 108, Stiftelsen REFORSK, Malmö, 1994
- [18] Fällman, A-M., Johansson, L., *Provtagning och karakterisering av restprodukter*, Nordtest Techn Report 273, Espoo, Finland, 1995
- [19] Fällman, A-M., *Characterisation of residues - Release of contaminants from slags and ashes*, Linköping Studies in Science and Technology, Dissertation 486. Linköping University, Linköping, 1997
- [20] Fällman, A-M., Larsson, L., Rogbeck, J. *Slaggrus, Miljömässiga och materialtekniska egenskaper*, SVR, SGI, Malmö, Linköping, 1999
- [21] Hartlén, J., Elander, P., *Residues from waste incineration – chemical and physical properties*, SGI varia 172, SGI Linköping, 1986
- [22] Hartlén, J., Fällman, A-M., Back, P-E., Jones, C., *Principles for risk assessment of secondary materials in civil engineering work*, AFR-report 250, Naturvårdsverket, Stockholm, 1999
- [23] Håkansson, K., Nilsson, U., *National report for leaching tests for Sweden*, ALT-MAT,10/11/99, 1999
- [24] Höbeda, P., *Masugnsslagg som vägmaterial – en litteraturstudie*, Rapport 111, VTI, Linköping, 1976
- [25] Höbeda, P., Bünsöv, L., *Slagg från förbränning av hushållsavfall som vägmaterial*, VTI med. 180, VTI, Linköping, 1979
- [26] Jacobsson, T., Viman, L., *Provvägsförsök Gärstad -87, Slagger från kol- och sopförbränning*, VTI notat V80, VTI, Linköping, 1989
- [27] Janz, M., Johansson, B.F., *Measurement of the moisture storage capacity using sorption balance and pressure extractors*, Journal of Thermal Envelope and Building Science, 24(4): 316-334, 2001
- [28] Kazimoglu, Y.K., McDougall, J.R., Pyrah, I.C., *Moisture retention curve in landfilled waste*, I: Schanz, T (ed.), 2005, *Unsaturated soils: Experimental studies*, 93: 59-67, Springer proceedings in physics, Berlin, Germany, 2005
- [29] Kullberg S., *Slagganvändning – teknik och miljö*, SGI Varia 321, SGI, Linköping, 1990
- [30] Lind, B., Nilsson, U., *Inventering av alternativa material till naturgrus i Göteborgsregionen*, SGI rapport 2000-03-20; 2-0001-005, 2000
- [31] Lindgren, Å., *Laboratorieundersökningar av masugnsslagg*, Teknisk rapport 1992:09T, LuTH, Luleå, 1992
- [32] Lindgren, Å., *Road construction material as source of pollutants*, Thesis, Div of traffic engineering, Dept of Environmental Engineering, LuTH, Luleå, 1998

-
- [33] Lu N., Likos, W., *Unsaturated soil mechanics*, John Wiley & Sons, New Jersey, Usa, 556 p, 2004
- [34] Lundgren, T., Hartlén, J., *Slagg från avfallsförbränning*, Teknik och miljö. Reforsk, rapport 61, Malmö, 1991
- [35] Mudd G.M., *Solute transport modelling of Latrobe Valley ash disposal sites*, School of the Built Environment, Faculty of Engineering and Science, Victoria University, Australia, 328p, 2000
- [36] Nemes, A., Schaap, M.G., Leij, F.J., UNSODA Model, Version 2.0, The Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture's, 1999
- [37] Rogbeck, J., Elander, P., *Väg E4 Nyköpingsbro–Jönåker. Miljökonsekvenser vid användning av hyttsten*, SGI, Linköping, 1995
- [38] Maxe L., *Bestämning av markmaterialets specifika yta, resultat från svenska sand-, grus-, morän- och lerprofiler*, Institutionen för Mark- och Vattenteknik KTH, Rapport, Stockholm, 2003
- [39] Nordtest metod NT BUILD 481, projekt. 1267-96, ISSN 0283-7153, Espoo Finland
- [40] Simunek, J., Sejna, M., Van Genuchten, M.T., *HYDRUS, version 2*, US Salinity laboratory, Riverside, California, USA, 1999
- [41] SYSAV, *Utnyttjande av slagg från avfallsförbränning, Vägtekniska och miljömässiga undersökningar samt praktiska erfarenheter*, Reforsk, rapport 06, Malmö, 1986
- [42] Van Genuchten, M.T., Leij, F.J., Sejna, M., Simunek, J., *The RETC Code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils*, U.S Department of Agricultural Research Service. EPA/600/2-91/065, 1991
- [43] Van Genuchten M.T., *A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*, Soil Science Society of America Journal, 44, 892-898, 1980
- [44] Waste Materials in Construction: Proceedings of international conferences, Pergamon, ISCOWA ,1991, 1994, 1997, 2000, 2003
- [45] Öberg A-L., *Matrix Suction in Silt and Sand Slopes – Significance and Practical Use in Stability Analysis*, Avhandling, Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för Geoteknik, Göteborg, 1997

Värmeforsk är ett organ för industrisamverkan inom värmeknisk forskning och utveckling. Forskningsprogrammet är tillämpningsinriktat och fokuseras på energi- och processindustriernas behov och problem.

Bakom Värmeforsk står följande huvudmän:

- Elforsk
- Svenska Fjärrvärmeföreningen
- Skogsindustrin
- Övrig industri

VÄRMEFORSK SAMARBETAR MED
STATENS ENERGIMYNDIGHET

VÄRMEFORSK SERVICE AB

101 53 Stockholm

Tel 08-677 25 80

Fax 08-677 25 35

www.varmeforsk.se

Beställning av trycksaker

Fax 08-677 25 35