

Rapport  
fra Skog og landskap

12/2014



skog +  
landskap

Norsk institutt for  
skog og landskap

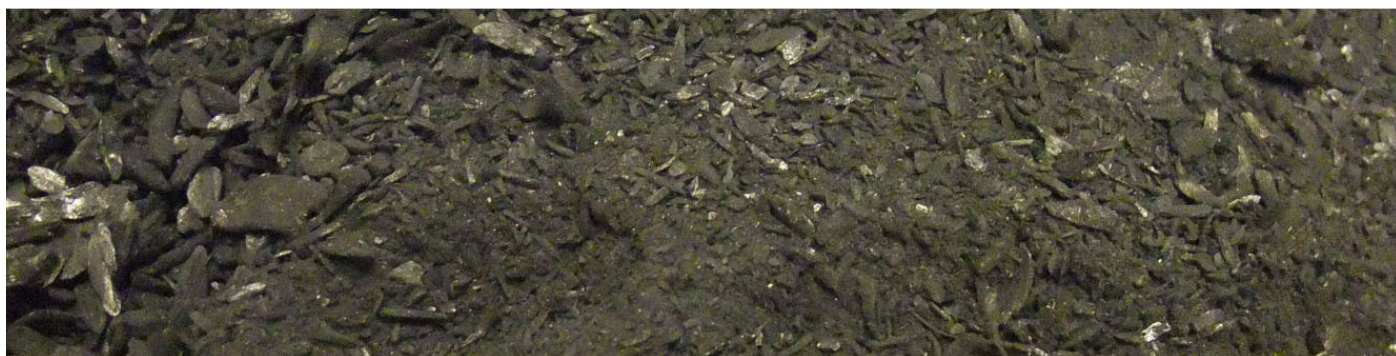
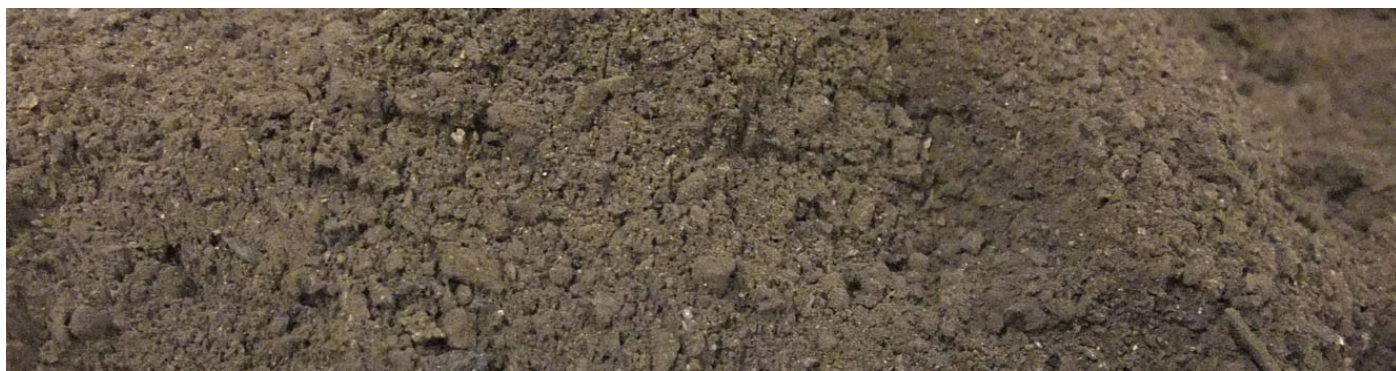
---

## INNOVATIV UTNYTTELSE AV ASKE FRA TREVIRKE FOR ØKT VERDI- SKAPING OG BÆREKRAFTIG SKOGBRUK (ASKEVERDI)

Prøveuttak og analyse av aske fra trevirke ved ulike bedrifter

---

Janka Dibdiakova og Henning Horn



---

## INNOVATIV UTNYTTELSE AV ASKE FRA TREVIRKE FOR ØKT VERDISKAPING OG BÆREKRAFTIG SKOGBRUK (ASKEVERDI)

Prøveuttak og analyse av aske fra trevirke ved ulike bedrifter

---

Janka Dibdiakova og Henning Horn

ISBN: 978-82-311-0218-2

ISSN: 1891-7933

Omslagsfoto: Askeprøver ved Bioenergi-laboratoriet på Skog og landskap.

Foto: Janka Dibdiakova, Skog og landskap.

## FORORD

De senere årene har det blitt rettet et større fokus på industriell utnyttelse av biomasse fra skogen til produksjon av varme og strøm. Økt utnyttelse av trebasert biobrensel spiller en viktig rolle i Norges fremtidige energi- og klimastrategi. Denne økte satsningen medfører at utnyttelsen av de resulterende askeressursene fra biomassen blir stadig viktigere. En bærekraftig utnyttelse av biomasse i forbrenningsanlegg innebærer derfor resirkulering av aske til gjødselformål, enten i jordbruk, eller grøntanlegg.

Prosjektet "Innovativ utnyttelse av aske fra trevirke for økt verdiskapning og bærekraftig skogbruk (AskeVerdi prosjektnummer 215935/O10)" ble startet med bakgrunn i økt interesse for fornybar energi og mulighetene til å benytte treaske som gjødsel. Prosjektet er finansiert av Norges forskningsråds program Natur og næring, Jordbruksavtalen og en gruppe industripartnere. Bergene Holm AS er prosjekteier, Norsk Treteknisk Institutt er prosjektleder, og Skog og landskap, Bioforsk og PFI er prosjektdeltagere i AskeVerdi.

Denne rapporten er en del av prosjektet, arbeidspakke 1 Ressurstilgang og kvalitet på treaske, hvor Skog og landskap er ansvarlig partner. I rapporten er de kjemiske egenskapene til bunnaske, flyveaske og blandaske undersøkt. Askene ble innhentet fra forbrenningsanlegg ved bedrifter i Bergene Holm AS, Eidsiva Bioenergi AS, Moelven Timber AS, Moelven Wood AS og Statkraft Varme AS, samt de enkeltstående bedriftene Begna Bruk AS og InnTre AS avd. Verdal.

Forfatterne takker de ansatte ved alle bedriftene for deres bidrag og egeninnsats, og Simen Gjølshø og Kjersti Holt Hanssen for kommentarer til rapporten. En spesiell takk til Monica Fongen og Eva Grodås ved Skog og landskap for deres assistanse ved de kjemiske analysene.

*Ås, 24. mai 2014*

## SAMMENDRAG

I de kommende årene forventes det en økende satsing på etablering av biobrenselanlegg i Norge. Økt forbrenning av trebasert biobrensel vil også medføre økt produksjon av betydelige mengder aske som må håndteres på en hensiktsmessig måte. En bærekraftig utnyttelse av de resulterende askeressursene fra biomassen blir derfor stadig viktigere.

Treaske har en varierende sammensetning, men inneholder det meste av de viktige næringsstoffer og tungmetaller som fantes i trevirket før forbrenningen. Asken er meget alkalisk. Anvendelse av aske i jordsmonn øker pH-verdien og innholdet av de fleste hovednæringsstoffene, samt at tilgjengeligheten av sporelementer (tungmetaller) reduseres. Aske fra trevirke med riktig kvalitet kan derfor utnyttes i forvaltningen av forsuret grøntarealer, jordbruksarealer eller områder med flatehogst som trenger kalktilsetning. Askeegenskapene avhenger av hvilken type biobrenselassortiment som benyttes i forbrenningen, riktig styring av prosessparametre i forbrenningsprosessen, samt behandling og lagring av askene. Alle askene i denne undersøkelsen er fra biobrenselanlegg med ristovner.

Undersøkelsene i denne studien viste at den kjemiske kvaliteten på de ulike treaskene varierte betydelig, avhengig av faktorer som kvaliteten på biobrenselet som benyttes til forbrenningen, treslag, biobrenselassortiment og type forbrenningsanlegg. I tillegg vil faktorer som lagring, håndtering og forbrenningstemperatur ha betydning for askekvalitetene som oppnås. For bestemmelse av askens kjemiske kvalitet er det viktig å evaluere alle elementer (næringsstoffer og tungmetaller). Analysene viser at det var en oppkonsentrasjon av tungmetaller i flyveaskene, sammenlignet med bunnaskene undersøkt i denne studien.

De laveste nivåene av organisk karbon ble målt i bunnaskene, noe som indikerer at forbrenningsforholdene var gode i perioden for prøvetakingen. Det ble målt et høyere silisiumnivå i noen av bunnaskene. Silisiumnivået i aske fra biobrensel som inneholder bark kan være høyt på grunn av sand, grus og andre forurensninger som tas opp under tømmerhogst og transport. Det kan undersøkes om disse biobrenselanleggene er mer utsatt for sintring og slagging på forbrenningsristen. Konsentrasjonen av klor og svovel i alle undersøkte flyveasker var mye høyere enn i bunnaskene. Klor og svovel vil kunne ha en korrosiv effekt på forbrenningsanleggets komponenter, og er medvirkende elementer ved sintring og slaggdannelse.

I Norge er tilbakeføring av aske til skog ikke tillatt fordi «Forskrift om gjødsel varer mv. av organisk opphav (2003)» ikke definerer skog som et av arealene det kan spres aske på. Forskriften er på tiden under revisjon. En av bunnaskene som ble undersøkt hadde høyt innhold av næringsstoffer, lave konsentrasjoner av tungmetaller, lite uforbrent organisk karbon og en høy pH-verdi. Med hensyn til resirkulering vil denne asken kunne anvendes i grøntarealer og jordbruksarealer. Denne asken ble derfor valgt ut til et feltforsøk i skog som startet opp i mai 2013.

Bruk av aske fra biobrenselanlegg som gjødsel i Norge bør så raskt som mulig få en høyere prioritet på den politiske dagsordenen. For å komme videre er det viktig at ulike industri- og næringsaktører innenfor områdene bioenergi, skogbruk, varmedistribusjon, miljøvernmyndigheter m.fl. deltar aktivt i utformingen av et anvendelig regelverk.

**Nøkkelord:** Askesammensetning, biobrensel, bunnaske, forbrenning, flyveaske, regelverk, skog



## SUMMARY

Increased use of wood-based biomass plays an important role in Norway's future energy and climate strategy. In coming years it is expected an increasing focus on the building of biofuel plants in Norway. As a result, this will generate large volumes of wood ashes. This increased focus means that the utilization of the resulting ash from biomass resources is becoming increasingly important.

Wood ashes have a variable composition, but contain most of the important nutrients that can be used as an additive for fertilization purposes, and heavy metals found in the wood before burning. Wood ash is very alkaline. Use of ash in the soil increases the pH and the content of many nutrients, as well as the availability of the trace elements (heavy metals) may be reduced. Ash from wood with appropriate quality can therefore be utilized in the management of acidified forest soils or areas with clear-cutting in need of lime addition. Ash properties depend on the type of biofuel range used in the combustion, proper control of process parameters in the combustion process, as well as processing and storage of ashes. All the ashes in this study were sampled from heating plants with grate furnace.

The chemical quality of the biomass ashes varied considerably depending on factors such as quality of biofuel used for combustion, wood and type of biofuel. In addition, factors such as storage, handling and combustion temperature affect the quality of biomass ashes. It is important to evaluate all elements (nutrients and heavy metals) and their concentrations which give the corresponding ash quality. The analyzes show that there was accumulated concentration of heavy metals in fly ashes compared with the bottom ashes examined in this study.

The lowest levels of organic carbon were measured in bottom ashes, indicating satisfactory combustion conditions during the period of sampling. A higher silicon level was measured in the bottom ashes in comparison to the other ash samples. Silicon levels in biomass ash containing bark can be high because of sand, gravel and other contaminant uptake during logging and transportation. It may be examined whether these combustion plants are more exposed to sintering and slagging of the combustion grate. The concentration of chlorine and sulphur in all investigated fly ashes was much higher than in the bottom ashes. Chlorine and sulphur may have a corrosive effect on the combustion plant components, and contributes to the sintering and slag formation.

In Norway, ash spreading in the forest is not allowed, because the "Regulation on Fertilisers etc. of Organic Origin (2003)" does not define forest as one of the land types that can be fertilized by wood ash. This regulation is for the time being under revision. One of the bottom ashes had high nutrient content, low concentrations of heavy metals, low unburned organic carbon and a high pH. According to the current Norwegian regulation applied for ash recycling, this ash can be applied as fertilizer in the agricultural land, gardens, parks and greening areas.

Use of ash from biofuel combustion plants as fertilizer, should have high relevance in Norway. It is important that authorities within biofuel and biomass industry, forestry, and environmental protection agencies contribute in the framing of applicable regulations for ash recycling.

**Key words:** Ash composition, biofuels, bottom ash, fly ash, regulations, forest

# INNHold

|                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------|-----|
| Forord .....                                                    | ii  |
| Sammendrag .....                                                | iii |
| Summary .....                                                   | iii |
| 1. Innledning .....                                             | 1   |
| 1.1. Bioenergi – en viktig fornybar energikilde.....            | 1   |
| 1.2. Askens sammensetning .....                                 | 1   |
| 1.2.1 Sammensetning .....                                       | 1   |
| 1.2.2 Næringstoffer og tungmetaller .....                       | 2   |
| 1.2.3 Bunnaske og flyveaske.....                                | 2   |
| 1.2.4 Utlekningssegenskaper .....                               | 3   |
| 1.2.5 Ristfyrte fastbrenselanlegg .....                         | 4   |
| 1.2.6 Sluttbehandling .....                                     | 4   |
| 1.2.7 Forskrift om gjødselvarer mv. av organisk opphav.....     | 5   |
| 2. Material og metoder.....                                     | 6   |
| 2.1. Biobrenselanlegg. Driftsforhold og behandling av aske..... | 6   |
| 2.2. Bunnaske og flyveaske .....                                | 6   |
| 2.3. Metoder for prøveuttak av aske .....                       | 9   |
| 3. Resultater og diskusjon .....                                | 10  |
| 3.1. Elementsammensetningen i askeprøvene .....                 | 10  |
| 3.1.1 Kadmium .....                                             | 15  |
| 3.1.2 Bly .....                                                 | 15  |
| 3.1.3 Nikkel .....                                              | 15  |
| 3.1.4 Krom .....                                                | 15  |
| 3.1.5 Kobber .....                                              | 16  |
| 3.1.6 Arsen .....                                               | 16  |
| 3.1.7 Sink .....                                                | 16  |
| 3.1.8 Kalsium og kalium .....                                   | 16  |
| 3.1.9 Magnesium .....                                           | 17  |
| 3.1.10 Silisium .....                                           | 17  |
| 3.1.11 Andre tungmetaller .....                                 | 17  |
| 3.2. Totalt organisk karbon (TOC) og pH-verdi .....             | 17  |
| 3.3. Askerelaterte problemer i forebrenningsprosessen .....     | 19  |
| 3.3.1 Askesintrang .....                                        | 19  |
| 3.3.2 Askeslagging .....                                        | 20  |
| 3.3.3 Askeavsetning .....                                       | 20  |

|       |                    |    |
|-------|--------------------|----|
| 3.3.4 | Korrosjon .....    | 21 |
| 3.4.  | Oppsummering ..... | 21 |
| 4.    | Konklusjoner ..... | 22 |
|       | Referanser .....   | 23 |

# 1 INNLEDNING

## 1.1 Bioenergi – en viktig fornybar energikilde

Hele 85 % av industrilandenenes energiforbruk er basert på ikke fornybar energi, vesentlig i form av olje, kull og naturgass (Trømborg, 2011). Det vil være av avgjørende betydning for verdens økonomiske og økologiske utvikling at fossil energibruk reduseres, mens bruk av fornybar energi økes.

Av verdens eksisterende fornybare energikilder er bioenergi den viktigste. Den teknologiske utviklingen har gjort det stadig mer økonomisk bærekraftig å kunne utnytte biomasse. Det finnes naturressurser nok til å dekke 20-25 % av klodens totale energibehov. Sverige og Finland er allerede i ferd med å nå dette målet, mens bioenergi i Norge per i dag utgjør kun ca. 7 % av det totale energiforbruket. Dersom man når målet om å produsere i overkant av 30 TWh basert på bioenergi innen 2020, vil det tilsvare 10 % av dagens energiforbruk i Norge (Trømborg, 2011).

Produksjon av aske fra trevirke har økt kraftig de siste ti årene. Grunnen er at biobrensel i stadig større grad blir tatt i bruk for å sikre fornybar og CO<sub>2</sub>-nøytral varme- og energiproduksjon. Imidlertid fører energiproduksjon fra biomasse til betydelige askevolumer som må utnyttes økonomisk. Miljøvennlig utnyttelse av aske etter forbrenning av trebasert biomasse er en bærekraftig måte å utnytte en fornybar ressurs på som gjør at skogens bioenergiressurser kan karakteriseres som en grønn energikilde (EU, 2008). I Norge er deponering den mest vanlige metoden å kvitte seg med asken på i dag. Nye regler for å bedre ivareta miljøet har hevet deponikostnadene og gjort det vanskeligere å skaffe til veie nye områder for deponering.

De siste tiårene er det gjennomført en rekke studier omkring alternativ utnyttelse av treaske i jordbruk og grøntanlegg. På grunn av egenskapene til asken fra trevirke og den positive innvirkningen visse askeekvaliteter har på blant annet jordkjemi, kan aske fra trevirke være særlig egnet for styring av vekstforhold i sur jord og skogsjord.

## 1.2 Askens sammensetning

### 1.2.1 SAMMENSETNING

Asken er det som er igjen etter en fullstendig forbrenning, og består derfor av ikke brennbare bestanddeler. Et høyt askeinnhold kan derfor indikere lavt energiinnhold, men her vil fuktigheten også spille stor rolle. Endringer i brenselets askemengde vil kunne skape problemer mht. askeutmatning. Store askemengder kan virke isolerende mht. varme og luftsirkulasjon og dermed påvirke forbrenningen, og vil kunne gi et økt vedlikeholdsbehov. Kvaliteten av aske fra biomasse avhenger av flere faktorer, der den kjemiske sammensetningen i brenselet er av de viktigste. Andre faktorer er for eksempel hvor trevirket er avvirket ut, vekst- og hogstforhold, gjødseltype, høstingsteknikk, lagring, transport, håndtering og eventuelt forbehandling før forbrenning.

Aske fra ulike skogsbrenslar varierer avhengig av hvilket treslag som benyttes. Bjørk har for eksempel et annet mineralinnhold enn gran. Ulike tredeler har forskjellig kjemisk sammensetning. Mesteparten av næringsstoffene sitter i barken, grenene og toppene av treet. Forskjeller i brenselets kjemiske karakter vil også variere med vekstplass. De substratene som utnyttes (berggrunn, jordsmonn og vannets kjemiske sammensetning) vil variere fra sted til sted. Forurensninger av ulikt slag, både i atmosfæren og skogsmarken, påvirker opptaket i plantene.



Videre vil valg av forbrenningsmetode påvirke askens sammensetning. Alle askene i denne undersøkelsen er samlet inn fra ristfyringsanlegg. Man har også observert betydelige variasjoner i askesammensetning i et og samme forbrenningsanlegg over tid, til tross for at samme teknologi, temperaturområder og brensel har blitt benyttet (Lindkvist, 2000).

De fleste av disse faktorene er til en viss grad kontrollerbare, slik at askeinnholdet kan komme innenfor grenseverdiene som dagens regelverk setter.

Generelt består asken av store deler av de næringsstoffer og tungmetaller som finnes i trevirket. Den inneholder også en del salter med varierende mengder av uforbrent organisk materiale, grus og sand. Videre kommer mulige forurensninger som kan stamme fra urent brensel, ufullstendig forbrenning med mer. Asken er meget alkalisk og har en pH på rundt 12-13 (Lindkvist, 2000).

### 1.2.2 NÆRINGSSTOFFER OG TUNGMETALLER

Forbrenning av trebasert biobrensel produserer betydelige mengder aske som må håndteres på en hensiktsmessig måte. Trevirke består hovedsakelig av organisk materiale og mindre mengder av uorganisk materiale. Det uorganiske materialet er et resultat av at trærne absorberer mineraler fra jorda. Når treet forbrennes, omdannes deler av de organiske elementene til CO<sub>2</sub> og vann, mens de uorganiske elementene blir igjen i asken (Tothova, 2012; Hakkila, 1989).

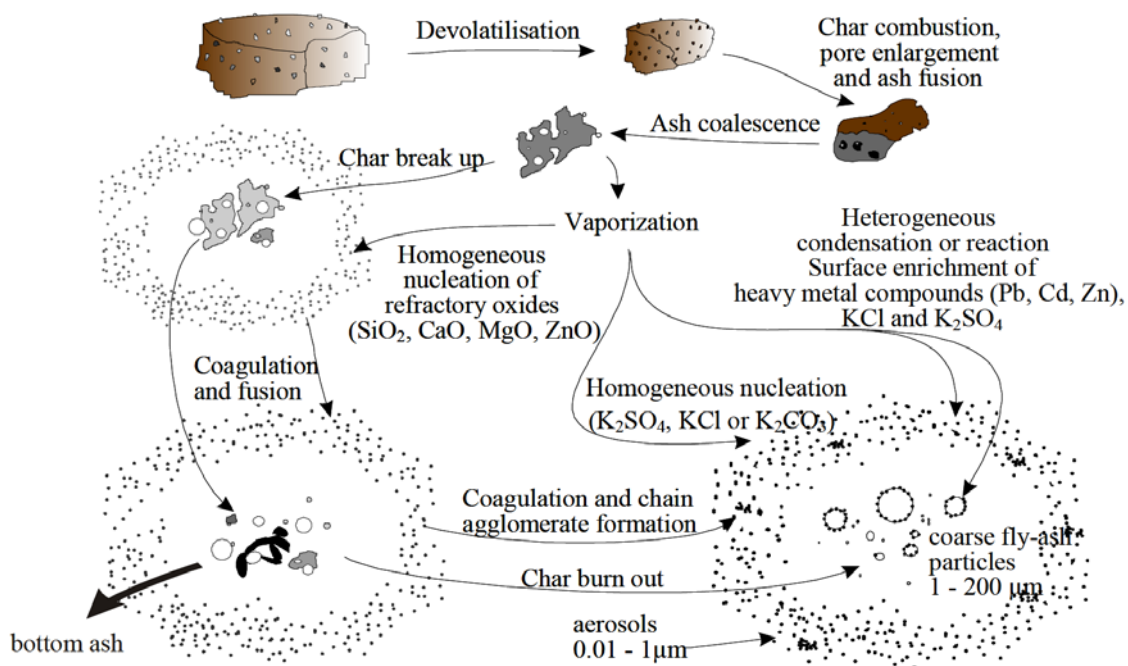
Askens næringsinnhold domineres av kalsium. Andre viktige makronæringsstoffer er magnesium, kalium og fosfor. Av mikronæringsstoffer finnes blant annet bor, kobber, sink, mangan, kobolt og molybden. Asken inneholder også mesteparten av de tungmetallene som en gang fantes i trevirket, for eksempel kvikksølv, bly, krom, arsen, nikkel, vanadium og kadmiem (Lindkvist, 2000).

Som nevnt kan kvaliteten på biobrenselaske variere mye avhengig av biobrenseltype og forbrenningsforholdene i anlegget. Her stiller lovgivende forskrifter krav til begrensninger for bruk av aske som gjødsel, eller som mineraltilsetning i kompost.

### 1.2.3 BUNNASKE OG FLYVEASKE

I et biobrenselanlegg vil det genereres både bunnaske og flyveaske. Fordelingen mellom de to fraksjonene vil avhenge av type biobrenselanlegg. Bunnasken og flyveasken vil vanligvis ha noe forskjellig sammensetning. Metaller med lav flyktighet, som nikkel, krom og vanadium vil være mest konsentrert i bunnasken. Det samme gjelder makronæringsstoffer som kalsium, magnesium og fosfor. Kalium er mer flyktig, men også her vil det meste av elementet foreligge i bunnasken. Miljømessig viktige tungmetaller, som kadmiem, sink, bly og kvikksølv, er langt mer flyktige og forventes derfor å være mer oppkonsentrert i flyveasken (Narodoslawsky og Obernberger, 1996). Den flyktige fraksjonen vil avhenge av den kjemiske sammensetningen i biobrenselet, den omgivende gassatmosfæren, forbrenningstemperaturen og hvilken type forbrenningsteknologi som benyttes. En høy forbrenningstemperatur og redusert atmosfære (mindre oksygen) vil øke flyktigheten av tungmetaller som kadmiem, sink og bly. Ved påfølgende kondensering vil disse partiklene sammen med faste mikropartikler fra brenselet på risten danne finforstøvede partikler (aerosoler) som hovedsakelig består av kalium, svovel og klor. På grunn av den høye flyktigheten til kadmiem, sink og bly vil også disse elementene kunne forekomme i aerosolene.

De ikke-flyktige bestanddelene som er igjen i trekullet vil danne askepartikler med et vidt spekter i sammensetning, form og størrelse. Disse partiklene består hovedsakelig av tungsmeltende materialer som kalsium, magnesium og silisium, så vel som mindre mengder bundet flyktige komponenter som kalium og aluminium. Hoveddelen av denne asken blir igjen på forbrenningsristen og faller ned som bunnaske. Den resterende andelen blandes med røykgassen og danner de største partiklene i flyveasken. Disse partiklene kan danne avsetninger på veggene i forbrenningskammeret og på overflatene i kjelanleggets varmeveksler, i tillegg til å gi partikkelutslipp. Etter avkjøling av røykgassen på de konvektive overflatene i kjelens varmeveksler kan deler av de flyktige komponentene kondensere eller gi nye kjemiske reaksjoner på overflatene til partiklene i flyveasken. En skematisk fremstilling av askedannelse under forbrenning av biomasse er vist i Figur 1.



Figur 1. Mekanismer i dannelsen av aske ved forbrenning av biomasse (Obernberger et al., 2006).

#### 1.2.4 UTLEKNINGSEGENSKAPER

I de senere år har askers utlikningsegenskaper blitt viet stadig større oppmerksomhet. Grunnen til at man ønsker kunnskap om dette, er at det ikke bare er viktig å kjenne til innholdet av ulike stoffer i asken, men også hvor mye av disse som vil lekke ut fra asken til omgivelsene over tid. Det er flere faktorer som vil påvirke askens utlikningsegenskaper, blant annet pH, askefraksjon (bunn- eller flyveaske) og forbrenningsmetodikk (Lindkvist, 2000).

Generelt kan man si at ved  $\text{pH} > 7$  er det kun kalium og kalsium som lett løses ut av asken. Det er først når  $\text{pH}$  synker under 7 at løseligheten av fosfor og magnesium øker markant. Deretter, ved ytterligere lavere  $\text{pH}$ , følger en økning av sporstoffenes og tungmetallenes løselighet (Lindkvist, 2000). Man skal likevel være oppmerksom på krom som har høy løselighet også ved høy  $\text{pH}$  (Pohlandt-Schwandt, 1999).

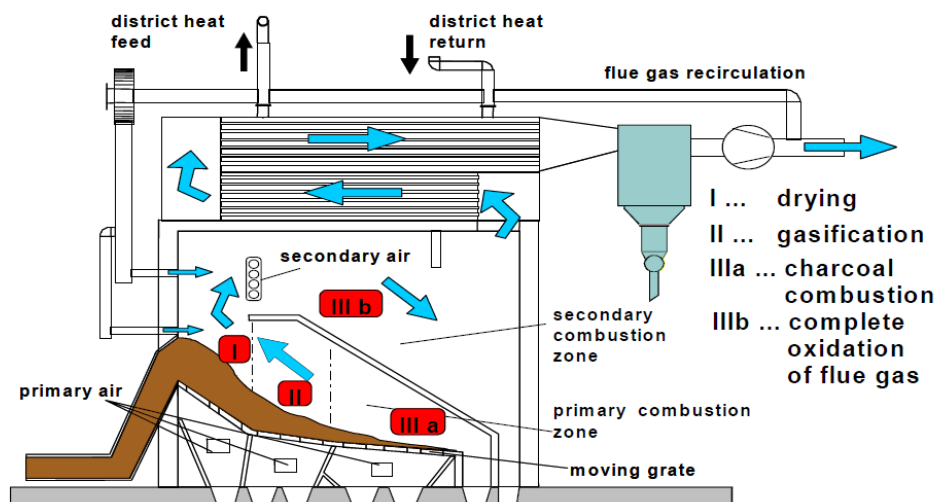
Utlekningsegenskapene vil variere med asketype og forbrenningsanlegg. Mens løseligheten av kalsium og kalium er høyest fra flyveasker, har bunnasker høyest utlekking av metaller og sporstoffer. Videre vil aske fra fluidized bed forbrenning ha en betydelig langsommere utlekking enn aske fra ristfyrte fastbrenselanlegg (Lindkvist, 2000).

#### 1.2.5 RISTFYRTE FASTBRENSELANLEGG

Forbrenningsprosessen i et ristfyrte forbrenningsanlegg består av fem hovedfaser: Tørring, pyrolyse, gassifisering, oksidering (forbrenning) av gasser og oksidering av fast materiale. Brenselet mates inn på forbrenningsristen hvor primærluft tilføres fra bunnen av biobrenselstokket. Biobrenselets partikkelstørrelse og fuktighet er faktorer som avgjør hvor raskt det faste brenselet tørkes på forbrenningsristen.

Når brenselet er tørket starter en pyrolyse (inni treet) og en gassifisering (på overflaten). Brenselet transporteres på risten gjennom brennkammeret til alt brenselet er omdannet ved enden av risten. Høyden på biobrenselstokket reduseres derfor gradvis mot enden av risten. Gassifiseringen skjer kun på risten. Til slutt forbrennes gassene i brennkammeret. Det gjenværende faste materialet vil forbrenne ved temperaturer på 800-1000 °C. Den produserte varmen overføres til oppvarming av vannet gjennom varmeveksling i kjelanlegget. Figur 2 viser en prinsippskisse av et forbrenningsanlegg med bevegelig skrårist.

Omtrent 50 % av forbrenningsluften (primærluften) tilføres gjennom dyser under forbrenningsristen. Resterende sekundærluft (og eventuelt også tertiærluft) tilføres i forbrenningssonen gjennom flere rader med luftdyser plassert for å sikre en mest mulig effektiv miksing av luft og forbrenningsgasser. Denne type stegvis forbrenning sikrer lave NO<sub>x</sub> utslipp (Scharler et al., 2004; Loo and Koppejan, 2002). Optimal forbrenningstemperatur oppnås gjennom lavt luftoverskuddstall, forvarming av luft og / eller røykgassirkulasjon.



Figur 2. Prinsippskisse av biobrenselanlegg med bevegelig skrårist (Obernberger et al., 2006).

#### 1.2.6 SLUTTBEHANDLING

Historisk har aske blitt regnet for å være et verdifullt råstoff. I de senere årene har det vært økende fokus på å utnytte askens næringsinnhold til kostnadseffektiv og miljømessig forsvarlig gjenbruk.

- Deponering – på grunn av treaskens varierende sammensetning og muligheten for høyt innhold av tungmetaller og organiske forbindelser, har flere land en restriktiv politikk når det gjelder bruk av asken. Deponering er derfor vanlig praksis (Pohlandt-Schwandt et al., 2001).

I noen land, som for eksempel USA og Norge, er det uproblematisk å deponere treaske siden den ikke regnes som spesialavfall. De fleste steder vil likevel kreve en deponeringsavgift. Andre land er nå i ferd med å utvikle et regelverk som kan gjøre deponering av aske mer vanskelig. Både Tyskland og Sveits kommer til å innføre lover som i første rekke regulerer vannløselige komponenter som kan lekk ut fra avfall. For treaske er det spesielt utlekking av krom som kan by på problem. I disse landene kan det derfor bli nødvendig å rense asken før deponering.

- Tilbakeføring til skogen – når aske fra ikke kontaminert biomasse (rent trevirke) resirkuleres til jorda vil tungmetallinnholdet være de samme som det ville vært dersom biomassen hadde fått lov til å brytes ned i skogen. Resirkulering av aske under kontrollerte og tilrettelagte forhold med riktige konsentrasjoner vil ikke øke nivået av tungmetaller i skog. En slik tilbakeføring vil gi en besparelse av primære ressurser og kan ses som et eksempel på bærekraftig bruk av biomasse (Ingerslev et al., 2001).

Treaske er et egnet og økonomisk tilgjengelig gjødsel som ved riktig bruk kan tilbakeføres til skogen. Tradisjonen med å bruke treaske i skogen som tilsetning til gjødsel er mest vanlig i Sverige og Finland (Hanssen et al., 2014; Ingerslev et al., 2001). I Norge er bruk av aske som organisk gjødsel basert på kvalitetsklasser av tungmetaller på tørrstoffbasis, og regulert gjennom Forskrift om gjødselvarer mv. av organisk opphav. (Landbruks- og matdepartementet, 2003). Fordi asken vil ha økte konsentrasjoner av metaller på tørrstoffbasis sammenlignet med det opprinnelige organiske materialet (trevirket), er dagens regelverk sterkt begrensende i forhold til resirkulering av aske (Insam og Knapp, 2011).

En forutsetning for bærekraftig bruk av aske i jordbruk og grøntarealerbruk er en tilstrekkelig god aske kvalitet i form av næringsstoffer på den ene side, og innholdet av tungmetaller og organiske miljøgifter (for eksempel klor) på den annen side (Insam og Knapp, 2011). Gode teknologiske løsninger både ved håndtering, transport, lagring, forbrenning, og filtreringsteknologi er av stor betydning for å kunne oppnå kvalitativt verdifulle askefraksjoner.

#### 1.2.7 FORSKRIFT OM GJØDSELVARER MV. AV ORGANISK OPPHAV

Det er ikke vanlig i Norge i dag å tilbakeføre treaske i skogen. I Norge er asketilbakeføring til skog ikke tillatt fordi «Forskrift om gjødsel varer mv. av organisk opphav (2003)» ikke definerer skog som et av arealene det kan spres aske på. Forskriften er på tiden under revisjon. Denne regulering er basert på kvalitetsklasser av tungmetaller på en tørrstoffbasis. Det er en forskjell i Kvalitetsklasser (0-III) med tilhørende beskrivelse, herunder eventuelle bruksbegrensninger eller andre forholdsregler ved produktets bruk.

Kvalitetsklasser og bruksområder av aske:

- Kvalitetsklasse 0: Kan nyttes på jordbruksareal, private hager, parker, grøntarealer og lignende. Tilført mengde må ikke overstige plantenes behov for næringsstoffer.

- Kvalitetsklasse I: Kan nyttes på jordbruksareal, private hager og parker med inntil 4 tonn tørrstoff pr. dekar pr. 10 år. Kan nyttes på grøntarealer og lignende der det ikke skal dyrkes mat eller forvekster. Produktet skal legges ut i lag på maksimalt 5 cm tykkelse og blandes inn i jorda på bruksstedet.
- Kvalitetsklasse II: Kan nyttes på jordbruksareal, private hager og parker med inntil 2 tonn tørrstoff pr. dekar pr. 10 år. Kan nyttes på grøntarealer og lignende der det ikke skal dyrkes mat eller forvekster. Produktet skal legges ut i lag på maksimalt 5 cm tykkelse og blandes inn i jorda på bruksstedet.
- Kvalitetsklasse III: Kan nyttes på grøntarealer og lignende arealer der det ikke skal dyrkes mat- eller forvekster. Produktet skal legges ut i lag på maksimalt 5 cm tykkelse hvert 10. år og blandes inn i jorda på bruksstedet. Bruk til toppdekke på avfallsfyllinger skal dekkisjiktet være maksimalt 15 cm.

## 2 MATERIAL OG METODER

### 2.1 Biobrenselanlegg. Driftsforhold og behandling av aske

Ved uttak av askeprøver fra et forbrenningsanlegg er det ønskelig å ha kontroll med driftsparametrene (brennkammertemperatur, røykgasstemperatur, element-sammensetning i røykgassen etc.) da flere aske relaterte problemer kan spores tilbake til forbrenningsprosessen. Dette er i første rekke sintring, slagging, korrosjon og askeavsetninger (se kapittel 3.3). Svært høyt brennkammertemperatur ( $>1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) kan gi sammensmelting av askepartikler (sintring) som kan feste seg på overflatene i brennkammeret, eller smelte sammen med andre partikler eller forurensninger med resulterende slaggdannelse. Sintring kan også forekomme ved betydelig lavere temperaturer dersom biobrenselet har et høyt innhold av silisium (se for øvrig kapittel 3.3).

Askeinnholdet i brenselet påvirker den termiske utnyttelsen av biomassen. Biobrensel med lavt innhold av aske er bedre egnet for termisk utnyttelse enn biobrensel med høyt askeinnhold. Dette er fordi et lavt askeinnhold forenkler slaggutmating, asketransport, lagring og avhending. Et høyt askeinnhold i brenselet vil vanligvis føre til høyere støvutslipp, noe som må tas hensyn til ved valg av varmevekslere og bestemmelse av rensesystemer og teknologi for filtrering av partikler i røykgassen.

I denne delen av prosjektet ble 50 askeprøver hentet fra totalt 19 forskjellige biobrenselanlegg i Norge. Installert termisk effekt på disse anleggene er mellom 1,5 MW til 10 MW (Tabell 1).

### 2.2 Bunnaske og flyveaske

Askeprøvene ble, der det var mulig, tatt ut manuelt i transportbåndene for å skille bunn- og flyveaske, da det er vanlig at disse to fraksjonene blandes i transportskruen inn til askecontaineren. Der det ikke var mulig å skille fraksjonene ble det tatt ut prøver av blandasken. Det ble innhentet ca. 1 kg aske for hver prøve fra bedriftene. Hver prøve ble lagt i en lukket plastbeholder for lagring inntil de ble forberedt for analyse på laboratoriet.

De innsamlede prøvene av bunnaske, flyveaske og blandaske er listet i Tabell 1, sammen med en oversikt over termisk effekt og over hvilken type biobrensel som ble benyttet i perioden for prøveuttakene.

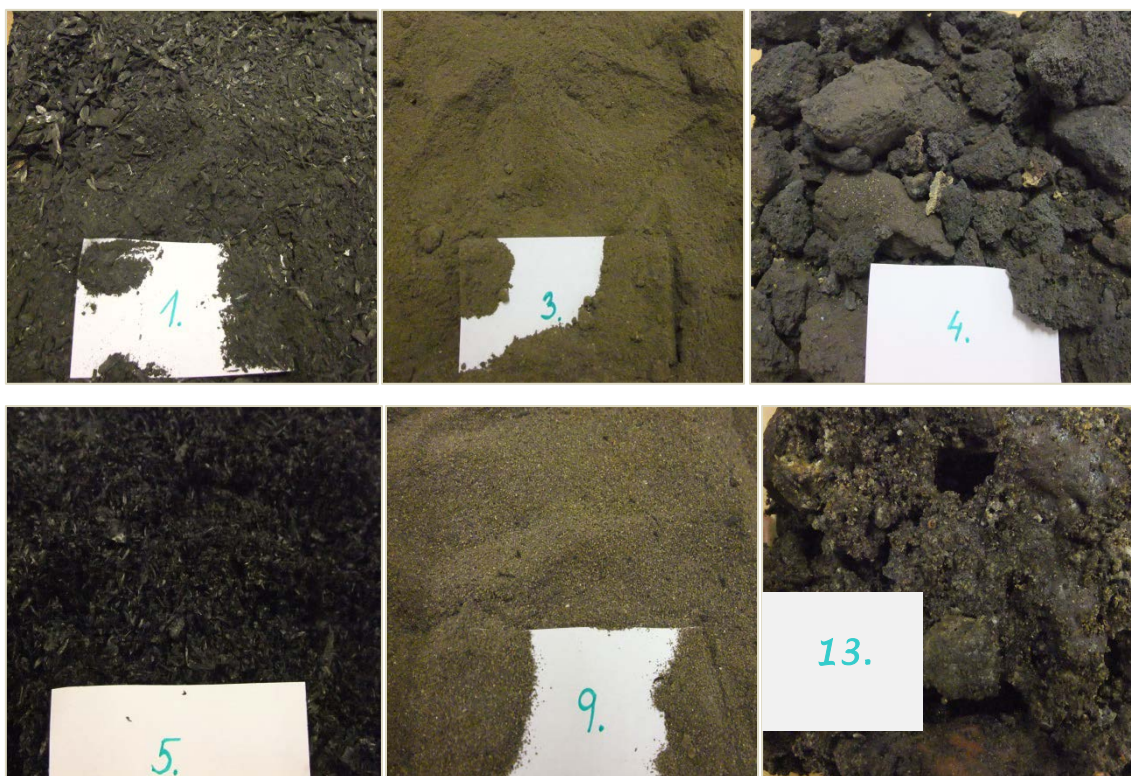
Tabell 1. Treaske fra 50 askeprøver, hentet fra 19 forskjellige bedrifter i Norge i 2012/2013.

| Nr. | Bedrift | Termisk effekt [MW] | Type aske | Biobrenselssortiment              | Innsamlingsdato    |
|-----|---------|---------------------|-----------|-----------------------------------|--------------------|
| 1.  | A       | 4,5                 | Flyveaske | Bark / tørrflis                   | 7. juni 2012       |
| 2.  | A       | 4,5                 | Bunnaske  | Bark / tørrflis                   | 7. juni 2012       |
| 3.  | A       | 4,5                 | Flyveaske | Bark / tørrflis                   | 6. juli 2012       |
| 4.  | A       | 4,5                 | Bunnaske  | Bark / tørrflis                   | 6. juli 2012       |
| 5.  | B       | 5,0                 | Flyveaske | Bark / tørrflis                   | 7. juni 2012       |
| 6.  | B       | 5,0                 | Bunnaske  | Bark / tørrflis                   | 7. juni 2012       |
| 7.  | B       | 5,0                 | Flyveaske | Bark / tørrflis                   | 17. desember 2012  |
| 8.  | B       | 5,0                 | Bunnaske  | Bark / tørrflis                   | 17. desember 2012  |
| 9.  | B       | 5,0                 | Bunnaske  | Bark / tørrflis                   | 4. juli 2013       |
| 10. | B       | 5,0                 | Flyveaske | Bark / tørrflis                   | 7. juli 2013       |
| 11. | C       | 3,5                 | Flyveaske | Bark / rå hoggerflis / rå sagflis | 6. juli 2012       |
| 12. | C       | 3,5                 | Blandaske | Bark / rå hoggerflis / rå sagflis | 6. juli 2012       |
| 13. | C       | 3,5                 | Bunnaske  | Bark / rå hoggerflis / rå sagflis | 6. juli 2012       |
| 14. | C       | 3,5                 | Bunnaske  | Bark / rå hoggerflis / rå sagflis | 17. desember 2012  |
| 15. | D       | 5,5                 | Flyveaske | Bark / tørrflis                   | 13. desember 2012  |
| 16. | D       | 5,5                 | Bunnaske  | Bark / tørrflis                   | 13. desember 2012  |
| 17. | D       | 5,5                 | Blandaske | Bark / tørrflis                   | 13. desember 2012  |
| 18. | E       | 2,77                | Blandaske | Bark / tørrflis                   | 6. juli 2012       |
| 19. | E       | 2,77                | Flyveaske | Bark / tørrflis                   | 6. juli 2012       |
| 20. | F       | 5,5                 | Flyveaske | Bark / tørrflis                   | 22. september 2012 |
| 21. | F       | 5,5                 | Bunnaske  | Bark / tørrflis                   | 22. september 2012 |
| 22. | F       | 5,5                 | Blandaske | Bark / tørrflis                   | 5. juli 2013       |
| 23. | F       | 5,5                 | Flyveaske | Bark / tørrflis                   | 5. juli 2013       |
| 24. | G       | 8,0                 | Bunnaske  | Bark / tørrflis                   | 19. september 2012 |
| 25. | H       | 3,5                 | Bunnaske  | Bark / tørrflis                   | 3. desember 2012   |
| 26. | H       | 3,5                 | Flyveaske | Bark / rå hoggerflis / rå sagflis | 3. desember 2012   |
| 27. | I       | 5,5                 | Bunnaske  | Bark / rå hoggerflis / rå sagflis | 3. desember 2012   |
| 28. | I       | 5,5                 | Flyveaske | Bark / rå hoggerflis / rå sagflis | 3. desember 2012   |
| 29. | J       | 5,0                 | Blandaske | Bark / tørrflis                   | 13. desember 012   |
| 30. | J       | 5,0                 | Blandaske | Bark / tørrflis                   | 14. mars 2013      |
| 31. | J       | 5,0                 | Blandaske | Bark / tørrflis                   | 9. juli 2013       |
| 32. | K       | 10                  | Flyveaske | Bark / Tørrflis                   | 13. desember 2012  |
| 33. | K       | 10                  | Bunnaske  | Bark / Tørrflis                   | 13. desember 2012  |
| 34. | K       | 10                  | Bunnaske  | Bark / Tørrflis                   | 3. juli 2013       |
| 35. | L       | 3,8                 | Bunnaske  | Bark / tørrflis                   | 18. juli 2013      |
| 36. | M       | 8,0                 | Bunnaske  | Flis / bark                       | 19. september 2012 |
| 37. | M       | 8,0                 | Flyveaske | Flis / bark                       | 19. september 2012 |
| 38. | M       | 8,0                 | Flyveaske | Flis / bark                       | 18. desember 2012  |
| 39. | M       | 8,0                 | Bunnaske  | Flis / bark                       | 18. desember 2012  |



|     |   |     |            |                                               |                    |
|-----|---|-----|------------|-----------------------------------------------|--------------------|
| 40. | N | 4,5 | Bunnaske   | Bark / flis / rotreduserflis                  | 13. september 2012 |
| 41. | O | 7,5 | Flyveaske  | Flis                                          | 27. november 2012  |
| 42. | O | 7,5 | Bunnaske   | Flis                                          | 27. november 2012  |
| 43. | P | 1,5 | Blandaske  | Stammevedflis / heltreflis /<br>celluloseflis | 22. november 2012  |
| 44. | R | 3,0 | Blandaske  | Flis / kornavrens                             | 3. desember 2012   |
| 45. | S | 2,0 | Blandaske  | Stammevedflis / heltreflis /<br>celluloseflis | 3. desember 2012   |
| 46. | T | 8,0 | Flyveaske1 | Briketter                                     | 19. mars 2013      |
| 47. | T | 8,0 | Flyveaske2 | Briketter                                     | 19. mars 2013      |
| 48. | T | 8,0 | Flyveaske3 | Skogflis                                      | 19. mars 2013      |
| 49. | T | 8,0 | Flyveaske4 | Skogflis                                      | 19. mars 2013      |
| 50. | T | 8,0 | Bunnaske   | Briketter                                     | 19. mars 2013      |

Figur 3 viser bilder fra noen av de innsamlede askeprøvene benyttet i denne undersøkelsen.





Figur 3. Treaske (bunnaske, flyveaske, blandaske) fra noen av de 50 prøvene hentet fra 19 forskjellige bedrifter i Norge i 2012/2013.

### 2.3 Metoder for prøveuttak av aske

Bestemmelse av sammensetningen av hovedelementer (næringsstoffer) (P, Ca, Mg, K, S, Si, Zn) og sporelementer (tungmetaller) (As, Cd, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, V) i treaskene ble gjort etter oppløsning i hydrogenperoksid  $H_2O_2$  (30 %), salpetersyre  $HNO_3$  (65 %), flussyre HF (40 %) og nøytralisert i borsyre  $H_3BO_3$  (4 %) og deionisert vann med samtidig ICP-OES (Induktiv Koblet Plasma – Optisk Emisjons Spektrografi) etter følgende standarder:

- NS 4770 (1994) Vannundersøkelse - Bestemmelse av metaller ved atomabsorpsjons- spektrofotometri i flamme - Generelle prinsipper og retningslinjer
- NS-EN 15290 (2011) Fast biobrensel - Bestemmelse av hovedelementer - Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na og Ti
- NS-EN 15297 (2011) Fast biobrensel - Bestemmelse av sporelementer - As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, V og Zn

Askene ble videre analysert etter følgende standarder:

- NS-EN 15104 (2011) Fast biobrensel - Bestemmelse av totalt innhold av karbon, hydrogen og nitrogen - Instrumentelle metoder
- NS-EN 13037 (2011) Jordforbedringsmidler og dyrkingsmedier - Bestemmelse av pH
- NS-EN 15289 (2011) Fast biobrensel - Bestemmelse av totalt innhold av svovel og klor

## 3 RESULTATER OG DISKUSJON

Resultatene fra analysene av askeprøvene er gitt i kapittel 3.1 og 3.2. I kapittel 3.3 omtales askerelaterte problemer i forbrenningsprosessen generelt, og resultatene fra analysene av 50 treaske prøvene fra 19 forskjellige bedrifter diskuteres i forhold til dette. I kapittel 3.4 oppsummeres resultatene fra de kjemiske analysene av askene.

### 3.1 Elementsammensetningen i askeprøvene

Alt naturlig trevirke inneholder tungmetaller. Mye av disse tungmetallene blir igjen i asken, og er da kraftig oppkonsentrert. Asken kan også inneholde eventuelle forurensninger som fantes i biobrenselet. Videre kan forbrenning i seg selv generere farlige organiske

forbindelser, som PAH og dioksiner. I denne rapporten omtales noen av de forbindelsene man bør være mest oppmerksom på i forbindelse med sluttbehandling av aske.

Elementsammensetningen og mengden av uorganiske forbindelser som dannes under forbrenningsprosessen vil variere med hvilket råstoff som benyttes, filterteknologi, og ulike prosessparametre under forbrenningen. Forbrenningstemperaturen vil påvirke mengden flyktige alkalier som fjernes og mengden smeltemasse som er til stede (Demeyer et al., 2001).

Askeprøvene som ble samlet inn ble analysert med ICP-OES etter kjemisk behandling. Tabell 2 viser resultatene av innholdet av hovedelementer (næringsstoffer) og Tabell 3 viser resultatene av innholdet av sporelementer (tungmetaller). Konsentrasjonen av elementer i askeprøvene er angitt i tørrstoff (TS).

Tabell 2. Konsentrasjoner av hovedelementer (g/kg TS) i treaske fra 50 askeprøver, hentet fra 19 forskjellige bedrifter i Norge.

| Nr. | Bedrift | Type aske | Aluminium<br>(Al) | Kalsium<br>(Ca) | Kalium<br>(K) | Magnesium<br>(Mg) | Fosfor<br>(P) | Svovel<br>(S) | Silisium<br>(Si) | Sink<br>(Zn) |
|-----|---------|-----------|-------------------|-----------------|---------------|-------------------|---------------|---------------|------------------|--------------|
| 1.  | A       | Flyveaske | 6,2               | 185,2           | 52,4          | 19,6              | 16,6          | 5,6           | 24,0             | 3,7          |
| 2.  | A       | Bunnaske  | 8,0               | 321,2           | 61,5          | 28,0              | 18,5          | 2,5           | 32,8             | 0,2          |
| 3.  | A       | Flyveaske | 1,1               | 53,0            | 3,6           | 5,5               | 3,1           | 0,3           | 7,0              | 0,3          |
| 4.  | A       | Bunnaske  | 14,7              | 219,2           | 75,1          | 19,2              | 11,8          | 1,9           | 54,4             | 0,3          |
| 5.  | B       | Flyveaske | 7,7               | 224,2           | 85,3          | 23,7              | 17,5          | 9,1           | 35,6             | 5,5          |
| 6.  | B       | Bunnaske  | 8,9               | 437,2           | 8,2           | 37,3              | 24,2          | 0,9           | 40,7             | 0,1          |
| 7.  | B       | Flyveaske | 0,8               | 106,9           | 36,6          | 10,9              | 18,6          | 4,9           | 12,7             | 3,3          |
| 8.  | B       | Bunnaske  | 1,8               | 60,0            | 26,8          | 14,3              | 17,9          | 0,4           | 35,1             | 0,1          |
| 9.  | B       | Bunnaske  | 6,8               | 262,8           | 46,4          | 23,2              | 12,7          | 1,0           | 55,0             | 0,1          |
| 10. | B       | Flyveaske | 3,5               | 241,7           | 53,0          | 21,9              | 12,5          | 8,5           | 33,8             | 4,2          |
| 11. | C       | Flyveaske | 36,9              | 160,2           | 55,8          | 16,0              | 10,8          | 4,4           | 132,1            | 1,6          |
| 12. | C       | Blandaske | 27,2              | 180,6           | 41,5          | 18,1              | 10,9          | 0,8           | 91,4             | 0,4          |
| 13. | C       | Bunnaske  | 36,0              | 194,9           | 48,7          | 21,5              | 10,8          | 0,3           | 113,6            | 0,1          |
| 14. | C       | Bunnaske  | 20,6              | 58,2            | 54,3          | 8,3               | 4,4           | 0,3           | 94,8             | 0,3          |
| 15. | D       | Flyveaske | 57,1              | 157,0           | 33,8          | 31,3              | 7,1           | 11,5          | 116,8            | 6,5          |
| 16. | D       | Bunnaske  | 71,9              | 113,6           | 36,5          | 21,8              | 4,2           | 1,1           | 158,8            | 0,6          |
| 17. | D       | Blandaske | 80,7              | 106,1           | 30,7          | 23,5              | 2,9           | 1,2           | 146,4            | 0,5          |
| 18. | E       | Blandaske | 7,4               | 251,5           | 40,5          | 31,7              | 19,9          | 2,5           | 23,8             | 1,0          |
| 19. | E       | Flyveaske | 6,4               | 279,6           | 90,7          | 21,2              | 27,0          | 6,9           | 22,6             | 1,5          |
| 20. | F       | Flyveaske | 6,7               | 182,5           | 84,4          | 13,8              | 13,0          | 12,1          | 27,3             | 5,2          |
| 21. | F       | Bunnaske  | 20,2              | 349,3           | 75,9          | 27,4              | 22,4          | 5,0           | 57,5             | 0,0          |
| 22. | F       | Blandaske | 5,8               | 173,0           | 66,3          | 20,1              | 14,8          | 1,5           | 120,1            | 0,4          |
| 23. | F       | Flyveaske | 5,8               | 236,7           | 64,8          | 25,7              | 24,4          | 0,7           | 97,4             | 0,1          |
| 24. | G       | Bunnaske  | 13,9              | 356,5           | 48,9          | 26,2              | 16,8          | 0,9           | 54,3             | 0,3          |
| 25. | H       | Bunnaske  | 22,1              | 245,9           | 39,0          | 20,9              | 12,7          | 2,3           | 73,9             | 0,8          |
| 26. | H       | Flyveaske | 13,3              | 298,5           | 49,2          | 21,3              | 14,5          | 7,9           | 29,8             | 4,2          |
| 27. | I       | Bunnaske  | 15,1              | 358,4           | 29,8          | 31,0              | 16,2          | 1,0           | 46,1             | 0,2          |

|     |   |            |      |       |       |      |      |      |      |      |
|-----|---|------------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|
| 28. | I | Flyveaske  | 12,2 | 175,4 | 39,0  | 17,2 | 10,6 | 3,7  | 31,8 | 2,0  |
| 29. | J | Blandaske  | 6,6  | 92,5  | 24,7  | 17,0 | 11,0 | 3,3  | 5,7  | 2,1  |
| 30. | J | Blandaske  | 3,5  | 212,4 | 34,3  | 18,6 | 9,7  | 3,3  | 6,0  | 1,6  |
| 31. | J | Blandaske  | 2,4  | 252,9 | 21,9  | 23,2 | 10,6 | 2,9  | 45,7 | 1,3  |
| 32. | K | Flyveaske  | 30,0 | 153,3 | 32,1  | 34,5 | 15,6 | 5,1  | 0,9  | 1,8  |
| 33. | K | Bunnaske   | 15,5 | 104,2 | 53,3  | 19,2 | 11,4 | 0,6  | 19,1 | 0,4  |
| 34. | K | Bunnaske   | 17,5 | 104,9 | 22,9  | 13,1 | 5,4  | 3,1  | 17,8 | 0,9  |
| 35. | L | Bunnaske   | 4,3  | 145,9 | 27,3  | 13,8 | 6,7  | 0,9  | 51,8 | 0,4  |
| 36. | M | Bunnaske   | 13,9 | 350,2 | 56,6  | 23,1 | 12,3 | 1,5  | 40,8 | 0,6  |
| 37. | M | Flyveaske  | 5,4  | 345,5 | 100,6 | 22,7 | 14,0 | 25,7 | 16,3 | 11,9 |
| 38. | M | Flyveaske  | 26,3 | 49,5  | 51,9  | 8,8  | 14,4 | 9,8  | 1,2  | 5,0  |
| 39. | M | Bunnaske   | 14,7 | 135,7 | 28,7  | 33,3 | 16,5 | 0,5  | 1,5  | 0,1  |
| 40. | N | Bunnaske   | 11,6 | 185,4 | 23,6  | 12,6 | 6,3  | 2,2  | 39,7 | 0,9  |
| 41. | O | Flyveaske  | 35,2 | 164,3 | 42,3  | 24,3 | 11,9 | 8,9  | 0,7  | 4,0  |
| 42. | O | Bunnaske   | 69,1 | 150,2 | 46,5  | 20,0 | 7,5  | 0,8  | 0,6  | 0,3  |
| 43. | P | Blandaske  | 6,5  | 115,9 | 61,1  | 18,3 | 15,5 | 2,5  | 0,9  | 0,9  |
| 44. | R | Blandaske  | 25,5 | 72,3  | 99,7  | 34,2 | 39,0 | 0,9  | 0,7  | 0,1  |
| 45. | S | Blandaske  | 16,2 | 104,6 | 97,3  | 32,4 | 10,1 | 5,1  | 1,4  | 1,4  |
| 46. | T | Flyveaske1 | 2,4  | 98,0  | 264,5 | 18,2 | 6,2  | 41,9 | 4,9  | 7,7  |
| 47. | T | Flyveaske2 | 4,3  | 145,3 | 45,4  | 28,0 | 9,4  | 4,9  | 13,0 | 1,0  |
| 48. | T | Flyveaske3 | 1,6  | 90,1  | 283,0 | 18,6 | 5,7  | 41,6 | 1,9  | 7,3  |
| 49. | T | Flyveaske4 | 4,0  | 114,8 | 36,1  | 23,0 | 7,5  | 3,5  | 10,8 | 0,7  |
| 50. | T | Bunnaske   | 5,5  | 204,7 | 79,0  | 25,6 | 10,7 | 1,4  | 97,4 | 0,4  |

Tabell 3. Konsentrasjoner av sporelementer (mg/kg TS) i treaske fra 50 askeprøver, hentet fra 19 forskjellige bedrifter i Norge.

| Nr. | Bedrift | Type aske | Arsen (As) | Kadmium (Cd) | Klor (Cl) | Kobolt (Co) | Krom (Cr) | Kobber (Cu) | Molybden (Mo) | Nikkel (Ni) | Bly (Pb) | Vanadium (V) |
|-----|---------|-----------|------------|--------------|-----------|-------------|-----------|-------------|---------------|-------------|----------|--------------|
| 1.  | A       | Flyveaske | 0,6        | 21,9         | 3147,5    | 8,9         | 17,1      | 74,3        | 6,5           | 34,2        | 14,5     | 12,9         |
| 2.  | A       | Bunnaske  | 0,6        | 3,0          | 103,3     | 14,4        | 28,1      | 71,1        | 8,7           | 56,6        | 11,9     | 9,6          |
| 3.  | A       | Flyveaske | 0,1        | 1,7          | 192,2     | 0,1         | 4,7       | 25,7        | 1,1           | 9,8         | 9,5      | 2,2          |
| 4.  | A       | Bunnaske  | 0,1        | 0,6          | 320,8     | 11,1        | 32,0      | 105,8       | 4,9           | 41,6        | 42,7     | 17,7         |
| 5.  | B       | Flyveaske | 7,8        | 25,9         | 5149,3    | 9,3         | 85,8      | 122,1       | 6,5           | 23,7        | 30,6     | 9,3          |
| 6.  | B       | Bunnaske  | 0,6        | 3,0          | 0,1       | 18,6        | 127,9     | 20,7        | 6,5           | 50,3        | 11,9     | 10,1         |
| 7.  | B       | Flyveaske | 0,7        | 13,9         | 2451,7    | 13,9        | 36,4      | 89,5        | 0,4           | 42,8        | 25,8     | 10,2         |
| 8.  | B       | Bunnaske  | 0,7        | 0,2          | 0,0       | 16,6        | 50,8      | 59,2        | 0,4           | 46,4        | 24,0     | 16,5         |
| 9.  | B       | Bunnaske  | 0,7        | 0,2          | 100,2     | 16,8        | 97,4      | 120,5       | 0,4           | 43,7        | 25,0     | 28,2         |
| 10. | B       | Flyveaske | 0,7        | 25,9         | 2334,0    | 14,3        | 85,2      | 162,0       | 7,2           | 39,3        | 55,2     | 22,6         |
| 11. | C       | Flyveaske | 0,1        | 17,1         | 251,4     | 12,8        | 31,2      | 160,4       | 4,6           | 20,2        | 46,9     | 37,7         |
| 12. | C       | Blandaske | 0,1        | 3,1          | 57,6      | 11,7        | 25,1      | 155,5       | 8,4           | 23,5        | 60,1     | 30,8         |
| 13. | C       | Bunnaske  | 0,1        | 0,7          | 1,0       | 10,0        | 31,1      | 108,0       | 1,2           | 31,9        | 63,2     | 41,1         |
| 14. | C       | Bunnaske  | 0,7        | 0,2          | 8,0       | 11,2        | 57,6      | 186,8       | 2,5           | 12,7        | 50,6     | 35,2         |
| 15. | D       | Flyveaske | 0,1        | 39,4         | 3401,1    | 30,2        | 943,0     | 778,2       | 15,7          | 39,9        | 211,2    | 17,0         |
| 16. | D       | Bunnaske  | 0,6        | 3,2          | 9,8       | 39,4        | 714,4     | 427,3       | 4,2           | 32,8        | 41,9     | 17,7         |
| 17. | D       | Blandaske | 0,1        | 5,1          | 75,9      | 45,3        | 567,2     | 1430,0      | 3,6           | 26,9        | 22,4     | 24,0         |
| 18. | E       | Blandaske | 0,1        | 5,4          | 469,0     | 14,0        | 19,3      | 251,8       | 0,1           | 28,1        | 269,0    | 10,1         |
| 19. | E       | Flyveaske | 2,0        | 8,6          | 1623,2    | 17,5        | 28,3      | 402,8       | 4,3           | 27,9        | 45,1     | 9,9          |
| 20. | F       | Flyveaske | 0,3        | 25,7         | 3437,0    | 8,2         | 23,3      | 170,2       | 2,7           | 20,7        | 35,3     | 7,4          |
| 21. | F       | Bunnaske  | 0,1        | 0,8          | 0,0       | 13,7        | 38,2      | 778,1       | 0,8           | 31,9        | 14,2     | 9,9          |
| 22. | F       | Blandaske | 0,7        | 0,2          | 56,7      | 9,7         | 52,7      | 117,9       | 0,4           | 21,7        | 120,0    | 12,9         |
| 23. | F       | Flyveaske | 0,7        | 0,2          | 3221,0    | 10,0        | 32,1      | 133,6       | 0,4           | 22,5        | 35,7     | 12,4         |
| 24. | G       | Bunnaske  | 0,1        | 1,3          | 9,3       | 18,9        | 61,3      | 107,6       | 0,1           | 68,8        | 13,2     | 17,3         |
| 25. | H       | Bunnaske  | 3,6        | 4,7          | 188,1     | 11,7        | 24,7      | 102,0       | 1,3           | 45,7        | 22,4     | 21,0         |
| 26. | H       | Flyveaske | 7,6        | 21,0         | 2928,0    | 13,7        | 27,5      | 137,2       | 3,5           | 57,4        | 30,6     | 18,4         |
| 27. | I       | Bunnaske  | 0,8        | 0,5          | 12,6      | 19,6        | 34,4      | 89,7        | 0,8           | 70,0        | 11,7     | 19,1         |



|     |   |            |      |      |         |      |        |       |      |       |       |      |
|-----|---|------------|------|------|---------|------|--------|-------|------|-------|-------|------|
| 28. | I | Flyveaske  | 2,1  | 11,0 | 1042,0  | 14,6 | 66,2   | 143,1 | 4,7  | 40,9  | 20,9  | 17,8 |
| 29. | J | Blandaske  | 0,7  | 4,8  | 5104,4  | 13,7 | 7,9    | 65,8  | 2,6  | 29,4  | 21,2  | 12,2 |
| 30. | J | Blandaske  | 0,7  | 3,2  | 4505,1  | 16,2 | 8,9    | 68,8  | 0,4  | 17,2  | 89,0  | 3,9  |
| 31. | J | Blandaske  | 0,7  | 2,4  | 1544,4  | 17,9 | 28,6   | 82,3  | 0,4  | 30,4  | 18,6  | 13,1 |
| 32. | K | Flyveaske  | 0,7  | 15,5 | 1261,5  | 13,4 | 57,5   | 115,0 | 0,4  | 41,4  | 34,0  | 2,4  |
| 33. | K | Bunnaske   | 0,7  | 0,2  | 22,2    | 12,6 | 26,6   | 119,5 | 0,4  | 34,7  | 23,0  | 1,3  |
| 34. | K | Bunnaske   | 0,7  | 8,4  | 20,6    | 12,6 | 51,7   | 84,7  | 0,4  | 28,4  | 47,4  | 42,9 |
| 35. | L | Bunnaske   | 0,7  | 0,2  | 18,2    | 11,2 | 18,9   | 57,5  | 0,4  | 26,9  | 97,0  | 18,1 |
| 36. | M | Bunnaske   | 0,1  | 1,3  | 17203,0 | 16,2 | 98,3   | 99,1  | 0,1  | 43,1  | 13,1  | 23,6 |
| 37. | M | Flyveaske  | 2,6  | 38,6 | 130,4   | 13,5 | 57,3   | 174,6 | 2,6  | 42,8  | 54,2  | 13,0 |
| 38. | M | Flyveaske  | 0,7  | 17,2 | 5721,3  | 14,3 | 29,2   | 109,8 | 0,4  | 40,0  | 28,4  | 0,1  |
| 39. | M | Bunnaske   | 0,7  | 3,3  | 0,0     | 19,0 | 57,8   | 76,6  | 0,4  | 52,4  | 17,5  | 3,4  |
| 40. | N | Bunnaske   | 0,1  | 5,5  | 500,1   | 25,0 | 118,7  | 78,7  | 2,8  | 36,0  | 22,2  | 11,6 |
| 41. | O | Flyveaske  | 10,0 | 24,6 | 3461,2  | 9,8  | 89,4   | 114,6 | 7,9  | 33,3  | 83,4  | 11,2 |
| 42. | O | Bunnaske   | 0,7  | 2,6  | 113,0   | 12,1 | 52,2   | 93,2  | 3,8  | 19,9  | 43,3  | 19,2 |
| 43. | P | Blandaske  | 0,7  | 3,9  | 424,3   | 16,2 | 13,3   | 124,1 | 2,7  | 49,2  | 25,5  | 1,1  |
| 44. | R | Blandaske  | 0,7  | 1,5  | 247,3   | 5,8  | 44,0   | 71,8  | 5,1  | 14,4  | 22,0  | 8,5  |
| 45. | S | Blandaske  | 6,4  | 11,7 | 1272,3  | 17,3 | 1252,0 | 203,7 | 3,9  | 71,3  | 64,2  | 2,3  |
| 46. | T | Flyveaske1 | 27,9 | 58,3 | 12734,0 | 6,2  | 237,9  | 545,6 | 13,7 | 19,6  | 452,8 | 6,6  |
| 47. | T | Flyveaske2 | 0,7  | 21,3 | 1208,7  | 6,1  | 135,8  | 102,4 | 0,4  | 13,9  | 38,1  | 6,3  |
| 48. | T | Flyveaske3 | 58,8 | 57,2 | 13831,1 | 4,4  | 306,4  | 605,5 | 15,4 | 15,4  | 288,3 | 2,7  |
| 49. | T | Flyveaske4 | 0,7  | 14,7 | 746,4   | 4,7  | 105,4  | 72,4  | 0,4  | 11,1  | 26,6  | 4,8  |
| 50. | T | Bunnaske   | 0,7  | 1,3  | 12,13   | 21,6 | 473,6  | 173,6 | 5,4  | 271,1 | 26,9  | 41,8 |

### 3.1.1 KADMIUM

Når man vurder gjenbruk av treaske, er det grunn til å være særlig oppmerksom på kadmiumkonsentrasjon, som har høy løselighet og er svært giftig for mange organismer (Lindkvist, 2000). Dersom tilgangen til kalium er god – noe den ofte er i for eksempel jordbruksområder (gjødsel) – tas det lett opp av planter. Salix-arter, som er mye benyttet til energiskog, har en særlig stor evne til å ta opp kadmium (Lindkvist, 2000). I noen områder kan det være stort atmosfærisk nedfall av kadmium, hovedsakelig fra forbrenning av fossilt brennstoff (Narodoslawsky og Odenberger, 1996).

Basert på resultatene presentert i Tabell 3 ser man tydelig at det er en oppkonsentrasjon av kadmium i flyveaskene (noe som også var forventet). Flyveaskene nr. 1, 5, 10, 15, 20, 38, 41 og 48 hadde veldig høye kadmiumnivåer (over 20 mg/kg TS). Maksimalt tillatt nivå for kadmium er 0,4 mg/kg TS for Kvalitetsklasse 0, og opp til 5,0 mg/kg TS for Kvalitetsklasse III (Forskrift om gjødselvarer, 2003). Disse flyveaskene vil derfor ikke kunne brukes på jordbruksarealer, og heller ikke på grøntarealer. De laveste nivåene av kadmium ble målt i bunnaskene nr. 8, 9, 14, 33 og 35 (0,2 mg/kg TS), noe som er verdt å merke seg. Bunnasken nr. 40 har for høy Cd-konsentrasjon (5,5 mg/kg TS) og ligger altså noe over maksimumsgrensen for Kvalitetsklasse III.

Det meste av kadmiumet vil følge flyveasken ved forbrenning av biobrensler på grunn av metallens høye flyktighet (Narodoslawsky og Odenberger, 1996). I større anlegg er det mulig å utføre termisk kadmiumrensing til relativt lave kostnader (Lindkvist, 2000).

### 3.1.2 BLY

Resultatene viser at det er en oppkonsentrasjon av bly i flyveaskene sammenlignet med bunnaskene. De høyeste konsentrasjonene av bly ble målt i flyveaskene fra prøve nr. 15, 46, 48 og i blandasken fra prøve nr. 18 med Pb-verdiene over 200 mg/kg TS. Disse prøvene overholder kravene i Forskrift om gjødselvarer (2003). Bunnaskene nr. 2, 6, 21, 24, 27 og 36 hadde de laveste bly nivåene (11,7 mg/kg TS – 13,2 mg/kg TS). Maksimalt tillatt nivå for bly er 40 mg/kg for Kvalitetsklasse 0, og opp til 200 mg/kg TS for Kvalitetsklasse III.

### 3.1.3 NIKKEL

Nikkelkonsentrasjonene i de fleste askeprøvene var ganske lave, mens Ni-nivået i bunnasken nr. 50 (271,1 mg/kg TS) overskrider grenseverdiene for nikkelkonsentrasjon i Forskrift om gjødselvarer (2003). Maksimalt tillatt nivå for nikkel er 20 mg/kg for Kvalitetsklasse 0, og opp til 80 mg/kg TS for Kvalitetsklasse III.

### 3.1.4 KROM

Krom er et metall som kan foreligge i seks ulike oksidasjonstrinn. De to vanligste oksidasjonstrinnene er Cr-III og Cr-VI, også kalt treverdig og seksverdig krom. Cr-III er et essensielt sporstoff for mennesker og dyr, og er heller ikke særlig giftig i høye konsentrasjoner. Cr-VI er derimot meget giftig, kjent for å kunne medføre allergier og kan også føre til utvikling av kreft. I trær foreligger det meste av krommet som det ufarlige Cr-III, men under forbrenningsprosessen vil en del av dette krommet oksideres til Cr-VI. Ved høye pH-verdier har Cr-III lav løselighet, mens Cr-VI har høy løselighet. Ved forbrenning av for eksempel kobber/krom/arsen-impregnert trevirke, men også ved forbrenning av helt ren ved, har man observert innhold av Cr som har oversteget tyske grenseverdier for utlekning fra avfall (Pohlandt-Schwandt, 1999).

Kromkonsentrasjonen varierte betydelig for bunnaske-, flyveaske- og blandaskeprøvene. I noen askeprøver ble de målt svært høye Cr-nivåer (prøve nr. 15, 16, 17, 44, 45, 47 og 49). Disse prøvene har verdier som overskrider grenseverdien for krom i Kvalitetsklasse III på 150 mg/kg TS, og vil derfor ikke kunne brukes på jordbruksarealer, og heller ikke på grøntanlegg. Et høyt kromnivå kan være relatert til korrosjonsprosesser i forbrenningskammeret (Huang et al., 1992; Hakkila, 1989).

Det finnes ulike metoder for å fjerne Cr-VI fra aske, blant annet har oppløsning i destillert vann vist seg å være effektivt når konsentrasjonene ikke er for høye (Pohlandt-Schwandt, 1999). Ved høyere konsentrasjoner kan formaldehyd benyttes til rensing (Pohlandt-Schwandt et al., 2001).

#### 3.1.5 KOBBER

Kobberkonsentrasjonen varierte mye i alle askeprøvene. Den største andelen har en konsentrasjon som er innenfor kravet til Kvalitetsklasse I på 150 mg/kg TS. Maksimalt tillatt nivå for kobber er 50 mg/kg for Kvalitetsklasse 0, og opp til 1000 mg/kg TS for Kvalitetsklasse III. De laveste konsentrasjonene av kobber ble målt i bunnaske prøvene nr. 6, 8 og 35 (mindre enn 60 mg/kg TS). De fleste flyveaskene har høyere Cu-nivåer enn bunnaskene.

#### 3.1.6 ARSEN

De fleste flyveaskene hadde høyere konsentrasjoner av arsen sammenlignet med bunnaskene. Høye verdier av arsen kan først og fremst forekomme når man forbrenner kobber/krom/arsen-impregnert trevirke. En amerikansk studie viste at dersom biobrenselet består av mer enn 5 % kobber/krom/arsen-impregnert trevirke, vil asken ha et så høyt innhold av arsen at den må karakteriseres som spesialavfall i henhold til amerikanske grenseverdier (Solo-Gabriele et al., 2002). Den samme studien påpekte at ikke noe kobber/krom/arsen-impregnert trevirke kunne blandes i brenselet dersom asken skulle imøtekomme gjeldende grenseverdier for spredning på jordbruksarealer etc.

#### 3.1.7 SINK

Sinknivåene var vesentlig lavere i alle bunnaskene sammenlignet med flyveaskeprøvene. Zn-konsentrasjonen i bunnaskene var fra 0,0-0,9 g/kg TS. Det var også et lavt sinkinnhold i flyveaskeprøve nr. 3, 23, 32 og 49. Sinkverdier i flyveaskene nr. 46 (7,3 g/kg TS) og nr. 48 (7,7 g/kg TS) er svært høye, og oppfyller ikke kravene i dagens regelverk. Maksimalt tillatt nivå for sink er 150 mg/kg TS (0,15 g/kg TS) for Kvalitetsklasse 0, og opp til 1500 mg/kg TS (1,5 g/kg TS) for Kvalitetsklasse III. Et høyt sinknivå kan være relatert til korrosjonsprosesser i forbrenningskammeret (Huang et al., 1992; Hakkila, 1989).

#### 3.1.8 KALSIMUM OG KALIUM

Bunnaskeprøve nr. 6 hadde det høyest målte kalsiuminnholdet (437,2 g/kg TS). Denne asken hadde også det høyeste fosforinnholdet (24,2 g/kg TS), noe som er svært positivt. Andre bunnasker med høyt Ca-nivå er nr. 27 (358,4 g/kg TS), nr. 24 (356,5 g/kg TS) og nr. 36 (350,2 g/kg TS). Kaliumkonsentrasjon varierte betydelig mellom askeprøvene. De høyeste kaliumverdiene ble funnet i prøve nr. 50 (79,0 g/kg TS), nr. 21 (75,9 g/kg TS) og nr. 4 (75,1 g/kg TS).

Høye konsentrasjoner av kalsium og kalium gjør asken en potensiell kandidat for tilsetning til grøntarealer jord for tilførsel av næringsstoffer, økning av pH, samt at de

eventuelt kan gi en tilveksteffekt. Kaliumkonsentrasjonen er som forventet noe lavere i flyveaskene enn bunnaskene, da flyveasker generelt har mindre hovedelementer enn bunnasker (Hakkila og Kalaja, 1983). Det ble målt høye kaliumkonsentrasjoner i flyveaske prøve nr. 46 (264,5 g/kg TS) og nr. 48 (283,0 g/kg TS).

#### 3.1.9 MAGNESIUM

Resultatene i Tabell 2 viser at de fleste bunnaskene inneholder høyere magnesiumnivå enn de flyveaskene. Et høyt nivå av magnesium i bunnaskeprøve nr. 6 (37,3 g/kg TS) gjør at denne asken kan benyttes som gjødseltilsetning i grøntanlegg. Denne typen av aske er blant annet egnet for nitrogenrike torvmyrer som har lavt innhold av andre næringsstoffer (Kuokkanen et al., 2009).

#### 3.1.10 SILISIUM

Det ble målt mye høyere silisiumkonsentrasjoner i bunnaskene enn i flyveaskene. Det høyeste Si-innholdet hadde bunnaskeprøve nr. 16 (158,8 g/kg TS). Denne bedriften benytter bark og tørrflis som råstoff til forbrenningen. Someswhar (1996) har funnet at silisiumnivået kan være høyt i aske fra biobrensel som inneholder bark på grunn av sand, grus og andre forurensninger som setter seg i barken under tømmerhogst og transport.

#### 3.1.11 ANDRE TUNGMETALLER

Man skal være oppmerksom på veldig høye konsentrasjoner av andre tungmetaller i asken. Høye verdier kan for eksempel komme ved forbrenning av impregnert eller malt trevirke (rivningsvirke) eller trevirke fra skog der det har vært stort nedfall av tungmetaller (Trømborg, 2011; Bioenergi 2001).

Holmgren et al. (2000) understreker at på grunn av antropogene aktiviteter, kan vi forvente en økning i konsentrasjonen av en rekke andre elementer, som platinum-metaller og lantanider, i skogen (grøntarealer) – og dermed også i treasken. Det vil derfor være nødvendig at også slike elementer inkluderes i fremtidige studier.

### 3.2 Totalt organisk karbon (TOC) og pH-verdi

Elementer av karbon, nitrogen, svovel og klorider finnes i begrensede mengder i asken. Disse elementene må tas hensyn til da de i ulik grad kan ha innvirkning på både komponenter i forbrenningsanlegget og på askekvaliteten (Obernberger og Thek, 2010).

Totalt karboninnhold ble målt ved at prøvene ble forbrent i oksygenatmosfære til aske og forbrenningsgasser. Massefraksjoner av karbondioksid, vanndamp og nitrogen i gasstrømmen ble deretter bestemt kvantitativt ved instrumentell gassanalyse (NS-EN 15104, 2009). Resultatene er vist i Tabell 4.

Tabell 4. pH, karboninnhold og nitrogeninnhold av treaske fra 50 askeprøver, hentet fra 19 forskjellige bedrifter i Norge.

| Nr. | Bedrift | Type aske | pH   | C (%) | N (%) |
|-----|---------|-----------|------|-------|-------|
| 1.  | A       | Flyveaske | 12,3 | 18,5  | 0,15  |

|     |   |            |      |      |      |
|-----|---|------------|------|------|------|
| 2.  | A | Bunnaske   | 12,5 | 4,1  | 0,01 |
| 3.  | A | Flyveaske  | 9,6  | 74,9 | 0,20 |
| 4.  | A | Bunnaske   | 12,7 | 7,6  | 0,08 |
| 5.  | B | Flyveaske  | 12,5 | 24,2 | 0,11 |
| 6.  | B | Bunnaske   | 11,6 | 0,3  | 0,00 |
| 7.  | B | Flyveaske  | 13,0 | 9,6  | 0,10 |
| 8.  | B | Bunnaske   | 12,8 | 1,6  | 0,00 |
| 9.  | B | Bunnaske   | 13,0 | 0,8  | 0,01 |
| 10. | B | Flyveaske  | 12,9 | 12,9 | 0,10 |
| 11. | C | Flyveaske  | 11,9 | 0,9  | 0,04 |
| 12. | C | Blandaske  | 11,9 | 9,6  | 0,01 |
| 13. | C | Bunnaske   | 12,0 | 1,8  | 0,01 |
| 14. | C | Bunnaske   | 12,8 | 0,7  | 0,08 |
| 15. | D | Flyveaske  | 12,7 | 2,9  | 0,10 |
| 16. | D | Bunnaske   | 12,5 | 0,4  | 0,00 |
| 17. | D | Blandaske  | 12,5 | 1,1  | 0,00 |
| 18. | E | Blandaske  | 12,0 | 10,7 | 0,02 |
| 19. | E | Flyveaske  | 12,5 | 5,5  | 0,01 |
| 20. | F | Flyveaske  | 12,6 | 31,1 | 0,18 |
| 21. | F | Bunnaske   | 12,1 | 0,7  | 0,00 |
| 22. | F | Blandaske  | 12,6 | 3,8  | 0,10 |
| 23. | F | Flyveaske  | 12,7 | 0,5  | 0,13 |
| 24. | G | Bunnaske   | 12,2 | 1,2  | 0,00 |
| 25. | H | Bunnaske   | 12,6 | 11,9 | 0,11 |
| 26. | H | Flyveaske  | 12,9 | 14,7 | 0,28 |
| 27. | I | Bunnaske   | 12,8 | 3,2  | 0,01 |
| 28. | I | Flyveaske  | 11,9 | 34,6 | 0,19 |
| 29. | J | Blandaske  | 12,7 | 27,4 | 0,10 |
| 30. | J | Blandaske  | 12,8 | 35,1 | 0,13 |
| 31. | J | Blandaske  | 13,2 | 3,4  | 0,02 |
| 32. | K | Flyveaske  | 12,9 | 13,2 | 0,13 |
| 33. | K | Bunnaske   | 12,7 | 6,2  | 0,05 |
| 34. | K | Bunnaske   | 11,9 | 26,3 | 0,20 |
| 35. | L | Bunnaske   | 11,7 | 28,8 | 0,10 |
| 36. | M | Bunnaske   | 12,4 | 0,4  | 0,05 |
| 37. | M | Flyveaske  | 12,5 | 13,2 | 0,13 |
| 38. | M | Flyveaske  | 13,1 | 10,7 | 0,09 |
| 39. | M | Bunnaske   | 12,8 | 0,6  | 0,01 |
| 40. | N | Bunnaske   | 12,2 | 26,6 | 0,20 |
| 41. | O | Flyveaske  | 12,7 | 17,0 | 0,19 |
| 42. | O | Bunnaske   | 12,3 | 1,5  | 0,00 |
| 43. | P | Blandaske  | 13,4 | 4,8  | 0,01 |
| 44. | R | Blandaske  | 11,3 | 9,0  | 0,21 |
| 45. | S | Blandaske  | 13,4 | 2,7  | 0,03 |
| 46. | T | Flyveaske1 | 12,7 | 8,5  | 0,40 |
| 47. | T | Flyveaske2 | 12,9 | 49,3 | 0,21 |
| 48. | T | Flyveaske3 | 12,7 | 6,7  | 0,41 |
| 49. | T | Flyveaske4 | 12,8 | 59,1 | 0,12 |
| 50. | T | Bunnaske   | 13,0 | 1,3  | 0,10 |

Ved riktig kvalitet kan treaske anvendes til kalkning av jordsmonnet som en praktisk måte å resirkulere næringsstoffene (Demeyer et al., 2001). Tilbakeføring av aske vil også tilføre næringsstoffer og øke pH i grøntarealersjord (Insam og Knapp, 2011; Cronan og Grigal, 1995).

Det er ikke bare innholdet av tungmetaller som gjør at tilbakeføring av aske må gjøres i kontrollerte mengder, men også innholdet av kalsium. Kalsium gir en økning i pH-verdien, noe som igjen gir en økning i mikrobiologisk aktivitet og en potensiell mineralisering av nitrogen. Resultatene i Tabell 4 viser at målt pH var sterkt alkalisk ( $\text{pH} > 12$ ) i de fleste undersøkte askeprøvene, noe som betyr at asken har en sterk kalkningseffekt på sur jord. Kalkningseffekten er en av de viktigste parameterne for å evaluere gjødslingsverdien av aske. Det er ikke stor forskjell i pH-verdi for noen av askeprøvene.

Innholdet av uforbrent organisk karbon i askeprøvene varierte i forhold til hvilket biobrensel-sortiment som ble benyttet i biobrenselanleggene. Forbrenningstemperaturen vil ha innvirkning på mengden uforbrent karbon. Forbrenning ved temperaturer under  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  vil gi et maksimalt innhold av kalium, samt redusere dannelsen av metallforbindelser i bunnasken.

Tabell 4 viser at det ble målt oppkonsentrasjon av totalt organisk karbon (TOC) i flyveaskene. De laveste nivåene av TOC ble målt i bunnaskene noe som indikerer at forbrenningsforholdene for disse bedriftene var gode i perioden for prøvetakingen.

Likevel var TOC verdiene i bunnaskeprøve nr. 34 (26,3 %) og nr. 40 (26,6 %) veldig høye for denne type aske. I tillegg hadde flyveaskeprøve nr. 3, 47 og 49 et svært høyt TOC innhold på henholdsvis 74,9 %, 49,3 % og 59,1 %. Disse askene oppfyller ikke kravene i Forbud mot deponering av nedbrytbart avfall (2004), hvor totalt organisk karbon ikke må overstige 10 %.

### **3.3 Askerelaterte problemer i forbrenningsprosessen**

#### **3.3.1 ASKESINTRING**

Ved forbrenning av biobrensel vil deler av asken bli klebrig på grunn av kondensering og smelting av salter på overflaten til askepartiklene, i tillegg til at asken delvis smelter og blir viskøs. I denne smelten vil askepartiklene feste seg til hverandre og danne et porøst nettverk av sammenhengende partikler (Gupta et al., 1998). Den porøse strukturen vil gradvis bli tettere og tettere med videre oppfuktning i smelten og tilførsel av flere askepartikler. Partiklene presses sammen, og porene i strukturen lukkes mer og mer og asken sintrer på forbrenningsristen.

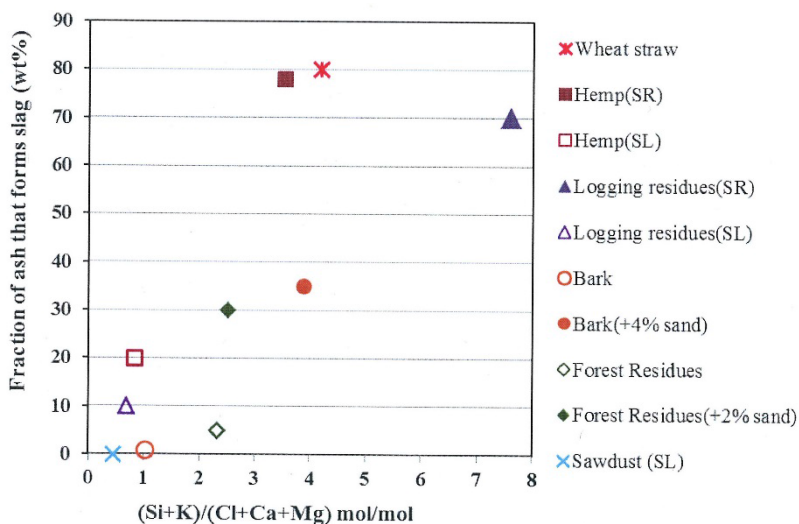
Graden av sintring fra bioaske er sterkt avhengig av hvilken type biobrensel-sortiment som benyttes. Aske som veldig lett vil sintre er vanligvis relatert til biobrensel med en høy konsentrasjon av alkalisk stoff, silisium og klor, og lav konsentrasjon av kalsium og magnesium. En høy konsentrasjon av silisium kommer vanligvis fra forurensninger av sand og grus i biobrenselet. Silisium selv har en høy smeltetemperatur på omkring  $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Men silisium i kombinasjon med alkaliske metaller i biobrenselet vil reagere, og danne polymeriserte silikater som har smeltetemperaturer under  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Baxter, 1998). Dette gjør at det er svært viktig å unngå mest mulig forurensninger av sand og grus i biobrenselet for å sikre at sintring ikke oppstår på forbrenningsristen.



### 3.3.2 ASKESLAGGING

I ristfyrte forbrenningsanlegg vil en stor del av de askedannende elementene bli igjen på risten som restaske. Restasken kan smelte og gi sintring av askepartiklene. Ved videre smelting vil det dannes større partikler av askeslagg med en komprimert struktur som fester seg og må fjernes manuelt fra forbrenningsristen (Wang, 2012). Mer og mer slagg vil akkumuleres og gi en dårlig fordeling av forbrenningsluften over biobrenselet. Dette gir en lav forbrenningsvirkningsgrad og overoppheting av risten, som igjen kan forårsake mekaniske skader.

Egenskapene og mengden av slagg som dannes vil avhenge av mengden og sammensetningen av de askedannende elementene. Silikater som dannes i sintringsprosessene fester seg på overflatene av restaskepartiklene og forårsaker slaggdannelse. Tidligere undersøkelser viser at Si, K og Ca er de dominerende elementene i slagg prøver, noe som tyder på at slaggdannelse kan relateres til dannelse og smelting av ulike silikater. Figur 4 presenterer andel slaggdannelse for ulike biobrenslar som funksjon av forholdstallet av elementer som øker askesmeltepunktet (Si og K) og elementer som senker askesmeltepunktet (Cl, Ca og Mg). Figuren viser også at for bark som er forurensset med sand (4 %) vil en svært stor andel (35 %) danne slagg, mens ren bark tilnærmelsesvis ikke danner slagg.



Figur 4. Slaggdannelse versus ulike element forholdstall på molarbasis av  $(\text{Si}+\text{K})/(\text{Cl}+\text{Ca}+\text{Mg})$  for ulike biobrenslar (Wang, 2012).

Resultatene presentert i Tabell 2 viser at bunnaskene har et mye høyere silisiumnivå enn flyveaskene. For noen av forbrenningsanleggene ble det målt svært høye Si-konsentrasjoner (spesielt prøve nr. 13, 16 og 50). Disse anleggene vil ha en større risiko for sintring og slagging på forbrenningsristen.

### 3.3.3 ASKEAVSETNING

Askeavsetning (sedimentering) er en av de største driftsmessige utfordringene i forbrenningsanlegg med biobrensel som råstoff. Askeavsetninger kan gi redusert virkningsgrad og uforutsett nedkjøring av anlegget.

Partikler i flyveasken kan sette seg på røroverflatene i varmeveksleren og bygge opp et lag med avsetninger som etter hvert vil gi en dårlig varmeoverføring i kjelanlegget. Avsetningen danner seg som et resultat av kondensasjon av fuktig røykgass og partiklene den fører med seg, og et lag vil etter hvert bygge seg opp ettersom flere og

flere partikler fester seg til overflaten av klebrige askepartikler. En videre oppbygning kan gi sintring av partikler som beskrevet i 3.3.1. En videre sammenpressing og komprimering gjør at overflatene etter hvert vanskelig lar seg rengjøre.

I biobrenselanlegg forekommer hovedsakelig to typer askeavsetninger; slaggdannelse (som beskrevet i 3.3.2) og begroing (fouling). Slaggdannelse skjer i de områdene av forbrenningskammeret hvor varmeoverføring med strålevarme fra flammen er dominerende, ved temperaturer i området 800 - 1000 °C og høyere. Slaggavsetninger vil ha en kjemisk sammensetning omtrent lik den i flyveasken (Wang, 2012).

Avsetninger i form av begroing skjer ved mye lavere temperaturer og forekommer normalt i varmevekslerdelen av kjelanlegget. Mekanismene bak begroing er i hovedsak kondensasjon av flyktig uorganisk materiale, særlig alkaliske metaller og alkalisk materiale som inneholder salter.

Fyr- og kjelanlegget bør undersøkes for askeavsetninger når anlegget kjøres ned for vedlikehold. Det er avgjørende at disse avsetningene i størst mulig grad fjernes for å sikre at anlegget kan levere tilstrekkelig varme.

### 3.3.4 KORROSJON

Biobrenslar med en høy konsentrasjon av klor og kalium kan være problematiske med hensyn til korrosjon av komponenter i fyr- og kjelanlegget. Cl og HCl i røkgassen kan initiere direkte korrosjon på overflatene i kjelanleggets varmeveksler. Mer alvorlig korrosjon kan forekomme ved høye Cl-avsetninger på rørene i varmeveksleren. Problemer med Cl-indusert korrosjon kan forventes med biobrenslar som inneholder mer enn 0,1 vekt % (t.v.) klor.

I forhold til korrosjonsmekanismer er også svovel (S) svært viktig i elementsammensetningen. En høy SO<sub>2</sub> konsentrasjon i røkgassen vil gi sulfatdannelse av alkalisk materiale og jordalkaliske klorider med synkende røkgasstemperaturer. Sulfatdannelsen vil føre til at Cl frigis. Dersom disse reaksjonene skjer i askeavsetninger på overflatene i kjelanleggets varmevekslerrør, kan Cl gi korrosjon gjennom FeCl<sub>2</sub> eller ZnCl<sub>2</sub> dannelse på metallet. Som for Cl, kan problemer med S-indusert korrosjon forventes med biobrenslar som inneholder mer enn 0,1 vekt % (tørrestoff) svovel (Biedermann og Obernberger, 2005).

Nivåene av svovel- og klorinnhold i askene er vist i henholdsvis Tabell 2 og Tabell 3. Konsentrasjonen av svovel og klor i de fleste bunnaskene var mye lavere enn i flyveaskene. Klor og svovel vil kunne ha en korrosiv effekt på forbrenningsanleggets komponenter, og er medvirkende elementer ved sintring og slaggdannelse (Obernberger og Thek, 2010).

## 3.4 Oppsummering

Flere studier har vist at flyveaske fra forbrenning av biomasse vil inneholde betydelig høyere konsentrasjoner av tungmetaller enn bunnaske (Hakkila, 1989). Mengden av tungmetaller i aske blir sterkt påvirket av forbrenningstemperaturen. De relativt høye konsentrasjonene av kadmium, sink og bly i flyveaske kommer av at disse elementene vil oppkonsentreres gjennom forbrenningsprosessen fordi den fungerer som en termodynamisk separasjonsprosess for de forskjellige uorganiske materialene i biobrenslene. Bunnasken forlater forbrenningskammeret med høy temperatur og inneholder derfor ingen flyktige tungmetaller, men i stedet metaller med lav volatilitet (eksempelvis nikkel og krom) som oppkonsentreres her.

Resultatene viser klart at det var en oppkonsentrasjon av tungmetaller i flyveaskene. Det er vist at jo mer effektivt filtreringssystemet i forbrenningsanlegget er, jo høyere vil andelen av tungmetaller være i flyveasken (Hakkila og Kalaja, 1983). Ut fra resultatene vil bunnasken fra forbrenningsanlegget i Bedrift B være den asken som best vil kunne utnyttes som gjødseltilsetning i jordbruksarealer, private hager og parker, og i grøntarealer deponering. Denne asken hadde et høyt nivå av næringsstoffer, lave konsentrasjoner av tungmetaller, lite uforbrent organisk karbon og en høy pH-verdi, noe som gjør at asken overholder kravene dagens regelverk setter i Kvalitetsklasse II.

Det er viktig å nevne at selv om noen av askene hadde høye konsentrasjoner av flere næringsstoffer, så vil en høy konsentrasjon av andre elementer, som tungmetaller, kunne redusere askens anvendbarhet til gjødslingsformål betydelig. Derfor er det viktig å evaluere konsentrasjonen av alle elementene som angir askens kjemiske kvalitet.

## 4 KONKLUSJONER

Økt utnyttelse av trebasert biobrensel spiller en viktig rolle i Norges fremtidige energi- og klimastrategi. Forbrenning av trebasert biobrensel produserer betydelige mengder aske som må håndteres på en hensiktsmessig måte. Denne økte satsningen medfører at utnyttelsen av de resulterende askeressursene fra biomassen blir stadig viktigere.

Treasker har en varierende sammensetning, men inneholder det meste av de viktige næringsstoffer som og kalk som kan utnyttes som tilsetning til gjødslingsformål, og tungmetaller som fantes i trevirke før forbrenningen. Asken er meget alkalisk. Anvendelse av aske i jordsmonn øker pH-verdien og innholdet av de fleste hovednæringsstoffene, samt at tilgjengeligheten av sporelementer (tungmetaller) reduseres. Aske fra trevirke med riktig kvalitet kan derfor utnyttes i forvaltningen av forsuret i grøntarealer eller områder med flathogst som trenger kalktilsetning. Askeegenskapene avhenger av hvilken type biobrenselassortiment som benyttes i forbrenningen, riktig styring av prosessparametre i forbrenningsprosessen, samt behandling og lagring av askene.

Kvaliteten på de ulike treaskene varierte i betydelig grad. I denne studien er det foretatt kjemisk analyse av aske fra 19 forbrenningsanlegg i Norge hvor råstoffet er biobrensel av rent trevirke. Resultatene viser at det kan være store variasjoner i kvaliteten på aske fra biobrenselanlegg med rent trevirke. Det er foretatt analyser av både bunnaske, flyveaske og blandaske fra forbrenningsanleggene. Resultatene viser at det kun vil være bunnaske som er egnet for tilbakeføring i naturen som gjødseltilsetning. Blandaske vil i noen tilfeller kunne benyttes, men dette vil kreve en mer omfattende kontroll da mengden av oppkonsentrerte tungmetaller i flyveasken varierer sterkt. Det er viktig å evaluere alle elementene (næringsstoffer og tungmetaller) med sine konsentrasjoner i bestemmelsen av askens kjemiske kvalitet.

I noen land (blant annet Sverige, USA, Østerrike) finnes det grenseverdier for innhold av næringsstoffer og tungmetaller i aske som skal spres til jordbruks- eller skogsområder. Siden det kan være store regionale forskjeller i naturlige nivåer av ulike grunnstoff, klimatiske forhold og forurensningsbelastning, er det viktig at det på sikt utvikles et eget sett med grenseverdier for Norge dersom aske skal benyttes som gjødsel.

Bruk av aske fra biobrenselanlegg som gjødsel, burde ha høy aktualitet i Norge. I følge «Forskrift om gjødselvarer mv. av organisk opphav (2003)» er i dag treaskegjødsling i skog ikke tillatt i Norge. Forskriften må derfor endres før tilbakeføring av aske til skog kan

skje. For å komme videre er det viktig at aktører innenfor både biobrenselnæring, skogbruk, industri, miljøvernmyndighet m.fl. kommer på banen.

## REFERANSER

Cronan CS, Grigal DF (1995) Use of calcium/aluminium ratios as indicators of stress in forest ecosystems. *J. Environ. Qual.* 24, 209-226.

Bioenergi – Miljø, Teknikk og Marked. Erik Eid Hohle, red. Energigården 2001.

Baxter LL (1998) Influence of ash deposit chemistry and structure on physical and transport properties, *Fuel Processing Technology* 56, 81-88.

Biedermann F, Obernberger I (2005) Ash-related Problems during Biomass Combustion and Possibilities for a Sustainable Ash Utilisation. Proceedings in 'World Renewable Energy Congress' (WREC), May, Aberdeen, Scotland, Elsevier Ltd, Oxford, UK.

Dahl O, Nurmesniemi H, Pöykiö R, Watkins G (2009) Comparison of the characteristics of bottom ash and fly ash from a medium-size (32 MW) municipal district heating plant incinerating forest residues and peat in a fluidize-bed boiler. *Fuel Process Technol* 90, 871-878.

Demeyer A, Voundi Nkana JC., Verloo MG (2001) Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview. *Bioresource Technology* 77, 287-295.

EU (2008) Commission of the European communities. Directive of the European parliament and of the council on the promotion of the use of energy from renewable sources. Gupta SK, Wall TF, Creelman RA, Gupta RP (1998) Ash fusion temperatures and the transformations of coal ash particles to slag, *Fuel Process Technol* 56, 33-43.

Haglund N (2008) Guideline for classification of ash from solid biofuels and peat utilised for recycling and fertilizing in forestry and agriculture. NT Technical Report. ISSN 0283-7234.

Hakkila P (1989) Utilization of Residual Forest Biomass. Springer-Verlag, 568 pp.

Hakkila P, Kalaja H (1983) The technique of recycling wood and bark ash. *Folia Forestalia* 552, 37 (English summary 35-37).

Hanssen KH, Clarke N, Dibdiakova J (2014) Tilbakeføring av treaske til skog. Egenskaper, effekter og metoder, Rapport fra Skog og landskap 09/2014, 19 s.

Hermansson S, Olausson C, Thunman H, Rönnbäck M, Leckner B (2006) Combustion disturbances in the fuel bed of grate furnaces, in: A. Reis, W. J., W. Leuckel (Eds.), Proceedings of the 7th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Porto, Portugal.

Holmberg SL, Lind BB, Claesson T (2000) Chemical composition and leaching characteristics of granules made of wood ash and dolomite. *Environmental Geology* 40 (1-2).

Hon DNS, Shiraishi N (2001) Wood and cellulosic chemistry. Marcel Dekker, Berlin, 914 s.

Huang H, Campbell AG, Folk R, Mahler RL (1992) Wood ash as a soil additive and liming agent for wheat: Field studies. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 23(1&2), 25-53.

Ingerslev M, Malkonene E, Nilsen P, Nohrstedt HO, Oskarsson H, Raulund-Rasssen K (2001) Main finding and future challenges in forest nutritional research and management in the Nordic countries. Scandinavian Journal of Forest Research, 16, 488-501.

Insam H, Knapp BA, (2011) Recycling of Biomass Ashes. Springer-Verlag, 164 pp.

Kuokkanen M, Vilppu T, Kuokkanen T, Stoor T, Niinimäki J (2011) Additives in wood pellets. BioResources 6(4), 4331-4355.

Kuokkanen M, Pöykjö R, Kuokkanen T, Nurmesniemi H (2009) Wood ash – a potential forest fertilizer. In: Paukkeri, A., Ylä-Mella, J., Pongrácz, E (eds.) Energy research at the University of Oulu. Proceedings of the EnoPro conference, June 3rd, 2009, University of Oulu, Finland. Kalevaprint, Oulu, ISBN 978-951-42-9154-8, 89-93.

Loo S, Koppejan H (2002) Handbook of Biomass: Combustion and Cofiring. Twente. University Press, 442 s.

Landbruks- og matdepartementet (2003) Forskrift om gjødselvarer mv. av organisk opphav. FOR 2003-07-04 nr. 951. <http://www.lovdata.no/for/sf/ld/xd-20030704-0951.html>. Accessed 12 Feb 2013.

Landbruks- og matdepartementet (2004) Forbud mot deponering av nedbrytbart avfall. FOR 2003-06-01 nr. 930. <http://www.regjeringen.no/nb/dep/md/pressemeldinger/pressemeldinger/2008/forbud-mot-deponering-av-nedbrytbart-avf.html?id=520348>. Accessed 18.06.2013.

Lindkvist L (2000) Aska från biobränsle Produktions- och kvalitetsaspekter beträffande näringskompensasjon och vitalisering av skogsmark. Skogsstyrelsen, Rapport 5/2000. Jönköping, 51 s.

Narodoslawsky M, Obernberger I (1996) From waste to raw material – the route from biomass to wood ash for cadmium and other heavy metals. Journal of Hazardous Materials 50, 157-168.

NS 4770 (1994) Vannundersøkelse - Bestemmelse av metaller ved atomabsorpsjons-spektrofotometri i flamme - Generelle prinsipper og retningslinjer, 12 s.

NS-EN 15290 (2011) Fast biobrensel - Bestemmelse av hovedelementer - Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na og Ti, 20 s.

NS-EN 15297 (2011) Fast biobrensel - Bestemmelse av sporelementer - As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, V og Zn, 20 s.

NS-EN 15104 (2011) Fast biobrensel - Bestemmelse av totalt innhold av karbon, hydrogen og nitrogen - Instrumentelle metoder, 16 s.

NS-EN 13037 (2011) Jordforbedringsmidler og dyrkingsmedier - Bestemmelse av pH, 12 s.

NS-EN 15289 (2011) Fast biobrensel - Bestemmelse av totalt innhold av svovel og klor, 20 s.

Nurmesniemi H, Pöykiö R, Kuokkanen T, Rämö J (2008) Chemical sequential extraction of heavy metals and sulphur in bottom ash and in fly ash from pulp and paper mill complex. *Waste Management & Research* 26(4), 389-399.

Obernberger I, Thek G (2010) *The Pellet Handbook. The production and thermal utilization of biomass pellets.* Earthscan Ltd, 549 s.

Obernberger I, Brunner T, Bärnthaler G (2006) Chemical properties of solid biofuels - significance and impact. Institute for Resource Efficient and Sustainable Systems, Graz University of Technology, Graz, Austria. Biomass and Bioenergy DOI:10.1016/j.biombioe.2006.06.011.

Obernberger I, Thek G (2004) Physical characterization and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behavior. *Biomass and Bioenergy* 27, 653-669.

Obernberger I (1998) Decentralized biomass combustion: state of the art and future development. *Biomass and Bioenergy* 14 (1), 33–56.

Pohlandt-Schwandt K (1999) Treatment of wood ash containing soluble chromate. *Biomass and Bioenergy* 16, 447-462.

Pohlandt-Schwandt K, Salthammer T, Marutzky R (2001) Reduction of soluble chromate in wood ash by formaldehyde. *Biomass and Bioenergy* 22, 139-143.

Scharler R, Forstner M, Braun M, Brunner T, Obernberger I (2004) Advanced CFD analysis of large fixed bed biomass boiler with special focus on the convective section, in: N. Abatzoglou (Ed.), *Proceedings of the Second World Biomass Conference for Energy, Industry and Climate Protection*, Rome, Italy, 825–828.

Solo-Gabriele HM, Townsend TG, Messick B, Calitu V (2002) Characteristics of chromated copper arsenate-treated wood ash. *Journal of Hazardous Materials* B89, 213-232.

Someshwar AV (1996) Wood ash and combination wood-fired boiler ash characterization. *J. Environ. Qual.* 25, 962-972.

Steenari B, Lindqvist O (1997) Stabilisation of biofuels ashes for recycling to forest soil. *Biomass and Bioenergy* 13 (1-2), 39-50.

Tothova S (2012) The utilization of wood ash as fertilizer in Slovak forestry, *ASH 2012*, Stockholm, Sweden January, 25-27.

Trømborg E (2011) IEA Bioenergy task 40 – Country report 2011 for Norway, 18 s.

Wang L (2012) Effect of Additives in Reducing Ash Sintering and Slagging in Biomass Combustion Applications. Doctoral theses at NTNU, 2012, 254.