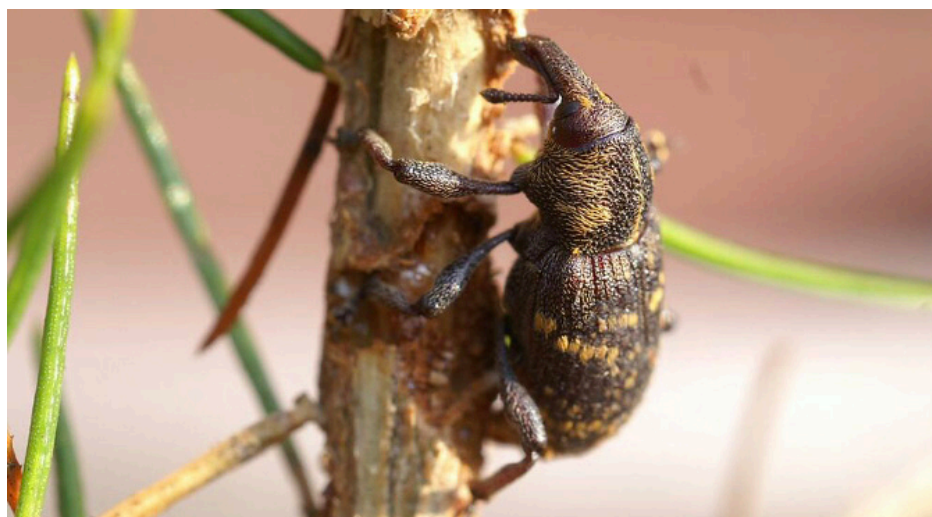
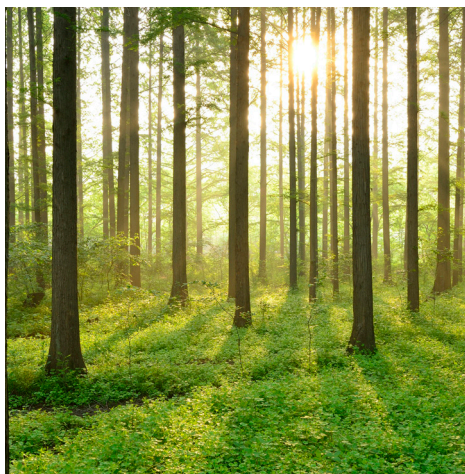


KISELUPPTAG I TALL OCH GRAN FRÅN ASKA

RAPPORT 2022:904



Kiselupptag i tall och gran från aska

MARIA GREGER OCH TOMMY LANDBERG

ISBN 978-91-7673-904-4 | © Energiforsk december 2022

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

Förord

Kisel är ett viktigt näringsämne för växter och främjar bland annat produktionen av biomassa. Den här studien visar att askor innehåller höga halter kisel, mellan 10-20% och att det därför är möjligt att det med hjälp av aska återföra den växttillgängliga kisel som tagits ut vid avverkningen. Studien visar också att gran och tall lättare kan stå emot insektsangrepp när kisel tillförts via aska i så små mängder som 0,5-5 ton TS/ha.

I referensgruppen har Stefan Anderson Skogstyrelsen, Hedvig Johansson Södra och Karin Karlfeldt Fedje Renova, deltagit.

Studie har finansierats av Energiforsk AB, Stina Werners stiftelse och Stiftelsen Skogssällskapet.

Marie Kofod-Hansen
Programansvarig Askprogrammet
December 2022

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

Sammanfattning

Skogsträd behöver kisel bland annat för tillväxt och bättre motstånd mot snytbaggeangrepp. Askor innehåller växttillgängligt kisel som tas upp av växter. Askåterföring vid återplantering av skog skulle därför kunna bidra till åtgärderna mot snytbaggar.

Skogsträd tar upp näringsämnen från jorden och dessa ämnen följer med biomassan vid virkesuttag. Om ämnena inte återförs till marken minskar dessa i jorden med sämre trädutväxt som följd. Ett växtnäringsämne som minskar vid virkesuttag är kisel. Kisel ökar bl.a. biomassaproduktion, näringsupptagning och skyddet mot bl.a. snytbaggeangrepp i barrträd. Kisel är det näst vanligaste ämnet i jorden, men en mycket liten andel kisel i jorden är tillgängligt för växter, eftersom det är hårt bundet i mineraler som vittrar mycket långsamt. Kisel tas upp av växten och när växten dör och bryts ner återgår kisel till jorden i form av växttillgängligt kisel, som tas upp av nya växter. Därför är virkesuttag utan kisel tillförsel inte hållbart i längden, eftersom virkesuttag minskar markens växttillgängliga kiselhalt. Bioaskor innehåller höga halter av kisel och därför behöver ett hållbart skogsbruk återföring av bioaskor till skogen för att upprätthålla den växttillgängliga kiselhalten i marken.

Syftet med denna studie var att ta reda på 1) hur mycket kisel i aska som är växttillgängligt, 2) hur mycket kisel som tas upp i tall och gran från aska samt var i plantan det ackumuleras, 3) vilka kiselformer som återfinns i barken när aska tillförs samt 4) hur mycket aska som bör tillföras för att få den kiselhalt i barken som minskar snytbaggeangrepp (enl. tidigare försök).

1,5 åriga gran- och tallplantor odlades 28 dagar i jord till vilket 7 olika bioaskor, i mängd som efterliknades 0-5 ton TS/ha, tillsatts i krukor. Plantorna analyserades på total kiselhalt i rötter, barr, ved och bark. Bark och aska analyserades även på löst kisel, hårt bunden kisel och SiO₂-nanopartikulärt kisel. Aska och jord analyserades också på total och växttillgänglig kiselhalt.

Resultaten visar att alla askor innehöll en växttillgänglig fraktion på ca 0,03% av den totala kiselhalten. Den växttillgängliga andelen var 40% större i askorna än i jorden. Kisel togs upp från askan av både tall och gran och kiselhalten ökade med 7,5 ggr när man jämförde kontroll och de växter som fått 5 ton TS/ha aska. Ungefär 60% kisel ackumulerades i barken, 25-30% i veden och runt 5% i barr respektive rötter. Granen ackumulerade mer kisel än tallen. Den större andelen kisel återfanns i barken som hårt bunden kisel. En mindre mängd var kisel i nanopartikelform. Kiselhalten i barken i denna studie jämfördes med tidigare studier där snytbaggeangrepp ingått som parameter. Detta gav en indikation på att för att få en minskning av snytbaggeangrepp med det från askan ackumulerade kiset i barken bör man tillföra en askmängd på mellan 0,5-1 ton TS/ha. Slutsatsen blir att återförande av aska i skogen kan öka den växttillgängliga kiselhalten i marken som i sin tur ökar kiselackumuleringen i skogsträdplantor och som på det sättet kan minska betningstrycket från snytbaggar.

Nyckelord

Snyltbagge, kisel, aska, gran, tall

Summary

Forest trees need silicon, e.g. for growth and better resistance to pine weevil infestations. Ashes contains plant-available silicon that can be taken up by plants. Recirculation of ashes during afforestation would therefore contribute to the measures against pine weevils.

Forest trees take up nutrients from the soil and during the disforestation these substances will be removed from the site. If the substances are not returned to the soil, the soil is depleted with poorer tree growth as a result. A plant nutrient that is depleted due to deforestation is silicon. Silicon increases biomass production, nutrient uptake and protection against e.g. pine weevils gnawing on conifers bark. Silicon is the second most abundant element in the soil, but a very small proportion of silicon in the soil is available to plants, as it is firmly bound in minerals, which weather very slowly. Silicon is taken up by the plant and when the plant dies and decomposes, silicon returns to the soil in the form of plant-available silicon, which is taken up by a new generation of plants. Therefore, disforestation without silicon supplementation is not sustainable in the long run, as it reduces the plant available silicon content. Bioashes contain high levels of silicon and therefore sustainable forestry needs the return of bioashes to the forest to maintain the plant-available silicon content in the soil.

The aim of this study was to find out 1) how much silicon in ash is available to plants, 2) how much silicon is taken up in pine and spruce from bioashes and where in the plant it accumulates, 3) what silicon forms are found in the bark when bioashes is added and 4) how much bioashes should be added to get the silicon content in the bark that reduces pine weevils gnawing (according to previous research).

1.5-year-old spruce and pine plants were grown for 28 days in soil to which 7 different bioashes, in amounts that mirrors 0-5 tons DM/ ha, were added into pots. The plants were analyzed for total silicon content in roots, conifers, wood and bark. Bark and bioashes were also analyzed for soluble silicon, hard bound silicon and SiO₂ -nanoparticulate silicon. Bioashes and soil were also analyzed for total and plant available silicon content.

The results show that all ashes contained a plant available fraction of about 0.03% of the total silicon content. The plant available proportion was 40% larger in the ashes than in the soil. Silicon was taken up from the ash by both pine and spruce and the silicon content increased by 7.5 times when comparing control and the plants that received 5 tons DM/ ha of bioash. About 60% silicon accumulated in the bark, 25-30% in the wood and around 5% each in needles and roots. The spruce accumulated more silicon than the pine. The larger proportion of silicon was found in the bark as hard bound silicon. A small amount was nanoparticulate silicon. The silicon content in the bark in this study was compared with previous studies where pine weevils gnaw was included as a parameter. This gave an indication that in order to obtain a reduction in pine weevils gnawing with the silicon accumulated from the bioash in the bark, an amount of bioash of between 0.5-1 tons Dm/ ha

should be added. The conclusion is that the recirculation of ash in the forest can increase the plant-available silicon content in the soil, which in turn increases the silicon accumulation in forest tree plants and which in this way can reduce the grazing pressure from pine weevils.

Innehåll

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Inledning | 9 |
| 2 | Material och metodik | 11 |
| 2.1 | Askor | 11 |
| 2.2 | Jorden | 11 |
| 2.3 | Växtmaterial | 11 |
| 2.4 | Försöket | 11 |
| 2.5 | Skörd | 11 |
| 2.6 | Analys av kisel | 12 |
| 2.7 | Beräkningar och statistik | 15 |
| 3 | Resultat | 17 |
| 3.1 | Kisel i askor och jord | 17 |
| 3.2 | Askornas inverkan på växtens torrsvikt/färskvikts-förhållande | 20 |
| 3.3 | Kiselupptaget | 21 |
| 4 | Diskussion | 30 |
| 4.1 | Hur mycket kisel är växttillgängligt i aska? | 30 |
| 4.2 | Hur mycket kisel tas upp i tall och gran från aska? | 30 |
| 4.3 | Var i trädplantorna ackumuleras kisel? | 30 |
| 4.4 | Vilka kiselformer ackumuleras i barken? | 31 |
| 4.5 | Hur mycket aska bör tillföras för att få den kiselhalt i barken som minskar snytbaggegnag? | 31 |
| 5 | Tackord | 33 |
| 6 | Referenser | 34 |

1 Inledning

Skogsträd tar upp näringsämnen från jorden och dessa ämnen följer med biomassan vid virkesuttag (Greger m.fl. 1998). Om ämnena inte återförs till marken utarmas jorden med sämre träd tillväxt som följd. Ett växtnäringsämne som minskar vid virkesuttag är kisel (Struyf m.fl. 2010, Carey och Fulweiler 2012, Keller m.fl. 2012). Kisel är det näst vanligaste ämnet i jorden, dock är en mycket liten del av kisel i jorden tillgängligt för växter, eftersom det är hårt bundet i mineraler som vittrar mycket långsamt. Vittrat kisel i form av kiselsyra tas upp av växter som bildar en amorf kiselsyrastruktur, s.k. fytoliter i växtvävnaden i cellväggar och som ansamlas i epidermisceller på bladtytor (Prychid m.fl. 2003). När växten dör och bryts ner återgår fytoliterna till jorden i form av växttillgängligt kisel, som tas upp av nya växter (Keller m.fl. 2012). Detta recirkulerade kisel är majoriteten av det växttillgängliga kiset i marken. Därför är virkesuttag utan kiselåterföring inte hållbart i längden eftersom virkesuttag minskar markens växttillgängliga kiselhalt. Återförsel av bioaskor behövs därför i ett hållbart skogsbruk (Greger m.fl. 1998). Bioaskor innehåller höga halter av kisel (Greger m.fl. 1998) och den växttillgängliga andelen kisel i askor är antagligen högre än i skogsjord (Greger pilotförsök). Det är därför möjligt att det inte behövs så höga askdoser som 3 ton per ha, den gängse normen vid tillförsel, för att återföra den växttillgängliga kisel mängd som behövs för ett upptag i trädplantor och som ger goda effekter på växten.

Växten tar upp och använder kisel, olika mycket beroende på växtart (Hodson m.fl. 2005). De behöver kisel för att stärka cytoskelettet och för försvar mot yttre påverkan som tex. insektsangrepp. De allra flesta undersökningar har utförts på jordbruksgröda. De visar att kisel bl.a. ökar biomassan samt toleransen mot insektsangrepp, växtsjukdomar, torka och hög salthalt i jorden (Epstein 2009, Liang m.fl. 2015, Rodrigues och Datnoff 2015, Alhousari och Greger 2018). Dessutom minskar kisel kadmiumupptaget (Greger och Landberg 2015, Greger m.fl. 2016) och ökar näringsämnesupptaget i växter (Greger m.fl. 2018). Kisel har även effekter på skogsträd som gran, tall och björk (Greger och Alhousari 2018, 2020) liknande de som man har sett i jordbruksgröda. Kisel ökar trädens biomassa, fiberkvalité och torktolerans, dessutom minskar kisel angreppen av snytbagggar genom ökat biokemiskt försvar samt kiselansamling i barken (Greger och Alhousari (2018, 2020), Alhousari och Greger (2019), Pettersson m. fl. (2022)).

Kisel tas inte endast upp som kiselsyra utan även som partiklar (Nazaralian m.fl. 2017, Kaur och Greger 2019, Greger m.fl. 2021). Kisel kan lagras i växten i löst, hårt bunden samt nanopartikulär form. Vilken form beror på kiselsubstratet som tillförts. Upptaget kisel bildar inte SiO₂-nanopartiklar i växten utan dessa finns där om substratet innehåller SiO₂-nanopartiklar (Greger m. fl. 2021). Snytbaggarna verkar påverkas av den hårt bundna kisel fraktionen i barken men inte av SiO₂-nanopartikel fraktionen. Prediktering av askmängd vid askåterförsel för kiselupptag och effekter hos skogsträd inkluderar därför kunskap både om olika kisel former i askor och i bark, växttillgängligt kisel i askan samt växtens kiselupptag från aska och var i växten kisel ackumuleras och i vilken form.

Syftet med denna studie var att ta reda på

- hur mycket kisel i aska som är växttillgängligt
- hur mycket kisel som tas upp i tall och gran från aska samt var i plantan det ackumuleras
- vilka kiselformer som återfinns i barken när aska tillförs
- hur mycket aska som bör tillföras för att få den kiselhalt i barken som minskar snytbaggegnag (enl. tidigare försök).

2 Material och metodik

2.1 ASKOR

De sju askor som användes var alla flygaskor från biobränsle och beskrivs i tabell 1. Beteckningar för de olika askorna, vilka används i övriga tabeller och figurer, finns också i tabell 1. Askorna analyserades på innehåll av ämnen, pH m.m. Analysen utfördes av ALS Scandinavia AB.

Förutom den totalanalys som ALS Scandinavia AB gjorde analyserades askorna på total kiselhalt, växttillgängligt kisel, nanopartikulärt kisel samt lösligt kisel med metoder beskrivna nedan. Analyserna gjordes i eget laboratorium. Resultatet visas i tabell 2.

2.2 JORDEN

Jorden som användes i försöket var en sandig jord. Denna jord analyserades också på total kiselhalt, växttillgängligt kisel, nanopartikulärt kisel och lösligt kisel.

2.3 VÄXTMATERIAL

Till försöket användes 1,5-åriga pluggplantor av tall (*Pinus sylvestris* cv. Hade 610) och gran (*Picea abies* Åltuna 504). Plantorna levererades av Stora Enso plantskola i Österfärnebo, 7 oktober 2021. Plantorna förvarades i ett kallväxthus (ca 14°C). En vecka innan försökets start flyttades plantorna till ett växthus med 19°C för aklimatisering. Alla plantor var aktiva, vilket kunde observeras i rot- och skotttillväxt.

2.4 FÖRSÖKET

Innan plantering rensades jord från rötterna. Detta gjordes mekaniskt för hand och med kranvatten. Som odlingskärl användes 1-L plastkrukor med en toppdiameter på 125 mm. Krukorna fylldes med 1,4 kg sandig jord, i vilken en planta per kruka planterades. Aska applicerades därefter i det 5 mm översta lagret av jord, som sedan täcktes med 3 mm finsand. Askappliceringen motsvarande mängden 0, 0,5, 1, 3 och 5 tonTS/ha. Aska applicerades på samma sätt för tall och gran.

Plantorna odlades i växthus (19°C) med stödbelysning 16 h/dygn. Odlingen genomfördes i december 2021. Plantorna vattnades utan genomrinning 2 dagar i veckan med destillerat vatten, dvs. fältkapaciteten bibehölls och inget överskottsvatten rann ut. Försöket gjordes i 4 upprepningar i randomiserad blockdesign. Varje aska hade 4 egna replikat av kontrollplantor.

2.5 SKÖRD

Försöksodlingen avslutades efter 28 dagar. Hela plantan delades upp i rötter, stam och barr. Stammen delades i sin tur upp i bark och ved. En 20 mm bit från 50-70 mm upp på stammen kapades särskilt för analys av olika kiselfraktioner i barken.

Samtliga delar vägdes för friskvikt (FW) och för torrsvikt (DW) efter torkning 24 h i 105°C.

2.6 ANALYS AV KISEL

Rot, bark, ved och barr analyserades på total kiselhalt. Barken analyserades dessutom på löst kisel, kisel i SiO₂-nanopartiklar samt hårt bundet kisel. Askan och jorden analyserades på löst kisel, kisel i SiO₂-nanopartiklar, hårt bundet kisel, total kiselhalt samt växttillgängligt kisel.

TABELL 1. ANLÄGGNINGAR FRÅN VILKA DE OLIKA FLYGASKORNA KOMMER SAMT KEMISK ANALYS AV BIOASKOR SOM ANVÄNTS I FÖRSÖKET. LOI = OFÖRBRÄNNT

TABLE 1. PLANTS FROM WHICH THE DIFFERENT FLY ASH ORIGINATES AND CHEMICAL ANALYSIS OF BIO ASHES USED IN THE EXPERIMENT. LOI = LOSS OF IGNITION

| Anläggning | ENA EnergiAB, Enköping | Björksätra Kraftvärmeverk, Sandviken | Sandviksverken, Kraftvärmeverk, Växjö | Eskilstuna kraftvärmeverk, Eskilstuna | Heden kraftvärmeverk (Etapp 3 anl.), Karlstad | Stora Enso pappersmassa, Nymölla | Södra Cell Mönsterås, Pappersmassa Fjärrvärme, Mönsterås |
|--------------------------------------|-----------------------------|---|---|---|--|--|---|
| Beteckning | ENA | BS | SV | EE | HK | SEN | SCMS |
| Bränsle | Biobränsle (Salix, GROT) | Skogsavfall 90%, Torv 10% | Biobränsle, (Grenar, flis) | Skogsavfall 100% (Flis, grenar, trädtoppar) | Skogsavfall 80% GROT 20% | Skogsavfallsrester | Skogsavfallsrester |
| Typ av panna | FB/CFB | Roaster | CFB | CFB | CFB | Roaster | FB |
| pH | 11,2 | 10,5 | 10,6 | 10,7 | 10,3 | 11,0 | 10,5 |
| Konduktivitet (mS cm ⁻¹) | 9,4 | 21,5 | 11,4 | 11,7 | 15,3 | 10,8 | 9,7 |
| LOI (%) | 6,1 | 11,4 | 7,5 | 6,3 | 7,8 | 18,2 | 30,5 |
| Torrsubstans (TS 105°C, %) | 99,6 | 99,9 | 96,6 | 98,3 | 97,7 | 55,5 | 64,4 |
| <i>% av TS</i> | | | | | | | |
| SiO ₂ | 38,7 | 35,6 | 39,3 | 36,2 | 35,5 | 33,4 | 20,4 |
| Al ₂ O ₃ | 9,5 | 10,8 | 12,7 | 9,1 | 12,7 | 5,1 | 4,2 |
| CaO | 24,4 | 20,7 | 25,7 | 22,2 | 24,1 | 14,3 | 33,1 |
| Fe ₂ O ₃ | 3,8 | 3,9 | 4,3 | 1,7 | 2,8 | 9,6 | 1,5 |
| K ₂ O | 4,4 | 4,5 | 4,4 | 4,2 | 3,8 | 0,7 | 2,1 |
| MgO | 3,6 | 1,9 | 3,7 | 2,4 | 1,9 | 12,8 | 5,3 |
| Na ₂ O | 1,2 | 1,0 | 1,7 | 0,9 | 0,9 | 4,3 | 1,5 |
| P ₂ O ₅ | 1,4 | 1,1 | 2,5 | 1,7 | 2,7 | 4,4 | 2,1 |
| TiO ₂ | 1,7 | 2,2 | 2,2 | 2,3 | 1,9 | 0,03 | 0,06 |
| MnO ₂ | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,2 |
| S:a oxider | 90,6 | 83,6 | 98,5 | 82,5 | 88,1 | 82,5 | 68,5 |
| Si | 18,0 | 16,6 | 18,3 | 16,9 | 16,4 | 15,6 | 9,5 |
| <i>mg kgTS⁻¹</i> | | | | | | | |
| As | 448 | 30,1 | 12,1 | 10 | 12,3 | 10,6 | 10,5 |
| Ba | 242 | 205 | 400 | 238 | 345 | 1470 | 1550 |
| Cd | 79,8 | 11,7 | 3,2 | 10 | 3,6 | 2,1 | 4,6 |
| Co | 7,5 | 2,9 | 6,5 | 8,1 | 7,6 | 12,6 | 9,2 |
| Cr | 140 | 120 | 90,7 | 60 | 102 | 80,2 | 81,5 |
| Cu | 405 | 200 | 244 | 108 | 211 | 109 | 166 |
| Hg | 2,2 | 0,2 | 0,2 | 1,82 | 0,2 | 0,1 | 0,1 |

| Anläggning | ENA EnergiAB, Enköping | Björksätra Kraftvärmeverk, Sandviken | Sandviksverken, Kraftvärmeverk, Växjö | Eskilstuna kraftvärmeverk, Eskilstuna | Heden kraftvärmeverk (Etapp 3 anl.), Karlstad | Stora Enso pappersmassa, Nymölla | Södra Cell Mönsterås, Pappersmassa Fjärrvärme, Mönsterås |
|------------|---------------------------|---|---|---|--|--|---|
| Ni | 69,8 | 12,3 | 70,3 | 82 | 71 | 36,2 | 48,6 |
| Pb | 1150 | 156 | 109 | 109 | 529 | 126 | 255 |
| V | 10,6 | 9,7 | 10,5 | 61 | 12 | 15 | 8,6 |
| Zn | 2820 | 1110 | 1030 | 3360 | 914 | 1766 | 1894 |

Kiselfraktionerna analyserades med sekventiell extraktion enligt följande:

1. *Löst kisel*: Materialet våtförbrändes i 200°C (i slutna kärl med mikrovågsteknik Speedwave, Berghof, Tyskland) i en lösning med 30% H₂O₂/12 M HNO₃ (v:v, 2:5). Provet förbrändes i 15 min varvid provmaterialet blev helt upplöst och späddes sedan till 10 mL med H₂O. Därefter filtrerades proverna innan Si analyserades i dem med AAS (se nedan).
2. *Kisel i SiO₂-nanopartikel fraktion*: Det våtförbrända materialet i steg 1 (innan filtrering) behandlades med 1M BH₄ 4 h i 60°C, enligt Zhang et al. (2008) varvid Si-nanopartiklar specifikt upplöstes. Lösningen filtreras och centrifugering (1700 x g, 10 min) och Si analyserades sedan med AAS (se nedan). Halten Si i nanopartikel fraktionen beräknades genom att subtrahera fraktion 1 från fraktion 2.
3. *Total Si-fraktion*: Materialet från steg 2 löstes upp i NaHCO₃ och värmdes 60 min i 95°C (Snyder 2001). Efter att de svalnat filtrerades proverna och Si analyserades sedan med AAS (se nedan).
4. *Den hårt bundna kiselfractionen* erhöles genom att subtrahera Si-halten i fraktion 1 + 2 från Si-halten i den totala Si-fraktionen 3.
5. *Den växttillgängliga kiselfractionen* analyserades enligt Berthelsen et al. (2001). Luft-torkad aska eller jord (2g) mixades med 20 mL 0,01 M CaCl₂ och skakades 16 h i rumstemperatur. Efter filtrering och centrifugering (1700 x g, 10 min) analyserades proverna på Si med AAS (se nedan).

Kisel analyserades i samtliga fraktioner med AAS (atomabsorptionsspektrofotometri, med grafitugn; AAS-modell Agilent 240 Series AA (Agilent, USA)). Standardadditionsteknik användes för att eliminera matriseffekter.

2.7 BERÄKNINGAR OCH STATISTIK

Kiselkoncentrationen i varje plantdel analyserades som mg/kg torrsvikt. För att beräkna Si koncentrationen i hela plantan gjordes följande beräkning;

$$\text{Mängd Si per planta (mg)} = ([\text{Si}]_{\text{rot}} \times M_{\text{rot}}) + ([\text{Si}]_{\text{ved}} \times M_{\text{ved}}) + ([\text{Si}]_{\text{bark}} \times M_{\text{bark}}) + ([\text{Si}]_{\text{barr}} \times M_{\text{barr}}) \quad (1)$$

$$\text{Si-koncentration i hel planta (mg/kg)} = \frac{\text{Mängd Si per planta}}{M_{\text{rot}} + \text{ved} + \text{bark} + \text{barr}} \quad (2)$$

där M är gram torrsvikt och [Si] är kiselkoncentrationen.

Nettoackumulering, som är ett mått på hur mycket kisel som har tagits upp genom roten och ackumulerats i växten under testperioden beräknades enligt följande;

$$\text{Nettoackumulering (mg/gTS}_{\text{root}}) = \frac{\text{Mängd Si per försöksplanta} - \text{Mängd Si per kontrollplanta}}{M_{\text{rot}} \text{ i försöksplantan}} \quad (3)$$

De 7 askprover som sändes till ALS Scandinavia AB för analys sändes som ett replikat. Vardera replikat bestod i sin tur av ett generalprov som baserades på sex separata prover. I övriga analyser användes fyra replikat.

När effekten av de sju askorna var mycket lika lades resultat från de 7 olika askorna samman till ett medelvärde och behandlades därmed som en aska.

Signifikanta skillnader vid $p \leq 0,05$ analyserades med Tukey's honest significant difference (HSD) test m.h.a. JMP 16.0 (SAS Institute, Cary, NC, USA) och korrelationsanalyser mha Microsoft Excel.

3 Resultat

3.1 KISEL I ASKOR OCH JORD

Askorna innehöll ungefär 10-20% kisel (Tabell 1, 2). Askorna som användes skiljde sig inte mycket åt i kiselhalt, enbart en av askorna från pappersmassaindustrierna hade nästan hälften så hög total koncentration kisel (Si) som övriga askor, 86 mot 139-158 g kgTS⁻¹ (Tabell 2). Eftersom samma gällde den växttillgängliga koncentrationen i askan var den procentuella andelen växttillgänglig kisel av askans totala kisel samma i alla askor, 0,029%. Detta kan jämföras med jordens totala kiselhalt på 77,65 ± 5,38 (SE) g/kg och växttillgängliga kiselhalt på 0,0131 ± 0,0020 (SE) g/kg, dvs. andelen växttillgängligt kisel i jorden var 0,017 % (ej visat).

TABELL 2. TOTAL KISELHALT OCH VÄXTTILLGÄNGLIG KISELHALT I ASKORNA SOM ANVÄNTS I DETTA ARBETE. N=3, ±SE≤5%

TABLE 2. TOTAL SILICON AND PLANT AVAILABLE SILICON CONCENTRATIONS IN THE ASHES USED IN THIS WORK. N=3, ±SE≤5%

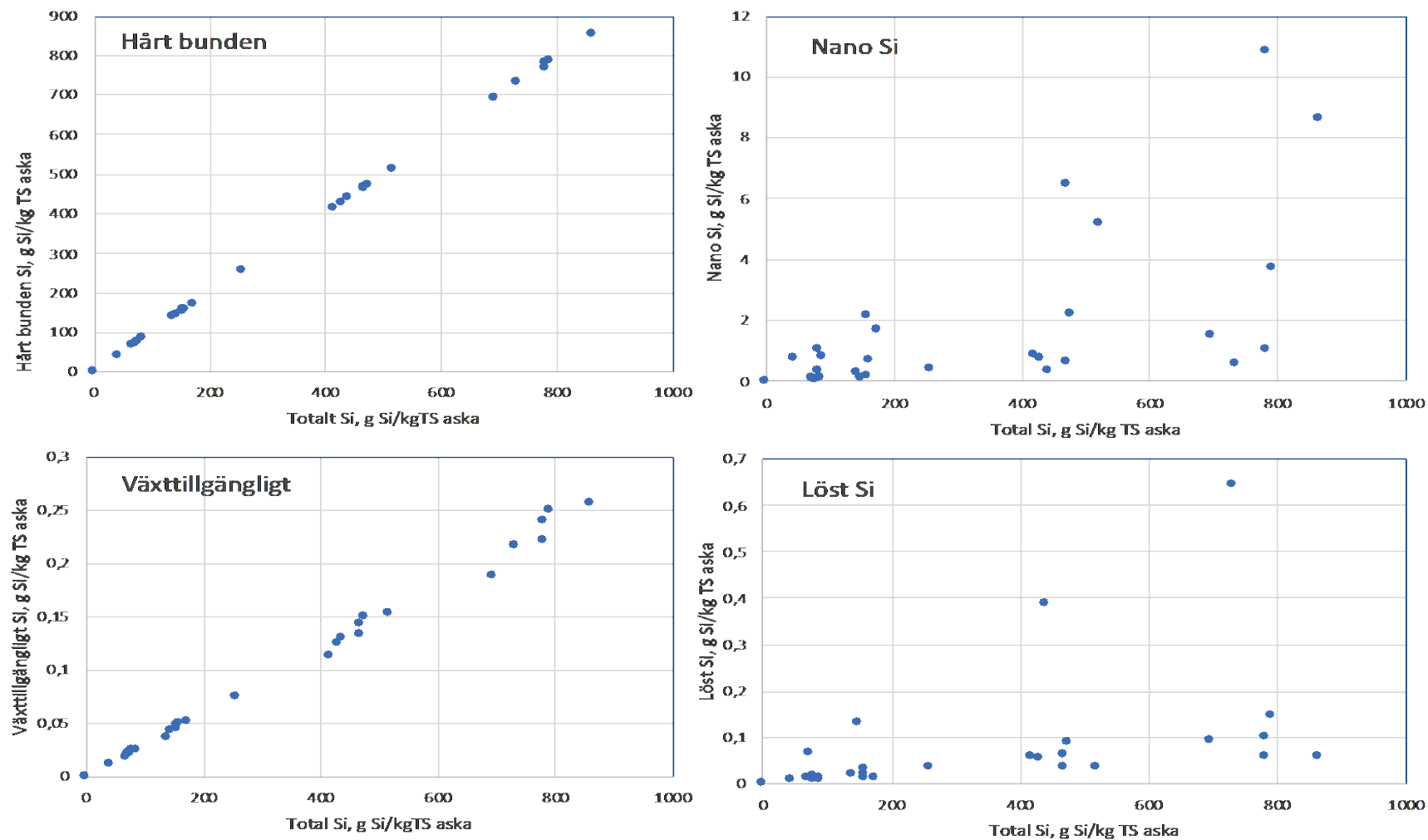
| Anläggning | ENA | BS | SV | EE | HK | SEN | SCMS | Alla askor |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|
| <i>g kgTS⁻¹</i> | | | | | | | | |
| Total | 158 | 146 | 173 | 156 | 156 | 139 | 86 | 145±14 |
| Växttillgänglig | 0,050 | 0,043 | 0,051 | 0,048 | 0,044 | 0,038 | 0,025 | 0,043±0,005 |
| <i>%av total Si</i> | | | | | | | | |
| Växttillgänglig | 0,0316 | 0,0296 | 0,0296 | 0,0306 | 0,0285 | 0,0270 | 0,0292 | 0,029±0,001 |
| <i>% av askan</i> | | | | | | | | |
| Total | 15,8 | 14,6 | 17,2 | 15,6 | 15,6 | 13,9 | 8,6 | 14,5±1,4 |
| Växttillgänglig | 0,005 | 0,004 | 0,005 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,003 | 0,004±0,0005 |

Kisel kan förekomma i olika former och i askan var den allra största delen hårt bunden, runt 98,6-99,9% av total kisel (Tabell 3). Mellan 0,09 och 1,4 % av den totala kiselhalten i askan var nanopartikulärt kisel, vilket betyder upp till 18 ggr skillnad mellan askorna. Den lösta fraktionen kisel stod för 0,0006-0,088%, och denna fraktion skiljde sig med 150 ggr mellan högsta och lägsta värde och varierade därför stort mellan askorna. Detta kan jämföras med jorden där nästan allt var hårt bundet, 77,61 ± 5,38 (SE) g/kg (ej visat). I jorden var den lösta kisel fraktionen mycket låg, 0,031 ± 0,002 (SE) g/kg, och halten av nanopartikulärt Si låg under detektionsgränsen (ej visat).

TABELL 3. KISELFORMER ANALYSERADE I ASKORNA SOM ANVÄNTS I DETTA ARBETE. N=3, $\pm SE \leq 5\%$ TABLE 3. SILICON FORMS ANALYZED IN THE ASHES USED IN THIS WORK. N=3, $\pm SE \leq 5\%$

| Anläggning | ENA | BS | SV | EE | HK | SEN | SCM | Alla askor |
|----------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|-------------------|
| <i>g kgTS⁻¹</i> | | | | | | | | |
| Löst Si | 0,029 | 0,129 | 0,011 | 0,020 | 0,011 | 0,018 | 0,011 | 0,033 \pm 0,021 |
| Nanopartikelform | 0,752 | 0,123 | 1,731 | 0,213 | 2,168 | 0,308 | 0,151 | 0,778 \pm 0,418 |
| Hårt bundet | 157,3 | 146,1 | 170,7 | 155,9 | 153,8 | 138,4 | 85,8 | 144 \pm 13,7 |
| <i>%av total Si</i> | | | | | | | | |
| Löst Si | 0,018 | 0,088 | 0,0006 | 0,0128 | 0,0071 | 0,0131 | 0,01268 | 0,022 \pm 0,015 |
| Nanopartikelform | 0,476 | 0,0841 | 1,004 | 0,1365 | 1,3894 | 0,222 | 0,1757 | 0,498 \pm 0,253 |
| Hårt bundet | 99,5 | 99,8 | 99,1 | 99,9 | 98,6 | 99,8 | 99,8 | 99,5 \pm 0,24 |

Den hårt bundna fraktionen av kisel visade ett linjärt samband med den totala kiselhalten i askan (Fig. 1). Så var även fallet med den växttillgängliga fraktionen av kisel i askan. Däremot varierade den lösta och den nanopartikulära fraktionen i olika askor och gav inget linjärt samband med den totala kiselhalten i askan.



FIGUR 1. OLIKA KISELFORMER, HÅRT BUNDEN KISEL, LÖST KISEL, NANOPARTIKULÄRT KISEL OCH VÄXTTILLGÄNGLIGT KISEL, RELATERADE TILL DEN TOTALA KISELHALTEN I ASKA. N= 5.

FIGURE 1. DIFFERENT SILICA FORMS, HARD-BOUND SILICA, SOLUBLE SILICA, NANOPARTICULATE SILICA AND PLANT-AVAILABLE SILICON, RELATED TO THE TOTAL SILICON CONCENTRATION IN ASHES. N = 5.

3.2 ASKORNAS INVERKAN PÅ VÄXTENS TORRVIKT/FÄRSKVIKTS-FÖRHÅLLANDE

Askornas inverkan på biomassan har inte uppmätts och tiden för försöket var för kort för att se några skillnader i biomassatillväxt. Däremot har TS:FV kvoten beräknats, dvs andelen torrmasa av total färskvikt (Tabell 4). Andelen torrmasa var störst i veden. Dock hade mängden tillförd aska inte någon inverkan på denna kvot under försökstiden. Samma resultat ses för både tall och gran.

TABELL 4. OLIKA GIVOR AV MEDELASKANS INVERKAN PÅ TORRVIKTS/FRISKVIKTS KVOTEN (TS/FV) HOS ROT, VED, BARK, BARR AV TALL OCH GRAN. RESULTAT FRÅN 7 OLIKA ASKOR HAR HÄR SLAGITS IHOP OCH MEDELVÄRDET ANGES, EFTERSOM DE OLIKA ASKORNAS VÄRDEN INTE SKILJER SIG SIGNIFIKANT FRÅN VARANDRA. N=7, ±SE.

TABLE 4. THE EFFECT OF VARIOUS SUPPLEMENTATION OF ASH ON THE DRY WEIGHT / FRESH WEIGHT RATIO (TS / FV) OF ROOT, WOOD, BARK AND NEEDLES IN PINE AND SPRUCE. RESULTS FROM 7 DIFFERENT ASHES HAVE BEEN MERGED AND THE MEAN VALUE IS GIVEN, SINCE THE VALUES OF THE DIFFERENT ASHES DO NOT DIFFER SIGNIFICANTLY FROM EACH OTHER.

| Asktillförsel, ton TS/ha | Gran, TS/FV | | | | Tall, TS/FV | | | |
|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | Barr | Bark | Ved | Rot | Barr | Bark | Ved | Rot |
| 0 | 0,221±0,002 | 0,359±0,002 | 0,515±0,003 | 0,228±0,004 | 0,223±0,004 | 0,371±0,002 | 0,517±0,002 | 0,225±0,002 |
| 0,5 | 0,226±0,002 | 0,365±0,002 | 0,517±0,004 | 0,227±0,003 | 0,222±0,002 | 0,358±0,002 | 0,514±0,001 | 0,222±0,002 |
| 1 | 0,213±0,006 | 0,351±0,013 | 0,502±0,020 | 0,218±0,008 | 0,226±0,002 | 0,362±0,004 | 0,510±0,001 | 0,224±0,004 |
| 3 | 0,219±0,002 | 0,368±0,003 | 0,516±0,003 | 0,227±0,004 | 0,223±0,002 | 0,360±0,002 | 0,515±0,002 | 0,223±0,002 |
| 5 | 0,224±0,002 | 0,366±0,003 | 0,516±0,003 | 0,228±0,002 | 0,220±0,002 | 0,365±0,002 | 0,516±0,002 | 0,225±0,003 |

Torrmassan i ved och bark jämfördes. Bark:ved förhållandet var lika mellan behandlingarna och inga förändringar erhöles under denna korta behandlingsperiod (Tabell 5). Något högre värden erhöles för gran jämfört med tall.

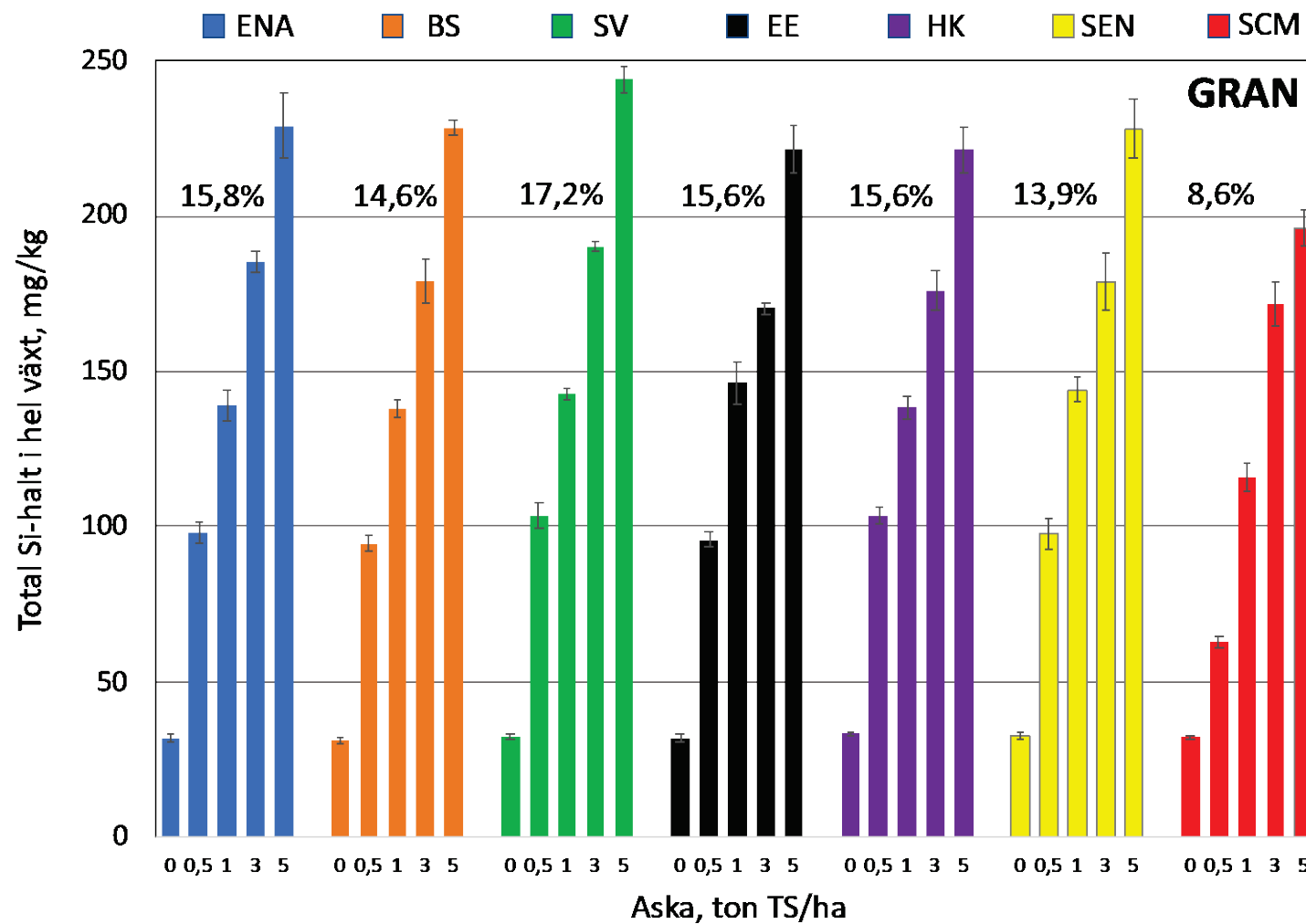
TABELL 5. OLIKA GIVOR AV MEDELASKANS INVERKAN PÅ TORRVIKTSFÖRHÅLLET MELLAN BARK OCH VED HOS TALL OCH GRAN. RESULTAT FRÅN 7 OLIKA ASKOR HAR HÄR SLAGITS IHOP OCH MEDELVÄRDET ANGES, EFTERSOM DE OLIKA ASKORNAS VÄRDEN INTE SKILJER SIG SIGNIFIKANT FRÅN VARANDRA. OLIKA BOKSTÄVER INDIKERAR SIGNIFIKANTA SKILLNADER MELLAN VÄRDEN I DE BÅDA KOLUMNERNA. N=7, ±SE.

TABLE 5. THE EFFECT OF VARIOUS SUPPLEMENTATION OF ASH ON THE DRY WEIGHT RATIO BETWEEN BARK AND WOOD. RESULTS FROM 7 DIFFERENT ASHES HAVE BEEN MERGED AND THE MEAN VALUE IS GIVEN, SINCE THE VALUES OF THE DIFFERENT ASHES DO NOT DIFFER SIGNIFICANTLY FROM EACH OTHER.

| Asktillförsel, Ton TS/ha | Gran | Tall |
|-----------------------------|---------------|---------------|
| | Bark/ved | Bark/ved |
| 0 | 0,490±0,0007a | 0,464±0,0010b |
| 0,5 | 0,486±0,0008a | 0,467±0,0010b |
| 1 | 0,487±0,0009a | 0,465±0,0011b |
| 3 | 0,489±0,0008a | 0,466±0,0012b |
| 5 | 0,486±0,0016a | 0,465±0,0008b |

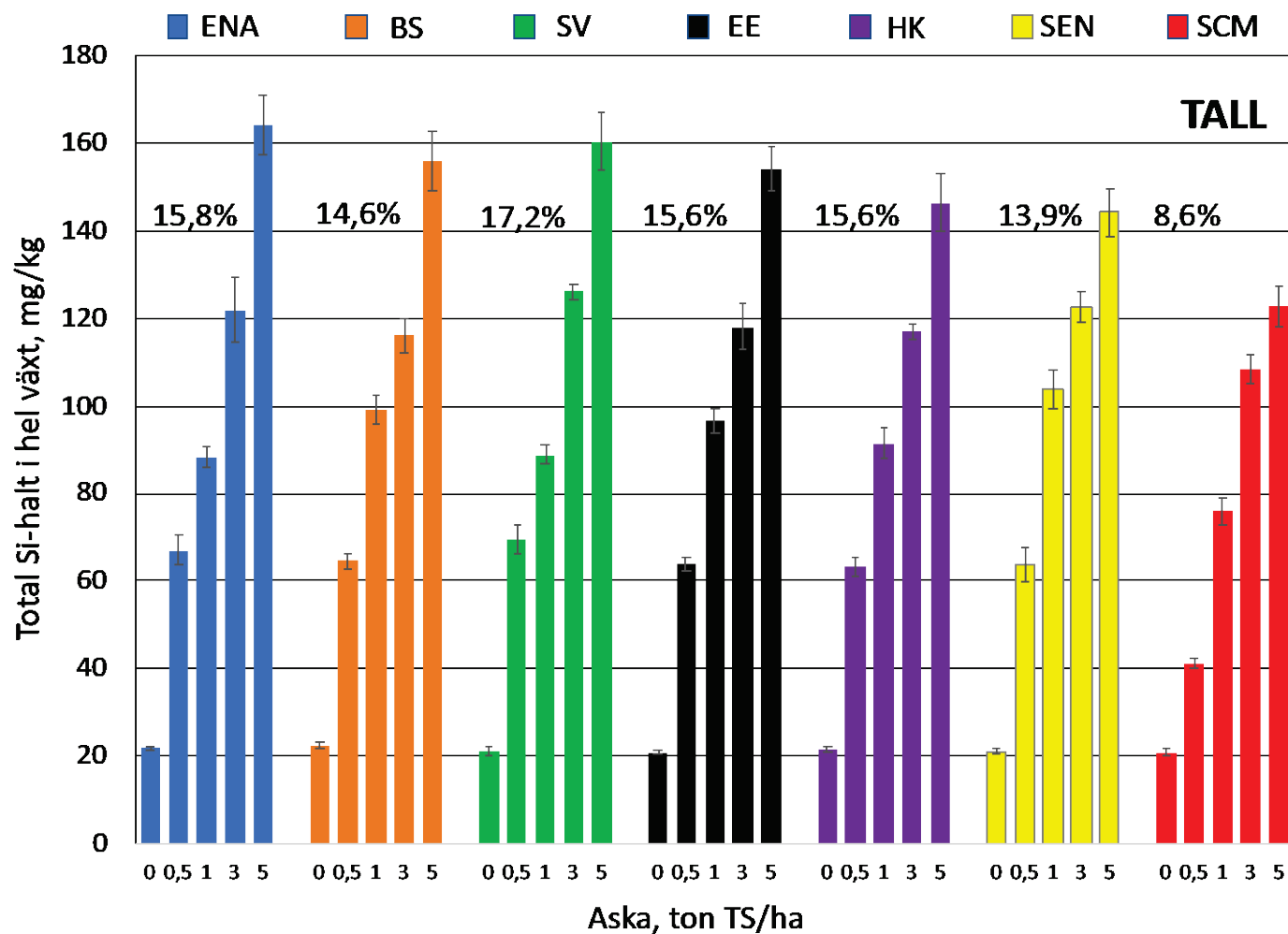
3.3 KISELUPPTAGET

Kiselhalten i växterna ökade med ökad askgiva (Figur 2 och 3). Kiselhalten i plantorna som fått askan med låg kiselhalt (SCM) var lägre än för övriga plantor, dock inte i proportion med den ca 50% lägre halten av kisel i askan. Samma effekt ses i både gran och tall. Gran ackumulerade mer kisel från askorna än tall, oavsett aska.



FIGUR 2. KISELKONCENTRATION I HELA PLANTOR AV GRAN EFTER 28 DAGARS ODLING I NÄRVARO AV 7 OLIKA ASKOR. INLAGDA VÄRDEN ÄR ASKORNAS SI INNEHÅLL I %. N=4, ± SE.

FIGURE 2. SILICON CONCENTRATION IN WHOLE SPRUCE SEEDLINGS AFTER 28 DAYS OF CULTIVATION IN THE PRESENCE OF 7 DIFFERENT ASHES. INSERT ARE THE ASH SI CONTENTS IN %. N=4, ± SE



FIGUR 3. KISELKONCENTRATION I HELA PLANTOR AV TALL EFTER 28 DAGARS ODLING I NÄRVARO AV 7 OLIKA ASKOR. . INLAGDA VÄRDEN ÄR ASKORNAS SI INNEHÅLL I %. N=4, ±SE.

FIGURE 3. SILICON CONCENTRATION IN WHOLE PINE SEEDLINGS AFTER 28 DAYS OF CULTIVATION IN THE PRESENCE OF 7 DIFFERENT ASHES. INSERT ARE THE ASH SI CONTENTS IN%. N=4, ±SE.

Kiselhalten i växternas olika delar ökade med ökad askgiva (Tabell 6). Samma effekt kan ses hos både tall och gran. Kiselkoncentrationerna var lägre i alla delar hos tall jämfört med gran, störst skillnad ses i ved med ca dubbelt så hög Si-koncentration i ved hos gran jämfört med tall. Av alla växtens delar som analyserades på Si-koncentration var den högst i barken, både hos gran och tall. Halten i barken var 62 till 436 mg Si/kg hos gran och 53 till 358 mg Si/kg hos tall när dessa odlades i 0 till 5 ton TS aska/ha.

TABELL 6. TOTAL KONCENTRATIONEN AV KISEL I RÖTTER, VED, BARK OCH BARR I GRAN- OCH TALLPLANTOR. RESULTAT FRÅN 7 OLIKA ASKOR HAR HÄR SLAGITS IHOP OCH MEDELVÄRDET ANGES, EFTERSOM DE OLIKA ASKORNAS VÄRDEN INTE SKILJER SIG SIGNIFIKANT FRÅN VARANDRA. OLIKA BOKSTÄVER INOM VARJE KOLUMN INDIKERAR SIGNIFIKANT SKILLNAD. N=7, ±SE

TABLE 6. TOTAL CONCENTRATION OF SILICON IN ROOTS, WOOD, BARK AND NEEDLES IN SPRUCE AND PINE PLANTS. RESULTS FROM 7 DIFFERENT ASHES HAVE BEEN MERGED AND THE MEAN VALUE IS GIVEN, SINCE THE VALUES OF THE DIFFERENT ASHES DO NOT DIFFER SIGNIFICANTLY FROM EACH OTHER. DIFFERENT LETTERS WITHIN EACH COLUMN INDICATE A SIGNIFICANT DIFFERENCE. N=7, ±SE

| Asktillförsel Ton TS/ha | Rot | Ved | Bark | Barr |
|----------------------------|-------------|------------|------------|-----------|
| | Si, mg/kgTS | | | |
| Gran | | | | |
| 0 | 12 ± 0,3a | 21 ± 0,3ab | 62 ± 0,4a | 13 ± 0,2a |
| 0,5 | 36 ± 1,7c | 63 ± 3,7d | 180 ± 11b | 36 ± 1,7c |
| 1 | 54 ± 2,0de | 92 ± 3,3e | 265 ± 8,0d | 55 ± 2,0d |
| 3 | 70 ± 1,9f | 120 ± 3,3f | 341 ± 6,1e | 71 ± 1,8e |
| 5 | 88 ± 3,4g | 148 ± 4,7g | 436 ± 12f | 88 ± 2,2f |
| Tall | | | | |
| 0 | 9 ± 0,2a | 11 ± 0,2a | 53 ± 0,6a | 10 ± 0,2a |
| 0,5 | 25 ± 1,4b | 33 ± 1,8b | 149 ± 9,0b | 27 ± 1,6b |
| 1 | 37 ± 1,3c | 48 ± 2,2c | 222 ± 6,8c | 40 ± 1,7c |
| 3 | 48 ± 1,4d | 60 ± 2,1cd | 291 ± 4,8d | 51 ± 1,4d |
| 5 | 60 ± 2,3e | 80 ± 3,5e | 358 ± 13e | 66 ± 2,9e |

Den större andelen av kisel i växten fanns i barken där ungefär 60% ackumuleras, något högre andel ackumulerades i tallbark än i granbark (Tabell 7). Fördelningen är oberoende av mängd aska som tillförts. I veden ackumuleras ungefär hälften av det som ackumuleras i barken. Gran ackumulerade mer i veden och mindre i barr än i tall, medan ackumuleringen av kisel i rötterna var ungefär lika hos tall och gran.

TABELL 7. OLIKA GIVOR AV MEDELASKANS INVERKAN PÅ FÖRDELNINGEN AV TOTAL KISELMÄNGD MELLAN ROT, VED, BARK, BARR HOS HEL PLANTA AV TALL OCH GRAN. TOTAL HALT KISEL I HEL PLANTA ÄR 100%. RESULTAT FRÅN 7 OLIKA ASKOR HAR HÄR SLAGITS IHOP OCH MEDELVÄRDET ANGES, EFTERSOM DE OLIKA ASKORNAS VÄRDEN INTE SKILJER SIG SIGNIFIKANT FRÅN VARANDRA. OLIKA BOKSTÄVER INDIKERAR SIGNIFIKANT SKILLNAD. N=7, ±SE.

TABLE 7. EFFECTS OF VARIOUS ASH SUPPLEMENTATIONS OF THE AVERAGE ASH ON THE DISTRIBUTION OF THE TOTAL AMOUNT OF SILICON BETWEEN ROOT, WOOD, BARK AND NEEDLES IN WHOLE PLANT OF PINE AND SPRUCE. TOTAL SILICON CONTENT IN WHOLE PLANT IS 100%. RESULTS FROM 7 DIFFERENT ASHES HAVE BEEN MERGED HERE AND THE MEAN VALUE IS GIVEN, SINCE THE VALUES OF THE DIFFERENT ASHES DO NOT DIFFER SIGNIFICANTLY FROM EACH OTHER. DIFFERENT LETTERS INDICATE A SIGNIFICANT DIFFERENCE. N=7, ±SE

| Asktillförsel, Ton TS/ha | Gran, % | | | | Tall, % | | | |
|-----------------------------|-----------|------------|------------|--------------|-----------|--------------|------------|---------------|
| | Bark | Ved | Barr | Rot | Bark | Ved | Barr | Rot |
| 0 | 58,9±0,6a | 30,1±0,5c | 4,84±0,9e | 4,25±0,2uvx | 64,4±0,6b | 22,90±0,5d | 7,23±0,2f | 4,93±0,19stu |
| 0,5 | 58,5±0,6a | 30,9±0,46c | 4,93±0,15e | 4,16±0,2vx | 63,2±0,8b | 22,46±0,064d | 7,08±0,2f | 4,88±0,14stuv |
| 1 | 58,7±0,7a | 30,6±0,7c | 5,29±0,2e | 4,12±0,1vx | 64,4±1,0b | 23,31±0,70d | 7,00±0,39f | 5,14±0,2s |
| 3 | 58,5±0,6a | 30,7±0,53c | 5,03±0,2e | 4,30±0,2tuvx | 64,9±0,8b | 23,24±0,57d | 7,09±0,24f | 4,80±0,1stuvx |
| 5 | 59,7±0,7a | 29,8±0,7c | 5,39±0,2e | 4,09±0,2x | 63,2±0,7b | 24,47±0,53d | 6,82±0,18f | 5,03±0,2st |

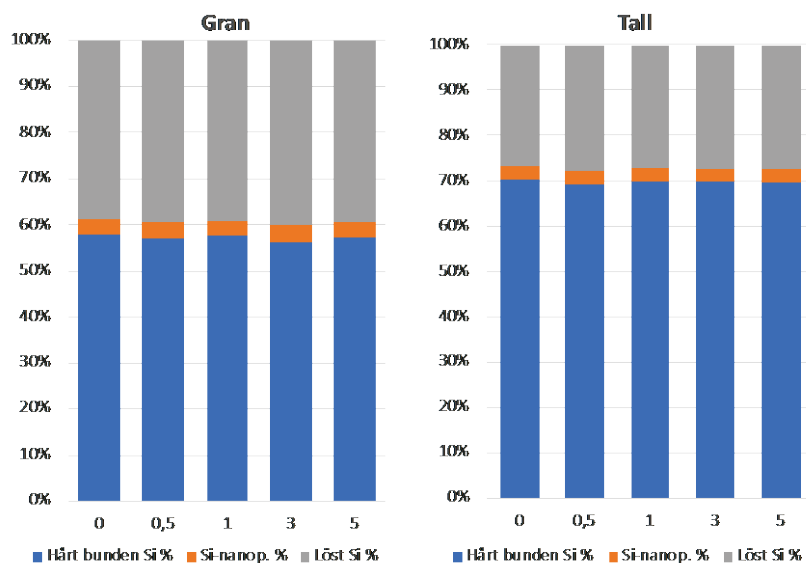
Kiselfraktionerna i barken analyserades. Den hårt bundna kiselfractionen var störst medan den nanopartikulära fraktionen var lägst (Tabell 8). Det var inga skillnader mellan tall och gran i halterna av dessa två fraktioner. Däremot skiljde sig den lösta fraktionen åt i halt mellan tall och gran; den var nästan dubbelt så stor hos gran som hos tall

TABELL 8. KONCENTRATIONEN AV OLIKA KISELFRAKTIONER I BARK HOS GRAN OCH TALL. RESULTAT FRÅN 7 OLIKA ASKOR HAR HÄR SLAGITS IHOP OCH MEDELVÄRDET ANGES, EFTERSOM DE OLIKA ASKORNAS VÄRDEN INTE SKILJER SIG SIGNIFIKANT FRÅN VARANDRA. OLIKA BOKSTÄVER INDIKERAR SIGNIFIKANT SKILLNAD INOM RESPEKTIVE KOLUMN. N=7, ±SE

TABLE 8. THE CONCENTRATION OF DIFFERENT SILICON FRACTIONS IN THE BARK OF SPRUCE AND PINE. RESULTS FROM 7 DIFFERENT ASHES HAVE BEEN MERGED HERE AND THE MEAN VALUE IS GIVEN, SINCE THE VALUES OF THE DIFFERENT ASHES DO NOT DIFFER SIGNIFICANTLY FROM EACH OTHER. DIFFERENT LETTERS INDICATE A SIGNIFICANT DIFFERENCE WITHIN EACH COLUMN. N=7, ±SE

| Asktillförsel Ton TS/ha | Hårt bunden | Nanopartikulärt | Löst |
|----------------------------|-------------|-----------------|------------|
| | | | |
| Gran | | | |
| 0 | 36 ± 0,6a | 2 ± 0,1m | 24 ± 0,4t |
| 0,5 | 103 ± 6,9b | 6 ± 0,3no | 71 ± 4,3vw |
| 1 | 151 ± 4,9c | 8 ± 0,5r | 106 ± 4,2x |
| 3 | 195 ± 3,4d | 11 ± 0,4s | 134 ± 4,1y |
| 5 | 249 ± 9,2e | 14 ± 0,4k | 173 ± 3,9z |
| Tall | | | |
| 0 | 37 ± 0,6a | 1 ± 0,0m | 14 ± 0,2t |
| 0,5 | 103 ± 6,6b | 5 ± 0,3n | 41 ± 2,7u |
| 1 | 155 ± 5,0c | 6 ± 0,3op | 61 ± 2,2v |
| 3 | 203 ± 7,0d | 8 ± 0,3pr | 80 ± 2,3w |
| 5 | 252 ± 9,4e | 11 ± 0,6s | 96 ± 3,5x |

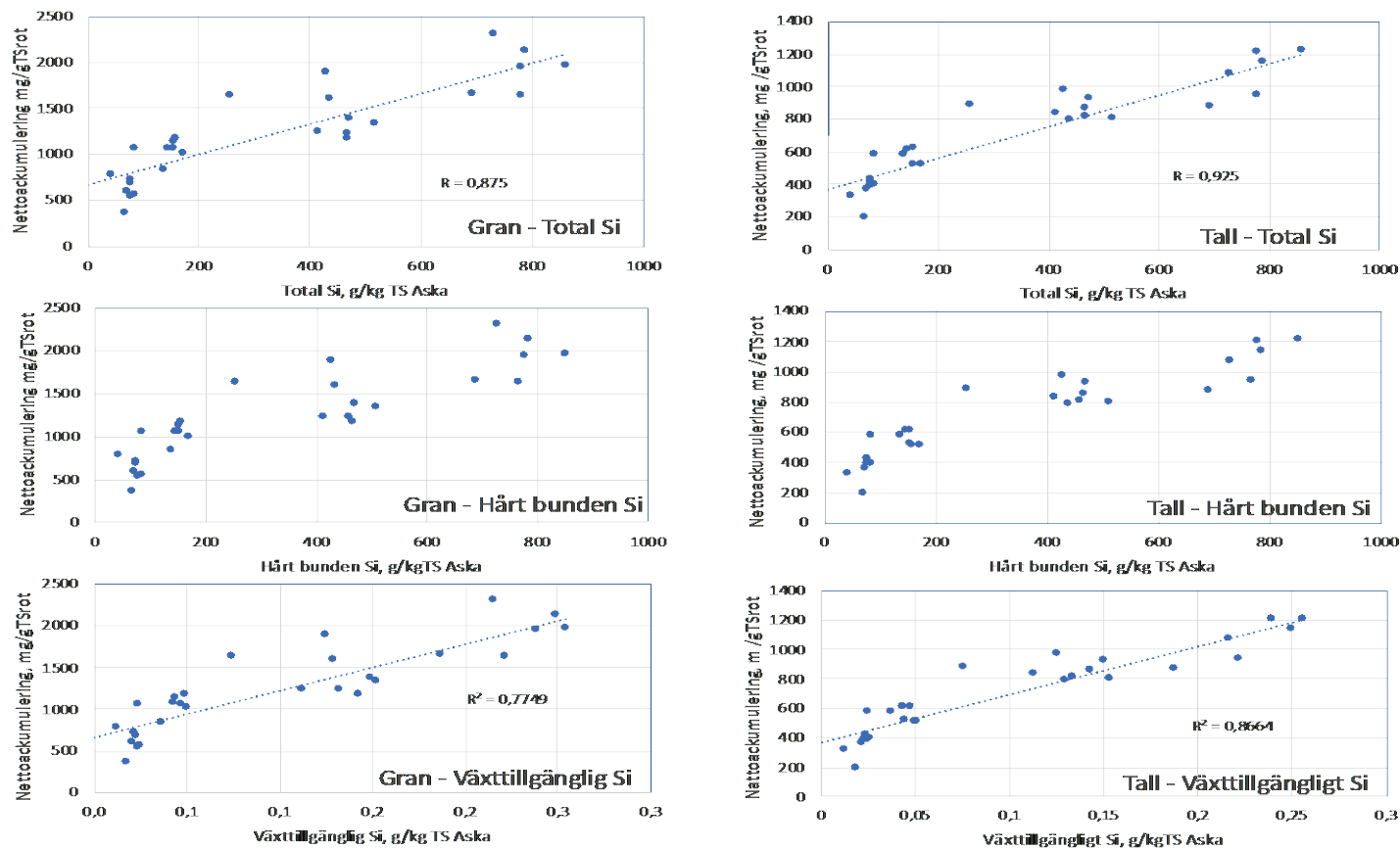
Kiselformernas fördelning i barken ses i figur 4. Andelen kisel i form av nanopartiklar var mycket liten jämfört med den lösta och den hårt bundna fraktionen. Den hårt bundna fraktionen var störst och låg på 60-70% och den lösta fraktionen mellan 30-40%. Den hårt bundna fraktionen var större och den bundna fraktionen mindre hos tall än hos gran.



FIGUR 4. FÖRDELNING (%) AV OLIKA FRAKTIONER AV KISEL I BARK HOS TALL OCH GRAN. RESULTAT FRÅN 7 OLIKA ASKOR HAR HÄR SLAGITS IHOP OCH MEDELVÄRDET ANGES, EFTERSOM DE OLIKA ASKORNAS VÄRDEN INTE SKILJER SIG SIGNIFIKANT FRÅN VARANDRA. N=7.

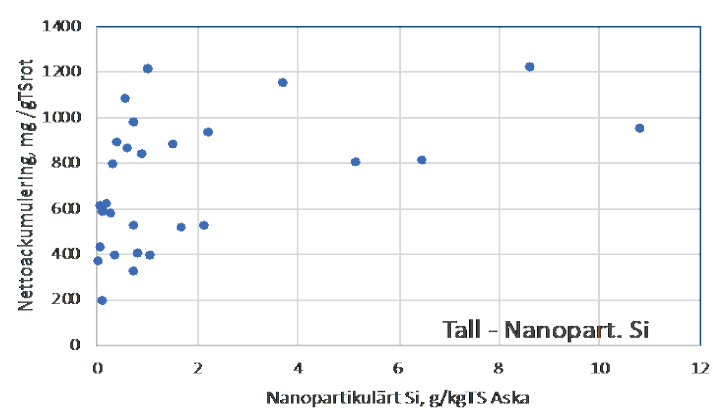
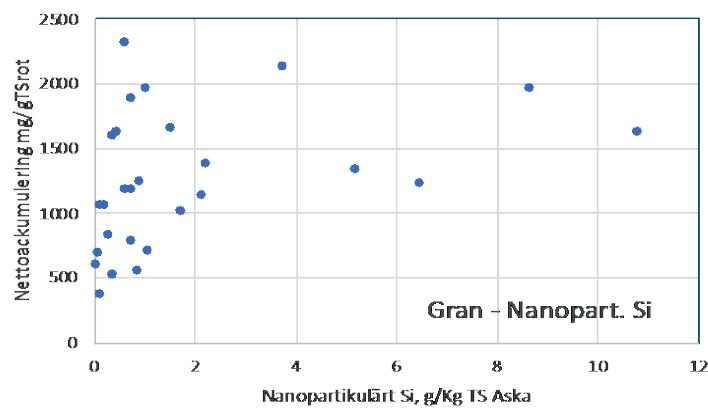
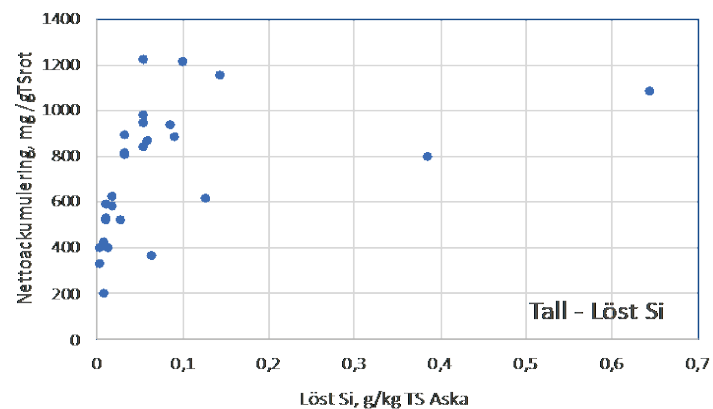
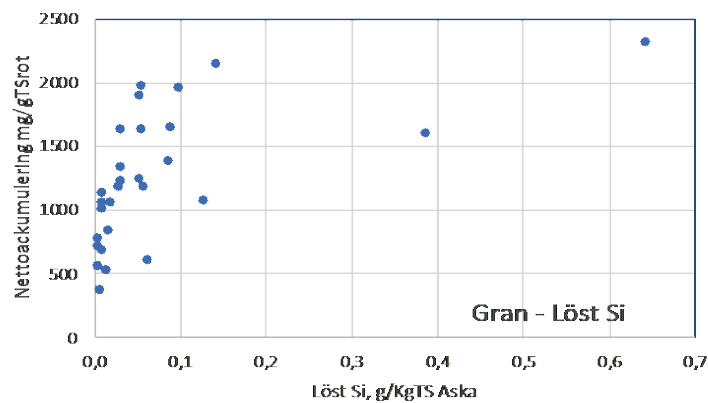
FIGURE 4. DISTRIBUTION (%) OF VARIOUS FRACTIONS OF SILICON IN BARK OF PINE AND SPRUCE. RESULTS FROM 7 DIFFERENT ASHES HAVE BEEN MERGED HERE AND THE MEAN VALUE IS GIVEN, SINCE THE VALUES OF THE DIFFERENT ASHES DO NOT DIFFER SIGNIFICANTLY FROM EACH OTHER. N = 7.

Nettoackumuleringen av kisel relaterades till olika kiselfraktioner som tillförts via askan (Figur 5 och 6). Nettoackumuleringen ökade linjärt med total, hårt bunden samt växttillgänglig fraktion av kisel. Något samband mellan nettoackumulering av kisel och nanopartikulär eller löst fraktion av kisel kunde däremot inte ses.



FIGUR 5. NETTOACKUMULERING AV KISEL I GRAN OCH TALL I RELATION TILL TOTAL KISELHALT, HÅRT BUNDEN KISEL SAMT VÄXTTILLGÄNGLIG KISEL I ASKAN.

FIGURE 5. NET ACCUMULATION OF SILICON IN SPRUCE AND PINE IN RELATION TO THE TOTAL SILICON CONTENT, FIRMLY BOUND SILICON AND PLANT-AVAILABLE SILICON IN THE ASH.



FIGUR 6. NETTOACKUMULERING AV KISEL I GRAN OCH TALL I RELATION TILL HALTEN AV LÖST KISEL OCH NANOPARTIKULÄRT KISEL I ASKAN

FIGURE 6. NET ACCUMULATION OF SILICON IN SPRUCE AND PINE IN RELATION TO THE SOLUBLE, FIRMLY BOUND AND PLANT-AVAILABLE SILICON IN THE ASH.

4 Diskussion

Denna undersökning visar att kisel tas upp i trädplantor från aska som har tillförts jorden, redan vid 0,5 ton TS/ha. Detta betyder att det är inte bara näringsämnen såsom baskatjoner som kan återföras med aska, utan även kisel.

4.1 HUR MYCKET KISEL ÄR VÄXTTILLGÄNGLIGT I ASKA?

Denna undersökning visar att askor innehåller höga halter kisel, mellan 10-20% (Tabell 1, 2), vilket överensstämmer med tidigare analyser (Greger m.fl. 1998, 2006, 2009). En mindre del av den totala kiselhalten var växttillgänglig, ca 0,03% (Tabell 2), vilket är 40% mer än i den jord som användes. Den största delen av den växttillgängliga fraktionen är troligtvis löst kisel, men även delar av nanopartikulärt kisel förekommer antagligen i den växttillgängliga fraktionen, eftersom dessa tas upp i växterna och ackumuleras i dem (Tabell 3 och 8).

Den växttillgängliga kiselandelen som finns i jorden utarmas med tiden genom upptag i träd och andra växter och bortförs vid avverkning av skogen. Därför beror storleken på jordens växttillgängliga Si-fraktion på hur länge växter vuxit i jorden och hur mycket kisel de har tagit upp. Olika växtarter tar ju upp olika mycket kisel (Hodson m.fl. 2005). Det är därför positivt att den växttillgängliga kiselhalten i jorden kan ökas med askåterföring och ytterligare ökas med ökad askgiva.

4.2 HUR MYCKET KISEL TAS UPP I TALL OCH GRAN FRÅN ASKA?

Kisel tas upp i gran- och tallplantor från jorden och är orsaken till att kontrollplantorna innehöll kisel. Men plantorna tar även upp kisel från de nedmyllade bioaskorna och med en askgiva på 3 ton TS per ha ökar kiselhalten i plantan 6 gånger (Figur 2 och 3). Ökar man dosen till 5 ton TS per ha så ökar kiselhalten med 7,5 gånger jämfört med kontrollplantan (Figur 2 och 3). En kontrollplanta innehåller 20 resp. 30 mg/kg Si och med 5 ton TS aska ökar kiselhalten i plantan till ca 160 resp. 250 mg/kg Si i tall resp. gran (Figur 2 och 3).

Plantornas nettoackumulering av kisel ökar med ökad askgiva (Figur 5 och 6). Ökningen beror till största grad på den växttillgängliga kisel fraktionen eftersom det finns ett linjärt samband mellan nettoackumulering och den växttillgängliga fraktionen av kisel i askan. Detta linjära samband återfinns hos både gran och tall.

Gran ackumulerar ca 40% mer kisel än tall och skillnaden är lika över hela plantan (Figur 2, 3, 5 och 6). Detta överensstämde inte med Greger och Alhousari (2018) som odlade barrträden i närvaro av kaliumsilikat, men däremot överensstämmer resultaten med Greger och Alhousari (2019) där man odlat i SiO₂-nanopartiklar och i kiselslagg.

4.3 VAR I TRÄDPLANTORNA ACKUMULERAS KISEL?

Den högsta koncentrationen av kisel sker i barken, där ca 60% kisel återfinns (Tabell 6 och 7). Granen ackumulerar mer kisel i veden och mindre i barken än vad

tallen gör (Tabell 7). Trots detta har granens bark högre kiselhalt än vad tallen har (Tabell 6). Detta överensstämmer bra med resultaten i Alhousari och Greger (2019). I övrigt hade granen mindre andel kisel i barren än tallen och ca 5% av det kisel som tagits upp ackumulerades i rötterna (Tabell 7).

4.4 VILKA KISELFORMER ACKUMULERAS I BARKEN?

Den högre kiselhalten i barken hos gran än hos tall beror på att den lösta kiselkoncentrationen är dubbelt så hög i granbark som i tallbark (Tabell 8). I övrigt är den hårt bundna kiselfraktionen störst och lika stor i båda arterna (Tabell 8). Det är mest troligt att det är den hårt bundna fraktionen, som ligger i det yttersta barklagret (Greger och Alhousari 2020) som är den som fungerar som mekanisk barriär. Den höga halten kisel i barken hos båda arterna (Tabell 6 o 7)) används högst troligt som mekanisk barriär för insektsangrepp.

4.5 HUR MYCKET ASKA BÖR TILLFÖRAS FÖR ATT FÅ DEN KISELHALT I BARKEN SOM MINSKAR SNYTBAGGEGNAG?

Kiselhalten i barken är extra viktig för att förhindra snytbaggegnag och en total kiselhalt av 200 mg/kg i barken har i tidigare försök där Si-nanopartiklar har använts som kiselgödselmedel minskat gnagfrekvensen signifikant i fält (Pettersson m.fl. 2022). När kisel har tillförts som silikat (Greger och Alhousari 2020) har upp till 50% minskning av gnag från snytbagge erhållits i non-choice försök på gran.

När kisel tillsätts som kiselnanopartiklar, får vi en sämre effekt på snytbaggegnagen även om dessa tas upp som de är i växterna och ackumuleras i barken (Tabell 8) (Alhousari och Greger 2019). Orsaken är troligtvis att kiselnanopartiklarna ackumuleras i barken som nanopartiklar istället för att ombildas till hårt bunden fraktion (Tabell 8), och våra tidigare resultat visar på att mer kisel hamnar i den hårt bundna fraktionen när kisel har tillsatts som silikat (Greger m.fl. 2022). I denna undersökning med aska återfinns en stor del av kiset i barken som hårt bunden fraktion och en mycket liten nanopartikelfraktion. Därför borde kiset i barken som tagits upp från askan ge ett bra skydd mot snytbaggeangrepp.

I våra tidigare studier med silikater (Greger och Alhousari 2020) ger 40g löst kisel/kg i barken en signifikant minskning av snytbaggegnag. Därför borde kiselhalten i barken utgöra en repellerande effekt på snytbaggarna redan vid 0,5 ton TS askgiva eftersom denna askgiva ger 41 och 71 g löst kisel/kg i barken hos tall och gran (Tabell 8). I studien där Si-nanopartiklar har använts var den total kiselhalten i barken av 200 mg/kg och denna minskade snytbaggegnagen. I denna undersökning ger 1 ton TS aska en total kiselhalt i barken som är 265 respektive 222 mg/kg för gran respektive tall (Tabell 6). Från dessa siffror drar vi slutsatsen att för att få en effekt på snytbaggegnag behövs en askgiva på mellan 0,5 och 1 ton TS/ha.

Slutsatsen är att återförande av aska i skog kan öka polen av växttillgängligt kisel i marken som i sin tur ökar kiselupptag och -ackumulering i skogsträdplantor och på det sättet kan snytbaggarnas betningstryck minska.

5 Tackord

Denna studie har finansierats av Energiforsk AB, Stina Werners stiftelse och Stiftelsen Skogssällskapet.

6 Referenser

- Alhousari F & Greger M. 2018. Silicon and mechanisms of plant resistance to insect pests. — *Plants* 7: 33; doi:10.3390/plants7020033.
- Alhousari F. & Greger M. 2019. Influence of microsilica and slag on weevil grazing, fiber quality, drought resistance and fire retardation in coniferous trees as well as Si uptake. — *Rapport till Elkem*. 31pp
- Berthelsen S., Noble A.D. & Garside A.L. 2001. Silicon research down under: past, present and future. In: Datnoff L.E., Snyder G.H. and Korndörfer G.H. (eds), *Silicon Deposition in Higher Plants. Silicon in Agriculture*. Elsevier Science, pp. 241–255.
- Carey J.C., & Fulweiler R.W. 2012. The terrestrial silica pump. — *PLoS One*, 7(12): e52932.
- Epstein E. 2009. Silicon: its manifold roles in plants. — *Annals of applied Biology*, 155(2): 155-160.
- Greger M., Ekvall L., Österås A.H., Pettersson W., Perttu K. & Aronsson P. 1998. Mixed waste products from pulp and paper industry used as fertilizers in forest. — *Rapport 238 AFR.*, 66pp
- Greger M., Neuschütz C. & Isaksson K.-E., 2006. Flygaska och rötslam som tätskikt vid efterbehandling av sandmagasin med vegetationsetablering. — *Värmeforsk rapport 959*. 79pp
- Greger M., Neuschütz C. & Isaksson K.-E., 2009. Inverkan av vegetation och rötslam på tätskikt av flygaska vid efterbehandling av sandmagasin. — *Värmeforsk rapport 1098*. 49 pp
- Greger M. & Landberg T. 2015. Silicon decreases cadmium and arsenic in field grown crops. — *Silicon* 11: 2371–2375.
- Greger M., Kabir A.H., Landberg T., Maity P.J. & Lindberg S. 2016. Silicate reduces cadmium uptake into cells of wheat. — *Environmental Pollution* 211: 90-97
- Greger M. Alhousari F. 2018. Kisels inverkan på trädens stamstruktur och cellulosa-fiberbildning. — *Rapport till Önnesjöstiftelsen*. 7pp
- Greger M., Landberg T. & Vaculík M. 2018. Silicon Influences Soil Availability and Accumulation of Mineral Nutrients in Various Plant Species. — *Plants*, 7: 41; doi:10.3390/plants7020041
- Greger M. & Alhousari F. 2020. Effekten av kisel på snytbaggegnag på barrträd. En naturlig metod att förebygga insektsangrepp på skogsträd med kisel. — *Rapport till Stina Werners stiftelse* 12pp
- Greger M., Landberg T., Herbert R. 2021. Inverkan av nano-kiseldioxidpartiklar på Cd och As i jord-växt systemet i jordbruket. — *Rapport till FORMAS* dnr 2016-01040

- Hodson M.J., White P.J., Mead A., & Broadley M.R. 2005. Phylogenetic variation in the silicon composition of plants. — *Annals of botany*, 96(6): 1027-1046.
- Kaur H & Greger M. 2019. A Review on Si Uptake and Transport System. — *Plants*, 8: 81; doi:10.3390/plants8040081
- Keller C., Guntzer F., Barboni D., Labreuche J., & Meunier J.D. 2012. Impact of agriculture on the Si biogeochemical cycle: input from phytolith studies. — *Comptes Rendus Geoscience*, 344(11-12): 739-746.
- Liang, Y., Nikolic, M., Bélanger, R., Gong, H., & Song, A. 2015. *Silicon in Agriculture: From Theory to Practice*. Springer, Dordrecht/Heidelberg/New York/London
- Nazaralian S., Majd A., Irian S., Najafi F., Ghahremaninejad F., Landberg T. & Greger M. 2017. Comparison of silicon nanoparticles and silicate treatment in fenugreek. — *Plant Physiology and Biochemistry* 115: 25-33
- Pettersson, M., Greger, M., Høst, E. Kløvstad, A.G. & Sundheim Fløstad, I. 2022. Kan snutebillen stoppes med tilførsel av silika? — Norsk Skogsbruk.
- Pettersson M, Greger M. m. fl. 2022. Tilførsel av (Amorf) silika fører til økt motstand mot snutebilleangrep og økning i biomasse for granplanter. — Rapport till Skogtiltaksfondet og Utviklingsfondet for skogsbruk 6pp
- Prychid C.J., Rudall P.J., & Gregory M. 2003. Systematics and biology of silica bodies in monocotyledons. — *The botanical review*, 69(4): 377-440.
- Rodrigues F.A. & Datnoff L.E. (Eds.). 2015. *Silicon and Plant Diseases*. Springer International Publishing AG. Cham, Switzerland
- Snyder G.H. 2001. Chapter 11 Methods for silicon analysis in plants, soils, and fertilizers. In: *Silicon in Agriculture*, Eds: L.E. Datnoff, G.H. Snyder and G.H. Korndörfer (Eds). *Studies in Plant Science Series Volume 8*, 2001 Pages 185-196, Elsevier Science B.V.
- Struyf, E., Smis, A., Van Damme, S., Garnier, J., Govers, G., Van Wesemael, B., ... & Meire, P. 2010. Historical land use change has lowered terrestrial silica mobilization. — *Nature communications*, 1(1): 1-7.
- Zhang T., Ge J., Hu Y., Zhang Q., Aloni S. & Yin Y. 2008. Formation of hollow silica colloids through a spontaneous dissolution-regrowth process. — *Angew. Chem. Int. Ed.* 2008, 47: 5806–5811

KISELUPPTAG I TALL OCH GRAN FRÅN ASKA

Kisel är ett viktigt näringsämne för växter och ämnet främjar bl.a. biomassaproduktion och tolerans mot insektsangrepp. Den här studien visar att den växttillgängliga kiselhalten i aska är större än den i jord. Dessutom visar studien att gran och tall tar upp kisel från aska som tillförts med 0,5-5 ton TS/ha. Det är därför möjligt att med askåterföring återföra den växttillgängliga kisel som tagits ut med avverkningen. Kisel i bark hos gran och tall kan minska snytbaggangreppen hos utplanterade skogsplantor. Beräknat på kiselackumuleringen i barken efter asktillförsel skulle en askgiva på mellan 0,5-1 ton TS/ha räcka för att se ett minskat angrepp.

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