

Skrubberintegrerat vått elektrofilter, WESP

Sven Andersson, Linda Bäfver, Kent Davidsson,
Jens Pettersson, Hans Schmidt, Michael Strand
och Johan Yngvesson

Skrubberintegrerat vått elektrofilter, WESP

Scrubber-Integrated Wet Electrostatic Precipitator

Sven Andersson, Linda Bäfver, Kent Davidsson, Jens Pettersson, Hans Schmidt, Michael Strand och Johan Yngvesson

Projektnummer WR-36
År: 2011

WASTE REFINERY
SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
Box 857, 501 15 Borås
www.wasterefinery.se
wasterefinery@sp.se
ISSN 1654-4706

Förord

Götaverken Miljö AB har tillsammans med SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Linnéuniversitetet, AWS Corp. (Italien) och Renova genomfört detta arbete om skrubberintegrerat vått elektrofilter, WESP. Projektet är samfinansierat av Värmeforsk och WasteRefinery. Denna rapport föreligger även i Värmeforsks rapportserie som projekt A08-854. Värmeforskprojektet har inrymt konstruktion och installation av WESP pilotanläggningen samt totalstofmätningar (med kemisk analys av ingående stoft) över WESP. WasteRefineryprojektet inkluderar onlinemätningar av partikelstorleksfördelningar, metodutveckling för provtagning av fuktmättad gas och totalstofmätningar över kondenseringskrubber och slangfilter. Övriga finansiärer är (ordnade efter storlek på insats) Götaverken Miljö, SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, AWS Corp (Italien) och Renova.

Stort tack för värdefulla synpunkter till Värmeforsks referensgrupp bestående av Fredrik Axby (Grontmij), Henrik Lindståhl (Tekniska Verken, Linköping) och Niclas Lindqvist (Alstom) samt Värmeforsks två utsedda granskare Anna Edebo (Holmen) och Mats Lindgren (Naturvårdsverket). Stort tack även till WasteRefinerys granskare.

Ett varmt tack till alla som gjort projektet möjligt samt Renovas ledning och personal för all hjälp under försökens gång!

Göteborg, december 2011

Sven Andersson, projektledare
Götaverken Miljö AB

Sammanfattning

Utveckling av förbättrad stoftavskiljning efter förbränningsanläggningar är en viktig fråga för framtidens hållbara energisystem. Projektet har syftat till att vidareutveckla våt elfilterteknologi för att enklare och mer kostnadseffektivt möta framtidens hårdare utsläppskrav av submikrona partiklar, vilka visat sig vara mycket hälsofarliga.

Ett vått skrubberintegrerat elektrofilter (WESP, Wet ElectroStatic Precipitator), installerat av Götaverken Miljö inom ramen för detta projekt, har framgångsrikt demonstrerats i pilotskala vid Renovas Waste-to-Energy anläggning. Partiklarna laddas upp och avskiljs genom att en spänning läggs på en central elektrod i en cylindrisk kollektor. Det unika med piloten är kombinationen av att den är konstruerad i korrosionsbeständig, elektriskt ledande glasfiberarmerad plast (GAP), integrerad i en våt fyllkroppsskrubber, vilket ger jämn gasfördelning i inloppet, samt är utrustad med kondenserande, kyld kollektor och en högfrekvenstransformator för stabil spänningsmatning.

Pilotanläggningen har fungerat mycket väl. Samtidiga totalstoftmätningar uppströms och nedströms WESP-piloten har genomförts. Samtliga rengashalter efter WESP-enheten var under $0,3 \text{ mg/Nm}^3$ (torr gas., 11% O_2), vilket motsvarar 3% av gällande emissionsgränsvärde. Avskiljningsgraden har varit bättre än 97% för samtliga totalstoftmätningar. Medelvärdet för samtliga totalstoftmätningar var $15,2 \text{ mg/Nm}^3$ i ingående halt och $0,14 \text{ mg/Nm}^3$ i utgående halt (båda som tg., 11% O_2), vilket ger en medelavskiljningsgrad strax över 99%. Pilotanläggningen har körts dygnet runt under ca 10 veckor. Visuell inspektion av kollektorytorna visar inga tecken på påverkan från driften. Förväntad livslängd hos GAP-materialet i en WESP motsvarar därför den hos andra rökgasreningskomponenter konstruerade i GAP, som tex. skrubbrar och kanaler. Halten av medryckta droppar från skrubbersteget har uppmätts med spårämnesteknik. LiBr tillsattes till skrubbervätskan och filtren från stoftprovtagningen analyserades för en rad grundämnen. Med hjälp av massbalans för Li kunde droppkoncentrationen beräknas till 33 mg/Nm^3 tg. före WESP och $<0,02 \text{ mg/Nm}^3$ tg. efter, vilket ger en avskiljningsgrad $>99,9\%$ för dropparna från skrubbern.

Två elektriska lågtrycksimpaktorer (ELPI, Electric Low Pressure Impactor) har använts uppströms och nedströms WESP-piloten för realtidsmätning av partikelkoncentration och storleksfördelning, som antalet partiklar per volymenhet för olika storleksklasser. En mätmetodik för att provta partiklar i fuktmättad rökgas och låga koncentrationer av partiklar har tagits fram och verifierats i projektet. Med hjälp av ELPI-mätningarna kunde förhållandet mellan ökad partikelavskiljningsgrad och ökande WESP-spänningen bestämmas. I en fullskaleinstallation kan avskiljningsgraden styras genom att variera spänningen och därigenom kan energianvändningen optimeras.

WESP har visat sig vara en väl fungerande metod för slutavskiljning av stoft med hög avskiljningsgrad och låg specifik energiförbrukning jämfört med andra rökgasrenings-tekniker. Tekniken är tillämplig i förbränningsanläggningar för hushållsavfall och torde även vara det för förbränning av farligt avfall, biomassa och för kemisk industri. Projektet har resulterat i en kommersiellt tillgänglig produkt.

Nyckelord: Våtelektrofilter, WESP, stoftavskiljning, rökgasrening, submikrona partiklar

Summary

Combustion processes for heat and power production are an important source of sub-micron particle emissions, which cause enhanced health risks and premature deaths. To meet future requirements of economical and robust dust cleaning equipment, the Wet Electrostatic Precipitation (WESP) technology has been further developed in this project.

A pilot scale slip stream WESP unit, installed by Götaverken Miljö, has been successfully installed and tested at the Renova Waste-to-Energy plant in Göteborg, Sweden. The particles in the gas are charged by an ionizing electrode and collected in a concentric cylinder geometry. The WESP pilot consists of a unique combination of several existing technologies: it is integrated with a packed bed scrubber which means an ideally uniformly distributed gas flow in the WESP inlet. Furthermore, the WESP unit has a water cooled condensing collector, which facilitates continuous formation of a water film. The downward flowing water film transports the collected dust counter current to the upward flowing flue gas in order to minimize particle re-entrainment. The WESP is equipped with a high frequency transformer for stable voltage output and is fabricated in electrically conductive corrosion resistant Fibre Reinforced Plastic (FRP).

The concentration of dust upstream of the WESP unit varied between 6.2 and 28 mg/Nm³ dry gas. All measured outlet dust concentrations were below 0.3 mg/Nm³ (dry gas, 11% O₂), which equals 3% of the applicable emission limit. The dust removal efficiency has been higher than 97% in all the dust measurements. The mean value of all the dust measurements was 15.2 mg/Nm³ upstream and 0.14 mg/Nm³ in downstream (both as dry gas, 11% O₂), which gives an average removal efficiency of slightly more than 99%. The removal efficiency increased with increasing inlet dust concentration, SO₂ concentration and ΔT of the collector cooling. Chlorine, potassium, sodium, silicon and sulphur dominated the composition of the dust. The concentration of droplet carry-over from the scrubber stage and droplet separation in the WESP was calculated by adding LiBr tracer to the scrubber liquid and using a mass balance for Li. The droplet concentration was thus estimated at 33 mg/Nm³ dg. upstream of the WESP and <0.023 mg/Nm³ dg. downstream, corresponding to a removal efficiency of > 99.9% for the droplets from the scrubber.

On-line-measurement of number concentration and size distribution (0.007-7 μm) was performed using two ELPI (Electrical Low Pressure Impactor) operating at < 40°C . In order to cool the gas while avoiding condensing, a sampling system was developed and verified. The ELPI measurements enabled the removal efficiency to be determined as a function of WESP electrode voltage, which means that the energy consumption can be optimised by controlling the WESP voltage.

The WESP showed high removal efficiencies, low emission levels, stable operation and was found to have the lowest energy consumption of the studied dust removal technologies. Visual inspection of the FRP collector showed no signs of impact from 10 weeks of continuous operation. WESP is applicable to Waste-to-Energy plants, but should also be suitable for combustion of biomass and hazardous waste and for chemical industry. The project has resulted in a commercially available product.

Keywords: Wet Electrostatic Precipitator, dust removal, flue gas cleaning, submicron particles

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	9
1.1	BAKGRUND	9
1.2	BESKRIVNING AV FORSKNINGSSOMRÅDET	9
1.3	FORSKNINGSUPPGIFTEN OCH DESS ROLL INOM FORSKNINGSSOMRÅDET	10
1.4	MÅL OCH MÅLGRUPP	10
2	AVSKILJNING AV PARTIKLAR OCH DROPPAR	11
2.1	MEKANISMER FÖR PARTIKEL- OCH DROPPAVSKILJNING	11
2.2	UTRUSTNING FÖR AVSKILJNING AV PARTIKLAR OCH DROPPAR	14
3	FÖRSÖKSANLÄGGNING	18
3.1	FULLSKALEANLÄGGNING: RENOVA	18
3.2	WESP-PILOTANLÄGGNING	19
4	MÄTMETODER	20
4.1	TOTALSTOFTPROVTAGNING	20
4.2	GRAVIMETRISK LÅGTRYCKSIMPAKTOR (LPI)	21
4.3	ELEKTRISK LÅGTRYCKSIMPAKTOR (ELPI)	21
4.4	SCANNING MOBILITY PARTICLE SIZER (SMPS)	23
4.5	AERODYNAMIC PARTICLE SIZER (APS)	25
4.6	OPTISK IN-SITU ANALYSATOR	25
5	RESULTATREDOVISNING	26
5.1	DRIFTFALL FÖR WESP	26
5.2	MÄTNINGAR ÖVER WESP-PILOT	26
5.3	JÄMFÖRANDE MÄTNINGAR MED OLIKA MÄTMETODER	34
5.4	MÄTNINGAR ÖVER BEFINTLIG KONDENSERINGSSKRUBBER OCH SLANGFILTER	36
5.5	ENERGIFÖRBRUKNING FÖR WESP	37
5.6	MATERIALBESTÄNDIGHET FÖR ELEKTRISKT LEDANDE GAP	38
6	RESULTATANALYS	39
6.1	WESP-PILOTANLÄGGNING	39
6.2	KEMISK SAMMANSÄTTNING HOS STOFDET	41
6.3	JÄMFÖRELSE MELLAN OLIKA STOFTEAVSKILJNINGSMETODER	42
6.4	ÖRSAKER TILL AVVIKELSER MELLAN OLIKA MÄTMETODER	42
7	SLUTSATSER	45
8	REKOMMENDATIONER OCH ANVÄNDNING	46
9	FÖRSLAG TILL FORTSATT FORSKNINGARBETE	47
10	LITTERATUREREFERENSER	48

1 Inledning

Höga halter av partiklar i luften innebär en ökad hälsorisk. Det kan leda till luftvägsproblem, hjärt/kärl-sjukdom och på sikt även cancer [1], [2]. Intresset för utsläpp av partiklar från förbränningsanläggningar har ökat under senare år och flera forskningsinsatser har gjorts. Det är känt att partiklarna som släpps ut främst utgörs av fina partiklar ($\leq 1 \mu\text{m}$). Förbränning genererar även grövre partiklar, men de avskiljs i multicykloner. Forskning har visat att storleken på partiklarna har stor inverkan på vilka hälsoproblem de orsakar [3]. Ju mindre partiklarna är desto längre in i kroppen kan de ta sig. Ultrafina partiklar ($\leq 100 \text{ nm}$) tränger djupt ned i lungorna och in i blodomloppet. Det finns studier som visar att ett högt antal ultrafina partiklar innebär förhöjd risk för hjärt- och kärlsjukdomar [3]. Utsläppskrav för partiklar från förbränningsanläggningar är i nuläget specificerat med avseende på total masskoncentration stoft. Partiklarna hamnar sedan i omgivningsluften och bidrar till halterna PM10 och PM2.5 (Particulate Matter, partiklar med storlekar mindre än 2,5 respektive $10 \mu\text{m}$). Partikelhalter i omgivningsluften regleras genom PM10 och PM2.5, både i EU-direktiven 1999/30/EC och 96/62/EC samt svenska miljömål. PM2.5 anses orsaka för tidig död hos 350 000 EU-invånare per år [4].

1.1 Bakgrund

Det är väl känt att det behövs rökgasreningsutrustning för att avskilja partiklar från förbränning. Vid mindre närvärmepannor kan det räcka med multicykloner för att nå krav på en stofthalt 100 mg/Nm^3 [5]. Vid högre rökgashastigheter, vilket ofta är fallet när pannorna blir större, avgår högre koncentration av partiklar från förbränningsrummet på grund av medryckning från bränselbädden. Större pannor har högre krav på stoftemissioner. Stora biobränslepannor har typiskt stoftkrav på $10\text{-}50 \text{ mg/Nm}^3$ och avfallsförbränningspannor på 10 mg/Nm^3 . Då behövs ytterligare stoftavskiljning jämfört med mindre närvärmepannor. Multicykloner avskiljer partiklar med hjälp av tröghetskrafter, vilket innebär att de främst avskiljer grova partiklar ($> 1 \mu\text{m}$). För att avskilja fina partiklar ($< 1 \mu\text{m}$) krävs annan teknik, som textilt spärrfilter, vått eller torrt elektrostatiskt filter eller skrubber.

1.2 Beskrivning av forskningsområdet

Redan de gamla grekerna observerade att små partiklar drogs till bärnsten som gnidits mot päls. På 1600-talet upptäckte den engelske vetenskapsmannen William Gilbert att rök från ett utblåst stearinljus på samma sätt attraherades av bärnsten som laddats elektriskt genom det som numera är känt som den triboelektriska effekten. Ett experiment genomfördes av Hohlfield 1824, där rök i en burk skingrades från en elektrifierad spets. Den brittiske fysikern Sir Oliver Lodge publicerade 1883 en artikel i Nature, där han föreslog att statisk elektricitet skulle användas för att rena förorenad luft från rök och dimma, men han fick snart möjligheten att istället applicera idén på en industriell utsläppskälla. Ett elfilter byggdes 1885 vid en blysmältningsanläggning i Wales. Tyvärr var valet av applikation olyckligt, eftersom blyoxidpartiklar är mycket svåra att avskilja på grund av hög resistivitet och liten partikelstorlek [6]. Tekniken applicerades dock framgångsrikt 1907 för att avskilja aerosoler från en svavelsyrafabrik med hjälp av ett vått elektrofilter [7]. Denna installation banade väg för installationer i smältverk (1910), cementugnar (1912), massabruk (1916), kraftverk (1923) och masugnar (1930) [8]. Idag är elektrostatiska filter vanligt förekommande på större förbränningsanläggningar och avskiljer totalstofv mycket effektivt. De avskiljer en stor andel av fina partiklar, även om de generellt har ett minimum i avskiljningsgrad i området $0,1\text{-}2 \mu\text{m}$ [9], [10]. I området med minimum avskiljningsgrad har denna uppmätts till

96-97%, samtidigt som total avskiljningsgrad var 99,2-99,8% vid en ingående stofthalt på 510-1400 mg/Nm³ [10]. Den vanligast typen av elektrostatiske filter renar torr rökgas, men det finns också våta elektrostatiske filter (eng. WESP, Wet ElectroStatic Precipitator) som renar fuktig rökgas som passerat ett våtskrubbersystem. Funktionsprincipen är dock densamma: partiklarna laddas upp av en sk. koronaurldning och avskiljs därefter med hjälp av ett elektriskt fält. Det finns ett stort antal våtelektrofilter installerade i världen, men endast enstaka publicerade studier och man har i dessa visat att våtelektrofilter fungerar väl för partiklar ned till 0,05 µm [11]. Det är särskilt relevant att använda ett vått elektrostatiske filter på en avfallsförbränningsanläggning där man har våt rökgasrening, men det ställer samtidigt höga krav på materialval eftersom miljön är korrosiv.

1.3 Forskningsuppgiften och dess roll inom forskningsområdet

Bakgrunden till föreliggande projekt är idén att undvika korrosionsproblem genom att välja ledande glasfiberarmerad plast som konstruktionsmaterial för en WESP, som är integrerad i en våt fyllkroppsskrubber, vilket ger jämn gasfördelning i inloppet samt är utrustad med kondenserande, kyld kollektor och en högfrekvenstransformator. På så sätt skapas ett unikt nytt koncept utgående från känd teknik. Projektet syftar till att i pilotskala bygga, testköra och utvärdera ett vått elektrofilters förmåga att avskilja partiklar från rökgas samt att studera materialets beständighet i en WESP. Målet är att bestämma avskiljningsgraden av partiklar för WESP:en. Stoffmängd uppströms och nedströms bestäms genom användning av parallella mätningar med likadana instrument i de två mätpunkterna. Projektet sorterar under ”Minimerad Miljöpåverkan” som är ett av tre huvudområden i Värmeforsks forskningsprogram ”Anläggnings- och förbränningsteknik”. I ramprogrammet 2008-2011 anges att ”Fortsatt behov finns även av att studera effekten och uppkomsten av submikrona partiklar samt metoder för avskiljning av dessa” samt att ”För olika typer av rökgasrening (multicykloner, elfilter, slangfilter, rökgaskondensering, torr, halvtorr, katalytisk) studera möjligheten att möta gällande och kommande krav avseende utsläpp till luft”. Projektet har utförts inom ramen för Waste Refinerys verksamhetsområde ”Termisk återvinning av avfall: optimerad rening av rökgaser.” och syftar till anläggningsoptimering och reducerad LCC (livscykelkostnad) genom lägre förbrukning av el, minskade driftkostnader samt minimering av emissioner.

1.4 Mål och målgrupp

Målet är att demonstrera att elektriskt ledande GAP (GlasfiberArmerad Plast, eng. FRP, Fibre Reinforced Plastics) fungerar som konstruktionsmaterial i ett vått elektrofilter samt att demonstrera att mycket låga utgående totalstofthalter kan erhållas med tekniken. Mål med projektet är att:

- Konstruera, installera, testköra och utvärdera ett vått elektrofilters förmåga att avskilja partiklar från rökgaser.
- Studera beständigheten hos elektriskt ledande glasfiberarmerad plast i en WESP
- Jämföra energiförbrukningen hos en WESP med tex. venturi och slangfilter.
- Visa att mycket låga totalstofthalter kan erhållas med elfilter och våt rökgasrening i kombination med en WESP.

Målgruppen för rapporten är ägare till anläggningar som släpper ut partiklar till atmosfären, i synnerhet förbränningsanläggningar för avfall och biomassa. Därutöver riktar sig rapporten till konsulter, myndigheter och aerosolforskare.

2 Avskiljning av partiklar och droppar

I många storstäder är det problematiskt att nå de gränsvärden som finns för partiklar i omgivningsluft. Det är därför möjligt att framtida emissionsgränsvärden skärps för förbränningsanläggningar och andra verksamheter som bidrar till PM10 och PM2.5 i luften. Om gällande utsläppskrav skärps för avfallsförbränningsanläggningar har en kombination av torr och våt rening störst möjlighet att på ett kostnadseffektivt sätt klara dessa skärpta utsläppskrav. Minskade utsläpp av PM2.5 har stor betydelse för hälsan och livslängden i Sverige även om det aktuella utsläppet inte direkt bidrar till ett gränsvärdesöverskridande.

Fysikaliska principer för hur partiklar kan avskiljas beskrivs översiktligt i avsnitt 2.1. Beskrivningarna utgår från referenserna [12][13] och för mer detaljer hänvisas dit. I avsnitt 2.2 ges en överblick över reningsteknik för partiklar och droppar. Mer detaljerat beskrivs sedan elektrofilter och våtelektrofilter eftersom detta projekt har ett vått elektrofilter i fokus.

2.1 Mekanismer för partikel- och droppavskiljning

2.1.1 Gravitation

Större partiklar kan avskiljas från ett gasflöde med hjälp av gravitationen. Effektiviteten beror på partikelstorlek och gashastighet och är ofta låg vid tillämpningar som rökgasrening. Partikelstorleken måste enligt [13] vara över ca 80 μm för att gravitationen ska kunna användas som primär avskiljningsmekanism. Trots detta är det en viktig mekanism, tex. när elfilter rengörs genom rappning eller slangfilter rengörs genom pulsrensning eller då det är av stor vikt att filterkakan eller agglomeraten faller ner på avsedd plats utan att för stor mängd partiklar återgår till gasflödet.

2.1.2 Tröghetskrafter

Partiklar i rökgas rör sig och har ett tröghetsmoment som gör att de kan fångas upp av en fast yta eller av ett föremål som rör sig långsammare än rökgasflödet. Detta kan ske på två sätt:

1. Direkt kollision (eng. inertial impaction), t.ex. partiklar som fastnar på värmeöverförande ytor när rökgasen tvingas böja av.
2. Infångning (eng. direct interception), t.ex. partiklar som fångas in genom kollision med tex. vattendroppar.

Ju större partiklarna är desto lättare är det att använda tröghetskrafter för att avskilja dem. Partiklar som är större än 10 μm kan avskiljas relativt effektivt med hjälp av tröghetskrafter, medan det är betydligt svårare att använda för partiklar mindre än 1 μm . Fina partiklar följer gasflödet väl, utan att kollidera med hinder på vägen.

2.1.3 Diffusion

Brownsk rörelse, efter botanikern Robert Brown, är den slumpmässiga partikelrörelsen som uppstår genom att fler gasmolekyler träffar partikelns ena sida i ett givet ögonblick. Partikeln får då en ”knuff” och förflyttar sig [9]. Partiklars brownska rörelse är analog med diffusion av molekyler. Diffusion av partiklar (och gas) sker i riktning från hög koncentration till låg koncentration. Om partikeln kolliderar med tex. ett filtermedia eller en vägg

på grund av Brownsk rörelse talar man om avskiljning genom diffusion. Små partiklars diffusion liknar diffusion av gasmolekyler, och större partiklar diffunderar långsammare än små på grund av sin större tröghet.

2.1.4 Termofores

Termofores (eng. thermophoresis) beskriver partiklars diffusion i en temperaturgradient, där partiklar diffunderar från varmare gas till kallare dito. Effekten uppstår genom att varma gasmolekyler med högre kinetisk energi kolliderar med partikeln och överför impuls så att den rör sig mot sjunkande temperatur, eftersom de kallare gasmolekylernas kollisioner inte påverkar partikeln lika mycket [9]. Framförallt fina partiklar ($\leq 1 \mu\text{m}$) påverkas av termofores.

2.1.5 Elektrofores

Elektriskt laddade partiklar som passerar ett elektriskt fält kan avskiljas genom att de attraheras av ytor som har motsatt laddning som de själva. Mekanismen för detta kallas för elektrofores och används för att avskilja partiklar i torra och våta elektrofilter. Hur effektiv denna avskiljning kan bli beror framförallt på:

- migrationshastighet
- gashastigheten,
- elektrofiltrets geometri och dimensioner

Nedan beskrivs migrationshastigheten (hur fort partiklarna vandrar i det elektriska fältet) och hur avskiljningsgraden kan beräknas teoretiskt för två idealiserade fall.

Om de elektrostatiska krafterna dominerar kommer partikeln att migrera med en hastighet w (m/s) som bestäms av storleken på de elektrostatiska och de viskösa krafterna [8] enligt:

$$w = \frac{qECu}{3\pi\mu d}$$

Där q = partikelladdning (C), E = fältstyrka (V/m), μ = gasviskositet (Pa·s), d = partikeldiameter och Cu = Cunninghamfaktorn (-) som beskriver ökningen i migrationshastighet för de partiklar som är så små ($< 1 \mu\text{m}$) att de är jämförbara med gasmolekylernas fria medelväg.

Avskiljningsgraden är 100% för den s.k. gränspartikeln i en cylindrisk elfiltergeometri under antagandet att strömningen motsvarar plugflöde och att partiklarna ej omblandas utan rör sig i fältriiktningen med migrationshastigheten w om:

$$L = \frac{Rv}{w}$$

Där L = kollektorlängd, R = kollektorradie och v = gashastighet.

I praktiken är strömningen alltid turbulent vid de dimensioner och gashastigheter som är aktuella i industriella applikationer. Vid turbulent strömning sker en omblandning av par-

tiklarna som kallas dispersion och är analog med diffusion som beror på den termiska rörelsen. Deutsch publicerade 1922 en teoretisk grund för avskiljningen av små partiklar i ett elektrostatiskt fält och gav namn till den ekvation som beskriver avskiljningsgraden för elektrofilter [14]. Korrelationen gäller för turbulent strömning och under en rad antaganden. Nämligen att den radiella omblandningen är fullständig, att partiklarna omedelbart får mätnadsladdningen och att migrationshastigheten bestäms av de viskösa och elektriska krafterna i den sk. Deutschekvationen:

$$\eta = 1 - e^{-De}$$

Där η = avskiljningsgraden (-) och De = Deuschtalet (-) som beräknas enligt följande för en cylindrisk ESP/WESP:

$$De = \frac{2wt_v}{R}$$

där w = migrationshastighet (m/s), t_v = medeluppehållstid (s) och R = tubradie.

2.1.6 Koronauraddning, jonisering och partikelladdning

En förutsättning för att kunna avskilja partiklar med elektrofores, dvs. med elektrostatiska krafter, är att partiklarna är laddade. I våta och torra elfilter uppnås detta genom att en koronauraddning (1) skapar en joniserad gas (2) som laddar upp de passerande partiklarna (3). Mekanismerna för dessa tre delsteg beskrivs i tur och ordning nedan:

- 1) Koronauraddningen skapas genom att lägga på en spänning mellan två elektroder. Den ena elektroden utformas lämpligen med ”spikar” med mycket liten spetsradie. Vid negativ koronauraddning övergår elektroner till gasen då fältstyrkan nära ytan på dessa spetsar blir tillräckligt hög.
- 2) De frigjorda elektroner som har tillräcklig energi vid kollisionen med en gasmolekyl, bildar gasjoner. Jonisationspotentialen för de fyra gaser som utgör huvudbeståndsdelen av rökgaser är N_2 (15.58 eV), CO_2 (13.77 eV), H_2O (12.61 eV) och O_2 (12.07 eV) [15]. Ett högre fuktinnehåll gör alltså rökgasen lättare att jonisera. Vid jonisering av gasmolekylen bildas en positiv jon och ytterligare en elektron frigörs i en lavinprocess (eng. avalanche process). De positiva jonerna vandrar mot den negativt laddade centrala elektroden där de tar upp en elektron och åter blir oladdade. De elektroner som processen ger upphov till bildar negativt laddade joner
- 3) Partiklarna blir negativt laddade av de negativt laddade joner som fastnar på dem. Laddningen av partiklar sker genom två mekanismer: fältladdning (eng. field charging) och diffusionsladdning (diffusion charging). Fältladdning är den dominerande mekanismen för partiklar större än omkring $0,5 \mu m$ och uppkommer genom kollisioner mellan partiklarna och den riktade ström av laddade joner som uppkommer vid koronauraddningen. Diffusionsladdning är den dominerande mekanismen för partiklar mindre än $0,2 \mu m$ och är baserad på kollisioner mellan partiklar och den slumpmässiga termiska jonrörelsen. I partikelstorleksområdet däremellan är båda mekanismer betydelsefulla. En laddad partikel kommer att påverka det elektriska fältet lokalt så att fältlinjerna blir vinkelräta mot partikeln. Jonernas

migrationsriktning sammanfaller med fältlinjerna, vilket gör att joner krockar med partiklarna. Allteftersom större laddning byggs upp på en enskild partikel, så modifieras fältet runt partikeln tills ett tillräckligt stort elektriskt fält byggt upp kring partikeln, vilket repellerar och därigenom förhindrar fler joner från att krocka med partikeln. Den maximala partikelladdningen som därigenom kan uppnås med fältladdning kallas mättnadsladdning (eng. saturation charge) och är i storleksordningen 10^1 enhetsladdningar för partiklar med $0,1 \mu\text{m}$ och i storleksordningen 10^2 enhetsladdningar för $1 \mu\text{m}$ stora partiklar. Även diffusionsladdning når en viss gräns som bestäms av när partikeln får så hög laddning att den avger en fri elektron. Denna laddning uppnås aldrig i praktiken [8].

2.2 Utrustning för avskiljning av partiklar och droppar

De olika mekanismerna för partikelavskiljning beskrivna i avsnitt 2.1 kan utnyttjas var för sig eller i kombination i industriella tillämpningar, av vilka de vanligaste beskrivs nedan.

2.2.1 Fallkammare

Avskiljningen av partiklar i en fallkammare bygger på att partiklarna separeras från gasen med hjälp av gravitationskraften på samma sätt som partiklar i en vätska kan avskiljas i en sedimentationsbassäng. De allra största askpartiklarna, den s.k. pannaskan, avskiljs i de så kallade ”dragen” i pannan enligt denna princip. Metoden fungerar endast för relativt stora partiklar, typiskt $>0,1 \text{ mm}$.

2.2.2 Cyklon

Cykloner utnyttjar centrifugalkrafterna för att avskilja partiklar större än ca $5 \mu\text{m}$ [16]. Fördelarna med cykloner är en robust konstruktion och att de tål höga temperaturer. Normalt används de som föravskiljare uppströms tex. elfilter, framförallt i fluidbäddpannor för avfall och biobränslen. Avskiljningsgraden är emellertid för låg för att klara moderna utsläppskrav för avfallseldade pannor. De kombineras därför ofta med andra tekniker.

2.2.3 Elfilter

I ett elfilter laddas partiklarna upp genom koronauppladdning (avsnitt 2.1.6) när en spänning läggs på mellan emittor- och kollektorelektroden. De laddade partiklarna vandrar genom elektrofores (avsnitt 2.1.5) mot kollektorelektroden på grund av det elektriska fältet mellan elektroden. Kollektorelektroden rensas genom rappning varvid en del av de avskiljda partiklarna återgår till gasen. Typiska drifttemperaturer är $130 - 260^\circ\text{C}$. Högre temperaturer (runt 250°C och däröver) undviks normalt vid avfallsförbränning eftersom detta ökar risken för dioxinbildning genom de Novo-syntesen [16]. En faktor som påverkar partikelavskiljningen är partiklarnas resistivitet, som i sin tur påverkas framförallt av temperatur, fuktinnehåll och svavelinnehållet i bränslet vilken i sin tur påverkar sulfateringen av askorna. En högre svavelhalt i bränslet och därigenom ökad sulfatering sänker partiklarnas resistivitet, vilket förbättrar avskiljningsgraden. En fördubbling av svavelinnehållet vid koleldning sänkte flygaskans resistiviteten med en tiopotens [5]. Vid resistiviteter högre än $10^{11}-10^{12} \Omega\text{cm}$ sjunker avskiljningsgraden [8]. Om beläggningen av uppfångade partiklar på kollektorelektroden har hög resistivitet, så fungerar dessa som en isolator och fältstyrkan inne i beläggningen blir mycket hög. Om fältstyrkan blir tillräckligt hög sker ett överslag inne i beläggningen, vilket resulterar i en ”back corona” effekt, där en del av beläggningen återgår till gasen.

2.2.4 Slangfilter

Slangfilter, även kallade textfilter eller spärrfilter, har en hög avskiljningsgrad för alla partikelstorlekar större än ca 0,1 μm [16]. De består av ett cylindriskt filtermedium genom vilket gasen passerar (normalt utifrån och in, men det existerar även installationer med omvänd flödesriktning). Allteftersom partiklar avskiljs, byggs en filterkaka upp på utsidan av filterslangarna, vilket gör att tryckfallet ökar. När tryckfallet uppgår till ett visst värde eller när en viss tid förflutit rensas filtret genom att en kort luftpuls skickas genom filterslangen i motsatt flödesriktning. Låga emissionsnivåer kan uppnås med denna teknik. Rågasslangfilter körs normalt vid 130 - 200 °C, men med speciella slangar är 260 °C möjligt. Rengasslangfilter körs normalt 20 - 40 °C över mätnadstemperaturen för att undvika korrosion.

2.2.5 Skrubber

Våta skrubbrar är i huvudsak avsedda för att avskilja gasformiga komponenter. En viss partikelavskiljning sker även om den typiskt är lägre än för de gasformiga komponenterna. Partikelavskiljning i skrubber sker genom infångning till vattendroppar.

2.2.6 Droppavskiljare

Droppavskiljare kan bestå antingen av lameller eller fibrer. Lamellavskiljare (eng. vane type eller Chevron) används framförallt för att avskilja droppar mellan eller efter skrubberstegen i en våtskrubber. En lamellavskiljare utnyttjar tröghetskrafterna genom att gasen omlänkas så att dropparna krockar med lamellerna och rinner neråt i speciella rännor (stående avskiljare) eller nedåt mot den uppåtgående gasen (liggande avskiljare).

Den andra typen av droppavskiljare består av fibrer som antingen kan vara regelbundet arrangerade eller slumpmässiga. Stickade droppavskiljare (eng. knitted mesh droplet separators) består av ihopstickade trådar arrangerade i lager och används ofta som slutavskiljare i våta skrubbrar. Så kallade "Candle filters" består av patroner innehållande mycket fina fibrer och används bla. för att avskilja svavelsyraaerosoler.

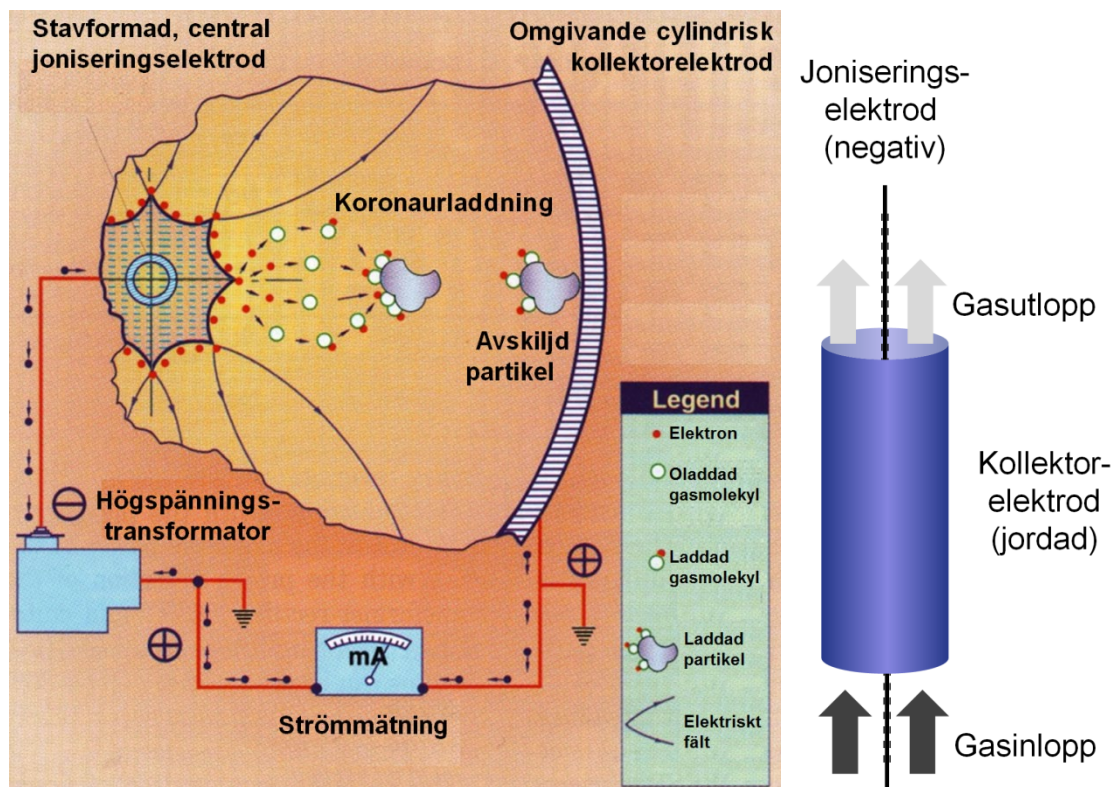
2.2.7 Venturi

I en venturi ökas gashastigheten genom att gasen leds genom en förträngning. Den höga turbulensintensitet som uppstår gör att partiklar och vätskedroppar kolliderar och agglomererar så att de resulterande stora vätskedropparna lätt kan avskiljas i tex en lamellavskiljare. Följande varianter av venturi finns: 1) rektangulära, 2) med en variabel strypmekanism som möjliggör styrning av tryckfallet och därmed partikelavskiljningsgraden, 3) eduktorventuri som introducerar vätska med hög relativhastighet, 4) reverse jet där vätska injiceras motströms, 5) kollisionsventuri som "kolliderar" två gasströmmar mot varandra och 6) multi-venturi med flera parallellkopplade venturi [17]. Venturi ger ofta en hög energiförbrukning på grund av det höga tryckfallet.

2.2.8 Våtelektrofilter

Våtelektrofilter (WESP) arbetar med fuktmättad gas och fungerar principiellt på samma sätt som ett torrt elfilter (ESP). Avskiljningen sker i följande tre steg:

- 1) Laddning av partiklarna
- 2) Infångande av partiklarna
- 3) Avlägsnande av de infångade partiklarna



Figur 1. Principskiss av WESP bestående av en central joniseringselektrod i en cylindrisk kollektorelektrod sedd uppifrån (t.v.) och från sidan (t.h.). Gasen strömmar mellan joniserings- och kollektorelektroden. (Vänster bild: AWS Corp., Italien)

Figure 1. Sketch of WESP consisting of an ionising electrode in a cylindrical collecting electrode seen from above (left) and from the side (right). The gas flows through the space between ionising and collecting electrodes. (Left Figure: AWS Corp., Italy)

1) och 2) beskrivs i Figur 1 och i avsnitt 2.1.5. Fukten sänker dock resistiviteten hos partiklarna, vilket förbättrar avskiljningsgraden. Ytterligare en fördel jämfört med torra ESP är att partiklarna fångas upp i kollektorelektrodens vattenfilm (3) vilket minimerar risken för återsuspendering (eng. reintrainment). Partiklarna kan avlägsnas genom intermittent vattenspolning, vilket tillfälligt sätter WESP:en ur funktion, eller genom att kollektorn kyls så att det kontinuerligt kondenserar ut vatten, vilket ger en kontinuerlig borttransport av partiklar. Uppströms våtelektrofilter (eng upstream, dvs. där gasen är uppåtriktad), har även fördelen att vätskefilmen med de fångade partiklarna rinner motströms gasen, vilket ytterligare minskar risken för återsuspendering jämfört med nedströms våtelektrofilter. Vidare minimeras risken för sk. "back corona" (se avsnitt 2.2.3) eftersom vätskefilmen sänker resistiviteten så att en isolerande beläggning av avskiljt stoft inte bildas.

Det finns våtelektrofilter med en mängd olika geometrier och konstruktionsmaterial. Den vanligaste typen består av en central elektrod i en cylindrisk (Figur 1), kvadratisk eller sexkantig kollektor. Tvärsnittsarean kan vara konstant eller utformad som en venturi (sk. elektroventuri). Det finns även konfigurationer med vertikala plattor på samma sätt som i torra ESP, men utrymmesbehovet (footprint) hos dessa är större jämfört med cylindriska WESP och gashastigheten måste halveras för att få samma avskiljningsgrad [7]. Kollektorn i en WESP kan konstrueras av rostfritt stål, av elektriskt ledande eller icke-ledande polymerer. Det finns även kollektorer som består av ett membran. [18] summerar att det

inte finns någon industrikonsensus av vilket material som är optimalt. Så kallade Hybrid WESP består av ett torrt ESP med ett sista vått fält. Detta har testats i fullskala, men försöken avbröts på grund av låg drifttillgänglighet [18]. Denna konfiguration är inte tillämpbar för avfallsförbränning pga. korrosion. En annan typ av våtelektrofilter är en s.k. IWS (Ionizing Wet Scrubber) som består av joniseringssteg med efterföljande vått skrubbersteg där de laddade partiklarna avskiljs [16]. Ytterligare en variant på separat uppladdning och avskiljning är CAROLA [19][20].

Våta elektrofilter används bla. i metallurgisk industri, skogsindustri, vid svavelsyratillverkning och olika typer av förbränningsanläggningar, framförallt vid förbränning av farligt avfall men även vid förbränning av hushållsavfall och i kolkraftverk. I svavelsyrafabriker har WESP varit standardutrustning för att avskilja svavelsyraaerosoler sedan ett femtiotal år tillbaka. Vid kolkraftverket AES Deepwater i USA är en WESP i drift sedan starten 1986 och vid Northern State Power's 2 x 750 MW Shirco Station sedan 1995. I Kanada finns det ytterligare WESP installerade vid kolkraftverk. I framtiden kan fler kraftverk av de 25% i USA som förbränner högsvavligt kol komma att utrustas med WESP för avskiljning av svavelsyraaerosoler. En WESP pilotanläggning vid kolkraftverket Bruce Mansfield visade PM_{2.5}-avskiljningsgrader på 96% efter optimering [7] [18]. Vid denna anläggning (och vid två andra anläggningar) har även en MWESP (Membrane WESP) testats motsvarande eller tom. högre avskiljningsgrader än motsvarande WESP [21]. Avskiljningsgraden över CAROLA har i pilotförsök uppmätts till > 95% för submikrona partiklar och > 98% för partiklar > 1 µm [20].

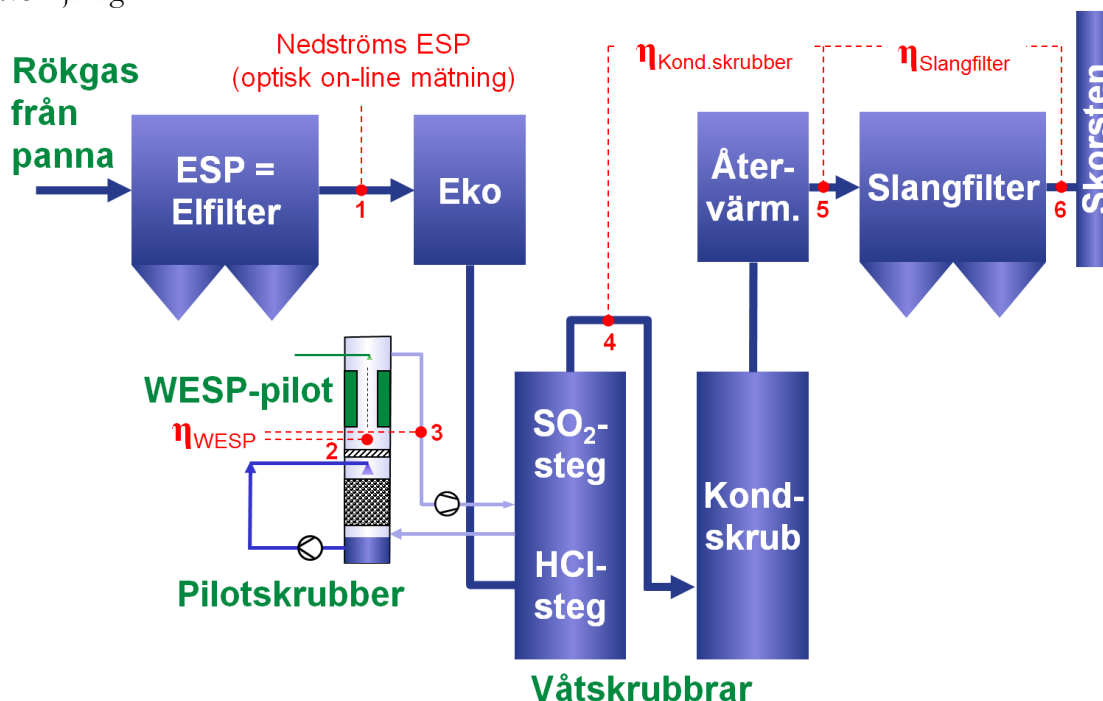
I en jämförelse mellan olika stoftavskiljningstekniker var slutsatsen att WESP ger den lägsta totalkostnaden och att en kondenserande WESP är den mest effektiva typen [22]. Resultaten från en sådan jämförelse är naturligtvis beroende på förutsättningarna och inte nödvändigtvis generellt applicerbara. Bredden på applikationsområden som redovisats ovan talar emellertid för sig själv.

3 Försöksanläggning

En skrubberintegrerad WESP-försöksanläggning i pilotskala har inom ramen för detta projekt byggts upp av Götaverken Miljö vid en fullskalig avfallsförbränningsanläggning. En delström av rökgas har förts från fullskaleanläggningen till pilotanläggningen och tillbaka.

3.1 Fullskaleanläggning: Renova

Försöken genomfördes vid Panna 1 (P1) vid Renova, Sävenäs. P1 är en rosterpanna byggd av Martin GmbH. Kapaciteten är 16 ton/h hushållsavfall och verksamhetsavfall. Rökgasflödet är 78 000 Nm³/h tg. vid aktuell O₂-halt, som är 8,7 vol% tg (medelvärden från 2010). I eldstaden är uppehållstiden för gasen minst 2 sekunder vid temperaturen 850°C. Efter det första s.k. tomdraget är rökgastemperaturen runt 550 till 650 °C beroende på hur försmutsade värmeöverföringsytorna är. Därefter kyls gasen i överhettarna och till sist i ekonomisern. Efter pannan avskiljs merparten av partiklarna i gasen i ett tvåfålt elfilter som arbetar vid omkring 240 °C. Halten stoft sjunker då från ca 1-5 g/Nm³ till ca 30 mg/Nm³. Ytterligare en ekonomiser där fjärrvärme produceras är kopplad efter elfiltret. Gasen renas därefter i en våt rökgasreningsanläggning levererad av Götaverken Miljö AB. Först kyls rökgasen i en quench innan gasen leds in i en tvåstegsskrubber försedd med Adioxfyllkroppar för dioxinavskiljning (Figur 2). I det första (undre) HCl-steget är pH under 1. I det övre SO₂-steget doseras lut för att upprätthålla neutralt pH och därmed avskilja SO₂. Den reade gasen kyls i en efterföljande kondenseringskrubber till under 40 °C. Fjärrvärme produceras genom att temperaturen på kondenseringsvärmnet höjs i en värmepump. Sista steget i rökgasreningen är en återvärmare och ett slangfilter med koldosering för dioxinavskiljning.



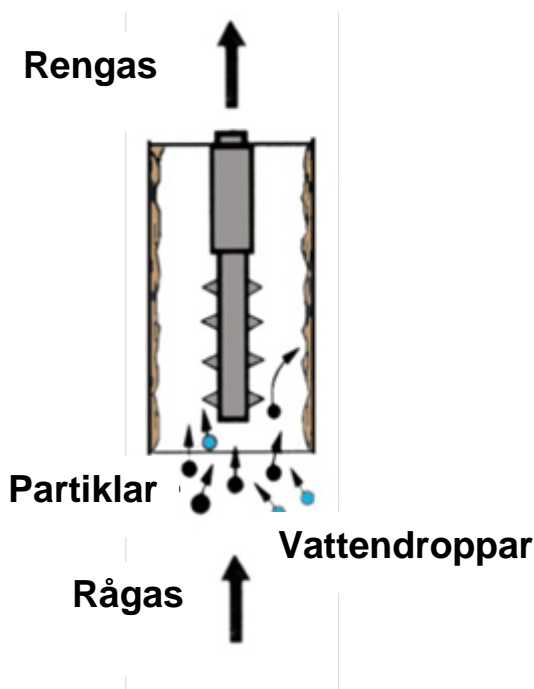
Figur 2. Flödesschema Renova rökgasrening L1 med provtagningsställen (●) efter ESP (1), före+efter WESP (2+3), kondenseringskrubber (4+5) och slangfilter (5+6).

Figure 2. Renova L1 flue gas cleaning with sampling positions (●) downstream of ESP (1), up+downstream WESP (2+3), Condensing scrubber (4+5) and bag house (5+6).

3.2 WESP-pilotanläggning

En delström av det totala rökgasflödet tas ut efter HCl-steget i den våta rökgasreningen enligt Figur 2. Pilotanläggningen består av ett skrubbersteg med fyllkroppsbädd, en cirkulationspump, en spraydysa och en lamelldemister för att minska droppmedryck in till WESP-enheten, som är placerad omedelbart ovanför (nedströms) skrubbersteget. Fördelen med detta arrangemang är att fyllkroppsbäddens tryckfall idealt sett ger en gashastighet som är jämnt fördelad över tvärsnittet in till WESP-enheten (se Figur 3). Efter att ha passerat WESP-enheten återförs rökgasen till samma punkt i huvudskrubbern. Ett insticksrör används vid inblåsningen för att undvika återföring av WESP-rengasen.

Pilotanläggningen är utrustad med kylning av kollektorytan (markerad med grönt i Figur 2), vilket medför att flera effekter samverkar för förbättrad avskilningsgrad. Dels gör kylningen att vattenånga i rökgasen kondenserar på kollektorytan, vilket leder till en tjockare och mer kontinuerlig vattenfilm. Vattenfilmen förbättrar ledningsförmågan på kollektorn och gör att de avskilda partiklarna tvättas bort från kollektorn snabbare. Halten partiklar i vätskan blir också lägre, vilket gör att återföring av redan uppfångade partiklar till gasen (eng. reentrainment) minskar. Dessutom ökar partiklarnas migrationshastighet mot kollektorn genom termofores.



Figur 3. WESP enhet bestående av en centralt placerad elektrod i en cylindrisk kollektor. Partiklarna laddas upp och vandrar till den omgivande cylindriska kollektorytan där de avskiljs från gasen och fastnar i vattenfilmen. Vattenfilmen rinner nedåt och för med sig partiklarna. (Bild: AWS Corp., Italien)

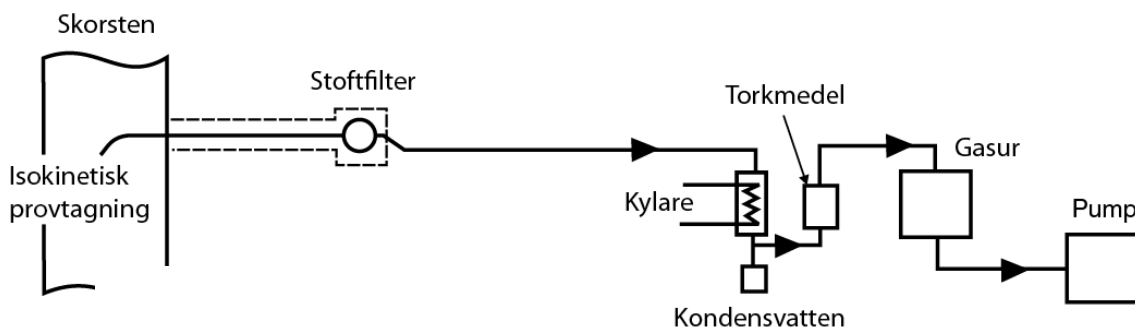
Figure 3. WESP unit consisting of a concentric charging electrode in a cylindrical collecting electrode. The particles are charged and migrate to the collector, where they are separated from the gas by the water film, which is flowing downwards. (Figure: AWS Corp., Italy)

4 Mätmetoder

Koncentrationer av partiklar i inkommande och utgående gas till WESP mäts med hjälp av stoftprovtagningsutrustning, gravimetrisk lågtrycksimpaktor, elektrisk lågtrycksimpaktor och en optisk in-situ-analysator på anläggningen. Lågtrycksimpaktorerna ger information om stoftpartiklarnas storlek medan de övriga två metoderna ger information om totalstoft. De olika mätmetoderna kompletterar varandra. Standardiserad mätning med två stoftprovtagningsutrustning utgör basen för mätning av stoftavskiljning över WESP, men har nackdelen att varje mätning tar lång tid (4 h) pga låga stoftkoncentrationer. Vid realtidsmätning med två elektriska lågtrycksimpaktorer kan många driftfall köras, vardera på 3-10 minuter. Övriga mätmetoder används som ett komplement för att karakterisera gasen som går in till WESP.

4.1 Totalstoftprovtagning

Masskoncentration partiklar, dvs. totalstofthalten, bestämdes i huvudsak enligt SS-EN 13284-1 [23]. I Figur 4 visas en översiktsbild på provtagningssystemet. Provtagning görs isokinetiskt. Det innebär att sondspetsen är riktad mot flödesriktningen och att hastigheten i rökkanal och sondspets är lika stora. Stoftsond och efterföljande filterhållare med filter värmdes till 100-120 °C. Vid mätningar där kemisk analys gjordes på filtren användes teflonfilter och i övriga fall kvartsfiberfilter. Totalstoftmängden har efter torkning bestämts genom vägning. Fukthalten i rökgasen bestämdes genom att kyla och kondensera ut vattnet i gasen. Sist bestämdes provtagen torr gasmängd mha. gasur.



Figur 4. Provtagningssystem för masskoncentration partiklar (totalstoft).

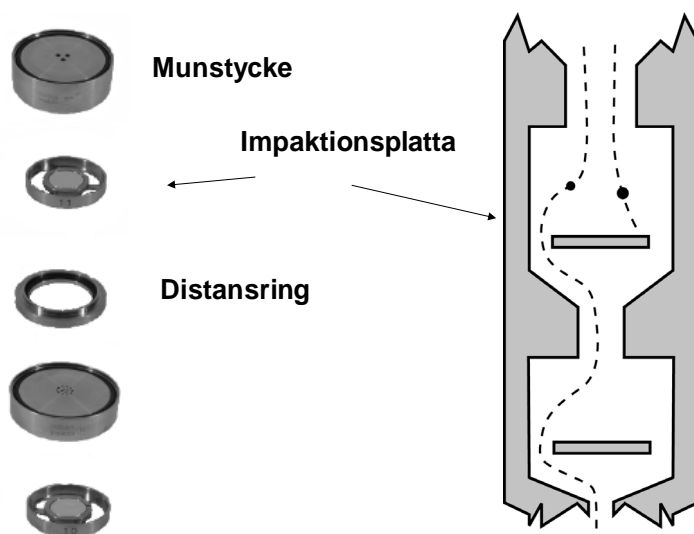
Figure 4. Sampling system for mass concentration of particles.

4.1.1 Kemisk analys av stoftpartiklar

Stoftprover från samtliga provtagningar uppströms WESP undersöktes med avseende på kemiskt innehåll. I ett driftfall doserades LiBr för att studera droppbildning och då gjordes också analyser av stoftprov nedströms WESP, samt skrubbervätska. De insamlade partiklarna löstes upp och innehållet av Al, Ba, Ca, Fe, Mg, Mn, P, Si, Zn, Na, K, Ti, Cu, Pb och Li analyserades med ICP-OES (Induktivt kopplad plasma – optisk emission), medan innehållet av sulfater, klorider och bromider analyserades med jonkromatograf.

4.2 Gravimetrisk lågtrycksimpaktor (LPI)

Partiklarnas masstorleksfördelning mättes med en Dekati lågtrycksimpaktor (LPI, tillverkas av Dekati ltd). Den mäter partiklar i området 30 nm till 10 μm , uppdelat på 12 storleksklasser. Partikelstorlekar mäts i form av aerodynamiska diametrar och i storleksfördelningarna som presenteras visas geometriska medeldiametrar för respektive steg. På varje steg i instrumentet samlades partiklar upp på polykarbonatfolier bestrukna med rent vakuumsfett upplöst i koltetraklorid. I Figur 5 visas en principskiss över en sektion av instrumentet. Principen är att partiklarna avskiljs med hjälp av tröghetsimpaktion. ”Jet plate” har till uppgift att ge rökgasen en viss hastighet så att partiklar av en viss storlek impakterar fastnar” på ”Impaction plate” därefter. På ”Impaction plate” monterades invägda och fettade polykarbonatfolier.



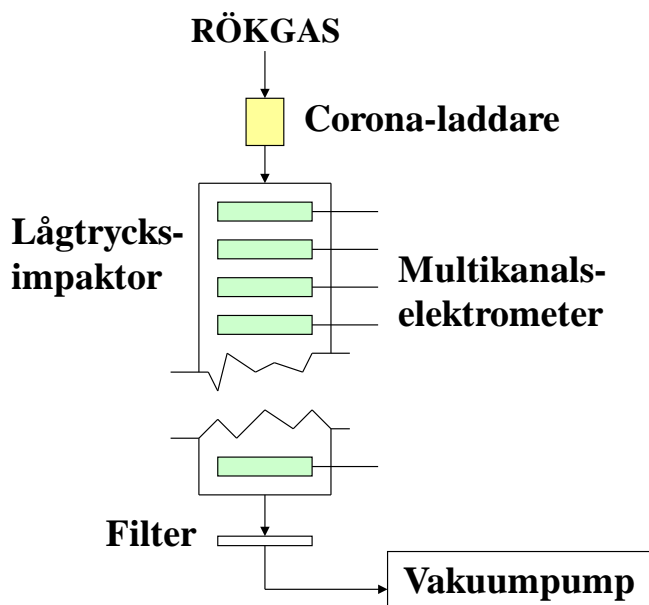
Figur 5. Gravimetrisk lågtrycksimpaktor. Till vänster visas foton av instrumentdelar och till höger principskiss för mostasvarande instrumentdel.

Figure 5. Gravimetric Low Pressure Impactor. Photos of instrument parts to the left and a schematic sketch of the corresponding instrument part to the right.

4.3 Elektrisk lågtrycksimpaktor (ELPI)

En elektrisk lågtrycksimpaktor (ELPI) är uppbyggd som en LPI, men mäter antalskoncentration av partiklar och deras storleksfördelning on-line i området 7 nm till 8 μm , uppdelat på 12 storleksklasser genom att mäta strömmen från varje impaktorsteg (Figur 6).

Rökgasen håller ca 60-65 °C och gas som går in till ELPI får max ha temperaturen 40 °C. Rökgasen är dessutom fuktmättad, så det innebär utveckling av provtagningsmetodiken jämfört med mätning i varma emissionsgaser från en panna (vilket man kan läsa mer om i referenserna [9] och [24]). Problemet med kondensation är att det kan störa själva mätningen som då visar för höga partikelhalter eftersom instrumentet inte skiljer mellan fasta partiklar och vätskedroppar, samt att det kan skada utrustningen. Ett provtagningsystem för ELPI-mätning på fuktmättad gas togs fram och verifierades och användes sen vid mät-kampanjerna för att undersöka WESP.

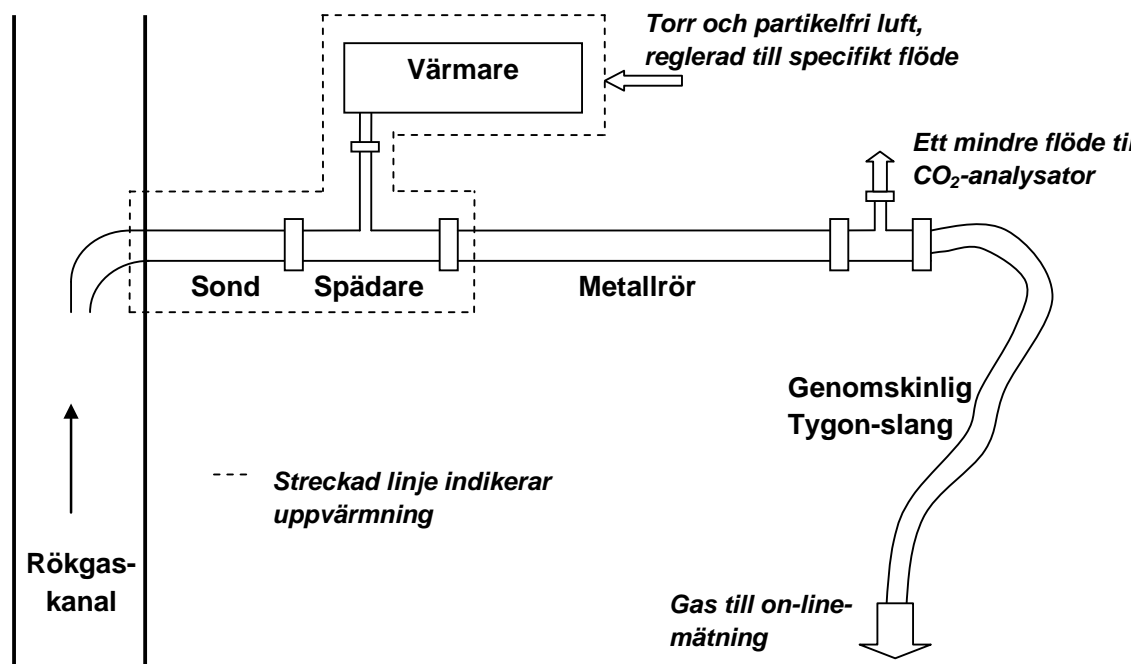


Figur 6. Principschema ELPI (Elektrisk lågtrycksimpaktor). Antalskoncentration och storleksfördelning bestäms i storleksområdet 0,07- 8(10) μm (13 steg)

Figure 6. Diagram showing the working principle of ELP (Electric Low Pressure Impactor). The number concentration and size distribution is measured in the range 0,07-8(10) μm (13 stages)

4.3.1 Provtagningsystem för on-line-mätning

För att undvika kondensation vid provtagning och ha en gastemperatur på max 40 °C in till ELPI används provtagningsystemet som visas i Figur 7. Sonden som rökgasen sugts ut med är uppvärmd och efter den görs en spädning med varm, torr och partikelfri luft. Därefter kyls den spädda gasen genom att gå genom ett metalliskt rör och därefter en genomskinlig slang i Tygon. Med hjälp av den genomskinliga slangen säkerställs att kondensation i systemet undviks vid mätningarna. Om kondensation uppstår spolas kondens bort genom att köra varm, torr och partikelfri luft genom systemet tills kondens försvinner. En metodutvecklingskampanj föregick mätkampanjerna över WESP och vid metodutveckling bestämdes lämpliga spädförhållanden så att kondensation inte riskerades vid mätkampanjerna över WESP. Den fuktiga gasen späds minst 8 gånger för att undvika kondensation. För att kontrollera spädfaktorn i systemet mäts halten CO_2 i rökgaskanalen och efter spädning. Mätning av spädfaktor på detta sätt medför högre mätosäkerhet ju högre spädfaktor man har.



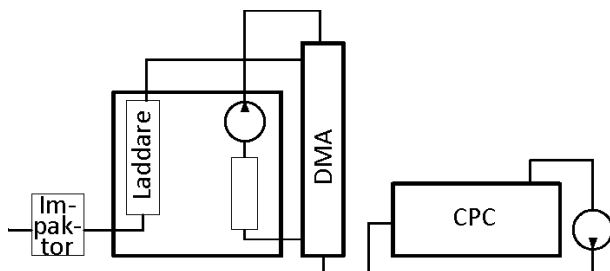
Figur 7. Provtagningsystem för mätning med ELPI.

Figure 7. Sampling system for ELPI measurement.

4.4 Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)

Mätsystemet är ett direkt (on-line) system för mätning av antalskoncentration av sub-mikrona partiklar i området från enstaka partiklar till 10 000 partiklar per kubikcentimeter. Det använda instrumentet bestod av SMPS 3080, DMA 3081 och CPC 3010, (TSI Inc, Minnesota U.S.A). Mätprincipen är elektrisk mobilitet för partiklar som laddats elektrostatiskt. Uppbyggnaden av systemet medger en viss flexibilitet med avseende på vilka partikelstorlekar som mäts samt upplösning och tidsåtgång för mätning. Med de inställningar som använts detekteras partiklar i storlekar från 15 nanometer till 661 nanometer (0,015 till 0,661 μm). Därmed täcker instrumentet det storleksområde som typiskt uppstår vid förbränning av bränslen som innehåller organiska salter, den så kallade finmoden. Mätprincipen innebär att provet successivt delas upp i olika storleksintervall och antalskoncentrationen mäts intervall för intervall. Ett komplett svep över hela storleksområdet kräver knappt tre minuter och resulterar då i antalskoncentrationer för 106 olika partikeldiametrar.

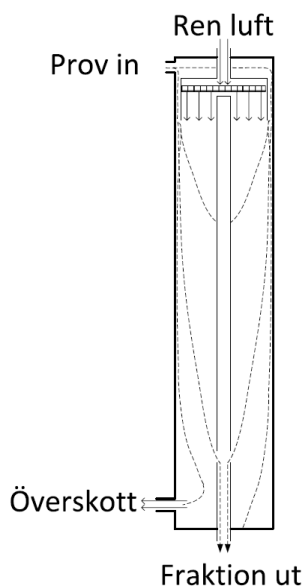
Provets partiklar laddas med hjälp av en strålkälla (Krypton 85) och därefter används partiklarnas olika elektriska mobilitet för att avskilja partiklar inom ett bestämt storleksintervall. De avskilda partiklarna leds sedan till en optisk räknare (CPC, Condensation Particle Counter), men på grund av de små diametrarna är det inte möjligt att optiskt detektera partiklarna. Den optiska räknaren är därför försedd med ett system där partiklarna först växer genom att en alkoholång kondenseras på partiklarna.



Figur 8. Principalskiss av SMPS instrumentet bestående av en impaktor, laddare, DMA och CPC

Figure 8. Overview of the SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) instrument, consisting of impactor, charger, DMA (Differential Mobility Analyzer) and CPC (Condensation Particle Counter).

I Figur 8 visas den allmänna anordningen av det använda SMPS-systemet. Provet leds in längst ned till vänster. En impaktor tjänstgör som grovavskiljare och avlägsnar alla partiklar med större diameter än 710 nm ($0,71\ \mu\text{m}$). Därefter laddas partiklarna elektriskt och leds till selektering i Differential Mobility Analyzer (DMA), där en partikeldiameter i sänder selekteras fram. Provet med de elektriskt laddade partiklarna leds in i toppen av en cylinder, som visas i Figur 9, via en smal spalt i periferin. I cylinderns mitt finns en rörformad elektrod, spänningssatt med en polaritet motsatt partiklarnas. I elektrodens nedre del finns en slits, som tjänstgör som utlopp för den selekterade partikelstorleken. Ren luft tillförs i cylinderns topp på ett sådant sätt att luften rör sig axiellt i cylindern, utan någon radiell rörelse. Provet följer luften med samma hastighet som densamma. De laddade partiklarnas mobilitet varierar med deras diameter. Partiklar med större mobilitet än den avsedda träffar elektrodens ovanför utloppsslitsen. Partiklarna kvarhålls med adhesion. Partiklar med mindre



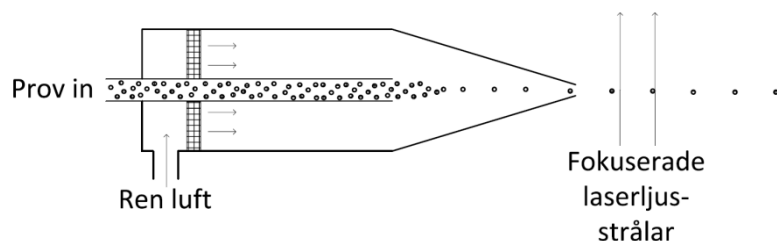
Figur 9. Arbetsprincipen för DMA.

Figure 9. Working principle for DMA (Differential Mobility Analyzer).

mobilitet än den avsedda träffar antingen elektroden nedanför utloppsslitsen, eller följer med utloppsflödet tillbaka till ett filter och en cirkulationspump, som kontinuerligt förser DMA:n med ren luft. Genom att välja elektrodspänning, kan aktuell partikeldiameter varieras.

4.5 Aerodynamic Particle Sizer (APS)

Det använda instrumentet är av typen Aerodynamic Particle Sizer (APS 3321, TSI Inc, Minnesota U.S.A). Mätprincipen bygger på direkt räkning och uppmätning av enskilda partiklars hastighet efter en acceleration under kontrollerade förhållanden enligt Figur 10. Bestämning av antal och hastighet sker samtidigt, med hjälp av laserljus teknik. Partikels hastighet är, under de givna, kontrollerade förhållandena i instrumentet, ett direkt mått på partikelns diameter. Partikelstorlekar mellan 0,5 och 20 μm kan detekteras med en upplösning av 52 diameterintervall vid koncentrationer upp till 1000 partiklar per kubikcentimeter. Partikelstorleksfördelning och koncentration kan mätas upp till en gång per sekund med full upplösning.



Figur 10. Arbetsprincipen för APS (Aerodynamic Particle Sizer).

Figure 10. Working principle for APS (Aerodynamic Particle Sizer). The particles are accelerated in a controlled manner and the resulting particle velocity, which depends on the aerodynamic diameter, is measured by two separated laser beams (to the right).

Provet kommer in i ett centralt rör, placerat koncentriskt i ett yttre, koniskt munstycke. Ren luft leds parallellt med provet runt det centrala röret och genom det koniska munstycket, där lufthastigheten ökar. Det accelererande luftflödet drar med sig partiklarna från det inre röret och accelererar dem. Partiklarna kan vara olika stora och har därmed också olika massa. Deras acceleration kommer att bestämmas av deras kontakt med luften respektive den mot accelerationen verkande masströgheten. En partikels hastighet, när den lämnar accelerationszonen i det koniska munstycket, kommer att vara ett direkt mått på partikelns aerodynamiska diameter. Varje partikel detekteras två gånger, när den passerar två ljusstrålar med ett inbördes avstånd av cirka 100 μm .

4.6 Optisk In-situ analysator

Ett kontinuerligt stoftmätningssinstrument finns installerat efter fullskalanläggningens elfilter (punkt 1 i Figur 2). Instrumentet är tillverkat av Durag och har modellbeteckningen D-R 800. Mätområdet är 0-200 mg/m^3 stoft och enligt tillverkaren är noggrannheten 1% av mätområdet. Mätprincipen bygger på "forward scattering" av laserljus som leds in i en sond med fiberoptik. Laserljuset träffar gasen i en mätsträcka och en ljussensor mäter ströjluset som stoftpartiklar i gasen reflekterar. Enligt tillverkaren kan instrumentet kalibreras mot filterbaserade totalstoftmätningar.

5 Resultatredovisning

Totalstofmätningar enligt EN13284-1 har genomförts uppströms och nedströms WESP för att på så sätt mäta stoftavskiljning över WESP vid olika driftfall. ELPI-mätningar har gjorts parallellt med totalstofmätningarna för att jämföra resultaten från dessa metoder med varandra. För att jämföra stoftavskiljning från andra utrustningar med prestanda för WESP har totalstofmätningar uppströms och nedströms Renovas kondenseringskrubber och slangfilter utförts. Koncentration av partiklar före filtret, det vill säga ingående koncentration (C_{in}) och koncentration efter filtret (utgående koncentration C_{ut}) ger stoftavskiljningen η :

$$\eta = \frac{C_{in} - C_{ut}}{C_{in}}$$

5.1 Driftfall för WESP

WESP kördes vid ett flertal olika driftfall. Följande parameterar varierades: spänning över WESP, gashastighet genom WESP med respektive utan kontinuerlig kondensering i WESP. Ett antal realtidsmätningar med två ELPI instrument gjordes innan stofmätningarna för att välja ett representativt driftfall och en lämplig driftspänning i WESP-piloten. För stofmätningarna (Tabell 1 i avsnitt 5.2.1) valdes 46 kV, som baserat på förförsöken bedömdes ge en bra avskiljningsgrad. Merparten stofmätningar genomfördes vid en referensgashastighet som kallas 100% och kondensering, vilket benämns ”cond”. Gashastigheten varierades mellan 50% och 143%.

Utöver detta varierar pannans drift och bränsle kontinuerligt. Ett stort antal driftparametrar från fullskaleanläggningen har undersökts i form av minutmedelvärden för att studera inverkan av de externa driftförhållanden som projektet ej kunnat påverka. Medelvärden har beräknats för provtagningsperioderna.

5.2 Mätningar över WESP-pilot

Pilotanläggningen har fungerat stabilt vid olika driftfall och haft mycket hög tillgänglighet. Partikelavskiljning över WESP har bestämts med hjälp av parallella stofmätningar och parallella on-line mätningar med ELPI på rågas och rengas.

Den framtagna metodiken för att provta i fuktmättad rökgas på 60-70 °C har fungerat väl. Systemet är dock känsligt. Det behöver ständig tillsyn för att undvika kondensation och om man späder mycket fås hög mätosäkerhet.

5.2.1 Stofmätningar

I Tabell 1 visas resultaten från samtidiga stofmätningar uppströms och nedströms WESP-piloten. Samtliga rengashalter efter WESP-enheten är under 0,3 mg/Nm³ tg, vilket motsvarar 3% av gällande emissionsgränsvärde och medelvärdet var hälften av detta. Avskiljningsgraden har varit bättre än 97% för samtliga mätningar och medelvärdet var 99%.

Tabell 1. Stoftmätningar över WESP pilotanläggningen gjorda vid spänningen 46 kV betecknade med normerat gasflöde tillsammans med, temperaturdifferens för kollektorkondensering, SO₂ före ESP, stoft efter ESP. Alla stofthalter är vid torr gas och 11% O₂.

Table 1. Dust measurements over the WESP-unit operating at 46 kV. The labels in the left column denote normalized gas velocity together with collector condensing operation and LiBr tracing. ΔT is the temperature difference between gas and collector cooling liquid. SO₂ is measured upstream of the ESP. Dust (Stoft) is measured as dry gas 11% O₂ downstream (e) of ESP, upstream (f) and downstream (e) of the WESP-unit. The removal efficiency (Avsk.) over the WESP is given in %.

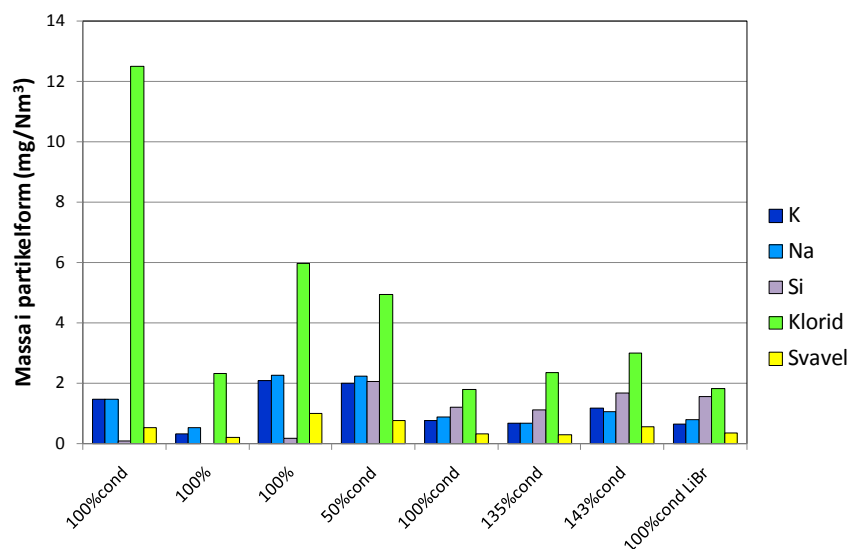
Beteckn.	Datum	ΔT kond °C	SO ₂ f ESP mg/Nm ³	Pos 1, Fig2.	Pos 2, Fig 2.	Pos 3, Fig 2.	Avsk. %
				Stoft e ESP mg/Nm ³	Stoft f WESP mg/Nm ³	Stoft e WESP mg/Nm ³	
100%cond	3/5	23	133	54,8	28,0	0,26	99,1%
100%	4/5	0	141	20,2	6,2	0,18	97,0%
100%	20/6	0	331	40,2	19,1	0,06	99,7%
50%cond	21/6	10	576	19,3	16,9	0,09	99,5%
100%cond	22/6	11	369	17,5	13,7	0,29	97,9%
135%cond	23/6	15	773	15,5	15,2	0,07	99,6%
143%cond	27/6	8	254	10,6	13,8	0,11	99,2%
100%condLiBr	29/6	7	402	11,5	8,4	0,08	99,0%
Medelvärde		9	372	23,7	15,2	0,14	99,1%

Sammansättningen, i termer av massa, på stoftet uppströms WESP-enheten visas i Tabell 2 och Figur 11 - Figur 13. Klor, kalium, natrium, kisel och svavel dominerar sammansättningen. Bland spårämnen dominerar bromid och järn. Sammansättningen, i termer av substansmängd, visar att det i ett par av försöken är överskott på kloridjoner i förhållande till positiva joner. Det visar också att tillsatsen av LiBr påverkar stoftsammansättningen. Stoftkoncentrationen nedströms WESP-enheten domineras av kisel, men är så mycket mindre än uppströms att dess sammansättning inte kan åskådliggöras i diagrammen i Figur 13.

Tabell 2. Halter av olika ämnen i totalstoftmättningsfilter, före och efter WESP- pilot-anläggningen (position 2 och 3 i Figur 2) gjorda vid spänningen 46 kV. Alla koncentrationer är i mg/Nm^3 tg., 11% O_2 . Driftfallen beskrivs i Tabell 1.

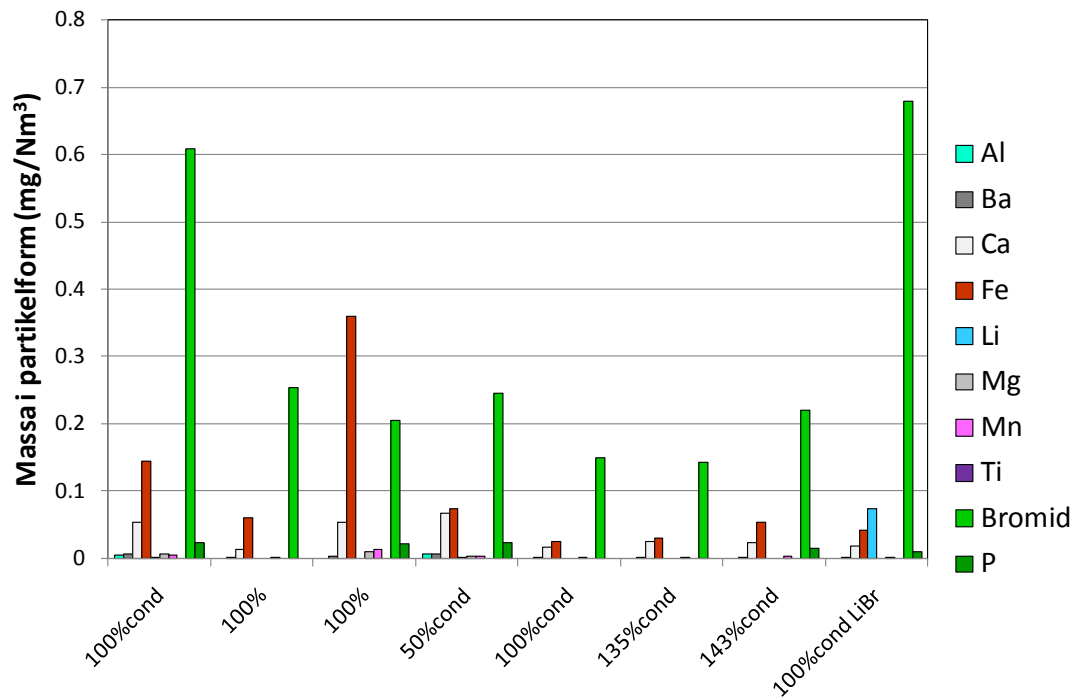
Table 2. Mass concentrations in mg/Nm^3 (dg., 11% O_2) of different elements in the dust upstream and downstream ("före" = position 2 and "efter" = position 3 in Figure 2). The WESP-unit operated at 46 kV. Labels are according to Table 1.

	100%cond före	100% före	100% före	50%cond före	100%cond före	135%cond före	143%cond före	100%cond LiBr, före	100%cond LiBr, efter
Al	5,7E-03	-	-	7,3E-03	-	-	-	-	-
Ba	6,0E-03	1,6E-03	3,6E-03	7,0E-03	1,1E-03	2,1E-03	2,1E-03	1,7E-03	-
Ca	5,3E-02	1,3E-02	5,4E-02	6,7E-02	1,7E-02	2,4E-02	2,3E-02	1,9E-02	-
Fe	1,4E-01	6,0E-02	3,6E-01	7,4E-02	2,5E-02	3,0E-02	5,4E-02	4,2E-02	1,4E-06
K	1,5E+00	3,3E-01	2,1E+00	2,0E+00	7,6E-01	6,9E-01	1,2E+00	6,4E-01	2,6E-07
Li	5,3E-04	-	-	7,8E-04	-	-	-	7,4E-02	-
Mg	7,4E-03	-	1,1E-02	3,3E-03	-	-	-	-	-
Mn	5,6E-03	1,4E-03	1,4E-02	3,4E-03	9,3E-04	1,4E-03	2,5E-03	1,7E-03	2,8E-08
Na	1,5E+00	5,2E-01	2,3E+00	2,2E+00	8,8E-01	6,8E-01	1,1E+00	7,8E-01	-
P	2,4E-02	-	2,2E-02	2,3E-02	-	-	1,4E-02	9,5E-03	-
Si	9,6E-02	-	1,9E-01	2,1E+00	1,2E+00	1,1E+00	1,7E+00	1,6E+00	6,7E-05
Ti	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cl ⁻	1,3E+01	2,3E+00	6,0E+00	5,0E+00	1,8E+00	2,4E+00	3,0E+00	1,8E+00	5,0E-07
Br ⁻	6,1E-01	2,5E-01	2,1E-01	2,5E-01	1,5E-01	1,4E-01	2,2E-01	6,8E-01	-
SO ₄ ²⁻	1,6E+00	5,8E-01	3,0E+00	2,3E+00	9,8E-01	8,8E-01	1,7E+00	1,0E+00	3,9E-06



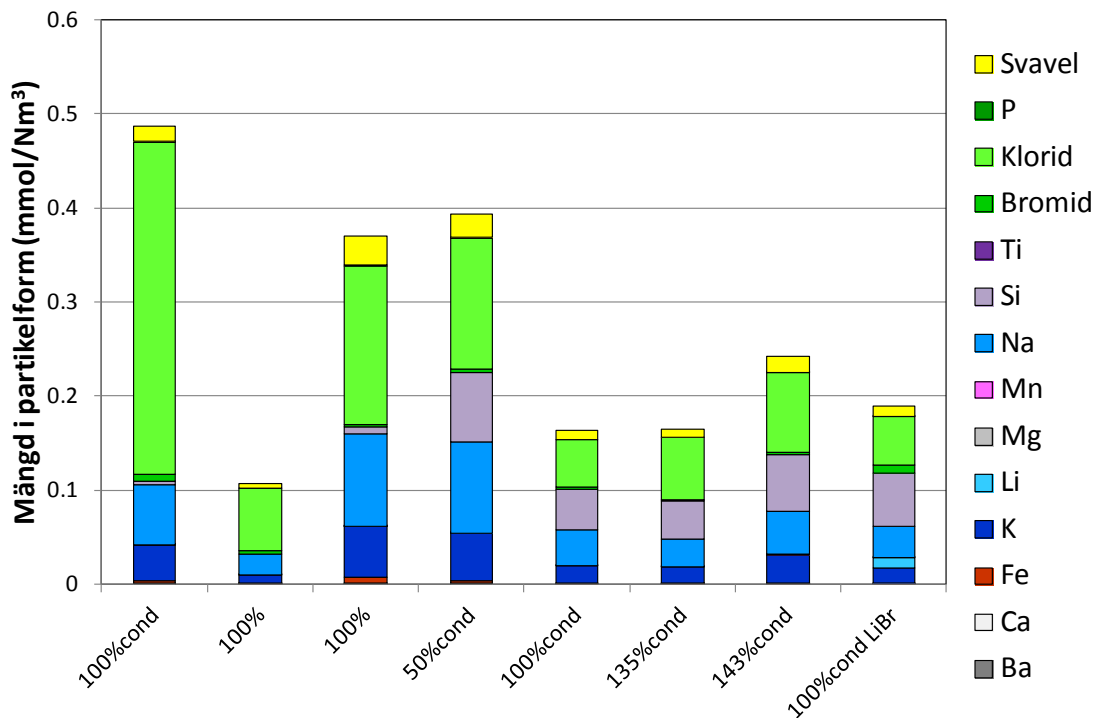
Figur 11. Masskoncentration av de mest förekommande grundämnena i stoft uppströms WESP.

Figure 11. Mass concentrations of main elements in the dust upstream of the WESP unit.



Figur 12. Masskoncentration av mindre förekommande grundämnena i stoft uppströms WESP.

Figure 12. Mass concentration of trace elements in the dust upstream of the WESP-unit.



Figur 13. Mängdkoncentration av grundämnena i stoft uppströms WESP.

Figure 13. Molar element concentrations upstream of the WESP unit.

5.2.2 Mätning av droppavskiljning med spårämne

Ett spårämnesförsök har genomförts med en känd mängd LiBr i skrubbervätskan, med syfte att beräkna droppmedryck från skrubbern och hur väl dessa droppar avskiljs i WESP. Dropparna indunstas i de uppvärmda stofffiltern och genom att analysera mängden Li och Br kunde halten droppar före och efter WESP beräknas genom att den sökta mängden droppar ger upphov till en känd mängd Li på stofffiltret, under antagandet att koncentrationen är samma i de medryckta dropparna som i skrubbervätskan. Mängden Li i stofffiltret var mer än 100 ggr högre än normalt vid spårämnesförsöket enligt Tabell 3 och allt Li i stofffiltret under spårämnesförsöket kunde därför antas komma ur droppmedryck från skrubbersteget, vars Li-koncentration är känd. Br-halten kunde inte lika tydligt härröras till LiBr-tillsatsen i skrubbersteget. I Tabell 4 visas de beräknade droppkoncentrationerna, som kunde bestämmas till 33 mg/Nm³ tg. före WESP och <0,023 mg/Nm³ tg. efter WESP med hjälp av Li-tillsatsen.

Tabell 3. Mängder av Li, Na, Cl och Br i stofffilter vid provtagning före och efter WESP med och utan LiBr dopning av skrubbervätska. Mängden Li i stofffiltret var mer än 100 ggr högre vid försöket.

Table 3. Amounts of Li, Na, Cl and Br in the dust sampling filters upstream and downstream of the WESP unit, with and without addition of LiBr tracer to the scrubbing liquid. The amount of Li was more than 100 times higher during the LiBr tracing experiment.

	Normal mängd i stofffilter före WESP. mg abs	Mängd i stofffilter före WESP vid LiBr- spår- ämnesförsök mg abs	Mängd i stofffilter efter WESP vid LiBr- spår- ämnesförsök mg abs
Li	≤ 0,0037	0,38	<0,002
Na	1,5-11	4	<0,1
Cl	6-82	9,4	0,061
Br	0,5-4	3,5	<0,05

Tabell 4. Uppmätt koncentration av Li, Na, Cl och Br i skrubbervätskan vid LiBr-spårämnesförsöket tillsammans med stoffkoncentrationerna av respektive ämne före och efter WESP (position 2 och 3 i Figur 2), tillsammans med droppkoncentrationer beräknade från Li och Br koncentrationerna från stoffprovtagningarna.

Table 4. Measured concentrations of Li, Na, Cl and Br in the scrubbing liquid during the LiBr tracer experiment together with the dust concentration of these elements upstream ("före") and downstream ("efter") of the WESP unit (position 2 and 3 in Figure 2). From these concentrations, the concentration and removal of droplets originating from the scrubber could be calculated upstream and downstream of the WESP unit.

	Skrubber- vätska mg/dm ³	Stoft före mg/Nm ³ tg	Ber. dropp- konc. före mg/Nm ³ tg	Stoft efter mg/Nm ³ tg	Ber dropp- konc. efter mg/Nm ³ tg	Avsk av droppar (%)
Li	2700	0,090	33	<6e-5	<0,023	>99,9
Na	2200	0,95		0,0031		
Cl	2000	2,2		0,0019		
Br	32000	0,83	26	0,0015	0,048	99,8

5.2.3 Masstorleksfördelning av stoftpartiklar

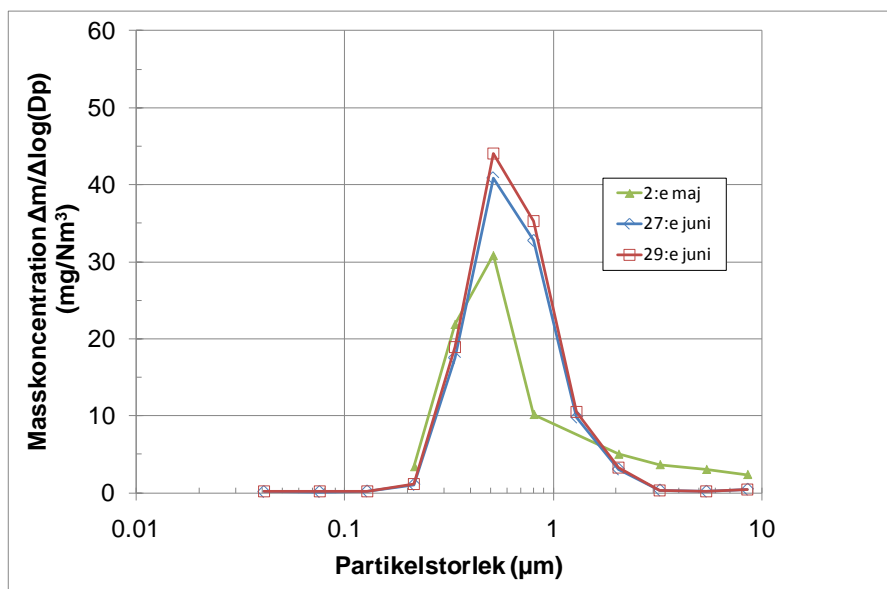
I Figur 14 visas masstorleksfördelning för stoftpartiklarna i rökgasen in till WESP. Högst koncentration hade partiklar med storlek kring 0,6 μm , kring denna storlek fanns maximum i storleksfördelning. Koncentrationerna av grova partiklar ($>1 \mu\text{m}$) var låga och likaså halterna av ultrafina partiklar under 0,1 μm . Masstorleksfördelningen mättes efter befintligt torrt ESP på Renova, vilket förklarar storleksfördelningen. Elektrostatiska filter har generellt ett minimum i partikelavskiljning och det befintliga filtret ser ut att ha detta minimum i området 0,2-2 μm . Men för att exakt säga hur minimum ser ut skulle det krävas mätning av partikelstorleksfördelning uppströms.

Genom att summera stoftpartiklar av alla storlekar som samlats in erhålls stoftkoncentration från DLPI-mätning (Tabell 5).

Tabell 5. Stofthalter från DLPI-mätningar före WESP pilotanläggningen (position 2 i Figur 2), vid torr gas och 11% O_2 .

Table 5. Dust concentrations from DLPI-measurements upstream of the WESP unit (position 2 in Figure 2), at dry gas and 11% O_2 .

Datum	Stoftmätning mg/Nm^3	DLPI mg/Nm^3
11 05 02	-	5,2
11 06 27	13,8	20,7
11 06 29	8,4	22,3

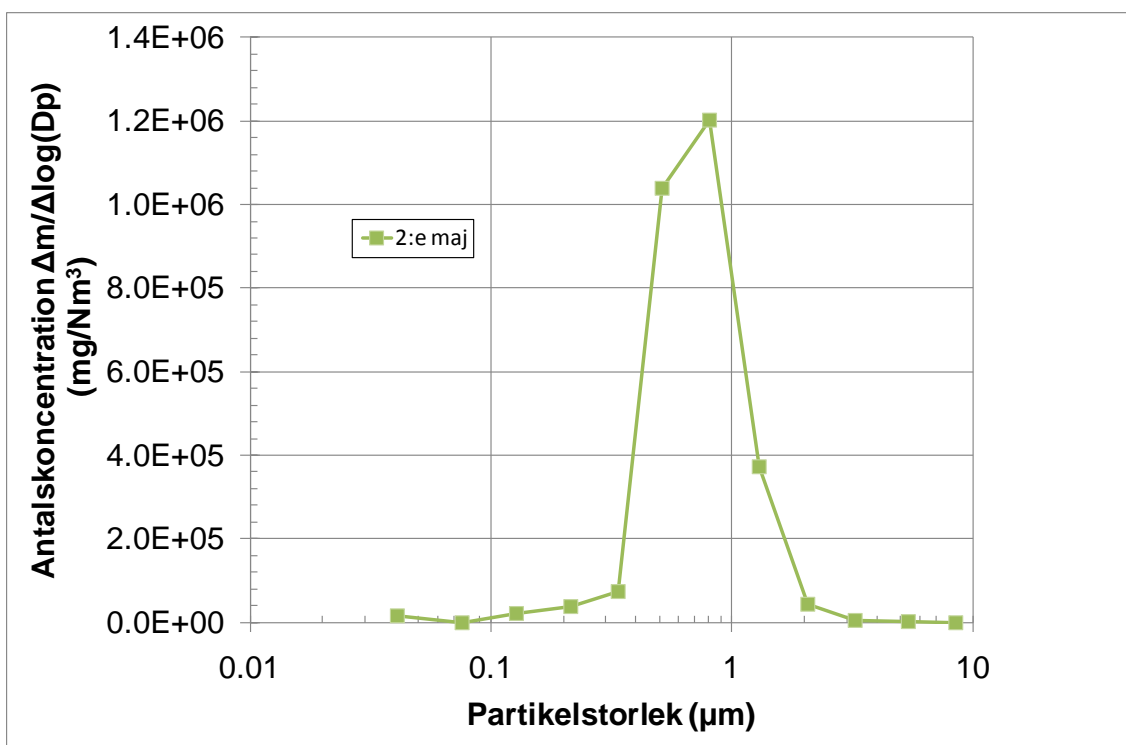


Figur 14. Masstorleksfördelning av partiklar före WESP mätt med gravimetrisk lågtrycks-impaktör (torr gasvolym, normerad till 11% O_2).

Figure 14. Mass size distributions of particles upstream of the WESP unit measured with gravimetric low pressure impactor (dry gas, normalized at 11% O_2).

5.2.4 Antalstorleksfördelning av stoftpartiklar

I Figur 15 visas antalstorleksfördelning för stoftpartiklarna i rökgasen in till WESP vid en mättag. Högst koncentration hade partiklar med storlek kring 0,8 μm , kring denna storlek fanns maximum i storleksfördelning. Koncentrationerna av grova partiklar ($>1 \mu\text{m}$) var låga och likaså halterna av ultrafina partiklar under 0,1 μm . En del i förklaringen till låga koncentrationer av grova partiklar är förluster av dessa i spädsystemet som partiklarna går genom före on-line-mätning.



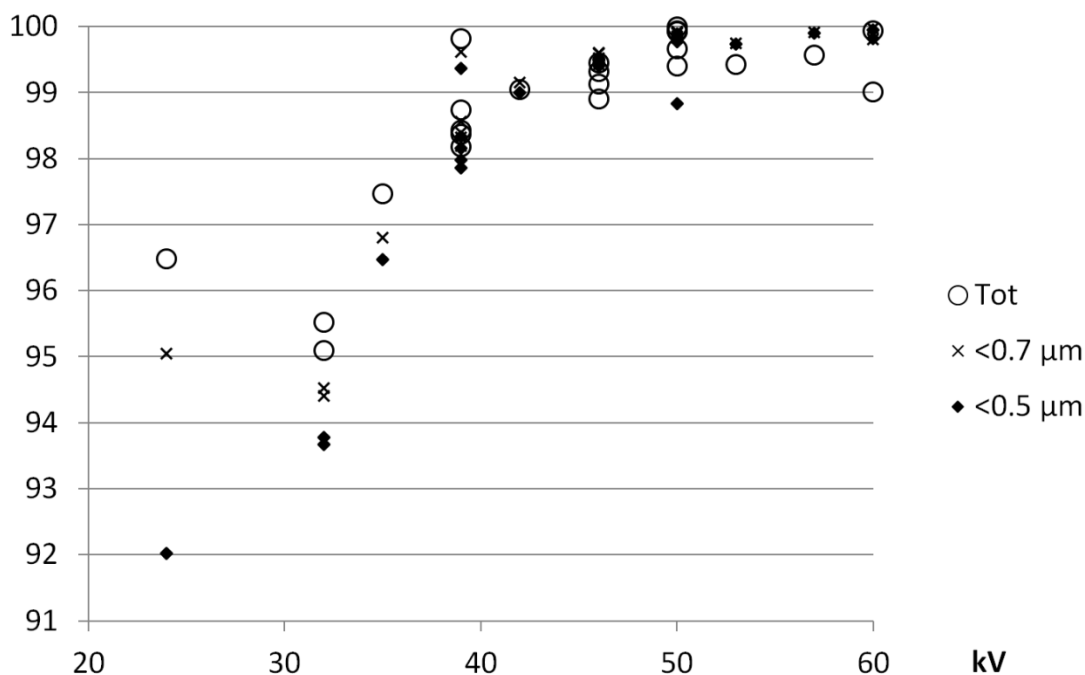
Figur 15. Antalstorleksfördelning av partiklar före WESP uppmätt 2/5, presenterad i våt gasvolym och normerad till 11% O₂ mätt med ELPI.

Figure 15. Number size distribution of particles upstream of the WESP unit on May 2nd, presented in wet gas volume and normalized to 11% O₂ measured with ELPI.

5.2.5 ELPI-mätningar

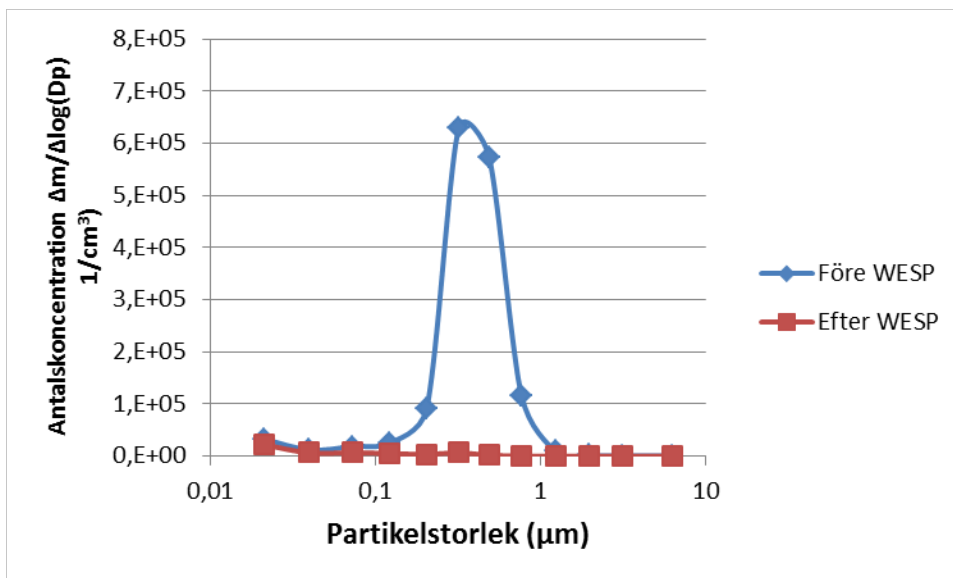
Avskiljning över WESP, beräknat från ELPI-mätningar, visas i Figur 16-17 nedan. Ett tydligt samband mellan avskiljningsgrad och WESP-spänning kan ses. Stoft- och ELPI-mätningarna för samma driftfall ger samma storleksordning på avskiljningsgraden.

Avskiljningsgrad (%)



Figur 16. Avskiljningsgrad (%) över WESP uppmätt med två ELPI, plottad mot elektrodspänning för 2/5 och 4/5 för 100% gashastighet och utan kollektorkondensering.

Figure 16. Removal efficiency (%) for the WESP-unit measured with two ELPIs vs. electrode voltage on 2/5/2011 and 4/5/2011 at 100% gas velocity, without collector condensing. Tot, <0.7 μm and <0.5 μm corresponds to the different size intervals included in the removal efficiency.



Figur 17. Antalskoncentrationer i ingående och utgående gas till WESP den 4/5.

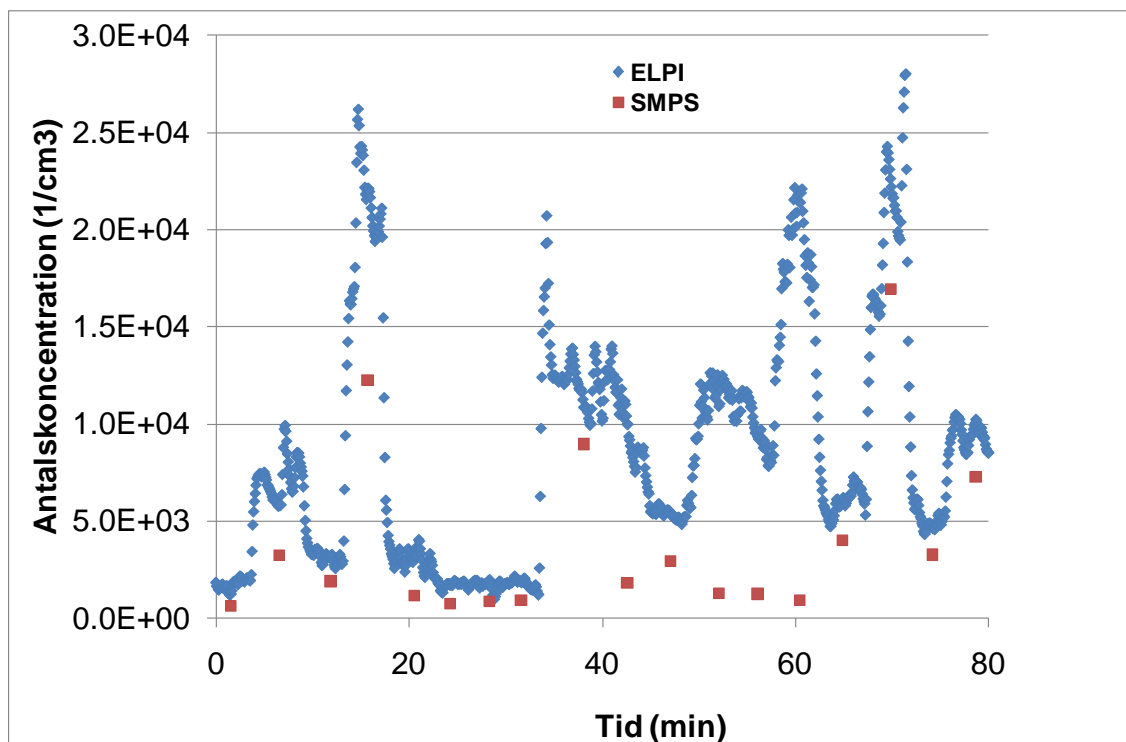
Figure 17. Number concentrations for different particle sizes, upstream (Före) and downstream (Efter) of the WESP unit.

5.3 Jämförande mätningar med olika mätmetoder

Kompletterande on-line-mätningar har genomförts med SMPS och APS (Aerodynamic Particle Sizer) parallellt med ELPI-mätning på rågas i ett antal driftfall. I Figur 18 jämförs antalskoncentration mätt med ELPI (i storleksområdet 0,007 μm till 8 μm) med antalskoncentration mätt med SMPS (0,015-0,661 μm) före WESP. Generellt är halterna från SMPS något lägre, precis som förväntat utifrån instrumentens olika mätområden. ELPI fångar upp snabba förändringar bättre.

Mätning med APS som mäter antalskoncentration i området 2 μm till 20 μm visade på låga halter partiklar, som endast förekom sporadiskt, sett över tiden.

Totalstoff mättes enligt metod [23], vilket är den av myndigheterna godkända metoden för att mäta totalstoffhalt (Mätosäkerhet ges i Tabell 9). I Tabell 6 visas totalstoffhalter och samtidiga medelvärdesbildade stoffhalter från Renovas optiska on-line-stoffmätning samt masskoncentrationer beräknade från ELPI-instrumentets antalskoncentrationer. Eftersom ELPI primärt mäter koncentration av antalet partiklar per volymsenhet görs en omräkning till masskoncentration före jämförelse med optisk on-line-mätning (Figur 19 - Figur 20). Först räknas om till koncentration volym partiklar per volymsenhet gas genom att anta att partiklarna som mäts är sfäriska. Därefter antas partiklarna ha en densitet på 1 g/cm^3 och genom att multiplicera volym med densitet fås masskoncentration partiklar. De olika metoderna för stoffhaltsmätning ger olika resultat och avvikelserna däremellan diskuteras i kapitel 6.4.1.



Figur 18. Jämförelse ELPI och SMPS mot tid (0 = 2011-05-02 20:52). Halterna är i utspädd gas uppmätta före WESP (Pos 2 i Figur 2).

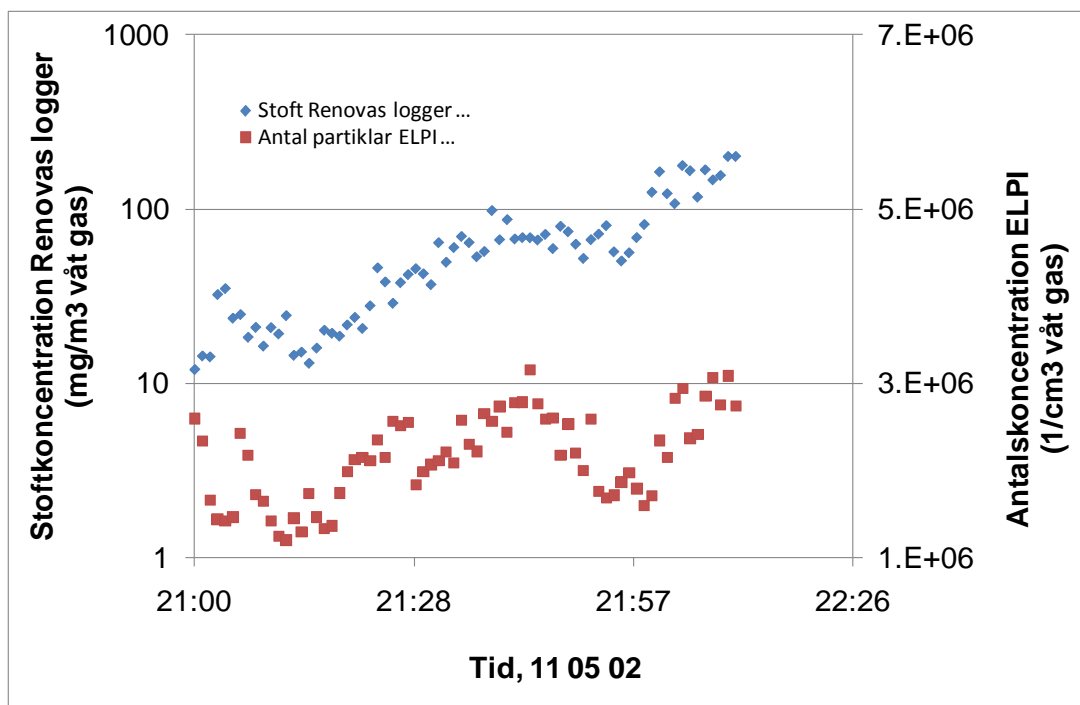
Figure 18. Comparison between ELPI and SPMS vs time (0 = 2011-05-02). Concentrations are in diluted gas measured upstream of the WESP unit (position 2 in Figure 2).

Tabell 6. Totalstoftmätningar, optiska- och ELPI-mätningar över WESP pilotanläggningen. Alla värden är angivna vid torr gas och 11% O₂. Masskoncentration för ELPI-mätning beräknad genom antagande om sfäriska partiklar och densitet 1 g/cm³.

Table 6. Dust (Stoft) concentrations, optical and ELPI measurements downstream of the ESP (efter) together with upstream (f) of the WESP unit. All concentrations are at dg., 11%O₂. Mass concentration for ELPI-measurement calculated by assuming spherical particles and density 1 g/cm³.

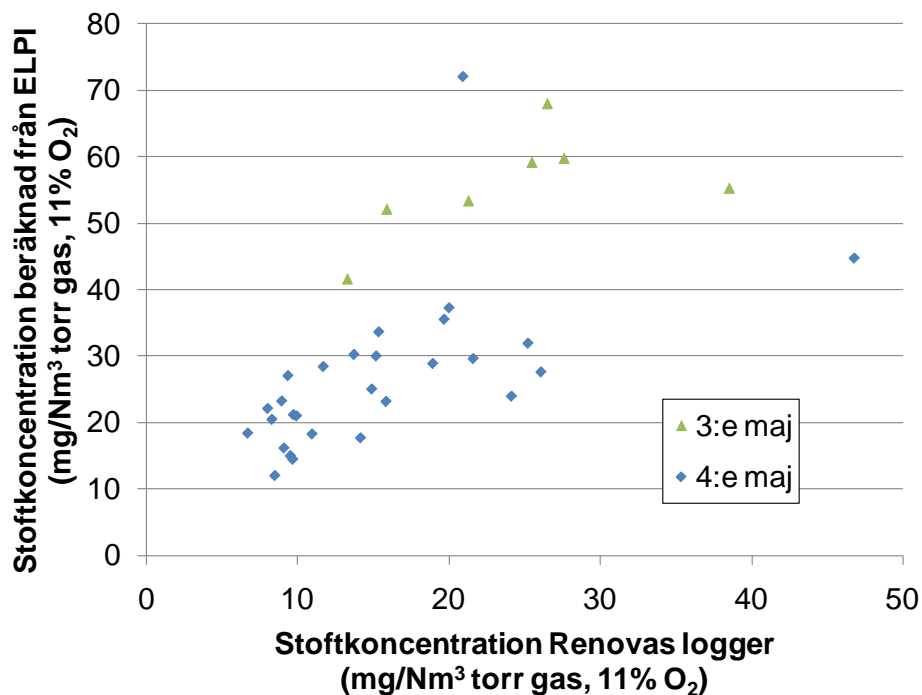
Datum	mg/Nm ³ Pos 2, Fig 2 f WESP Totalstoft	mg/Nm ³ Pos 1, Fig 2 efter ESP Optisk stoftmät.	mg/Nm ³ Pos 2, Fig 2 f WESP ELPI tot	mg/Nm ³ Pos 2, Fig 2 f WESP ELPI < 0,7 µm	mg/Nm ³ Pos 2, Fig 2 f WESP ELPI < 0,5 µm
2011-05-04	6,2	20	30	20	13
2011-06-20	19	40	110	47	23
2011-06-21	17	19	7,3	0,63	0,39
2011-06-27	14	11	67	36	12
2011-06-29	8,4	12	26	13	5,4

Datum	mg/Nm ³ Pos 3, Fig 2 e WESP Totalstoft	mg/Nm ³ Pos 3, Fig 2 e WESP ELPI tot	mg/Nm ³ Pos 3, Fig 2 e WESP ELPI < 0,7 µm	mg/Nm ³ Pos 3, Fig 2 e WESP ELPI < 0,5 µm
2011-05-04	0,18	0,16	0,07	0,06
2011-05-03	0,26	0,14	0,09	0,07



Figur 19. Jämförelse mellan ELPI uppströms WESP (position 2 i Figur 2) och Renovas optiska in-situ-stoftmätare nedströms ESP (position 1 i Figur 2) mot tid.

Figure 19. Comparison between ELPI (upstream of WESP (pos 2, Fig 2), red squares, right axis) and optical in-situ dust instrument (downstream of ESP (pos 1, Fig 2), blue diamonds, left axis) vs. time. The flue gas passes a quench and wet HCl scrubber stage, with an estimated dust removal of 50%, between these sampling positions.



Figur 20. Plot av ELPI (Pos 2 i Figur 2) mot kontinuerlig optisk stoftmätare (Pos 1 i Figur 2).

Figure 20. ELPI upstream of WESP (Pos 2) vs optical in-situ dust instrument downstream of ESP (Pos 1, Fig 2). The flue gas passes a quench and wet HCl and pilot scrubber stage, with an estimated dust removal of 50%, between these sampling positions.

5.4 Mätningar över befintlig kondenseringskrubber och slangfilter

För att jämföra mellan olika stoftavskiljningstekniker gjordes även mätningar över den befintliga kondenseringskrubbern och slangfiltret på förbränningslinje 1, där pilotförsöken utfördes. Stoftmätningarna över kondenseringskrubbern presenteras i Tabell 7. En energiförbrukning från tryckfallet normerat till 100 000 Nm³/h tg. (motsvarande en avfallspanna med kapaciteten 20 ton/h) presenteras också. I denna energiförbrukning har ingen hänsyn tagits till andra energiförbrukningar och energivinster från kondenseringskrubbern än bara tryckfallet. Ingen hänsyn har heller tagits till fläktverkningsgrad, vilket gör att den verkliga siffran är något högre.

Tabell 7. Stoftmätningar över befintlig kondenseringskrubber (Pos. 4 och 5 i Figur 2).

Table 7. Dust measurements upstream (Före) and downstream (Efter) of the full-scale condensing scrubber (Sampling positions 4 and 5 in Figure 2).

Datum	Stoftkonc. före (mg/Nm ³ tg. 11% O ₂)	Stoftkonc. efter (mg/Nm ³ tg. 11% O ₂)	Stoftavskiljn. (%)	Energiförbr. Från ΔP (kW/100000 Nm ³ /h tg.)
11 02 04	39	5,5	86	58
11 02 07	22	6,1	73	59

För att jämförelsen mellan olika avskiljningsmetoder skall vara rättvis bör halterna på ingående gas vara jämförbara. Normalt doseras kol till gasen uppströms slangfiltret, men denna stängdes tillfälligt av under försöket för att komma ner till jämförbara halter. I praktiken visade det sig att dessa halter var lägre än ingående halter till WESP-piloten, vilket förklarar de låga avskiljningsgraderna i Tabell 8. Vid högre ingående stofthalter är avskiljningsgraden över ett väl fungerande slangfilter normalt mycket högre - typiskt >99%. Medelvärdet för utgående stofthalt var 0,3 mg/Nm³ (t.g. 11% O₂) år 2010 och ingående halt under normal drift med kalk och koldosering ligger uppskattningsvis storleksordningen 100 mg/Nm³, vilket motsvarar en avskiljningsgrad på ca. 99,7%

Tabell 8. Stoftmätningar före och efter befintligt slangfilter (position 5 och 6 i Figur 2).

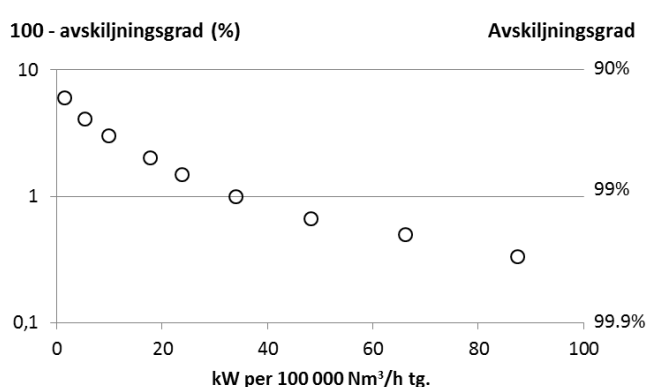
Table 8. Dust measurements upstream and downstream of the full-scale bag house filter ("före" = position 5, "efter" = position 6 in Figure 2) without carbon injection in operation. Normally, removal efficiencies (Avskiljn.) are >99%. The Energy consumption has been normalized to 100 000 Nm³/h, d.g.

Datum	Stoftkonc. före (mg/Nm ³ tg. 11% O ₂)	Stoftkonc efter (mg/Nm ³ tg. 11% O ₂)	Avskiljn. (%)	Energiförbr. Från ΔP (kW/100000 Nm ³ /h tg.)
11 03 30	3,9	0,41	90%	26
11 03 31	0,47	0,18	62%	27

5.5 Energiförbrukning för WESP

Tryckfallet över WESP-sektionen har uppmätts till < 10 Pa, vilket är försumbart jämfört med tryckfallet i kanaler, samt in- och utloppsförluster.

Energiförbrukningen för en WESP uppskalad till 100 000 Nm³/h tg. har beräknats vid olika driftspänningar och tillhörande avskiljningsgrader enligt Figur 21. Avskiljningsgradernas beroende av elektrospänningen har beräknats från ELPI-mätningarna och för att en korrekt absolutnivå skall erhållas har medelvärdet från samtliga stoftmätningar använts.



Figur 21. Stoftavskiljningsgrad avsatt mot beräknad energiförbrukning för en WESP uppskalad från pilotanläggningen till en fullskalanläggning med rökgasflödet 100 000 Nm³/h tg.

Figure 21. Particulate removal efficiency (right axis) vs. calculated scaled-up energy consumption for a WESP operating at 100 000 Nm³/h dg.

5.6 Materialbeständighet för elektriskt ledande GAP

Pilotanläggningen har körts dygnet runt under ca 10 veckor, vilket är den tid som stod till förfogande inom ramen för den relativt korta projekttiden och planerade underhållsstopp. Visuellt inspektion av kollektorytorna visar inga tecken på påverkan från driften i form av punktbränning eller annan påverkan från högspänningen. Vår bedömning är att andra typer av förstörande provning skulle gett samma resultat eftersom materialet såg helt opåverkat ut. Detta trots att piloten under ungefär halva tiden kördes vid 50 respektive 60 kV, vid vilken risken för överslag är betydligt större än vid den spänning som valts som normaldrift (46 kV). Dessutom har WESP piloten under dessa 10 veckor körts utan kollektorkylningen i drift. Med kollektorkylning i drift bildas kontinuerligt en vattenfilm som minskar risken för skador på GAP-materialet vid överslag. Piloten har alltså körts under mycket svårare förhållanden i detta test än i en verklig applikation. Vi bedömer att om materialet inte skulle varit lämpligt i denna högspänningsapplikation, så skulle detta ha visat sig som visuellt synbar påverkan inom provperioden. Inte heller någon typ av påverkan från den kemiska miljön kunde påvisas, vilket är väntat eftersom GAP sedan flera decennier tillbaka används som konstruktionsmaterial i miljöer som är betydligt mer aggressiva än den i WESP-piloten, tex. i HCl-skrubbar. Förväntad livslängd hos GAP-materialet i en WESP bedöms därför motsvara den hos andra rökgasreningskomponenter konstruerade i GAP, som tex. skrubbar och kanaler.

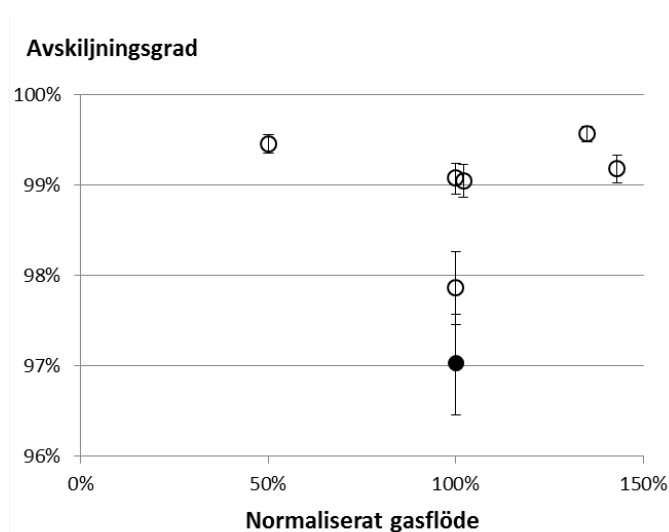
6 Resultatanalys

Installationen av WESP-pilotanläggningen vid Renovas fullskaliga Waste-to-Energy anläggning har genomförts inom ramen för detta projekt. Vid de samtidiga stoftmätningarna uppströms och nedströms WESP-piloten var samtliga rengashalter efter WESP-enheten under $0,3 \text{ mg/Nm}^3 \text{ tg.}$ och avskiljningsgraden var bättre än 97% för samtliga stoftmätningar. Sammanfattningsvis har medelvärdet för stoftmätningarna varit $15,2 \text{ mg/Nm}^3 \text{ tg.}$ i ingående gas och $0,14 \text{ mg/Nm}^3 \text{ tg.}$ i utgående gas, vilket ger en medelavskiljningsgrad strax över 99%. Demonstrationen av pilotanläggningen har varit framgångsrik och anläggningen har fungerat mycket väl.

6.1 WESP-pilotanläggning

För att undersöka vilka parametrar som påverkar avskiljningsgraden över WESP-piloten, så har stoftmätningarna som presenterades i Tabell 1 plottats mot gashastigheten i Figur 22, mot ingående stofthalt i Figur 23, mot SO_2 halten efter pannan i Figur 24 och mot temperaturdifferensen i kollektorkondenseringen i Figur 25. Felstaplarna för avskiljningsgraderna har beräknats ur mätosäkerheterna för stoftmätningarna enligt avsnitt 6.4.1. Mätningen som gjordes 20/6 har exkluderats från figurerna nedan eftersom pannan inte var i full drift då. Avskiljningsgraden vid denna mätning var oförklarligt hög.

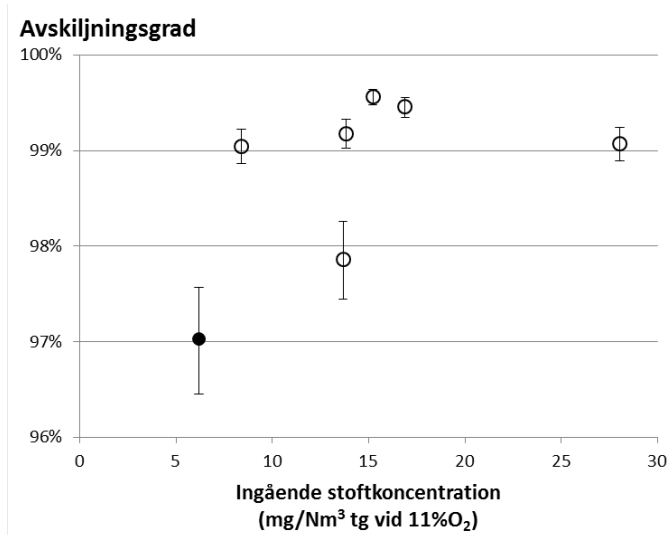
Enligt Deutschekvationen i avsnitt 2.1.5 minskar avskiljningsgraden vid ökande gashastighet. Spridningen i avskiljningsgrad är dock relativt stor även när gasflödet är konstant och enligt Figur 22 är spridningen signifikant större än konfidensintervallen för de enskilda mätningarna. Avskiljningsgraden verkar därför bero mer på andra parametrar än gashastigheten vilket undersöks nedan.



Figur 22. Avskiljningsgrad i % över WESP mot normaliserad gashastighet i %. Ofyllda cirklar motsvarar kollektorkondensering.

Figure 22. Removal efficiency (%) of the WESP unit vs. normalized gas velocity (%). Empty circles correspond to collector condensation in operation.

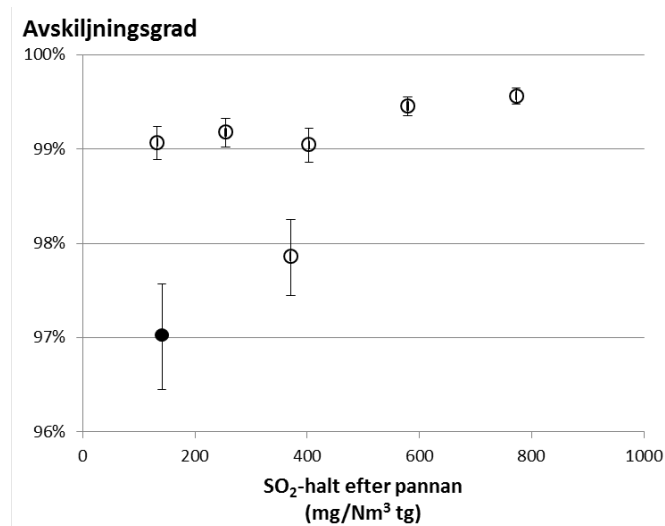
I Figur 23 syns en svag tendens att avskiljningsgraden förbättras med högre ingående stoftkoncentration. Skillnaderna mellan de olika ingående stofthalterna beror sannolikt på skillnader i grovfraktion stoft, eftersom den har stor påverkan på stofthalten. Höga stofthalter innebär troligen en högre andel stora partiklar, vilket observerats i andra studier, se till exempel referens [18]. Eftersom stora partiklar har högre avskiljningsgrad, så ökar då den totala avskiljningsgraden med högre stofhalt. En annan tänkbar orsak skulle kunna vara att mätosäkerheten ökar vid lägre utgående halter.



Figur 23. Avskiljningsgrad över WESP piloten plottad mot ingående stofthalt. Ofyllda cirklar motsvarar kollektorkondensering i drift.

Figure 23. Removal efficiency (%) of the WESP unit vs. inlet dust concentration in mg/Nm³ dg., 11%O₂. Empty circles correspond to collector condensation in operation.

I Figur 24 visas avskiljningsgraden mot SO₂-halt efter pannan.

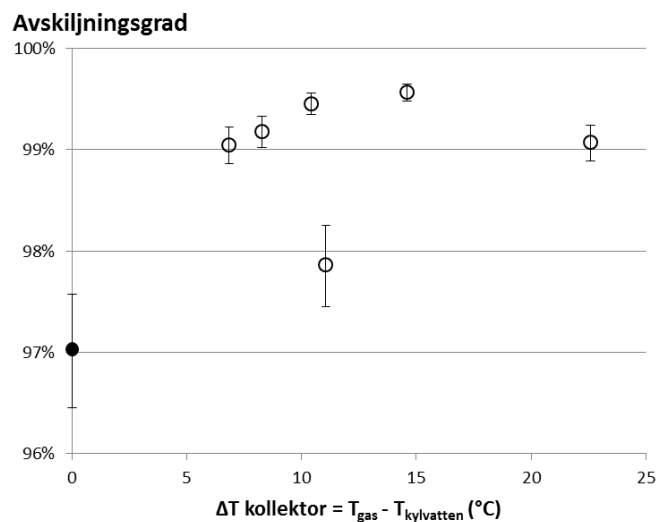


Figur 24. Avskiljningsgrad över WESP piloten plottad mot SO₂-halt efter pannan. Ofyllda cirklar motsvarar kollektorkondensering i drift.

Figure 24. Removal efficiency (%) of the WESP unit vs. SO₂ concentration downstream of the boiler. Empty circles corresponds to collector condensation in operation.

Det är välkänt att en högre SO_2 -halt ökar avskiljningsgraden i torra elektrofilter genom att sänka resistiviteten hos stoftet. I ett vått elektrofilter sänks partiklarnas resistivitet emellertid av den ledande vattenfilmen på partiklarnas yta. Effekten av SO_2 borde därför teoretiskt sett inte vara lika påtaglig i ett vått elektrofilter.

I Figur 25 visas avskiljningsgraden mot kollektorkylningens temperaturdifferens. Det är uppenbart att avstängd kollektorkondensering (punkten $\Delta T=0$ °C) har lägst avskiljningsgrad (om man bortser från mätningen 20/6 när pannan inte var i full drift). Den sammanvägda bilden av alla mätpunkter indikerar att ett högre ΔT i kollektorkylningen förbättrar avskiljningsgraden.



Figur 25. Avskiljningsgrad över WESP-piloten avsett mot temperaturdifferensen mellan rök-gas och kylvattnet i kollektorn. Punkten 0°C motsvarar avstängd kollektor-kondensering (fylld cirkel).

Figure 25. Removal efficiency (%) of the WESP unit vs. ΔT of the condensing collector. Empty circles corresponds to collector condensation in operation.

6.2 Kemisk sammansättning hos stoftet

De dominerande elementen är dem man kan förvänta sig vid avfallsförbränning. Det innebär riklig förekomst av klor och alkalimetaller som troligen härrör från förångning i eldstaden av alkaliklorid som sedan kondenserat och bildat partiklar. Beroende på bränslet kan svavel i form av sulfat också förekomma i partiklarna.

Bland de mindre förekommande elementen märks främst bromid som kan ha sitt ursprung i förekomsten av flamskyddsmedel i bränslet. I ett fall doserades LiBr, vilket ses tydligt i Figur 12 och Figur 13. Även järn och kalcium förekommer och kan antas avspegla bränslets sammansättning.

Partikelsammansättningen nedströms WESP skiljer sig från den uppströms. Kiselhalten är mycket högre och detta kan förklaras med att elektrostatiske filter bäst avskiljer partiklar med låg resistivitet. Kisel är en isolator och har således hög resistivitet varför kiselrika partiklar i högre grad slipper igenom filtret.

6.3 Jämförelse mellan olika stoftavskiljningsmetoder

I avsnitt 5.4 och 5.5 presenterades normerade energiförbrukningar för den befintliga kondenseringskrubbern, slangfiltret och WESP piloten omräknade till 100 000 Nm³/h tg. Nedan jämförs dessa tre nedströms stoftavskiljningsmetoder och en venturiskrubber med följande antaganden: 8000 drifttimmar/år, elkostnad = 400 kr/MWh, kostnad för lågtrycksånga = 250 kr/MWh, kreditering från fjärrvärme = 250 kr/MWh samt verkningsgrad för fläkt, motor och frekvensomriktare på 80, 95 respektive 98%. Följande energikostnader erhålls när siffrorna har normerats till en typanläggning med 100 000 Nm³/h tg. Det är dock viktigt att notera att slangfiltret även kan utrustas med koldosering för avskiljning av dioxiner och Hg samt att kondenseringskrubbarnas främsta funktion är energiåtervinning.

Kondenseringskrubbern i försöksanläggningen har en normerad kostnad för gastryckfall som är i storleksordningen 0,25 Mkr/år (tryckfallet är här sannolikt något högt jämfört med liknande kondenseringskrubbar). Stoftavskiljningsgraden uppmättes till 86% respektive 73%, vilket lägre än för WESP och slangfilter, jämförbart med en annan kondenseringskrubber (81%), och högre än värden rapporterade för en lamellkondensator (31%) och tubkondensator (0%) [25]. För den totala energibalansen tillkommer även elförbrukningen för cirkulations- och fjärrvärmepumpar som kostar i storleksordningen 0,3 Mkr/år och intäkten för 11 MW fjärrvärme (20 °C temperatursänkning) som är 11 Mkr/år vid 50% nyttjandegrad över året.

Slangfiltret i försöksanläggningen har ett tryckfall som kostar omkring 0,1 Mkr/år, en kostnad för tryckluft (pulsrensning) som grovt uppskattas till 0,1 Mkr/år (baserat på 60 Nm³/h och 0,2 kr/Nm³), samt en kostnad för återvärmning på 1,6-2 Mkr/år (vid 20 °C återvärmning som motsvarar 800-1000 kW med respektive utan kondensering i drift). Återvärmning före ett slangfilter är endast nödvändig om gasen är fuktmättad, vilket är förutsättningen för jämförelsen med en WESP. Utgående medelstofthalt var i denna studie lägre för WESP än för det studerade slangfiltret (0,14 jämfört med 0,3 mg/Nm³ tg., 11% O₂).

En venturiskrubber med 99% avskiljningsgrad vid 1 µm har ett tryckfall på i storleksordningen 7500 Pa [17][26], vilket motsvarar 1.4 Mkr/år i elkostnad. Uppgifter finns på ännu högre tryckfall: 15000 Pa för 95% avskiljning av 0,5 µm partiklar [7].

WESP enheten i detta arbete har en energiförbrukning för spänningsmatning och tryckfall som motsvarar 0,1 Mkr/år vid avskiljningsgraden 99%, där huvuddelen av de ingående partiklarna är < 1 µm. En fördel med WESP-enheten är emellertid att spänningen snabbt kan anpassas efter den önskade avskiljningsgraden, så att energiförbrukningen kan optimeras.

Sammanfattningsvis har WESP den lägsta specifika energiförbrukningen av de studerade slutstoftavskiljningsteknikerna.

6.4 Orsaker till avvikelser mellan olika mätmetoder

6.4.1 Totalstoff

Mätning av masskoncentration stoft görs mest korrekt med hjälp av den standardiserade mätmetod som används i projektet [23], vilken också beskrivs väl i Värmeforsk mättehandbok [27]. I projektet har metoden följts så långt det varit praktiskt möjligt. Det innebär

bland annat att rökgasen sugits ut isokinetiskt (samma hastighet i sondspets som i rökgaskanal) för att få ett representativt prov, gasur kalibrerats och att mer än tillräckligt fin våg använts (+/- 0,0001 g). Avvikelse från metoden har gjorts genom att sonder ej traverserats i mätplanet under mätning över WESP och det har gjorts med hänsyn till personsäkerhet då WESP varit spänningssatt. Denna avvikelse från metoden bedöms trots allt inte ha så stor betydelse för mätosäkerheten på grund av stabil flödesbild före WESP tack vare pluggflöde ut från skrubbern som WESP är integrerad med. Mätosäkerheter för stoftmätningar i de olika mätpunkterna har beräknats utgående från SS-EN 13284-1 [23]. Hänsyn har tagits till provpunkts representativitet, isokinetisk avvikelse, förlust av stoft vid hantering, vägningsfel, osäkerhet vid beräkning av provgasvolym och osäkerhet vid byte av kondensatflaska. I Tabell 9 visas mätosäkerheter för de olika stoftmätningar i de olika provpunkterna i projektet. Vid mätningarna före kondenseringskrubber och slangfilter traverserades sonden. Mätosäkerheterna för stoftmätning över kondenseringskrubber och slangfilter var 12 respektive 11% och motsvarande osäkerheter efter avskiljningsutrustningarna var 11% i båda fallen. Vid mätning uppströms WESP var mätosäkerheten 8% och nedströms WESP var den 17%. En viktig förklaring till att den är så hög nedströms WESP är de mycket låga halter som uppmättes efter WESP, vilket ger stort bidrag från vägningsfel. Vid beräkning av konfidensintervallen för avskiljningsgraderna har en elliptisk 95%-ig konfidenskontur för ingående och utgående halter konstruerats för varje mätfall under antagande att mätfelen på rå- och rengas är okorrelerade. Det 95%-iga konfidensintervallet för avskiljningsgraden ges då av den högsta respektive lägsta avskiljningsgraden på randen av detta elliptiska konfidensområde.

Tabell 9. Mätosäkerhet för totalstoftmätningar (95% konfidensintervall)

Table 9. Measurement uncertainty of dust measurements upstream (Före) and downstream (Efter) of the WESP unit at the 95% confidence level.

	Före (%)	Efter (%)
WESP	8	17
Kondenseringskrubber	12	11
Slangfilter	11	11

6.4.2 Optisk mätning

Renovas in-situ-instrument för kontinuerlig övervakning av stofthalt ger en god indikation på stofthalten som går in till WESP. Instrumentet gör dock ingen direkt mätning av stofthalt utan angiven halt bygger på kalibrering av en optisk signal gentemot ett antal standardiserade totalstoftmätningar. Eftersom det är avfall som förbränns kan stoftets optiska karaktär variera särskilt mycket och det gör det svårt att kalibrera en in-situ-mätare noggrant. Ytterligare en anledning till skillnader mellan halter mätta med in-situ-mätare och projektets totalstoftmätningar före WESP är att mätpunkterna skiljer sig. In-situ-mätaren sitter direkt efter elfiltret och stoftmätning före WESP gjordes i direkt anslutning till WESP. Mellan dessa mätpunkter passerar gasen en quench och två skrubbersteg.

6.4.3 Lågtrycksimpaktor

Masskoncentration av stoftpartiklar redovisas också från tre mätningar med lågtrycksimpaktor. Dessa mätningar blir mer osäkra än standardiserad stoftmätning med hänsyn till att provtagning ej gjordes isokinetiskt. Dessutom tillkommer osäkerhet på grund av att mätningarna gjordes på rökgas som passerat spädsystemet som användes för provtagning till on-line-mätning i projektet.

6.4.4 ELPI

ELPI-instrument användes för att få realtidsdata på partikelhalter före och efter WESP och samtidig information om vilka partikelstorlekar som finns i gasen. För att uppskatta vilka masskoncentrationer ELPI-mätningar motsvarat har det antagits att partiklarna är sfäriska och har en densitet på 1 g/cm^3 . I verkligheten vet man att det kan vara rimligt med dessa antagande för de minsta partiklarna som bildas genom nukleation ur gasfas ($< 1 \text{ }\mu\text{m}$), men ju större de blir desto mer säkert är antagandet fel. Anledningen är att grova partiklar utgörs av askfragment som ryckts med från bränslebädden. Det kan också hända att de minsta partiklarna inte är sfärer utan istället agglomerat eller kubiska kristaller. För att göra en mer korrekt skattning av masskoncentration utifrån antalskoncentration och storleksfördelning skulle betydligt fler mätningarna av masstorleksfördelning parallellt med antalstorleksfördelning behövs och helst också tillhörande elektronmikroskopi (för att studera partikelform) och kemisk analys av innehåll.

6.4.5 SMPS och APS

Antalskoncentration mättes efter spädsystemet som användes i projektet. Det innebär förluster av partiklar i spädsystemet, vilket främst påverkar grova partiklar. Samtidigt fås en osäkerhet pga. spädfaktorn, vilken kontrollerades med hjälp av massflödesregulatorer och CO_2 -analysatorer. Antalskoncentrationen mättes främst med ELPI. En del av mätningarna gjordes mätningar med SMPS och APS parallellt med ELPI. Alla tre instrumentet mäter antalskoncentration. ELPI täcker in mätområdet $0,007\text{-}8 \text{ }\mu\text{m}$ och mäter därför högre koncentration än SMPS som har bättre storleksupplösning men endast mäter upp till $0,7 \text{ }\mu\text{m}$. APS kompletterar SMPS genom att mäta grova partiklar. APS visade endast på sporadisk förekomst av grova partiklar i mycket låga koncentrationer. Även ELPI visade låga halter av grova partiklar, men det är möjligt att ELPI gjort en viss överskattning av grova partiklar.

7 Slutsatser

Demonstration i pilotskala vid Renovas Waste-to-Energy anläggning har framgångsrikt genomförts för ett skrubberintegrerat vått elektrostatiskt filter (WESP) i ledande glasfiberarmerad plast.

De övergripande resultaten från drift av WESP är:

- Effektiv avskiljning av fina partiklar.
- Låg energiförbrukning
- Fungerat stabilt
- Elektriskt ledande glasfiberarmerad plast är ett lämpligt konstruktionsmaterial

Stofthalten in till WESP varierade mellan 6,2 och 28 mg/Nm³ tg. Högst koncentration hade partiklar kring 0,6 µm. Klor, kalium, natrium, kisel och svavel dominerade sammansättningen,

Samtidiga totalstoftmätningar uppströms och nedströms WESP-piloten har genomförts. Samtliga rengashalter efter WESP-enheten är under 0,3 mg/Nm³ tg., vilket motsvarar 3% av gällande emissionsgränsvärde. Avskiljningsgraden har varit bättre än 97% för samtliga totalstoftmätningar.

Unika mätningar av kontinuerliga partikelstorleksfördelningar har gjorts i realtid samtidigt i in och utlopp. Huvuddelen av partiklarnas massa var i storleksordningen strax under 1 µm. Avskiljningsgraden för dessa fina partiklar var mycket hög. Partikelmätningar med ELPI visar att avskiljningsgraden typiskt varierar med WESP-spänningen, ju högre spänning desto bättre avskiljning. Andra observationer var att avskiljningsgraden ökade med ökande stofthalt, ökande SO₂-halt och ökande ΔT i kollektorkylningen.

Spårämnesförsök med LiBr visade sig fungera väl för att mäta koncentrationen av vätskedroppar som ryckts med från det våta skrubbersteget uppströms WESP-piloten. En droppkoncentration av 33 mg/Nm³ tg. uppmättes uppströms WESP och <0,02 mg/Nm³ tg. efter WESP, vilket ger en avskiljningsgrad av >99,9% för dropparna från skrubbern.

En WESP konstruerad i elektriskt ledande glasfiberarmerad GAP har visat sig vara en väl fungerande metod för slutavskiljning av stoft och har uppvisat en låg specifik energiförbrukning jämfört med andra rökgasreningstekniker. Tekniken är tillämplig i förbränningsanläggningar för hushållsavfall och torde även vara det för förbränning av farligt avfall, biomassa och för kemisk industri. Genom att variera spänningen kan energianvändningen optimeras med avseende på avskiljningsgrad.

Projektet har resulterat i en kommersiellt tillgänglig produkt.

8 Rekommendationer och användning

Vid val av WESP konfiguration finns det en lång rad parametrar att ta hänsyn till. I detta projekt har en WESP med följande egenskaper visat sig fungera mycket väl:

- Renspolning och vätning av kollektorerna sker kontinuerligt genom kondensering.
- Kondenseringen ökar stoftets migrationshastighet genom termofores och diffusiofores.
- Uppåtriktat gasflöde ger motströms stoftavskiljning med lägre återsuspenderingsgrad.
- God gasfördelning säkerställs i inloppet genom integreringen i en fyllkroppsskrubber.
- Väl fungerande högspänningsstyrning för jämn spänningsmatning.
- Kollektor konstruerad i korrosionsbeständig elektriskt ledande GAP.

WESP:en har i föreliggande projekt visats avskilja stoft med hög effektivitet. Den torde därför kunna rekommenderas som finavskiljare för stoft vid avfallsförbränning men även i andra applikationer som förbränningsanläggningar för biomassa, farligt avfall och andra svåra bränslen samt inom kemisk industri.

Normal stofthalt i rökgasen från en avfallsförbränningspanna är i storleksordningen 1000-5000 mg/Nm³ tg. och emissionskravet på utgående rökgas är 10 mg/Nm³ tg. vid 11% O₂. Ett väl utformat och fungerande elfilter kan sänka halten till under 10 mg/Nm³ tg., och i kombination med ett vått rökgasreningssystem med dioxinadsorbent kan alla tillämpliga emissionsgränsvärden innehållas. Mycket låga nivåer kan nås för HCl och SO₂. Detta projekt har demonstrerat att ett system bestående av ett normalt tvåfälts elfilter med utgående stofthalter på 10-30 mg/Nm³ tg. i kombination med ett vått rökgasreningssystem och skrubberintegrerad WESP kan nå utgående stofthalter på långt under 1 mg/Nm³ tg. Slutstoffavskiljningen kan även genomföras med ett efterkopplat slangfilter, men detta kräver återvärmning av rökgasen, vilket är energikrävande.

SCR-katalysatorer för NO_x-reduktion är beroende av mycket låga ingående halter av stoft och aerosoler (av tex. ammoniumklorid och ammoniumsulfat) för att fungera optimalt, vilket på ett konkurrenskraftigt sätt kan uppnås med ett elfilter och efterföljande vått reningssystem med skrubberintegrerad WESP.

Det är möjligt att WESP skulle kunna fungera som huvudstoffavskiljare i applikationer där kraven på rökgasrening är lägre än vid avfallsförbränning, tex. i biobränsleleddade anläggningar.

9 Förslag till fortsatt forskningsarbete

I föreliggande projekt har den totala stoftkoncentrationen med WESP:en reducerats avsevärt, vilket är viktigt för att förbränningsanläggningen skall uppfylla krav på minimala partikelemissioner. Det är också viktigt att visa att avskiljningen för de mest hälsofarliga partikelstorlekarna är effektiv. WESP:en klarar teoretiskt att avskilja dessa storlekar men p.g.a. det faktum att redan den ingående rökgasen var filtrerad av ett elektrostatiskt filter och en skrubber, så var det svårt att visa detta detaljerat map. olika storlekar. En naturlig fortsättning vore därför att noggrannare undersöka WESP:ens avskiljningsgrad för olika partikelstorlekar i området mindre än 1 μm , så kallade fina partiklar, genom att installera WESP på en anläggning med högre ingående koncentration av partiklar. En tänkbar applikation med högre stoftkoncentrationer än de som testats i detta projekt, är förbränningsanläggningar för biomassa, där ett elfilter och rökgaskondensator skulle kunna ersättas med en integrerad WESP och skrubberkondensator. En sådan enhet skulle ha potential att vara robust och konkurrenskraftig med litet utrymmesbehov ("footprint").

En annan fråga är vilka partiklar som kan ta sig igenom WESP:en. De föreliggande resultaten visar att partikelsammansättningen uppströms WESP:en var klor- och alkalirik medan den var kiselrik nedströms. Denna undersökning kan utökas till fler där man bl.a. varierar WESP:ens driftinställningar.

10 Litteraturreferenser

- [1] Dockery, D. W., Pope, C. A. 3rd, Xu, X., Spengler, J. D., Ware, J. H., Fay, M. E., Ferris, B. G., Jr, and Speizer, F. E., *An association between air pollution and mortality in six U.S. cities*, N. Engl. J. Med..329:1753–1759, 1993
- [2] *Partiklar i inomhusmiljön - en litteraturgenomgång*, Rapport utgiven av Socialstyrelsen, Artikelnummer: 2006-123-1, januari 2006
- [3] Lighty, J., J. M. Veranth and A. F. Sarofim, *Combustion Aerosols: Factors Governing Their Size and Composition and Implications to Human Health*, Journal of the Air and Waste Management Association 50: 1565-1618, 2000
- [4] Fumarola, G. (Ed.), *Air Quality and Emissions Trading*, Eu. Comm, Issue 4, May 2008, <http://ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/4si.pdf>
- [5] Persson, P., Johansson, L., Tullin, C., Österberg, S., Johansson, M., Leckner, B. *Partikelemissioner från biobränsle-eldade mindre fjärrvärmecentraler*, Värmeforskrapport 758, december 2001
- [6] Parker K.R., *Applied Electrostatic Precipitation*, Chapman & Hall, 1997
- [7] Altman, R., Buckley, W., Ray, I., *Application of Wet Electrostatic Precipitation Technology in the Utility Industry for Multiple Pollutant Control Including Mercury*, Coal-Gen, Columbus, Ohio, August 6-8, 2003
- [8] Oglesby, S., Nichols, G.B., *Electrostatic Precipitation*, Pollution Engineering and Technology 8, 1978
- [9] Huang, S.H. and Chen, C.C. *Ultrafine Aerosol Penetration through Electrostatic Precipitators*, Environ. Sci. Technol., 36, 4625-4632, 2002
- [10] Lind, T., Hokkinen, J., Jokiniemi, J. Saarikoski, S. and Hillamo, R. *Electrostatic Precipitator Collection Efficiency and Trace Element Emissions from Co-Combustion of Biomass and Recovered Fuel in Fluidized-Bed Combustion*. Environ. Sci. Technol., 37, 2842-2846, 2003
- [11] Maguhen, J., Karg, E., Kettrup, A. and Zimmermann, R. *On-line Analysis of the Size Distribution of Fine and Ultrafine Aerosol Particles in Flue and Stack Gas of a Municipal Waste Incineration Plant: Effects of Dynamic Process Control Measures and Emission Reduction Devices*. Environ. Sci. Technol, 37, 4761-4770, 2003
- [12] Willeke, K., Baron, P. A. *Aerosol Measurements - Principles, Techniques and Applications*, John Wiley & Sons Inc , 1993
- [13] Rönnbäck, M., Gustavsson, L., Martinsson, L., Tullin, C., Johansson, L. *Stofrenningsteknik för biobränsleanläggningar mindre än 10 MW - teknikläge och utvecklingspotential*, Värmeforskrapport 786, september 2002
- [14] Deutsch W., Ann. Phys (Leipzig) 68, 335-344, 1922
- [15] Lide, D., *Handbook of Chemistry and Physics*, 75th edition, CRC Press, 1992
- [16] European Commission, *Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration*, Aug 2006
- [17] Schiffner, K., *Air pollution Equipment Selection Guide*, Lewis Publishers, 2002
- [18] Altman R., *Update of Particulate Control Guidelines – A State-of-the-Art Report of Utility Wet Electrostatic Precipitators*, EPRI Report 1009775, December 2006

-
- [19] Bologna, a. et al., *The Use of a New Corona-Induced Precipitator for Flue Gas Purification*, IT3 Conference, Texas USA, May 2005
- [20] Bologna, A., et al., *Pilot-plant testing of a novel electrostatic collector for submicrometer particles*, IEEE Transactions, 41(4), 882-890, July-Aug. 2005
- [21] Pasic, H., Caine, J. and Shah H., *Membrane Tubular Wet Electrostatic Precipitators*, Filtration and Separation, p 16-18, November 2006
- [22] Lanzerstorfer C., *Solid/Liquid –Gas separation with wet scrubbers and WESPs: A Review*, *Filt&Sep*, 30-34, June 2000
- [23] SS-EN 13284-1 *Utsläpp och utombusluft - Bestämning av låga masskoncentrationer av stoft - Del 1: Manuell gravimetrisk metod*, Svensk Standard December 2001
- [24] Sloss, L., *Sampling and analysis of PM10/PM2.5*, IEA Coal Research., s 7, 1998
- [25] Axby, F., *Rökgaskondensering: Fördelning av emissioner mellan gas och kondensat*, Värmeforskrapport 792, Oktober 2002
- [26] Wicke, M., *Aufbau, Leistung und Betriebsverhalten von Nassentstaubern*, Fortschrittberichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 3, Nr. 33, November 1970
- [27] Gustavsson L och Nyquist G, *Värmeforsk Mätthandbok; utgåva 3*, Värmeforsk rapport nr 937, September 2005



WASTE REFINERY

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
Box 857, 501 15 Borås
wasterefinery@sp.se
www.wasterefinery.se