

Askfilter för rening av svavelväte i deponigas

Författare:

Johan Andersson¹, Gunnar Westin¹ & Åke Nordberg²

1: RISE - Research institutes of Sweden

2: Sveriges lantbruksuniversitet



Energimyndighetens titel på projektet – svenska Askfilter för rening av svavelväte i deponigas	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Ash filter to remove hydrogen sulfide in landfill gas	
Universitet/högskola/företag RISE (f.d. JTI)	Avdelning/institution Jordbruk och livsmedel
Adress Box 7033, 750 07 Uppsala	
Namn på projektledare Johan Andersson	
Nyckelord: 5-7 st deponigas, svavelväte, aska, askfilter, svavelfixering, gasrening	

Sammanfattning

Deponigas bildas under syrefria förhållanden i deponier genom mikrobiell nedbrytning av organiskt material. Gasens sammansättning kan variera mycket, men från svenska deponier brukar den generellt bestå av 40-60 % metan, 30-40 % koldioxid och 5-20 % kvävgas. Svavelväte (H_2S) är en mycket giftig och korrosiv gas som finns i deponigas i varierande omfattning, från 10 till 30 000 ppm (motsvarar 0,001-3,0 %). Det är önskvärt att deponigas används för el och/eller värmeproduktion, men för att detta ska vara möjligt behöver H_2S -halten renas till låga nivåer (< 200 ppm). Höga halter H_2S ökar slitaget på motor/panna och därmed frekvensen på servicetillfällen. Det leder till dyra underhållskostnader och i slutändan till förkortad livslängd för anläggningen. För att minska korrosionen är det vanligt att rökgastemperaturen justeras upp, men det leder samtidigt till lägre verkningsgrad och därmed till sämre energiutnyttjande av gasen. I en del fall bedöms gasens innehåll av H_2S vara för högt för att kunna användas för energiproduktion. Under 2015 facklades 53 GWh deponigas i Sverige, vilket i många fall beror på problem med höga halter H_2S .

Rening av deponigas från H_2S leder således till flera nyttigheter; gasens energiinnehåll används effektivare, underhålls- och servicekostnaderna för förbränningsanläggningarna minskar och utsläpp av försurande svaveldioxid från förbränning av deponigas reduceras. Det finns kommersiell reningsteknik för H_2S men den är dyr, både vad gäller kapitalkostnad och driftkostnad. Därmed finns ett behov av att ta fram nya billigare reningstekniker som förbättrar drifekonomin vid deponierna och som möjliggör att även deponigas med höga H_2S -halter kan utnyttjas för nyttig energiomvandling.

RISE (f.d. JTI - Inst. för jordbruks och miljöteknik) utvecklar tillsammans med SLU nya, potentiellt kostnadseffektiva metoder för att uppgradera biogas till drivmedelskvalité. En av metoderna baseras på att gasen får passera en bädd av fuktig aska (ett s.k. askfilter) varvid koldioxid och H_2S fixeras. Hypotesen i det här projektet var att askor med ursprung från förbränning av avfall, RT-flis eller liknande kan användas för att rena bort höga halter H_2S från deponigas. Denna typ av askor ska i regel ändå avsättas på deponier och om reningseffekten är god skulle det ge synergieffekter i form av att askan först används för att rena deponigas från svavel innan den avsätts som konstruktionsmaterial på deponier.

I det här projektet utfördes två försök i pilotskala vid en svensk deponi med mycket höga halter H_2S , ca 15 000 ppm. Olika gasflöden studerades (0,7-7,6 m^3/h) medan askvolymen var lika i de båda försöken, 0,37 m^3 . Halten H_2S i den renade gasen var genomgående mycket låg under behandling, < 10 ppm vid låga gasflöden och < 200 ppm vid höga gasflöden. Två asktyper undersöktes och båda visade sig ha mycket god förmåga att fixera H_2S , 44-61 g H_2S/kg torr aska. Vid jämförelse med litteraturvärden är det bara en studie som visar upptag i samma storleksordning, övriga studier ligger ca en tiopotens lägre i upptag.

Utifrån försöksresultaten bestämdes den tekniska och ekonomiska potentialen för askfilter som reningsmetod. Beräkningarna gjordes för olika typanläggningar för

att på så sätt täcka in vanligt förekommande deponier. För normalstora deponier med gasflöden på 100-1 000 m³/h och H₂S-halter mellan 100 och 1 000 ppm uppgår askbehovet till 10-130 ton torr aska per år. För specialfallet där halten H₂S är extremt hög ökar askbehovet och för en anläggning med 15 000 ppm H₂S och ett gasflöde på 200 m³/h krävs det ca 800 ton torr aska per år. Överlag är det emellertid beskedliga mängder aska som krävs och skulle t.ex. samtliga svenska deponier använda aska för gasrening skulle askbehovet endast vara 0,2-0,3 % av den årliga svenska askproduktionen.

De ekonomiska beräkningarna visar att askfilter är en konkurrenskraftig metod för att rena bort H₂S. För specialfallet med extremt höga halter H₂S visade det sig att kostnaden för askfilter är drygt 20 % lägre jämfört med den för ändamålet billigaste konventionella reningstekniken på marknaden. Även vid rening av deponigas med mer normala halter H₂S står sig askfilter väl. Vid låga flöden kring 100 m³/h är askfilter 50 % billigare jämfört med litteraturvärden för konventionell reningsteknik. Skalfördelarna tycks dock vara större för de konventionella reningsteknikerna och därför blir skillnaden mellan reningskostnaden för askfilter jämfört med annan teknik mindre vid högre gasflöden.

De låga reningskostnaderna för askfilter kan öppna upp möjligheter för deponier som idag inte renar gas från H₂S. Under projektet kontaktades 15 svenska deponier och ingen av dessa hade någon form av H₂S-rening. Med rening kan deponigas däremot användas effektivare, t.ex. genom minskad fackling, ökad verkningsgrad för el- och värmeproduktion samt minskat slitage på pannor och förbränningsutrustning. Dessutom minskar emissioner av svavel till atmosfären, vilket även minskar potentiella luktproblem kring deponin.

För fortsatt utveckling är utformning och design av en prototyp av en askfiltermodul i fullskala en central del. Vidare måste den behandlade askan undersökas vad gäller urlakningsegenskaper, lagringsbarhet och användbarhet som konstruktionsmaterial på deponier tillsammans med en bedömning av de samlade miljökonsekvenserna. Försök i fullskala bör även göras vid fler deponier med olika gasflöden och H₂S-halter i deponigasen för att verifiera prestanda från de genomförda pilotförsöken.

Summary

Landfill gas is formed under anaerobic conditions in landfills by microbial degradation of organic material. The gas composition can vary, but at Swedish landfills the gas generally consists of 40-60% methane, 30-40% carbon dioxide and 5-20% nitrogen. Hydrogen sulphide (H_2S) is a highly toxic and corrosive gas, which occur in landfill gas in varying concentrations, from 10 to 30,000 ppm (equivalent to 0.001 to 3.0%). It is desirable that the landfill gas is used for electricity and/or heat production, but to do that there is a need to clean the gas to reach <200 ppm H_2S . High levels of H_2S increases wear on the engine/boiler and thus the frequency of servicing. This leads to expensive maintenance costs, and ultimately shortens the economic life of the plant. To reduce corrosion, it is common to adjust the flue gas temperature, but this also leads to a lower efficiency and thus reduces the energy utilization of the gas. In some cases the gas concentration of H_2S is judged to be too high to be used for energy production at all. In 2015, approximately 53 GWh of landfill gas was flared in Sweden, which in many cases is due to problems with high levels of H_2S .

Cleaning of landfill gas from H_2S leads to several values; the gas energy is used efficiently, maintenance and service costs of the engines/boiler are reduced, and emissions of acidifying sulphur dioxide from combustion of landfill gas decreases. There are commercial cleaning technologies for H_2S but they are expensive, both in terms of capital cost and operating cost. Thus, there is a need to develop new cost efficient cleaning technologies that improve the economic outcome at landfills and that enables landfill gas with high H_2S concentrations to be utilized for valuable energy transformation.

RISE (formerly JTI – Swedish Institute of Agricultural and Environmental Engineering) together with SLU develops new, potentially cost-efficient methods for upgrading biogas to fuel quality. One of the methods is based on the gas passing through a bed of moist ash (a so-called ash filter), where carbon dioxide and H_2S are fixed. The hypothesis of this project was that ashes originating from the incineration of waste, recycled waste wood etc., can be used to clean the high levels of H_2S in landfill gas. This type of ashes will usually be disposed of in landfills anyway and if the treatment effect is good, it would generate synergy effects in the form of the ash first being used to clean landfill gas from sulphur before it is used as a construction material at landfills.

This project performed two trials in pilot scale at a Swedish landfill with very high concentration of H_2S , approximately 15,000 ppm. Different gas flow rates were studied (0.7 to $7.6 \text{ m}^3 / \text{h}$), while the volume of ash used were similar in the two trials, $0,37 \text{ m}^3$. The concentration of H_2S in the cleaned gas was consistently very low during treatment, < 10 ppm at low gas flow rates and < 200 ppm at high gas flow rates. Two types of ash were investigated and both proved to have very good capacity to fix H_2S , $44\text{-}61 \text{ g H}_2\text{S}/\text{kg dry ash}$. In comparison with literature values, there is only one study showing an uptake capacity in the same order. Other studies report an order of magnitude lower uptake capacity.

Based on the experimental results, the technical and economic potential for an ash filter as the cleaning method was assessed. The calculations were made for various typical landfills to cover the different range of landfills. For normal sized landfills with gas flow rates of 100-1 000 m³/h and H₂S concentrations between 100 and 1 000 ppm, the amount of ash needed is 10-130 tons of dry ash per year. For the special case where the H₂S concentration is extremely high, the amount of ash increases and a plant with 15 000 ppm H₂S and a gas flow rate of 200 m³/h requires approximately 800 tons of dry ash per year. However, overall modest amounts of ash is required and considering all Swedish landfills the requirement of ash would be only 0.2-0.3% of the annual production of ash in Sweden.

The economic calculations show that the ash filter is a competitive method for removal of H₂S. For the special case of extremely high levels of H₂S, it turned out that the cost of the ash filter is approximately 20% lower in comparison with the cheapest feasible conventional cleaning technology on the market. Also for the cleaning of landfill gas at more normal levels of H₂S, the ash filter is competitive. At low gas flow rates (100 m³/h), the cost for ash filter is approximately 50 % lower compared to literature values for conventional cleaning technologies. The economy of scale seems to be higher for the conventional cleaning technologies, and consequently the difference between the cost of ash filter cleaning and other technologies is less at higher gas flow rates.

The low treatment cost of the ash filter reveals opportunities for landfills that currently do not clean the gas from H₂S. During the project 15 Swedish landfills was contacted and none of these reported any form of H₂S cleaning. When using cleaning, the landfill gas can be used effectively, i.e. reduced flaring, increased efficiency of electricity and heat production with reduced wear on boilers and combustion equipment as well as reduced emissions of sulphur into the atmosphere, which also reduces the potential odour problems around the landfill.

For further development, the design of an ash filter module prototype at full-scale is important. Furthermore, the treated ashes should be analysed for leaching characteristics, storability and usability as construction materials or as cover landfills along with an assessment of the overall environmental impact. Further tests at full scale should be made at other landfills with various gas flow rates and H₂S concentrations to verify the performance of the conducted pilot tests.

Förord

Föreliggande projekt är ett s.k. förprojekt inom programmet RE:Source som finansieras av Energimyndigheten, Vinnova och Formas. Projektgruppen har bestått av RISE (f.d. JTI), SLU, Processum, SÖRAB, Ragn-Sells, Umeå Energi och Biogas Systems.

Genom detta projekt har en ny innovativ metod för rening av svavelväte studerats i en skala och med ingående svavelhalter som är långt högre än vad som tidigare undersökts. Framtagna resultat har således ett högt nyhetsvärde och kommer att vara viktiga vid fortsatt utveckling av tekniken mot en kommersiell produkt. Jag vill passa på och tacka projektgruppen för dess engageman och inspel under projektets gång. Ett extra tack riktar jag till personalen vid SÖRAB och Ragn-Sells som utfört arbete i samband med försöksverksamheten.

Uppsala, mars 2017

Johan Andersson

Innehållsförteckning

BAKGRUND	8
SYFTE OCH MÅLSÄTTNINGAR	9
GENOMFÖRANDE	9
ASKOR	9
GASSYSTEM VID LÖT DEPONI	10
FÖRSÖKSUPPSTÄLLNING	11
FÖRSÖKSUPPLÄGG.....	12
MÄTNING, PROVTAGNING OCH ANALYSER.....	13
RESULTAT OCH DISKUSSION	14
FÖRSÖK 1.....	14
<i>Övergripande gaskvalité och upptag av CO₂</i>	14
<i>Koncentration av H₂S</i>	15
<i>Upptag av H₂S</i>	16
<i>Urtag av aska</i>	16
FÖRSÖK 2.....	18
<i>Övergripande gaskvalité och upptag av CO₂</i>	18
<i>Koncentration av H₂S</i>	19
<i>Upptag av H₂S</i>	20
<i>Urtag av aska</i>	21
DESIGN OCH UPPSKALNING ASKFILTER	21
ASKBEHOV	21
TYP AV ASKFILTERSYSTEM.....	22
MODULSYSTEM ASKFILTER	22
<i>Askhantering</i>	22
<i>Gasflöde och tryckfall</i>	23
<i>Utformning på deponi</i>	23
EKONOMI	24
KOSTNAD KONVENTIONELLA TEKNIKER.....	24
EKONOMI ASKFILTER	26
<i>Basfall</i>	26
<i>Känslighetsanalys</i>	27
ÖVERGRIPANDE DISKUSSION	28
SLUTSATSER	30
FRAMTIDA UTVECKLINGSBEHOV	31
REFERENSER	31

Bakgrund

Deponigas avser gas som bildas under anaeroba (syrefria) förhållanden i deponier genom mikrobiell nedbrytning av organiskt material. Gasens sammansättning varierar kraftigt och beror på en rad olika faktorer såsom vilka typer av avfall som deponerats och vilka förutsättningar det finns för anaerob nedbrytning av det organiska materialet (fukt, temperatur, etc.). Deponigassammansättningen från svenska deponier brukar generellt vara 40-60 % metan (CH₄), 30-40 % koldioxid (CO₂) och 5-20 % kvävgas (N₂) [1]. Svavelväte (H₂S) är en mycket giftig och korrosiv gas som finns i deponigas i varierande omfattning, från 10 till 30 000 ppm (motsvarar 0,001-3,0 %). Det är önskvärt att deponigas används för el och/eller värmeproduktion, men för att detta ska vara möjligt behöver H₂S-halten renas till låga nivåer (< 200 ppm). Tillförs förbränningsanläggningar gas med höga halter H₂S kommer det ge upphov till korrosiva miljöer i förbränningskammaren, vilket kraftigt ökar slitaget och därmed frekvensen på servicetillfällen. Det leder till dyra underhållskostnader och i slutändan till förkortad livslängd för anläggningen. Dagens kommersiellt tillgängliga reningstekniker för H₂S är dyr, både vad gäller kapitalkostnad som driftkostnad. Det finns därmed ett behov av att ta fram nya billigare reningstekniker som förbättrar drifekonomin vid deponierna och som möjliggör att även deponigas med höga H₂S -halter kan utnyttjas för nyttig energiomvandling.

RISE (f.d. JTI - Inst. för jordbruks och miljöteknik) utvecklar tillsammans med SLU nya, potentiellt kostnadseffektiva metoder för att uppgradera biogas till drivmedelskvalité. En av metoderna baseras på att använda ett askfilter där gasen som ska renas får passera en bädd av fuktig aska (ca 80 % TS-halt i askan) varvid CO₂ fixeras. De studerade askorna har varit träaska från förbränning av flis respektive träpellets och de har karaktäriserats av ett högt innehåll av kalciumoxid (CaO), vilket resulterat i god förmåga att fixera CO₂ från gasen. En positiv bieffekt med askfiltret är att askan även fixerar H₂S från inkommande gas. Det sker genom att H₂S på grund av högt pH löser sig i den vattenfilm som omger askpartiklarna varpå sulfidjonerna (S²⁻) kan reagera med metalljoner och bilda metallsulfider. Askfilter har studerats i laboratorieskala (10-15 L askvolym) med ingående H₂S-halter upp till 3000 ppm som resulterat i <1 ppm H₂S i utgående gas under hela försöket (försöken har avslutats då askan blivit mättad på koldioxid, dvs. då höga halter av koldioxid påträffas i utgående gas).

Hypotesen bakom det här projektet var att askfilter skulle kunna användas för att rena bort höga halter H₂S från deponigas och att detta skulle uppnås genom att använda ”sämre” typer av aska med ursprung från förbränning av avfall, RT-flis eller liknande. Om reningseffekten är god i dessa typer av askor skulle det ge en del synergieffekter eftersom denna aska i regel ändå ska avsättas på deponier. Därmed skulle askan först kunna användas för att rena deponigas från svavel för att därefter senare användas som konstruktionsmaterial på deponin.

Askfilter (gasrening med fast askbädd) har tidigare studerats med avseende på rening av deponigas, där det konstaterats att H₂S kan fixeras. De flesta studier har genomförts vid relativa låga H₂S -halter (20 -100 ppm) och med aska från

avfallsförbränning [2-4]. Fontseré Obil m.fl. [5] hade däremot ingående koncentrationer på 1 000 – 3 000 ppm och även i denna studie användes aska från avfallsförbränning. Det är dock svårt att dra slutsatser från dessa studier om hur effektiv aska är för att rena bort höga halter H_2S ($> 10\,000$ ppm).

Syfte och målsättningar

Syftet med projektet är att öka resursutnyttjandet genom att på ett kostnadseffektivt sätt nyttiggöra energiinnehållet i deponigas rik på H_2S och samtidigt hitta användningsområden för askor från förbränning av avfall, RT-flis eller liknande.

Målsättningar:

- Uppnå god rening av H_2S där halten i utgående gas från askfiltret ska understiga 50 ppm.
- Studera vilka gasflöden askfiltret kan hantera med fortsatt god rening av H_2S .
- Bestämma vilken H_2S -fixerande kapacitet (g H_2S /kg torr aska) två olika askor har.
- Bestämma vilken koldioxidfixerande kapacitet (g CO_2 /kg torr aska) två olika askor har.
- Undersöka om använd aska har potential att användas som avjämningsmassa med avseende på kemisk sammansättning och stabilitet.
- Göra uppskalningsberäkningar för askfilter i fullskala samt studera teknisk och ekonomisk potential för tekniken.
- Göra två fallstudier där de lokala avsättningsmöjligheterna för testad aska undersöks.

Genomförande

Projektet inleddes med försöksverksamhet vid Löt deponi utanför Norrtälje där ett askfilter i pilotskala användes för att rena ett delflöde från deponigassystemet. Försöksresultaten användes därefter för att bestämma den tekniska och ekonomiska potentialen för askfilter och slutligen genomfördes två fallstudier för att ytterligare belysa potentialen för tekniken.

Askor

Två olika typer av askor användes i försöken och båda hämtades från Ragn-Sells anläggning i Högbytorp. Urvalet av askor gjordes av projektgruppen och ambitionen var att välja ut askorna som skulle spegla stora delar av den svenska askproduktionen. Därför valdes en bottenaska (Aska A) med ursprung från förbränning av avfall och blandade biobränslen samt en flygaska (Aska B) från förbränning av papper, trä och plast (PTP). Tabell 1 visar den kemiska sammansättningen i askorna som användes i försöken.

Tabell 1. Kemisk sammansättning av de studerade askorna i form av metalloxider.

	Aska A	Aska B	Enhet
Torrsubstans	94,7	88,0	%
SiO ₂	46,7	32,9	% av TS
Al ₂ O ₃	10,2	7,5	% av TS
CaO	16,5	23,8	% av TS
Fe ₂ O ₃	8,0	2,7	% av TS
K ₂ O	1,8	1,9	% av TS
MgO	1,9	2,3	% av TS
MnO	0,2	0,2	% av TS
Na ₂ O	2,9	1,9	% av TS
P ₂ O ₅	0,9	0,4	% av TS
TiO ₂	1,4	2,8	% av TS
Summa	90,5	76,3	% av TS
LOI* 1000 °C	6,1	14,5	% av TS

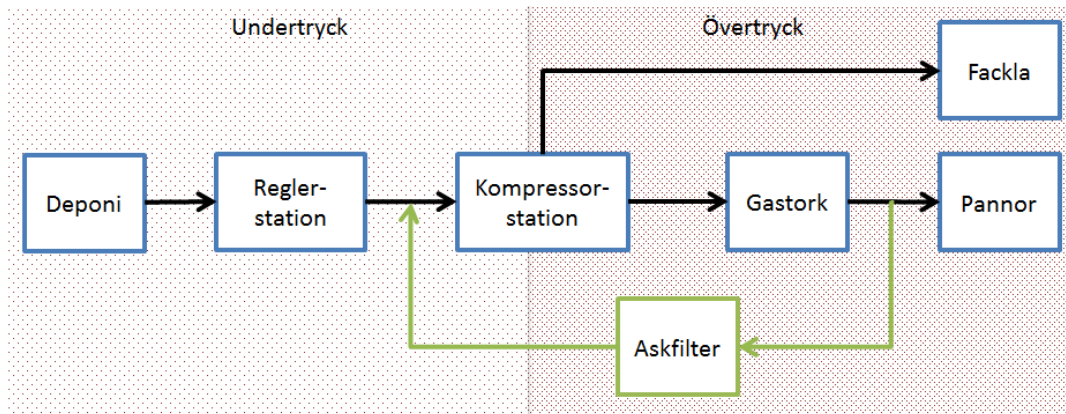
*LOI = loss on ignition

Aska A bestod av metallseparerad och sållad (0-4 mm) bottenaska som lagrats en längre tid i en stor hög. Askan var torr (95 % TS) och dammade en hel del vid hantering. Metallseparering och sållning sker kampanjvis över året och det innebär att obehandlad bottenaska och slag från olika pannor bunkras upp under delar av året. Följden av detta blir att den sållade bottenaskan är en samlingsprodukt av flera pannors bottenaska och det går därför inte att exakt säga vilket ursprung Aska A har. Det som är känt är att det är stora delar avfallsaska som behandlas men att det även förekommer bottenaska från en del biobränslepannor.

Hanteringen av flygaska vid Högbytorp sker i slutna system fram tills askan blandats upp med vatten och denna hantering medgav att Aska B kunde tas ut som en ren askfraktion, utan inblandning av askor från andra pannor. Den uppfuktade askan hade en tydlig lukt av ammoniak vilket var en rest från rökgasreningen vid pannan. I övrigt var askan fin till sin karaktär (små partiklar) och jämnt fuktad.

Gassystem vid Löt deponi

Försöken genomfördes vid Löt's deponi utanför Norrtälje. Deponigassystemet bestod av en undertryckssida och en övertryckssida, se figur 1. Undertryckssidan utgörs av rörledningarna i deponin vilka sammankopplades genom en reglerstation där flödet i respektive rör kan justeras. Från reglerstationen leds gasen vidare i en gemensam ledning till kompressorstationen där trycket höjdes från ca 150 mbar undertryck till ca 170 mbar övertryck. Den trycksatta gasen skickades därefter vidare till facklan eller till någon av de tre pannorna som var ansluta till systemet. Om gasen användes i pannorna passerar den först en kylare följt av ett saltfilter vilka tar bort fukt från gasen. En del av deponigasens H₂S löser sig i kondensatet som uppstår vid kylningen vilket innebär att kylningen i sig har en reducerande effekt på H₂S -halten.

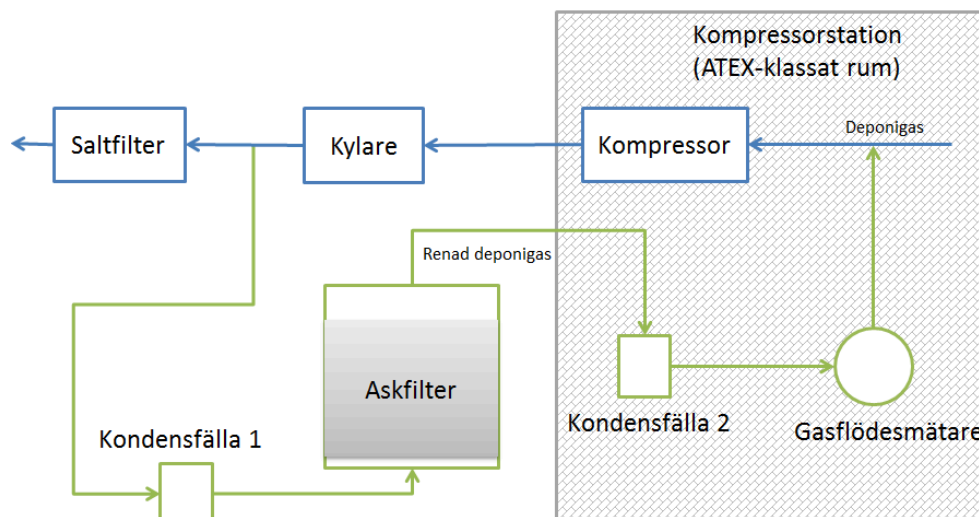


Figur 1. Deponigassystemets olika delar från utvinning till avsättning av gasen. I försöken togs ett delflöde av deponigas ut på övertryckssidan och återfördes på undertryckssidan.

Inför försöken med askfilter diskuterades olika möjliga alternativ gällande hur ett delflöde av deponigas kunde tas ut och återföras till det befintliga gassystemet. Valet föll på det mest robusta och praktiskt genomförbara alternativet vilket innebar att gasen togs ut på övertryckssidan efter kylaren men före saltfiltret och att gasen återfördes på sugsidan innan tryckhöjningen. Nackdelen med denna konfiguration är att det uppstod kortslutningseffekter där den av askfilter behandlade gasen återfördes på uppströmssidan (undertryckssidan) och därför spädde ut den obehandlade deponigasen. Eftersom försöken genomförts i pilotskala har delflödet genom askfiltret varit mycket lågt i förhållande till det totala deponigasflödet och därför har utspädningseffekten endast varit ytterst marginell (0,5-4% beroende på aktuellt gasflöde).

Försöksuppställning

Figur 2 visar en schematisk översikt av försöksuppställningen. Gasen leddes efter kylning till kondensfälla 1 (KF1) där kondens tappades av vid behov och där temperatur, tryck och halt H_2S mättes på ingående gas. Från KF1 leddes gasen vidare in i botten av askfiltret där gasen fördelades jämt över bottenarean. Askbädden vilade på ett galler med fiberduk som var placerad 5 cm från botten. Askfiltret hade formen av en stående cylinder med 1 m diameter och höjden 0,8 m. Den aktiva askhöjden var i de båda försöken 0,47 m. På askfiltrets mantel, 0,35 m upp från gallret satt en ventil och från ventilen gick det en gasslang in i mitten av askbädden. På så sätt kunde gasprover tas ut mitt i askbädden för analys, vilket användes för att prediktera genombrott av H_2S i den reade gasen. Vid denna provpunkt ("mitt i askbädden") fanns det även en temperaturmätare. Gasen gick igenom askbädden och togs ut genom locket och leddes vidare in till kondensfälla 2 (KF2). Likt KF1 var det möjligt att analysera gasen här med avseende på gassammansättning, temperatur och tryck. Från KF2 leddes gasen vidare till gasflödesmätare och därefter tillbaka till Löts gassystem (sugsidan).



Figur 2. Försöksupställning vid Löt deponi. Ett delflöde av deponigas togs ut efter kylaren men före saltfiltret och den renade gasen återfördes på sugsidan.

KF1 och askfiltret var placerade utomhus med fri exponering för nederbörd och vind. Anledningen till detta var främst av säkerhetsskäl då det hanterades deponigas med mycket höga halter H_2S varför god ventilation var prioriterat. Försöksupställningen på den ”rena sidan”, dvs. allt efter askfiltret (KF2 och gasflödesmätare) placerades inne i den uppvärmda kompressorstationen (ATEX-klassat rum). Den kalla sidan av systemet (FK1 och askfiltret samt tillhörande slangar) påverkades av rådande utomhustemperatur och därför har mängden kondensat varierat över tid.

Försöksupplägg

Totalt genomfördes två försök där försök 1 var med aska A och försök 2 med en blandning av aska A och aska B, se tabell 2. Den torra askan blandades upp med vatten inför försöken med hjälp av en traktordriven betongblandare. Därefter placerades askan i askfiltret och locket förslöts. Askbädden spolades med kvävgas för att få ner halten syrgas i gasvolymen och därefter kunde försöket starta genom att koppla in ett delflöde av deponigas. Ingående gasflöde valdes lågt i försök 1 och motiverades av den prestanda som rapporterats i litteraturen [2-5]. Aska A uppvisade dock ett högt upptag av H_2S och för att snabba på försöket höjdes flödet 3,5 veckor efter start från 0,7 m³/h till ca 2,1 m³/h. Försök 1 avslutades 5,5 veckor efter start. Erfarenheter och resultat från försök 1 låg till grund för valet av driftparametrarna till försök 2 där gasflödet sattes högt (5,1-7,6 m³/h). Syftet med det höga flödet var att uppnå hög gashastighet genom askbädden samt att få snabbare mätning av askan med avseende på svavel.

Tabell 2. Askdata och gasflöde för försöken.

		Försök 1	Försök 2
Andel aska A	% torr vikt	100	46
Andel aska B	% torr vikt	0	54
torr aska tot	kg	360	330
Vatten	kg	70	60
L/S		0,19	0,18
Invägd fuktig aska	kg	430	391
Askhöjd	m	0,47	0,47
Volym aska	L	369	369
Densitet	kg/L	1,16	1,06
Ing. gasflöde	m ³ /h	0,7-2,1	5,1-7,6
Spec. ing gasflöde	m ³ /h/ton torr aska	1,9-5,8	15,4-23,0

Mätning, provtagning och analyser

Systemtrycket i KF1, ”mitt i askbädden” och KF2 mättes manuellt med handinstrument (Testo) medan temperaturen loggades automatiskt var 15:e min (Tiny tags, view 2). Den renade gasen från mätpunkterna ”mitt i askbädden” samt KF2 analyserades med Biogas5000 (Geotech) som kunde mäta CH₄, CO₂, O₂ och H₂S (mätområde 0-5 000 ppm H₂S). Analyser med Biogas5000 med avseende på H₂S kompletterades med absorbentrör (Kitagawa) där flera olika mätområden användes (0-60 ppm; 25-2 000 ppm; 0-1,2 %). Gaskvalitén på ingående gas var ej möjlig att mäta med Biogas5000 till följd av den mycket höga halten H₂S. Därför analyserades den ingående gasens H₂S-halt med olika absorbentrör (Kitagawa: 0-1,2 %; 0-4 %).

Två gasflödesmätare användes i projektet. Vid låga flöden (0,6-0,8 m³/h) användes en rotameter (Ritter TG5) och vid höga flöden (2-8 m³/h) användes Fluid Inventor UNI200. Båda gasflödesmätarna hade automatisk loggning av flödet och detta kompletterades med manuella avläsningar i samband med den dagliga tillsynen. Askans kemiska sammansättning analyserades vid ackrediterat laboratorium (ALS). Totalt analyserades fem prov, två på obehandlad aska och tre på behandlad.

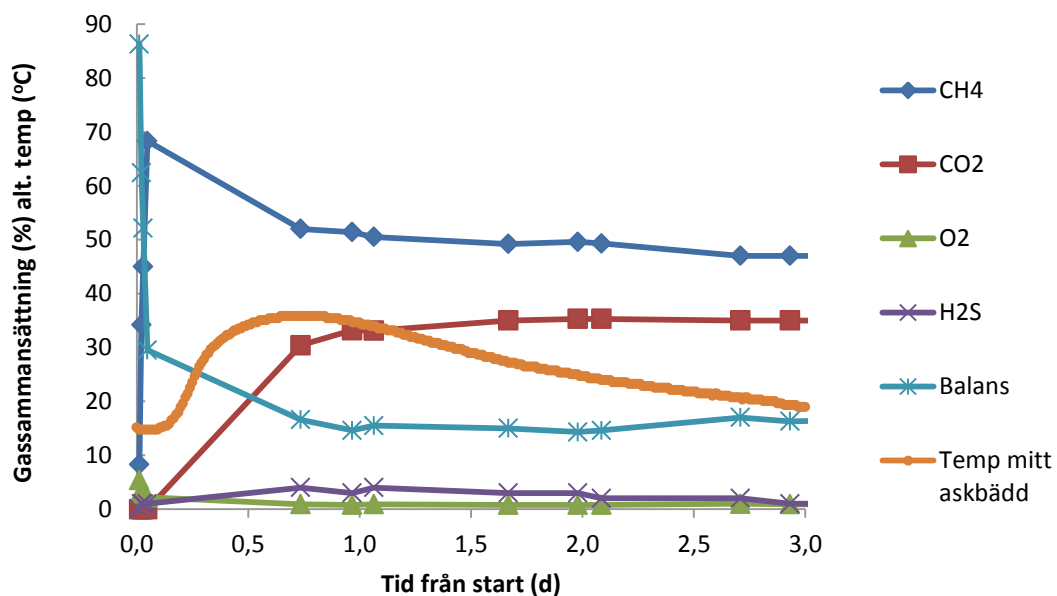
Resultat och diskussion

Försök 1

Övergripande gaskvalité och upptag av CO₂

Den uppfuktade askan till försök 1 (aska A) upplevdes relativt tung och kompakt men trots detta var det inte några problem att få gas genom askbädden. Mottrycket genom askfiltret var endast 5 mbar vid uppstart (gasflöde 0,7 m³/h).

Gassammansättningen på den renade gasen samt temperaturen i askbädden för de tre första dagarna framgår av figur 4. Precis vid start är balansen (100%-[CH₄]-[CO₂]-[O₂]) hög till följd av att askbädden strax innan start spolades med kvävgas. Därefter sjunker balansen successivt och svänger in mot 14-17 % efter en dags körning. Askkan innehåller från början en del fri CaO vilken via några mellansteg reagerar kemiskt med ingående CO₂ och bildar fast kalciumkarbonat (CaCO₃). På så sätt fastläggs all CO₂ i den ingående gasen under de inledande timmarna av försöket men därefter har nästan all fri CaO förbrukats och halten CO₂ stiger därför snabbt upp mot 30 % en dag in i försöket. CO₂-halten stiger ytterligare något och stabiliseras kring ca 35 % efter 1,5 dagar. Askbädden är då att betrakta som mättad med avseende på CO₂. Fixeringen av CO₂ är en exoterm reaktion och genererar värme till omgivningen, vilket detekterades av temperatursloggningen i mitten av askbädden (figur 4). Temperaturen i askbädden stiger från inledande 15 °C till 36 °C för att sedan långsamt klinga av ner mot 15-20 °C. Genombrottet av CO₂, dvs. den tidpunkt då CO₂-halten i den renade gasen >1% inträffade under kvällen/natten första dagen och den exakta tidpunkten går därför ej att fastställa eftersom det inte fanns någon personal på plats då. Det är därmed svårt att beräkna det exakta upptaget av CO₂ i askbädden och därför anges upptaget här som ett intervall. Fram till genombrott bedöms upptaget vara 5-21 g CO₂/kg torr aska.

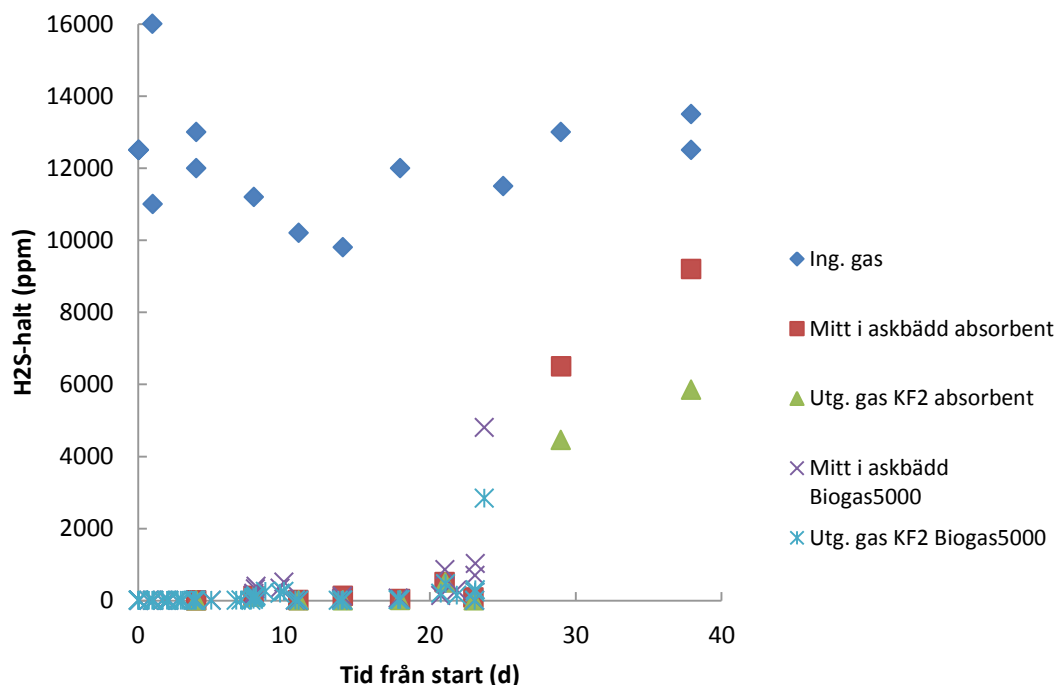


Figur 4. Sammansättningen på den renade gasen samt temperaturen mitt i askbädden under de tre första dagarna av försök 1.

Eftersom askbädden snabbt blir mättad på CO₂ går det att använda analysvärdena på den utgående gasen för att approximera sammansättningen på den ingående gasen gällande CH₄, CO₂ och O₂. Gassammansättningen fluktuerar en del över tid till följd av variationer i driftryck och fukt i deponin, men över lag har den ingående gasen innehållit 45-50 % CH₄, 34-38 % CO₂ och ca 1 % O₂ under försök 1. Vidare har balansen som sannolikt till största del består av N₂, samtidigt uppgått till 12-17 %.

Koncentration av H₂S

Figur 5 visar halterna H₂S i ingående och utgående gas samt från provpunkten mitt i askbädden under försök 1. Den ingående halten H₂S har varierat en del över tid men har i medeltal varit 12 300 ppm (medianvärde 12 500 ppm). Halten H₂S i utgående gas var från start mycket låg, <5 ppm de första sju dagarna. Dag 8-10 sker en tillfällig ökning av H₂S där halten når upp till ca 250 ppm som högst för att därefter (dag 10-11) sjunka ner och stabiliserar sig <10 ppm. Dag 20-21 sker åter en tillfällig ökning där halten H₂S som mest uppgår till 470 ppm. Dag 22 är halten H₂S åter <10 ppm, men dag 23 inträffar ett permanent genombrott. Halten H₂S stiger relativt snabbt upp till 3000 ppm men därefter avtar ökningen och under den sista veckan av försöket ökar halten bara till 5850 ppm. Följaktligen var inte askbädden helt mättad på H₂S då försök 1 avslutades utan det pågick fortfarande en påtaglig reduktion där drygt 50 % av ingående H₂S fortfarande fixerades i askbädden. Som väntat är halten H₂S högre vid provpunkten mitt i askbädden eftersom gasen där inte passerat hela askmängden. Vid avslut av försök 1 är halten mitt i askbädden 9 200 ppm.

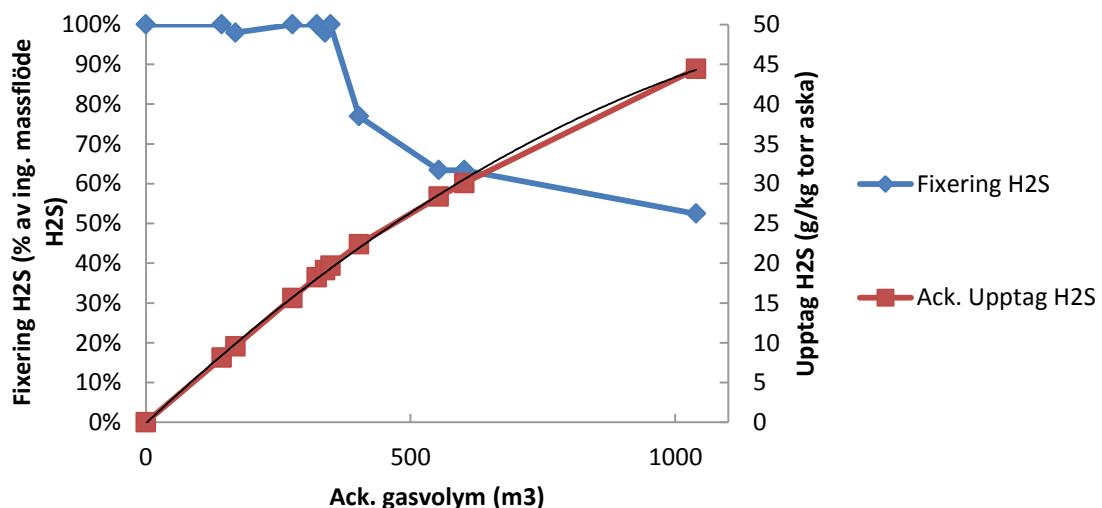


Figur 5. H₂S-halt i ingående och utgående gas samt från provtagningspunkten mitt i askbädden för försök 1. Analyserna av ingående och utgående gas har skett med absorbenttror med olika mätområden. Analyserna av den reade gasen har kompletterats med instrumentet Biogas5000 inom mätområde 0-5 000 ppm.

Det permanenta genombrottet (dag 23) sammanföll med att det ingående gasflödet höjdes från 0,7-2,1 m³/h. Motivet till flödeshöjningen var att snabba på försöket som fram till dess redan gått över prognostiserad försökstid med tio dagar. Det var dock tendenser till genombrott redan innan flödet justerades och därför ska flödeshöjningens påverkan på tidpunkten för genombrottet tolkas försiktigt. Det är däremot rimligt att anta att det ökade flödet påverkade hur snabbt halten H₂S steg efter genombrottet.

Upptag av H₂S

Figur 6 visar det ackumulerade upptaget av H₂S under försök 1. Fram till genombrott (då totalt 350 m³ gas passerat filtret) är upptaget 20 g/kg torr aska och vid avslut av försöket uppgår det totala upptaget 44 g/kg torr aska. Figuren visar också att askbädden har en relativt god fixerande kapacitet vid avslut där ca 50 % av ingående H₂S fixeras. Det är dock tydligt utifrån figuren att fixeringskapaciteten klingar av och att mättnad av askbädden inte var långt bort. En bedömning av hur stor den återstående kapaciteten var i den aktuella askan gjordes genom regression av ett andragradens polynom och enligt denna ekvation borde det maximala upptaget i askan vara ca 49 g/kg torr aska.



Figur 6. Ackumulerat upptag av H₂S under försök 1.

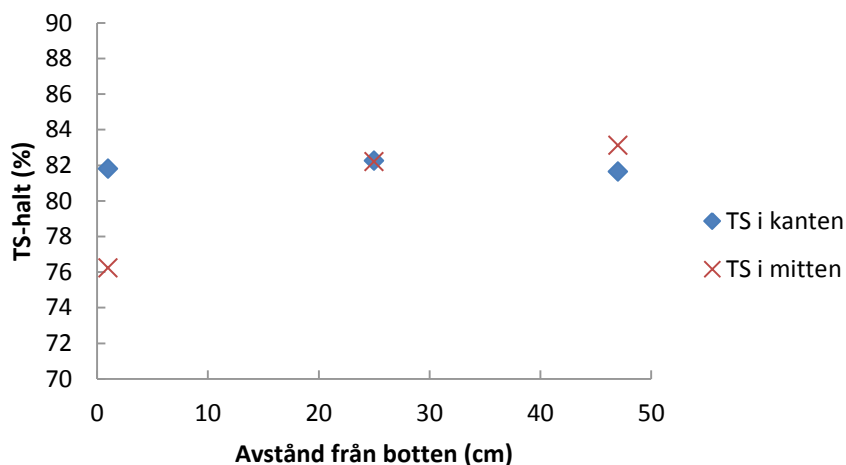
Urtag av aska

Efter avslut av försök 1 spolades askbädden med N₂ för att få bort H₂S och CH₄ från gasfasen. När askfiltret öppnades märktes en stark lukt som påminner om någon form av petroleumprodukt. Däremot upplevdes ingen karakteristisk lukt av H₂S. Askan var vid uttag svart och det var en tydlig färgförändring jämfört med askan som vägdes in (grå/brun). Det är rimligt att anta att den svarta färgen beror på att delar av det fixerade svavlet ligger fast som järnsulfid, vilket har en svart färg. Bädden var tämligen kompakt och det krävdes att den hackades lös med spade för att få ut den. Det fanns ett litet område i centrum av askbädden som hade en ljusare färg vilket indikerar att denna aska ej mättats helt på H₂S, se figur 7.



Figur 7. Det finns ett litet område med ljus aska i mitten av bädden som indikerar att askan inte var helt mättad på H_2S .

Det togs ut askprover på tre nivåer och för varje nivå ett prov i centrum och ett vid kanten. Dessa prov analyserades med avseende på torrsubstans (TS) och resultatet framgår av figur 8. TS-halten är jämn längs kanten och det är rimligt med tanke på att temperaturen där bör vara konstant oavsett höjd eftersom det sker avkyllning från omgivningen via mantelytan. I mitten av askbädden är det en viss variation i TS där det är något torrare i botten.



Figur 8. Torrhalten i askbädden efter försök 1. Askan är relativt jämnt fuktad även efter reningsprocessen.

Den uttagna askan lades i en liten stuka med plast mellan mark och aska, se figur 9. Även om askan var kompakt i askfiltret upplevdes den lätthanterlig och lucker när den väl tömts från filtret. De klumpar som förekom föll lätt sönder och som framgår av bilden är det en relativt homogen produkt efter behandlingen.



Figur 9. T.v. Direkt efter försök 1 placerades askan i en stuka för att undersöka dess karaktäristik vid lagring. T.h. Aska från försök 1 efter tre veckors lagringstid. Färgen på askan har återgått till den ursprungliga brun/grå.

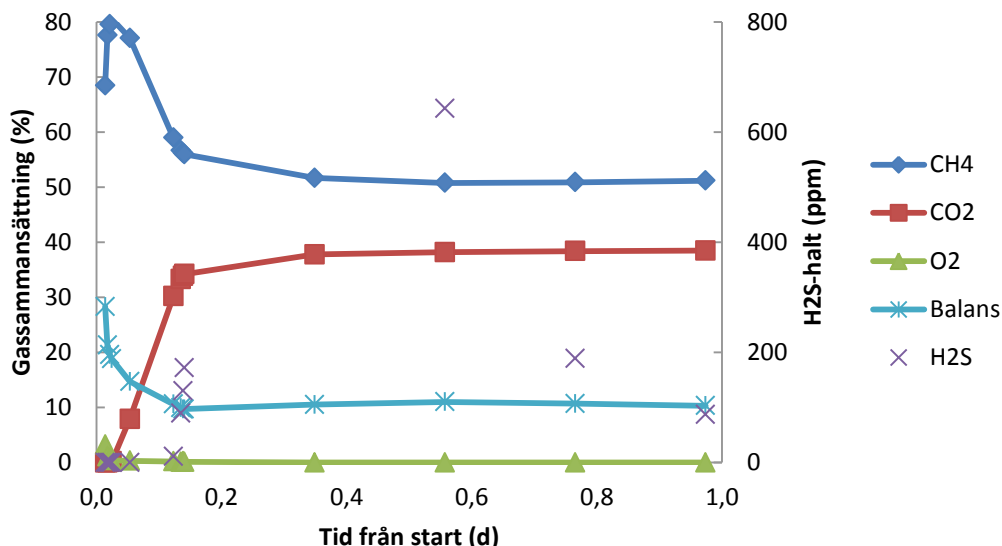
Det visade sig att den mörka färgen försvann under lagringstiden varvid askans ursprungliga brun/grå färg kom fram, se figur 9. Som framgår av bilden är färgförändringen tämligen genomgående i stukan. Askan upplevdes fortfarande lucker och det fanns inga tendenser till att askan skulle härda ihop till hårda klumpar eller liknande. Det gjordes kemiska analyser med avseende på askans sammansättning både direkt vid tömning av askfilter och efter tre veckors lagring i stuka. Askan direkt vid avslut innehöll 38 500 mg S/kg torr aska och askan som lagrats tre veckor 40 500 mg S/kg torr aska. Det finns osäkerheter i analyserna samt vid provtagning (samlingsprov), men resultaten indikerar att mängden svavel är ungefär samma i askan även efter tre veckors lagring. Analysresultaten visar således inga tecken på att svavel skulle ha urlakats eller avgått till atmosfären under dessa tre veckors lagring. Däremot tyder färgförändringen på att svavel övergått från t.ex. järnsulfid till andra svavelföreningar. Några urlakningstest har inte varit möjligt att genomföra inom ramen för detta projekt.

Försök 2

Övergripande gaskvalité och upptag av CO₂

Den blandade askan till försök 2 bestod av en mix av aska A och aska B (tabell 2). Gasflödet höjdes ordentligt till försök 2 och motivet till detta var att testa om reningseffekten förblev god även vid aggressivare driftstrategi. Det ökade flödet innebar att gasens uppehållstid i askbädden minskade, från 10-33 min under försök 1 till 3-4 min under försök 2. Under inledningen av försök 2 fixeras all ingående CO₂ men till följd av det höga flödet sker det snabbt ett genombrott och CO₂-halten stiger upp mot 30 % för att sedan långsamt svänga in kring 38 % (figur 10). Upptaget av CO₂ fram till genombrott är ungefär 10 g/kg torr aska. CH₄-halten stiger inledningsvis upp till 80 % på grund av askans fixering av CO₂ men sjunker därefter snabbt i takt med att askbädden blir mättad med avseende på CO₂. CH₄-halten svänger så småningom in kring 51 % efter ett halvt dygn. Anledningen till att halterna CH₄ och CO₂ är högre under försök 2 beror på att

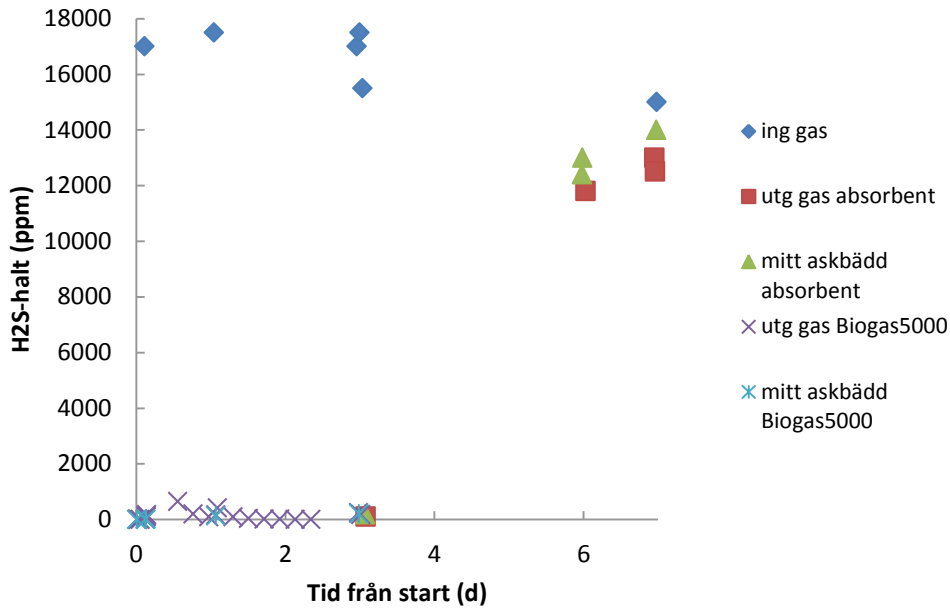
driften av deponigassystemet justerades något mellan försök 1 och försök 2 i syfte att höja CH_4 -halten och därmed få bättre förbränning i pannorna. De ändrade driftbetingelserna innebar även att balansen minskade till 10-11 % och att O_2 -halten var nära 0 %.



Figur 10. Sammansättningen på den reade gasen under första dagen av försök 2.

Koncentration av H_2S

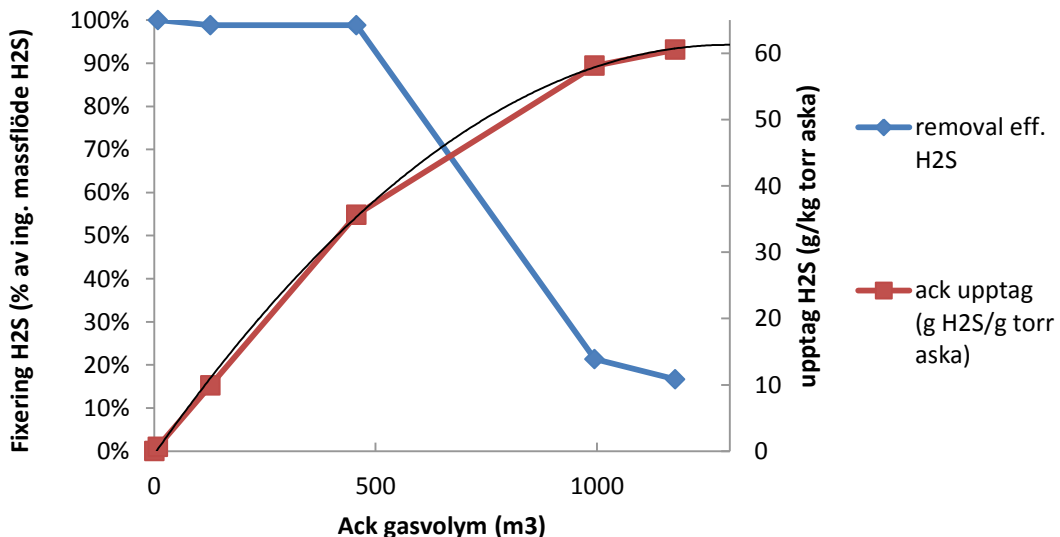
Under försök 2 var H_2S -halten i ingående deponigas genomgående högre än under försök 1 vilket även det förklaras av ändrad drift av deponigassystemet. I medeltal var ingående halt 16 600 ppm (medianvärde: 17 000 ppm) och som framgår av figur 11 förekom det en viss variation över tid. Halten H_2S i den reade gasen fluktuerade en del i början av försöket där halten tillfälligt var uppe i 700 ppm som högst. Därefter stabiliserades halten kring 100-200 ppm fram till tre dagar in i försöket. Dag 4-5 användes Biogas5000 för att automatiskt logga gaskvalitén eftersom det inte fanns någon personal på plats (helg). Tyvärr slutade instrumentet att fundera och därför finns det inga mätningar under dessa dagar. Nästa mättillfälle (dag 6) är halterna H_2S mycket höga i både i provpunkten mitt i askbädden och i utgående gas. Således har genombrottet av H_2S inträffat under en period då det saknas mätdata. Med tanke på de höga halterna H_2S dag 6 är det emellertid troligt att genombrottet inträffat innan dag 5. För att inte riskera att överskatta upptaget av H_2S fram till genombrottet antas tidpunkten för genombrottet ske precis vid start av dag 4. Beräkningsmässigt antas därefter H_2S -halten stiga linjärt fram till nästa mätpunkt (6 dagar in i försöket) då halten är ca 12 000 ppm. Försöket avslutas efter sju dygns körning och då är askbädden så gott som mättad med avseende på H_2S .



Figur 11. H₂S-halt i ingående och utgående gas samt från provpunkten i mitten av askbädden.

Upptag av H₂S

Figur 12 visar det ackumulerade upptaget av H₂S under försök 2. Fram till tidpunkten för det antagna genombrottet (då totalt 460 m³ gas passerat filtret) är upptaget 36 g/kg torr aska och vid avslut av försöket uppgår det totala upptaget till 61 g/kg torr aska. Det är tydligt utifrån grafen att askbädden är mättad på svavel när försöket avslutas. Det visas även av regressionen av ett andrageradens polynom där askans maximala kapacitet skulle vara 62 g/kg torr aska enligt ekvationen.



Figur 12. Ackumulerat upptag av H₂S under försök 2.

Urtag av aska

Likt försök 1 noterades en stark lukt som påminner om någon form av petroleumprodukt då askfiltret öppnades. Askblandningen som vägdes in till försök 2 var mörkgrå/svart till följd av att blandningen innehöll aska B. Vid urtag av askan var det svårt att notera någon färgförändring utan askan påminde mycket om färgen på den ursprungliga askan, möjligtvis att den var något mörkare. Bädden upplevdes än mer kompakt jämfört med försök 1 och det var en del stora fasta klumpar även efter att askan placerats i en hög på marken (figur 13). Askan var något fuktigare i ytskikt samt vid kanterna men i övrigt var det relativt jämn fukthalt i askbädden. Efter åtta veckors lagring utomhus hade ytskiktet på askhögen torkat och blivit ljusare men i övrigt hade askan ungefär samma färg som direkt efter avslut. Inte heller någon efterhärdning kunde påvisas utan askan var fortfarande lucker och de klumpar som fanns gick lätt att dela.



Figur 13. T.v. Aska från försök 2 direkt efter urtag. T.h. askhögen efter 8 veckors lagring. I bakgrunden syns askan från försök 1.

Design och uppskalning askfilter

Askbehov

Försöken har visat att de båda undersökta askorna har mycket god förmåga att rena bort H_2S från deponigas. Det höga upptaget av svavel innebär att mängden aska som behövs vid fullskaliga applikationer är mindre än vad som uppskattades inför detta projekt. Åtgången av aska styrs av askans förmåga att binda H_2S , gasflöde, halten H_2S i orenad gas samt till vilken halt H_2S ska renas till. Tabell 3 visar hur mycket aska som krävs för att rena deponigas vid olika flöden och halter H_2S . Beräkningarna utgår ifrån en askblandning med god kapacitet, 50 g H_2S /kg torr aska samt att all ingående H_2S renas bort. Askbehovet för Löt deponi är högt till följd av den extremt höga ingående halten H_2S men för övriga anläggningar är askbehovet däremot i sammanhanget mer beskedligt och i grova drag handlar det om 10-130 ton torr aska per år.

Tabell 3. Askbehov vid olika gasflöden och ingående H₂S-halter.

Anläggning	Gasflöde m ³ /h	Halt H ₂ S		Flöde H ₂ S		Upptag H ₂ S g/kg torr aska	Askbehov	
		%	ppm	m ³ /h	kg/h		ton/d	ton/år
SÖRAB Löt	200	1,50%	15000	3	4,6	50	2,2	799
Anl A	200	0,05%	500	0,1	0,2	50	0,1	27
Anl B	500	0,05%	500	0,25	0,4	50	0,2	67
Anl C	500	0,10%	1000	0,5	0,8	50	0,4	133
Anl D	100	0,05%	500	0,05	0,1	50	0,0	13
Anl E	100	0,10%	1000	0,1	0,2	50	0,1	27
Anl F	100	0,20%	2000	0,2	0,3	50	0,1	53
Anl G	1000	0,05%	500	0,5	0,8	50	0,4	133

Typ av askfiltersystem

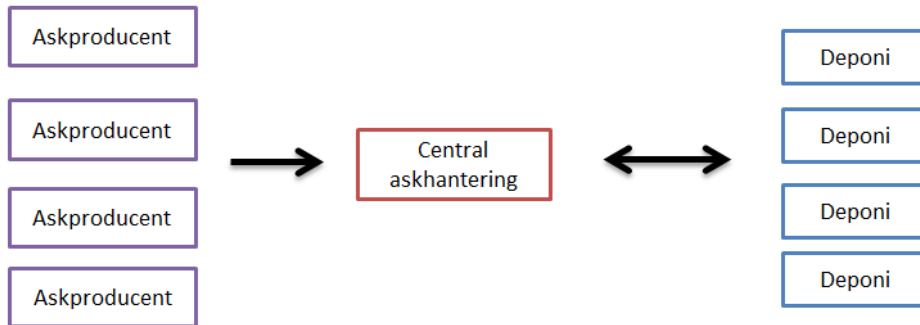
Det finns två alternativ att välja på vid val av askfilterdesign. Alternativ 1 är att ett stationärt system där tömning/fyllning av askfilter sker på deponin. Alternativ 2 är ett mobilt system där askfilter är i form av moduler som kan bytas ut i takt med att askan blir förbrukad. Båda systemen väntas ha samma prestanda avseende rening av HS₂ utan skillnaden i systemen är framförallt hur askan hanteras. Ett stationärt system innebär att allt arbete kopplat till askfilterssystemet sker på deponin och därför krävs större insats av deponins personal. Ett mobilt system öppnar upp för att askhanteringen kan ske centraliserat på extern plats vilket då minskar belastningen för deponins personal. Askhanteringen på central plats borde även leda till mer kostnadseffektiv askhantering eftersom samma centrala anläggning kan bereda askmoduler till flera olika deponier.

En stor fördel med ett mobilt modulsystem är att systemet är flexibelt och enkelt kan skalas upp och ner beroende på anläggningarnas storlek och behov. En nackdel med mobilt modulsystem är att det krävs mer transporter och att lastbilarnas gräns för maximal lastvikt avgör hur stor en modul kan vara. Här bedöms att systemets flexibilitet och enkelhet väger över nackdelarna och därför utgår beräkningar i denna rapport utifrån ett mobilt modulsystem.

Modulsystem askfilter

Askhantering

Figur 14 visar en översikt av askflöden vid ett modulsystem. Aska från olika kraftvärmeverk skickas till en askentreprenör (central askhantering i figur 14) som åtar sig ta hand om askan. Innan askan används för sluttäckning eller liknande kan den användas för att rena deponigas. Aska av lämpligt ursprung blandas därför upp med vatten och laddas i moduler. Efter att modulerna förslutits och kontrollerats vara gastäta kan de skickas vidare till deponier för gasrening. Här antas att förbrukade moduler skickas i retur och att askan efter gasreningen därmed återförs till anläggningen för central askhantering.



Figur 14. Översikt askhantering vid mobilt modulsystem.

Gasflöde och tryckfall

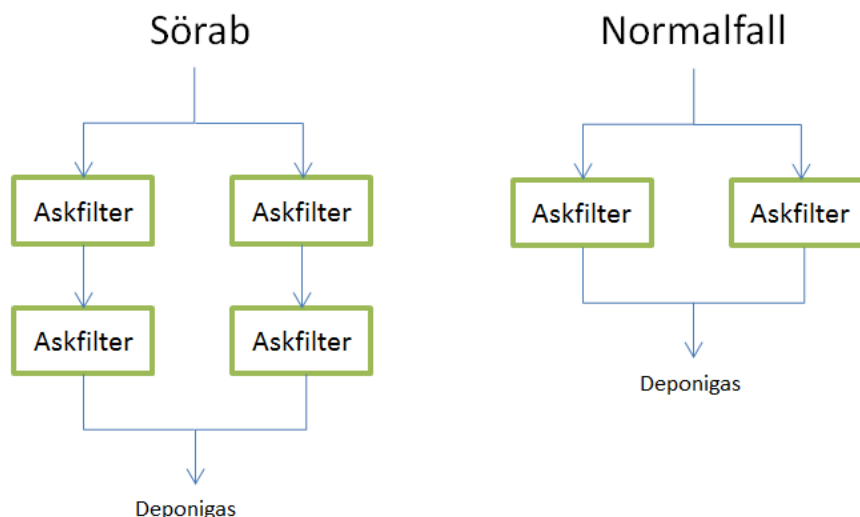
Varje modul antas kunna behandla ett deponigasflöde på upp till 110 m³/h oavsett vilken ingående halt H₂S gasen har. Halten H₂S i ingående gas kommer däremot att avgöra hur ofta ett filter behöver bytas ut. Askfiltermodulerna kommer ge upphov till ett mottryck i gassystemet och ger därmed upphov till extra energiförbrukning för blåsmaskinen. Figur 15 visar hur trycket varierar i deponigassystemet med och utan askfilter. Om det visar sig att tryckfallet är en viktig parameter som har stor påverkan på ekonomin bör det i framtida projekt jobbas vidare med att optimera askfilterdesignen samt askblandningens karaktäristik för att på så sätt få ner mottrycket i filtret.



Figur 15. Schematisk bild över systemtrycket med respektive utan askfilter för rening av H₂S.

Utformning på deponi

Konfigurationen på deponin avgörs av totalt gasflöde samt halt H₂S. I normalfallet (100-1000 m³/h, 500-2 000 ppm) kommer filter att anslutas som parallella moduler. I specialfallet med SÖRAB där H₂S är extremt högt kommer två filter vara kopplade i serie och flera parallella system kommer att behövas. Motivet till att koppla i serie på SÖRAB är att på så sätt utnyttja hela potentialen i askan (50 g/kg torr aska). I normalfallet där det endast är ett filter i serie kommer upptaget vara lägre eftersom filter behöver bytas ut då genombrott uppnåts, dvs. efter ca 50 % av totalt upptag (25 g/kg torr aska). Givetvis går det att ha två moduler i serie även i normalfallet och på så sätt utnyttja hela potentialen i askan men det kräver då dubbelt antal moduler och ger kraftigt ökad kapitalkostnad för systemet. Figur 16 visar vilka två konfigurationer som är aktuella.



Figur 16. Konfiguration askfilter vid SÖRAB *respektive* "normalfallet"

Ekonomi

Kostnad konventionella tekniker

Avfall Sverige har i en rapport från 2014 sammanställt kostnader för sex konventionella tekniker för rening av deponigas med höga halter ingående H₂S [6]. Metoderna som behandlades var olika typer av skrubbers, aktivt kol och våt RedOx-process. De konventionella teknikerna kräver insatskemikalier, vatten och energi (el, ibland värme) för att fungera vilket leder till höga driftskostnader, speciellt om det är stora mängder svavel som ska rensas bort. I jämförelse med konventionella tekniker är askfilter en enkel teknik utan behov av rörliga delar, värmeförsel eller el för omrörning, strippning och pumpning av media. Den elenergi som krävs för askfilter är det extra arbete blåsmaskinen på deponin behöver göra för att kompensera för tryckfallet över askbädden. Här bör noteras att även konventionella reningstekniker ger upphov till mottryck men att detta extra arbete troligen inte inkluderas i kostnadsuppskattningarna som redovisas i [6]. En annan stor fördel med askfilter för gasrening är att det inte krävs några insatskemikalier eller jungfruliga material för att rena gasen utan istället används aska som är en avfallsström från samhället.

Tabell 4 redovisar resultatet från referens [6] där den årliga kostnaden beräknades för konventionella reningstekniker. Deras beräkningar utfördes enligt följande antaganden:

- Gasflöde: 221 m³/h
- Ingående H₂S: 15204 ppm
- Elpris: 1 kr/kWh
- Avskrivningstid: 10 år
- Internränta: 5 %

Tabell 4. Kostnader för att rena deponigas med höga halter H₂S. Uppgifterna kommer ifrån en rapport från Avfall Sverige [6] och anger kostnaden för konventionella reningstekniker.

Teknik	Investering	CAPEX ¹⁾	OPEX ²⁾	Årlig kostnad	Spec. kostnad	
	SEK	SEK	SEK	SEK	SEK/kg H ₂ S	SEK/m ³
Torr skrubber Fe-medium	450 000	59 000	3 448 000	3 507 000	79	1,81
Våt skrubber amin-aldehyd	590 000	77 000	5 077 000	5 154 000	116	2,66
Våt RedOx	5 000 000	648 000	110 000	758 000	17	0,39
Aktivt kol	310 000	41 000	13 208 000	13 249 000	298	6,84
Specialimpregnerat kol	310 000	41 000	3 616 000	3 657 000	82	1,89
Lutskrubber (NaOH)	900 000	117 000	3 865 000	3 982 000	90	2,06

¹⁾ Kapitalkostnad, ²⁾ Driftkostnad

Det bör påpekas att det i dessa beräkningar inte inkluderats kostnader för underhåll/service eller den tid deponipersonalen behöver lägga på anläggningen. Likväl varierar kostnaden för teknikerna mycket, 0,8-13,2 MSEK per år, där RedOx-processen är billigast och aktivt kol dyrast. Till följd av den höga halten H₂S blir den specifika reningskostnaden per volym deponigas hög, 0,39-6,84 SEK/m³. En annan konsekvens av den höga halten H₂S är att reningsanläggningarna blir relativt kostnadseffektiva per kg renat svavel (SEK/kg H₂S) men eftersom massflödet av svavel är mycket högt blir den totala kostnaden ändå betydande.

Den antagna H₂S-halten och gasflödet ovan påminner mycket om förutsättningarna som råder på Löt deponi där försöken med askfilter har genomförts. H₂S-halter på 15 000 ppm är emellertid inte en representativ bild av hur det ser ut på deponier generellt och därför kan nivån på nyckeltalen ovan (SEK/m³ respektive SEK/kg H₂S) inte användas för att beräkna kostnaden vid ”normala” deponier där halten H₂S är lägre.

Lindqvist [7] beskriver i sitt examensarbete kostnader för att rena deponigas med tre konventionella tekniker men även här är det fråga om relativt höga halter H₂S (3 400 ppm). Vid dessa beräkningar antogs en avskrivningstid på 5 år, en internränta på 6 % och ett elpris på 0,50 kr/kWh. Gasflödet sattes till 1 500 m³/h, vilket är mycket högt, och den specifika kostnaden blev då 0,15-0,19 SEK/m³ för de tre studerade metoderna.

I SGC-rapport 163 [8] från 2006 anges kostnaden för H₂S-rening av biogas vid två olika flöden (100 och 600 m³/h) och med ingående H₂S-halter på 500-1 500 ppm. Kostnaden är enligt rapporten 0,23-0,27 SEK/m³ vid 100 m³/h och 0,06-0,09 SEK/m³ vid 600 m³/h. Det finns således tydliga skalfördelar enligt denna referens.

Ekonomi askfilter

Basfall

De ekonomiska beräkningarna för askfilter har utgått ifrån de typanläggningar som redovisades i tabell 3 tidigare i rapporten. Typanläggningarna A till G ska spegla vanliga svenska deponier där gasflödet är 100-1 000 m³/h och H₂S-halten 500-2 000 ppm. Typanläggning SÖRAB Löt är ett specialfall där flödet är 200 m³/h och halten H₂S är extremt hög, 15 000 ppm. Förutsättningarna för beräkningarna återges i tabell 5.

Tabell 5. Förutsättningar för ekonomiska beräkningar för askfilter.

Personalkostnad	350 kr/h
Underhållskostnad	3 % av investeringskostnaden
Avstånd till askleverantör	50 km
Transportkostnad	1 kr/km/ton
Elpris	1 kr/kWh
Avskrivningstid	10 år
Internränta	5 %

I våra beräkningar utgår vi ifrån att blåsmaskinens arbete ökar med 20 % till följd av ökat mottryck över askfiltret. Askfiltrets enkla uppbyggnad bör leda till låga underhållskostnader och därför valdes en relativt låg procentsats för denna kostnadspost, 3 % av total investering. Det antas att askan i sig inte ger upphov till någon kostnad utan att den ”lånas ut” för gasreningen och därefter tas omhand på konventionellt sett vid den centrala askterminalen.

Tabell 6 anger kostnaden för askfilter för de olika typanläggningarna. Investeringskostnaden rymmer utrustning i form av askfiltermoduler, uppställningsplats på deponi och blandningsutrustning för askan. Driftkostnader innefattar personaltid för askhantering samt tillsyn vid deponin, elförbrukning, underhåll och transportkostnad. Större delen av investeringsbehovet utgörs av kostnaden för modulerna och för driftkostnaden är det framförallt personaltid för askhantering som dominerar. Beräkningarna visar att den specifika reningskostnaden för typanläggningarna A-G är 0,08-0,13 SEK/m³. Enligt litteraturuppgifter är detta en klart konkurrenskraftig kostnad, speciellt då det rör sig om gasrening vid mindre/medelstora deponier. Exempelvis är resultaten för E och F (0,11-0,13 SEK/m³) ungefär 50 % lägre jämfört med kostnader för konventionell teknik enligt [8].

Från tabell 6 är det tydligt att halten H₂S och gasflöde har stor påverkan på den specifika kostnaden. Exempelvis blir kostnaden per kg renat svavel (SEK/kg H₂S) låg för anläggningar med höga halter H₂S i ingående gas. Effekten av detta är tydligast då SÖRAB löt jämförs med A. De har båda samma gasflöde medan halten H₂S är 30 gånger högre för SÖRAB Löt och det resulterar i att den specifika reningskostnaden (SEK/kg H₂S) skiljer en tiopotens.

För specialfallet SÖRAB Löt med extra höga halter H₂S visar beräkningarna att askfilter med marginal är billigare än konventionella tekniker. Exempelvis är den

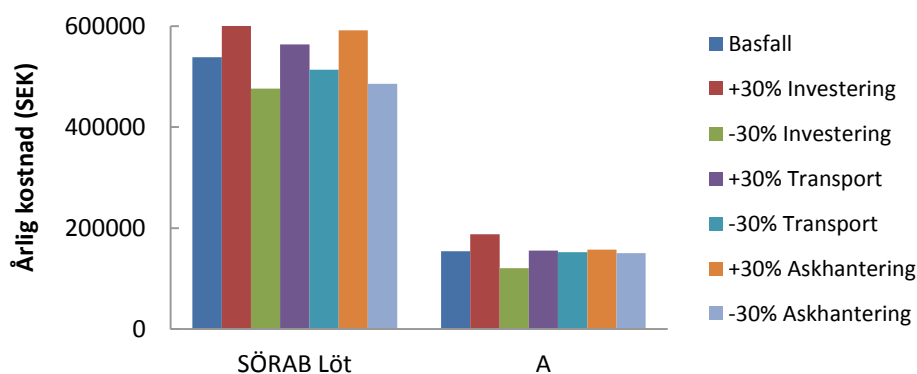
specifika kostnaden (SEK/m³) för askfilter 21 % lägre jämfört med den billigaste tekniken som redovisas i [6].

Tabell 6. Kostnad för att rena bort H₂S med askfilter för olika typanläggningar.

		SÖRAB Löt	A	B	C	D	E	F	G
Gasflöde	m ³ /h	200	200	500	500	100	100	100	1 000
H ₂ S in	ppm	15 000	500	500	1000	500	1 000	2 000	500
Invest.	MSEK	1,3	0,7	1,6	1,6	0,4	0,4	0,4	3,1
CAPEX	SEK	168 400	90 700	207 300	207 300	51 900	51 900	51 900	401 500
OPEX	SEK	370 200	63 300	141 600	185 000	34 700	43 400	60 800	269 600
Årlig kostnad	SEK	538 600	154 000	348 900	392 300	86 600	95 300	112 700	671 100
Spec. kostnad	SEK/m ³	0,31	0,09	0,08	0,09	0,10	0,11	0,13	0,08
	SEK/kg H ₂ S	13	110	100	56	123	68	40	96

Känslighetsanalys

För att avgöra vilken effekt olika parametrar har på den totala kostnadsbilden gjordes en känslighetsanalys för typanläggning A och SÖRAB Löt. Båda anläggningarna behandlar 200 m³/h men H₂S-halten skiljer dem åt, 500 respektive 15 000 ppm. Tre parametrar har studerats, investeringskostnad, transportavståndet mellan askterminal och deponi samt personalkostnad för askhantering. Varje parameter har justerats ± 30 % och en parameter i taget har studerats. Resultatet av känslighetsanalysen redovisas i figur 17. För anläggning A är det bara investeringskostnaden som påverkar den totala kostnaden i någon märkbar omfattning, ± 22 %. Askbehovet för denna anläggning är lågt vilket är anledningen till att transport och askhanteringskostnaden endast har marginell inverkan på den totala kostnaden. För SÖRAB Löt krävs det däremot betydligt mer aska och där är det också tydligt att alla tre studerade parametrar har effekt på totala kostnaden. Procentuellt är dock denna effekt relativt blygsam (investering ±12 %, transport ± 5 %, askhantering ± 10 %).



Figur 17. Tre parametrar har studerats i känslighetsanalysen och beräkningarna har genomförts för typanläggning A och SÖRAB Löt.

Övergripande diskussion

Upptaget av H₂S var i föreliggande studie 44-61 g H₂S/kg torr aska. I tabell 7 jämförs försöksresultaten med de resultat som redovisas i litteraturen, vilka samtliga genomförts med bottenaska från avfallsförbränning. Driftsparametrar, skala och försökstid varierar mycket mellan studierna, vilket gör det svårt att direkt jämföra kapaciteter och prestanda. Fontseré Obis m.fl [5] är den referens (studie i laboratorieskala) som visar upptag i samma storleksordning som våra resultat, trots att vi hade flöden som var 10-100 gånger högre och H₂S-halter som var 6-10 gånger högre än de som redovisas i referens [5]. I jämförelse med referens [2] och [4] är upptaget i denna studie drygt en tiopotens högre. Sammantaget visar våra försök i pilotskala på mycket goda resultat avseende H₂S-upptag även vid ingående H₂S-halter > 10 000 ppm.

Tabell 7. Jämförelse av resultat i föreliggande studie med resultat redovisat i litteraturen.

Referens	Skala	Gasflöde	Ingående H ₂ S-halt	Upptag	Försökstid
	kg torr aska	m ³ /h	ppm	g H ₂ S /kg torr aska	timmar
[2]	11	0,9	100	3,0	404
[3]	390-780	2,3-9,2	62-97	Ej redovisat	3,9-8,2
[4]	0,02	Ej redovisat	30-50	3,1-5,2	3
[5]	0,3	0,07	1 000-3 000	14-56	216-264
Föreliggande studie	330-360	0,7-7,6	10 000-18 000	44-61	168-912

Askbädden fixerade CO₂ i början av försöken men till följd av det höga massflödet av ingående CO₂ blev askan snabbt mättad med avseende på denna gas. Syftet med projektet var dock att använda askfilter för att rena bort H₂S och fixeringen av CO₂ var av underordnad betydelse. Därför sattes driftsparametrarna utifrån att nå god H₂S-rening och inte för att uppnå god fixering av CO₂ under lång tid. I ett större sammanhang när askfilter används i fullskala för rening av H₂S har eventuellt den initiala fixeringen av CO₂ i askbädden en viss betydelse eftersom det då under kort tid blir högre värmevärde i den renade gasen. Huruvida detta utgör ett problem eller inte vid fullskalig tillämpning bör undersökas i framtida studier.

Efter avslut av båda försöken var askbädden tämligen kompakt men det är också väntat med tanke på att askan tagit upp både CO₂ och H₂S och därmed ökat i vikt och volym. I takt med att askan ökar i volym blir bädden mer kompakt, dvs. gasfasen i bädden blir mindre. Askans kompaktitet innebär en del utmaningar då askan ska tömmas ut efter användning men med rätt design på askfilter bör detta gå att hantera även för storskaliga applikationer.

Askan har efter försöken lagrats i högar på marken med fri exponering till vind och nederbörd. Det var visuellt tydligt att det pågick kemiska reaktioner i askan från försök 1 under lagringstiden då denna aska ändrade färg från svart till grå/brun. Färgförändringen var inte lika tydlig för askan från försök 2 och det

beror troligen på att denna aska hade mörk färg redan innan försöket. Det är rimligt att tro att askan oxideras under lagringstiden utomhus och att t.ex. svarta järnsulfider övergår till järn(III)-hydroxider och sulfater [9]. Detta leder samtidigt till en frisättning av vätejoner och pH-sänkning om inte askan har god buffringskapacitet. Utifrån pH-analyser under det här projektet finns det inga tecken på att askan tappar i pH under lagring. Dock är tidsramen för projektet kort och det behövs studier under längre tid för att avgöra askans lagringsduglighet efter H₂S-rening. Målsättningen bör vara att det svavel som tas upp av askan ska stanna kvar i askan även långt efter behandlingstillfället.

Vår bedömning är att askan efter försöken kan användas som konstruktionsmaterial vid deponier med avseende på fysikaliska egenskaper. Även om det fanns en del klumpar i askan från försök 2 gick det enkelt att dela dessa. I övrigt var askan lagom fuktig (dammade ej), relativt finkornig och påminde mycket om finare grusfraktioner. I detta förprojekt har det inte rymts några lakteter av behandlad aska och därför går det inte att avgöra om askan uppfyller de krav som ges av Naturvårdsverkets författningssamling NFS 2004:10. Om det skulle visa sig att det lakas ur en del sulfater från den behandlade askan kommer det förmodligen påverka hur askan hanteras efter försöken. En hypotes är att behandlad aska kan blandas upp med en del färsk aska för att på så sätt höja pH-värdet samt öka innehållet av t.ex. fri kalcium som då potentiellt kan reagera med sulfater och bilda kalciumsulfat. Lakteter och eventuellt behov av inblandning av aska behöver således studeras framöver för att avgöra askans lagringsduglighet.

Det höga upptaget av svavel innebär att det krävs mindre mängder aska i fullskala än vad som förväntades inför det här projektet. För normalstora svenska deponier handlar det om ca 10-130 ton torr aska per år. Enligt statistik från 2015 finns 60 deponier i Sverige som samlar upp gas [10] och skulle samtliga av dessa använda askfilter för rening av H₂S blir det totala nationella askbehovet ca 3 000-5 000 ton torr aska per år. Detta är klart beskedliga mängder och motsvarar t.ex. endast 0,2-0,3 % av den svenska årliga askproduktionen. Tillgången till aska är således inte begränsande för reningsteknikens tekniska potential och det gäller även internationellt.

Det relativt låga askbehovet per anläggning bidrog till att askfilterdesignen utformades som mobila moduler istället för stationära askfiltersystem. Med ett mobilt system ökar flexibiliteten, och skalbarheten samtidigt som arbetsinsatsen för personal på deponin minskar. En annan fördel är att askan hanteras av en central anläggning (askentreprenör) vilket torde ge stordriftsfördelar då denna anläggning kan bereda aska till flera olika deponier. Eftersom föreliggande studie undersökt ett stationärt filter i pilotskala blir en viktig del i framtida studier att utveckla de mobila askfiltermodulernas utformning och design. I detta arbete bör aspekter på bl.a. askans egenskaper, storlek, dimensioner, fyllning och tömning, materialval, förslutning för gastäthet, konsekvenser av gällande regelverk samt kostnader belysas.

De ekonomiska beräkningarna visar att askfilter är en kostnadseffektiv metod för att rena bort H_2S . För specialfallet med SÖRAB Löt där det är extremt höga halter H_2S visade det sig att kostnaden för askfilter är 21 % lägre jämfört med den billigaste konventionella reningstekniken på marknaden [6]. Även vid rening av deponigas med mer normala halter H_2S står sig askfilter väl. Vid låga flöden kring $100 \text{ m}^3/\text{h}$ är askfilter 50 % billigare än konventionell reningsteknik enligt de kostnader som anges i [8]. Skalfördelarna tycks dock vara större för de konventionella reningsteknikerna och därför blir skillnaden mellan reningskostnaden för askfilter jämfört med annan teknik mindre vid högre gasflöden.

De låga reningskostnaderna för askfilter kan öppna upp möjligheter för deponier som idag inte renar gas från H_2S . Det bör leda till att deponigas används effektivare, t.ex. att gas som tidigare facklats p.g.a. höga halter H_2S istället kan användas för el- och värmeproduktion. 2015 facklades nämligen 53 GWh deponigas i Sverige [10] och en rimlig bedömning är att det i många fall beror på problem med höga halter H_2S .

En annan viktig aspekt med rening av H_2S är att svavel fixeras och hindrar på så sätt utsläpp till atmosfären i form av försurande svaveldioxid. Under projektet kontaktades 15 svenska deponier och det visade sig att ingen av dessa hade någon form av H_2S -rening. Även om anläggningarna använder gasen för energiändamål (mest värmeproduktion) leder frånvaron av H_2S -rening till att svavel släpps ut i atmosfären och i förlängningen till ökad försurning i naturen. Andra fördelar med att rena deponigas från H_2S är att slitaget minskar på pannor och förbränningsanläggningar samt att verkningsgraden kan höjas eftersom temperaturen på rökgaserna kan sänkas. Vidare innebär H_2S -rening att potentiella luktproblem kring deponin kan minskas eller till och med helt undanröjas.

Slutsatser

- Genomförda försök visade att de testade askorna kunde rena deponigas med H_2S -halter $> 10\,000$ ppm och höga flöden ned till nivåer som rekommenderas för drift av kraftvärmelanläggningar (< 200 ppm).
- Det totala upptaget av H_2S var 44 respektive 61 g $\text{H}_2\text{S}/\text{kg}$ torr aska för de två testade askorna, vilket är i samma storleksordning som de bästa resultaten dokumenterade i litteraturen.
- Fram till genombrott, dvs. när utgående gas innehöll > 200 ppm H_2S , hade ungefär 50 % av det totala upptaget fixerats.
- Efter försöken var askan tämligen kompakt, men när den tömts från filtret var den förhållandevis lätthanterlig och lucker samt uppvisade ingen tendens till efterhärdning.
- Uppskalningsberäkningar visar att åtgången av aska vid en deponi med $15\,000$ ppm H_2S och ett flöde på $200 \text{ m}^3/\text{h}$ motsvarar ca 800 ton/år, medan

askåtgången för anläggningar med 500 till 2 000 ppm och gasflöden från 100 till 1 000 m³/h varierar mellan ca 10 och 130 ton/år.

- Vid uppskalning föreslås i första hand ett system med central hantering av aska (terminal) och mobila askfiltermoduler som förbereds centralt innan distribution till deponierna. Utformning och design av gastäta mobila askfiltermoduler med hänsyn till bl.a. den behandlade askans kompakta egenskaper är ett viktigt steg för fortsatt utveckling av systemet.
- Resultaten från projektet visar att askfilter har god teknisk och ekonomisk potential att rena bort H₂S från deponigas. Exempelvis är askfilter 21 % billigare än konventionell teknik vid rening av höga halter H₂S, >10 000 ppm. För små och medelstora deponier med mer normala halter H₂S kan kostnadsbesparingen med askfilter vara ännu större, upp till 50 %.

Framtida utvecklingsbehov

Denna förstudie har i pilotskala klart visat att avfallsaska kan användas för rening av H₂S från deponigas med mycket god prestanda till ett konkurrenskraftigt pris och med relativt låga mängder aska för en deponi. Som tidigare beskrivits i diskussion och slutsatser bedömer vi att utveckling av en prototyp av en mobil askfiltermodul som kan testas i fullskala vid deponier är en mycket viktig och central del i fortsatt arbete. En kravspecifikation för utformning och design av en sådan enhet måste tas fram där bl.a. askans egenskaper, materialval, uppfyllande av gällande regelverk m.m. beaktas och kostnader kan beräknas. Försök bör göras vid fler deponier med olika gasflöden och H₂S-halter i deponigasen för att verifiera prestanda från de genomförda pilotförsöken. Vidare måste den behandlade askan undersökas vad gäller urlakningsegenskaper, lagringsbarhet och användbarhet som konstruktionsmaterial eller till sluttäckning av deponier. De samlade miljökonsekvenserna för användning av aska för rening av H₂S behöver också studeras där hänsyn tas till att deponigasen kan användas för kraftvärmeproduktion och att svavel fixeras istället för att emitteras till atmosfären.

Referenser

[1] Handbok för deponigas. Rapport D 2013:02. Avfall Sverige Utveckling

<http://www.avfallsverige.se/fileadmin/uploads/Rapporter/Deponering/D2013-02.pdf>

[2] Ducom G, Radu-Tirnovanu D, Pascual C, Benadda B, Germain P. 2009. Biogas-municipal solid waste incineration bottom ash interactions: Sulphur compounds removal. *J Hazard Mater* 166, 1102-1108.

[3] Mostbauer P, Lombardi L, Olivieri T, Lenz S. 2014. Pilot scale evaluation of the BABIBU process – upgrading of landfill gas or biogas with the use of MSWI bottom ash. *Waste Manage* 34, 125-133.

- [4] del Valle-Zermeño R, Romero-Güiza MS, Chimenos JM, Formosa J, Mata-Alvarez J, Astals S. 2015. Biogas upgrading using MSWI bottom ash: an integrated municipal solid waste management. *Renew Energy* 80, 184-189.
- [5] Fontseré Obis M, Germain P, Troesch O, Spillemaecker M, Benbelkacem H. 2016. Valorization of MSWI bottom ash for biogas desulfurization: Influence of biogas water content. *Waste Manage* 60, 388-396.
- [6] Svavelväte och andra föreningar i deponigas. Rening för långsiktiga avsättningsmöjligheter. Rapport D2014:08, Avfall Sverige.
- [7] Lindqvist, A-S. 2008. Studie av deponigasanläggning – kvalitetshöjande åtgärder samt alternativa användningsområden. Examensarbete Luleå tekniska universitet.
- [8] Benjaminsson, J. 2006. Nya renings- och uppgraderingstekniker för biogas. SGC-rapport 163. April 2006, Malmö.
- [9] Bozkurt S, Moreno L, Neretnieks I. 2000. Long-term processes in waste deposits. *Sci Tot Environ* 250, 101-121.
- [10] Energimyndigheten. 2016. Produktion och användning av biogas och rötresten år 2015. ES 2016:04.