

TRANSPORTKEDJA FÖR ASKÅTERFÖRING TILL SKOG

RAPPORT 2016:303



Transportkedja för askåterföring till skog

Studie av lakningsegenskaper som grund för
effektivisering

DANIEL GLIMTOFT

ISBN 978-91-7673- 303-5 | © 2016 ENERGIFORSK

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Denna rapport är slutrapportering av projekt Q14-230 Effektivisering av transportkedjan för ökad askåterföring till skog (Energimyndighetens projektnummer 40183-1) inom programmet Miljöriktig användning av askor som bedrivs av Energiforsk. Programmet startade inom ramen för Värmeforsks forskningsprogram och ingår liksom all övrig forskningsverksamhet inom Värmeforsk numera i Energiforsk.

Projektet har, genom att studera lakningsegenskaper, undersökt om det är rationellt att använda returtransporter och mellanlagring för att transportera aska från värmeverket till skogen.

Projektet har genomförts av Daniel Glimtoft, Svensk Skogsgödsling AB. Projektledaren vill särskilt tacka Henrik Bjurström och Britt-Marie Steenari som bidragit med värdefull kunskap.

Projektet har följts av en referensgrupp bestående av:

Mårten Zakrisson, Norrenergi

Helené Rasmusson, Linnéuniversitetet

Johan Sundberg, Sundbergs Åkeri

Anders Andersson, Södra

Stockholm oktober 2016

Helena Sellerholm

Områdesansvarig

Bränslebaserad el- och värmeproduktion, Energiforsk AB

Sammanfattning

Vid förbränning av skogsbränslen bildas det aska som innehåller alla de näringsämnen som bränslet innehöll förutom kväve, vilket avgår vid förbränningen. För att kompensera näringsuttaget ur skog återförs en del av denna aska till skog.

Dagens återföring av aska till skog upplevs av många askproducenter som allt för dyr i förhållande till andra alternativ, som exempelvis deponitäckning eller konstruktion av hårdgjorda ytor. Det medför att stora delar av den aska som skulle kunna användas för askåterföring istället används till andra ändamål. En stor del av kostnaderna för dagens återföring av krossaska till skog utgörs av transport till mellanlager, kostnader för och hantering på upplag, samt transport ut till spridningsobjekt i skog.

Projektet har genom att studera lakningsegenskaper hos två typer av askgranuler utrett möjligheterna till att rationalisera hanteringen av aska genom att använda returtransporter och mellanlagring av granulerad aska i skog i anslutning till spridningsobjekt. Försöket utgjordes av fyra försöksytor med olika mängd granulerad aska (47-8460 kg), samt en kontrollyta. Då avrinning och uppsamling av lakvatten från försöksytorna placerades mitt under askhögarna innebär utformningen att läckaget överskattas jämfört med fältförhållande, framförallt för svårslösliga ämnen. Försöket pågick mellan 2015-06-14 och 2016-01-08.

Askan som använts kom från två olika anläggningar och i två olika storlekar. "Normal granul" (4-8 mm) producerades av aska från skogsbränsle och "stor granul" (10-40 mm) producerades av aska från förbränning av skogsbränsle och torv. Under försökets dryga sex månader läckte 50 % av kaliumet för normala granuler och 14 % för stora granuler. Motsvarande siffra för natrium var 35 % respektive 9 %. Skillnaderna i läckage kan framförallt förklaras av granulernas storlek där mindre kornstorlek ger ökat läckage, men även till en mindre del av bränslets ursprung. Alkali förekommer i vedaska främst som lättlösliga salter, medan de i torvaska även förekommer som mer svårslösliga silikater. Läcketaget av de övriga näringsämnena kalcium (Ca), magnesium (Mg) och fosfor (P) var under 1 % för både normal granul och stor granul. Läcketaget av tungmetaller var störst för normal granul, där värdena för arsenik (As) och vanadin (V) stack ut med värden på 2,4 % och 4,7 %. Bland övriga metaller var läcketaget störst för bor (B) med 4,5 %. Den stora utlakningen av alkali gör det olämpligt att mellanlagra normal granul i bulk i anslutning till spridningsobjekt. Värt att notera är också att stor granul, till skillnad från normal granul, delvis gick sönder under försöket.

För att använda sig av returtransporter i form av flisbilar vid transport av granulerad aska i bulk ut till skog krävs det lång framförhållning, vilket innebär att granulerna kan behöva ligga i mer än ett halvår innan spridning.

Lakningsstudien visar att långtidslagring av färdiga granuler i anslutning till spridningsobjekt kräver någon form av väderskydd, genom exempelvis täckning med presenning. Användning av returtransport vid ett avstånd på 50 km innebär en kostnadsänkning på 30 % (19 kr/ton). Detta skall ställas i relation till kostnaden av täckning av granuler och extra planering. En försiktig uppskattning av täckningskostnaden visar att den överstiger besparingen i transportkostnad. Ett sätt att i mindre omfattning använda sig av returtransporter i bulk är att använda sig av returtransporter som komplement till direktleveranser av aska när askspridaren befinner sig i samma område som produktionen av biobränsle. Då majoriteten av

produktionen av biobränsle sker under vinterhalvåret och majoriteten av askåterföringen sker under sommarhalvåret, kan detta bli en högst begränsad verksamhet. Samtidigt ställer det stora krav på en effektiv planering, vilket i sin tur kräver utveckling av gemensamma planeringsverktyg för kedjans olika aktörer. Användning av granuler framför krossaska innebär i sig 15 % lägre transportkostnad på grund av lägre fukthalt. Om granulerna inte skyddas för nederbörd kommer upptag av vatten på grund av granulernas porositet att leda till ökade spridningskostnader.

Summary

Background

The Swedish society has an ambition to increase the use of wood fuel to decrease the use of fossile fuels. The use of wood fuel, and especially branches and needles, results in an increased withdrawal of nutrients which may be a problem due to decreased nutrient storage in the soil, which in turn may lead to decreased growth. This can partly be counteracted by returning the ash that is produced during wood fuel combustion to the forest. The ash contains all the nutrients, except nitrogen, that was present in the wood fuel. The Swedish Forestry Agency has recommendations for ash quality and dosing. A standard dose is 3 ton dry weight, which equals 4 ton moist ash in practical spreading.

Ash recycling is by most of the ash producers considered to be too expensive compared to other alternatives, such as covering of landfills and construction of hardened surfaces. Much of the suitable wood ash is therefore used for other purposes than recycling in forests. A large part of the total cost for ash recycling is transportation.

The ash is usually wetted and transported from the ash producer to a temporary storage site, typically a fuel storage site, where it is self hardened during at least a couple of months. It is then crushed or/and sieved before transportation to the spreading site.

The aim of the project was to investigate the leaching properties of two different granulated ashes and the possibilities to use return transportation with forest fuel trucks from ash producer directly to the forest and temporary bulk storage at the spreading site to achieve a more cost efficient handling.

Method

The experiment consisted of four different treatments and one control, see figure 1 and table 1. The leachate was collected in ibc containers and sampled at 10 occasions between 2015-06-14 and 2016-01-08. The drainage was placed at the center of the area, and the design results in an overestimation in leaching compared to field conditions.

The ash comes from two different CFB boilers in Sweden and Finland, see table 2. The granules are of two different sizes, "normal sized granule" (4-8 mm) from Sweden and "large granule" (10-40 mm) from Finland, see figure 2. The Swedish CFB boiler is fed with forest fuels and the Finnish CFB boiler is fed with forest fuels and peat (60/40). Peat has a higher ash content than forest fuels which makes the contribution of ash from the peat larger than the proportion of peat in the fuel mix.



Figure 1 Experimental site

Table 1 Description of experimental site

	Area A	Area B	Area C	Area D	Area E
Granule size (mm)	-----	4-8	10-40	10-40	10-40
Surface area (m ²)	1,37	0,59	0,58	1,31	16,25
Amount (kg)	0	47	47	200	8460
Height (m)	0	0,25	0,25	0,4	1,2



Figure 2 Normal granule and large granule

The ash was analyzed by Belab AB/ALS Scandinavia AB accordingly: moisture (EN 1477:2099/15414:2011), LOI (187187), pH, conductivity, Ca, Mg, K, P, Cu, Zn, As, Pb, Cd, Cr, Ni, V, B and Hg.

Table 2 Ash analysis. Total analysis of characteristics and content of nutrients and heavy metals in granules at the start of the experiment.

Analysis	Unit	Normal granule	Normal granule	Target Values
Moisture	%	14,6	17,9	
LOI	% d.w	7,8	3,6	
pH		12,3	10,6	
Conductivity	mS/m	2410	475	2400-2600
Calcium Ca	mg/kg d.w	166000	110000	> 125000
Magnesium Mg	mg/kg d.w	16000	16900	> 15000
Potassium K	mg/kg d.w	50400	20800	> 30000
Sodium Na	mg/kg d.w	7650	8430	
Phosphorus P	mg/kg d.w	12500	10600	> 7000
Boron B	mg/kg d.w	279	123	800
Copper Cu	mg/kg d.w	61,5	96,5	400
Zinc Zn	mg/kg d.w	804	702	7000
Arsenic As	mg/kg d.w	<3	15,2	30
Lead Pb	mg/kg d.w	55,9	58,7	300
Cadmium Cd	mg/kg d.w	21	3,6	30
Mercury Hg	mg/kg d.w	0,1	0,4	3
Chrome Cr	mg/kg d.w	72	128	200
Nickel Ni	mg/kg d.w	24	58	70
Vanadium V	mg/kg d.w	18,7	80	70

Results and discussion

The difference in amount of leachate, see figure 3, depends mainly on evaporation and binding of water in the internal porosity of the granules. The difference in amount of leachate can only to a minor extent be explained by chemical binding.

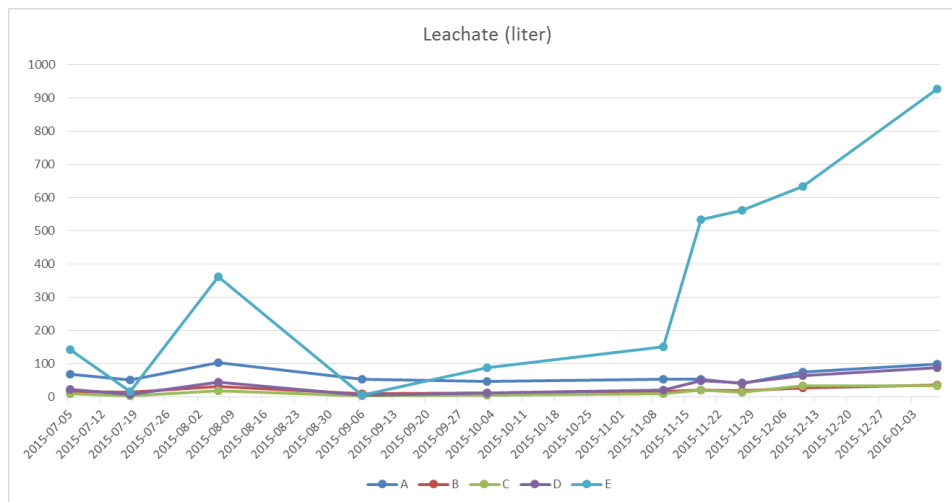


Figure 3 Amount of leachate

During the just over six months that leachate was collected, 50% of the potassium leached from area B (normal granules) and 14% from area D and E (large granules) respectively, see figure 4. The corresponding figures for Na was 35% for area B and 9% for area D and E. The differences in leaching can to a large extent be explained by difference in granule size [10]. There is a lack of references since many previous studies have been conducted on granules produced with different techniques and use of binders, but granules of fly ash, green liquor sludge and lime [12] and granules of fly ash and dolomite lime [13] show high leaching rates of potassium in accordance with this project. The leaching was low for the other nutrients, see table 3. The leaching of heavy metals were generally low, see table 3, with exceptions for arsenic (2,7%) and vanadium (4,7%) for the normal granule. The leaching of arsenic and vanadium can be explained by their increased solubility at high pH.

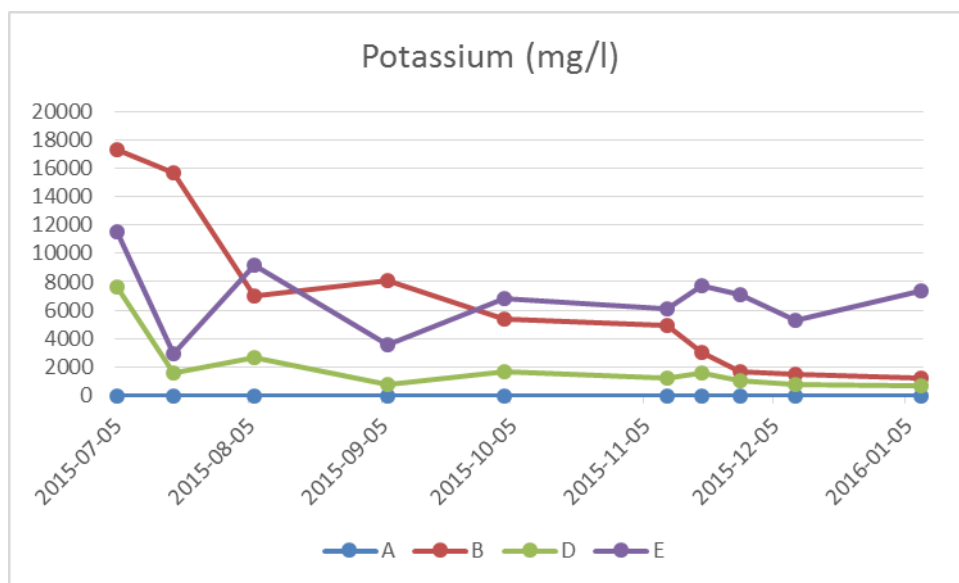


Figure 4 Potassium in leachate

Table 3 Leached quantities and shares

	A	B		D	E		
	Leachad (mg)	Leached (mg)	Share (%)	Leached (mg)	Share (%)	Leached (mg)	Share (%)
Calcium (Ca)	748	774	0,01	111137	0,51	1566834	0,17
Magnesium (Mg)	123	214	0,03	28867	0,85	153109	0,11
Potassium (K)	293	1192315	50,33	593169	14,26	24892740	14,15
Sodium (Na)	909	125723	34,97	149055	8,84	6387180	8,96
Phosphorus (P)	5,3	2776	0,47	26	<0,02	148	<0,02
Boron (B)	13	590	4,5	349	1,4	2014	0,19
Copper (Cu)	0,85	1,50	0,05	0,59	<0,02	5,83	<0,02
Zinc (Zn)	-----	-----	-----	-----	-----	13	<0,02
Arsenic (As)	0,65	3,4	2,41	0,46	0,02	9,74	<0,02
Lead (Pb)	0,15	1,75	0,07	0,09	<0,02	1	<0,02
Cadmium (Cd)	0,03	0,06	<0,02	0,21	0,03	8,26	0,03
Mercury (Hg)	0,01	0,01	0,15	0,01	<0,02	0,07	<0,02
Chrome (Cr)	0,3	17	0,5	49	0,19	2356	0,22
Nickel (Ni)	1,68	0,26	0,022	0,35	<0,02	2,61	<0,02
Vanadium (V)	0,04	42	4,72	9	0,06	275	0,04

The strength of the granules varied for normal and large granule. The normal granules were more or less intact after the leaching, while some of the large granules had disintegrated, see figure 5. The disintegration can depend on several different mechanisms. Freezing and thawing can increase the disintegration rate, but also the curing process. If the carbonatisation occurs after the granulation, the structure swells

and the granule can disintegrate [17]. Also weathering of ettringite when pH decrease during leaching can cause disintegration of granules [3].



Figure 5 Area D and E after leaching.

Use of return transportation is most efficient on long distances since the loading and off-loading then constitutes a minor share of the total cost. It can therefore serve as way to increase the area of spreading. It's difficult to use return transportation for just in time delivery for spreading for many reasons, mainly planning and communication. There are many companies working with forest fuels and they have different systems for planning and communication between different machine- and transportation-systems. The leaching, of especially potassium, makes it unsuitable to store granulated ash in bulk without cover, and the cost for cover exceeds the savings of using return transports.

Conclusion

The project was initiated with hopes of being able to temporary store granulated wood ash for a longer period in connection to the spreading area. The possibilities of longtime storage increase the possibilities of using return transports and thereby decrease the cost of ash recycling. The high leaching of mostly potassium, but also vanadium, arsenic and boron from the normal granule makes it unsuitable for longtime storage if not protected from precipitation. Longtime storage of non-covered granules also leads to water uptake due to internal porosity, which leads to higher costs for spreading. The alternatives are to cover the granules, which results in additional costs that exceed the savings of using return transports, or to use traditional transportation of ash adjacent to spreading. Use of granulated wood ash results in a 15 % decrease in transportation costs due to lower water content. Large granule leaches less alkali and heavy metals, but partly breaks during storage.

Innehåll

1	Inledning	15
1.1	Bakgrund	15
1.1.1	Traditionell hantering av krossaska	15
1.1.2	Mellanlagring av aska	16
1.1.3	Transport av aska	16
1.1.4	Utveckling av askåterföring	17
2	Metod	18
2.1	Försöksupplägg för lakförsök	18
2.2	Val av aska	19
2.3	Beskrivning av aska	19
2.4	Analyser av lakvatten	22
2.5	Transportstudie	22
3	Resultat	23
3.1	Lakvatten	23
3.1.1	Lakvattenvolym och avdunstning	23
3.1.2	Konduktivitet	25
3.1.3	pH	27
3.1.4	Metallinnehåll	28
3.1.5	L/S kvot	33
3.1.6	Jämförelse mellan konduktivitet, Na och K	34
3.1.7	Totalt utlakade mängder	34
3.1.8	Hållbarhet av granuler	35
3.2	Transport	36
4	Diskussion	37
4.1	Lakvattenmängd	37
4.2	Konduktivitet	37
4.3	pH	38
4.4	Metaller	38
4.5	Utlakade mängder	38
4.6	Hållbarhet av granuler	40
4.7	Transport	41
5	Slutsats	42
6	Litteraturförteckning	43
7	Bilaga 1. Läckage av övriga metaller	44

1 Inledning

1.1 BAKGRUND

Samhället har en ambition att öka användningen av skogsbränsle för att minska användningen av fossila bränslen. Uttaget av skogsbränsle, och då framförallt grot (grenar och toppar), innebär ett ökat näringsuttag från skogen vilket på sikt kan utgöra ett problem genom ett minskat näringsförråd i marken. Detta går att kompensera genom att återföra den aska som bildas vid förbränning av skogsbränslen.

Skogsstyrelsen och en rad andra aktörer driver frågan om askåterföring med argumenten compensation av näringsuttag, bibehållande av den långsiktiga produktionsförmågan och att kompensera försurning. Askåterföring ses också som en del i arbetet med att uppnå flera av Sveriges miljömål.

För askproducenter är dagens askhantering vid återföring till skog generellt dyrare än exempelvis deponitäckning och anläggning av hårdgjorda ytor. Detta medför ofta att för askåterföring godkänd aska används för just deponitäckning eller anläggning av hårdgjorda ytor om verksamheten sker på kommersiella villkor. Skogsstyrelsen har en ambition om kraftigt ökad askåterföring till skog. Skogsstyrelsens nuvarande mål är att arealen askåterföring skall motsvara den areal slutavverkning med grot uttag av gran där uttaget av stamved är större än 200 m³sk/ha, vilket innebär de flesta slutavverkningar i Götaland, Svealand och längs norrlandskusten [1]. För tall eller blandskog krävs det större avverkningsvolym per hektar för att samma behov skall uppstå. För att nå detta mål krävs många olika typer av insatser, bland annat har Skogsstyrelsen samordnat ett initiativ med deltagare från energi- och skogsbranschen kallat "Aktörsrådet" och arbetar med en handlingsplan under 2015 och 2016. Andra sätt att öka askåterföringen är minskade kostnader för askåterföring alternativt en ökad betalningsvilja från markägare. Ett sätt att öka betalningsviljan är att skapa en mer enhetlig produkt med jämn kvalitet och innehåll, samt hög igenkänningsfaktor (jämför med konstgödsel) i form av granulerad aska.

1.1.1 Traditionell hantering av krossaska

Traditionell askhantering vid återföring till skog innebär följande moment.

1. Utmatning och befuktning av aska
2. Transport av aska till mellanlager
3. Krossning av hårdad aska
4. Transport till spridningsobjekt
5. Spridning i skog

Den totala kostnaden för askåterföring ligger enligt egna erfarenheter i dagsläget för större anläggningar på 500-600 kr/ton fuktad aska och är ökande. Av detta står transport- och lagringskostnaderna ofta för 30-40%. Spridning av aska sker generellt under vår, sommar och höst. Under senare delen av hösten och vintern är det ofta blött i skogarna i södra Sverige (där huvuddelen av spridningen sker) vilket innebär ökad risk för körskador både i skog och på vägar. Då krossaska innehåller ca 25 % vatten så finns det även risk att askans spridningsegenskaper på grund av förändringar i konsistens förändras/försämras vid minusgrader och till slut även fryser ihop. Det kan även bli problem med att snö fastnar i spridningsutrustningen.

1.1.2 Mellanlagring av aska

Mellanlagrets funktion är framförallt att säkerställa att askan härdar, samt för att lagra aska under den tid av året då det generellt inte sker någon askåterföring pga. väder och dålig bärighet i skogen. I samband med utmatning av aska vid värmeverk befuktas askan för att starta härdningsprocessen och för att underlätta hantering. Under härdningsprocessen omvandlas en stor del av askans beståndsdelar till mindre reaktiva föreningar. De viktigaste härdningsprocesserna är:



Process (1) är en snabb och värmebildande process, medan process (2) är långsammare. Process (2) är beroende av en vätskefas där reaktanterna kan lösas och transporteras och överföringen av kalcium från hydroxid till karbonat innebär att lösligheten minskar med en faktor 100 [2]. Process (3) påverkas av mängden tillgänglig svavel som finns och de konkurrerande reaktionernas hastighet. En annan process som kan påverka askans egenskaper är bildning av kalciumsilikathydrat i närvaro av kiseldioxid [3]. En kemiskt och fysikaliskt stabiliserad aska minimerar risken för negativa effekter såsom t.ex. brännskador på vitmossa i samband med askåterföring och bidrar till att produkten har en lång upplösningstid i fält.

1.1.3 Transport av aska

Transport av krossaska sker oftast med transport på lastbilar med växelflak. Dessa flak ställs antingen av i anslutning till spridningsobjekt och töms av askspridaren, eller så töms de genom tippning på marken i anslutning till spridningsobjekt varefter askspridaren lastar från marken (Figur 1). Att ställa ut och hämta växelflak innebär en högre kostnad än tippning, men innebär också mindre spill och städbehov på upplagsytor. Utplacering av växelflak ställer också större krav på planering för att undvika stillestånd för askspridare eller asktransportör. Tippning sker normalt sett samma dag eller någon dag innan spridning för att inte bygga upp för stora lager och för att inte komma i konflikt med gällande lagstiftning gällande mellanlagring av aska. Ett flak rymmer normalt ca 11 ton, vilket räcker till ca 3 ha. Askspridaren rymmer i sin tur ca 8 ton.



Figur 1 Tippning eller användning av container vid askspridning

Figure 1 Tipping or using container when spreading ash

1.1.4 Utveckling av askåterföring

Återföring av aska till skogsmark har bedrivits under lång tid i Sverige, först i försöksverksamhet och i kommersiell skala sedan slutet av 1990-talet. De senaste åren har branschens utveckling främst handlat om effektivare karthantering och dokumentation genom datorstöd. Själva hanteringen av krossaska har inte utvecklats särskilt mycket de senaste 15 åren, främst av rent fysiska skäl. Självhårdning av aska kräver tid och utrymme. Då fjärr- och kraftvärmeverk ofta ligger nära sina kunder innebär det begränsad tillgång till lämpliga lagringsytor, vilket gör att askan måste transporteras till en terminalyta för mellanlagring (hårdning).

Det finns två alternativ för att slippa mellanlagringen. Alternativ ett är att köra krossaskan direkt från värmeverk till skog för att ha mellanlager på särskilt utvalda platser i skogen i anslutning till spridningsobjekt. Askan krossas på plats och sprids i närområdet. Mellanlagret utnyttjas bara en gång och miljöeffekterna bedöms som små [4]. Kringkostnaderna för denna hantering är relativt höga vilket gör att det krävs relativt stora volymer, eller kraftigt förkortade transportavstånd. Det andra alternativet är att använda sig av granulerad eller pelleterad aska. Denna produkt är redo för spridning direkt efter produktion och behöver därför inte mellanlagras. Granuler kan också transporteras med returfrakt i exempelvis fliscontainrar då den inte häftar fast på metallytor, till skillnad från krossaska. Enligt Skogsstyrelsens rekommendationer [5] kan askprodukter där 95 % av materialet har en kornstorlek som överstiger 4 mm spridas oavsett värde på elektrisk konduktivitet. Finkornigt material innebär större kontaktyta, vilket ökar risken för negativa effekter i form av ex brännskador på mossor.

2 Metod

2.1 FÖRSÖKSUPPLÄGG FÖR LAKFÖRSÖK

Lakningsförsöket genomfördes utanför Glimåkra i nordöstra Skåne. Försöket pågick från 2015-06-14 till 2016-01-08 och det uppsamlade vattnets volym mättes och provtogs vid 10 tillfällen. Försöksytorna (Figur 2) utgjordes av fem anlagda ytor; kontroll (A), 47 kg normal granul (B), 47 kg stor granul (C), 200 kg stor granul (D) och 8460 kg stor granul (E). För beskrivning av granuler se avsnitt 2.3. Ytorna placerades på en öppen plats med de fyra ytorna granul ca 75 m från kontrollytan för att undvika damning. Ytorna består av kompakterat stenmjöl med fall mot varje försöksytas mitt. Tätskiktet ovanpå stenmjölet utgörs av skyddsduk och gummiduk (EPDM) av märket Firestone. EPDM är en inert gummiduk med hög kemisk resistans och är godkänd som dricksvattenreservoar. Från mitten av varje yta leder ett avlopp ut till en separat IBC container. Ytornas storlek är A: 1,37 m², B: 0,59 m², C: 0,58 m², D: 1,31 m² och E: 16,25 m². Temperaturdata som redovisas under resultat är tagna från SMHIs närmsta provtagningsstation, Osby, ca 13,5 km västerut. Försöksyta C var med som ett extra försöksled där lakvattenmängd, pH och konduktivitet analyserades vid samtliga provtagningsstillfällen, medan metallinnehåll analyserades vid 6 av 10 tillfällen. Yta C finns därför inte med i redovisningen av metallinnehåll.



Figur 2 Försöksyta

Figure 2 Experimental site

2.2 VAL AV ASKA

För att granulering av aska skall vara ett konkurrenskraftigt alternativ till krossaska för en askproducent, krävs det relativt stora mängder aska eftersom en granuleringsanläggning är en stor investering. För att uppnå en jämn kvalitet krävs det också att askan som används är torr. Då det är dyrt att transportera torr aska på grund av låg volymvikt och krav på dammfria transporter innebär det att det generellt är svårt med anläggningar som delas av flera aktörer.

Stora förbränningsanläggningar har oftast pannor av typen cirkulerande, eller bubblande fluidiserad bädd (CFB eller BFB). Askan kan generellt delas upp i två fraktioner, bottenaska och flygaska, där flygaskan används för askåterföring. Bottenaskan består till största delen av pannsand, vilken innehåller låga halter av näringsämnen och därför inte används vid askåterföring.

2.3 BESKRIVNING AV ASKA

Askan som granulerats och använts i försöken är flygaska från två olika förbränningsanläggningar av typen cirkulerande fluidiserad bädd, CFB. Askan har granulerats i två olika anläggningar och benämns normal granul och stor granul. För analys av innehåll se Tabell 2. I tillverkningsprocessen skapas först mikrogranuler (1-2 mm), vilka sedan tillåts växa på en tallriksgranulator till önskad storlek. Vid användning av torr flygaska från skogsbränslen tillförs endast vatten under tillverkningsprocessen.



Figur 3 Normal granul och stor granul

Figure 3 Normal granule and large granule

Normal granul består av flygaska från en CFB panna eldad med skogsbränsle hos Fortum Värme i Brista. Granulerna har tillverkats i labskala under våren 2014 och har en kornstorlek om ca 4-8 mm. Granulerna har sedan produktion förvarats i täta plastpåsar. Stor granul består av flygaska från en CFB panna eldad med skogsbränsle och torv (60/40) hos Rovaniemi Energi. Granulerna har producerats under våren 2015 i kommersiell skala och har en kornstorlek om ca 10-40 mm. Då torv generellt har en högre askhalt än skogsbränsle innebär det att torvens andel i askan är större än i bränslemixen [6]. Vid en askhalt om 2% för skogsbränsle och 4% för torv blir askfördelning 45% från skogsbränsle och 55% från torv. Den ursprungliga ambitionen var att använda granuler av ren trädbränsleaska, men det visade sig svårt att uppnå då det inte gick att få tag på ren trädbränsleaska inom rimligt avstånd från produktionsanläggningen.

Andelen finfraktion bedömdes som låg innan projektet påbörjades och ingen siktning genomfördes innan projektstart

Innan projektet startades gjordes en snabbtest av hur granulerna påverkades av frysning och upptining genom att de blötlades i ca 2 veckor, varefter de frystes ner i två dygn och sedan tinades upp. Okulär besiktning och test med handkraft visade ingen förändring av hållbarhet.

Tabell 1 Beskrivning av försöksytor

Table 1 Description of experimental site

	Yta A	Yta B	Yta C	Yta D	Yta E
Granulstorlek (mm)	-----	4-8	10-40	10-40	10-40
Ytstorlek (m ²)	1,37	0,59	0,58	1,31	16,25
Mängd (kg)	0	47	47	200	8460
Höjd (m)	0	0,25	0,25	0,4	1,2

Askan analyserades av Belab AB/ALS Scandinavia AB enligt följande: fukthalt (EN 1477:2099/15414:2011), oförbränt (187187), pH, konduktivitet, Ca, Mg, K, P, Cu, Zn, As, Pb, Cd, Cr, Ni, V, B och Hg.

Tabell 2 Askanalys. Totalanalys av egenskaper och innehåll av växtnäringsämnen och tungmetaller i granuler vid försöksstart.

Tabel 2 Ash analysis. Total analysis of characteristics and content of nutrients and heavy metals in granules at the start of the experiment.

Analys	Enhet Unit	Normal granul Normal granule	Stor granul Normal granule	Riktvärden SKS Target Values
Fukthalt	%	14,6	17,9	
Oförbränt	% Ts	7,8	3,6	
pH		12,3	10,6	
Konduktivitet	mS/m	2410	475	2400-2600
Kalcium Ca	mg/kg Ts	166000	110000	> 125000
Magnesium Mg	mg/kg Ts	16000	16900	> 15000
Kalium K	mg/kg Ts	50400	20800	> 30000
Natrium Na	mg/Kg Ts	7650	8430	
Fosfor P	mg/kg Ts	12500	10600	> 7000
Bor B	mg/kg Ts	279	123	800
Koppar Cu	mg/kg Ts	61,5	96,5	400
Zink Zn	mg/kg Ts	804	702	7000
Arsenik As	mg/kg Ts	<3	15,2	30
Bly Pb	mg/kg Ts	55,9	58,7	300
Kadmium Cd	mg/kg Ts	21	3,6	30
Kvicksilver Hg	mg/kg Ts	0,1	0,4	3
Krom Cr	mg/kg Ts	72	128	200
Nickel Ni	mg/kg Ts	24	58	70
Vanadin V	mg/kg Ts	18,7	80	70

2.4 ANALYSER AV LAKVATTEN

Askan analyserades av ALS Scandinavia AB enligt följande: pH, konduktivitet, Ca, Mg, K, Na, P, Cu, Zn, As, Pb, Cd, Cr, Ni, V, B och Hg. Proverna filtrerades med 0,45 µm filterpapper före analys. På grund av ett utökat antal försöksled analyserades pH och konduktivitet för yta B och C vid samtliga 10 provtagningstillfällen, medan metallhalterna endast analyserades vid provtagning nr 1, 2, 3, 5, 7 och 9. Prover för eventuell framtida analys togs ut och förvarades i kyl enligt instruktioner från ALS. I samband med sammanställning av resultat sågs ett behov av att komplettera analysen för yta B. I samband med detta framgick att lagrade prover skulle surgjorts vid provtagning. Om provet inte surgörs ökar risken för utfällning av metaller på själva flaskan. Efter diskussioner med ALS togs beslut att ändå genomföra analysen då själva analysen innebär surgörning till pH 2 och den ursprungliga provflaskan används under hela processen, vilket gör att eventuella utfällningar till stor del detekteras i lösningen.

2.5 TRANSPORTSTUDIE

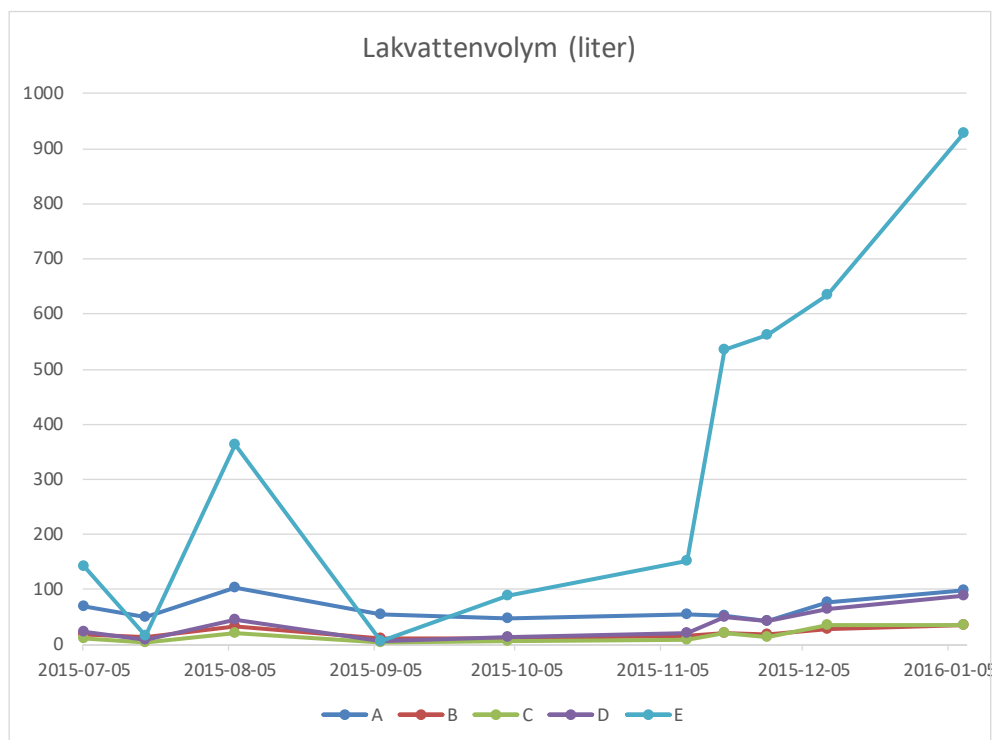
Underlag för transportkostnader togs fram genom förfrågningar hos ett flertal aktörer i branschen samt egna erfarenheter från tidigare entreprenadverksamhet inom området. Målsättningen var att undersöka möjligheter till nyttjande av returtransporter för att transportera askan ut till spridningsobjekt.

Ett vanligt sätt att beräkna transportkostnad är att utgå från en kostnad/tidsåtgång för lastning och lossning och sedan lägga till en kostnad per ton per transporterad km. Hur formeln ser ut beror främst på vilket transportsystem som valts, utställning av flak eller tippning, och lastbilarnas konstruktion i form av 2- eller 3-flakssystem.

3 Resultat

3.1 LAKVATTEN

3.1.1 Lakvattenvolym och avdunstning



Figur 4 Lakvattenvolym (liter)

Figure 4 Amount of leachate (liter)

Försöksytorna utgjordes av fem anlagda ytor; kontroll (A), 47 kg normal granul (B), 47 kg stor granul (C), 200 kg stor granul (D) och 8460 kg stor granul (E).

Vädret varierade under sommaren mellan sol och regnskurar, särskilt under andra halvan av juli kom det flera kraftiga regnskurar. September och oktober hade liten nederbörd och mycket sol. Från och med november till och med 2016-01-08 var det kallare än -1 °C kl 18.00 under 17 dygn. Värt att notera är att vid provtagningsstillfälle nummer 4 var lakvattenvolymen för yta B dubbelt så stor som för yta E, trots att yta E är 28 gånger större än yta B. Vid första provtagningsstillfället noterades en svag brunfärgning av vattnet från ytorna C, D och E, men inget bottensediment. Vid övriga provtagningar var vattnet klart.

Tabell 3 Total avrinning, avrinning, samt avdunstning och inbindning per m² bottenyta

Table 3 Total run-off, run-off, and evaporation and binding per m² bottom area

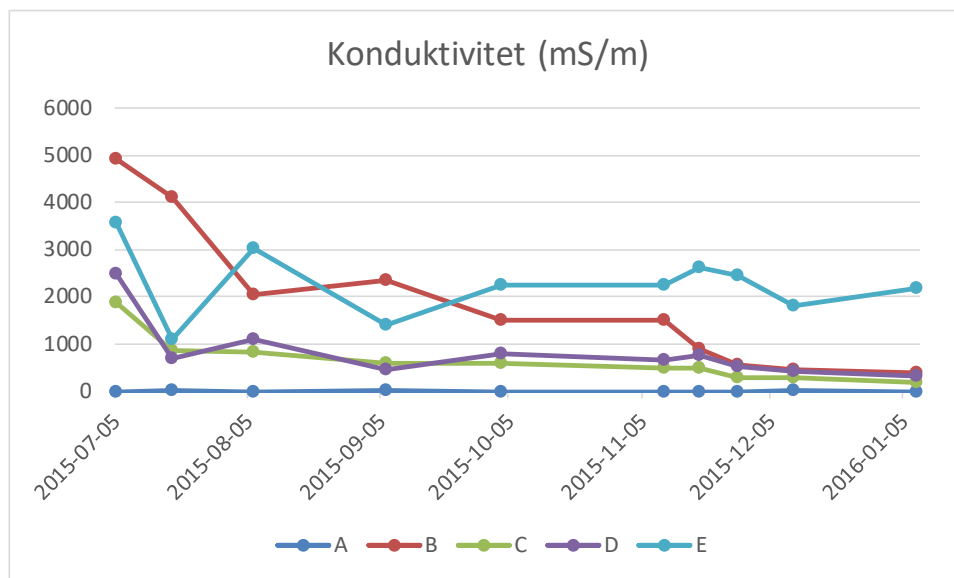
	Total Avrinning (liter)	Avrinning liter per m²	Avdunstning och inbindning (liter) per m²
A	650	475	0
B	211	355	122
C	161	277	200
D	364	278	199
E	3428	211	266

Avrinningen per m² bottenyta var störst för kontrollen och minst från yta E Tabell 3.

Avdunstning och inbindning för yta B-E har beräknats utifrån förutsättningen att avdunstning och inbindning från yta A är noll. Under försöket har nederbörden uppmätts separat ca 500 m från försöksytorna och sett över de 10 provtagningarna är medelvärdet för kvoten mellan uppmätt vattenmängd för yta A och uppmätt nederbörd justerad för storlek av yta A 1,00. Som lägst var kvoten 0,90 vid provtagningsstillfälle nummer fyra (september) och högst, 1,09, vid provtagningsstillfälle 6 (november).

3.1.2 Konduktivitet

Högst värde på konduktivitet uppmättes vid det första provtagningsstillfället, för att därefter minska under resten av provtagningsperioden, Figur 5. För yta E (stor granul) stabiliserades konduktiviteten på en avsevärt högre nivå än övriga provtytor.



Figur 5 Konduktivitet

Figure 5 Conductivity

Notera de vita saltutfällningarna på de granuler som grävts fram efter avslutat projekt till vänster mitt i Figur 6.

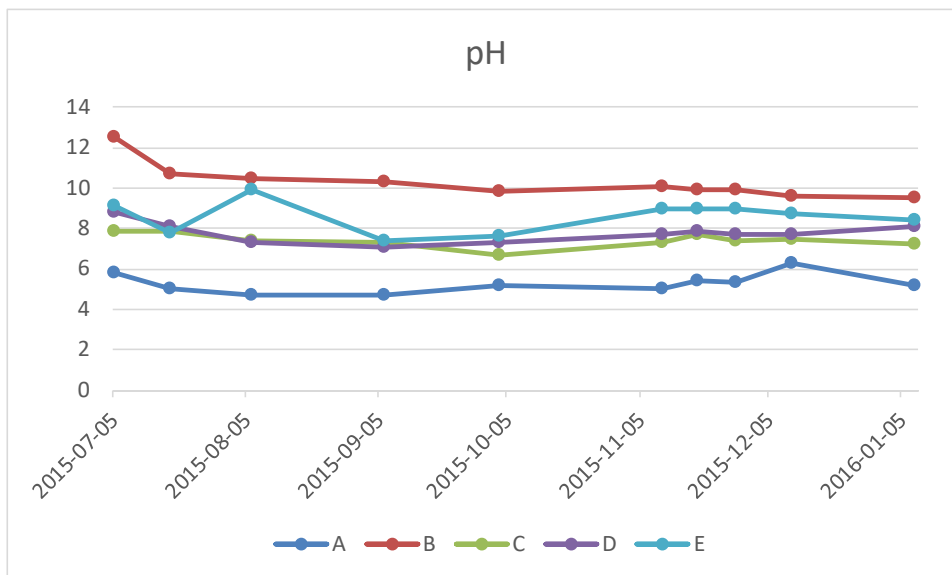


Figur 6 Yta E efter avslutat försök

Figure 6 Area E after finished experiment

3.1.3 pH

Yta B har störst förändring i pH över tid då det mellan provtagningstillfälle 1 och 2 sjunker från 12,5 till 10,7 för att sedan gradvis sjunka till 9,5.



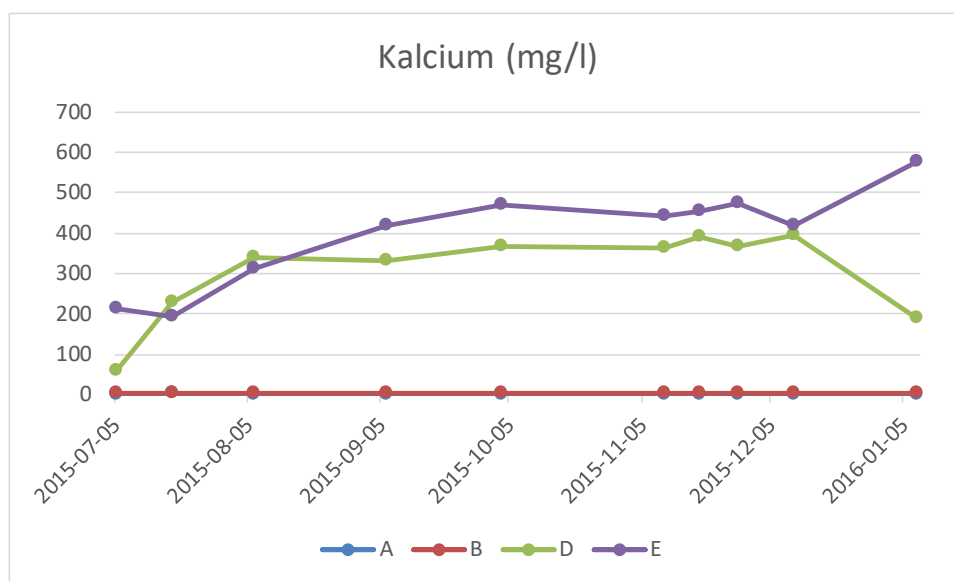
Figur 7 pH

Figure 7 pH

3.1.4 Metallinnehåll

För prover med värden under analysföretagets redovisningsgräns används värdet för redovisningsgräns. Detta innebär att om en halt i analysprotokollet anges som ex <0,5 µg/l så används halten 0,5 µg/l vid beräkningar. Yta C redovisas ej som tidigare nämnts. Värt att notera är dock att de analyser som gjordes stämmer väl överens med värden för yta D.

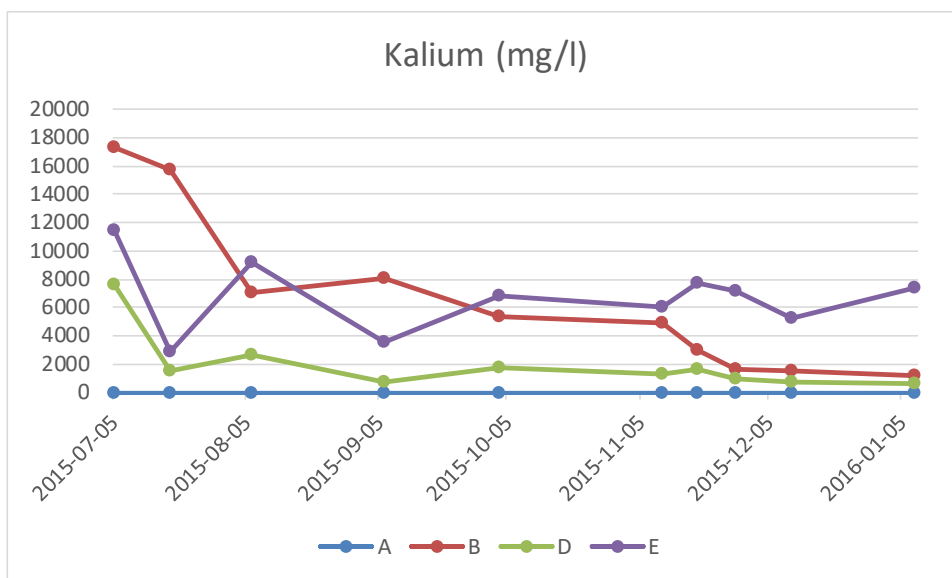
Enligt Figur 8 ser det ut att vara stor skillnad i läckage mellan yta B och yta D/E, men det är värt att notera att halterna i sig är låga. Motsvarande resultat gäller för magnesium, vars figur återfinns i bilaga 1.



Figur 8 Kalcium

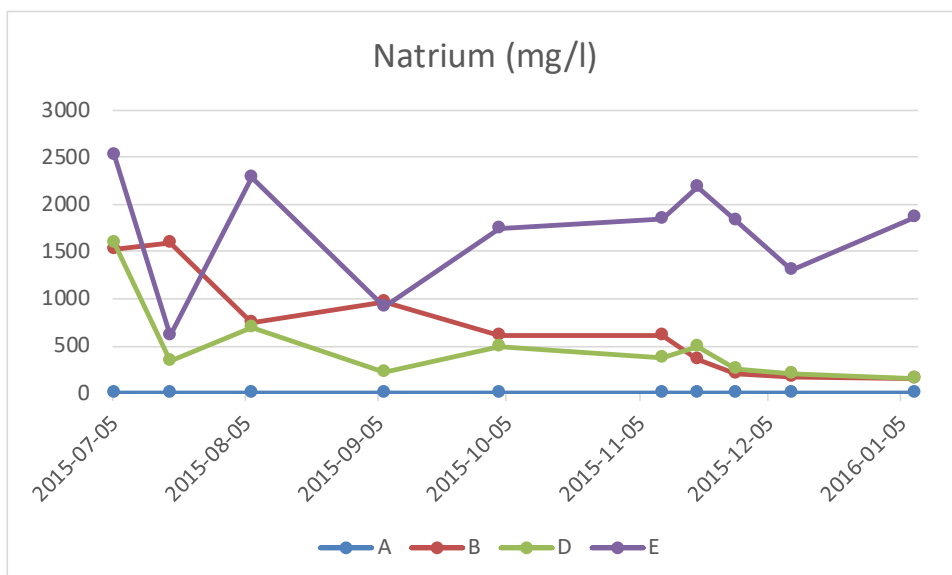
Figure 8 Calcium

För yta B och D minskar läckaget av kalium efterhand, Figur 9, medan läckaget från yta E stabiliseras på en högre nivå. Läckaet av natrium, Figur 10, uppvisar samma mönster.



Figur 9 Kalium

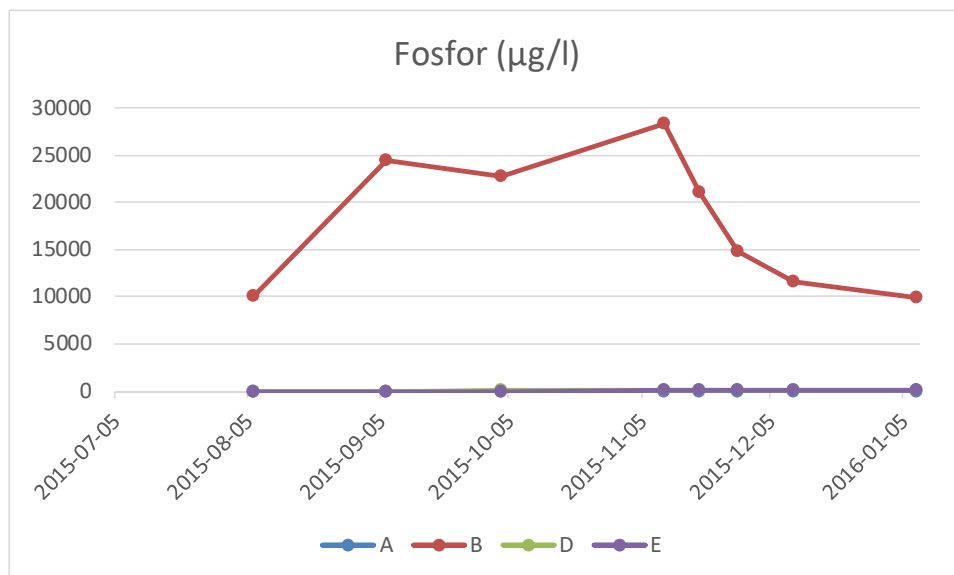
Figure 9 Potassium



Figur 10 Natrium

Figure 10 Sodium

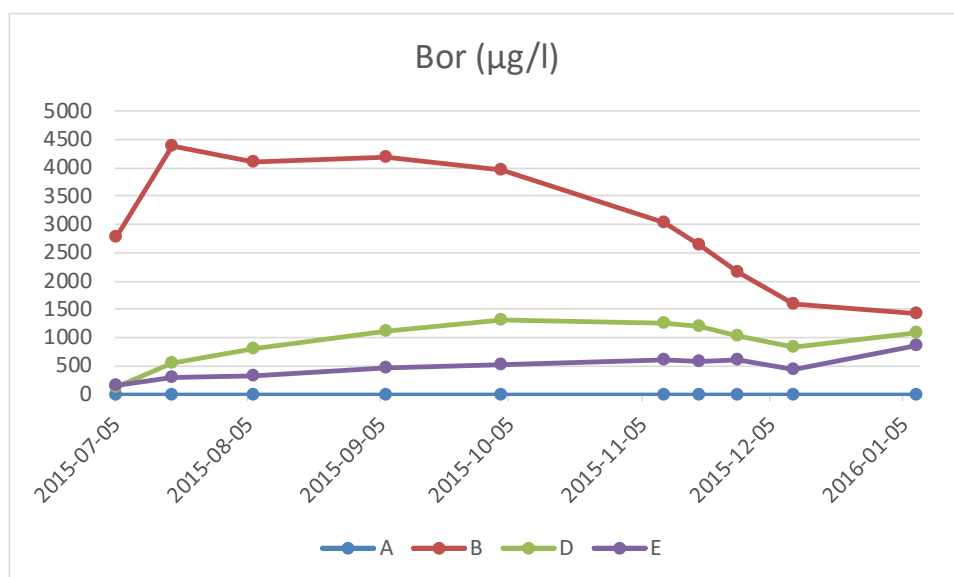
Innehåll av fosfor analyserades först från provtagningstillfälle 3 och framåt på grund av missförstånd vid beställning av analyspaket. Det kan verka som att läckaget av fosfor från yta B är väldigt stort, men notera enheten. Det totala läckaget från yta B är 0,4 %. Det enskilt högsta värdet för provtagningarna på yta D och E ligger på 131 µg/l.



Figur 11 Fosfor

Figure 11 Phosphorus

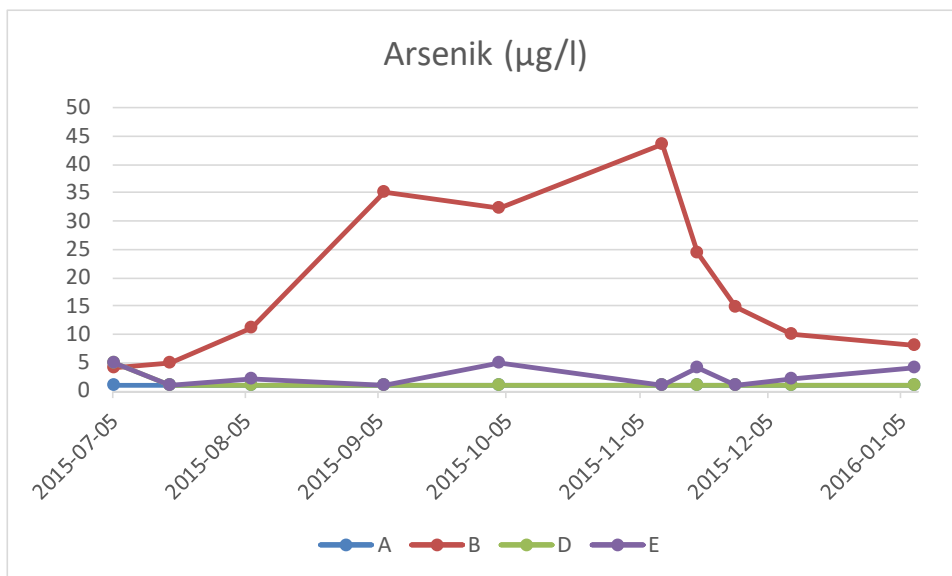
Läckaget av bor uppvisar olika mönster för normal och stor granul, där normal granul (yta B) efter en initial ökning minskar efterhand, medan stor granul (yta D och E) ökar och vid sista provtagningen har ett högre läckage än vid försöksstart.



Figur 12 Bor

Figure 12 Boron

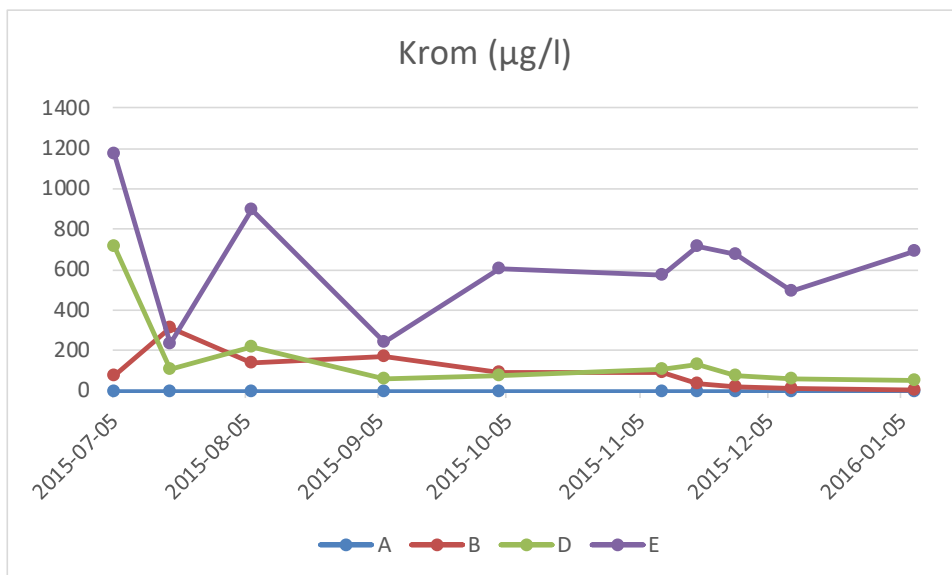
Läckaget av arsenik är störst från yta B (normal granul) där det först ökar kraftigt, för att sedan avta kraftigt. Värt att notera är också att den ursprungliga koncentrationen av arsenik i stor granul (yta D och E) var 5 gånger högre än i normal granul.



Figur 13 Arsenik

Figure 13 Arsenic

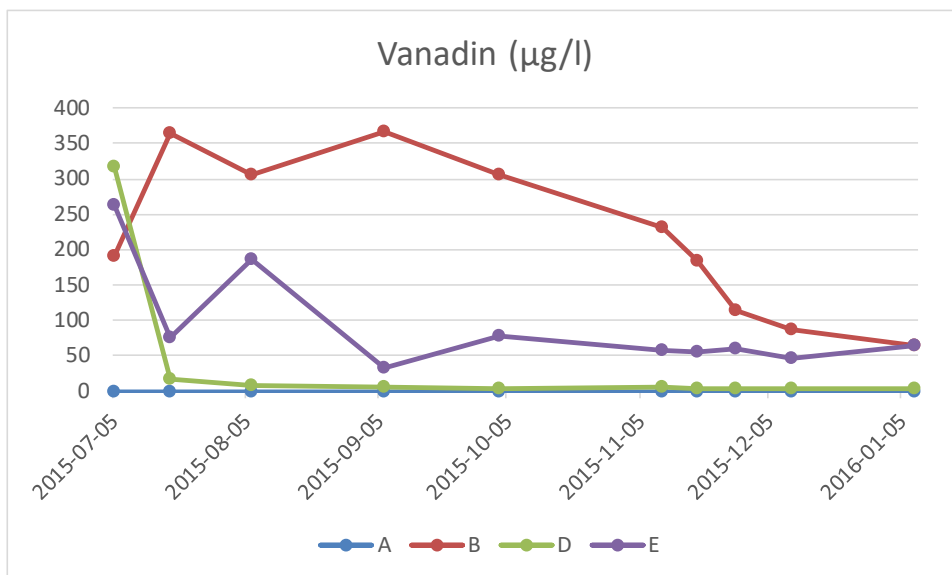
För yta E är utlakningsmönstret av krom mycket likt utlakningsmönstret för kalium, Figur 9.



Figur 14 Krom

Figure 14 Chrome

För yta B (normal granul) inleds försöket med ökande läckage av Vanadin för att sedan gradvis sjunka. Yta D (stor granul) har vid första provtagningen ett högt läckage för att sedan sjunka till mycket låga nivåer. Variationerna för yta E (stor granul) följer initialt mängden lakvatten.

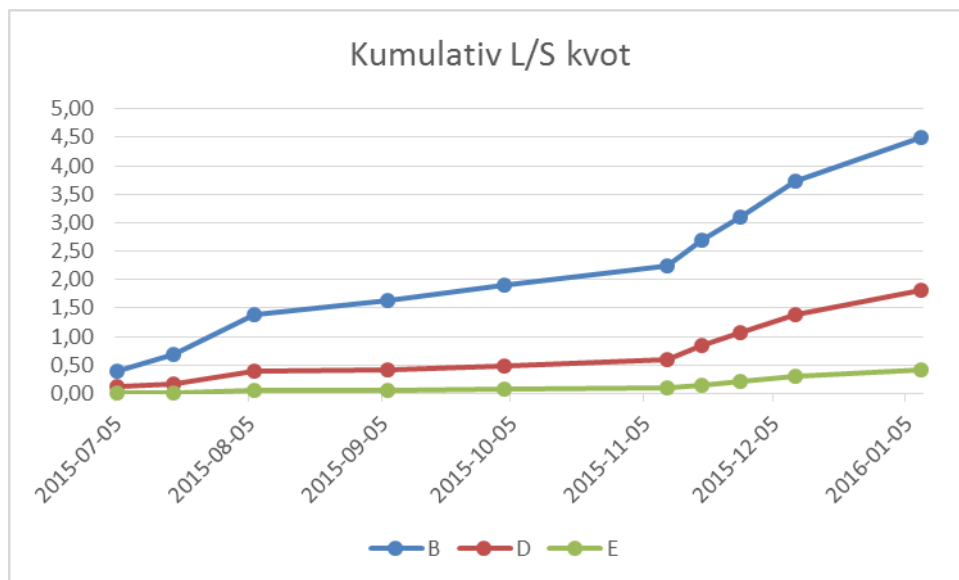


Figur 15 Vanadin

Figure 15 Vanadium

3.1.5 L/S kvot

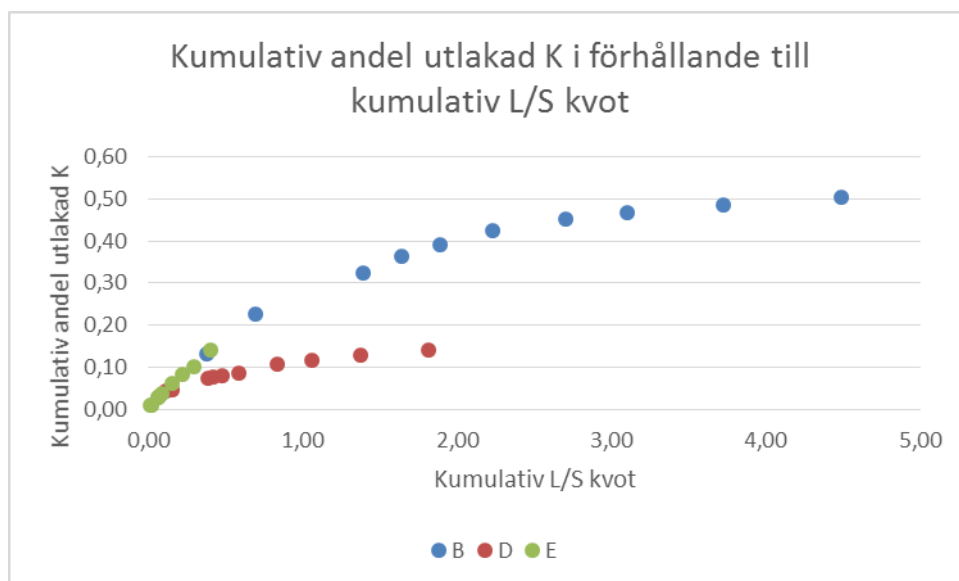
Redovisning av ackumulerad L/S kvot (liquide/solid, lakvatten i liter/aska i kg) vid de 10 provtagningstillfällena visar på högst värde för B. En L/S kvot på 1 betyder att för varje kg granulerad aska som finns på provytan så har 1 liter lakvatten samlats upp.



Figur 16 Kumulativ L/S kvot

Figure 16 Cumulative L/S quota

Genom att relatera kumulativ andel utlakad K i förhållande till kumulativ L/S kvot visar det sig att kurvan för yta E uppvisar samma mönster som yta B.

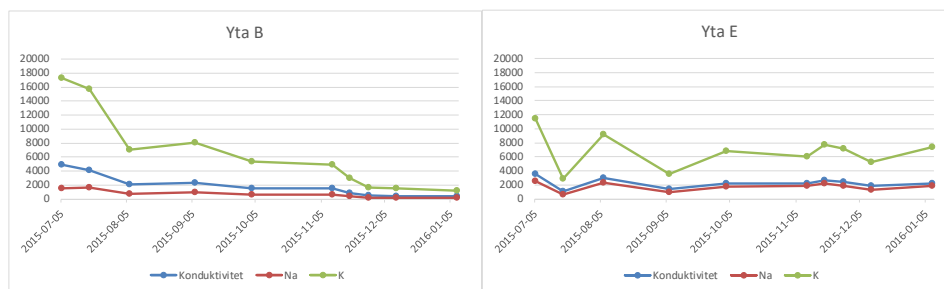


Figur 17 Kumulativ andel utlakad K i förhållande till kumulativ L/S kvot

Figure 17 Cumulative share of leached K in relation to cumulative L/S quota

3.1.6 Jämförelse mellan konduktivitet, Na och K

För att tydliggöra Figur 5, Figur 9 och Figur 10 redovisas en sammanslagen bild för yta B och yta E. Lakningsmönstren för kalium och natrium följer värdena av konduktiviteten väl.



Figur 18 Jämförelse mellan konduktivitet (mS/m), Na (mg/l) och K (mg/l) för yta B och E

Figure 18 Comparison between conductivity (mS/m), Na (mg/l) och K (mg/l) for area B and E

3.1.7 Totalt utlakade mängder

I Tabell 4 redovisas de totala utlakade mängderna från yta A, B, D och E. För stor granul (yta D och E) var det väldigt låg andel av tungmetallerna som lakades ut

Tabell 4 Utlakade mängder och andelar

Table 4 Leached quantities and shares

	A			B		D		E	
	Utlakat (mg)	Utlakat (mg)	Andel (%)	Utlakat (mg)	Andel (%)	Utlakat (mg)	Andel (%)	Utlakat (mg)	Andel (%)
Kalcium (Ca)	748	774	0,01	111137	0,51	1566834	0,17		
Magnesium (Mg)	123	214	0,03	28867	0,85	153109	0,11		
Kalium (K)	293	1192315	50,33	593169	14,26	24892740	14,15		
Natrium (Na)	909	125723	34,97	149055	8,84	6387180	8,96		
Fosfor (P)	5,3	2776	0,47	26	<0,02	148	<0,02		
Bor (B)	13	590	4,5	349	1,4	2014	0,19		
Koppar (Cu)	0,85	1,50	0,05	0,59	<0,02	5,83	<0,02		
Zink (Zn)	-----	-----	-----	-----	-----	13	<0,02		
Arsenik (As)	0,65	3,4	2,41	0,46	0,02	9,74	<0,02		
Bly (Pb)	0,15	1,75	0,07	0,09	<0,02	1	<0,02		
Kadmium (Cd)	0,03	0,06	<0,02	0,21	0,03	8,26	0,03		
Kvicksilver (Hg)	0,01	0,01	0,15	0,01	<0,02	0,07	<0,02		
Krom (Cr)	0,3	17	0,5	49	0,19	2356	0,22		
Nickel (Ni)	1,68	0,26	0,022	0,35	<0,02	2,61	<0,02		
Vanadin (V)	0,04	42	4,72	9	0,06	275	0,04		

3.1.8 Hållbarhet av granuler

Tvårt emot testerna som gjordes på stor granul innan försöksöksstart så gick en del av dessa sönder under försöket, se Figur 19. Störst andel påverkade granuler återfanns längs högarnas mantelyta.

Bilderna togs 2016-03-13. Det hade då varit kallare än $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ kl 18.00 vid 50 tillfällen sedan projektstart



Figur 19 Yta D och E

Figure 19 Area D and E

3.2 TRANSPORT

Diskussioner och beräkningar har gjorts med ett antal aktörer som arbetar med transport inom skogsbranschen. Resultat redovisade i Tabell 5 anger typiska kostnader i kr/ton för tippning i skog i anslutning till spridningsobjekt. För korta avstånd blir besparingen generellt väldigt liten då lastning och lossning utgör en stor del av den totala tidsåtgången. Inverkan av lastning och lossning minskar med ökande transportavstånd. Beräkningarna tar inte hänsyn till eventuella regleringar av vinstdelning mm i nuvarande avtal.

Tabell 5 Typisk transportkostnad vid bulktransport – Tippning (kr/ton)

Tabel 5 Typical transportation costs for bulk transport – Tipping (SEK/ton)

Avstånd (km)	Kostnad utan returtransport	Kostnad med returtransport
10	38	34
20	45	37
30	53	41
40	60	45
50	68	49
60	75	52
70	83	56
80	90	60
90	98	63
100	105	67
110	113	71
120	120	74

4 Diskussion

4.1 LAKVATTENMÄNGD

Avdunstningen från kontrollytan var, sett över säsongen, obetydlig på grund av försökets utformning med dräneringsrör från ytan ner i en sluten IBC-container. För askytorna innebär materialet att vattnet bromsas upp och, beroende på temperatur och solinstrålning, till viss del avdunstar från högens yta. Askhögarnas exponerade yta påverkas också av högarnas koniska form och användningen av granul. Vid ett antagande om att 50 % av ytan av granulerna vid högarnas mantelyta exponeras innebär det en nästan fördubblad exponeringsyta i förhållande till askhögarnas bottenyta. Stor granul har en mörkare färg vilket antas ge ökad avdunstning (yta C-E) i förhållande till normal granul (yta B). Det första steget i härdningsprocessen av aska är en exoterm reaktion vilket initialt kan påverka avdunstningen från högarnas yta [7] om befuktningen av aska inte varit fullständig. Högarnas koniska form ger att den största högen (yta E) har störst volym i förhållande till exponerad yta och därmed störst påverkan på avdunstningen.

Även askhögarnas genomsläpplighet kan påverka lakvattenmängden genom att vatten som rinner närmare mantelytan lättare avdunstar. Generellt gäller för stackat material (ex bark, spån och krossaska) att en stor del av avrinning rör sig längs mantelytan i de översta decimetrarna av högen. Ju större hög, desto tydligare blir effekten. Askhögarnas genomsläpplighet har inte mätts, men högen på yta E är så stor att det bör påverkat avrinningen.

Skillnaderna i avrinning mellan kontrollytan och askytorna beror till största delen av avdunstning och fysiskt vatten i granulernas porstruktur. Kulorna upplevdes som kompakta, men intern porositet kan påverka den fysiska inbindningen. Tyvärr mättes inte fukthalten vid brytningen av askhögarna, men en mörkare färg noterades inne i hög D och E, vilket tyder på blötare granuler. Stora granuler (C-E) från försöket tog efter 3 månaders lagring inomhus upp ca 30% av sin vikt i vatten i vattenbad, medan normala granuler (B) tog upp ca 15% av sin vikt i vatten. Den interna porositeten kan därmed antas ha en stor påverkan på mängden lakvatten. Vid härdning av aska binds vatten in, men för ex yta B är skillnaden mellan nederbörd och lakvattenmängd 70 liter (motsvarande 122 liter per m²) medan ursprungsvikten av granulerna var 47 kg. Kemisk inbindning av vatten kan därför bara utgöra en mindre mängd.

4.2 KONDUKTIVITET

Havsvatten har i genomsnitt en ledningsförmåga runt 5 000 mS/m [8]. Konduktiviteten vid första provtagningen av yta B är alltså i nivå med konduktiviteten på havsvatten. Kalium och natrium har överlägset högst halter i askan och därmed störst potential för att påverka värdet på konduktiviteten. Värdet på konduktiviteten för de olika försöksleden följer också värdena för kalium och natrium väl (Figur 5, Figur 9 och Figur 10). Yta B har högst värden på konduktivitet och även störst andel utlakad alkali. För yta B och D minskar konduktiviteten över tid med minskande värden på kalium och natrium. Yta E uppvisar inte samma mönster, utan konduktiviteten ligger kvar på en mycket högre nivå och samma mönster gäller för värdena på kalium och natrium. Grafernas utseende påverkas delvis av skillnaden i storleksordning mellan försöksytorna, men yta E har en något högre takt av utlakning av alkali än yta D vid sista provtagningstillfället.

Trots ovanstående resonemang kring högarnas vattenpermeabilitet (4.1), verkar genomsläppligheten vara tillräckligt stor för att den vattenlösliga delen av alkali inte skall påverkas av granulhögarnas storlek då andelen utlakat alkali är lika stor för yta D och E.

Hög konduktivitet är i sig inget hinder för att använda de aktuella granulerna i skog då det enligt Skogsstyrelsens rekommendationer inte finns några begränsningar gällande konduktivitet för askgranuler där 95% av materialet har en kornstorlek som överstiger 4 mm.

De absoluta värdena på konduktiviteten påverkas kraftigt av mängden avrinnande vatten då utspädning ger lägre konduktivitet. Det är därför svårt att relatera konduktivitet i avrinnande vatten till rekommenderade värden enligt Skogsstyrelsens rekommendationer [5]. Värt att notera är också att konduktiviteten för askgranulerna vid projektstart, se Tabell 2, uppfyllde Skogsstyrelsens rekommendationer.

4.3 PH

Enligt analyser av ursprunglig aska, Tabell 2, har normal granul ett pH värde på 12,3 vilket visar att hårdningen inte har gått så långt, troligtvis på grund av vattenunderskott vid granulering. Vid det första provtagningstillfället är pH värdet för yta B 12,5 för att sedan stabiliseras runt pH 10. Det högre initiala pH värdet i lakvattnet antas bero på att hydroxidjoner följt med som motjon till kalium. I vedaska förekommer kalium generellt tillsammans med klorider och sulfater [9], men om halten kalium är hög i förhållande till halterna av sulfater och klorider kan även hydroxid fungera som motjon. Innehållet av klor har inte analyserats, men en slagning i Värmeforsk/Energiforsks databas ALLASKA (www.varmeforsk.se/allaska-en) med villkoren flygaska, trädbränslen och CFB visar på en lägsta halt om 0,2% och en högsta halt på 0,43% för totalt 5 stycken analyser. Då halten sulfat är förhållandevis låg för normal granul (1,1 %) är det troligt att även hydroxid fungerat som motjon till det stora läckaget av kalium och därmed bidragit till det höga pH värdet.

Projektet inleddes med ett par rejäla regnskuror som fuktade upp askhögarna. Det är troligt att detta bidragit till ökad bildning av kalciumsilikathydrat och karbonatisering, då steg (2) i hårdningsprocessen förutsätter en vattenfas som kan lösa CO₂. Karbonatiseringen sänker pH och ger en stabilare produkt, det sänker dock generellt inte lösligheten för alkalisulfater och alkaliklorider [9].

4.4 METALLER

4.5 UTLAKADE MÄNGDER

Skillnaden i halter i lakvatten och totalt utlakad mängd mellan normal granul och stor granul antas bero av flera anledningar. Tidigare studier visar att partikelstorlek påverkar utlakningen av kalium [10]. En intressant observation från det försöket är att kaliumläckaget var ca 10 procentenheter högre från den mindre askfraktionen (< 2,8 mm) jämfört med den större (2,8-8 mm) trots små skillnader i specifik yta.

De två granulerna är också producerade i olika anläggningar av olika askor, vilket gett upphov till skillnader i näringsinnehåll och löslighet. Alkalimetaller förekommer mestadels som lättlösliga salter i vedaska, medan de i torvaska även förekommer i form av silikater med låg löslighet [9] [11]. I ett finskt försök [11] förekom ca 80% av K i form

av svårslösliga silikater i torvaska. I samma försök var genomsnittshalten av K i torvaska 0,5 % (n=23). I Bränslehandboken från Värmeforsk [6] är medianvärdet för kaliumhalt i torv 0,7 % (n=18). Om de finska resultaten appliceras på den aktuella askan som använts i Finland för granulering av stor granul så innebär det att kaliumhalten i askan från skogsbränsle i stor granul är ca 4 %, vilket kan jämföras med kaliumhalten på 5,0 % i normal granul. Utifrån ovanstående resonemang verkar partikelstorleken spela större roll än i vilken form kalium befinner sig då torvaskans bidrag till kaliuminnehållet i stor granul är litet. Motsvarande resonemang gäller även för natrium även om andelen svårslöslig natrium är lägre, 45 %, än ovan nämnda 80 % för kalium i torvaska.

Då olika tekniker och bindemedel, utöver vatten, använts vid granulering genom åren är det svårt att hitta jämförbara försök, men fältförsök med ECOFOR granul (flygaska, grönlutsslamm och mesa) uppvisar läckage av 95 % av kalium och natrium efter sex månader [12] och granuler av aska och dolimitkalk uppvisade läckage av 60% av kalium och natrium efter 7 månader [13]. ECOFOR granulerna var av ungefär samma storlek som normal granul.

Ett annat sätt att åskådliggöra lakning är att använda sig av L/S kvot, vilket är vanligt i samband med avfallsaska. Figur 16 visar att den minsta högen (B) har högst kumulativ L/S kvot, medan den största högen (E) har lägst kumulativ L/S kvot. Därför är det lite förvånande att kurvorna för yta B och yta E följer varandra i Figur 17 medan yta D ligger under, trots att yta D och E har samma andel utlakad K vid sista provtagningen. Det indikerar att om provtagningen fått fortsätta så hade yta E haft en större andel utlakad K än yta D. En möjlig förklaring är att det kan finnas gemensamma geometriska faktorer mellan yta B och E. För att bekräfta detta krävs ytterligare studier.

Kalcium finns i härdad vedaska i stor utsträckning i form av CaCO_3 och till viss del i form av Ca(OH)_2 , vilkas löslighet är relaterad till pH [14] där högre pH i porvatskan innebär lägre löslighet. Utlakningen av kalcium kommer därför att öka efterhand då pH minskar. Skillnaden i utlakning av Ca mellan normal granul och stor granul är låg men antas bero på skillnader i granulernas pH-värde. Motsvarande antagande antas gälla för utlakningen av Mg. Låg utlakning av Ca och Mg har också observerats av [13], där Ca och Mg läckte 1-5% under 7 månader i fält.

Utlakningen av fosfor är väldigt låg för både normal och stor granul. Vid aktuella värden på pH sitter P hårt bundet.

Läckaget av tungmetaller är generellt lågt. De högsta halterna uppmättes för arsenik (2,7 %) och vanadin (4,7 %) för normal granul. Arsenik och vanadin förekommer som anjoner och deras löslighet påverkas av pH, där högt pH ger en högre mobilitet [15]. Ett sätt att skatta belastningen är att sätta läckaget i relation till gränsvärdena i Skogsstyrelsens rekommendationer. Omräknat till maximal dos per kvadratmeter vid standardgivan 3 ton TS aska/hektar blir maxdosen 21 mg vanadin/m². För normal granul motsvarar läckaget på 4,7 % en dos om 70 mg vanadin/m², dvs 3,5 ggr högre. Denna uträkning är baserad på den faktiska ytan för B (47 kg). Om ytan skalas upp till motsvarande storlek som yta E (8460 kg), under förutsättning att andel lakat vanadin är opåverkad, innebär det nästan 22 ggr högre än Skogsstyrelsens rekommendationer. För Arsenik ger motsvarande beräkning en dos på upplagsytan som är ca 4 ggr högre vad som är rekommenderat i skog. För stor granul ligger dosen under Skogsstyrelsens rekommendationer. Motsvarande beräkning för bor ger en 27 ggr högre dos för normal granul, medan stor granul ligger under Skogsstyrelsens rekommendationer. Rekommendationerna är satta för spridning av tre ton aska (TS) i skog, max 2 gånger

under en omloppstid och målsättningen är att det årligen skall ske på mer än 50 000 hektar. Att punktbelastningen av tungmetaller på upplag i skog överstiger rekommendationerna behöver inte nödvändigtvis innebära några miljömässiga problem.

Övriga tungmetaller har låg utlakning, men trots en utlakning av krom på 0,5 % för normal granul och 0,2 % för stor granul så innebär en jämförelse med Skogsstyrelsens rekommendationer att dosen är ca 3 ggr för hög för normal granul och 2 ggr för hög för stor granul. För nickel återfinns de högsta halterna för kontrollen.

Försöksupplägget innebär att vattnet exponeras mer mot aska än vid praktisk användning i fält, då vatten som rör sig i sidled ner till ytterkanten och infiltreras i mark exponeras mindre för aska än det vatten på försöksytorna som efter rörelsen i sidled därefter även är i kontakt med aska under transporten längs botten till utloppet vid försöksytan mitt. Detta upplägg gör att läckaget kommer att överskattas till viss del. Risken för överskattning är större för svårslösliga ämnen än lättlösliga. Tidigare försök där försöksytan lutar åt ett håll och uppsamling sker längs kanten innebär liknande risk för överskattning [4]. Ett försöksupplägg som efterliknar praktisk användning skulle kräva ett mycket omfattande försöksupplägg, vilket inte ryms inom projektet. Bedömningen gjordes att det är viktigare ur miljösynpunkt att lakningen av tungmetaller inte underskattas än att lakningen av näringsämnen överskattas.

Värt att notera är också att det är skillnad på lakning av aska i hög vid mellanlagring och frigöring av näring från granuler som spritts i skog.

4.6 HÅLLBARHET AV GRANULER

Både normal granul och stor granul snabbtestades innan försöksstart och uppvisade inga tecken på att vara fysiskt lättvittrade. Vinterns upprepade tillfällen av frysning och upptining, med 50 dygn med en temperatur på -1°C eller kallare fram till fototillfälle (2016-03-13), kan dock ha påverkat hållbarheten för stor granul (Figur 19). Störst effekt syntes längs mantelytan, vilket är rimligt med tanke på att det är där som temperaturväxlingarna är som störst. Större kulor innebär mer inbyggda spänningar och heterogeniteter vilket minskar hållfastheten. Det krävs också högre fukthalt i tillverkningsprocessen för att uppnå större granuler. Detta vatten skall sedan transporteras ut till granulens yta.

Även den kemiska hårdningen påverkar granulernas hållbarhet då välhårdad aska är sprödare. När exempelvis kalcium omvandlas från oxid till karbonat under hårdningen (1) och (2) så växer molekylen i storlek, vilket ger upphov till spänningar. Det vita pudret som syns i Figur 6 kan vara kalciumkarbonat (CaCO_3). Natrium och kalium förekommer som sulfater och klorider i form av kristallina strukturer, och har en salt smak. Kalciumkarbonat förekommer däremot som pudret och har en fadd smak [16], vilket stämmer överens med granulerna i försöket. Ingen kemisk analys har dock gjorts. En möjlig förklaring till förloppet är att granulerna har producerats med ett vattenunderskott (se Tabell 2). När askan sedan släcks och karbonatiseras under försöket så sväller strukturen och spräcker granulen [17]. Även bildning och därefter vittring av ettringit under sjunkande pH kan ha påverkat granulernas hållfasthet [3].

Den fysiska vittringen med uppkomst av finfraktion hos stor granul leder även till att mer vatten transporteras längs mantelytan än i högarnas centrum jämfört med projektets start.

4.7 TRANSPORT

Returtransporter får störst effekt vid längre transporter då kostnaden för lastning och lossning får stort genomslag vid kortare transporter. Detta minskar incitamentet för användning av returtransporter i anslutning till produktionsanläggning/terminal, men det kan göra det försvarbart att transportera askan till spridningsområden som hittills har ansetts ligga för långt bort. Ett sätt att göra transporten effektiv på långa sträckor är att skapa ett konstant flöde under en längre tid, ex i samband med flytt av bränslelager [18].

En fördel med att köra ut askan i god tid innan spridningen skall genomföras är att det inte finns någon risk för att spridningsentreprenören behöver stå och vänta på aska. Samtidigt finns det vid tippning ingen möjlighet att korrigera för eventuella förändringar i förutsättningar för spridning, ex om något område inte går att sprida på grund av stormskador eller dålig bärighet. Att köra ut askan långt innan spridning ställer därför stora krav på en bra planering. Om det inte finns väl fungerande system för denna planering är risken stor att eventuella besparingar i transportkostnad istället går åt till ökad planering.

Läckaget av framförallt kalium, men till viss del även arsenik, vanadin och bor, gör att tippning av aska i hög som sedan får ligga otäckt fram tills spridningstillfälle inte anses lämpligt. Alternativen som finns är då att skydda materialet med någon form av täckning eller att använda sig av traditionell uttransport av aska i anslutning till spridning. Täckning av material i fält innebär en extra kostnad i form av presenning och någon form av tyngd för att hålla den på plats. För att presenningen inte skall få för stort vindfång behöver troligen varje tippad hög om 12-16 ton (3- eller 2-flakssystem) täckas med en separat presenning. Antingen ser man presenningen som en engångskostnad eller väljer man att samla in presenningarna och använder dem igen. Om man som exempel räknar på ett transportavstånd på 50 km så innebär användandet av returtransport en besparing på 228 kr per tippad hög (12 ton). Kostnaden för presenning och arbete med att lägga ut och samla in kommer att överstiga besparingen i transportkostnad oavsett om presenningen används en eller flera gånger.

Rent teoretiskt skulle man kunna tänka sig att returtransport av aska sker i direkt anslutning till spridning och kompletteras med traditionell uttransport, men det ställer mycket stora krav på planering och samverkan mellan olika skogliga aktörer. Då flisning av grot till största delen sker under vinterhalvåret och askåterföring till största del under sommarhalvåret är det ytterligare en försvårande faktor. En faktor som kan göra att det ändå kan vara värt att ha med sig tanken om returtransporter av aska vid utformning av planeringsverktyg är att det endast går ca en asktransport per 50 bränsletransporter vid en askhalt på 2 %.

Utöver detta har Skogsstyrelsen numera som praxis att inte genomföra planeringsuppdrag vid tippning av aska, utan endast vid utställning av container.

Sammantaget innebär detta, trots vissa ekonomiska fördelar, att möjligheterna att använda returtransporter av granulerad aska i bulk är små.

Värt att notera i sammanhanget är att granulernas lägre fukthalt, jämfört med krossaska, innebär i sig en minskning av transportkostnaden med ca 15 %, utöver eventuella besparingar vid användning av returtransporter. Vid långtidslagring av granuler utan väderskydd kommer dock upptag av vatten på grund av granulernas porositet att leda till högre spridningskostnader då lastvikten är begränsande.

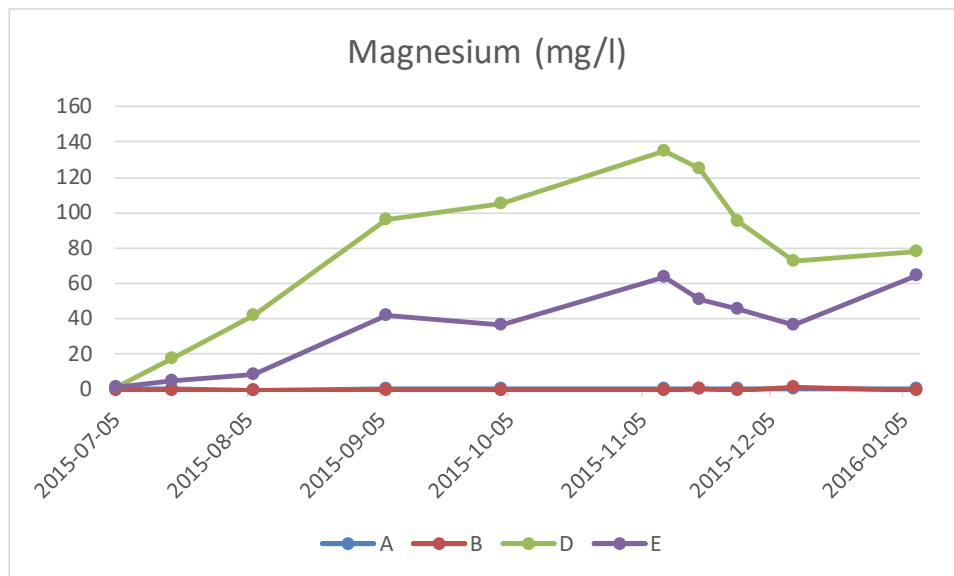
5 Slutsats

Projektet inleddes med förhoppningar om att kunna mellanlagra granulerad aska i bulk under längre tid i anslutning till spridningsobjekt. Möjligheten till längre lagring ökar förutsättningarna för att använda returtransporter och därmed sänkta kostnader. Den höga utlakningen av framförallt kalium, men även vanadin, arsenik och bor från normal granul gör det dock olämpligt med långtidslagring av granuler som är exponerade för nederbörd. Vid långtidslagring av granuler utan väderskydd kommer också upptaget av vatten på grund av granulernas porositet att leda till högre spridningskostnader. Alternativen som finns är då att skydda materialet med någon form av täckning, vilket innebär kostnader som överstiger besparingarna, eller att använda sig av traditionell uttransport av aska i anslutning till spridning. Användning av granulerad aska innebär i sig en 15 % lägre transportkostnad på grund av lägre fukthalt. Stor granul läcker mindre alkali och tungmetaller, men går delvis sönder.

6 Litteraturförteckning

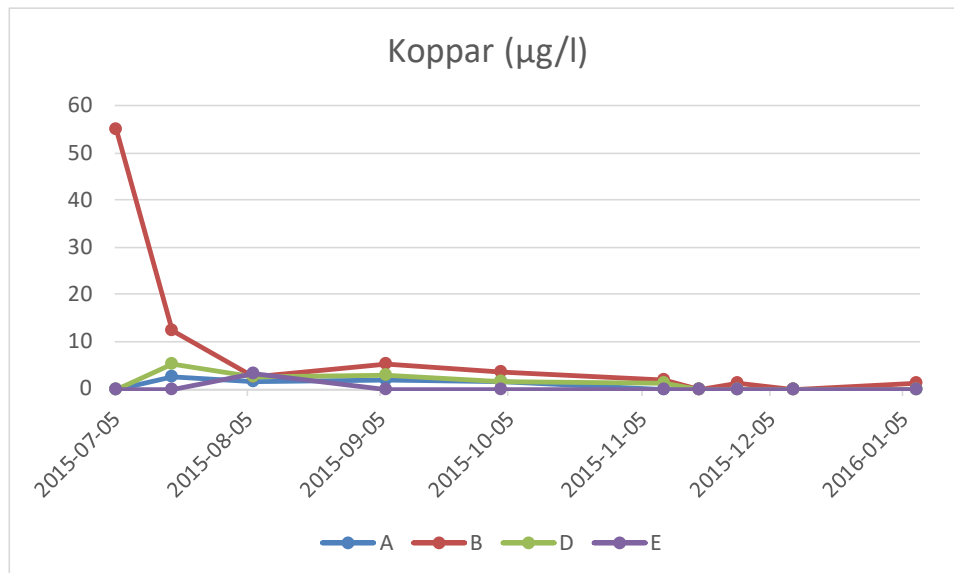
- [1] Mailkonversation med Stefan Anderson, Skogsstyrelsen. 2016-03-31.
- [2] Steenari B. -M. & Lindqvist, O. *Kemisk stabilitet hos restprodukter från förbränning av biobränsle R* 1997:74. Stockholm : NUTEK, 1997.
- [3] Fjällberg L., Lagerblad B., Mossberg Bustnes H. och Bjurström H. Rapport 940 *Styrd utlakning av bioaska som sprids i skogsmark* . Stockholm : Värmeforsk Service AB, 2005.
- [4] Valeur I. & Thelin G. Rapport 1217 *Lakvatten från skogsbränsleaska - markpåverkan av lagring*. Stockholm : Värmeforsk , 2012.
- [5] Andersson, S. *Meddeland 2:2008 Rekommendationer vid uttag av avverkningsrester och askåterföring*. Jönköping : Skogsstyrelsen, 2008.
- [6] Strömberg B., Herstad Svärd S. Rapport 1234 *Bränslehandboken 2012*. Stockholm : Värmeforsk , 2012.
- [7] Czernin, W. *Cementkemi för byggare*. Malmö : Svenska Cementföreningen, 1969.
- [8] Bullard, E. *National Physical Library*. [Online] National Physical Laboratory, 2016-03-08. www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/2_7/2_7_9.html.
- [9] Steenari B.-M., Schelander S., Lindqvist O. Chemical leaching characteristics of ash from combustion of coal, peat and wood in a 12 MW CFB - a comparative study. *Fuel*. 1999, Vol. 78, 249-258.
- [10] Steenari B.M., Lindqvist O., Tomsic A., Marsic N. & Karlsson L.-G. *Partikelstorlekens inverkan på upplösning av härdad träaska - Simulering i laboratorieförsök samt modellering av kinetiken för upplösning*. Eskilstuna : Energimyndigheten, 1998.
- [11] Zevenhoven M., Yrjas P., Skrifvars B.-J. & Hupa M. Characterization of Ash-Forming Matter in Various Solid Fuels by Selective Leaching and Its Implications for Fluidized-Bed Combustion. *Energy & Fuels*. 2012, Vol. 56, pp 6366-6386.
- [12] Mahmoudkhani M. & Theliander H. *Laknings- och vittringshastighet hos behandlade restprodukter från pappersmassaprocessen*. Göteborg : Chalmers Tekniska Högskola, 2005.
- [13] Holmberg S. L., Lind B.B. & Claesson T. Chemical composition and leaching characteristics of granules made of wood ash and dolomite. *Environmental Geology*. 40, 2000, Vol. 1-2.
- [14] Börjesson, P. *Granulerade vedaskors upplösning i skogsmark*. Uppsala : SLU Institutionen för markvetenskap, 1992.
- [15] von Brömssen M., Lindström N., Hedman K. & Svensson M. *Flygaskors egenskaper i våt miljö*. Stockholm : Värmeforsk Rapport 1104, 2009.
- [16] Wikipedia. [Online] 2016-04-01.
https://en.wikipedia.org/wiki/Calcium_carbonate.
- [17] Bjurström, H. Rapport 669 *Jämförelse mellan olika metoder att behandla bioaska som skall återföras*. Stockholm : Värmeforsk Service AB, 1999.
- [18] Telefonsamtal Johan Sundberg, Sundbergs Åkeri AB, 2016-04-11.
- [20] Steenari B.-M., Marsic N., Karlsson L.-G., Tomsic A. och Lindqvist O. Long-term leaching of stabilized wood ash. *Scandinavian Journal of Forest Research*. Suppl. 2, 1998, Vol. 3-16.
- [21] Livsmedelsverket. [Online] 2016-04-01.
<http://www.livsmedelsverket.se/livsmedel-och-innehall/kosttillskott/amnen-i-kosttillskott/vanadin/>.

7 Bilaga 1. Läckage av övriga metaller



Figur 20 Magnesium

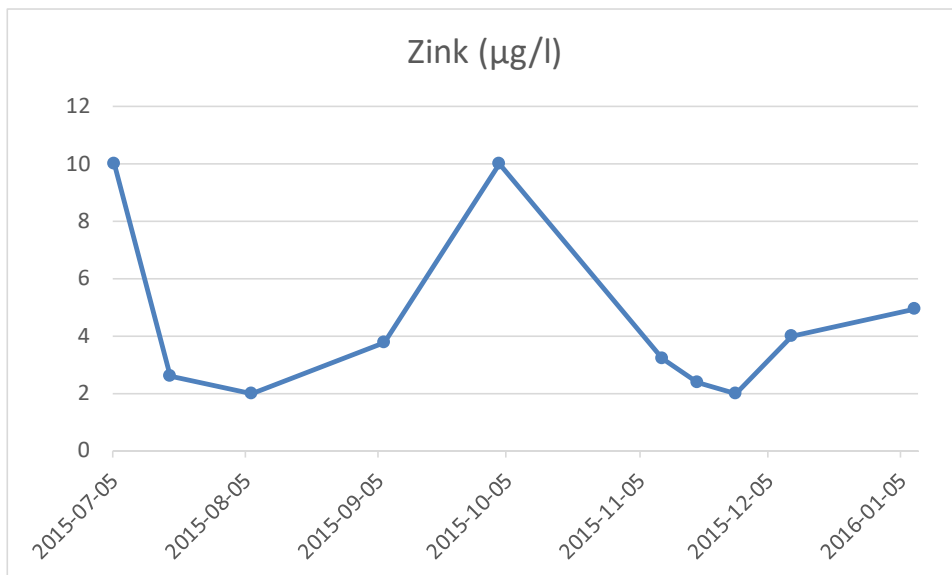
Figure 19 Magnesium



Figur 21 Koppar

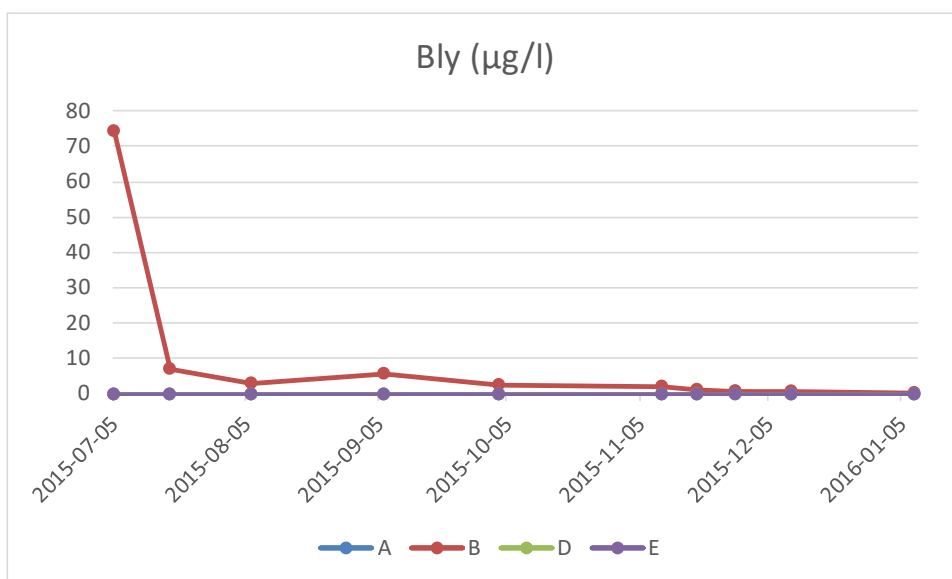
Figure 19 Copper

På grund av kontaminering av galvaniserat nät vid försökskonstruktion av yta A-D redovisas endast halter av zink för yta E.



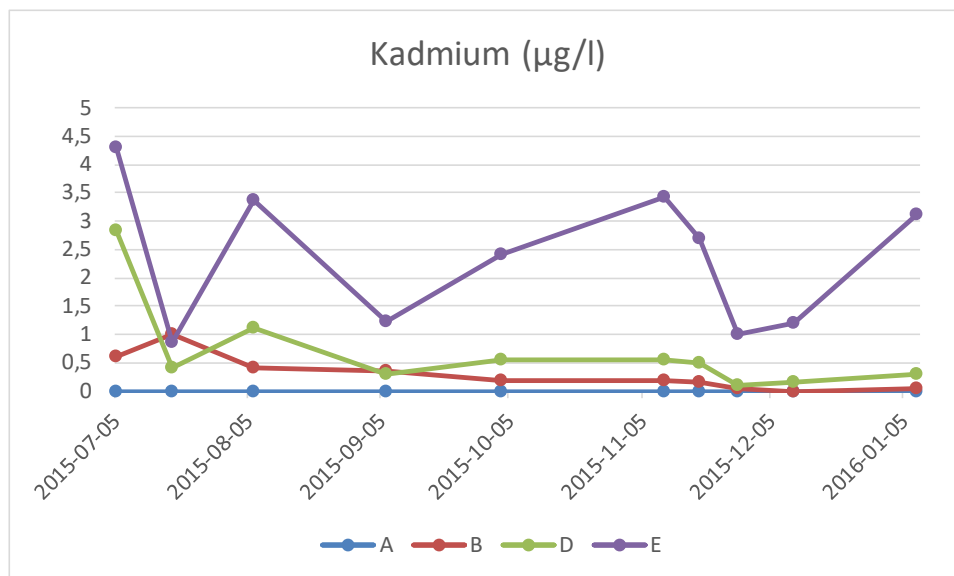
Figur 22 Zink

Figure 20 Zinc



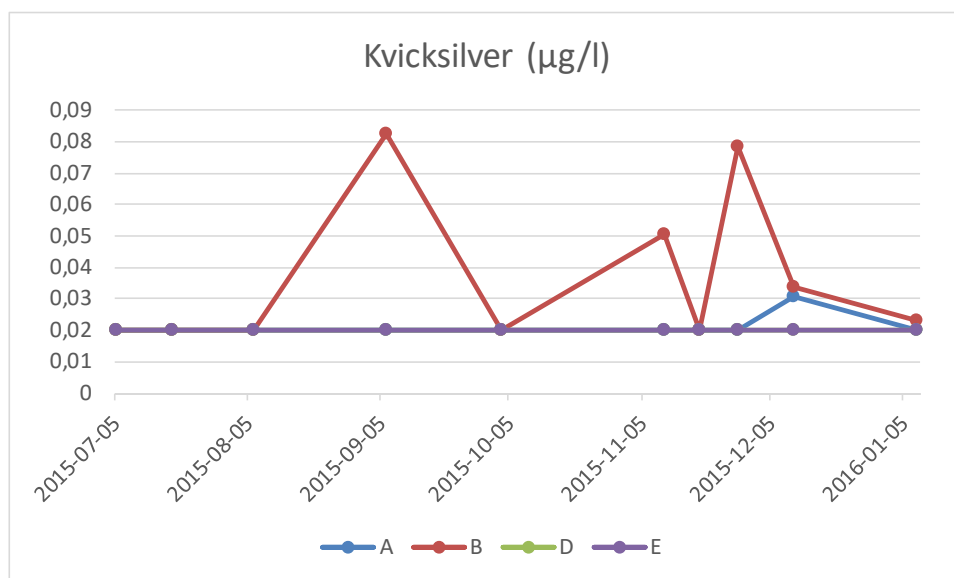
Figur 23 Bly

Figure 21 Lead



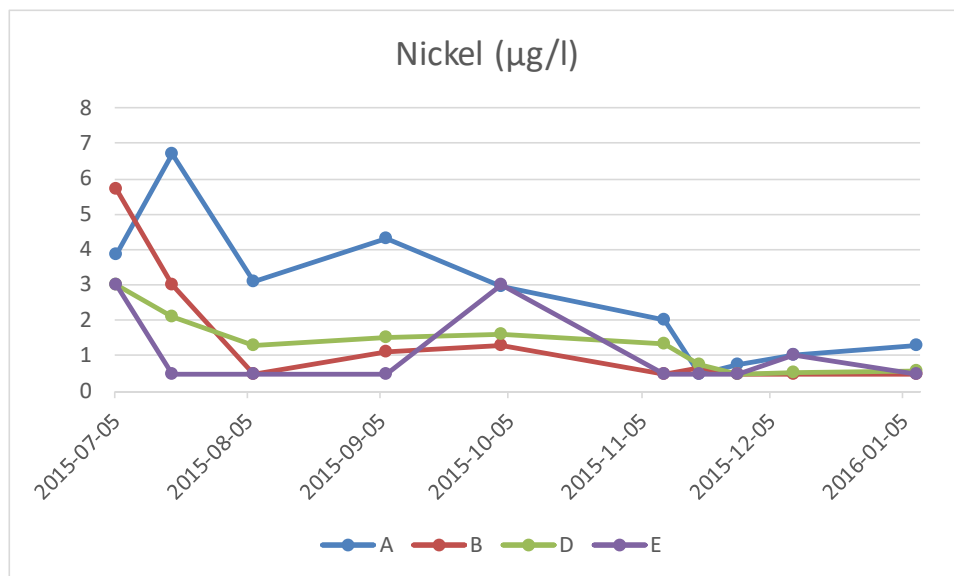
Figur 24 Kadmium

Figure 22 Cadmium



Figur 25 Kvicksilver

Figure 23 Mercury



Figur 26 Nickel

Figure 24 Nickel

TRANSPORTKEDJA FÖR ASKÅTERFÖRING TILL SKOG

Lakningsstudien visar att långtidslagring av färdiga granuler i anslutning till spridningsobjekt kräver någon form av väderskydd, genom exempelvis täckning med presenning. Användning av returtransport vid ett avstånd på 50 km innebär en kostnadssänkning på 30 % (19 kr/ton). Detta ska ställas i relation till kostnaden av täckning av granuler och extra planering. En försiktig uppskattning av täckningskostnaden visar att den överstiger besparingen i transportkostnad. Ett sätt att i mindre omfattning använda sig av returtransporter i bulk är att använda sig av returtransporter som komplement till direktleveranser av aska när askspridaren befinner sig i samma område som produktionen av biobränsle. Då majoriteten av produktionen av biobränsle sker under vinterhalvåret och majoriteten av askåterföringen sker under sommarhalvåret, kan detta bli en högst begränsad verksamhet. Samtidigt ställer det stora krav på en effektiv planering, vilket i sin tur kräver utveckling av gemensamma planeringsverktyg för kedjans olika aktörer. Användning av granuler framför krossaska innebär i sig 15 % lägre transportkostnad på grund av lägre fukthalt. Om granulerna inte skyddas för nederbörd kommer upptag av vatten på grund av granulernas porositet att leda till ökade spridningskostnader.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk