

FYTOSANERING AV SLAGGRUS MED HJÄLP AV SOLROSOR OCH RAPS

RAPPORT 2020:651



ASKPROGRAMMET



Fytosanering av slaggrus med hjälp av solrosor och raps

**KARIN KARLFELDT FEDJE
VIKTORIA EDVARDSSON
DAVID DALEK**

ISBN 978-91-7673-651-7 | © Energiforsk februari 2020

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

Förord

Denna rapport är slutrapportering av projekt 2018-113 *Fytosanering av slaggrus* inom Askprogrammet som bedrivs av Energiforsk. Askprogrammet verkar för att kunskap tas fram för att stimulera användningar av askor så att ingen eller ringa risk för hälsa och miljö på kort eller lång sikt föreligger.

Detta projekt har haft som inriktning att undersöka om det går att odla specifika växter, som extraherar metaller, i slaggrus från energiåtervinning. Metalltillgängligheten skulle därmed kunna minskas i slaggruset samtidigt som man producerar ett metallanrikat bränsle i växterna. Detta skulle i sin tur bland annat kunna öka förutsättningar för att använda slaggrus i olika anläggningsändamål.

Arbetet har genomförts av Renova med Karin Karlfeldt Fedje som huvudprojektledare.

Projektet har följts av en referensgrupp bestående av:

Märta Hasselqvist, Tekniska verken i Linköping,
Stefan Anderson, Skogsstyrelsen
Anita Pettersson, Högskolan i Borås

Utöver Askprogrammet har även Avfall Sveriges utvecklingssatsning Energiåtervinning finansierat projektet. Avfall Sveriges rapport med samma titel är till innehållet identiskt med denna rapport.

Stockholm januari 2020

Helena Sellerholm
Områdesansvarig
Termisk energiomvandling, Energiforsk AB

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

Sammanfattning

Slagg från avfallsförbränning används, efter förädling, vanligen som konstruktionsmaterial på deponi. Detta behov kommer dock minska och därför är det av intresse att undersöka alternativa hanteringar.

Anledningen till att askor inte används utanför deponi är framförallt risken för lakning av metaller. Metallerna är dock inte bara en nackdel utan kan även ses som en resurs, vilka kan vara möjliga att återvinna.

Eftersom metallerna i slaggruset framförallt inte är i metallisk form fungerar inte fysikalisk separation för att avskilja dem. Ett alternativ skulle istället kunna vara att använda fytosanering, d.v.s. odling av specifika växter som extraherar metaller från materialet de växer i. Genom att omhänderta de anrikade växterna på lämpligt vis, t.ex. förbränning, skulle metallerna kunna återvinnas från flygaskan och återinföras i samhällets kretslopp.

Fytosanering används fullskaligt för att sanera förorenad jord, medan kunskapen om att odla i slaggrus är mycket begränsad. Det övergripande syftet med detta projekt är därför att studera hur en sådan odling kan fungera. Målen är dels att minska innehållet av potentiellt lakbara metaller i slaggruset för att främja alternativ användning och dels att producera ett metallanrikat bränsle.

Efter litteraturstudier valdes solros och raps som lämpliga försöksväxter. Tre försöksvariationer sattes upp för respektive växt; odling i slaggrus utan respektive näringstillsats samt referensodling i jord. Samtliga odlingsförsök skedde utomhus i odlingslådor om ca 1 m² under en växtsäsong.

Relativt snart efter sådd stod det klart att tillväxten hos solrosor var betydligt sämre i slaggruset än i referensjorden. Förklaringar till detta är högre vattenbehov vid odling i slaggrus och att val av näringsgödsel troligen inte varit optimalt. Tillväxten hos raps med näring var mer jämförbar med referensfallet, medan rapsodlingen utan näring fungerade mycket dåligt. En möjlig förklaring till att raps växer bättre än solrosorna är att rapsrötterna är mer lämpade att växa i det mer kompakta slaggruset än vad solrosorna är.

Innehållet av flera metaller är många gånger högre i växter som vuxit i slaggrus jämfört med de i referensjorden, vilket styrker att både raps och solros extraherar metaller från slaggruset. De högsta metallhalterna återfinns i rötterna och vid förbränning av rapsrötter är en uppskattad Zn-halt i askan ca 2%.

Gällande reningseffekten av slaggruset till följd av odlingen är den mindre tydlig. Trots att innehållet av flera metaller är lägre i slaggruset efter odling, är minskningen begränsad p.g.a. den låga tillväxten. Följaktligen kan varken raps- eller solrosodling anses vara speciellt effektiva åtgärder för att rena slaggrus, då de enbart växer över en säsong och har relativt veka rötter. Då innehållet av metaller i slaggrus är så högt tar det troligtvis längre tid än en växtsäsong att få till stånd en tillräcklig minskning, varför kraftigare perenna växter som t.ex. salix skulle kunna vara ett alternativ.

Dessa inledande försök visar att fytosanering av slaggrus för att erhålla ett metallanrikt bränsle och renare slaggrus fungerar principiellt, men att metoden behöver utvecklas, t.ex. i form av bättre utformad vatten- och näringstillförsel, för att få till stånd en effektivare tillväxt och rening.

Summary

Sorted and aged slag from waste incineration is usually used as construction material on landfills. However, the need for this utilization will decrease, and it is therefore of interest to investigate alternative handling. The reason why ashes are not used outside landfill is primarily the risk of leaching of metals. However, the metals are not only a disadvantage but can also be used as recyclable resources.

Since the metals in the sorted slag are mainly not in metallic form, physical separation does not work to extract them. An alternative could instead be to use phytoextraction, i.e. cultivation of specific plants that extract metals from the material in which they grow. By treating of the enriched plants appropriately, e.g. through incineration, the metals could be recycled from the fly ash and reintroduced into society's cycle.

Phytoextraction is used on a full scale to remediated contaminated soil, while the knowledge of growing in sorted slag is very limited. The overall purpose of this project is therefore to study how such cultivation can work. The goals are partly to reduce the content of potentially leachable metals in the sorted and aged slag to promote its alternative use and partly to produce a metal-enriched fuel.

After literature studies, sunflower and rapeseed were chosen as suitable plants for this study. Three experimental variations were set up for each plant; cultivation in sorted and aged slag without respective nutritional additives and reference cultivation in soil. All cultivation attempts took place outdoors in cultivation boxes of about 1 m² during one growing season.

Relatively soon after sowing, it became clear that the growth of sunflowers was significantly lower in the slag than in the reference soil. Explanations for this are higher water requirements for cultivation in slag and that the choice of nutrient fertilizer is probably not optimal. The growth of rapeseed with nutrition was more comparable to the reference case, while rapeseed cultivation without nutrition worked very poorly. One possible explanation for rapeseed growing better than sunflowers is that rapeseed roots are more suited to growing in the more compact slagmaterial than sunflowers are.

The content of many metals is several times higher in plants grown in slag compared to those in the reference soil, which proves that both rapeseed and sunflower extract metals from the slag. The highest metal contents are found in the roots and if incinerating those roots, a theoretical estimated Zn content in the fly ash is about 2%.

Regarding the remediation effect of the slag as a result of the cultivation, it is less clear. Although the content of several metals is lower in the slag after cultivation, the reduction is limited due to the low growth. Consequently, neither rapeseed nor sunflower cultivation can be considered as particularly effective measures to purify slag as they only grow over one season and have relatively weak roots. As the content of metals in slag is so high, it will probably take longer than one season

to achieve sufficient reduction. Therefore perennial plants such as Salix could be an alternative.

These initial experiments show that phytoextraction of slag to obtain slag with lower metal content and a metal-enriched fuel works in principle, but that the method needs to be developed, e.g. in the form of better designed water and nutrient supplies, to achieve more efficient growth and remediation.

Innehåll

1	Introduktion	9
2	Syfte och mål	11
2.1	Detaljerade mål	11
3	Material och metod	12
3.1	Material	12
3.2	Byggnation av odlingslådor	13
3.3	Plantering	13
3.4	Skötsel	14
3.5	Skörd	14
3.6	Kemiska analyser	15
4	Resultat och diskussion	16
4.1	Val av växter	16
4.2	Tillväxt	16
4.3	Biomassa i delar ovan jord och i rötterna	20
4.4	Innehåll i växterna	22
4.5	Innehåll i slaggrus efter odling	25
4.6	Potential för rening av slaggrus och återvinning av Zn	28
5	Slutsatser och fortsatt arbete	30
6	Referenser	31
Bilaga A:	Totalhalter i solrosor och raps	33
Bilaga B:	Totalhalter i referensjord och slaggrus innan och efter odling	34

1 Introduktion

Vid förbränning av avfall genereras ca 20% bottenaska, vilket bara i Sverige innebär närmare 1 miljon ton aska årligen [1]. Bottenaskan, eller slaggen som den också kallas, förädlas till slaggrus genom karbonatisering och genom att metallbitar återvinns. Därefter används vanligen slaggruset som konstruktionsmaterial på deponi. Det har länge varit känt att behovet av slaggrus för konstruktionsändamål på deponier kommer minska och alternativa användningsområden behöver utvecklas. Anledningen till att askor inte används utanför deponi är framförallt risken för lakning av potentiellt giftiga metaller. Dessa metaller är framförallt bundna i kemiska föreningar, men en mindre andel återfinns även i små solida metallpartiklar. Metallerna är dock inte bara en nackdel utan kan även ses som en resurs, vilka kan vara möjliga att återvinna. Medan flygaskor från avfallsförbränning innehåller så höga halter att de i vissa fall är jämförbara med malmer är innehållet i slaggrus lägre. Trots det är användningen av slaggrus från avfallsförbränning utanför deponi mycket begränsad i Sverige, även om det är vanligt i länder som t.ex. Danmark och Nederländerna. Skulle metallhalter i slaggruset minska ökar möjligheten för att använda det utanför deponi.

Eftersom de metaller som finns i slaggruset framförallt inte är i metallisk form fungerar inte fysikalisk separation för att avskilja dem. Istället skulle kemiska metoder så som lakning med t.ex. syra kunna fungera. Åtgången av syra eller annat lakningsmedel skulle dock bli hög. Antaget att det åtgår dubbelt så mycket syra som aska för en tekniskt fungerande lakning, skulle över 1 miljon ton syra/år behövas. Ett alternativ skulle istället kunna vara att använda fytosanering. Det är känt att även i mycket förorenade områden brukar växtligheten till slut komma tillbaka. Det kanske mest kända exemplet på detta i Sverige är Falu koppargruva, där marken är förorenad av t.ex. Cu och Pb. De plantor som växer i dessa typer av material är speciella så till vida att de anpassar sig och klarar av höga metallhalter och/eller organiska föroreningar. Vissa av dessa växter är s.k. hyperackumulatorer, vilket innebär att de drar ut metaller från jorden och anrikar dem i olika växtdelar så som blad eller rötter. Det finns flera exempel på där växter används för att sanera jordområden på ett kostnadseffektivt sätt och tekniken är spridd över världen. Ett problem för våra breddgrader är dock att många av de växter som är kända som hyperackumulatorer har liten biomassa t.ex. backskärvfrö (*Thlaspi caerulescens*) eller kräver omgivning som inte är naturligt tillgänglig i Sverige t.ex. vattenhyacint (*Eichhornia crassipes*) [2, 3]. Det finns dock undantag och t.ex. har solrosor (*Helianthus annuus*), raps, majs och gröna bönor visat sig vara bra på att ackumulera bl.a. Zn [2, 4-7]. Vanligtvis är det förorenade jordar som har studerats och vetenskapligt kontrollerad odling i askor är begränsad. I de fall det förekommer är det framförallt kolaskor som har studerats [8, 9]. En studie om odling i bottenaska från avfallsförbränning finns dock publicerad [10]. Resultaten visade att de valda växterna överlevde och tog upp Ni (*A. serpyllifolium*) respektive Zn (*S. plumbizincicola*) från den förbehandlade (tvättade och manuelltsorterade) slaggen. Tillväxten var dock begränsad, vilket troligen berodde på närvaron av Cu och salt. Jämförelse mellan innehållet i svenskt slaggrus och Skogstyrelsens rekommendationer för biobränsleaskor, som ska återföras till skog,

ger att av makroämnena (Ca, K, P, Mg) förekommer Ca och Mg i tillräckligt höga halter i slaggrus jämfört med riktlinjerna, medan de potentiellt giftiga metallerna Cr, Cu, Ni och Pb överskrider rekommendationerna [11]. Följaktligen finns det förutsättningar för att växter ska kunna växa direkt i slaggrus och att näringstillförsel av N, P och K troligen ökar tillväxten, medan förekomsten av Cu enligt tidigare studie riskerar att hämma tillväxten [10].

Efter skörd är det tänkbart att metallerna som har anrikats i växterna skulle kunna återvinnas genom att förbränna växterna och behandla flygaskan. Det är rimligt att anta att metallerna till största delen anrikas i den askfraktionen [12]. Utvinning av framförallt Zn från flygaska är ett intressant område och flera olika tekniker är under utveckling eller finns som fullskalig process [13-15]. Därför är det av intresse att studera hur mängden Zn kan ökas i bränslen, men även andra metaller är av intresse. Ett lyckat exempel på när fytosanering kombinerat med förbränning har gjorts kommersiellt gångbart är odling i Ni-förorenad jord och där ett Ni-salt har utvunnits ur askan från växterna [16].

2 Syfte och mål

I detta projekt studerades möjligheten att rena slaggrus från metaller genom fytosanering, genom att växter utvalda för sin förmåga att ta upp metaller, med fokus på Zn, från sin omgivning planterades i slaggrus. Efter skörd analyserades metallinnehållet i plantorna, för att utvärdera hur mycket metaller som har anrikats och hur väl slaggruset har renats.

I detta specifika fall var syftet dels att minska innehållet av potentiellt lakbara metaller i slaggruset och dels att producera ett metallanrikat bränsle. Nyttan med detta är att främja användandet av slaggrus utanför deponier genom att slaggrusets innehåll av metaller minskar och att dessa tidigare utnyttjade metaller kan återföras till samhällets kretslopp genom att de återvinns från askan efter förbränning av växterna.

2.1 DETALJERADE MÅL

- Utvärdera tillväxt (t.ex. höjd och biomassa) mellan de två olika växtsorterna och deras olika odlingsförhållanden.
- Utvärdera upptag av Zn och andra metaller i de olika växterna relativt innehållet i slaggruset.
- Utvärdera totalinnehåll i slaggrusen efter skörd och göra en inbördes jämförelse.
- Beräkna potentialen av saneringsmetoden baserat på hur mycket Zn som teoretiskt kan utvinnas från askan.

3 Material och metod

3.1 MATERIAL

Slaggruset, som användes i försöken, erhöles genom konventionell metallseparation och lagring av slagg från avfallsförbränning. Innehållet i slaggruset innan odling återfinns i Tabell 1. För referensodlingen användes en mager anläggningsjord för gräsmatta, som är en produkt från behandling av trädgårdsavfall [17]. För att studera hur gödsel inverkar på tillväxten gödslades vissa odlingslådor med YaraMila Promagn 11-5-18. Denna konstgödsel är speciellt utvecklad för växter med stort behov av N, vilket är ett bristämne i slaggrus [18].

Tabell 1. Innehåll i jord och slaggrus innan odling. Innehåll i gödseln anges också. Alla halter anges i mg/kg TS.

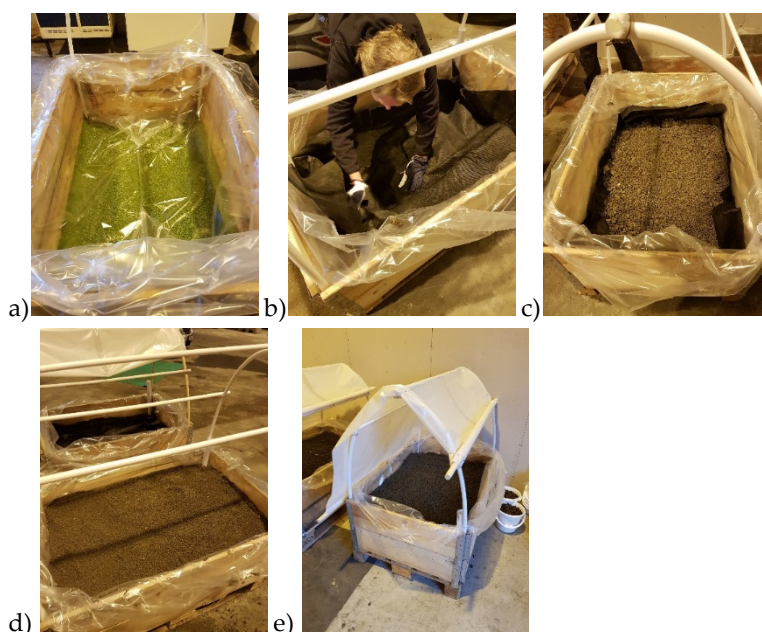
Element	Slaggrus original	Jord original	Gödsel
Al	50 000	11 000	na
As	32	2,5	na
B	na	8,5	500
Ba	2 100	95	na
Be	1,2	0,6	na
Ca	130 000	5 250	na
Cd	3,2	0,2	<55*
Co	72	6,6	na
Cr	750	15	na
Cu	5 400	22	300
Fe	65 000	17 000	800
Hg	<0,025	<0,025	na
K	9 500	5 300	180 000
Li	na	14	na
Mg	14 000	4 600	16 000
Mn	1 200	330	2 500
Mo	59	1,2	20
N	na	na	110 000
Na	24 000	560	na
Ni	340	13	na
P	4 600	560	46 000
Pb	830	14	na
S	8 700	500	100 000
Sb	77	0,3	na
Se	na	<2,5	na
Si	160 000	na	na
Sn	220	1,5	na
Sr	390	27	na
Ti	8 900	na	na
V	53	28	na
Zn	5 600	80	na

^{na}Analys saknas.

*Omräknat från max 12 mg Cd/kg P

3.2 BYGGNATION AV ODLINGSLÅDOR

Försöken utfördes i odlingslådor, ca 80*120 cm, som byggdes upp i olika lager, Figur 1. Inledningsvis placerades plast på insidan av varje pall för att fuktsäkra botten, innan en marktäckduk och ca 15 cm leca-kulor lades i botten. Därefter fylldes varje låda med slaggrus i ett ca 30 cm tjockt lager. Över varje låda byggdes dessutom ett plasttak för att vid behov kunna skydda odlingarna från sol och regn. Dessa användes dock endast i begränsad omfattning.



Figur 1. Byggnation av odlingslådor i olika steg. a) fuktsärr b) marktäckduk c) leca-kulor d) slaggrus, e) tak.

På varje odlingslåda sattes dessutom ett rör med en flottör fast för att vattennivån i odlingslådan skulle kunna kontrolleras. Dessa fungerade dock inte enligt plan, då vattennivån aldrig blev så hög att vatten trängde in i flottörrören. Detta kan ses som ett tecken på att vattentillgången var begränsad i samtliga odlingslådor, även i referensfallen.

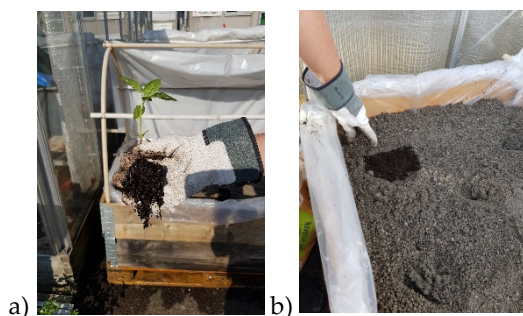
3.3 PLANTERING

Totalt byggdes 6 stycken lådor, där planteringen skedde enligt följande;

- Solros i slaggrus utan näring
- Solros i slaggrus med näring
- Solros i referensjord med näring
- Raps i slaggrus utan näring
- Raps i slaggrus med näring
- Raps i referensjord med näring

Både solrosor och raps förödlades från frön i referensjord i växthus och vid utplanteringen var solrosorna ca 20 cm höga, Figur 2a. Tyvärr torkade rapsen ut i växthuset och rapsen såddes därför som frön direkt i respektive odlingslåda. Innan

sådd vattnades alla lådor igenom. I slaggruslådorna för solrosor gjordes 8 små hål, som fylldes med jord, medan 12 hål gjordes för rapslådorna, Figur 2b. Avsikten med detta var att öka grobarheten för de unga plantorna respektive fröna, genom att de fick gro i jord istället för slaggrus. För rapsen såddes flera frön tillsammans i varje hål, men frön såddes även direkt i slaggruset. Gödseln tillfördes en vecka efter plantering i mängder enligt producentens rekommendationer. Alla odlingslådor låg i bra och likvärdiga sol- och vindlägen.



Figur 2. a) Solrosplanta redo för plantering i slaggrus. b) Nyplanterade rapsfrön, närmast omgivna av jord och med slaggrus utanför.

3.4 SKÖTSEL

Vattning, skötsel och tillväxtskontroll av växterna skedde regelbundet under den närmare 5 månader långa säsongen. Som diskuterats ovan mättes inte vattentillsatsen, men det fanns flera tecken på att vattenbehovet hos slaggrusväxterna var större än tillförseln. Anledningen till detta är inte helt klarlagd, men troliga orsaker är att odling i slaggrus är mer vattenkrävande än konventionell odling, vilket framförallt syns på solrosorna, Figur 3, samt att en stor del av växtsäsongen sammanföll med semesterperioden. Efter ca 6 veckor gallrades rapsplantor bort från några ställen i respektive odlingslåda där rapsen växte tätt. Syftet med detta var att studera om några skillnader i tillväxt kunde ses beroende på om rapsen vuxit tätt eller glest.

3.5 SKÖRD

Samtliga växter skördades efter 19 veckors odling. Plantorna grävdes försiktigt upp, för att undvika att skada rötterna, och placerades i hinkar för transport till laboratoriet för torkning. För solrosorna grävdes varje planta upp separat, medan flera rapsplantor samlades in tillsammans. Från varje hål, där respektive planta vuxit, togs prover på jorden/slaggruset ut och blandades samman till samlingsprov som sparades för totalhaltsanalys. Försiktighet iakttogs för att säkerställa att enbart material, som rötterna antogs ha varit i kontakt med, kom med vid provtagningen, men det kan inte uteslutas att visst material av originalkvalitet ändå följde med. För solrosorna noterades även att en viss del av jorden, som satt kvar på rötterna vid utplanteringen, fanns kvar. Som följd av detta blev provmängden begränsad och enbart enkelprover kunde analyseras. Lakningstester på jord- respektive slaggrusrester kunde inte heller utföras p.g.a. den begränsade provmängden.

Torkning av växterna skedde under 1 vecka i rumstemperatur. Anledningen till att växterna inte torkades i ugn vid högre temperatur, vilket är det normala förfarandet, var den stora volymen hos referenssolrosorna, vilket skulle innebära praktiska problem vid ugnstorkningen. Då det bedömdes viktigare att alla prover behandlades lika än att växterna var totalt torra vid vidare analys, valdes torkning i låg temperatur och längre tid. Den torkade jorden respektive slaggruset skakades bort. Flera växter från varje odlingsförsök vägdes för att analysera mängden biomassa. Därefter delades växterna i rötter och delar ovan jord, vilka vägdes separat. Ett enskilt växtprov bestod i samtliga fall förutom för referenssolrosförsöken av flera plantor, som delades i rot respektive ovan jord-delar. Detta gjordes för att få ihop tillräcklig massa för analys. För raps utan rot analyserades hela växten som ett prov p.g.a. otillräcklig biomassa. Dubbelprover analyserades av alla växtdelar, medan enkelprover gjordes på jordmaterialen, vilket diskuterats ovan.

3.6 KEMISKA ANALYSER

Totalhaltsanalys av grundämnen i jord innan och efter odling gjordes genom upplösning i kungsvatten enligt SS-ISO 11466 följt av analys med ICP-SFMS (SS EN ISO 17294-1, 2 (mod) eller EPA-metod 200.8 (mod)) eller ICP-AES (SS EN ISO 11885 (mod) samt EPA-metod 200.7 (mod)).

Totalhalter i slaggruset analyserades genom smältning med LiBO_2 och efterföljande upplösning med HNO_3 enligt ASTM D3682: 2013 och ASTM D4503: 2008 eller med $\text{HNO}_3/\text{HCl}/\text{HF}$ enligt SS EN 13656: 2003. Slutlig analys har skett med ICP-SFMS enligt SS EN ISO 17294-2: 2016 samt EPA-metod 200.8: 1994.

De skördade växternas innehåll av grundämnen analyserades genom mikrovågsuppslutning med $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{O}_2$. Efterföljande analys gjordes med ICP-SFMS enligt SS EN ISO 17294-2: 2016 samt EPA-metod 200.8: 1994.

4 Resultat och diskussion

4.1 VAL AV VÄXTER

Valet av lämpliga försöksväxter baserades på en litteraturstudie med begränsningen att växterna skulle kunna odlas på friland i svenskt klimat och skördas efter en säsong samt att de har bevisad affinitet för ackumulering av Zn. Dessutom skulle växterna gärna ha mycket biomassa och vara av vedartad karaktär för att få ett så bra bränsle som möjligt och underlätta en eventuell återvinning.

Solros (*Helianthus annuus*) har i flera studier visat sig lämplig för fyto Remediering av Zn, men även andra korsblommiga växter som raps (*Brassica napus* ssp. *Napus*) har visat sig fungera bra [5, 6]. Då både raps och solros uppfyller kraven ovan och dessutom har olika typer av rötter, pålrot (lång och rak) respektive rund och bullig, valdes dessa växter som lämpliga att utföra försöken på, Figur 7a och 8a.

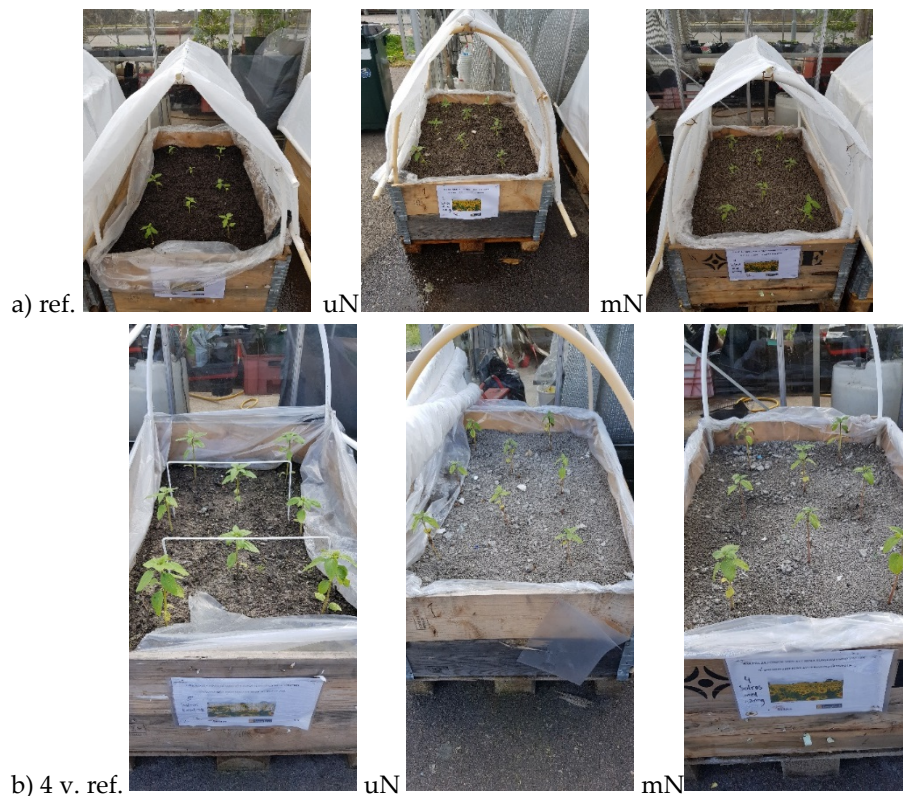
4.2 TILLVÄXT

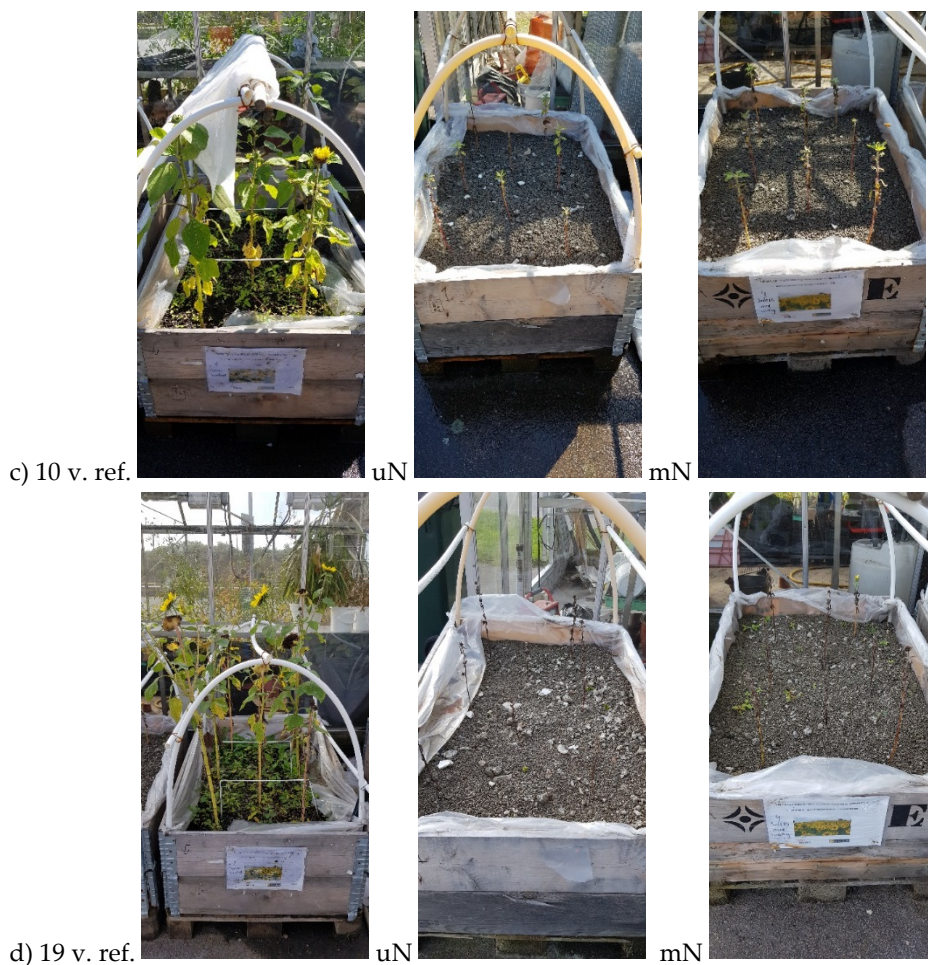
Plantornas tillväxt kontrollerades regelbundet under hela växtsäsongen genom okulär undersökning och mätning av plantornas höjd. Inledningsvis var tillväxten för solros liknande i alla tre fallen, men efter någon månad började referensproverna dra ifrån, Figur 3 och 5. Ingen skillnad mellan plantorna, som fick näring relativt de som inte fick näring, noterades. En trolig anledning till detta är att solrosorna som växer i slaggrus är mer vattenkrävande, möjligen p.g.a. att slaggruset är mer kompakt och att rötterna därför inte tränger ner lika effektivt för att nå vattnet. Även om det finns 10 gånger mer P i slaggruset än i jorden kan bristen på växttillgänglig P vara en anledning till att tillväxten hämmas. Det är också tänkbart att växternas fosforsupptagande förmåga hämmas av konkurrensen från andra närvarande element. Det finns dock flera tidigare studier som visar på solrosors förmåga att växa i förorenade material, även om det vanligtvis handlar om jordar med en eller ett fåtal föroreningsämnen och inte som i slaggrus där det finns många olika föroreningar närvarande [4, 6, 7]. Utan att i detalj kunna redogöra för hur tillväxten styrs av gödsling är det rimligt att val av gödselsort inverkar på tillväxten. I denna studie verkar dock tillgången på vatten och slaggrusets föroreningssituation ha större inverkan, då både solrosor som fick respektive inte fick näring uppvisade dålig tillväxt, om än något sämre i fallet utan näring. En fördel med att odla i slaggrus är att inga ogräs eller skadedjur upptäcktes på plantorna, vilket förekom i referensodlingslådan.

För raps var det inte riktigt samma tillväxtmönster. Redan ett par veckor efter sådd var det tydligt att tillväxten för slaggrusrapsplantorna utan näring var lägre och efter ca 8 veckor hade tillväxten avstannat, Figur 4 och 5. Rapsplantorna med näring växte till en början bättre än referensproverna, men sedan ökade tillväxten i referensplantorna mer. Vid skörden var dock rapsplantorna med näring nästan lika höga som referensplantorna, vilket tyder på att trots att det tar längre tid för tillväxt vid odling av raps i slaggrus blir sluthöjden jämförbar. Dock är slaggrusplantorna vekare. Det är troligt att vattenbrist kan ha haft inverkan även

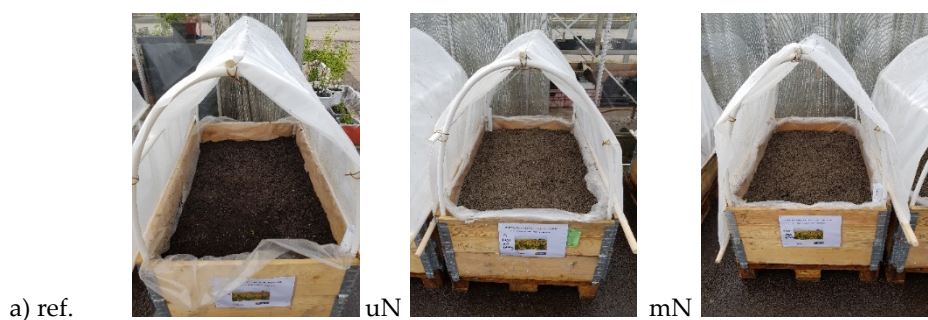
på rapsens tillväxt, men det är inte lika tydligt som för solrosorna. En förklaring kan vara att till skillnad från solrosor, som har många små rötter som växer i en klump, har rapsen en grov, rak rot, som växer nedåt, med mindre rötter utstickande från denna, vilket skulle kunna göra det enklare för rapsrötterna att penetrera det kompakta slaggruset. Istället verkar tillförseln av gödsel vara den viktigaste faktorn för raps tillväxt, då raps utan näring uppvisade mycket dålig tillväxt. I tillägg blev dessa blad lilafärgade, vilket, hos oljeväxter som raps tillhör, kan bero på brist av P [19]. Fosforbrist förvärras ofta i alkaliska jordar med lågt organiskt innehåll och vid dåligt utvecklade rötter, vilket stämmer in på odlingen av raps. Det har dock inte kunnat klarläggas inom ramen för projektet att det är brist på P som orsakar de lila bladen i rapslådan utan näring, men då detta inte kunde ses i rapsen som fick näring är det rimligt att det är brist på något som finns i gödseln som orsakar fenomenet. Det kan dock inte uteslutas att det är balansen mellan olika mineraler som påverkar tillväxten då överskott av något kan hämma upptaget av något annat, som t.ex. att ett högt innehåll av K kan hämma upptaget av Mg.

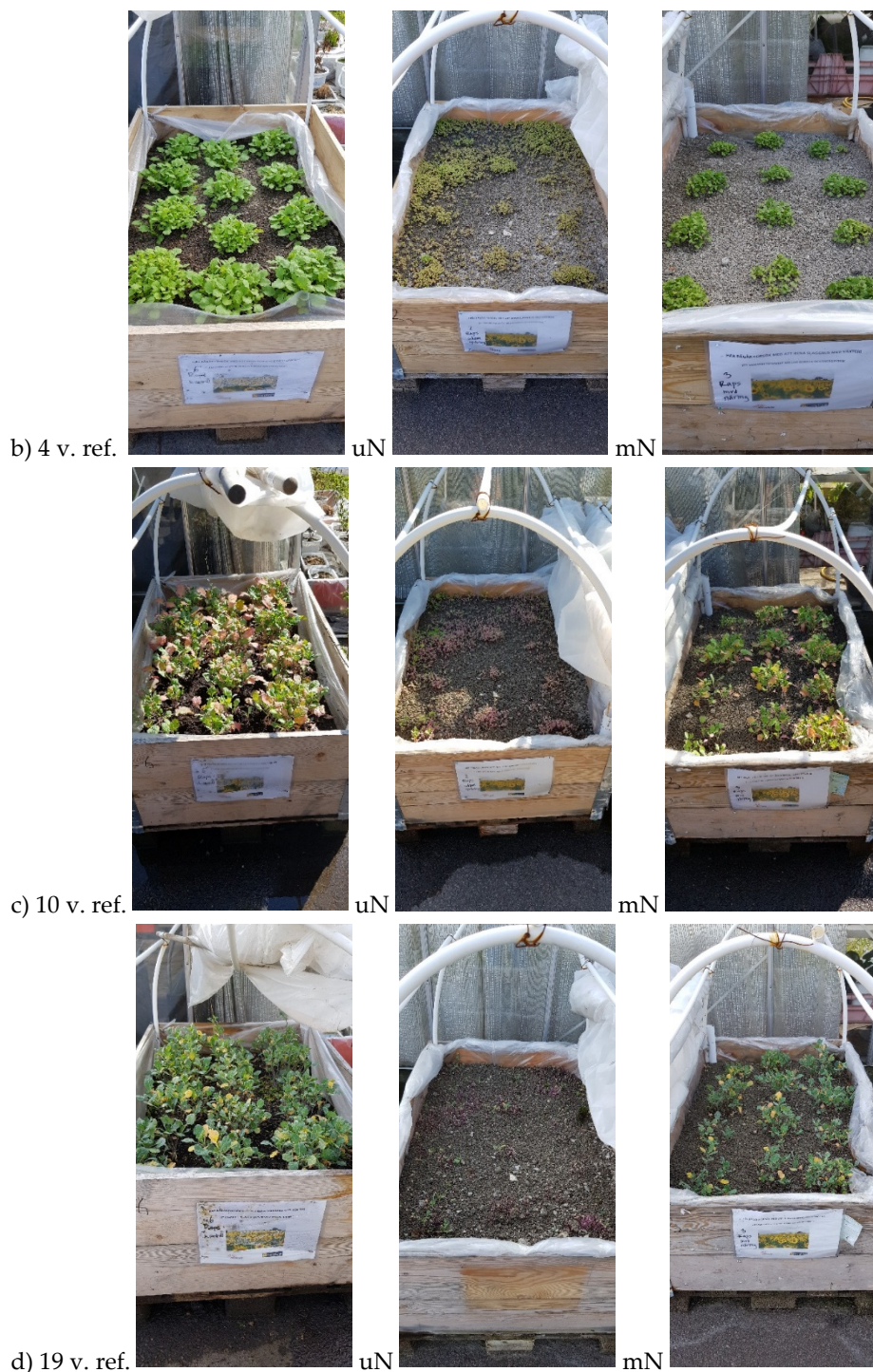
Raps kan växa tätt utan att tillväxten påverkas, vilket även sågs i detta projekt, där inga skillnader i tillväxt på de rapsplantor som växte tätt respektive i gallrade grupper kunde påvisas.



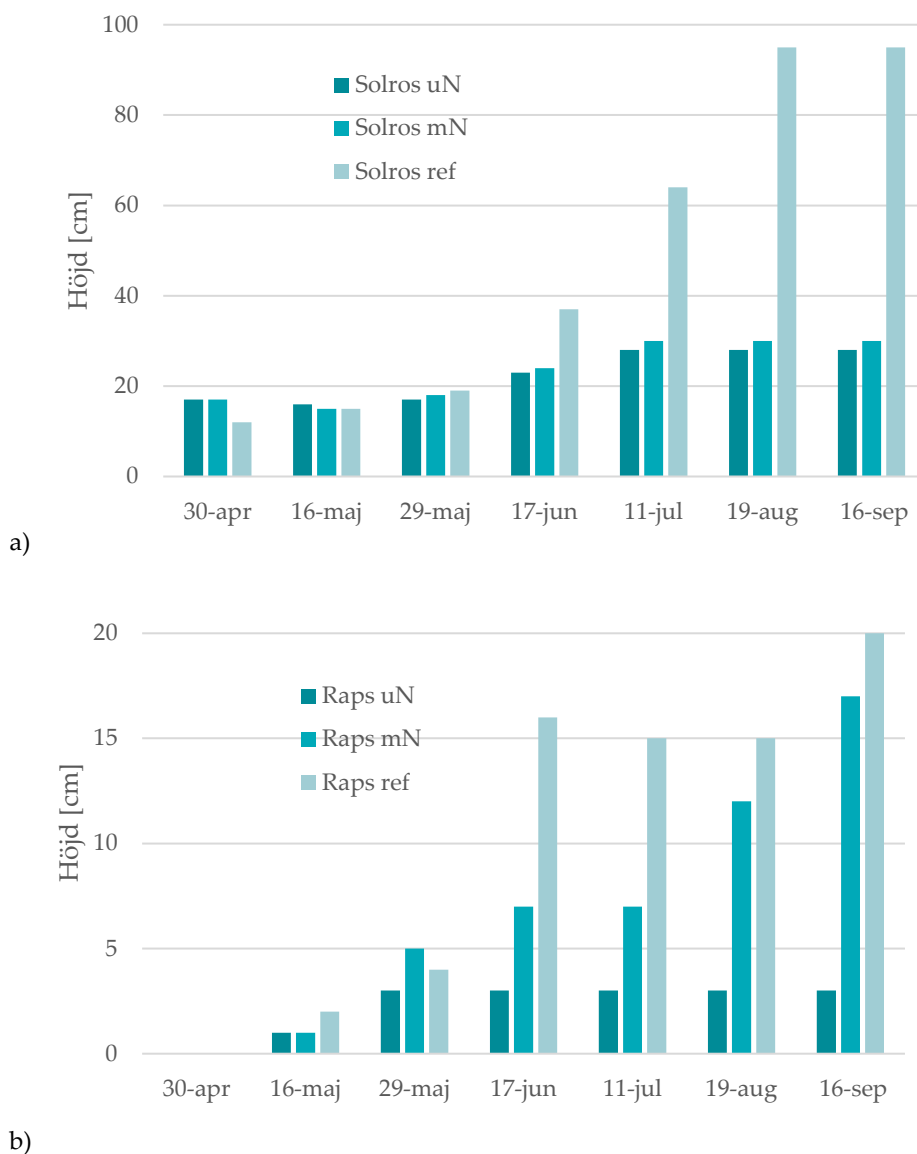


Figur 3. Solrosplanter odlade i referensjord (ref), i slaggrus utan näring (uN) och i slaggrus med näring (mN) vid a) (ut)planering (20190430), efter b) 4 veckor (20190529), c) 10 veckor (20190711) och d) 19 veckor (20190916)





Figur 4. Rapsplanter odlade i referensjord, i slaggrus utan näring och i slaggrus med näring vid a) (ut)planering, efter b) 4 veckor (20190529), c) 10 veckor (20190711) och d) 19 veckor (20190916)



Figur 5. Medeltillväxt för a) solros och b) raps under växtsäsongen maj till september.

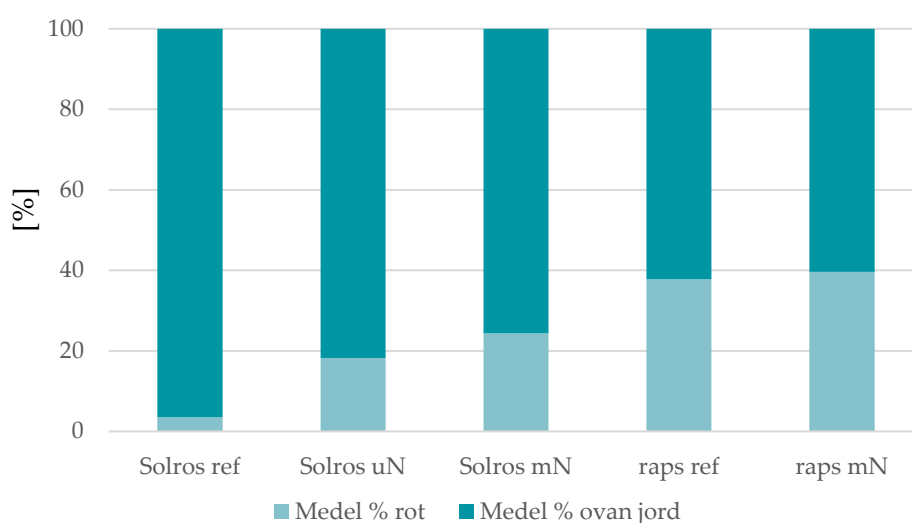
4.3 BIOMASSA I DELAR OVAN JORD OCH I RÖTTERNA

Den största andelen biomassa finns i delarna ovan jord, för samtliga växter, Figur 6. För solrosen är andelen ovan jord högre i referensfallet än för slaggrussolrosorna, medan fördelningen för rapsen är detsamma mellan referens och slaggrus. Detta beror troligen på rötternas utseende och slaggrusets densitet, vilket diskuterats ovan. Ur denna aspekt verkar både raps och solros lida brist på något, då deras rötter både är relativt sett mindre till storleken och mer grenade jämfört med referensfallen, Figur 7 och 8.

Trots att fördelningen mellan de olika växtdelarna i rapsfallen är liknande för referens- och slaggrusodling och höjden på plantorna var snarlika vid skörd, är biomassan/växt ca 3 gånger högre i referensfallet än i slaggrusplantorna, Tabell 2.

Detta sågs även under tillväxtstudierna, då rapsplantorna i slaggruset var vekare än de i referensjorden.

Vid provberedningen noterades att jorden var våtare än slaggen, trots att tillförsln av vatten varit likvärdig till alla odlingslådor. Detta pekar också på att vatten som tillförs slaggrus inte blir lika tillgängligt för växterna, som när vatten tillförs jord. Exakt vad detta beror på är i nuläget inte klart, men fasta material är olika bra på att suga åt sig och hålla vatten beroende på porositet och kapillärkraft. Vid eventuella fortsatta försök behöver det säkerställas att tillräckligt med vatten tillförs slaggrusodlingen.

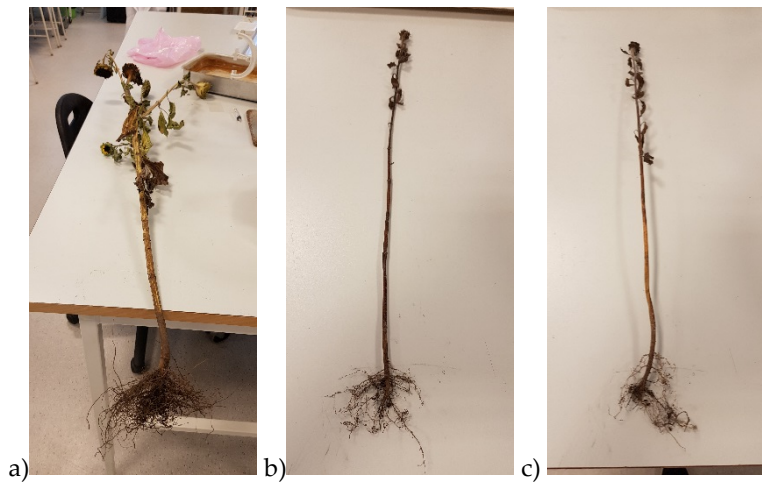


Figur 6. Fördelning av torkad biomassa mellan delar ovan jord och rötter för solros och raps. Raps utan näring visas ej p.g.a. att biomassan var så låg att uppdelning i växtdelar inte var möjlig.

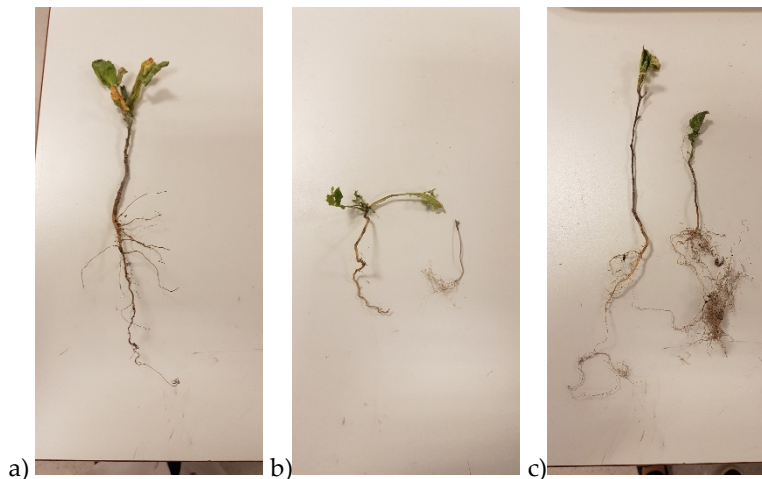
Tabell 2. Massa torkad biomassa/växtdel för solros och raps.

Växt	Massa ovan jord/växt, g	Massa rot/växt, g	Höjd ovan jord, cm
Solros ref	120	4,0	95
Solros uN	0,8	0,2	28
Solros mN	0,8	0,3	30
raps ref	0,6	0,4	20
raps uN	0,1 ¹	-	3
raps mN	0,2	0,1	17

¹Denna fraktion innehåller även rötterna p.g.a. liten biomassa, vilket gjorde uppdelning omöjlig.



Figur 7. Skördade och torkade solrosplanter odlade i a) referensjord och i slaggrus b) utan resp. c) med näring.



Figur 8. Skördade och torkade rapsplanter odlade i a) referensjord och i slaggrus b) utan resp. c) med näring.

4.4 INNEHÅLL I VÄXTERNA

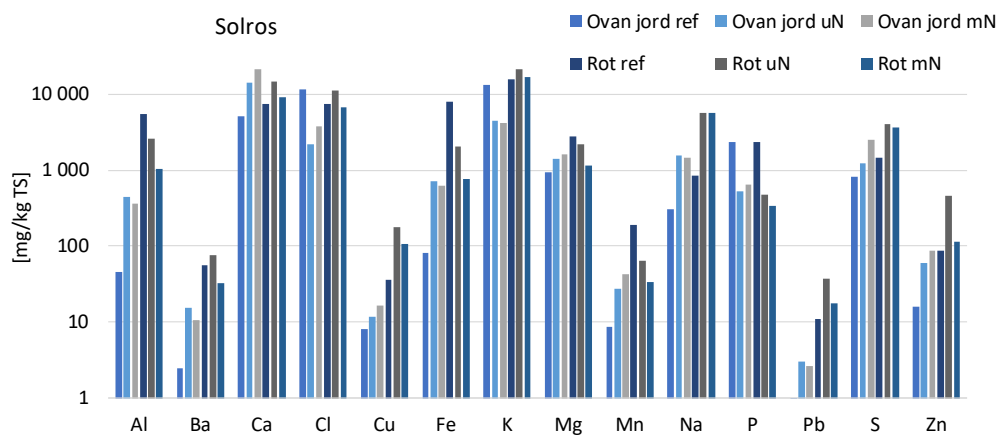
Även om den största biomassen återfinns i växtdelarna ovan jord är metall- och näringsämneshalter generellt sett högre i rötterna för båda växttyperna och oavsett odlingsmedia, Figur 9. För solros gäller detta oavsett om näring har tillförts plantorna eller inte, medan det för raps inte är möjligt att dra samma slutsats då biomassen för raps utan näring var för liten för uppdelning i rötter och ovan-jord-delar. Dock är uppmätta metallhalter i dessa prover mer lika innehållet i rotproverna än ovan-jord-proverna för övriga rapsprover, vilket tyder på att näringstillförsel inte påverkar fördelningen av metaller och näringsämnen inom växten. Däremot är näringstillförsel viktig för tillväxten, vilket diskuterats ovan. I en tidigare studie av Zn-upptag i solrosor var halterna högst i bladen [6]. Det är möjligt att detsamma skulle ha kunnat bli fallet även i den studie som presenteras här, om inte tillväxten av solrosorna i slaggrus hade avstannat. Detta styrks dock inte av fördelningen i referensfallet, där t.ex. halterna av Cu, Pb och Zn är ca 10 gånger högre i rötterna i solrosorna utan näring jämfört med delarna ovan jord, Figur 9. Överlag är skillnaderna i halter mellan olika växtdelar störst för

referenssolrosorna, där halten av Al, Fe och V är ca 100 gånger högre i rötterna jämfört med delarna ovan jord. Motsvarande uppgifter om fördelningen mellan växter som har odlats i slaggrus finns inte, då endast delarna ovan jord analyserades i den studien [10].

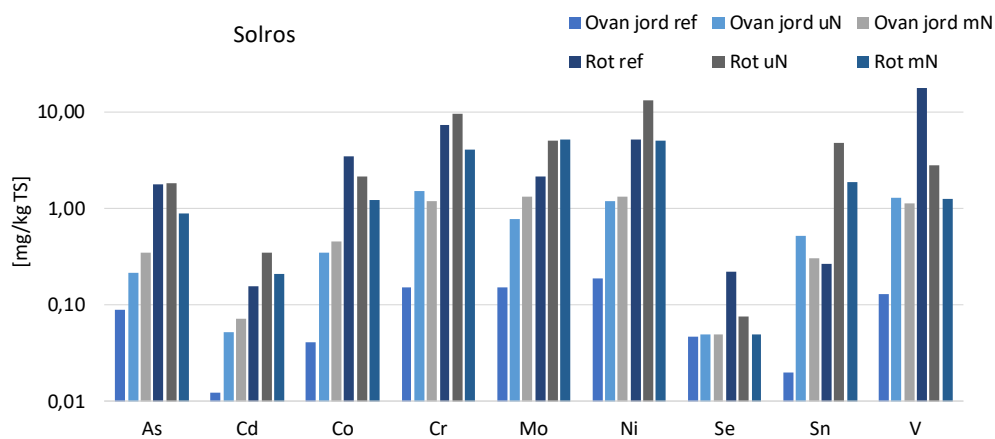
Resultaten indikerar att ju mer förorenad jord, desto högre halter i både rötter och ovan jord-delar. För Zn är det ca 5 gånger så höga halter i solrosdelarna, som har vuxit i slaggrus jämfört med växterna i referensjord, vilket styrker tidigare studier om att solrosor har affinitet för att extrahera Zn ur den jord de växer i, Figur 9 [4, 7]. För raps är anrikningen än tydligare, då halten i slaggrusrapsrötterna är nästan 20 gånger högre än i referensrötterna. Det ska dock noteras att ursprungshalten av Zn i slaggruset är 70 gånger högre än innehållet i referensjorden, vilket indikerar att effektiviteten i upptaget minskar med föroreningsgrad, oavsett växttyp. Det är dock inte bara Zn som anrikas i slaggrusrapsrötterna, utan allra högst anrikningsgrad har Cu och Sn samt Pb, med ca 50 respektive 25 gångers högre halt i rapsrötterna jämfört med referensfallet. För Cu och Na är innehållet ca 5 gånger högre i rötterna från slaggrussolrosorna jämfört med referenssolrosorna. I delarna ovan jord är halterna av Al, Cr, Pb och V ca 10 gånger högre när solrosorna har vuxit i slaggrus jämfört med referensfallet, medan halterna i raps är mer lika. Det är anmärkningsvärt att de högsta halterna av många ämnen, t.ex. Zn, Ca, Cl, S och Na, återfinns i rötterna till solros utan näring, trots att dessa växter både okulärt och vid mätning av biomassan hade sämst tillväxt. Dessa element, förutom Cl, som inte analyserades, visar också på en bra rening av slaggruset, där Zn har den högsta reningsgraden (29%). Dock har de fasta jord/slaggrusproverna enbart analyserats som enkelprov, varför det inte ska dras för stora slutsatser av detta. Alla totalhaltsanalyser av växterna återfinns i Bilaga A.

Vid jämförelse av solrosor och raps i egenskap av hur lämpliga de är för fytosanering av slaggrus är innehållet i rapsen generellt högre än i solrosorna, Figur 9. För Zn är innehållet ca 10 gånger högre i rötterna från raps relativt solrosorna, medan metallinnehållet i växterna ovan jord är mer lika. Det högre metallinnehållet i slaggrusrötterna av raps jämfört med solrosrötterna kan bero på att formen på rapsrötterna (pålröt), har enklare på att sprida sig i det mer kompakta slaggruset än vad solrosrötterna har samt att solrosorna torkade och inte växte optimalt.

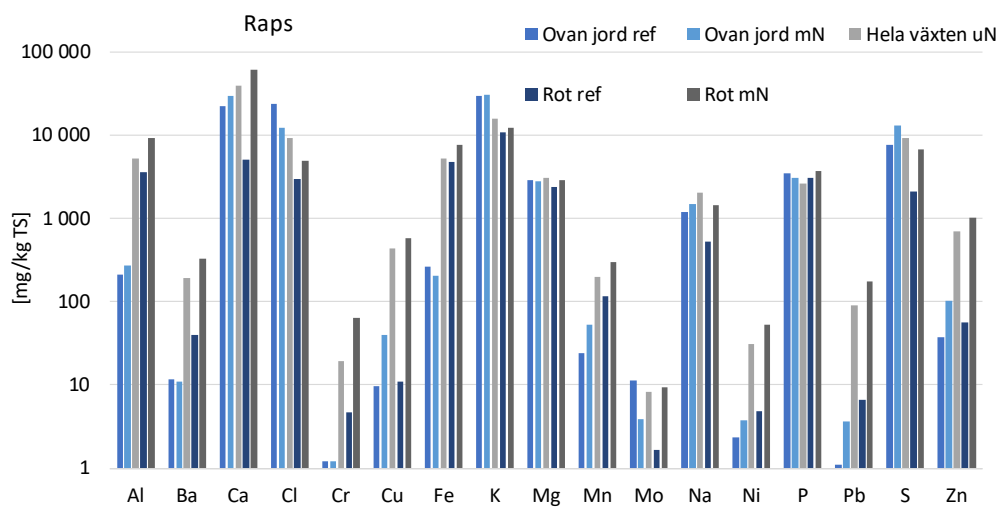
a)



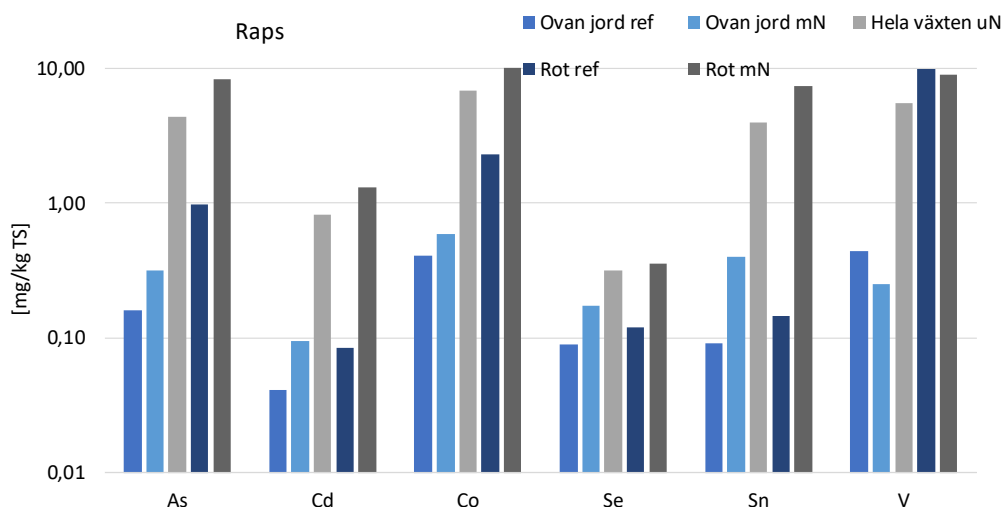
b)



c)



d)



Figur 9. Totalinnehåll i solros (a, b) och raps (c, d) odlade i referensjord och i slaggrus utan respektive med näring uppdelade på innehåll i rötter och delar ovan jord. Alla halter anges i mg/kg TS.

4.5 INNEHÅLL I SLAGGRUS EFTER ODLING

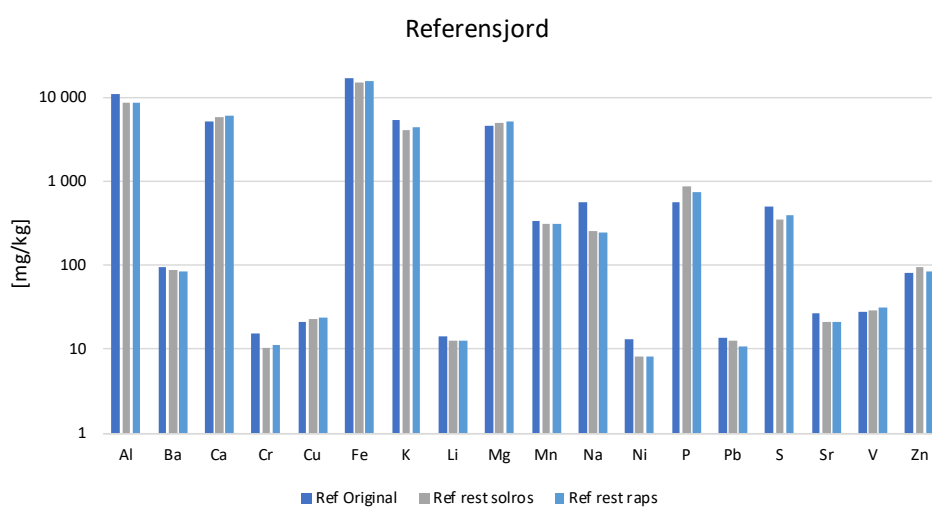
Enbart enkelprover kunde analyseras på jord/slaggrusmaterialet efter odling. Därför ska resultaten snarare ses som indikativa än absoluta halter. Ursprunglig plan var att ta dubbelprover, men då rötterna i de flesta fall var så dåligt utvecklade var det svårt att få ihop tillräckligt provmaterial för analys utan att riskera att "obehandlat" material kom med. Det kan dock inte uteslutas att mindre mängder obehandlat material ändå kommit med i analysen och uppmätta halter bör ses som "worst case"-resultat. Alla totalhaltsanalyser av referensjorden och slaggruset innan och efter odling återfinns i Bilaga B.

Även om halterna av många ämnen är höga i växtdelarna, som t.ex. Zn i rapsrötterna, är minskningen i slaggruset inte lika tydlig, Figur 10. Förutom för element som bildar lättlösliga föreningar (Ca, K, Na och S) uppmättes inte några riktigt stora minskningar i slaggrusets sammansättning. Med tanke på den relativt låga tillväxten med dåligt utvecklade rotsystem hos både raps och solros i slaggruset är det rimligt att upptaget av metaller i växterna blir mycket lokalt och det är troligt att en bättre tillväxt hade lett till en större reningsgrad. Den övergripande trenden är dock att halterna av många element är lägre efter odling. Beräknas den procentuella minskningen genom att massan av respektive grundämne som har försvunnit från jorden/slaggruset under odlingen jämförs med vad som fanns i materialet från början blir trenden tydligare, Tabell 3. Förutom minskningen för de element som bildar lättlösliga föreningar, vilket diskuterats ovan, indikerar även halterna av t.ex. Mn och Mo i slaggruset efter odling på reella minskningar till följd av odlingen. För Zn kan inte någon generell trend ses, men klart är att någon större reningseffekt med avseende på Zn-halten i slaggrus till följd av odling av solrosor eller raps inte kan väntas. Detsamma gäller i princip alla element och det är inte aktuellt med någon omklassning av slaggrus efter odlingen.

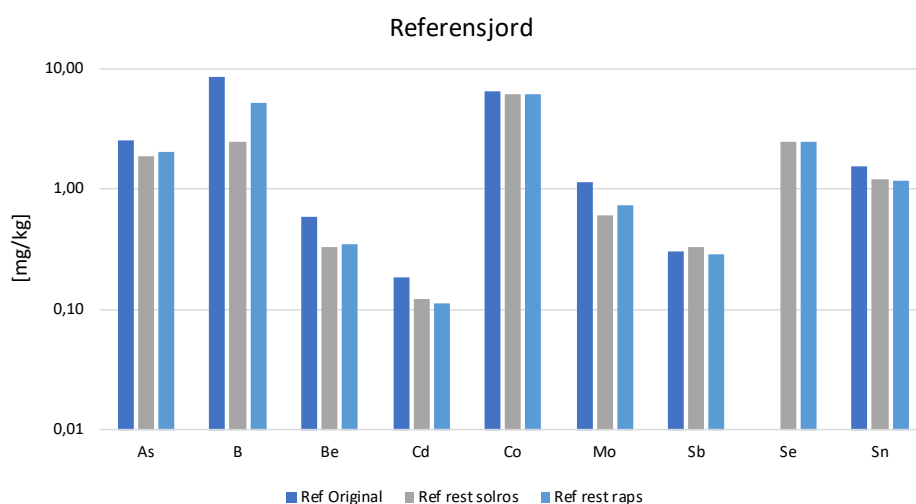
I vissa fall erhöles vid beräkningarna negativa värden, vilket indikerar en ökning av det aktuella grundämnet efter odling. Då det inte bedöms rimligt att halterna skulle öka till följd av odling har dessa värden tagits bort och beräkningen inte utförts. Anledningen till dessa orimliga resultat beror snarare på låga totalhalter (t.ex. Sn i jord), naturlig heterogenitet i proven (t.ex. Ba i slaggrus) samt att endast enkelprov av respektive försöksuppsättning kunde göras.

Det är svårt att dra någon slutsats om något av odlingssätten skulle vara bättre ur reningssynpunkt, men raps utan näring verkar i alla fall ha minst potential med tanke på den låga tillväxten.

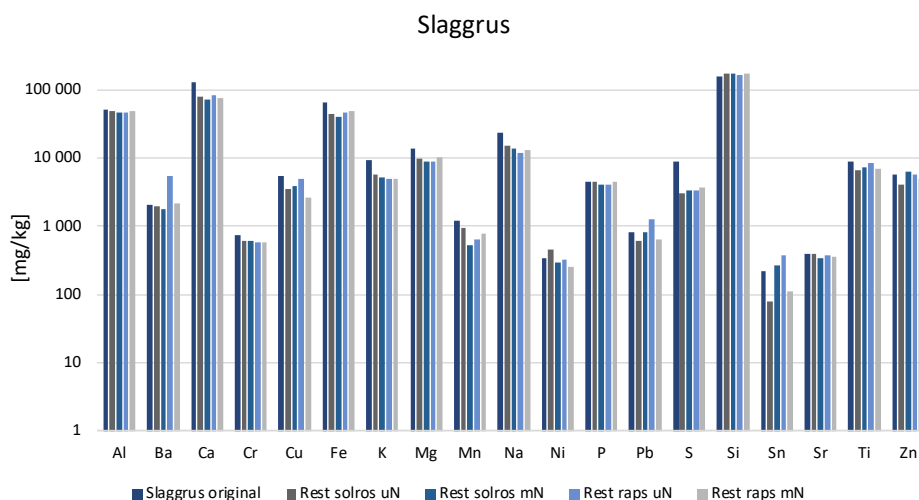
a)



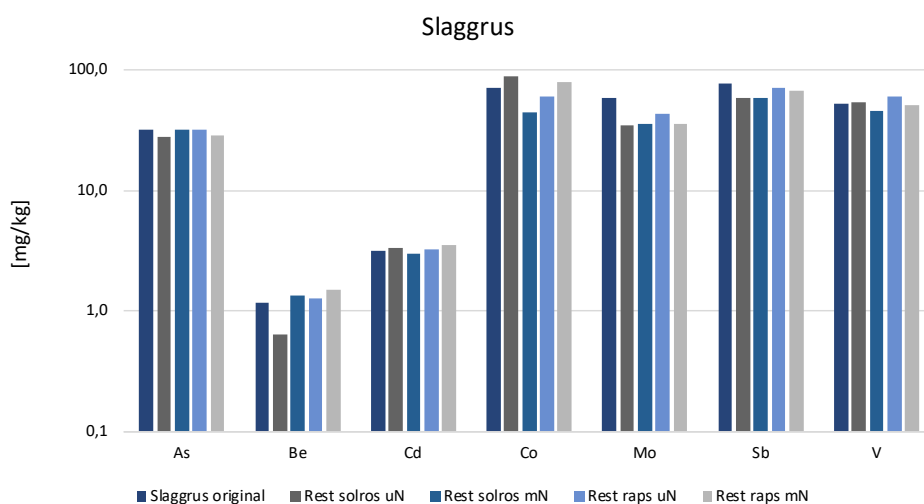
b)



c)



d)



Figur 10. Totalinnehåll i referensjord (a, b) resp. slaggrus (c, d) innan och efter odling av solrosor och raps. Alla halter anges i mg/kg TS.

Tabell 3. Procentuell minskning av utvalda grundämnens innehåll i referensjordarna och i slaggruset efter odling. Siffror markerade med **fet stil** innebär att minskningen är $\geq 40\%$, medan *kursiv stil* innebär att totalhalten av aktuellt ämne i originaljorden/slaggruset är <10 mg/kg och därför bör värdet användas med försiktighet. Kvicksilver analyserades också, men var under detektionsgränsen ($<0,025$ mg/kg TS).

	Ref rest solros	Ref rest raps	Rest solros uN	Rest solros mN	Rest raps uN	Rest raps mN
Al	21	22	3	9	7	0
As	26	20	14	0	–	9
B	71	39	na	na	na	na

	Ref rest solros	Ref rest raps	Rest solros uN	Rest solros mN	Rest raps uN	Rest raps mN
Ba	7	11	5	13	–	–
Be	44	41	46	–	–	–
Ca	–	–	41	45	36	42
Cd	34	39	–	7	–	–
Co	6	8	–	37	16	–
Cr	33	26	20	19	21	23
Cu	–	–	34	28	7	50
Fe	12	9	30	38	27	26
K	21	18	40	45	47	47
Li	9	11	–	–	–	–
M	–	–	30	35	38	28
g						
M	5	6	19	55	45	34
n						
M	48	37	41	39	25	39
o						
Na	55	55	35	42	51	45
Ni	37	37	–	14	7	25
P	–	–	4	10	11	1
Pb	7	21	25	1	–	24
S	31	20	65	61	61	57
Sb	–	5	23	24	6	11
Sn	21	23	64	–	–	51
Sr	21	21	–	14	2	5
Ti	na	na	27	17	7	21
V	–	–	–	14	–	2
Zn	–	–	29	–	–	11

–Beräkning kan inte utföras pga begränsat antal analyser och heterogena prover.

^{na}Analys saknas.

4.6 POTENTIAL FÖR RENING AV SLAGGRUS OCH ÅTERVINNING AV ZN

Det är tydligt att odling av raps och solros i slaggrus i första hand inte är effektiva åtgärder för att rena slaggruset, men det skulle kunna vara ett sätt för att anrika sitt bränsle på Zn. Överslagsberäkningar ger att om askhalten vid förbränning av raps antas vara 6% [20] skulle Zn-halten i askan bli närmare 1 % (7 700 mg/kg). Om istället enbart rötterna hade förbränts ökar Zn-innehållet i askan till 2% (17 000 mg/kg). Detta indikerar att det finns en viss potential i att odla i slaggrus för att få ett anrikat bränsle, men för att erhålla ett bränsle som är riktigt intressant för återvinning krävs högre halter och framförallt att biomassan per volym slaggrus kan ökas. Detta skulle troligen förbättras om växterna hade fått bättre förutsättningar genom t.ex. jämnare tillgång till vatten och en mer anpassad gödsel. Val av andra växter med grövre rötter och som växer över flera säsonger

hade förmodligen varit än mer effektivt, men har inte kunnat provas inom ramen för detta projekt. Det är rimligt att tro att det även hade haft en positiv inverkan på reningen av slaggruset.

Sammantaget visar resultaten att rätt valda växter kan extrahera metaller och anpassa sig till att växa i förorenade jordar samt att de högsta halterna återfinns i rötterna. Vidare blev referenssolrosorna betydligt större och rötterna mycket mer utvecklade jämfört med de som växte i slaggruset. Detta tyder på att om tillväxten i slaggruset kan ökas, så att rotsystemen kan utvecklas bättre kan mer metaller anrikas i rötterna och slaggruset renas mer. Dock verkar det vara en förutsättning att vattentillgången säkerställs och att slaggruset blir mindre kompakt, t.ex. genom uppblandning med något annat material. Klart är dock att metaller anrikas i växter odlade i slaggrus och för att få en effektiv rening är det viktigt att tillväxten är god, så att rötterna når över stora delar av slaggruset. Sannolikt blir anrikningen ännu högre om odlingen hade fungerat bättre, d.v.s. mer biomassa hade bildats och plantorna hade mått bättre.

Nackdelar med fytosanering jämfört med andra saneringsmetoder är att det tar tid och kräver stora arealer. Ingen av dessa nackdelar är enkla att åtgärda, men väljs vedartade växter som helt eller delvis kan skördas årligen erhålls ett biobränsle, som kan användas i förbränningsprocessen med minskat klimatavtryck som följd. Kan dessutom metallerna utvinnas från askan är fördelarna än större. Med växter som är anpassade till ett nordiskt klimat, är resursåtgången under odlingen låg, vilket kan kompensera den längre tidsåtgången jämfört med andra tänkbara metoder.

5 Slutsatser och fortsatt arbete

- Odling av raps och solros i slaggrus fungerar, men tillväxten är sämre än i referensjorden. Förklaringar till detta är högre vattenbehov vid odling i slaggrus, hämmad rotutveckling p.g.a. mer kompakt jordmaterial samt att val av näringsgödsel troligen inte varit optimalt.
- Innehållet av flera metaller, som t.ex. Zn, är många gånger högre i växter som vuxit i slaggrus jämfört med de i referensjorden. Högst metallhalter återfinns i rötterna och vid förbränning av rapsrötter är en uppskattad Zn-halt i askan ca 2%.
- Innehållet av flera metaller är lägre i slaggruset efter odling, men minskningen är begränsad p.g.a. den låga tillväxten. Odling av raps eller solros är således ingen effektiv åtgärd för att rena slaggrus.

Dessa inledande försök visar att fytosanering av slaggrus för att erhålla ett metallanriktat bränsle och renare slaggrus fungerar principiellt, men att metoden behöver utvecklas, t.ex. i form av bättre utformad vatten- och näringstillförsel, för att få till stånd en effektivare tillväxt och rening. Sannolikt är inte de här använda växterna, raps och solros, de mest optimala för slaggrus, då de enbart växer över en säsong och har relativt veka rötter. Då innehållet av metaller i slaggrus är så högt tar det troligtvis längre tid än en växtsäsong att få till stånd en tillräcklig minskning, varför kraftigare perenna växter som t.ex. salix skulle kunna vara ett alternativ. Då kan löven samlas upp och hanteras varje växtsäsong och efter ett antal säsonger skördas hela busken inklusive rötter.

6 Referenser

1. Sverige, A., *Svensk avfallshantering 2018*. 2019: Avfall Sverige, Malmö, Sweden.
2. Zhao, L., et al., *Phytoremediation of Zinc-Contaminated Soil and Zinc-Biofortification for Human Nutrition*, in *Phytoremediation and Biofortification: Two Sides of One Coin*, X. Yin and L. Yuan, Editors. 2012, Springer Netherlands: Dordrecht. p. 33-57.
3. Odjegba, V.J. and I.O. Fasidi, *Phytoremediation of heavy metals by Eichhornia crassipes*. The Environmentalist, 2007. **27**(3): p. 349-355.
4. Wrobel, S., *Sunflower yields as an indicator of zinc polluted soil detoxification*. Fresenius Environmental Bulletin, 2010. **19**(2a): p. 330-334.
5. Belouchrani, A.S., et al., *Phytoremediation of soil contaminated with Zn using Canola (Brassica napus L.)*. Ecological Engineering, 2016. **95**: p. 43-49.
6. Adesodun, J., et al., *Phytoremediation Potentials of Sunflowers (Tithonia diversifolia and Helianthus annuus) for Metals in Soils Contaminated with Zinc and Lead Nitrates*. Water, Air, and Soil Pollution, 2010. **207**: p. 195-201.
7. M.H. Fulekar, *Phytoremediation of Heavy Metals by Helianthus annuus in Aquatic and Soil environment*. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 2016. **5**(7): p. 392-404.
8. Bilski, J., et al., *Agro-toxicological aspects of coal fly ash (FA) phytoremediation by cereal crops: effects on plant germination, growth and trace elements accumulation*. Advances in bioresearch, 2012. **3**(4): p. 121-129.
9. Krgović, R., et al., *Phytoextraction of metals by Erigeron canadensis L. from fly ash landfill of power plant "Kolubara"*. Environmental Science and Pollution Research, 2015. **22**(14): p. 10506-10515.
10. Rosenkranz, T., et al., *Waste or substrate for metal hyperaccumulating plants — The potential of phytomining on waste incineration bottom ash*. Science of The Total Environment, 2017. **575**: p. 910-918.
11. Drott, A., et al., *Regler och rekommendationer för skogsbränsleuttag och kompensationsåtgärder, Rapport 2019/14*, Skogsstyrelsen, Editor. 2019.
12. Delplanque, M., et al., *Combustion of Salix used for phytoextraction: The fate of metals and viability of the processes*. Biomass and Bioenergy, 2013. **49**: p. 160-170.
13. Rasmusen, E., *Sambehandling af RGA og scrubber væske fra forbrændingsanlæg med HALOSEP processen, Miljøprojekt nr. 1648*. 2015.
14. Karlfeldt Fedje, K., et al. *Opportunities for Zn recovery from Swedish MSWI fly ashes*. in *SUM 2014, Second Symposium on Urban Mining*. 2014. Bergamo, Italy: CISA Publisher, Italy

15. Schlumberger, S. and J. Bühler, *Metal recovery in fly and filter ash in waste to energy plants*, in *Ash 2012*, B. Strömberg, Editor. 2012, Värmeforsk AB: Stockholm, Sweden.
16. Barbaroux, R., Plasari, E., Mercier, G., Simonnot, M.O., Morel, J.L., Blais, J.F., *A new process for nickel ammonium disulfate production from ash of the hyperaccumulating plant Alyssum murale*. *Science of The Total Environment*, 2012. **423**: p. 111-119.
17. Renova AB. *Jordprodukter*. 2019-12-20.
18. Granngården AB. *Promagna* 11-5-18. 2019-12-20.
19. Yara AB. *Näringsbrister oljeväxter*. 2019-12-20.
20. Birgitta Strömberg and Solvie Herstad Svärd, *Bränslehandboken A08-819*, B. Strömberg, Editor. 2012: Värmeforsk.

Bilaga A: Totalhalter i solrosor och raps

Bilaga A. Totalhalter i solrosor och raps. Alla halter anges i mg/kg TS.

Element	Solros												Raps											
	Ovan mark						Rot						Ovan mark				Rot							
	Utan näring	sd	Med näring	sd	Ref	sd	Utan näring	sd	Med näring	sd	Ref	sd	Med näring	sd	Ref	sd	Utan näring	sd	Med näring	sd	Ref	sd	Utan näring	sd
Al	446	46	368	41	46	13	2 615	2 005	1 033	168	5 560	640	267	147	212	77	5 160	-	9 090	580	3 520	2 280		
As	0,22	<0,01	0,35	0,04	0,09	0,06	1,8	1,2	0,88	0,13	1,8	0,25	0,32	0,06	0,16	0,05	4,4	-	8,4	0,12	0,99	0,63		
Ba	16	2,7	10	1,0	2,5	0,67	76	54	33	2,6	55	8,2	11	2,8	12	0,10	194	-	325	42	39	23		
Ca	14 250	3 150	21 150	3 050	5 090	1 010	14 780	8 320	9 015	175	7 430	10	29 800	300	22 200	300	39 100	-	60 500	2 100	5 105	995		
Cd	0,05	0,00	0,07	0,00	0,01	0,00	0,35	0,16	0,21	0,04	0,16	0,00	0,09	0,00	0,04	0,00	0,82	-	1,3	0,07	0,08	0,04		
Cl	2 180	140	3 720	560	11 555	2 045	11 185	4 015	6 685	385	7 430	540	12 300	1 600	23 700	1 000	9 100	-	4 840	90	2 965	665		
Co	0,35	0,01	0,46	0,08	0,04	0,01	2,1	1,5	1,2	0,10	3,5	0,68	0,59	0,17	0,41	0,03	6,8	-	10,1	0,25	2,3	1,7		
Cr	1,5	0,26	1,2	0,16	0,15	0,02	9,6	6,7	4,1	0,42	7,3	0,97	1,2	0,43	1,2	0,73	19	-	65	31	4,7	3,1		
Cu	12	0,35	16	1,9	8,0	0,97	179	119	107	30	36	7,9	39	7,9	10	4,8	428	-	568	19	11	6,1		
Fe	725	75	630	111	80	33	2 066	1 635	774	169	7 875	1 405	205	77	263	72	5 190	-	7 570	920	4 740	3 360		
Hg	0,02	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,05	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	0,01	-	0,02	<0,01	<0,02	<0,02		
K	4 445	395	4 125	785	13 300	2 700	21 250	6 350	16 850	4 550	15 500	3 800	29 950	2 450	29 400	1 500	15 900	-	12 200	100	10 710	990		
Mg	1 425	15	1 625	45	937	44	2 220	360	1 155	55	2 750	330	2 785	5,0	2 890	130	3 020	-	2 860	130	2 385	955		
Mn	27	3,6	43	4,8	8,8	1,0	64	46	34	3,1	188	35	52	3,9	24	3,0	200	-	297	2,0	115	79		
Mo	0,78	0,06	1,33	0,03	0,15	0,06	5,1	2,6	5,2	0,9	2,2	0,6	3,9	0,18	11	1,6	8,1	-	9,5	0,16	1,7	0,23		
Na	1 565	45	1 455	25	304	71,00	5 705	425	5 580	1 440	848	342	1 500	10	1 175	75	2 050	-	1 435	155	517	252		
Ni	1,2	0,08	1,3	0,11	0,19	0,05	13	11	5,0	0,39	5,2	0,9	3,7	0,73	2,3	0,19	31	-	52	5,0	4,8	1,8		
P	532	7,5	654	72	2 325	265	475	232	343	2,5	2 380	470	3 005	185	3 430	290	2 600	-	3 710	440	3 040	720		
Pb	3,0	0,02	2,64	0,24	0,23	0,03	37	27	18	2,0	11	1,5	3,6	1,4	1,1	0,53	91	-	174	11	6,6	4,1		
S	1 235	45	2 470	60	819	40	4 035	65	3 690	890	1 440	110	12 950	50	7 545	185	9 290	-	6 670	310	2 085	55		
Se	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,05	<0,01	<0,08	<0,03	<0,05	<0,01	0,22	0,03	0,17	0,01	0,09	0,04	0,32	-	0,36	0,02	0,12	0,07		
Sn	0,52	0,02	0,30	0,02	<0,02	<0,001	4,8	3,8	1,9	0,45	0,27	0,03	0,40	0,14	0,09	0,02	4,0	-	7,5	0,65	0,15	0,06		
V	1,3	0,18	1,1	0,22	0,13	0,06	2,8	2,1	1,2	0,045	18	0,75	0,25	0,09	0,45	0,10	5,55	-	9,0	0,27	9,8	6,7		
Zn	59	1,2	88	7,5	16	0,35	460	28	114	18	88	8,2	101	1,7	38	8,9	695	-	1 020	10	56	26		

Bilaga B: Totalhalter i referensjord och slaggrus innan och efter odling

Sökord

Slaggrus, fytosanering, zink, solros, raps

Bilaga B. Totalhalter i referensjord och slaggrus innan och efter odling. Alla halter anges i mg/kg TS.

Element	Ref Original	Ref rest solros	Ref rest raps	Slaggrus original	Rest solros uN	Rest solros mN	Rest raps uN	Rest raps mN
Ag	0,025	0,06	0,025	-	-	-	-	-
Al	11 000	8 710	8 610	50 135	48 626	45 820	46 568	50 028
As	2,5	2	2	32	28	32	32	29
B	8,5	3	5	-	-	-	-	-
Ba	95	89	84	2 050	1 940	1 780	5 540	2 120
Be	0,6	0	0	1,2	0,6	1,3	1,3	1,5
Ca	5 250	5 820	6 140	132 218	78 549	72 471	84 627	77 146
Cd	0,19	0,12	0,11	3,2	3,3	3,0	3,2	3,6
Co	6,6	6	6	72	88	45	60	80
Cr	15	10	11	749	596	604	593	577
Cu	22	23	24	5 360	3 550	3 870	4 990	2 670
Fe	16 900	14 800	15 400	64 680	45 119	40 397	47 223	47 691
Hg	0,025	0,06	0,06	0,023	0,031	0,024	0,026	0,026
K	5 260	4 130	4 320	9 460	5 704	5 190	5 050	5 003
Li	14	13	13	-	-	-	-	-
Mg	4 570	5 020	5 150	14 049	9 772	9 071	8 743	10 052
Mn	330	312	310	1 177	949	533	645	776
Mo	1,2	1	1	59	35	36	44	36
Na	558	251	250	23 816	15 476	13 746	11 736	13 092
Ni	13	8	8	344	445	295	320	257
P	557	867	736	4 585	4 418	4 124	4 082	4 554
Pb	14	13	11	827	617	816	1 270	629
S	504	348	402	8 680	3 060	3 350	3 420	3 740
Sb	0,3	0	0	77	59	58	72	68
Se	2,5	3	3	-	-	-	-	-
Si	-	-	-	156 163	175 800	176 735	167 384	176 735
Sn	1,5	1	1	224	80	267	375	110
Sr	27	21	21	386	388	333	378	365
Ti	-	-	-	8 933	6 546	7 434	8 322	7 060
V	28	29	31	53	54	45	60	52
Zn	80	94	86	5 600	3 990	6 430	5 770	4 960

Värden i kursiv är <värden, halva värdet används vid beräkning.

FYTOSANERING AV SLAGGRUS MED HJÄLP AV SOLROSOR OCH RAPS

Genom att odla växter i slaggrus kan man både få ett renare slaggrus och ett anrikat bränsle. Här har solrosor och raps studerats för att extrahera zink och andra metaller från slaggrus.

Resultaten av de här inledande försöken visar att både solrosor och raps anrikas med avseende på flera metaller jämfört med växter odlade i referensjord. Metallhalterna i slaggruset minskade dock i begränsad omfattning.

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