



Københavns Universitet



Recirkulering af aske i skov

Callesen, Ingeborg; Skov, Simon; Heding, Niels

Publication date:
2004

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

Citation for published version (APA):
Callesen, I., Skov, S., & Heding, N. (2004). Recirkulering af aske i skov: tekniske, økonomiske og økologiske aspekter. Center for Skov, Landskab og Planlægning, Den Kgl. Veterinær- og Landbohøjskole. Arbejdsrapport / Skov & Landskab, Nr. 7-2004



Skov & Landskab

Center for Skov,
Landskab og
Planlægning • KVL

Recirkulering af aske i skov **-tekniske, økonomiske og økologiske aspekter**

I. Callesen, S. Skov og N. Heding

Arbejdsrapport Skov & Landskab nr. 7-2004

Rapportens titel

Recirkulering af aske i skov. Tekniske, økonomiske og økologiske aspekter

Forfatter

I. Callesen, S. Skov og N. Heding

Serie

Arbejdsrapport *Skov & Landskab* Nr. 7-2004

Rapporten publiceres på www.SL.kvl.dk

Projektet

Projekt journal nr.: 51161/97-0049

Forbehandling og udbringning af træaske i skov - tekniske løsninger

Energistyrelsens udviklingsprogram for vedvarende energi

Bedes citeret

I. Callesen, S. Skov og N. Heding, 2004. Recirkulering af aske i skov. Tekniske, økonomiske og økologiske aspekter. *Skov & Landskab*, KVL. 52 p.

ISBN

87-7903-189-7

Udgiver

Skov & Landskab

Hørsholm Kongevej 11

2970 Hørsholm

Tlf. 35281500

E-post: sl@kvl.dk

Gengivelse er tilladt med tydelig kildeangivelse

I salgs- eller reklameøjemed er eftertryk og citering af rapporten samt anvendelse af navnet *Skov & Landskab* kun tilladt efter skriftlig tilladelse.

Skov & Landskab er et selvstændigt center for forskning, undervisning, formidling og rådgivning vedr. skov, landskab og planlægning ved Den Kgl. Veterinær- og Landbohøjskole (KVL)

1. FORORD	5
2. ENGLISH SUMMARY	7
3. SAMMENDRAG	9
4. BAGGRUND	11
5. UNDERSØGELSER	13
6. KARAKTERISERING AF ASKE FRA STØRRE TRÆFYREDE FORBRÆNDINGSANLÆG	15
ASKEINDHOLD I RELATION TIL BRÆNDELSTYPE OG FLISSTØRRELSE	15
NÆRINGSSTOFFER, TUNGMETALLER OG TOKSISKE ORGANISKE FORBINDELSER I TRÆASKE.....	16
7. ASKEHÅNDBLING PÅ FORBRÆNDINGSANLÆG OG I SKOVEN	21
SEPARERING AF BUND OG FLYVEASKE I ASKEHÅNDBLING	21
ARBEJDSMILJØ VED ASKEHÅNDBLING	21
8. SPREDNING AF ASKE – ØKOLOGISKE ASPEKTER	23
KOMPENSATION AF NÆRINGSSTOFFER I SKOVØKOSYSTEMET - MASSEBALANCER	23
MILJØKONSEKVENSER VED SPREDNING AF ASKE	24
<i>Asketyper og spredningsmængder</i>	24
<i>Effekter på jord og planter</i>	24
<i>Udvaskning af næringsstoffer</i>	25
<i>Risiko for ophobning af tungmetaller, PAH og dioxin i jord og planter</i>	25
<i>Askespredning på dansk skovjord</i>	26
9. FORBEHANDLING AF ASKE: FORSØG OG UDVIKLINGSARBEJDE	27
PELLETERING AF ASKE I SVERIGE	27
<i>Valsepelletering</i>	27
<i>Pillernes fysiske og kemiske egenskaber</i>	29
FORSØG MED PELLETERING AF ASKE I DANMARK	31
STABILITET AF FORBEHANDLET ASKE	35
OMKOSTNINGER VED PELLETERING AF ASKE	36
10. SPREDNING AF ASKE I SKOVEN: ØKONOMI OG TEKNIK	37
SPREDNING AF PELLETERET ASKE I SVENSK FULDSKALAFORSØG.....	37
DANSKE ERFARINGER MED UDSPREDDNING AF ASKE	37
<i>Klosterheden Statskovdistrikt</i>	37
<i>Thy Statskovdistrikt</i>	38
11. RECIRKULERING AF ASKE – AKTUELLE HINDRINGER OG FREMTIDIGE MULIGHEDER	41
STATUS FOR RECIRKULERING AF ASKE I SVERIGE	41
GENANVENDELSE AF ASKE SET FRA ASKEPRODUCENTENS SYNSVINKEL	41
<i>Alternative anvendelser af aske</i>	42
GENANVENDELSE AF ASKE SET FRA SKOVEJERENS SYNSVINKEL	42
MULIGHEDER FOR AT SPREDE ASKE I SKOVE I DANMARK	44
<i>Pelletering</i>	44
<i>Skala: små og store askeproducenter</i>	44
<i>Lovgivning</i>	45
VALG AF GØDNINGSPRODUKT: ASKE, KALK, ORGANISK GØDNING ELLER KUNSTGØDNING ?	45
12. KONKLUSION	47

13. PUBLIKATIONER MED RELATION TIL ASKEPROJEKTERNE 1999 - 2004.....	49
GENERELLE PUBLIKATIONER	49
A: UDBRINGNING AF FLISASKE I DANSK SKOVBRUG – ØKOLOGISKE KONSEKVENSER	49
B: BIOMASSE TIL ENERGIFORMÅL: TILBAGEFØRING OG BEVARING AF NÆRINGSSTOFFER I SKOVBRUGSSYSTEMER	49
C: FORBEHANDLING OG UDBRINGNING AF TRÆASKE I SKOV- TEKNISKE LØSNINGER	50
14. REFERENCER	51

1. Forord

Projektet er udført i Afdeling for Skovdrift, Forskningscentret for Skov & Landskab i perioden 1999 til 2002 for Energistyrelsens udviklingsprogram for vedvarende energi "Biomasse til energiformål". Forskningscentret for Skov & Landskab er pr. 1. januar 2004 fusioneret ind i Center for Skov, Landskab og Planlægning, KVL, kort kaldet *Skov & Landskab, KVL*.

En række personer ved Skov & Landskab har været involveret i forsøgsarbejde, analyser og afrapportering. Det drejer sig om seniorforsker, ph.d. Morten Ingerslev, skovingeniør Pieter Kofman, forstkandidat Helle Serup, biolog Simon Skov, forstkandidat Inge Stupak Møller, forstkandidat Thomas Nord-Larsen og biolog Peter Daugbjerg Jensen. Jørgen Busk, Bioteknologisk Institut, har udført forsøgsarbejde med forbehandling af aske. I slutfasen har forstkandidat, ph.d. Ingeborg Callesen sammenfattet projektet og redigeret denne slutrapport.

Projektet er et af tre sideløbende projekter om om bioaske. Det drejer sig om:

Projekt A: Udbringning af flisaske i dansk skovbrug – Økologiske konsekvenser.

Finansiering: Produktudviklingsfonden i skovbruget og træindustrien. Projektleder er Morten Ingerslev.

Projekt B: Biomasse til energiformål: tilbageføring og bevaring af næringsstoffer i skovbrugssystemer. Finansiering: Energistyrelsens udviklingsprogram for vedvarende energi. Projektleder er Morten Ingerslev.

Projekt journalnr.: 51161/98-0035, afsluttet i januar 2004.

Projekt C: Forbehandling og udbringning af flisaske i skov – Tekniske løsninger.

Dette projekt kaldes projekt C. Projektet støtter sig til viden om økologiske konsekvenser af udbringning af flisaske, som er tilvejebragt i projekt A og B. Projektet er finansieret af Energistyrelsens udviklingsprogram for vedvarende energi, journalnummer 51161/97-0049 og er afsluttet i januar 2004.

Skov & Landskab, KVL ønsker at takke Energistyrelsen for en hjælpsom og smidig sagsbehandling under projektets forløb.

Niels Heding

Skov & Landskab, 31. januar 2004

Projektleder

2. English summary

Wood ash production from Danish power- and heating plants is expected to yield 10.000 tonnes per year by 2030. The ash is deposited in landfills at high cost. Technical, ecological and economical aspects of wood ash recycling to forests were investigated. Raw wood ash is alkaline due to the content of oxides and carbonates, and contains most nutrients except nitrogen. Results from field experiments show that self-hardened and crushed wood ash in doses up to 4 tonnes per hectare can be applied without negative impact on water quality in run-off, and flora and fauna. Owing to the acid neutralising properties wood ash can counteract anthropogenic acidification of forest ecosystems. Crushed self-hardened ash is spread with standard equipment at low cost. This solution is applicable for small-scale plants contracting with local wood chip suppliers.

In a pilot study wood ash mixed with binders such as lignin, shea-nuts and cement could be pelleted, thus contradicting professional expectations. Pelleted wood ash dissolves more slowly than self-hardened wood ash. Production of ash pellets as a fertiliser by large-scale energy plants could be a competitive alternative to other fertilisers. Danish burner technology that is currently in use may be an obstacle to wood ash pelleting, due to high contents of unburned carbon in the ash.

Wood ash contains cadmium and other heavy metals originating from the wood chips. Danish legislation prevents the recycling of a large proportion of the bottom ash and most of the flyash from wood fuels due to limits for cadmium concentrations. Legislation based on cumulated load per forest rotation per hectare rather than concentration in the ash would allow recycling of wood ash to forests. Software developed in the project (ESBEN) can estimate the amount of cadmium removed in wood chip harvest. Amended with estimates of accuracy, ESBEN will be useful in fertiliser planning, preventing cadmium accumulation in wood ash amended forest soils.

3. Sammendrag

Mængden af bioaske er stigende, især fra træbrændsler, hvor efterspørgslen dækkes ved import af flis og rundtræ. Asken kan ofte ikke recirkuleres til skoven efter gældende lovgivning, fordi kadmiumindholdet er for højt i det meste flyveaske og en stor del af den producerede bundaske. Askemængderne, som tillades ved givne koncentrationer af kadmium, er for små til, at spredning af aske i skove kan operationaliseres. I stedet for at benytte afskæringsværdier for indhold af tungmetaller i aske kan man benytte tilladte udbringningsmængder per areal per omdrift baseret på beregninger af fraførte mængder. Beregningerne skal være veldokumenterede og indeholde spredningsmål. De tilladte mængder skal benytte nedre værdier i estimerne for bortfjernede tungmetaller. Bæredygtig udnyttelse af skovene forudsætter en hensyntagen til næringsstofbalancerne. En hugstpraksis, der fjerner heltræer i tyndinger og grene og topender i den afsluttende renafdrift, er et alvorligt indhug i økosystemets næringspulje, som mange steder ikke kan erstattes ved forvitring. Valget af gødning står frit for skovejeren, og aske er et prisbilligt alternativ til jordbrugskalk eller kunstgødning.

Forbehandling ved pelletering kan gøre asken til en langtidsvirkende gødning, hvilket er afprøvet i Sverige. Asken skal konkurrere med andre gødningsprodukter i pris og håndteringsvenlighed. Forsøg udført i projektet viser, at det er muligt at fremstille piller af aske, men pillernes opløsningsegenskaber er ikke undersøgt. Askens indhold af næringsstoffer og tungmetaller er variabelt, og afhænger af brændselstype, askefraktion og forbrændingsproces. Kemisk analyse af asken er nødvendigt for at kunne deklarere den og beregne mængder, der skal recirkuleres til skov. Indholdet af næringsstoffer er ikke balanceret til planternes behov, ofte er fosforindholdet for lavt. Forbehandling kan udjævne opløsningshastigheden for de enkelte næringsstoffer i nogen grad, og på dette område ses nye forskningsinitiativer.

Man kan vælge forskellige politiske virkemidler for at tilskynde recirkulering af næringsstoffer ved at stille krav om kompensationsgødsning ved intensiv flishugst på næringsfattige jorde. Markedet kan så regulere, hvilken gødning, der vælges. Øgende udgifter til deponering af aske vil stimulere udviklingsarbejdet med at forbehandle asken. Det er ikke muligt at sige på nuværende tidspunkt, om der kan skabes en rentabel produktion af gødningsprodukter fra træaske. Processen lettes, hvis flisleverandører og askeproducenter inddrager askerecirkulering til leverandøren i leveringsaftalen for flis. Handelen med flis baseres i stigende grad på import, og det kan modvirke lokale aftaler. De store askeproducenter kan forsøge at starte et udviklingsprogram, hvor asken gøres til et kommercielt gødningsprodukt efter forbehandling. Udviklingen går i retning af fremstilling af gødning af aske i blanding med andre organiske restprodukter. Udviklingsarbejdet skal følges op med dokumentation for en balanceret frigivelse af næringsstoffer fra de nye produkter. Pelletering af aske synes at være den mest lovende forbehandling. Selvhærdning og knusning vil dog fortsat være den billigste metode, der kan udføres uden transport til et centralt anlæg. Det kan være en løsningsmodel for mindre værker med lokale flisleverandører. Vådudaskning, som foretages på de fleste anlæg af sikkerhedshensyn og af hensyn til arbejdsmiljø, et højt restkulindhold og indhold af større slaggeklumper stiller sig i vejen for pelletering af dansk aske.

4. Baggrund

I Biomasseaftalen fra 1993 fastsatte man mål om anvendelse af biobrændsel til kraft- og varmeproduktion. Den indebar, at der inden år 2000 skulle anvendes 0,2 mio. ton træflis og 1 mio. ton halm per år til kraftvarmeproduktion. Målet skulle fortrinsvis nås ved omstilling af centrale kraftvarmeverker (Falster *et al.*, 1999). Biomasseaftalen er senere revideret, således at andelen af træflis kan øges til 0,4 mio. ton og andelen af halm tilsvarende nedsættes til 0,8 mio. ton. Målene for udnyttelse af træflis er mere end opfyldt, men problemet med genanvendelse af aske står fortsat uløst. Træflis handles internationalt, og der importeres både flis og rundtræ for at dække efterspørgslen.

Ved forbrænding af biomasse produceres der årligt ca. 55.000 ton aske (tørstof) fordelt på små og store producenter lige fra husholdninger til store kraftvarmeverker (Hansen, 2001). Når man betragter askemængden fra større kollektive anlæg alene, var der i 2000 en produktion på 32.000 ton bioaske. Med træfyring på bl.a. Herningværket og Avedøreværkets blok 2 fra 2003 vokser mængden af træaske, som skal håndteres. Der forventes en produktion af bioaske på 70.000 ton per år fra kollektive anlæg frem mod år 2030. Mindst 10.000 ton forventes at være træaske (Hansen, 2001).

Asken indeholder næringsstoffer, men også restkulstof, tungmetaller og toksiske organiske forbindelser. Asken kan enten behandles som affald eller genanvendes til forskellige formål, bl.a. som gødning i jordbruget. Recirkulering af asken til skoven reguleres gennem bioaskebekendtgørelsen (Bekendtgørelse om anvendelse af aske fra forgasning og forbrænding af biomasseaffald til jordbrugsformål, Bek. nr 39 af 20. januar 2000).

Spredning af træaske i skove kræver driftstekniske løsninger, korrekt dosering og kendskab til askeproduktets reaktivitet. I øjeblikket deponeres træaske som affald med omkostninger til deponering og affaldsavgift til staten til følge. Projektets formål er at afdække tekniske og økonomiske løsninger til askehåndtering, specielt recirkulering af aske til skove.

Forskningscentret for Skov og Landskab har beskæftiget sig med bioenergi, herunder askehåndtering i mange år. Denne slutrapport for projektet *Forbehandling og udbringning af træaske i skov - tekniske løsninger* omtaler forskningsaktiviteter under projektet, som skal søge at kortlægge de tekniske, økonomiske og økologiske muligheder for at foretage en recirkulering af træaske til skove. Desuden giver vi en status for den nyeste udvikling på området. I rapporten sammenfattes aktuelle muligheder for recirkulering af aske. Alternative anvendelser og nye forskningsinitiativer omtales også.

5. Undersøgelser

Følgende delprojekter og aktiviteter er udført under dette projekt eller har relation til projektet:

Forbehandling af aske, tekniske løsninger hertil: Forsøg med pelletering af aske blev udført på Bioteknologisk Institut af Jørgen Busk og Simon Skov i 2002. Forsøget er beskrevet i afsnit 9.

Karakterisering af flis som biobrændsel. Forsøg med karakterisering af træbrændsler i Danmark er udført af Pieter Kofman, Peter Daugbjerg Jensen m.fl. (Kofman, 2003). Resultater vedr. brændværdi, askeprocent og størrelsesfordeling er vist i afsnit 6.

Askens indhold af næringsstoffer og gødningsværdi: Analysedata af aske er indsamlet i projekt B og er kort sammenfattet i afsnit 6.

Behov for recirkulering af næringsstoffer til skoven: Opgørelse af forsøg med flisning af rødgran i Mangehøje plantage (Nord-Larsen, 2002). Udvikling af software til beregning af næringsbalancer og næringskompensationsbehov i rødgranbevoksninger (Møller, 2001; Møller og Ingerslev, 2001). Resultater er gengivet i afsnit 8.

Miljøkonsekvenser ved spredning af aske (projekt A og B). Udlægning af granuleret flisaske i syv år og spredning af delvis selvhærdet aske i skoven ved Morten Ingerslev, Karsten Raulund-Rasmussen og Ingeborg Callesen (Callesen *et al.*, 2004b). Forsøgene er kort refereret i afsnit 8.

Driftsøkonomi ved transport og spredning af aske. Litteraturstudier og beregninger er udført af Thomas Nord-Larsen (Nord-Larsen, 2001). Emnet er behandlet i afsnit 10.

Arbejds miljø ved askehåndtering. Denne aktivitet har bestået i en sporadisk erfaringsopsamling fra større værker ved Simon Skov og er kort omtalt i afsnit 7.

6. Karakterisering af aske fra større træfyrede forbrændingsanlæg

Større træfyrede forbrændingsanlæg ses i denne sammenhæng som kraftværker, kraftvarmeværker og fjernvarmeværker med en produktionskapacitet, som er større end 1 MW. Mindre selvstændige kedler producerer også aske, som skal bortskaffes. Vi fokuserer her på de kollektive anlæg.

Efter forbrænding forsvinder kulstof, kvælstof og brint fra brændslet, hvis forbrændingen forløber fuldstændigt. Det er imidlertid sjældent tilfældet. Askemængden i ton tørstof og især det producerede askevolumen vil afhænge af restindholdet af kulstof, der ses som sort koks. Kulstofindholdet bestemmes ofte ved en analyse af askens glødetab ved vejning før og efter opvarmning til 550 grader Celsius. Hovedparten af glødetabet er restkulstof, som dog også kan bestemmes direkte, f.eks. på LECO analyser¹. Glødetabet kan variere fra få procent til over 50%. Et restkulstofindhold i aske fra træfyrede kedler på under 5% er ønskværdigt, dels for at udnytte energien i træet, og dels for at reducere mængden af aske, der skal bortskaffes. I praksis kan det dog være højere.

Askeindhold i relation til brændselstype og flisstørrelse

Den største del af asken kommer fra træets aktive plantedele (nåle og bark), der udgør en ret lille del af biomassen. Derfor vil en høj andel af bark, grene og kviste i træflisen øge askeindholdet. Tør aske reagerer stærkt basisk i kontakt med vand og har en pH værdi i intervallet 10-13 (Karlton *et al.*, 2003).

Askeindholdet i træflis er ofte blevet undersøgt, men sjældent i forskellige størrelsesfraktioner i flis. Askeindholdet i 10 forskellige typer flis blev bestemt i en undersøgelse af Kofman (2003). Træflis fra rødgran høstet som heltræer, samt flisede grene og topender, der betegnes ”hugstaffald” fra rødgran og bøg blev adskilt ved sigtning gennem 3, 8, 16 og 45 mm sold. Vandindhold, askeindhold og brændværdi blev undersøgt. På tør, askefri basis varierede brændværdien fra 18,9 til 20,8 MJ/kg i rødgran og fra 17,7 til 19,2 MJ/kg i bøg. Brændværdien var størst i de mindste partikelstørrelsesklasser.

¹ En LECO analyser bestemmer kulstofindholdet ved opsamling af kuldioxid efter forbrænding. Aske indeholder også karbonat-bundet kulstof, som kan bestemmes ved tilsætning af syre, og opfangning af den udviklede kuldioxid. Organisk kulstof findes som differencen mellem totalkulstof og karbonat-bundet kulstof.

Tabel 1 Askeindhold og vandindhold i flis efter partikelstørrelse.

Størrelse	Art	Størrelsesfordeling (gennemsnit af tre prøver)	Vandindhold	Askeindhold
<3 mm		%	%	% tørstof
	Rødgran, heltræ	12,4	11,4	11,1
	Rødgran, hugstaffald	4,5	23,0	6,0
3-8 mm	Bøg, hugstaffald	4,0	11,0	6,5
	Rødgran, heltræ	14,8	14,2	2,0
	Rødgran, hugstaffald	13,4	24,5	3,6
8-16 mm	Bøg, hugstaffald	8,3	10,4	1,5
	Rødgran, heltræ	29,1	11,4	0,8
	Rødgran, hugstaffald	15,8	23,3	1,6
16-45 mm	Bøg, hugstaffald	18,7	10,5	0,8
	Rødgran, heltræ	42,1	11,2	0,7
	Rødgran, hugstaffald	61,2	21,9	1,1
> 45 mm	Bøg, hugstaffald	63,8	10,9	0,4
	Rødgran, heltræ	0,6	-	-
	Rødgran, hugstaffald	3,8	-	-
Total	Bøg, hugstaffald	3,1	-	-
	Rødgran, heltræ	100	11,6	2,1
	Rødgran, hugstaffald	100	24,9	1,7
	Bøg, hugstaffald	100	10,4	0,8

Askeindholdet afhænger både af hvilke typer biomasse, der er høstet og af flisens størrelse. Flis mindre end 3 mm havde et askeindhold på 6,0 til 11,1% (Tabel 1). Flis i 16-45 mm klassen har et askeindhold på 0,4 til 1,1%, som er det laveste i undersøgelsen. De mindste fraktioner havde et større indhold af nåle og bark, og derfor både højere brændværdi og askeindhold.

Den mindste fraktion (<3 mm) udgjorde 12,4 % af flisen fra heltræer af rødgran, og 4,0% og 4,5 % af hugstaffald af bøg og rødgran. Undersøgelsen viser, at 15-30% af asken stammer fra de fineste flisfraktioner. Man kan nedbringe askemængden og reducere bortfjernelsen af næringsstoffer ved at efterlade den mindste flisfraktion i skoven. Teknisk kan dette gøres ved at lade en sideluge stå åben på flishuggeren under flisning eller ved at lægge en bundrist i fliscontaineren. Derved vil 1-3% af den samlede flismængde undgå opsamling og blive tilbage i bevoksningen. En stor af del af den separerede mængde er smuld med et højt askeindhold (Røhr Lauritzen & Leer, 2002).

Næringsstoffer, tungmetaller og toksiske organiske forbindelser i træaske

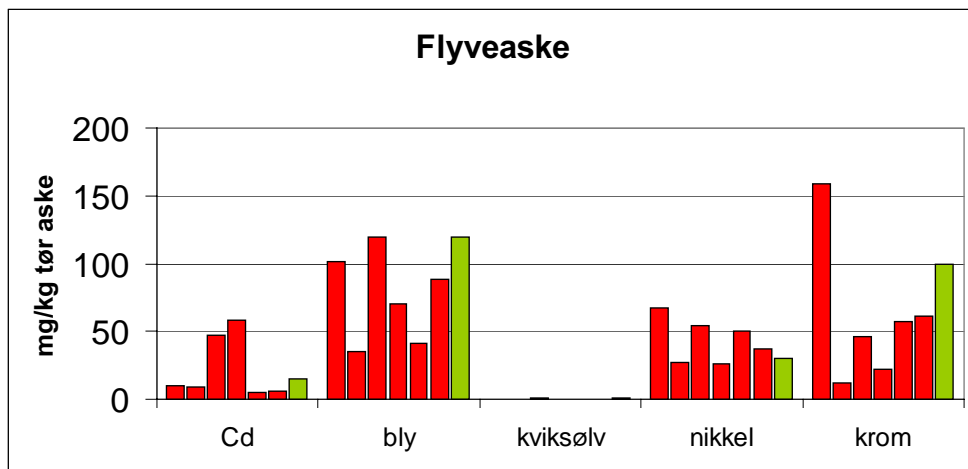
Danske forbrændingsanlæg har normalt kedler, hvor flisen brændes på en rist, som asken rystes ned igennem. Bundasken, som også kaldes slaggen, opsamles ofte i vandbad. Vandet slukker gløderne og virker som en vandlås, der forhindrer luften i at trænge ind i brændkammeret. Flyveasken opsamles af multicyclon, posefilter eller elektrofilter. I Sverige

er en anden kedeltype udbredt, nemlig circulating fluidised bed (CFB). Forbrændingen i en CFB kedel foregår i en smeltet matrix af sand, som giver en mere komplet forbrænding og lavere restkulindhold.

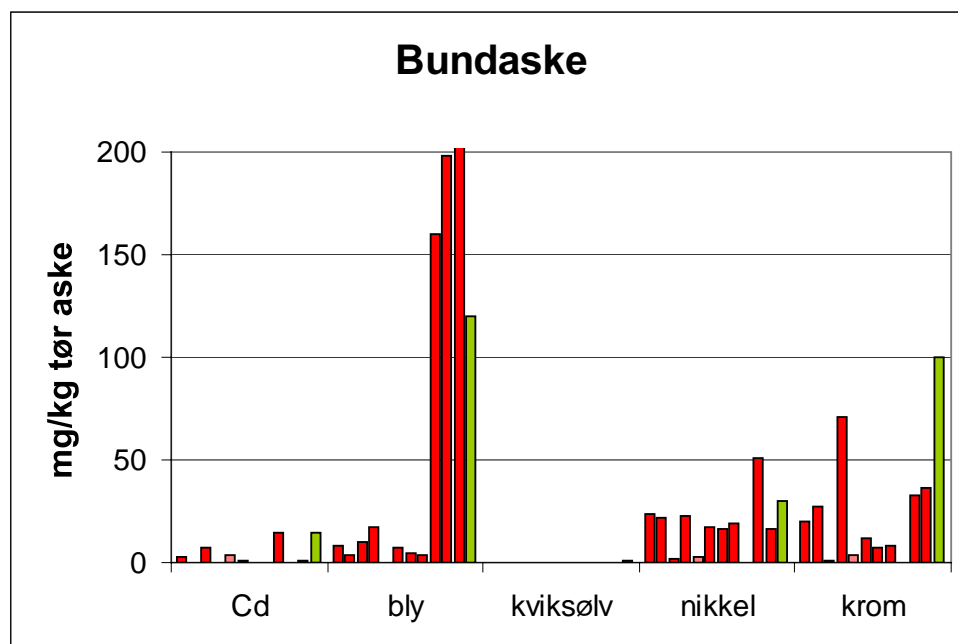
Mange næringsstoffer tilbageholdes i asken. Bundasken indeholder næsten intet (~ 0 mg g⁻¹) kvælstof, 15,5 (8,7) mg g⁻¹ fosfor, 54,1 (30,2) mg g⁻¹ kalium, 166 (80) mg g⁻¹ kalcium og 17,8 (9,4) mg g⁻¹ magnesium. Tallene er gennemsnit og spredning (i parentes) af 17-19 prøver fra forskellige anlæg. Koncentrationerne er beregnet på basis af askeprøver, hvor glødetab og uopløst rest er inkluderet (Callesen *et al.*, 2004b). Næringsstofferne findes som oxider, hydroxider, karbonater, silikater og salte som f. eks. sulfater og klorider. Desuden findes klumper af trækul og glas, der er smeltet kvarts fra brændslets indhold af sand eller hvide klumper af kaliumsalte. Flyveaske indeholder lidt flere næringsstoffer: 0,5 mg g⁻¹ (0,35) kvælstof, 20,7 (7,8) mg g⁻¹ fosfor, 61,7 (21,0) mg g⁻¹ kalium, 222 (74) mg g⁻¹ kalcium og 23,8 (11,3) mg g⁻¹ magnesium (Callesen *et al.*, 2004b).

Indholdet af næringsstoffer forekommer meget variabelt, hvilket kan skyldes flere ting. Brændslets kemiske sammensætning kan variere. Når indholdet af næringsstoffer analyseres i ren aske med fradrag af uopløselig rest, er indholdet meget mindre variabelt, hvilket giver en lavere spredning. I ren aske af nåletræflis er koncentrationen af fosfor f.eks. 35,5 mg g⁻¹ med en spredning på 2,9 mg g⁻¹ (Kofman, 1987). Andre kilder til variation er forskelle i forbrændingsprocessen, procedure for udtagning af askeprøven og analysemetoden. Tallene, som er præsenteret her, stammer fra flere forskellige kilder. Askerne fra Kofman (1987) er analyseret efter opvarmning til 550°C efterfulgt af kogning i 20% saltsyre i en time. I dette projekt (Hansen, 2001) anvendes oplukning af askeprøven i halvkoncentreret (ca. 7 M) salpetersyre (DS259), som også er den metode, som Miljøstyrelsen anviser jf. bioaskebekendtgørelsen. Ingen af metoderne vil opløse alle mineraler i asken fuldstændigt. Hos Kofman (1987) varierer den uopløselige rest fra 9% til 82 % af prøven, mens analyserapporterne i Hansen (2001) ikke oplyser, hvor stor den uopløselige rest er. Det vil påvirke koncentrationerne i analyserede asker. Det meget varierende indhold af kulstof, som udgør en stor del af glødetabet, er også kilde til variation. Der er behov for en yderligere standardisering af askeanalyser for at sikre, at askeanalyser er sammenlignelige. Det gælder især anvisninger til udtagning af repræsentative askeprøver. Afskæringsværdierne for f.eks. kadmium angives med en præcision på 0,5 mg kg⁻¹. Resultater af askeanalyser skulle gerne modsvare denne præcision. Der forestår et arbejde med at beskrive procedurer for prøvetagning af aske nærmere.

Kadmium-indholdet i bundaske og i flyveaske er yderligere undersøgt ved indsamling af analyserapporter fra forskellige askeproducenter, hvor der bruges træflis som brændsel. Analyserne er udført på kommercielle akkrediterede laboratorier. Resultaterne er vist sammen med afskæringsværdien for T1 aske på 15 mg Cd g⁻¹. Figur 1 og 2 viser 12 bundasker og 9 flyveasker. Analysemetoden er ofte ikke angivet, men formodes at være en syreopløsning, som f.eks. DS259. Figurene viser, at ikke blot kadmium, men også bly og nikkel kan overskride de tilladte afskæringsværdier for askens indhold af tungmetaller.



Figur 1 Indhold af tungmetaller i flyveaske og afskæringsværdier (højre søjle, lys) for indhold af tungmetaller, jf. bioaskebekendtgørelsen.



Figur 2 Indhold af tungmetaller i bundaske og afskæringsværdier (højre søjle, lys) for indhold af tungmetaller, jf. bioaskebekendtgørelsen

Aske indeholder polyaromatiske hydrocarboner, som forkortes til PAH'er. SUM-PAH er en international betegnelse for 16 stoffer af denne type, defineret af det amerikanske Environmental Protection Agency (EPA) og grænseværdien for EPA-PAH i aske er 3 mg kg^{-1} jf. bioaskebekendtgørelsen. PAH måles, hvis restkulstofindholdet er højere end 5%. Målte EPA-PAH værdier lå i intervallet $<0,24 - 7,6 \text{ mg kg}^{-1}$, og 9 ud af 12 prøver havde

koncentrationer, der var lavere end bioaskebekendtgørelsens afskæringsværdi (Callesen *et al.*, 2004b). Da analysemetoden for PAH har været usikker, har der indtil for nylig været dispenseret for analyse af PAH.

I forbrændingsprocesser, hvor klor, kulstof og ilt er tilstede, dannes dioxiner. Dioxiner er bl.a. polyklorerede dibenzodioxiner (PCDD) og polyklorerede dibenzofuraner (PCDF). Dioxiner har meget forskellig giftighed. De opgøres derfor i I-TEQ (internationale toksiske ækvivalenter). Dioxin koncentrationen lå i intervallet 0,02 – 20,9 I-TEQ ng kg⁻¹ TS i nogle analyserede danske og svenske træasker fra større forbrændingsanlæg (Callesen *et al.*, 2004b). Det er meget lavt i sammenligning med, hvad der kan måles i aske fra andre brændsler, specielt affald. Flyveaske indeholder mere dioxin end bundaske. Det diskuteres, om der kan dannes dioxin ved forbrænding af rent træ med et lavt naturligt indhold af klor, eller om de målte mængder skyldes forurening af brændslet fra omgivelserne. Der dannes meget lidt dioxin, når forbrændingen af rent træ foregår i store kedler (Lavric *et al.*, 2004).

7. Askehåndtering på forbrændingsanlæg og i skoven

Separering af bund og flyveaske i askehåndtering

Pga. det højere kadmium-indhold i flyveaske vil sammenblanding af flyveaske og bundaske kunne forhindre, at asken kan anvendes til jordbrugsformål, fordi koncentrationen af kadmium bliver for stor. Der findes dog eksempler på flyveaske, som opfylder både T1 og T2 krav til kadmiumindhold (se figur 1). Flyveaske og bundaske adskilles i forbrændingsprocessen. Af praktiske hensyn blandes askerne ofte i forbindelse med opbevaring. Mængden af flyveaske i forhold til bundaske varierer. På små værker kan askemængden være så lille, at bund- og flyveaske fyldes i samme containere. Asken må helst ikke tørre ud i containeren, da man risikerer, at den hærdner. Sammenblanding kan også skyldes, at der kun er plads til en enkelt container i rummet, hvor asken tages ud. På større værker er askemængderne så store, at den bør kunne adskilles i bund- og flyveaske uden større omstillinger. Årsagen til, at det ikke gøres, kan være, at asken deponeres samme sted.

Bundaske tages ofte ud i vandbad og er derfor vandholdig. Flyveasken er enten våd fra cyklonen eller befugtes til ca. 30% vand for at lette håndteringen. Askens naturlige hærdningsproces starter, når der tilføres vand. Hvis asken efterfølgende tørrer ud i containeren, bliver den stenhård. Som følge af hærdningen er asken mindre basisk, idet oxiderne er overgået til karbonatform. Det kan gøre videre forbehandling mere besværlig, idet selvhærdningen ikke kan udnyttes, f.eks. hvis asken efterfølgende skal presses til piller.

Arbejds miljø ved askehåndtering

Tør flyveaske støver meget ved håndtering. Alt støv virker irriterende på åndedrætsorganerne. Kontakt med aske er yderligere skadeligt pga. den alkaliske virkning. Ved driften af større værker kommer medarbejderne normalt ikke i kontakt med aske, da processen er automatiseret. Kontakt med aske forekommer i to situationer: ved fejlretning på forbrændingsanlægget og ved rensning af askecontainere, når de kommer retur efter tømning. På et værk foreskriver man værnemidler som støvafvisende overtræksdragt, handsker, åndedrætsværn og beskyttelsesbriller i sikkerhedsinstruksen, når der arbejdes i rum med tør aske. Dragterne må ikke komme ud af askerummet. Ved rensning af containere anvendes der som minimum handsker, men de før nævnte værnemidler anbefales også, fordi det kan støve, når hærdet aske bankes løs i containeren. Befugtningen af aske i askeudtaget er et middel til at nedsætte støveffekten og skal forhindre, at aske hvirvles op. Støvgenerne ved håndtering af befugtet aske er begrænsede.

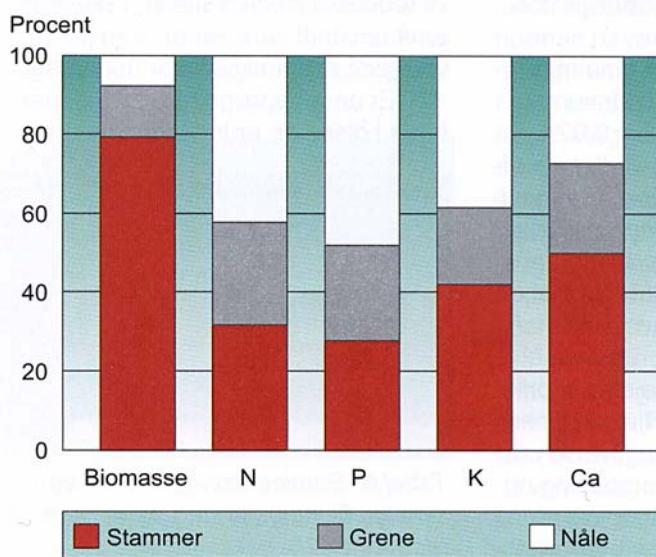
I forbindelse med spredning af aske kan der opstå støvgener. På Thy Statsskovdistrikt har man erfaringer med spredning af våd og tør aske gennem mere end 10 år. Asken selvhærdner under den kortvarige oplagring i skoven tæt på spredningsstedet. Når den selvhærdede aske i tørt vejr bliver udtørret, kan håndteringen blive støvende. Problemet kan afhjælpes ved at sprede aske i fugtigt vejr om efteråret og om vinteren. Man kan også opfugte asken på værket, idet der typisk ikke er adgang til vand på lagerpladsen. Forbehandling vil også reducere støvgenerne. Valg af køreretning under hensyntagen til vindretningen kan reducere støvgenerne for traktorføreren (traktorfører Finn Christensen, Thy Statsskovdistrikt, pers. komm.).

8. Spredning af aske – økologiske aspekter

Aske har historisk set været anvendt som jordforbedringsmiddel. Kompensationsgødskning kan være en generel modforanstaltning mod den naturlige forsuring og den menneskeskabte luftforurening med forsurende forbindelser. Aske vil kunne spredes på alle skovdækkede arealer efter behov. Med en askeproduktion fra de store kraftvarmeværker og fra fjernvarmeværker på over 10.000 ton per år vil asken være en ressource for skoven. Generelt er kompensationsbehovet på 3 til 7 ton aske per omdrift af gran i skoven, afhængig af, hvilke næringsstoffer, man ser på. I løbet af de næste 30 år vil der blive produceret mindst 300.000 ton træaske (10.000 ton per år), som vil kunne spredes i 75.000 ha skov ved en dosis på 4 ton per ha. Det svarer til 25 % af det nuværende nåleskovsareal i Danmark (Larsen og Johannsen 2002).

Kompensation af næringsstoffer i skovøkosystemet - massebalancer

Ved flishugst af tyndingstræer og hugstaffald i renafdrifter i skoven kan disse arealer få særlige behov for recirkulering af næringsstoffer. Fremkomsten af flishuggere til tyndingstræer i 1980'erne har ført til en praksis, hvor kviste og grene og nåle fjernes. Det fjerner flere næringsstoffer, end hvis der alene fjernes stammer (figur 3). Man kan undgå at fjerne de næringsrige nåle ved at fælde træerne og lade dem fortørre inden flisning.



Figur 3 Andelen af biomasse i hele træet og fordelingen af næringsstoffer i stammer, grene og nåle (Falster et al., 1999).

Det er konstateret i svenske forsøg (Jacobson *et al.*, 2000), at fjernelse af letomsættelige nåle, bark og kviste med stort næringsindhold af f.eks. kvælstof i nogle tilfælde efterfølges af midlertidigt nedsat tilvækst i størrelsesordenen 8 %. Den samme tendens er set herhjemme i et forsøg på næringsfattig jord (Nord-Larsen, 2002). Hvad der sker på længere sigt i hele bevoksningens levetid og i efterfølgende omdrifter er imidlertid uvist. Følger man tankegangen om næringsbalance og bæredygtighed, bør regnskabet for tilførsel og fraførsel af næringsstoffer dog stemme nogenlunde på langt sigt. Det gælder især for de store skovarealer, der findes på sandjord. Sandet har en meget ringe evne til at frigive næringsstoffer ved

forvitring af jordens mineraler (Callesen & Raulund-Rasmussen, 2004). Der bør holdes regnskab med næringsstofferne ved flishugst, så tilbageførsel af næringsstoffer kan ske efter dokumentation af fjernede mængder.

Beregninger af, hvor mange næringsstoffer, der fjernes, kan foretages ved hjælp af PC-programmet ESBEN (Møller 2001, Møller og Ingerslev 2001). Forskellige scenarier for fjernelse af næringsstoffer ved hugst blev sammenholdt med frigivelsen fra forbehandlet aske, som i et forsøg var placeret i jordmiljøet i syv år i netposer (Callesen *et al.*, 2004a). De frigivne mængder fra poserne blev inddraget i et scenarie, hvor man antog, at tre ton af asken var blevet spredt i en 60-årig rødgranbevoksning. Frigivelsen af næringsstoffer i de syv vækstsæsoner svarede godt til det teoretiske optag af næringsstoffer i bevoksningen i samme periode. Forbehandlingen af asken ved granulering resulterede altså i en tilstrækkelig langsom frigivelse af næringsstoffer. For samme 60-årige rødgranbevoksning blev udtaget af kalcium, magnesium, fosfor og kalium beregnet ved to forskellige hugstscenarier i en hel omdrift. I det ene tilfælde fjernedes kun stammer, i det andet huggede man fortørrede heltræer i tyndingshugster og grene og topender i slutafdriften. I begge tilfælde var en dosis på 3 ton aske per ha utilstrækkelig til at kompensere for fosforudtaget. For kalcium, kalium og magnesium kunne hugsten af stammer alene kompenseres ved tilførsel af tre ton aske (Callesen *et al.* 2004b).

Miljøkonsekvenser ved spredning af aske

Asketyper og spredningsmængder

Virkingen af askespredning i skove på trævækst, flora og fauna og grundvandskvalitet er undersøgt i en lang række svenske og finske forsøg. Resultaterne er sammenfattet af Karlton *et al.* (2003) og kort omtalt sammen med nogle danske forsøg i slutrapporten for *projekt B* (Callesen *et al.*, 2004b). Effekterne afhænger af den spredte mængde og af askens reaktivitet. Det er vigtigt at slå fast, om der er tale om uhardet tør aske, opfugtet selvhærdet aske, eller forbehandlet aske. Der er eksperimenteret med doser på mellem 1 ton og 20 ton per ha. Aske virker først og fremmest neutraliserende på sure forbindelser i jorden, især hvis der er tale om uhardet aske. Indholdet af næringsstoffer virker som gødning på træer og andre planter. I meget høje doser kan asken også have en saltvirkning, der kan udtørre planterne. Alle indholdsstofferne i asken stammer fra næringssalte i træflisen og forureninger med sand fra jord, atmosfærisk nedfald af tungmetaller og dioxin. Den kemiske form, stofferne findes på i asken, er afgørende for deres tilgængelighed for planter og organismer.

De her beskrevne miljøeffekter gælder forsøg, hvor der er spredt uhardet, selvhærdet, knust aske i doser på op til 7,5 ton per ha. En sådan dosis betragtes som realistisk i forhold til mængden af biomasse, der fjernes over en omdrift under danske vækstforhold på en mellem bonitet i rødgran. For granuleret og pelleteret aske er effekterne mindre, fordi asken opløses langsommere og har mindre overflade.

Effekter på jord og planter

Aske virker neutraliserende, og det afspejles i jordens pH. Der er udført et enkelt dansk forsøg med spredning af selvhærdet flisaske. Virkninger på jordbunden ved spredning af flisaske blev undersøgt i en yngre Sitkagranbevoksning på Thy statsskovdistrikt på sur næringsfattig sandjord (*Projekt A*, Ingerslev 2001). I maj 2000 spredtes ca. 4 ton flisaske per ha af fyr og sitkagran fra to lokale fjernvarmeværker. Den anvendte aske fra Hurup Varmeværk var tør,

men delvis selvhærdet ved opbevaring i skoven inden udbringning. Asken fra Vestervig Varmeværk var vådudasket og dårligt hærdet under afvandingen, der foregik ved udspreddning på et åbent areal i skoven. De første resultater fra forsøget viser en stigning i pH i det organiske lag i jorden fra 3 til 4. Stigningen svarer til, hvad man har set i svenske og finske undersøgelser ved doser af uhærdet aske på op til 7 ton per ha. Mosser og laver kan blive misfarvede, når der spredes uhærdet aske pga. svidning. Misfarvningen forsvinger igen efter et par år (Karlton *et al.*, 2003).

Næringsstoffernes tilgængelighed i jorden øges, specielt calcium, magnesium, som findes i høje koncentrationer i aske. Fosfortilgængeligheden øges også, men fosfor i aske er ikke altid på letopløselig, plantetilgængelig form. Kalium er mere mobilt end de andre næringsstoffer, og koncentrationsstigninger ses i højere grad i mineraljorden, hvor det er tilgængeligt for planterne.

Udvaskning af næringsstoffer

Gødskning med andre næringsstoffer end kvælstof kan påvirke jordens kulstof og kvælstofbalance. Øget tilgængelighed af næringsstoffer kan stimulere mikroorganismene i jordbunden, og dermed øge nedbrydningen af organisk stof. Man har derfor været opmærksom på, om askespredning førte til nitratudvaskning. Der er kun få rapporteringer om markant øget nitratudvaskning efter spredning af moderate mængder aske blandt de undersøgelser, der er gennemført (Karlton *et al.*, 2003). Øget mikrobiologisk aktivitet kræver, at der er et egnet substrat med et tilstrækkeligt lavt kulstof:kvælstof forhold. Nitratudvaskning i granbevoksninger ses stort set aldrig, hvor kulstof:kvælstof forholdet er højere end 30 (Gundersen *et al.*, 1998). Askespredning ventes ikke at kunne føre til nitratudvaskning, eftersom kulstof:kvælstof forholdet i humuslaget i mange skove på næringsfattig jord er højt. Ved lavt kulstof:kvælstof forhold (<20) er indholdet af mineralske næringsstoffer i jorden i øvrigt højt, og den dosis, der tilføres med aske vil kun udgøre en mindre del af jordens samlede næringspulje. Det er usandsynligt, at det skulle øge mineraliseringen af kvælstof, og give mulighed for øget nitratudvaskning.

Kalium i aske findes bl.a. som letopløseligt kaliumklorid og kaliumsulfat. Forøgede koncentrationer af kalium i jordvandet kan forekomme, men aftager indenfor nogle måneder efter spredning. Risikoen for kaliumudvaskning må vurderes som størst på meget veldrænedede sandjorde med lav bufferevne.

Risiko for ophobning af tungmetaller, PAH og dioxin i jord og planter

Indholdet af tungmetaller, PAH'er og dioxin i jordbunden blev analyseret i det danske forsøg, i askebehandlede parceller og kontrolparceller. Koncentrationer af ombyttelige tungmetaller i mineraljorden var under bestemmelsesgrænsen, som er 0,05 mg kg⁻¹ tørstof (TS) for kadmium. I det organiske lag var koncentrationerne meget lave, omkring 0,1 mg kadmium kg⁻¹ TS. Lave blykoncentrationer blev fundet i den øverste del af mineraljorden, men var i det organiske lag lavere end bestemmelsesgrænsen på 0,5 mg kg⁻¹ TS. Jordkvalitetskriteriet (Miljøstyrelsen, 2003) for tungmetaller baseres på ekstraktion i 7 molær salpetersyre². Denne ekstraktion frigør en større fraktion, end den, der er umiddelbart tilgængelig i en sur skovjord. Undersøgelsen af den ombyttelige fraktion kan derfor ikke sammenlignes med jordkvalitetskriteriernes grænseværdi på 0,5 mg kg⁻¹ TS for kadmium. Konklusionen i

² Metoden er beskrevet i Dansk Standard 259

forsøget var, at askespredningen ikke har ført til en målbar forøgelse i koncentrationen af tungmetaller i sammenligning med kontrolparcellerne.

PAH'er i målelige niveauer blev fundet i det organiske lag på begge lokaliteter, men ikke i de øverste 5 cm af mineraljorden. Sum-PAH koncentrationerne lå i intervallet 0,27 – 0,44 mg kg⁻¹ TS og dermed under grænseværdien på 1,5 mg kg⁻¹ TS (Miljøstyrelsen, 2000a). De askebehandlede parceller havde ikke forhøjede niveauer i sammenligning med kontrollen.

Dioxinforbindelser blev kun fundet i det organiske lag og ikke i prøver fra de øverste 5 cm af mineraljorden. Koncentrationen i kontrolparceller og behandlede parceller adskilte sig tilsyneladende ikke fra hinanden. De dioxinforbindelser, som blev fundet, var 1,2,3,4,6,7,8 hepta CDD (polychloreret dibenzodioxin) med koncentrationer på 35 til 39 ng kg⁻¹ TS, 1,2,3,4,6,7,8 hepta CDF (polychloreret dibenzofuran) med 20 til 49 ng kg⁻¹ TS, oktaklordibensdioxin med ca 120 ng kg⁻¹ TS og oktaklordibensfuran med 38 til 62 ng kg⁻¹ TS. Dioxiner figurerer ikke på Miljøstyrelsens liste over jordkvalitetskriterier. På baggrund af forsøget kan det konkluderes, at spredning af 4 ton per ha delvis hærde aske tilsyneladende ikke har øget koncentrationerne af tungmetaller, PAH'er og dioxiner.

Øget indhold af tungmetaller, særlig kadmium, i bær og svampe har været fremført som en mulig effekt af askespredning, der kunne udgøre en sundhedsrisiko for bær- og svampeplukkere. Finske og svenske undersøgelser af askedoser på 2 – 10 ton per ha viste ingen forøgede koncentrationer af kadmium i blåbær og tyttebær (Karlton *et al.*, 2003). Kadmiumindholdet i svampe varierer fra art til art. Man har observeret ændret artssammensætning og øgede koncentrationer af kadmium i enkelte svampearter i askespredningsforsøg, men også forsøg, hvor man ikke så effekter (Karlton *et al.*, 2003).

Askespredning på dansk skovjord

De beskrevne effekter har ikke reference til jordtypen. I Danmark er jordbundens bufferevne, indhold af mineralske næringsstoffer, og oplagring og omsætning af organisk stof meget variabel. Den vigtigste egenskab er jordens indhold af fine og grove partikler, også kaldet teksturen. Man kan groft opdele danske skovjord i tre typer: Lerjorde med over 10% ler, finsandede jorde og lerholdige sandjorde, og grovsandede jorde med <5% ler og <50% finsand. Lerjordene har stor bufferevne, høj næringsstatus og hurtig nedbrydning af organisk stof, mens grovsandede jorde modsat har lav bufferevne og lav næringsstatus og langsom nedbrydning (Callesen, 2003). Tilførsel af aske vil derfor virke forskelligt afhængigt af jordtypen. Sandjorde vil eksempelvis have et større behov for kompensation af fjernede næringsstoffer, fordi jordens naturlige evne til at kompensere for tab af næringsstoffer er lav.

9. Forbehandling af aske: Forsøg og udviklingsarbejde

Forbehandling af tør aske har som formål at reducere den basiske virkning, lette håndteringen og reducere opløsningshastigheden. Behandlingen består i opfugtning af tør aske efterfulgt af selvhærdning og knusning eller granulering, pelletering, eller coating med mere resistente materialer. Hvis restkulindholdet er højere end ca. 10%, kan det være nødvendigt at tilsætte bindemidler, og pillernes stabilitet bliver dårligere. Asken kan alternativt genforbrændes for at fjerne kullet og øge virkningsgraden. Af hensyn til de mængder af aske, der skal håndteres, arbejdsmiljøet og opløsningshastighed ved spredning i skoven, er det nærliggende at forsøge at forbehandle asken. Dette kræver udviklingsarbejde.

Knusning af aske, der er selvhærdet som følge af opfugtning, er den simpleste form for forbehandling. Knusningen kan udføres med maskiner, der benyttes til knusning og spredning af jordbrugskalk. Andre typer forbehandling som granulering, coating og pelletering kræver investering i særlige anlæg.

Pelletering af aske i Sverige

Forsøg med pelletering af aske i Sverige er beskrevet i en artikel i "Fjernvarmen" (Nord-Larsen, 2002), hvorfra dele af kapitlet i let redigeret form stammer.

I et samarbejde mellem AssiDomän og Stora Enso blev der fra januar 1999 til marts 2000 udført et fuldskala forsøg med pelletering og udspredning af aske i Sverige. Forsøget og dets foreløbige resultater er beskrevet af (Lövgren *et al.*, 1999). Udover forsøg med pelletering af den rene aske blev der udført forsøg med forskellige blandinger af aske og kogelud eller bestrygningsmiddel fra papirproduktionen. Der blev under forsøget produceret 1.500 ton pelleteret aske.

Valsepelletering

Den anvendte teknik til pelletering af flyveaske fra CFB forbrænding er patenteret af Gert Nordström, AB Nordströms Konstruktionsbyrå i Umeå. Efter befugtning af den tørre aske falder asken direkte ned i anlæggets indføringstragt. Tragten, som rummer op til 2 m³, er forsynet med en vibrator for at opnå en jævn tømning. I bunden af tragten findes en valse, der fordeler asken på et 650 mm bredt transportbånd, som mader asken ind i maskinen. Tykkelsen af askelaget kan justeres ved at regulere en spalteåbning i bunden af indføringstragten (billede 1).

Efter asken har forladt indføringstragten, presses den sammen af en forkomprimeringsvalse, inden den presses til stænger af en pressevalse og en modtrykssvalse under transportbåndet. Pressevalsen holdes ren af en højtryksskraber. Stængerne bliver efter at have forladt pressevalsen skåret i stykker af ønsket længde af en kapvalse. Valserne er 500 mm brede og har en diameter på 220 mm. Efter at have forladt kapvalsen falder de færdige pellets ned i en container, hvor de hærdes ved kontakt med luftens kuldioxid. Hærdningstiden ved temperaturer over 0°C er cirka en måned under tag med god udluftning. Produktionskapaciteten for anlægget er cirka 5 ton pellets i timen, hvilket modsvarer en årlig produktion på 10.000 ton.



Billede 1 Anlæg til pelletering af aske. I forgrunden ses kapvalse og pressevalsen. I baggrunden ses indføringstragten. Foto: Løvgren et al. 1999.

Anlægget er fuldt indbygget i en 20 fods container og er således mobilt og enkelt at transportere (billede 2). Idet der anvendes en meget lille vandmængde, kræver teknikken en meget jævn befugtning af asken, for at alle askepartikler er befugtede i presseprocessen. Der skal derfor monteres en askeblender, der ikke er monteret i containeren, før indføringstragten. På baggrund af erfaringerne fra fuldskala forsøget evalueres teknikken til at være meget stabil og problemløs, selvom der dog blev foretaget visse justeringer af materiellet under forsøget.



Billede 2. Anlægget til pelletering af aske kan være i en 20 fods container.

Foto: Løvgren et al. 1999

Pillernes fysiske og kemiske egenskaber

De færdige askepellets er halvrunde stænger med en radius på 9 mm og en længde på 5-30 mm. Der blev udført kornstørrelsesanalyser, hvor prøverne tørstigtedes gennem sigter med en maskevidde på mellem 0,25 og 14 mm (Tabel 2). Resultaterne viste, at andelen af pellets af den ønskede størrelse var tilfredsstillende, selvom andelen af støv (<0,25 mm) steg med stigende grad af håndtering.

Tabel 2 Kornstørrelsesfordeling for hærdet og uhærdet aske ved en sporvidde på pressevalsen på 10 mm. Den hærdede aske havde ved prøvetagningen været udsat for omfattende håndtering.

Aske	<0,25	0,25-0,50	0,50-1,00	1,00-2,00	2,00-4,00	4,00-8,00	8,00-10,00	10,00-12,00	>14,00
Uhærdet	6	4	8	11	14	39	8	8	2
Hærdet	12	4	6	9	15	28	17	6	3



Billede 3 Pelleteret aske. Foto: Løvgren et al. 1999

Askens vandindhold er meget vigtig for pelleteringen og hærden af de færdige pellets. Det optimale vandindhold beror på askens egenskaber, hvilke igen er afhængige af brændslet og den anvendte teknik. Er vandindholdet for lille, hærdes asken ikke tilstrækkeligt, hvorimod asken har tendens til at klumpe og forårsage driftstop, når vandindholdet bliver for højt. Erfaringerne fra Sverige, hvor man anvendte en CFB-kedel viste, at det optimale vandindhold i asken lå i et meget snævert interval på 27-30%. Ved dette vandindhold havde de færdige, hærkede aske-pellets en rumvægt på 815 kg/m^3 i løs vægt.

Indholdet af næringsstoffer i de færdige pellets er selvfølgelig afhængig af askens indhold af næringsstoffer, der igen afhænger af brændslet. Næringsstofindholdet i flyveaske fra Stora Ensos papirmølle i Fors og fra AssiDomäns papirmølle i Frövi samt næringsstofindholdet i ovtør aske fra dansk nåletræflis (Kofman, 1987) er vist herunder i Tabel 3. Frövis piller er fattigere på fosfor, kalium og magnesium end aske fra dansk nåletræflis i gennemsnit.

Tabel 3. Gennemsnitligt næringsstofindhold i flyveaske fra Fors (upelleteret) og Frövi (pelleteret) samt næringsstofindholdet i oventør aske fra dansk nåletræflis (Kofman, 1987).

Næringsstof		Fors (upelleteret)	Frövi (pelleteret)	Nåletræ
Ca	g/kg	119	144	129
Mg	g/kg	12,9	14,7	17,0
K	g/kg	25,2	35,4	46,3
P	g/kg	5,2	8,9	14,0
Si	g/kg	145	168	-
Al	g/kg	78	67	-
Na	g/kg	12,3	1,32	7,6
As	mg/kg	10,2	<48,9	-
Cd	mg/kg	4,8	10,1	8
Co	mg/kg	22,8	12,6	15
Cr	mg/kg	56,9	159	-
Cu	mg/kg	59,5	68,3	135
Hg	mg/kg	0,32	-	-
Mn	mg/kg	5,9	5,4	13,2
Mo	mg/kg	<5,7	10,8	-
Ni	mg/kg	50,7	67,5	-
Pb	mg/kg	41,0	102	107
V	mg/kg	53,6	55,0	-
Zn	mg/kg	929	1156	817
Glødetab	%	11,2-21,1	12,1	16,8

Forsøg med pelletering af aske i Danmark

Der produceres piller af biomasse i Danmark til forskellige formål, bl.a. foder, gødning og brændsel. Inspireret af udviklingsarbejdet med pelletering af aske i Sverige, blev danske producenter spurgt, om aske kan pelleteres. De fleste producenter mente, at aske ville være uegnet til pelletering. Bioteknologisk Institut råder over udstyr til presning af piller. Instituttet indvilligede i at medvirke i en pilotundersøgelse om askepelletering i Danmark. Et pilotforsøg blev gennemført den 1. februar og selve forsøget den 4. marts 2002 på Bioteknologisk Instituts forsøgsstation, Gl. Åbovej 1, 6092 Sdr. Stenderup. Deltagere var Jørgen Busk fra Bioteknologisk Institut og Simon Skov, FSL. Forsøget havde til formål at undersøge, om der kunne presses piller af flisaske.

I pilotforsøget blev der eksperimenteret med blandingsforholdet mellem aske og vand og tilsætning af organisk stof i form af foder. Der blev fremstillet en række blandinger af aske, vand og bindemiddel. Bindemidlet var tørrede, pressede plantedele/foderpiller.

Pillerne blev fremstillet på en roterende matricepresse og blev derpå tørret på papirssække ved lav rumtemperatur, ca. 15°C. Tørringen forløb hurtigst lige efter presningen pga. varmen i pillerne. Derefter tørrede pillerne kun langsomt. De tørrede en uge i alt. Konklusionen af pilotforsøget blev, at der skulle anvendes noget organisk materiale som smøremiddel i presningen.

Vurderingen af forløbet af pelleteringen hviler på Jørgens Busk's erfaringer med pelletering (Tabel 4). Pillepressens elforbrug og lyd er vigtige parametre. Et ualmindeligt stort

elforbrug afslører, at processen kører dårligt, og at materialet dårligt lader sig presse. Flowet gennem matricen skal gerne være jævnt og glidende. Hvis pressen banker, viser det, at materialet sidder fast i matricen eller kun glider igennem den med besvær.

Tabel 4. Pilotforsøg med presning af piller. Blandingsforhold af aske, foder og vand, samt proces- og produktvurdering.

Aske, TS %	Foder %	Vand %	Presseproces	Vurdering af friske piller
100	0	25	højt elforbrug, hård banken, presse fastkørt	-
100	0	50	ret højt elforbrug, nogen banken	korte smattede piller
100	0	40	ret højt elforbrug, nogen banken	korte, smattede piller
90%	10%	40	OK elforbrug, OK presning	OK, hårde ved ovntørring men letopløselige i vand.

I det næste forsøg var det planlagt at lave piller af blandinger af aske, vand, og forskellige bindemidler og smøremidler. Formalede sheanøddeskaller, ligninpulver og cement indgik i afprøvningen. Blandingsforholdene fremgår af tabel 5. Målet var at få en god presseproces. Pillerne skal være faste nok til at holde formen i frisk tilstand og skal kunne tørre til en hård pille. I nogle tilfælde blev massen kørt gennem pressen to gange.

Forsøget blev udført på en Sprout-Matador matricepresser (billede I-VI). Den anvendte matrice var en ældre 5x50 p27 matrice. Den blev valgt dels pga. risikoen for at materialet ville brænde sig fast i matricen og derved ødelægge den, og dels fordi Jørgen Busk mente, den var velegnet. Andre matricestørrelser kunne give andre resultater. I begge forsøg blev der anvendt flisflyveaske fra Ebeltoft Varmeværk. Restkulindholdet i asken er ikke kendt, men var betydeligt. Asken var udtaget til formålet og derfor ikke befugtet på forhånd.

Asken blev tilsat 25% vand og 5 – 25 % bindemiddel, som kunne være 5-10% lignin, 5-15% shea nødder eller 5-10% cement. Kombinationer af lignin og sheanødder, lignin og cement, og sheanødder og cement blev afprøvet. Piller med iblanding af cement blev ikke tilfredsstillende, hvorimod blandinger af lignin og sheanødder fungerede bedre. Det bedste resultat for tørre piller blev opnået ved en blanding af 5% lignin og 15% sheanødder.

Lignin er et almindeligt anvendt organisk bindemiddel. Restproduktet fra presning af sheanødder bruges som brændsel i biomassefyrede anlæg, efter at pulveret er presset til piller. Cement indeholder brændt kalk (kalciumoxid) og hærder på samme måde som aske under dannelse af karbonat. Tilsætningsmidlerne er principielt forskellige, og blev valgt for at teste effekten af plantefibre, lignin og et uorganisk bindemiddel. Det er erfaringen, at plantefibre virker smørende og får massen til at virke mere smidig. Lignin anvendes bl.a. i forbindelse med presning af træpiller. Lignins virkning i forbindelse med aske var ikke kendt. Der blev anvendt malede sheanøddeskaller, fordi sheanødder har et højt olieindhold. Olien kunne ventes at smøre matricen samtidig med, at askepillerne opnåede en blank og bestandig overflade. Det skulle afprøves, om cement kunne hærde askepillerne på trods af det høje kulindhold i asken, som modvirker hærningen.

Tabel 5. Pelletering af flyveaske med tilsætning af forskellige binde- og smøremidler. "-" betyder, at intet er oplyst.

Nr	Aske	Lignin	Shea	Cement	Vand	Presseproces	Beskrivelse friske piller	Beskrivelse af tørre piller
	Tørstof = 100%				% Af totalvægten			0-dårligst, 3 bedst
1	90	10			1	lavt elforbrug	piller ok, bedre ved dobbeltpelletering	1
2	95	5			0	højere elforbrug	smuld	0
7	90	5	5		1	OK elforbrug	lange glatte piller	1
8	85	5	5	5	1	-	lange glatte piller	1
9	90	5		5	3	-	Korte piller, smuld	3
10	85	10		5	2	-	Lange, glatte-gode piller	2
	80	10		10	0	-	Dårlige piller	0
12	80	10		10	0	-	Bedre piller, men ikke ok	0
14	75	10	5	10	1	-	Meget bedre end 12, men ikke ok	1
11	85		15		3	-	Lange, glatte, gode	3
13	80	5	15		1	-	Lange, glatte, gode – bedst. Lignin smører matricen	1
15	85		10	5	2	-	Dårlige ved 1. pel., bedre ved 2. pelletering	2
17	80		10	10	3	-	Gode ved 1. pel., bedre ved 2. pel.	3

Pillerne var 5 mm i diameter og havde forskellig længde afhængigt af, hvordan presningen gik. Det typiske var en længde på ca. 10 mm. Pillerne fik varierende kvalitet i frisk tilstand. Efter tørring blev de hårde, men var forholdsvis letopløselige i vand, hvilket var en uønsket egenskab.

Konklusionen på forsøgene blev, at asken dårligt lader sig presse uden tilsætningsmidler. Cement hærdet dårligt i forbindelse med kul. Det antages, at der kun var en ringe effekt af det tilsatte cement, fordi kulindholdet i flyveasken var højt. Ingen af pillerne er tilfredsstillende til brug, men forsøget viser, at flyveaske lader sig presse med de rette tilsætningsstoffer. Pillerne blev forsøgsvis spredt ud på jorden bag Bioteknologisk Institut. Efter halvandet år, i sommeren 2003, havde de stadig deres oprindelige form.



I: Pillepresse



II: Pillepresse, nærbillede



III: Matricen bestemmer pillestørrelsen



IV: Tørring af piller



V: Fremstillede askepiller



VI: Pillerne blev spredt på jorden, og var sammenhængende efter 1,5 år.

Fotograf: Simon Skov.

Stabilitet af forbehandlet aske

Et væsentligt formål med pelleteringen er at hærde asken, så den basiske effekt og opløsningshastigheden sænkes. Man sikrer herved, at næringsstofferne frigives i takt med, at de kan optages i økosystemet. Samtidig sikres det, at udspredningen ikke medfører skader på træerne eller flora og fauna iøvrigt. Der blev i forbindelse med det svenske forsøg udført en undersøgelse af den hastighed, med hvilken næringsstofferne frigives fra den pelleterede aske.

Laboratorieforsøg viste, at den pelleterede aske frigiver næringsstofferne overordentligt langsomt. Eksempelvis var der efter 100 døgns udvaskning med 0,01 M saltsyre stadig 61% af den oprindelige mængde kalium tilbage i den pelleterede aske. Kalium anses for at være det element, der lettest udvaskes. Udvasning med 0,01 M saltsyre i 100 døgn modsvarer teoretisk udvaskningen efter 200 år på skovjord (Lövgren *et al.*, 1999). Forsøgene viste endvidere, at den pelleterede aske havde et betydeligt langsommere udvaskningsforløb end andre typer af granuleret aske og skovkalk. Dette gør, at den pelleterede aske vurderes at være meget velegnet til udspredning i skov.

Stabiliteten af forbehandlet aske kan også undersøges ved at sprede asken i feltforsøg. Pillerne kan f.eks. lægges i netposer, hvor opløsningen af de enkelte næringsstoffer kan følges. En pose ad gangen tages op med bestemte tidsintervaller og udgør derved en serie observationer over tid. Granuleret aske i finmaskede net af polyethylen blev inkuberet i jordbunden på en næringsrig og en næringsfattig skovlokalitet under træarterne bøg, eg, douglasgran og rødgran (Callesen *et al.*, 2004a). Formålet var at undersøge, hvor hurtigt næringsstofferne i asken blev frigivet fra askeposerne. Efter syv år blev askens kemiske ændringer analyseret og intensiteten af mykorrhizasvampe bestemt. Ved optagningen var askens masse kun reduceret med 19%, mens en større andel af næringsstofferne var forsvundet fra askeposerne: for calcium, magnesium og kalium ca. 35%, og for fosfor ca. 19%. Nedbrydningsmiljøet på de to jordtyper og under de fire forskellige træarter havde ikke indflydelse på opløsningshastigheden af flisasken. Mængderne repræsenterer nettoændringer i perioden, og det kan ikke udelukkes, at nogle poser midlertidigt har optaget næringsstoffer under inkuberingen. Forsøget var ikke anlagt for at undersøge effekter af askens forbehandling, og derfor indgik kun en enkelt type aske i forsøget. Fremfor at sprede pillerne i skoven og måle effekterne på jordkemi, flora, fauna og udvaskning og trævækst, kan det være en ide at benytte laboratorieforsøg i arbejdet med at udvikle stabile piller. I fremtidige feltforsøg vil det være relevant at teste reaktiviteten af forskellige typer forbehandlet aske på samme lokalitet. Forsøg i Sverige har vist, at pelleteret og granuleret aske opløses meget langsommere end ubehandlet aske og langsommere end selvhærdet knust aske, forudsat at pillerne har en ordentlig kvalitet (Ring *et al.*, 1999).

I nye forskningsinitiativer i Sverige ved Skogsindustriell Kemiteknik, Chalmers og Lunds Universitet arbejder man med at frembringe balanceret og stabil gødning af aske og andre restprodukter fra papirproduktion. Stabiliteten testes i laboratorieforsøg, hvor opløsningen af enkelte pellets følges i flow-celler (Gunnar Thelin, Lunds Universitet, pers. komm.). Man arbejder på at binde kalium i mere langsomt reagerende forbindelser som carbonat eller silikat fremfor de letopløseligt klorid og sulfat bl.a. ved opvarmning til 7-800 grader. Der eksperimenteres også med tilsætning af kaliumsilikat som stabiliserende element (K_2SiO_3). Produkternes stabilitet testes i laboratorie og feltforsøg.

Omkostninger ved pelletering af aske

Produktionsomkostningerne ved pelletering af aske og spredningsomkostningerne i det svenske fuldskalaforsøg er opgjort (Vattenfall AB, 1998). Ved pelletering af 330 ton tør aske per måned var driftsomkostningerne 44,15 d.kr. per ton og transportomkostningerne internt på fabrikken 26,49 d.kr. per ton. De samlede driftsomkostninger var således 70,63 d.kr. per ton tør aske eller 49,49 d.kr. per ton færdige pellets med et vandindhold på 30%.

Prisen for det afprøvede valsepelleteringsanlæg inklusive et anlæg til befugtning af asken er cirka 1,4-1,6 mio. d.kr. Ved en årlig produktion på 10.000 ton færdige pellets og afskrivning af anlægget over tre år giver dette en kapitalomkostning på 68-80 d.kr. per ton aske ved en kalkulationsrente på 10%. Sættes afskrivningstiden til ti år er kapitalomkostningen 28-33 d.kr. per ton aske. Transportomkostninger til enten mobilt anlæg eller transport og omladning af asken skal lægges til de direkte produktionsomkostninger.

Det danske pilotforsøg er ikke modent til at gøre omkostninger ved produktionen op. Her var målet blot at få erfaringer med pelletering af aske.

10. Spredning af aske i skoven: økonomi og teknik

Omkostningerne til spredning af aske i skoven er sammensat af lageromkostninger, transport fra værk til skov og omkostninger til spredning. Det er relevant at sammenligne med omkostninger til spredning af kalk eller kunstgødning med tilsvarende næringsindhold og kalkvirkning.

Spredning af pelleteret aske i svensk fuldskalaforsøg

Afsnittet er et citat fra (Nord-Larsen, 2002) i redigeret og opdateret form. Omkostningerne til udspredning af aske er blevet undersøgt ved fire forskellige feltstudier i Midtsverige fra 1995-1997 (Vattenfall AB, 1998). Undersøgelsen omfattede forskellige typer af knust og pelleteret aske. Asken blev transporteret 40-50 km til skoven i containere og senere spredt ud med tallerkenspreder eller gødningsspreder. Der blev udspremt 3 ton pelleteret aske per ha. Den gennemsnitlige omkostning til transport med lastbil var 65 d.kr. per ton eller 194 d.kr. per ha. Prisen for udspremt i skov var 267 d.kr. per ton eller 803 d.kr. per ha. Ved fuld effekt på systemet skulle denne udgift kunne reduceres til 113 d.kr. per ton eller 339 d.kr. per ha. Således er de samlede omkostninger ved pelletering, transport og udbringning af aske, inklusive kapitalomkostninger 279 d.kr per ton eller 837 d.kr. per ha. for det fuldt udbyggede system. Pelletering og udspremt af aske i skoven kan altså ske til en pris, der svarer til mellem halvdelen og en tredjedel af prisen for deponering.

Danske erfaringer med udspremt af aske

I dette afsnit sammenfattes de danske erfaringer fra Klosterheden og Thy Statsskovdistrikter, hvor man har spredt aske i 1990'erne.

Klosterheden Statsskovdistrikt

Klosterheden Statsskovdistrikt har i en længere årrække spredt forskellige typer af gødning samt aske fra flisfyrede varmekærter i skoven. På baggrund af disse erfaringer er omkostningerne ved udspremt af aske estimeret af Maskinstationsleder Paul Andersen på Klosterheden Statsskovdistrikt. Udgifterne til transport af asken fra askeproducenten til skoven er ikke inkluderet i denne undersøgelse.

Asken tænkes udspremt med en traktor og en Bredahl B.48 tallerkenspreder med en lastkapacitet på 2,5 m³. Ved en densitet af asken på 815 kg/m³ løs vægt giver dette en samlet lastkapacitet på godt 2 ton. Det vurderes, at det er muligt at sprede ca. 1,5 læs i timen eller godt 3 ton. Maskinprisen er godt 450 kr./time, hvilket giver en samlet omkostning ved udspremt af 3 ton per ha på 450 kr./ha eller 150 kr./ton.

Det vurderes, at man ved at ombygge spredningsaggregatet, således at det kan monteres på en udkørselsmaskine i lighed med de svenske forsøg, kan øge kapaciteten til ca. det dobbelte, dvs. godt 6 ton/time. Maskinprisen er da 750 kr./time, hvilket giver en samlet omkostning ved udspremt af tre ton per ha på 325 kr./ha eller 125 kr/ton. Der spredes ikke længere flisaske på Klosterheden Statsskovdistrikt, fordi omkostningerne ved de spredning af de lave mængder, som Bioaskebekendtgørelsen giver mulighed for, blev for store.

Thy Statsskovdistrikt

Thy Statsskovdistrikt har i lighed med Klosterheden flere års erfaring med udspreddning af flisaske. Ifølge oplysninger fra skovfoged Per Kynde er der på distriktet i perioden 1997-2000 udbragt 351 ton våd flisaske med et vandindhold på ca. 34%, svarende til 233 t TS. Udbringningen er sket med en almindelig kalkspreader, som bruges i landbruget og skovtraktor med frontlæsser.

De samlede omkostninger i perioden 1997-2000 til udbringning af aske var 37.025 kr. Omkostningerne omfatter maskinprisen for traktor og kalkspreader (tallerkenspreder) samt løn og sociale omkostninger. Selve spredningen af asken har således givet en omkostning på 105 kr./ton våd aske. Omregnet til tørstof er omkostningen 159 kr./ton tør aske. Ved udspreddning af tre ton våd aske per hektar er prisen således 315 kr./ha.

Asken leveres fra Hurup og Vestervig Varmeværker til oplagringspladser i forskellige plantager, hvor den hærder. Herfra køres den ud løbende over efterår og vinter, hvor askeproduktionen er størst. Asken knuses ved træk med en tallerkenharve (billede 4). Et knusningsaggregat i kalkspreaderen ville være en forbedring af teknikken, der kunne sikre at større askeknolde blev knust. Asken ville blive nemmere at sprede og mere jævnt fordelt. Ved den anvendte dosis på 1 ton per ha bliver asken fordelt i et tyndt lag (billede 5). Kalkspreaderen, som kostede 10.000 kr i indkøb som brugt, får skiftet sliddele med mellemrum.



Billede 4 Lagerplads med fast bund af flis. Asken knuses med tallerkenharve og læsses på kalkspreader med traktorens frontlæsser. En valse monteret i selve spreaderen, der knuser asken, ville forbedre knusningen og lette spredningen. Foto: I. Callesen



Billede 5 Asken spredes i en dosis på 1 t TS per ha med Bredahl B.40 kalkspreader og skovtraktor. Afstanden mellem sporene er 10-12 m. Aske fra kørsel i nabosporet ses i forgrunden som en sort skygge på sneen. Foto I. Callesen



Billede 6 Den selvhærdede aske er ikke homogen. Store klumper spredes sammen med fine askepartikler. En valse, der knuser asken, ville give en mere homogen aske. Foto I. Callesen

11. Recirkulering af aske – aktuelle hindringer og fremtidige muligheder

Status for recirkulering af aske i Sverige

I Sverige recirkuleres flisaske stort set ikke til skove, men deponeres som affald. Göran Enander, direktør for Skogsstyrelsen, taler for, at udnyttelsen af træbrændsler skal være bæredygtig. Næringsstofferne i asken skal recirkuleres til skoven (Enander, 2003). En opgørelse foretaget af Skogsstyrelsen viser dog, at der i 2003 kun blev spredt aske på ca. 4000 ha skov i Sydsverige, mens arealet, hvor der fjernes grene og topender er ti gange så stort. Fjernelse af næringsstoffer ved flishugst kan på langt sigt udpine skovjorden, da der ikke er balance i næringsstofregnskabet ved den nuværende hugstpraksis. Med hensyn til forbehandling af asken og undersøgelser af miljøeffekter er der udført et stort forsknings- og udviklingsarbejde i de sidste 20 år. Dokumentation er omfattende, infrastrukturen findes og officielle anbefalinger om recirkulering af aske har været offentliggjort siden 1998 (Skogsstyrelsen, 2002). På trods af dette er askerecirkulering endnu ikke udbredt praksis blandt skovejere. Nogle større sammenslutninger af skovejere har dog en politik om, at man ikke må flise grene og topender uden at kompensationsgødske arealerne. Flisleverandørerne, dvs. skovejerne, skal selv sørge for bortskaffelse af asken, så der er direkte kobling mellem aske og skov. Staten lægger afgift på deponering og opfordrer til recirkulering af aske, men det sker alligevel ikke.

Genanvendelse af aske set fra askeproducentens synsvinkel

Ejeren af forbrændingsanlægget har ansvaret for at bortskaffe asken. Hvis en anden transporterer asken væk og i den forbindelse behandler den, overgår ansvaret til den nye ihænde-haver. Ansvar for at dokumentere askens egenskaber hviler på producenten eller den, der har overtaget ejerskabet. For T2 aske skal tungmetaller, tørstof, totalfosfor, kalium og restkulstof analyseres hver 6. måned. Omkostningerne til kemisk analyse er anslået til 3000 kr. excl. moms incl. omkostninger til prøvetagning og administration per analyse (Hansen, 2001). For små askeproducenter på træfyrede værker < 2 MW svarer dette til 700 kr. per ton aske ved en årlig askeproduktion på 10 ton TS og to prøvetagninger per år. PAH analysen, som gennemføres hvert andet år, er ikke medtaget. For store askeproducenter med årlig askeproduktion på 500 - 1000 ton TS bliver omkostningen til analyse 7 - 14 kr. per ton.

Flis købes fra forskellige leverandører, som kan være lokale skovejere, men også mellemhandlere, der fliser importeret rundtræ og leverer det til værket. Der er ikke nødvendigvis kontakt mellem producenten og den skovejere, der leverer træet. Derfor eksisterer der hellere ikke naturlige kanaler til recirkulering af asken til skoven.

Dokumentationen af askens indhold af gødning og fremmedstoffer hviler på askeproducenten, og der er ikke fastsatte standarder for prøvetagning og analyserapportering for aske. Askens kvalitet hænger formodentlig sammen med betingelserne ved forbrænding, som bør registreres. Denne information bør følge asken.

Hvis der sker samfyring med andre brændsler, f.eks. fuelolie, skal der sættes grænser for, hvor meget ikke-træbrændsel, der kan accepteres, for at asken kan betragtes som

ren træaske. Bioaskebekendtgørelsen nævner forureninger fra lim, som skal være <1%, men ikke fra olie, der bruges i nye store multifuelkedler.

Alternative anvendelser af aske

I erkendelse af, at der ikke er udbredt praksis for recirkulering af aske til skove i Danmark, forsøger man forskellige alternativer, bl.a. på Assens Fjernvarme (John Jessen, pers. komm.). Man har undersøgt anvendelse af flyveaske på teglværk til blanding i mursten, hvor restkullet kan bortbrændes. Det giver de samme hulrum, som i dag fremkommer ved iblanding af savsmuld. Flyveasken var uanvendelig, fordi kaliumindholdet var for stort. Flyveaske er også afsat til fremstilling af sandkugler, der bruges til sandblæsning (Firma RGS90).

Energiindholdet i asken kan udnyttes ved genforbrænding dels i affaldsforbrændingsanlæg og dels ved afbrænding på stedet. Der har været kontakt til Fynsværket, som ved genforbrænding kan udnytte de ca. 6-8 GJ per ton, som er flyveaskens brændværdi. Fynsværket kræver dog afgift for at modtage asken som brændsel. Installering af genforbrændingsanlæg med CFB kedel er blevet undersøgt. Teknikken er ikke afprøvet i Danmark. Projekteringen for Assens Fjernvarme foregik i samarbejde med COWI A/S, men var for dyrt. Genforbrænding foretages på store svenske træfyrede anlæg for at reducere askemængden.

Fangel A/S udvikler gødningspiller af restprodukter. Asken blandes med afgasset svinegylle. Ifølge bioaskebekendtgørelsen må aske bruges til jordbrugsformål, hvis det blandes med andre restprodukter og indholdet er mindre end 10%. I så fald må andre regler for vurdering af gødningen til jordbrugsformål gælde, f.eks. slambekendtgørelsen³ og gyllebekendtgørelsen⁴.

Aske benyttes i Tyskland til forsegling af affaldsdepoter. Asken spredes i et lag ovenpå affaldsdepotet og danner ved hærdningen et låg på affaldsdepotet. Derpå kan man opsamle biogas fra nedbrydningen af affaldet. Det var ikke en attraktiv løsning for Assens Fjernvarme, fordi der stadig skulle betales affaldsafgift på asken.

I Sverige eksperimenteres fortsat med fremstilling af mineralske og organiske gødninger, som baseres på træaske og restprodukter fra papir og energifremstilling. Restprodukterne er anderledes end i Danmark, fordi en stor del stammer fra papirindustrien. Samforbrændning af slam fra rensningsanlæg og træ diskuteres også. Formålet er at øge fosforindholdet i asken, så det balancerer med indholdet af kalium (Gunnar Thelin, Lunds Universitet, pers. komm.).

Genanvendelse af aske set fra skovejerens synsvinkel

Skovejeren har ikke lovmæssige pålæg om at gødske arealer, hvor der produceres flis, udover skovlovens bestemmelser om god og flersidig skovdrift. Hvis skovejeren ønsker at føre de høstede næringsstoffer tilbage til jorden, kan han have flere bevæggrunde. Valget af gødskningsprodukt afhænger af formålet med gødskningen, af den praktiske håndtering og af prisen på gødningen. Hensynet til rekreation og sikring af grundvandskvaliteten kan veje tungere end ønsket om recirkulering af hensyn til den næringsmæssige bæredygtighed. Dokumentationen for risikoen for negative miljøeffekter er efterhånden så omfattende, at en

³ BEK nr 623 af 30/06/2003 Bekendtgørelse om anvendelse af affald til jordbrugsformål

⁴ BEK nr 604 af 15/07/2002 Bekendtgørelse om erhvervsmæssigt dyrehold, husdyrgødning, ensilage m.v.

nuanceret diskussion er mulig. Forskellige gødskningsstrategier kunne være en følge af forskellig argumentation:

Forsigtighedsprincip I: Prioritering af grundvand og rekreative formål med skovdriften

Flisugst fjerner næringsstoffer, men også kadmium, som enten findes i jordbunden og som følge af atmosfærisk luftforurening fra affaldsforbrændingsanlæg. Af hensyn til grundvandsbeskyttelse og skovens rekreative funktioner, er spredning af aske uønsket. Selvom dokumentationen af miljøvirkningerne ved askespredning er omfattende, kan argumentet være af etisk karakter. Holdningsbearbejdelse er nødvendig for at overbevise skovejerne om, at der ikke er negative bivirkninger ved askerecirkulering.

Forsigtighedsprincip II: Vi fjerner ingenting fra jorden - recirkulering

Når askeproducenten udelukkende bruger træbrændsel og har få flisleverandører, er recirkuleringstanken nærliggende. Skoven har sikkerhed for, at den aske, der returneres, stammer fra egne arealer. Mængden af bortfjernede næringsstoffer kan beregnes vha. PC programmer udviklet til formålet, f.eks. ESBEN (Møller, 2001). Den fjernede mængde næringsstoffer føres tilbage til jorden. På samme måde kan mængden af fjernede tungmetaller beregnes. Den tilsvarende mængde, der kan tilbageføres med aske, kan så beregnes på basis af askens tungmetalindhold. Dette princip vil i højere grad være i overensstemmelse med recirkuleringstanken end en given koncentration af f.eks kadmium i aske. Beregninger af næringsfraførsel skal ledsages af mål for usikkerheden på den fjernede mængde. Det betyder, at man kan føre en forsigtig praksis i doseringen ved recirkulering af næringsstoffer og kadmium.

Produktionsgødskning

Balanceret gødning med NPK gødning øger tilvæksten, og askespredning i kombination med kvælstof kan også øge tilvæksten. Rentabiliteten af askespredning skal beregnes som en marginal investering. Hidtil har produktionsgødskning ikke været rentabelt og er ikke aktuelt i skovbruget som selvstændigt mål. Punktgødskning i nye kulturer med balanceret gødning foretages i mindre omfang. Gødskning i pyntegrøntbevoksninger er udbredt. Her er gødning med både kvælstof og mineraler imidlertid vigtigt, fordi der fjernes store mængder grønt.

Modvirke naturlig og menneskeskabt forsuring

Tab af basekationer ved udvaskning er en naturlig proces. Atmosfærisk nedfald af forsurende stoffer og høst af biomasse bidrager også til forsuring. Mange skovjorde har lavt pH, hvilket kan påvirke vandkvalitet og biodiversitet negativt. Tilførsel af syreneutraliserende aske kan betragtes som en modforanstaltning mod forsuring. Der er tale om en rehabilitering af økosystemet. En øget produktion ville være en mulig ekstra gevinst. Skovkalkning med sigte på at modvirke forsuring udføres ikke i Danmark for øjeblikket, men udføres rutinemæssigt i flere tyske delstater, bl.a. Rheinland-Pfalz (Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz, 1998). I Sverige laves der forsøg med kombineret spredning af kalk og aske på højbundslande og i vådområder i et helt afstrømningsopland, for at hæve vandkvaliteten i områdets vandløb. Strategien er at få en umiddelbar effekt på vandløbskvaliteten og en langvarig effekt på koncentrationen af ioner i det afstrømmende vand fra højbundslandene. Kalk- og askebehandlingen har reduceret koncentrationen af uorganisk, toksisk aluminium i det afstrømmende vand, så ørreder igen har mulighed for at yngle i vandløbene (Larsson *et al.*, 2003). Samtidig er koncentrationen af kalcium øget.

Behovsbestemt – træerne mangler bestemte næringsstoffer

Hvis skovtræerne viser mangelsymptomer på enkelte næringsstoffer, kan dette korrigeres ved at tilføje det eller de næringsstoffer, der er i underskud. Hvis skovejeren følger denne strategi, kan han forholde sig afventende, indtil der måske kommer tydelige tegn på næringsmangel og faldende udbytter på arealer med intensiv flishugst.

Økonomi

Skovejeren kunne modtage betaling for at modtage aske fra askeproducenten som en del af aftalen om flisleverance. De økonomiske overvejelser skal vejes op mod ønsket om at gøde, omkostninger til spredning, sikkerheden for at der ikke er negative miljøeffekter osv.

Muligheder for at sprede aske i skove i Danmark

Der kan findes argumenter for og imod at sprede aske i skove. Argumenterne "for" får større vægt, hvis næringsstofferne i asken er på en form, hvor de frigives så langsomt, at de ikke tabes ved udvaskning eller frembringer næringsubalancer i planterne. Derved kan en større mængde spredes på en gang med lavere spredningsomkostninger til følge.

Pelletering

Med pelletering af aske sikres en langsom opløsning af asken og en reduceret direkte påvirkning af skovjorden. Der eksisterer en række hindringer for, at spredning af forbehandlet aske kan blive en udbredt praksis i Danmark. Erfaringerne fra det svenske pelleteringsforsøg (Vattenfall AB, 1998) viser, at det er vigtigt, at asken er ensartet og ikke indeholder slagger. Slagger hindrer en ensartet befugtning af asken og kan medføre, at pressevalsen ødelægges. Endvidere er det vigtigt, at asken ikke indeholder større mængder af uforbrændt materiale. Dette er ikke noget problem i det svenske forsøg, hvor man har anvendt CFB-teknologi. Med denne kedeltype er størstedelen af asken fra forbrændingen flyveaske, som er ensartet og har en meget lille andel uforbrændt materiale. I Danmark anvendes imidlertid forbrænding på rist. Dette giver en mindre mængde flyveaske, der ofte har et højt indhold af tungmetaller. I Danmark vil det derfor overvejende være bundasken, der kan anvendes til pelletering og udbringning i skov. Denne aske kan sagtens bruges til pelletering, forudsat at indholdet af større fremmedlegemer og uforbrændt materiale ikke er for højt. Bundasken skal passere en sigte, før den kan pelleteres.

Asken skal pelleteres i tør tilstand for at hærde. Det meste danske aske er vådudasket. Forsøgene med presning af piller af dansk flyveaske viser dog, at presning er mulig, når der anvendes bindemidler. Brug af bindemidler åbner imidlertid en helt ny dagsorden for gødningsprodukter, der baseres på organisk restaffald og aske. Afhængig af blandingsforholdet er der ikke længere tale om ren træaske. Hvis indholdet af bindemidler bliver stort, kan man ikke længere tale om recirkulering, men om brug af gødning baseret på aske og organiske restprodukter.

Skala: små og store askeproducenter

Askeproduktionen på et værk kan være så begrænset, at det giver et skalaproblem. De største anlæg producerer 2000 ton TS aske per år, heraf 800 – 1000 ton bundaske. For AB Vattenfalls pelleteringsanlæg svarer det til 200 driftstimer per år ved en ydelse på 5 t per time. Det øger kapitalomkostningerne til anlægget, at det ikke kan opnå et større antal driftstimer. En løsning kunne være at lade anlægget cirkulere mellem de største askeproducenter, eftersom det kan

bygges ind i en container. Det ville blot kræve længere oplagringstid for asken på værket, og synes ikke at være realistisk. Hvis al bundaske samles på et forbehandlingsanlæg, skal man indregne transport til anlægget og distribution af den forbehandlede aske. Det kan dog være et problem, hvis asken til pelletering bliver hentet fra forskellige værker, fordi asken så ikke har den ønskede ensartethed på grund af forskelle i fyringsteknik på de enkelte værker. Askerne skal have et kendt kulindhold og et indhold af tungmetaller og PAH, der opfylder gældende bestemmelser. Analyseomkostningerne vil være relativt høje ved en lav askeproduktion.

Lovgivning

Bioaskebekendtgørelsen udgør p.t. en forhindring for recirkulering af aske til skovbevoksninger. Lovgivningen siger, at der ikke må udsprede mere end 0,5 ton træaske per ha over en tiårs periode, såfremt indholdet af cadmium er 8-15 mg/kg tørstof. Er indholdet 0,5-8 mg/kg, må der udsprede op til 1 ton/ha, mens der må udsprede 7,5 ton per ha over en tiårs periode, hvis indholdet af cadmium er under 0,5 mg/kg. Asken fra danske flisfyrede kraft-/varmeværker har typisk et indhold af cadmium på 8-15 mg/kg. Således må der som oftest ikke udsprede mere end 0,5 ton aske per ha over en ti-års periode, hvilket er for lidt til at gøre økonomien i udspreddingen tilfredsstillende. Kompensation for den næringsstoffjernelse, der finder sted over en omdrift med rødgran i Vestjylland vil typisk kræve ca. 2-7 ton tør aske alt efter udnyttelsesintensitet, næringsstofindhold i asken, bevoksningens næringsstofstatus, samt hvilket næringsstof man ønsker at kompensere for. Dette er i god overensstemmelse med, at man i Sverige anbefaler at sprede ca. 4 ton tør aske per ha per omdrift. Som følge af bioaskebekendtgørelsen synes det ikke p.t. muligt i Danmark på en økonomisk måde at pelletere og udbringe aske i skoven som kompensation for det ekstra udtag af næringsstoffer, der skyldes heltræudnyttelse. Det synes dog på længere sigt muligt at ændre de lovgivningsmæssige rammer for udbringning af aske i skov, idet det er vist, at frigivelsen af næringsstofferne i forbeholdt aske sker i en sådan takt, at næringsstofferne kan nå at blive optaget af træerne uden at udvaskes til grundvandet. Der er ikke negative effekter på kvaliteten af bær og svampe, jord og grundvand ved de her nævnte doser aske. Det viser den eksisterende danske og udenlandske dokumentation, som omtalt i afsnit 8.

Valg af gødningsprodukt: aske, kalk, organisk gødning eller kunstgødning ?

Valget af gødningsstrategi afhænger af skovejeren. Hvis ejeren lægger vægt på bæredygtighed, og evt. indgår i certificeringsordninger for bæredygtig skovdrift, kan økologisk gødning ved intensiv plantagedrift være påkrævet (Peter Kristensen, FSC⁵, pers. komm.). Producenter af pyntegrønt gøder, men pyntegrøntbevoksninger er meget følsomme overfor svidningsskader. Forbehandling af aske vil sandsynligvis være nødvendig for at undgå svidningsskader i pyntegrøntbevoksninger. Hvis asken spredes inden kulturanlæg, er svidning ikke noget problem. Store skovarealer i Jylland har et lavt antal skovgæster, så selve spredningen ventes ikke at genere skovgæster. Askespredning i de foreslåede doser på 3 - 4 ton per ha ventes ikke at påvirke flora og svampe og bær negativt.

Hvis skovejeren har valgt at gødske, skal der vælges et gødningsprodukt og en dosering, som giver den ønskede positive effekt på skovøkosystemet. Produktet skal være miljømæssigt acceptabelt, let at håndtere og konkurrencedygtigt i pris. Frigivelsen af

⁵ Forest Stewardship Council Denmark, www.fsc.dk

næringsstoffer fra gødningen skal være balanceret, så mængden af elementer passer til planternes behov.

Ved vurdering af askens indhold af næringsstoffer og evne til at neutralisere syre samt kadmiumindholdet skal man sammenligne askens egenskaber med andre kalk- og gødningsprodukter. De forskellige gødningsprodukter indeholder de ønskede stoffer, men også uønskede elementer som f.eks. kadmium. Jordbrugskalk kan indeholde op til 1 mg kg^{-1} kadmium. Råfosfat, som anvendes i kunstgødning indeholder også kadmium i varierende mængder, f.eks. $0,13 \text{ mg kg}^{-1}$ i råfosfat fra arktiske egne (Miljøstyrelsen, 2000b). Jordbrugskalk har en meget variabel opløsningshastighed, afhængig af typen og formalingsgraden. Virkningsgraden beregnes som ækvivalenter til indholdet af kalciumkarbonat. Hvis asken indeholder oxider, er virkningsgraden større. En prissammenligning skal derfor sammenholde krævede mængder, pris og belastning med kadmium ved den udførte behandling. Hærdet træaske har en neutraliserende virkning på 20-30% i forhold til rent kalciumkarbonat, svarende til indholdet af kalcium i aske. I uhærdet aske vil den syreneutraliserende virkning være større, fordi oxiderne først skal omdannes til carbonater. Hvis man går efter en ren syreneutralisering, skal man sprede to til tre gange så meget aske som kalk, hvilket skal indregnes i en prissammenligning. Jordbrugskalk har meget forskellig kalkvirkning og opløsningshastighed, hvilket ofte negligeres i sammenligninger af effekter af kalkningsforsøg i skoven. Derfor beregner man kalkningseffekt i forhold til den syreneutraliserende virkning af 100 kg rent kalciumkarbonat og indregner partikelstørrelsen.

Handelsgødning har velkendte egenskaber, idet de skal deklarerer. Egenskaber og virkninger af slam og aske er mindre kendt, men skal også deklarerer i henhold til lovgivningen. Det er accepteret at en forbehandling af asken er ønskelig for at lette håndtering og dæmpe reaktiviteten. Det skyldes også hensynet til arbejdsmiljøet i forbindelse med spredning i skoven. Produktudvikling er nødvendig f.eks. i form af gødninger baseret på organisk restaffald og aske. Udover den praktiske fremstilling, vil der også kræves dokumentation for produkternes næringssammensætning, den balancerede opløsning af de enkelte næringsstoffer og indholdet af uønskede stoffer. Anvendelse af organisk affald som slam og gylle i skoven kan møde modstand med baggrund i etiske argumenter. Recirkulering af aske virker mere oplagt, fordi aske fra skovbrand er en naturlig del af nåleskoves næringskredsløb i det mindste i boreale egne.

Der findes ikke noget etableret, fungerende marked for træaske for øjeblikket. Askeproducenterne vil kunne fastsætte en meget lav pris på asken, fordi alternativomkostningen er statsafgift på 375 kr. per ton og en tilsvarende afgift for deponering. Dertil kommer omkostninger til at dokumentere indholdet af næringsstoffer og tungmetaller i asken og til forbehandling af asken. Der er imidlertid ingen direkte incitament for skovejeren til at aftage flisaske, fordi gødningspraksis ikke er udbredt. Der er mange andre gødningsprodukter at vælge imellem, hvis man vælger at gøde. Det ville blive mere oplagt, hvis aftaler om at aftage aske i skoven blev en del af prisforhandlingen mellem flisleverandør og askeproducent, således at næringsrecirkulering blev indbygget i aftalerne om flisleverance.

12. Konklusion

Der kan fremsættes to løsningsstrategier for askehåndtering afhængig af værkets størrelse:

Små værker, få leverandører :

- at fastholde recirkuleringstanken for aske i kredsløbet skov – varmekærk - skov. Det kræver en konkret løsning af de tekniske problemer, herunder mængder og metode i spredning af aske. Praktiske erfaringer har vist, at spredning kan gennemføres billigt med standardmaskiner. Det betyder imidlertid, at bioaskebekendtgørelsen må revideres, så den omfatter mere af den bundaske, der produceres for øjeblikket. Man kunne overveje at basere belastningen med kadmium på en kg per ha basis frem for at fastsætte koncentrationer. Et system til dokumentation af askens indhold af fremmedstoffer skal operationaliseres. Skovejerne skal motiveres til at aftage asken, f.eks. som led i flisleveranceaftaler.

Store værker, flere leverandører og brændselstyper

- at lade asken indgå i affaldsøkonomien, hvor talrige anvendelsesmuligheder for aske eksisterer. Alternative anvendelser kræver imidlertid også, at askens egenskaber er deklareret. Staten regulerer markedet ved at fastsætte affaldsafgiften. Stigende omkostninger til deponering af aske vil være et incitament til at finde andre anvendelser. Incitamentet vokser, jo større afgifter og omkostningerne til deponering bliver.

13. Publikationer med relation til askeprojekterne 1999 - 2004

Generelle publikationer

Nord-Larsen, T., Ingerslev, M., Møller, I. S., 2001. Udspredning af pelleteret aske i skov. Skoven 9/01: 418-421

Nord-Larsen, T., Ingerslev, M. og Møller, I. S., 2001. Udspredning af pelleteret aske i skov. Fjernvarmen, Danske Fjernvarmeværkers Forening. Nr. 8, 2001: 32-37.

A: Udbringning af flisaske i dansk skovbrug – Økologiske konsekvenser

Ingerslev, M., 2001a. Anlægsrapport nr 597, forsøgsnummer 1506. Thy Statsskovdistrikt, Nystrup klitplantage, afd. 452a.

Ingerslev, M., 2001b. Anlægsrapport nr 598, forsøgsnummer 1507. Thy Statsskovdistrikt, Stenbjerg klitplantage, afd. 259c.

B: Biomasse til energiformål: tilbageføring og bevaring af næringsstoffer i skovbrugssystemer

Callesen, I. M. Ingerslev, I. S. Møller, og K. Raulund-Rasmussen, 2004. Biomasse til energiformål: Tilbageføring og bevaring af næringsstoffer i skovbrugssystemer – Slutrapport, Energistyrelsens udviklingsprogram for vedvarende energi, Projekt journalnr.: 51161. Skov & Landskab. 58 p.

Møller, I. S. og Ingerslev, M., 2000. The need for, and effect of, wood ash application in Danish forests. In: Högbom, L. and Nohrstedt, H.-Ö. (ed.), 2001. Environmental consequences of recycling of wood-ash to forests – Extended abstracts from the SNS workshop at Grimsö, Sweden, 22-25 May 2000. (lecture and abstract in English). SkogForsk, Uppsala, Sweden: 6-8.

Møller, I. S. og Ingerslev, M. 2001. ESBEN - et EXCEL-program til estimering af biomasse- og næringsstofudtag ved udnyttelse af heltræer i rødgran. Videnblade Skovbrug 8.5-16

Møller, I. S., 2001. ESBEN - guided tour. Videnblade Skovbrug 8.5-17

Møller, I.S., Ingerslev, M. Raulund-Rasmussen, K., 2002: Bæredygtig udnyttelse af flis. Dansk BioEnergi nr. 65. BioPress, Risskov. pp. 10-11.

Møller, I. S., Callesen, I., Dreyer, T., Heding, N., Ingerslev, M., Raulund-Rasmussen, K. and Ravn, H. P., 2002: Bæredygtig udnyttelse af træ til energi - nyt internationalt projekt (In Danish). I: Skov & Landskabskonferencen 2002. Center for Skov, Landskab og Planlægning, Hørsholm. pp. 197-198.

Callesen, I., M. Ingerslev, og K. Raulund-Rasmussen, 2003. Frigivelse af næringsstoffer fra granuleret flisaske efter 7 år i jordmiljøet. Skov & Landskab (FSL). Upubliceret. 15 pp.

Ravn-Jonsen, L. (2001). Sammenhæng mellem træart, forvittringsmiljø og mængden af mykorrhiza-hyfer. Den Kongelige Veterinær og Landbohøjskole, Institut for Økologi. 94 pp. Bachelor projektrapport. Upubliceret.

C: Forbehandling og udbringning af træaske i skov- tekniske løsninger

- Callesen, I., S. Skov og N. Heding, 2004. Recirkulering af aske i skov. Tekniske, økonomiske og økologiske aspekter. Skov & Landskab, KVL. Energistyrelsens udviklingsprogram for vedvarende energi. Projekt journal nr.: 51161/97-0049 slutrapport. pp 3 – 50.
- Hansen, M.T., 2002. Separation og genanvendelse af aske fra biobrændselsanlæg. Miljøstyrelsen, Miljø- og Energiministeriet og dk-TEKNIK. Upubliceret rapport. pp. 7-115.
- Skov, S., 2002. Bioaskebekendtgørelsen i hovedtræk. Fjernvarmen 4, pp. 26 – 28.

14. Referencer

- Callesen, I. (2003) Transfer functions for carbon sequestration, nitrogen retention and nutrient release capability in forest soils based on soil texture classification. Ph.d. afhandling. Skov & Landskab, KVL, København.
- Callesen, I., Ingerslev, M., Raulund-Rasmussen, K. (2004a) Frigivelse af næringsstoffer fra granuleret flisaske efter 7 år i jordmiljøet. Upubliceret manuskript.
- Callesen, I., Ingerslev, M., Stupak Møller, I., Raulund-Rasmussen, K. (2004b) Biomasse til energiformål: Tilbageføring og bevaring af næringsstoffer i skovbrugssystemer - slutrapport. Skov & Landskab, KVL.
- Callesen, I., Raulund-Rasmussen, K. (2004) Base cation, aluminium and phosphorus release potential in Danish forest soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 167: 169-176.
- Enander, G. (2003) Mer trädbränsle bra för klimatet. Skogseko [4], 2. , Skogsstyrelsen. Jönköping
- Falster, H., Gamborg, C., Gundersen, P., Hansen, L., Heding, N., Houman Jakobsen, H., Kofman, P., Nikolaisen, L., Thomsen, I.M., Serup, H. (Ed.) (1999) Træ til energiformål. Teknik-Miljø-Økonomi. Energistyrelsen, Miljø- og Energiministeriet; Videncenter for Halm- og Flisfyring. pp 5-70.
- Gundersen, P., Callesen, I., de Vries, W., (1998) Nitrate leaching in forest ecosystems is related to forest floor C/N ratios. *Environm. Pollut.* 102, 403-407.
- Hansen, M.T. (2001) Separation og genanvendelse af aske fra biobrændselsanlæg. Miljøstyrelsen, Miljø- og Energiministeriet. pp 7 – 115.
- Ingerslev, M. (2001) Anlægsrapport nr 597, forsøgsnummer 1506. Thy Statsskovdistrikt, Nystrup klitplantage, afd. 452a.
- Jacobson, S., Kukkola, M., Malkonen, E., Tveite, B. (2000) Impact of whole-tree harvesting and compensatory fertilization on growth of coniferous thinning stands. *For. Ecol. Manag.* 129, 41-51.
- Karlton, E., Andersson, S., Mandre, M., Saarsalmi, A., Rothpfeffer, C., Ingerslev, M., Klöseiko, J (2003) Wood ash - properties and ecological consequences of recycling to forest. *Scan J. For. Res.*, *in prep.*
- Kofman, P.(1987) Aske fra flisfyrede varmeværker. Skovteknisk Institut 3-1987. pp 5 – 20.
- Kofman, P. (2003). Quality of wood fuels in Denmark: Summary report. Skov & Landskab, upubliceret.
- Larsen, P. H. og Johannsen, V. K (2002) Skove og plantager. Danmarks Statistik, Skov & Landskab, Skov- og Naturstyrelsen.
- Larsson, P.-E., Westling, O., Abrahamson, I. (2003) En integrerad strategi för kalk- och askspridning i avrinningsområden. Vattenkemiske effekter av barkbehandlingar. B 1435, IVL Svenska Miljöinstitutet AB, Stockholm. pp 1-32.

- Lavric, E.D., Konnov, A.A., Ruyck, J.D. (2004). Dioxin levels in wood combustion-a review. *Biomass and Bioenergy* 26, 115-145.
- Lövgren, L., Lundmark, J.E., Jansson, C. (1999) Kretsloppsanpassning af bioaskor. Utvärdering av ny teknik för pelletering av bioaska med avseende på dels driftsegenskaper, dels miljöeffekter i skogen av askåterföring. Statens Energimyndighet, projekt P11647-1.
- Miljøstyrelsen (2000a). Bekendtgørelse om anvendelse af aske fra forgasning og forbrænding af biomasseaffald til jordbrugsformål. Bek. nr 39.
- Miljøstyrelsen (2000b) Massestrømsanalyse for cadmium. Miljøprojekt nr 557.
- Miljøstyrelsen (2003). Liste over kvalitetskriterier i relation til forurennet jord. www.mst.dk.
- Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz (1998). 10 Jahre erfolgreiche Bodenschutzkalkung in den Rheinlandpfälzischen Wäldern.
- Møller, I. S. (2001) ESBEN - guided tour. Videnblade Skovbrug 8.5-17. Skov & Landskab, KVL.
- Møller, I. S. og Ingerslev, M. (2001) ESBEN - et EXCEL-program til estimering af biomasse- og næringsstofudtag ved udnyttelse af heltræer i rødgran. Videnblade Skovbrug 8.5-16. Skov & Landskab, KVL.
- Nord-Larsen, T., 2002. Stand and site productivity response following whole-tree harvesting in early thinnings of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Biomass and Bioenergy* 23, 1-12.
- Ring, E., Lövgren, L., Nohrstedt, H.-Ö., Jansson, G. (1999) Ash fertilisation in a clearcut and in a Scots pine stand in Central Sweden - effects on soil-water and soil chemistry coupled to laboratory leachings of six ash products. Report nr 2. Skogforsk, The Forestry Research Institute of Sweden, Oskarshamn. pp 1-51.
- Røhr Lauritzen, A., Leer, E. (2002) Smuldets miljøværdi ved flishugning - tekniske løsningsmodeller til separering af smuld fra flis. pp 1-32. 2002. Skov & Landskab (FSL), Hørsholm.
- Skogsstyrelsen (2002) Recommendations for the extraction of forest fuel and compensation fertilisation. 3, 1-20. Jönköping, Skogsstyrelsen, National Board of Forestry, Sweden.
- Vattenfall AB. (1998) Storskalig askhandtering i Mellansverige. Stockholm, Vattenfall Support AB.

Tidligere titler - Arbejdsrapporter *Skov & Landskab*

Nr. 1 · 2004 Etablering af løvtræ på marginale landbrugsjorder

Nr. 2 · 2004 Sekventiel udbringning af gødning til nordmannsgran juletræer

Nr. 3 · 2004 Metroens effekt på ansattes transportadfærd

Nr. 4 · 2004 Æstetisk satsning og naturvidenskabelig naturforståelse

Nr. 5 · 2004 endnu ikke trykt

Nr. 6 · 2004 endnu ikke trykt