

Bioenergiproduktion hos björk och hybridasp vid tillförsel av restproduktbaserade gödselmedel - etablering av fältförsök

Gunnar Thelin

**Bioenergiproduktion hos björk och hybridasp vid
tillförsel av restproduktbaserade gödselmedel
- etablering av gödslingsförsök**

**Bio energy production in birch and hybrid aspen
after addition of residue based fertilizers
- establishment of fertilization trials**

Gunnar Thelin
EkoBalans Fenix AB

Q6-657

Abstract

Inledande mätningar i gödslingsförsök i ungskog av björk och hybridasp indikerar att båda trädslagen reagerade med ökat upptag av kväve och fosfor vid gödsling både med NPK och med aska+N, vilket ger goda förutsättningar för framtida tillväxtökning. Energibalansberäkningar visar att ungskogsgödsling av björk och hybridasp kan vara mer energieffektivt än ungskogsgödsling av gran.

Sammanfattning

För att nå fram till effektiva och uthålliga produktionssystem för bioenergi från skog krävs utvärdering av lämpliga trädslag och utveckling av skötselmetoder. Tillväxten i svensk skog är normalt näringsbegränsad. Ungskogsgödsling av gran kan ge kraftig tillväxtökning. Men, för produktion av biobränsle är det inte säkert att gran är det bästa alternativet. Björk och hybridasp kan med sitt höga värmevärde resp. höga tillväxt vara intressanta alternativ. Men kunskapen om näringsbehov, tillväxtrespons, risk för näringsläckage, m m vid gödsling av lövskog är begränsad.

Framställning av konstgödsel kräver mycket energi och användning av ändliga resurser. Därför är det önskvärt att utveckla gödslingssystem baserade på användning av restprodukter som aska och slam. Sådana system behöver utvärderas med avseende på produktion, energieffektivitet och miljöpåverkan.

Målet med föreliggande projekt var att etablera försök med restproduktbaserad gödsling av unga björk- och hybridaspbestånd och undersöka korttidsrespons på näringsupptag och läckage, samt att med energibalansberäkningar utvärdera energieffektiviteten i tänkta produktionssystem. Det långsiktiga målet är att kunna utarbeta lämpliga gödslingsstrategier för uthållig intensivodling av björk och hybridasp.

Fältförsök, tre i björk och ett i hybridasp etablerades under försommaren 2008. Gödsling gjordes med dels NPK och dels aska+N, i hybridaspbeståndet testas enbart aska+N. Ytterligare ett försök i hybridasp ska etableras under våren 2009. Provtagning av knoppar och markvatten utfördes under hösten 2008.

Resultaten visar ökade koncentrationer av kväve och fosfor i björk gödsblad såväl med NPK som med aska+N när alla björkförsöken analyserades gemensamt och tendenser till samma effekt för hybridaspbeståndet. Eftersom trädens kväve- och fosforförsörjning har stor betydelse för framtida tillväxtrespons innebär detta goda förutsättningar för tillväxtökning. Eftersom markvatten hittills analyserats från enbart ett provtagningstillfälle går det ännu inte att dra några slutsatser om effekter på läckage.

Om volymproduktionen vid ungskogsgödsling av björk och hybridasp skulle öka lika mycket som i gran skulle det faktum att veddensiteten hos björk och hybridasp inte sjunker vid högre tillväxt innebära högre skörd i både ton och energi för björk och hybridasp än för gran och därmed en ännu mer fördelaktig energibalans av gödslingen än för gran. Restproduktbaserad gödsling var mer energieffektivt än användning av NPK, särskilt när energi från förbränning av en slamfraktion togs med i kalkylen.

Resultaten har stort nyhetsvärde då detta är de första ungskogsgödslingsförsök i björk och hybridasp på skogsmark som etablerats och då energibalansberäkningarna ifrågasätter om gran är det bästa alternativet med ett större fokus på produktion av bioenergi. De kortsiktiga målen i projektet har uppfyllts.

sökord: bioenergi, björk, hybridasp, ungskogsgödsling, restprodukter

Executive Summary

Introduction

Bio energy from forests is viewed as an important part of the future energy systems that must replace the fossil fuel based system in order to halt global warming. There is however limited knowledge on how much bio energy that can be sustainably produced in the forest ecosystems and how forest management should be adapted in order to maximize bio energy production.

Tree growth in the Swedish forests is normally nutrient limited, most often by N, but in large parts of southern Sweden also by P. Fertilization effectively increases growth as shown in many fertilization experiments in Norway spruce and Scots pine. However, there are very few fertilization experiments with deciduous species, except for energy crops, mostly willow, on farmland. The Swedish Energy Agency has identified intensive cultivation of deciduous species as a possibility for increased forest bio energy production. Thus, it is crucial to establish fertilization experiments in order to improve our knowledge on how to arrive at efficient and sustainable management programs for the intensive cultivation, including fertilization, of deciduous species.

Today, forest bio energy is dominated by Norway spruce both in terms of biomass used for bio energy and research. But is Norway spruce the best alternative? The sustainability of the current Norway spruce management systems has been questioned from several points of view such as climate change, nutrient balances, biodiversity, and social values. Several studies have shown large scale negative nutrient balances in Norway spruce systems; losses of several nutrients by harvest and leaching are not balanced by weathering and deposition. Norway spruce is sensitive to windthrow and butt rot and the heating value of the wood is relatively low. Still, Norway spruce dominates in plantations, the main reasons for this being the industry demand for Norway spruce, high seedling availability and limited browsing damages in plantations compared to most other species.

Species such as birch, hybrid aspen and hybrid larch are interesting from a forest bio energy point of view. The heating value of birch (per volume) is relatively high and birch is easily regenerated naturally on a majority of the forest area. Biomass production in hybrid aspen can be much higher than in Norway spruce, but the heating value is lower than for birch. The first generation of hybrid aspen must be planted, but it regenerates vigorously by root shoots after harvest.

Most often the growth of forest stands is measured in terms of tree volume produced per hectare and year. However, there is no linear relationship between volume harvest and energy harvest. Especially wood density but also other parameters such as the level of high energy substances in wood and bark influence energy harvest levels.

Regardless of management program and species used the management must be sustainable in order to produce bio energy in the long term without negative effects on the long term production capacity of the soil or neighboring ecosystems, including water ecosystems.

Sewage sludge and wood ashes could be used as fertilizers in order to increase forest tree production. In southern Sweden forest growth normally increases with approximately 10 % after ash recycling due to increased N and/or P availability. P is added with the ashes and the pH-increasing effect of the wood ash can lead to increased N net mineralization. Other positive effects of wood ash recycling are improved nutrient sustainability and less acid run-off water. Possible negative effects are heavy metal accumulation, if the content of one or more heavy metals of the recycled ash exceeds the heavy metal content of the harvested biomass, and nitrate leaching if the vegetation cannot take up nitrified N. It is important to evaluate the sustainability of fertilization systems based on residues such as sludge and wood ash.

Wood ash does not contain N and the P concentration often is too low for the ashes to function as an NP fertilizer. Thus N and sometimes P must be added. Sludge is an interesting alternative.

The main purpose of the project is to study sustainable production of forest bio energy in intensively cultivated birch and hybrid aspen stands. Another purpose is to establish experiments that can be used for long term studies and as demonstration objects.

In the first few years the goal is to study the short term effects of residue based fertilization compared to conventional NPK fertilization on tree nutrient uptake, nutrient leaching, sustainability and economy.

In the long term the goal is to design appropriate fertilization strategies in a residue based fertilization system for the intensive cultivation of birch and hybrid aspen without negative side effects such as large scale nutrient leaching.

Material and methods

Four field experiments were established in 2008 and one additional experiment in hybrid aspen will be established in the spring of 2009 (table 1). On each site the same treatments were tested: 1. Control, 2. Residue based fertilization, Ashes+N, and 3. Conventional fertilization, NPK. The NPK treatment was not included in the hybrid aspen experiment.

Before fertilization lysimeters for soil solution sampling were placed at 50 cm soil depth on all plots.

Fertilization was performed in June 2008. In Ashes+N the wood ash was spread first and N was added a few days later (tables 2 and 3). On the NPK-plots the N and P dose

was the same as on the Ashes+N-plots (table 3), but the K dose was much higher on some of the Ashes+N-plots due to the high K concentration of the wood ash.

Buds and soil solution were sampled in November 2008. Buds were ground and sub-samples were analyzed for Ca, Cu, K, Mg, P, S, and Zn on ICP-MS. Other sub-samples were analyzed for N on a C/N element analyzer for solid material. On water samples pH was measured and NO₃-N, NH₄-N, and PO₄-P were determined by flow injection analysis.

Treatment differences were evaluated with ANOVA for each experiment separately and nested ANOVA with all birch experiments combined.

Energy balances including energy input and energy harvest for Norway spruce, birch, and hybrid aspen in a conventional and a residue based fertilization system (ashes+sludge) were calculated. The residue based fertilization system that the calculations were made for is in development and cannot be described in detail for business reasons. The assumptions for the energy balance calculations are described below and in the tables 4 and 5.

The energy input for the management of fertilized stands was assumed to increase linearly with increased volume production. The energy input for the spreading of fertilizers was higher in the residue based than in the conventional system due to larger total amounts added and more spreading occasions. The energy input for the production of NPK was assumed to be 45 MJ kg⁻¹ N, 25 MJ kg⁻¹ P and 5 MJ kg⁻¹ K. NPK was assumed to be transported twice the distance as residue based fertilizers.

Tree growth was assumed to increase with 75 % (by volume) on fertilized plots for all species and for both fertilization systems. Rotation length was assumed to be 57-67 % of the rotation length in not fertilized stands. Wood density decreases in Norway spruce and is unaffected in birch and hybrid aspen as the growth rate increases. In the residue based fertilization alternative a sludge fraction is incinerated which was assumed to generate 3.0 GJ ha⁻¹ yr⁻¹ in Norway spruce and birch and 3.8 GJ ha⁻¹ yr⁻¹ in hybrid aspen.

Results and discussion

The concentrations of N and P were higher in buds from both NPK and Ashes+N plots than in buds from control plots in birch (figures 1 and 2, table 6) and there were tendencies towards higher K concentrations on fertilized birch plots (figure 3, table 6) and higher N and K in buds from fertilized hybrid aspen plots (figures 1 and 3). Zn was higher in buds from Ashes+N plots than in both control and NPK plots and there were tendencies towards higher Ca in buds from Ashes+N than in buds from NPK plots in two of the birch experiments (table 7).

The increases in N and P bud concentrations will probably lead to increased growth as long as the status of other nutrients is satisfactory since there is a close link between plant N and P concentrations and growth response. The relation between N and P was

close to target ratios for needles or leaves, but it is unclear whether such values can be used for buds. There is very limited reference data for bud nutrient concentrations and there may be differences between buds and leaves in the concentrations of several nutrients depending on e. g. the function of nutrients. The N concentrations, especially in the control, would have been regarded as quite low if they had come from leaves. The N concentrations were especially low in hybrid aspen buds possibly indicating a dilution of nutrients in the plant tissue due to the high growth rate. A higher N dose might have resulted in a higher N uptake in hybrid aspen.

Besides N and P most nutrients, judging from target ratios, appear to be at levels where growth effects are unlikely, with the possible exception of K. K/N was very low throughout the material and tendencies towards increases in the treatments could indicate suboptimal levels in the control. However, the fact that the high K addition in three of the Ashes+N experiments (table 3) did not result in increased K uptake (figure 3) suggests that there is no K deficit. Plant K status should be followed closely since earlier studies have shown deteriorating tree K status in Norway spruce forests in southern Sweden.

No differences in concentrations P, K and other nutrients between NPK and Ashes+N plots indicate that it is possible to use wood ashes as a nutrient source (except for N) at fertilization. P availability in wood ashes has been regarded as low compared to NPK depending on the chemical form of P in wood ashes. However P availability in ashes could be more dependent on ash particle size. The mean particle size of crushed wood ash, as used here, has a high specific area which increases the possibilities for the dissolution of P from the calcium phosphates in the ash compared to if e. g. hard ash granules with a much higher mean particle size had been used.

There are two important advantages with ash based fertilization systems compared to NPK. 1. Wood ashes, but not NPK, contain all essential plant nutrients, except for N. Repeated fertilization with NPK without the addition of other nutrients will sooner or later result in deficiencies of one or more nutrients. Thus, the NPK must be complemented with other nutrients at some point. 2. The wood ash has a liming effect which neutralizes the acidifying effect of increased tree growth at fertilization. Repeated NPK-fertilization will sooner or later require liming.

There were no differences between treatments in the analyzed soil solution samples (table 8). The variability within treatments was, as expected, high. A series of analyses is most often needed in order to determine differences in soil solution between treatments. However the limit of $1 \text{ mg l}^{-1} \text{ NO}_3\text{-N}$ was exceeded in 60 % of the analyses from Ashes+N, but only in 33 and 20 % of the analyses in NPK and the control respectively. The high frequency of high $\text{NO}_3\text{-N}$ -values in Ashes+N is a possible risk factor. A soil pH increase often leads to increased nitrification rates but that normally does not result in increased N leaching as long as there is vegetation that can take up the $\text{NO}_3\text{-N}$. But, as the ashes were added in combination with N the total inorganic N availability may have exceeded plant demand resulting in increased N leaching. If so, it should be possible to lower N addition rates in the Ashes+N treatment without negative

effects on plant N uptake. In order to do this we need tools to predict N mineralization and nitrification after a pH increase.

The energy balance calculations showed increased gross and net energy harvest at fertilization with both ashes+sludge and NPK (figure 4). The energy harvest in nonfertilized alternatives was similar for all the species but fertilization resulted in energy harvest levels according to: hybrid aspen > birch > spruce. The high density of birch wood makes it comparable with spruce and hybrid aspen despite the low volume harvest. The differences in wood density become increasingly important as the volume production levels increase since the density of spruce wood, but not birch and aspen wood, decreases as the volume production increases. Small differences in non fertilized alternatives become exaggerated after fertilization. The volume production increase was assumed to be the same for all the species, but this may have been an overestimation for birch and hybrid aspen. Similar growth increases in terms of mass rather than volume might have been a more reasonable assumption. The high growth rate in non fertilized hybrid aspen could mean that it is closer to the upper physiological limit than spruce and birch in terms of growth response. If so it would not be reasonable to expect the same relative growth response in hybrid aspen as in spruce and birch.

The total energy input was small compared to the gross energy harvest: 1.6, 5.3, and 0.8 % in control, NPK and ashes+sludge respectively in spruce, and the corresponding numbers for birch being 2.9, 5.4, and 1.9 % and for hybrid aspen 3.2, 5.6, and 1.6 %. The relationship between increased energy harvest compared to the control and energy input for fertilizer production and fertilization were 22:1 for NPK and 112:1 for ashes+sludge in spruce, the corresponding numbers for birch being 33:1 and 156:1 and for hybrid aspen 29:1 and 129:1. The net energy harvest was higher in ashes+sludge than in NPK since the net energy input was much lower for the ashes+sludge alternative, largely due to the energy from the incineration of a sludge fraction.

Low energy input in relation to energy harvest suggests efficient energy production systems. The energy input from the production of fertilizer and fertilization was smaller than expected.

In practical bio energy production systems the energy harvest will be even higher if whole-tree harvesting is applied.

Conclusions and future research

Elevated bud N and P concentrations after fertilization with both Ashes+N and NPK means good possibilities for future growth increases. But, tree growth response should be studied before any conclusions can be drawn regarding biomass production in the experiments. The similarities in plant response to Ashes+N and NPK suggests that Ashes+N can be used as a P and K resource in the fertilization of young stands of birch and hybrid aspen. If the Ashes+N treatment results in increased N availability due to the

pH increase, possibly the N dose could be lowered in order to decrease the risks for N leaching without negative effects on tree N uptake. Tools for the prediction of N mineralization need to be developed.

The energy harvest for fertilized birch and hybrid aspen appear to be at least as high as for fertilized Norway spruce. Intensive cultivation including fertilization of young stands appears to be energy efficient: the energy input is a small fraction of the increase in energy harvest. Residue based fertilization appears to be more energy efficient than fertilization with NPK. If production systems other than the ones currently applied are more efficient in terms of sustainable energy production it is important to review the funding of research and development within the field. Which species or species mixtures are most efficient under which soil and climatic condition? Management programs and harvesting techniques need to be developed.

More studies on fertilization response and energy harvest in deciduous species with and without the use of residue based fertilizers are needed in order to develop guidelines for the sustainable production of forest bio energy. Empirical studies should be combined with modeling studies in order to improve the understanding of the systems and predictability of management measures.

Residue based fertilization appears to be attractive both environmentally and economically, but it is important that such systems are evaluated closely in terms of growth response, nutrient leaching, carbon and metal balances, etc. in comparison with conventional fertilization.

Keywords: Bio energy, birch, hybrid aspen, fertilization of young stands, residue based fertilizers

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	BAKGRUND	1
1.2	BESKRIVNING AV FORSKNINGSSOMRÅDET	1
1.3	FORSKNINGSUPPGIFTEN OCH DESS ROLL INOM FORSKNINGSSOMRÅDET	3
1.4	MÅL OCH MÅLGRUPP	3
2	MATERIAL OCH METODER	4
2.1	FÄLTFÖRSÖK	4
2.2	ENERGIBALANSER	6
3	RESULTATREDOVISNING	8
3.1	FÄLTFÖRSÖK	8
3.2	ENERGIBALANSER	12
4	RESULTATANALYS	13
4.1	FÄLTFÖRSÖK	13
4.2	ENERGIBALANSER	14
5	SLUTSATSER	16
6	REKOMMENDATIONER OCH ANVÄNDNING	17
7	FÖRSLAG TILL FORTSATT FORSKNINGSPÅRBEJDE	18
8	LITTERATURREFERENSER	19

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Bioenergi från skogsråvara ses idag som en mycket viktig del av de framtida energisystemen i Sverige, Europa och världen och som en av lösningarna på såväl global uppvärmning som framtida brist på olja [27]. Det finns dock begränsad kunskap om hur mycket bioenergi som uthålligt kan produceras från skogsekosystemen och hur skogsskötseln kan anpassas för att maximera produktionen av biobränsle. Att som idag utnyttja nästan enbart GROT från avverkningar och vrakad, t ex rötskadad, ved för energi är långt ifrån tillräckligt för att täcka de framtida behoven.

För att öka produktionen av biomassa på en minskande areal (mer areal behöver åsidosättas av naturvårdsskäl) är det nödvändigt att tillföra näringsämnen. Tillväxten i Sveriges skogar begränsas normalt av tillgången på ett eller flera näringsämnen. Det är oftast kväve, men i stora delar av södra Sverige verkar också fosfortillgången vara avgörande [2] [4] [30]. Många studier av gödsling av såväl äldre gran- och tallskog [26] som ungskog av gran [5] visar att det är möjligt att kraftigt öka produktionen genom gödsling.

Den stora majoriteten av gjorda gödslingsförsök gäller gran och tall med användning av konventionella gödselmedel. Det finns mycket få gödslingsförsök i lövträdsbestånd, samt få skogliga gödslingssystem baserade på restprodukter.

Gödsling med konventionella gödselmedel är miljömässigt problematiskt eftersom man använder ändliga råvaror (fosfor m fl) och har en stor energiåtgång vid framställning (kväve). De globala tillgångarna på högvärdiga, brytbara, fosforhaltiga mineral har minskat kraftigt och beräkningar tyder på att de kommer att vara slut inom mindre än 100 år. Samtidigt finns det gott om outnyttjade reserver av näringsämnen i samhällets olika restprodukter.

1.2 Beskrivning av forskningsområdet

I Energimyndighetens syntesrapport av forskningsprogrammet om Miljöeffekter av skogsbränsleuttag och askåterföring i Sverige [11] identifieras intensivodling av lövträdsbiomassa som en möjlighet till ökad biobränsleproduktion. Samtidigt konstateras det att jämfört med gran är kunskaperna begränsade vad gäller effekter av gödsling. Det finns i dagsläget endast enstaka näringstillförsölsförsök med lövträd i Sverige [15] [19] förutom Salix i energiskog. Även internationellt är det ont om gödslingsförsök i lövskog. Det innebär att det finns ett synnerligen stort behov av att etablera gödslingsförsök i lövskog för att tillgodogöra oss nödvändig kunskap om hur intensivodling med gödsling i sådana produktionssystem bäst utformas.

Vad gäller trädslag för produktion av biobränsle är gran idag dominant och överlägset mest forskad på. Men är det ett bra alternativ? Uthålligheten i granskogsbruk har

ifrågasatts utifrån olika perspektiv som klimatförändringar, näringsbalanser, biologisk mångfald och sociala värden [29].

Flera studier har visat negativa näringsbalanser för skogen i södra Sverige, d v s tillförseln av näring genom vittring och nedfall motsvarar inte förlusterna genom skörd och utlakning [28] [1]. Granved har också ett relativt lågt värmevärde per volym, det är ett stormkänsligt trädslag, även om det går att påverka genom t ex gallringsfri skötsel i intensivodlingssystem, och det är känsligt för röta (vilket även minskar energiutbytet). Att stor del av de stormdrabbade områdena ändå återplanteras med gran har flera orsaker, bland annat att industrin efterfrågar gran idag, gran betraktas som ett säkert alternativ för framtida avsättning, tillgången på granplantor är bättre än för övriga trädslag, men kanske viktigast: föryngring med andra trädslag kräver ofta hägn för att utestänga betande klövvilt, något som inte behövs med den inte särskilt för viltet begärliga granen.

Energiskog, Salix, är knappast ett alternativ för det mesta av skogsmarken p.g.a. skördesystem. Trädslag som björk, hybridasp och hybridlärk är mer intressanta utifrån ett skogsbränsleperspektiv. Björkved har ett värmevärde som är nära 30 % högre än granved mätt i MWh m⁻³ [24], men produktionskapaciteten har ifrågasatts [7]. Den har dock fördelen att finnas tillgänglig som naturlig föryngring på en majoritet av skogsarealen och plantering är därför sällan nödvändig. Biomassaproduktion hos hybridasp kan vara betydligt högre än för gran (m³sk ha⁻¹ år⁻¹) [23], men värmevärdet är lägre än för björk. Den måste planteras, men efter avverkning får man naturlig föryngring genom täta rotskottsuppslag [22].

Oavsett skötselform och vilket trädslag som odlas måste skötseln vara uthållig för att biomassa inkl skogsbränsle ska kunna produceras på lång sikt utan att skada markens långsiktiga produktionsförmåga eller angränsande ekosystem, t ex vattendrag. Lövträd anses ofta ha en mindre försurande effekter på mark och vatten och ha högre uthålliga produktionsnivåer än gran [29]. Detta är dock inte någon självklarhet: Det är viktigt att utvärdera uthålligheten hos alternativa odlingsstrategier, inklusive intensivodling av björk och hybridasp, innan de får en storskalig utbredning, så att åtgärder för att förbättra uthålligheten kan vidtas.

Det är viktigt att skilja på biomassaproduktion (särskilt mätt som volym) och bioenergiproduktion. Det senare innebär att man får beräkna produktionskapaciteten som t ex MWh per areal och tidsenhet istället för traditionell beräkning av m³ per areal och tidsenhet. Det finns ingen linjär samvariation mellan volymproduktion och energiproduktion. Energiproduktionen beror också på vedens densitet och andra egenskaper hos veden som andelen lignin och andra substanser med högt energiinnehåll [24], men också hur allokeringen av kol till olika delar av växten ser ut, t ex hur stor andel av assimilerat kol som allokeras till skördbar biomassa.

Avloppsslam och aska kan användas för att öka skogsproduktion [17]. De positiva effekterna av askåterföring är främst en ökad näringsmässig uthållighet och mindre surt avrinningsvatten [11] [30]. I södra Sverige får man normalt också en tillväxtökning på

ca tio %, som kan bero på förbättrad fosfor- och/eller kvävetillgång [30] [14]. Aska har hittills nästan bara använts i syfte att kompensera för näringsförluster vid skörd och som försumningsmotverkande medel istället för kalk. Det är dock viktigt att utvärdera uthålligheten (både skogligt och samhälleligt) i gödslingsystem baserade på restprodukter som aska och slam.

Askan innehåller inget kväve och koncentrationen av fosfor är ofta för låg för att den ska kunna fungera som ett NP-gödselmedel. Därför måste kväve och ibland fosfor tillföras. Här är slam ett intressant alternativ.

1.3 Forskningsuppgiften och dess roll inom forskningsområdet

Projektets huvudsyfte är att studera uthållig produktion av biobränsle i skog genom intensivodling av björk och hybridasp med tillförsel av restproduktbaserade gödselmedel. Syftet är också etablera försök som kan användas för studier under längre tid, minst en rotation, och som kan fungera som demonstrationsobjekt.

Björk och asp har visat sig kunna svara på gödsling med ökad tillväxt och har goda förutsättningar att fungera som bioenergiproducenter. De är därför naturliga kandidater för att studera alternativ till dagens dominerande odlingssystem.

Att utnyttja aska i kombination med slam i ett restproduktbaserat gödslingsystem kan ses som en naturlig fortsättning på de studier inom askåterföring och slamspridning som har bedrivits hittills.

1.4 Mål och målgrupp

Det långsiktiga målet är att kunna utarbeta lämpliga gödselstrategier för uthållig intensivodling av björk och hybridasp med avseende på gödselmedel (restproduktbaserat jmf konventionellt), risk för näringsläckage, uthållighet och ekonomi.

På kort sikt är målet att studera korttidsresponsen (3 år) på tillförsel av restproduktbaserade gödselsystem för att ge kunskap om hur man utan risk för näringsläckage och andra negativa bieffekter kan inleda restproduktbaserad gödsling av unga björk- och hybridaspbestånd. Efter att ha utnyttjat aska + konstgödselkväve vid den första gödslingen är målet att vid nästa gödslingstillfälle använda ett helt restproduktbaserat alternativ.

Målgruppen är i första hand skogsägare och skogsföretag, men också energiomvandlare om el- och fjärrvärmeproducenter som genom sin konsumtion av biomassa kan påverka vilken biomassa som produceras och hur.

2 Material och metoder

2.1 Fältförsök

Fyra fältförsök har etablerats och ytterligare ett försök etableras under våren 2009 (tabell 1).

Tabell 1. Försökslokaler.

Table 1. Trial locations.

Lokal	Trädslag	Proveniens	Ålder	Mark	Antal provytor
Hedensberg (Västerås)	Björk	Lopi	15	Lera	12
Vrå (Ljungby - Halmstad)	Björk	Ekebo	5	Sandig morän	12
Vrå (Ljungby - Halmstad)	Hybridasp	Dalby	4	Sandig morän	8 ³
Fulltofta (Höör)	Björk/Lärk ²	Ekebo	4	Sandig-moig morän	12
Vrams Gunnarstorp ¹ (Söderåsen)	Hybridasp	Dalby	3	Sandig-moig morän	12

¹Etableras under våren 2009

²Blandbestånd av björk och hybridlärk

³Ingen jämförelse med NPK

Björkbestånden i Hedensberg är i äldsta laget för att starta ungskogsgödsling i. Beståndshöjd vid försöksutläggning var i medeltal 7-8 m. Idealisk höjd vid gödslingsstart är troligen 2-4 m. Bestånden ligger på f d jordbruksmark, inte skogsmark, men förutsättningarna i övrigt är mycket goda: den sammanlagda gödslade arealen är drygt 70 ha, vilket möjliggör ytterligare uppföljning med andra utgångspunkter.

På varje lokal testas samma behandlingar 1. kontroll, 2. näringstillförsel med askbaserat gödselmedel (Aska+N) och 3. näringstillförsel med konventionellt gödselmedel (NPK). Hybridaspbeståndet i Vrå (tabell 1) var dock för litet och heterogent för att möjliggöra etablering av fler än 8 försöksytor med likvärdiga förutsättningar, därför utgår jämförelse med NPK där.

Upplägget på varje lokal är randomiserat blockförsök med fyra replikat (block), d v s behandlingarna återfinns i minst fyra upprepningar utslumpade i varje enskilt block.

Provytorna är 30*30 m (bruttoyta). Hörnen markeras med permanenta stolpar. Mätningar görs inom 20*20 m (nettoyta). Minsta avstånd mellan provytor är 5 m.

Före gödsling placerades en lysimeter (Prenart) per provyta för provtagning av markvatten på 50 cm djup.

Gödsling gjordes i juni 2008. I Aska+N spreds först aska från Sala-Heby (Hedensberg), Ljungby (Vrå) och Öresundskraft (Fulltofta) (tabell 2 och 3). Efter ett antal dagar tillfördes N i form av N27 (Yara) (tabell 3). För NPK-tytor utnyttjades NPK 21:4:7, NPK 22:6:6 och PK 13:13 (Yara) i kombinationer så att doserna av N och P blev lika stora som i Aska+N-ledet. Det innebär att tillförseln av K blev betydligt högre i Aska+N än i NPK. Eftersom askorna varierar i K-koncentration blir det också stora skillnader mellan försökslokaler (tabell 3).

Gödsling och askspridning utfördes av Askungen Vital AB i Hedensberg och Vrå, utom på NPK-tytor som gödslades för hand. I Fulltofta gödslades samtliga tytor för hand.

Tabell 2. Bränsle, panntyp och näringsämnen för tillförda askor i fältförsöken.

Table 2. Fuel, type of furnace and nutrients in added ashes in the field trials.

	Öresundskraft	Ljungby E.ON	Sala-Heby
Bränsle	Malda pellets	GROT	
Panntyp	Kolpulverpanna	Roster	BFB
Ca (% av ts)	16.7	19.4	34.0
K (% av ts)	3.0	8.3	6.3
Mg (% av ts)	2.7	3.0	1.4
P (% av ts)	1.3	1.3	1.2

Tabell 3. Tillförda mängder aska och gödselmedel i fältförsöken

Table 3. Added amounts of wood-ash and fertilizers in the field trials.

	Hedensberg		Vrå - björk		Fulltofta		Vrå - asp
	Aska+N	NPK	Aska+N	NPK	Aska+N	NPK	Aska+N
Aska	4000		2500		2000		2500
N	90	90	95	95	80	80	95
P	48	48	32	30	26	26	32
K	252	61	207	44	60	26	207

Eftersom gödsling utfördes vid mitten-slutet av juni bedömdes tiden för respons i blad fram till normal tidpunkt för bladprovtagning i slutet av augusti som för kort. Därför valdes istället att provta och analysera knoppar. Kvistar provtogs i november 2008 från

mitten av kronan vettande mot söder på fyra träd per provyta. Knopparna, i genomsnitt 100 knoppar per provyta, plockades av på lab. och lades ihop till ett generalprov per provyta. Markvattenprover togs i november 2008.

Knopparna maldes och delprov togs ut för uppslutning i salpetersyra och analys av B, Ca, Cu, K, Mg, P, S och Zn på ICP-MS. På andra delprov analyserades N på C/N elementaranalysator för fast material. Vattenprover analyserades med avseende på pH och NO₃-N, NH₄-N och PO₄-P på FIA. Samtliga analyser gjordes på Växtekologens lab. på Ekol. Inst., Lunds Univ.

Statistikanalyser gjordes med SPSS v13. För varje lokal analyserades eventuella skillnader i mätdata mellan behandlingar med ANOVA efter säkerställande att förutsättningar för att köra ANOVA var uppfyllda (normalfördelade residualer). Dessutom gjordes en Nested ANOVA med samtliga björkbestånd för att undersöka om det förelåg skillnader mellan behandlingar för björkförsöken gemensamt.

2.2 Energibalanser

Energiinsats och energiskörd beräknades för gran, björk och hybridasp med konventionell gödsling (NPK) och med användning av restproduktbaserade gödselmedel (aska+slam). Näringsinnehåll i restproduktbaserad gödsel och energiinsats för produktion gäller ett produktionssystem som är under utveckling och inte kan beskrivas närmare här av affärstekniska skäl. Gjorda antaganden redovisas i texten nedan och i tabell 4 och 5.

Tabell 4. Antaganden för energiinsatser (GJ ha⁻¹ år⁻¹) för odling av gran, björk och hybridasp

Table 4. Assumptions for energy input (GJ ha⁻¹ yr⁻¹) for spruce, birch, and hybrid aspen growing systems.

	Gran			Björk			Hybridasp		
	ogödslat	NPK	aska +slam	ogödslat	NPK	aska +slam	ogödslat	NPK	aska +slam
Skötsel	1.1	1.9	1.9	2.1	3.7	3.7	2.5	4.4	4.4
Gödsling	0	0.02	0.025	0	0.02	0.027	0	0.025	0.035
Näring	0	1.56	0.30	0	1.60	0.32	0	2.03	0.42
Transporter	0	2.11	1.67	0	1.58	1.36	0	1.32	1.21

Energiinsatsen för skötsel i ogödslade bestånd (tabell 4) togs från [10]. Energiinsatsen för skötsel av gödslade bestånd har antagits öka linjärt med antagen ökad tillväxt (tabell 5) i gödslade bestånd. Energiåtgång för gödsling togs från [8]. Gödsling med restproduktbaserade gödselmedel (aska+slam) blir mer energikrävande p g a större mängder och fler gödslingstillfällen. Energiinsatsen för produktion av NPK antogs vara 45 MJ kg⁻¹ N, 25 MJ kg⁻¹ P och 5 MJ kg⁻¹ K [9]. Energiinsats för transporter har

beräknats enligt [6]. Det antogs att NPK transporteras dubbelt så långt som restproduktbaserad gödsel.

Tabell 5. Antaganden för energiskörd ($\text{GJ ha}^{-1} \text{år}^{-1}$) vid odling av gran, björk och hybridasp

Table 5. Assumptions for energy harvest ($\text{GJ ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$) for spruce, birch, and hybrid aspen growing systems.

	Gran		Björk		Hybridasp	
	ogödslat	gödslat	ogödslat	gödslat	ogödslat	gödslat
Tillväxt ($\text{m}^3 \text{år}^{-1}$)	9	15.8	7.5	13.1	12	21
Omloppstid (år)	70	40	50	30	30	20
Veddensitet (ton m^{-3})	0.4	0.35	0.5	0.5	0.35	0.35
Energiinnehåll (GJ ton ts^{-1})	19	19	19.2	19.2	18.7	18.7

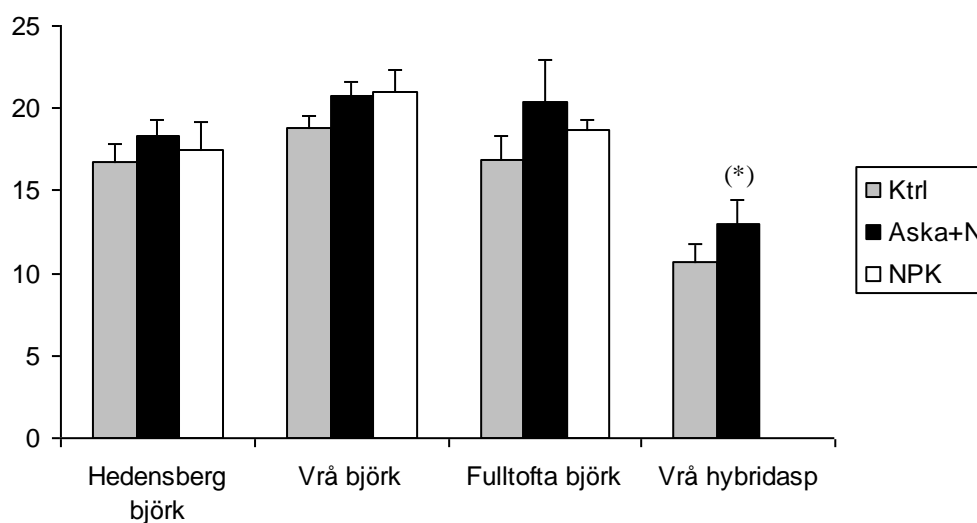
Tillväxten antogs öka med 75 % vid gödsling för samtliga trädslag för både NPK och restproduktbaserade gödselmedel. Omloppstid antogs kunna sänkas med 57-67 % av omloppstiden i ogödslade bestånd. Tillväxten i björk och hybridasp i förhållande till gran är baserade på [22]. Veddensitet påverkas inte vid tillväxtökning i björk och hybridasp [22]. Energiinnehåll i stamved av gran, björk och asp togs från [24].

I aska+slam alternativet förbränns en slamfraktion vilket ger ett beräknat energitillskott på $3.0 \text{ GJ ha}^{-1} \text{år}^{-1}$ i gran och björk och $3.8 \text{ GJ ha}^{-1} \text{år}^{-1}$ i hybridasp.

3 Resultatredovisning

3.1 Fältförsök

Koncentrationen av N och P var högre i knoppar på gödslade ytor, både NPK och Aska+N, än på kontrolltytor i björk (Figur 1 och 2, Tabell 6). Det fanns tendenser ($0.1 > p > 0.05$) till högre K-koncentration i knoppar från gödslade björkytor (Figur 3, Tabell 6) och tendenser till förhöjda koncentration av N och K i knoppar från gödslade hybridaspkytor (Figur 1 och 3).



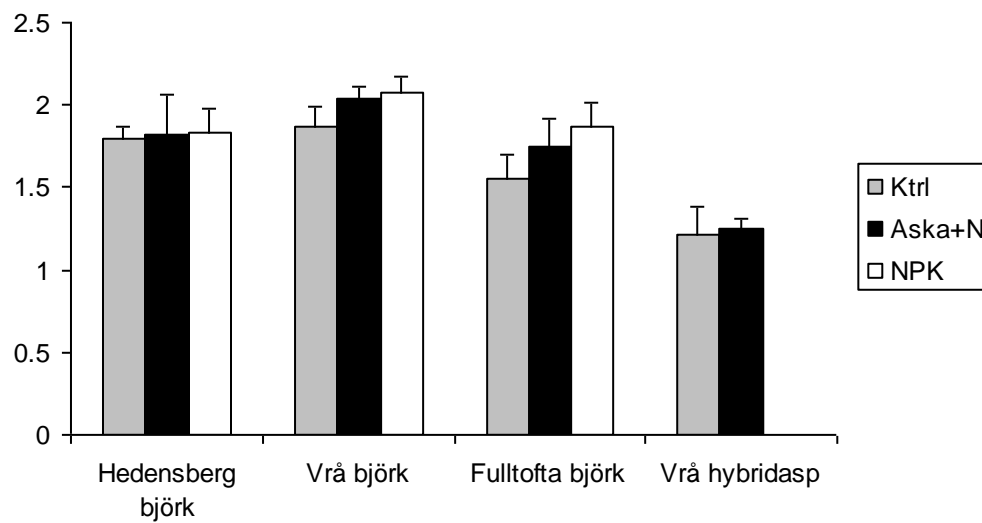
Figur 1. Koncentration av N (mg g^{-1}) i knoppar av björk och hybridasp

Figure 1. Concentration of N (mg g^{-1}) in buds from birch and hybrid aspen.

Tabell 6. *p*-värden för post-hoc test (Tukey) i nested ANOVA där samtliga björkförsök analyserats gemensamt för utvärdering av skillnader i koncentrationer i knoppar mellan behandlingar, n.s.= ej signifikant.

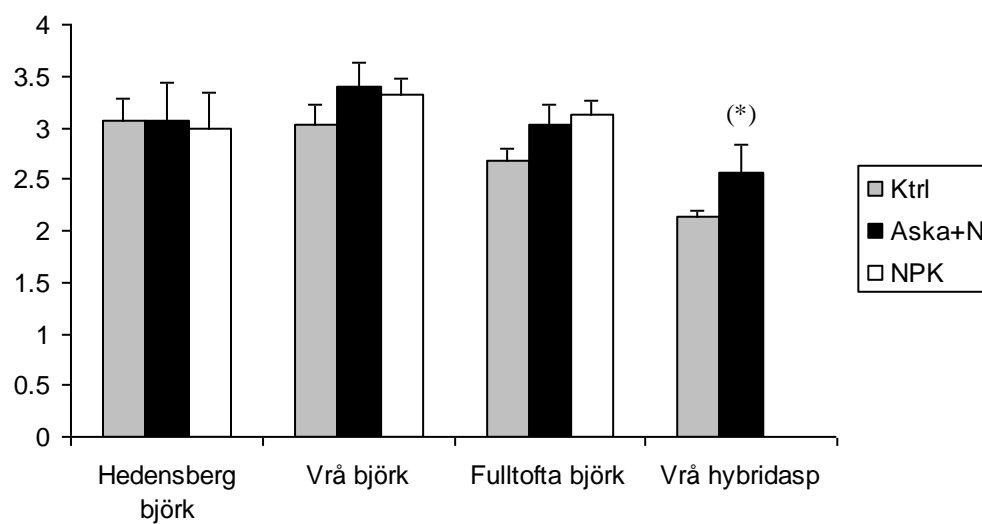
Table 6. *p*-values for post-hoc test (Tukey) in nested ANOVA where all the birch trials were analyzed together for the evaluation of treatment differences in bud concentrations, n.s.=not significant.

	Aska+N - Ktrl	NPK - Ktrl	Aska+N - NPK
N	<0.0001	0.014	n.s.
P	0.049	0.004	n.s.
K	0.05	0.077	n.s.



Figur 2. Koncentration av P (mg g^{-1}) i knoppar av björk och hybridasp

Figure 2. Concentration of P (mg g^{-1}) in buds from birch and hybrid aspen.



Figur 3. Koncentration av K (mg g^{-1}) i knoppar av björk och hybridasp

Figure 3. Concentration of K (mg g^{-1}) in buds from birch and hybrid aspen.

Tabell 7. Medelvärden och standardavvikelser (undre raden) av koncentrationer av Ca, Mg, S (mg g^{-1}) och B, Cu, Zn ($\mu\text{g g}^{-1}$) och kvoter till N (%) i knoppar av björk och hybridasp.

Table 7. Means and standard deviations (lower row) of concentrations of Ca, Mg, S (mg g^{-1}), and B, Cu, Zn ($\mu\text{g g}^{-1}$), and ratios to N (%) in buds from birch and hybrid aspen.

	Hedensberg			Vrå - björk			Fulltofta			Vrå - asp	
	Ktrl	Aska+N	NPK	Ktrl	Aska+N	NPK	Ktrl	Aska+N	NPK	Ktrl	Aska+N
B	7.21	8.66	7.33	10.25	9.79	9.92	9.29	11.17	10.66	15.04	15.89
	0.90	1.58	1.42	0.92	0.88	3.02	1.11	1.48	0.72	0.45	1.30
Ca	6.47	6.28	6.63	2.83	3.09	2.65	2.83	2.69	2.73	4.08	4.45
	1.67	2.00	0.81	0.19	0.25	0.42	0.35	0.20	0.40	0.12	0.44
Cu	8.38	7.74	8.67	8.55	7.17	6.32	8.03	10.90	8.63	10.38	9.89
	0.70	1.05	1.33	0.76	1.01	0.22	1.07	0.71	0.64	1.03	1.21
Mg	1.27	1.28	1.27	1.24	1.32	1.21	0.87	0.89	0.99	1.73	1.77
	0.16	0.13	0.06	0.07	0.06	0.07	0.04	0.08	0.07	0.08	0.18
S	0.697	0.737	0.734	0.735	0.794	0.782	0.618	0.732	0.678	0.660	0.719
	0.041	0.046	0.107	0.028	0.042	0.074	0.022	0.057	0.038	0.042	0.098
Zn	86.6	96.7	89.0	112.6	129.9	110.4	94.9	113.8	104.4	93.4	91.2
	22.5	22.8	18.2	3.4	16.5	11.5	2.6	2.7	5.3	3.7	2.7
B/N	0.043	0.048	0.042	0.055	0.047	0.048	0.056	0.055	0.057	0.141	0.123
	0.008	0.011	0.011	0.005	0.004	0.016	0.010	0.009	0.004	0.011	0.008
Ca/N	38.6	34.2	37.9	15.1	14.9	12.8	17.1	13.4	14.6	38.3	34.8
	9.9	10.5	2.4	0.9	1.0	2.8	3.6	2.2	1.7	4.2	6.8
Cu/N	0.050	0.042	0.049	0.046	0.035	0.030	0.048	0.054	0.046	0.098	0.077
	0.006	0.004	0.004	0.005	0.006	0.002	0.003	0.008	0.002	0.017	0.014
K/N	18.3	16.7	17.0	16.1	16.4	15.9	16.0	15.0	16.8	20.1	20.0
	0.9	1.4	1.2	0.6	1.6	0.6	0.8	0.9	0.9	2.2	3.6
Mg/N	7.58	6.97	7.36	6.60	6.36	5.78	5.20	4.38	5.32	16.23	13.84
	1.12	0.76	1.09	0.22	0.48	0.21	0.50	0.40	0.47	1.71	2.39
P/N	10.69	9.94	10.50	9.96	9.83	9.92	9.27	8.57	10.00	11.45	9.72
	0.39	1.13	0.86	0.45	0.13	0.81	0.48	0.38	0.73	1.81	1.32
S/N	4.15	4.02	4.19	3.91	3.83	3.75	3.69	3.61	3.64	6.17	5.54
	0.08	0.13	0.36	0.16	0.15	0.48	0.30	0.18	0.17	0.32	0.41
Zn/N	0.515	0.528	0.511	0.600	0.629	0.531	0.567	0.566	0.559	0.876	0.709
	0.118	0.122	0.104	0.032	0.101	0.088	0.049	0.074	0.017	0.078	0.076

Koncentrationen av Zn var högre i knoppar från aska+N ytor än i knoppar på kontroll- och NPK-ytor (Tabell 7). Det fanns tendenser till förhöjda Ca-koncentrationer i knoppar från Aska+N än i knoppar från NPK i Vrå och Fulltofta. För övriga ämnen och för kvoter till N fanns inga skillnader mellan behandlingar.

I förhållande till optimum enligt Linder (1995) ligger Ca/N, Cu/N, Mg/N och Zn/N högt och K/N och S/N lågt. K/N ligger långt under optimum på 35 %. B/N och P/N ligger nära optimum.

Tabell 8. Medelvärden och standardavvikelser (undre raden) av koncentrationer av $\text{NH}_4\text{-N}$ (mg l^{-1}), $\text{NO}_3\text{-N}$ (mg l^{-1}) och $\text{PO}_4\text{-P}$ ($\mu\text{g l}^{-1}$), samt pH i markvattenlösning på 50 cm markdjup i november 2008.

Table 8. Means and standard deviations (lower row) of concentrations of $\text{NH}_4\text{-N}$ (mg l^{-1}), $\text{NO}_3\text{-N}$ (mg l^{-1}), and $\text{PO}_4\text{-P}$ ($\mu\text{g l}^{-1}$), and pH in soil solution at 50 cm soil depth in November 2008.

	Hedensberg			Vrå - björk			Fulltofta			Vrå - asp	
	Ktrl	Aska+N	NPK	Ktrl	Aska+N	NPK	Ktrl	Aska+N	NPK	Ktrl	Aska+N
$\text{NH}_4\text{-N}$	1.54	4.49	3.97	0.08	0.53	0.09	0.05	0.05	0.07	2.97	1.04
	0.46	4.72	4.24	0.07	0.90	0.08	0.04	0.03	0.10	1.85	2.03
$\text{NO}_3\text{-N}$	0.90	1.82	0.49	0.92	3.26	1.40	1.83	11.94	1.83	5.47	0.29
	1.51	2.01	0.62	1.12	4.28	2.33	3.65	11.95	2.13	6.13	0.34
$\text{PO}_4\text{-P}$	20.7	82.0	34.2	3.3	2.3	3.8	2.8	3.8	4.0	4.0	19.3
	11.8	120.5	22.8	1.0	0.6	1.0	2.1	2.1	1.4	1.4	33.8
$\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$	7.0	6.7	6.8	4.9	4.6	4.8	5.5	4.8	5.1	4.9	5.0

Det fanns inga skillnader i markvattenkemi mellan behandlingar på någon av lokalerna (tabell 8). Variansen inom behandlingar är generellt stor i förhållande till medelvärden; enstaka prov med avvikande värde får ofta stort genomslag på medelvärdet.

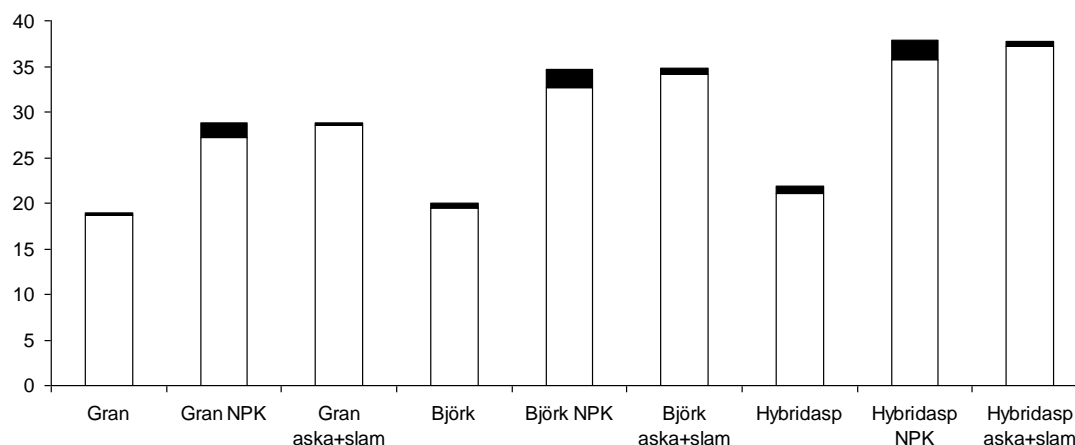
Gränsen på 1 mg l^{-1} för koncentration av $\text{NO}_3\text{-N}$ i avrinningsvatten överskrids i kontrollen i 20 % av analyserna, i Aska+N i 60 % av analyserna och i NPK i 33 % av analyserna.

3.2 Energibalanser

Energibalansberäkningarna (figur 4) visar högre brutto och nettoskörd vid gödning såväl med aska+slam som med NPK under förutsättning att antagen gödningseffekt uppnås. Energiskördenivåerna i ogödslade alternativ är jämförbara för de olika trädslagen. I gödslade alternativ verkar energiskörden bli enligt hybridasp > björk > gran. Nettoenergiskörden blir störst för aska + slam.

Energiinsatsens andel av bruttoskörd är för gran 1.6, 5.3 och 0.8 % för kontroll, NPK resp. aska+slam. Motsvarande siffror för björk är 2.9, 5.4 och 1.9 % och för hybridasp 3.2, 5.6 och 1.6 %. Gödselproduktionens andel av insatsenergin var 20 % för NPK och 6 % för aska + slam.

Förhållandet mellan energiskördeökning och energiinsats för gödselproduktion (energitillskott från slamförbränning oräknad) och gödning var 22:1 för gran gödslad med NPK och 112:1 för gran gödslad med aska+slam. Motsvarande siffror för björk var 33:1 resp. 156:1 och för hybridasp 29:1 resp. 129:1.



Figur 4. Energiskörd (MWh ha⁻¹ år⁻¹) uttryckt som nettoskörd (den vita delen av stapeln) resp. bruttoskörd (hela stapeln). Den svarta delen av stapeln motsvarar energiinsats, i aska+slam energiinsats minus energitillskott vid slamförbränning.

Figure 4. Energy harvest (MWh ha⁻¹ år⁻¹) expressed as net harvest (the white part of the bars) and gross harvest (the whole bars). The black part of the bars represent total energy input, in aska+slam (ashes+sludge) energy input minus energy from sludge incineration.

4 Resultatanalys

4.1 Fältförsök

Ökningar av koncentrationerna av N och P i knoppar (figur 1 och 2) kommer troligen att följas av tillväxtökning under förutsättning att status för övriga näringsämnen är tillfredställande. Att koncentrationerna av dessa ämnen ökat kan tolkas som att det fanns brist på dem i kontrollen, men för att säkerställa det krävs också tillväxtökning. N är det näringsämne som har tydligast koppling till tillväxt, men växtens P-status är också avgörande för tillväxteffekt [20]. En kombinerad tillväxtbegränsning av både N och P i skog är snarast att förvänta i södra och sydvästra Sverige [30], [13]. Kvoten mellan P och N (tabell 7) ligger nära optimum [16], vilket innebär att det finns lagom mycket N och P i förhållande till varandra. Enligt Linder [16] kan optimumkvoterna användas för alla högre växter. Det har ifrågasatts av t ex Schlyter m fl [25], då t ex P/N i bladprover för flera lövträd i södra Sverige ofta ligger långt under ett optimum på 10 % utan att P-brist kunnat säkerställas.

Det finns begränsat med referensdata för koncentrationer av näringsämnen i knoppar och det kan därför vara vanskligt att dra slutsatser om trädens status för enskilda näringsämnen. Det kan finnas skillnader mellan knoppar och blad i nivåer för olika näringsämnen, koncentrationerna av N och P kan vara högre och koncentrationen av K lägre i knoppar än i blad [12]. N-koncentrationerna skulle ha bedömts som låga om det varit fråga om bladanalyser [25], särskilt i kontrollen. Att åkermarksbeståndet i Hedensberg verkar ha ungefär samma eller t o m lägre N-koncentrationer än i skogsbestånden kan verka förbryllande eftersom N-tillgången oftast är betydligt högre på åkermark än i skogsmark. Avsaknaden av högre N-koncentrationer i Hedensberg kan möjligen bero på att bestånden där är ca 10 år äldre än i Vrå och Fulltofta.

N-koncentrationerna i hybridasp är förvånansvärt låga och indikerar brist. Att N inte ökat mer i hybridasp kan bero på att hybridaspens kraftiga tillväxt leder till en utspädning av näringsämnen i växtvävnad. Det är möjligt att en högre N-dos hade gett kraftigare respons i hybridasp.

Övriga ämnen ligger mestadels på nivåer som inte bör innebära tillväxtpåverkan. Ett möjligt undantag är K. K/N ligger generellt långt under optimum på 35 % [16]. Men eftersom optimumkvoterna gäller för barr eller blad, inte knoppar, bör man vara försiktig med att använda dem för att dra slutsatser för trädens status av K, liksom status av övriga ämnen. Tendenser till koncentrationsökning kan dock möjligen indikera suboptimala halter i kontrollen (figur 3). Å andra sidan, det faktum att den mycket högre K-tillförseln i Aska+N än i NPK (tabell 3) inte lett till betydligt större upptag i Aska+N än i NPK (figur 3) tyder snarast på att det inte föreligger K-brist. K-koncentrationerna bör dock noga följas upp i framtida bladanalyser. Tidigare studier har visat på försämrad K-status i granskog i södra Sverige [3] [31].

Avsaknaden av skillnader för P, K, m m mellan Aska+N och NPK indikerar att det är möjligt att utnyttja aska som källa för övriga näringsämnen än N. P föreligger i aska som kalciumfosfater och tillgängligheten bedöms generellt vara betydligt lägre än i NPK. Men P-tillgänglighet i aska kan bero mer på partikelstorlek än i vilken kemisk form P föreligger i. Här har siktad krossaska använts, vilket innebär en betydligt större specifik yta tillgänglig för upplösning av kalciumfosfater än i hårda granuler. Utlakningen av kalium från askpartiklar brukar vara hög oberoende av partikelstorlek [13], vilket därmed ger en hög K-tillgänglighet i de flesta askor.

Det finns två viktiga fördelar med gödselsystem där aska ingår jämfört med NPK: 1. Förutom P och K innehåller askan, men inte NPK viktiga mikronäringsämnen. Vid kontinuerlig gödsling utan tillförsel av mikronäringsämnen finns en uppenbar risk för att någon form av mikronäringsbrist uppstår [18] [32], därför kommer tillförsel av mikronäringsämnen förr eller senare att krävas vid upprepad NPK-gödsling. 2. Askan har kalkverkan vilket innebär en neutralisering av den tillväxtrelaterade försurningen. Även om många konstgödselprodukter innehåller lite kalk eller dolomitkalk är mängderna alltför små för att motverka den försurningseffekt som uppstår vid kraftiga tillväxtökningar som i ungskogsgödsling. Vid upprepad NPK-gödsling kommer kalkning att krävas för att motverka markförsurning.

Eftersom endast en omgång med vattenprover ännu föreligger går det knappast att dra några slutsatser för effekter på avrinnande vatten. Men den höga frekvensen av analyser med höga halter $\text{NO}_3\text{-N}$ i Aska+N är en möjlig riskfaktor. Nitrifikationen ökar ofta vid pH-höjning [21], men det behöver inte innebära ökad utlakning. Det finns exempel både på ökning och på minskning av nitratläckage efter kalkning eller askning, men den generella bilden är att nitratläckaget inte påverkas så länge det finns vegetation som kan ta hand om frigjort nitrat [30]. Men, eftersom askåterföringen i föreliggande studie har kombinerats med N-tillförsel är det möjligt att den samlade N-tillgången blivit så hög att vegetationen inte kunnat ta upp allt frigjort N. Om så är fallet borde det vara möjligt att sänka N-dosen i Aska+N och ändå få samma N-respons i träden. För detta krävs dock bättre metoder för att prediktera N-tillgång efter pH-höjning. Att effekter på P i markvatten saknas är inte förvånande. Tillförsel av betydligt större mängder P per ha gav inte upphov till ökat P-läckage på hygge i Hedberg m fl [13].

Med endast en lysimeter per provyta finns ingen möjlighet att mäta variation inom provytor och därmed finns en risk för att analyserna inte ger en representativ bild av markvattenkemin på varje enskild yta. Inköp och utplacering lysimetrar stod för större delen av kostnaderna för försöksetableringen. Med aktuell försöksuppläggning var det inte ekonomiskt möjligt att ha fler lysimetrar per provyta.

4.2 Energibalanser

Energibalansberäkningarna gav intressanta resultat som kanske delvis avviker från vad som kunde förväntas. Av alla skogsgödslingsförsök som gjorts i Sverige står försök med gran och tall för en helt överskuggande majoritet. Eftersom gran och tall har visats sig

svara väl på gödsling i mogen skog, gödslingsförsök i ungskog med gran har gett mycket stora tillväxteffekter, gödsling hittills har studerats i syfte att öka produktion av fiberråvara och timmer, inte bioenergi, och gödslingsförsök i lövskog saknas nästan helt, är det kanske inte så konstigt att granskog har framställts som huvudalternativet för att öka produktionen av bioenergi i skog. Om gjorda antaganden i huvudsak är riktiga indikerar resultaten från energibalansberäkningarna i denna studie (figur 4) att björk och hybridasp skulle kunna ge minst lika hög nettoenergiskörd som gran.

I ogödslade alternativ verkar det inte finnas någon större skillnad i energiskörd (figur 4), trots att björkens volymtillväxt är betydligt lägre än både gran och hybridasp. Det beror på björkvedens höga densitet jämfört med gran och hybridasp. Densitetsskillnaderna blir än viktigare i gödslade alternativ eftersom densitet hos gran sjunker vid högre tillväxt, vilket inte sker hos björk och hybridasp [22]. De små skillnader som fanns i ogödslade alternativ blir uppskalade i gödslade alternativ så att löv-alternativen framstår som överlägsna.

För såväl björk som hybridasp har volymökningen efter gödsling (75 %) antagits bli lika stor som för gran (tabell 5). Det kanske hade varit mer rättvisande att räkna med samma ökning i massa för de olika trädslagen. Det hade gjort gödslad gran och gödslad björk ungefär likvärdiga i bruttoproduktion. Eftersom hybridasp redan ligger på en högre tillväxtnivå än gran är det möjligt att hybrid Aspen redan ligger närmare den övre fysiologiska gränsen för tillväxt än vad gran gör. Om så vore fallet, vilket det inte finns data för att säkerställa, hade det troligen inte varit rimligt att anta samma relativa tillväxtökning för hybridasp som för gran.

Att energiinsatsen är så liten i förhållande till energiskörden visar att bioenergiproduktion i skog är ett effektivt alternativ. Det restproduktbaserade gödselsystemet aska+slam blir särskilt effektivt när energi från förbränning av en slamfraktion tas med i beräkningen. Energiåtgången för produktion av gödselmedel och gödsling hade dock relativt begränsad betydelse i både aska+slam- och NPK-alternativen. Förhållandet mellan energiinsats för gödselproduktion och gödsling i de olika alternativen indikerar att björk med aska+slam skulle vara det mest effektiva alternativet.

I praktiska bioenergiproduktionssystem i skog blir energiskörden ännu större när man förutom stam också tillvaratar GROT i slutavverkning och gallringar, samt tar ut biomassa i röjningar. För att det senare ska bli effektivt behöver dock skördesystem utvecklas, t ex stråkröjning.

5 Slutsatser

- Förhöjda koncentrationer av N och P i knoppar hos både björk och hybridasp efter gödsling med såväl NPK som aska+N ger goda möjligheter till framtida tillväxtökning.
- Avsaknaden av skillnader mellan NPK och aska+N indikerar att det är möjligt att använda aska som källa för P och K i ungskogsgödsling av björk och hybridasp.
- Om asktillförseln i aska+N ger större kväveutlakning än i kontroll och NPK, kan det bero på större tillgång på mineraliserat och nitrifierat kväve. Om så är fallet bör kvävedosen kunna sänkas i aska+N utan att påverka kväveupptaget negativt.
- Energiskörden för gödslad björk och hybridasp verkar kunna vara minst lika hög som i gödslad gran.
- Ungskogsgödsling av löv, liksom av gran är energieffektivt; insatsenergin är mycket liten jämfört med energiskörden.
- Användning av restproduktbaserade gödselsystem verkar vara mer energieffektivt än användning av NPK.

6 Rekommendationer och användning

Då fältförsöken ännu befinner sig i sin linda går det inte att utifrån dem ta fram rekommendationer på lämpligt val av trädslag för bioenergiproduktion i skog. Det krävs också flera års tillväxtmätningar och fler studier för att kunna dra slutsatser om potentialen i restproduktbaserade gödselsystem jämfört med NPK för gödsling av björk och hybridasp.

Energibalansberäkningarna indikerar att om syftet är att producera bioenergi från skog kan andra odlingsystem än de som är effektivast för produktion av fiberråvara och timmer vara effektivast för produktion av bioenergi och det bör därmed påverka trädslagsval. Med de effektivaste och mest uthålliga produktionssystemen har vi störst chans på sikt att motverka klimathotet. För den enskilde skogsägaren innebär framväxten av energisortiment en möjlighet till flera kostnadseffektiva val. En god strategi kan vara att i större utsträckning än tidigare förlita sig på flera trädslag och på fler sortiment, utöver gran för produktion av massaved och timmer.

Skogsägare, energiomvandlare (el och fjärrvärmeproducenter) och anslagsgivare rekommenderas att snarast satsa resurser på etablering av fler försök med gödsling av lövträd och med restproduktbaserade gödselmedel, liksom på systemstudier av olika alternativ för produktion bioenergi från skog.

7 Förslag till fortsatt forskningsarbete

Gödslingssystem för lövträd behöver utvecklas. Sannolikt ser responsfunktionerna för tillförd näring - tillväxt annorlunda ut än för gran. Gödslingssystemet behöver också anpassas så att risken för läckageförluster minimeras och anpassningarna kan behöva vara annorlunda för lövträdsbestånd än för gran. Det finns stora behov av fler fältförsök med lövträds gödsling. Empiriska studier bör kompletteras av och kombineras med modellering.

Restproduktbaserade gödslingssystem är sannolikt attraktiva ur såväl miljömässig som ekonomisk synvinkel, men detta måste utvärderas noggrant. Hur ser gödslingseffekt, läckagerisk, kolbalans, metallbalanser m m ut i olika restproduktbaserade gödslingssystem jämfört med NPK-gödsling?

Hanteringen av näring i aska och slam kan utvecklas avsevärt. Vilka system är mest effektiva; enkla system som användning av krossaska och pelleterat slam eller mer avancerade lösningar där näringsämnen extraheras ur aska och/eller slam till mer koncentrerade produkter?

Vi vet att tillförsel av aska och kalk kan leda till ökad kvävemineralisering och nitrifikation, men kunskapen om hur är begränsad. Måste pH öka till en viss nivå för att ge effekt? Är det enbart pH-höjning som ger effekt eller kan näringstillförseln med askan också påverka mineralisering och nitrifikation? Om man kan förutsäga hur mycket kväve som frigörs vid en viss åtgärd kan kvävetillförseln i gödsling minskas. Verktyg för att göra sådana förutsägelser behöver utvecklas.

Energibalansberäkningar för bioenergiproduktion från skog behöver utvecklas. Hur ser balansen ut när t ex energiinsats och energiskörd för GROT-uttag och biomassauttag i röjning tas med i kalkylen? Vilket trädslag, eller vilka trädslagsblandningar, är effektivast för vilka marktyper och klimatlägen?

Odlingssystem med självföryngring, med t ex björk eller hybridasp, kan vara effektiva för bioenergiproduktion. Hur ser energiskörd och insatsenergi ut i planterade resp. självföryngrade system? Teknik för att ta ut biomassa i röjningar, t ex stråkröjningssystem, behöver utvecklas.

8 Litteraturreferenser

1. Akselsson C, Sverdrup H, Westling O, Holmqvist J, Thelin G, Ugglå E, och Malm G. Impact of harvest intensity on long-term base cation budgets in Swedish forest soils. *Water Air Soil Pollut: Focus*, 7/2007 s 201–210.
2. Akselsson C, Westling O, Alveteg M, Thelin G, Fransson A-M och Hellsten S. Will N or P be limiting for growth in Swedish forests in the future? In press.
3. Aronsson A. Indications of stress at unbalanced nutrient contents of spruce and pine (in Swedish, with English summary). *Journal of the Royal Swedish Academy of Agriculture, Forestry Supplements*, 17/1985, s 40–51.
4. Bergh J och Linder S. Grundläggande försök med balanserad näringstillförsel i ungskog av gran. Slutrapport Fiberskogsprojektet. 2006.
5. Bergh J, Linder S, Lundmark T och Elfving B. The effect of water and nutrient availability on the productivity of Norway spruce in northern and southern Sweden. *Forest Ecology and Management*, 119/1999, s 51-62.
6. Berglund M och Börjesson P. Energianalys av biogassystem. Miljö- och energisystem, Lunds Universitet, Lund 2003, Rapport No 44.
7. Bergquist, J., Ekö, P.-M., Elving, B., Johansson, U., Thuresson, T. Jämförelse av produktionspotential mellan tall, gran och björk på samma ståndort. Skogsstyrelsen 2005. Rapport 2005:19.
8. Börjesson P. Energianalys av produktion av vete, poppel och gran på åkermark i södra Sverige. Miljö- och energisystem, Lunds Universitet, Lund 2005.
9. Börjesson P. Livscykelanalys av Salixproduktion. Miljö- och energisystem, Lunds Universitet, Lund 2006, Rapport No 60.
10. Börjesson P. Bioenergi från jordbruket – en växande resurs. Bilagedel, Statens Offentliga Utredningar, Stockholm 2007, SOU 2007:36.
11. Energimyndigheten. Miljöeffekter av skogsbränsleuttag och askåterföring i Sverige. En syntes av Energimyndighetens forskningsprogram 1997 till 2004. Energimyndigheten 2006, ER2006:44.
12. Göransson H, Rosengren U, Wallander H, Fransson A-M, Thelin G. Nutrient acquisition from different soil depths by Pedunculate oak. *Trees* 20/2006, s 292-298.
13. Hedberg J-E, Thelin G och Theliander H. Slutrapport EcoFor-projektet. Södra Cell Forskning och Utveckling. Värö 2008, FoU-rapport 03:08.
14. Jacobson S. Addition of stabilized wood ashes to Swedish coniferous stands on mineral soils – effects on stem growth and needle nutrient concentrations. *Silva Fennica* 37(4)/ 2003, s 437–450.

15. Jonsson S och Möller G. Björkens reaktion på kvävegödsling. Föreningen skogsträdsförädling och Institutet för skogsförbättring, Årsbok 1975, Uppsala, s 103-144.
16. Linder S. Foliar analysis for detecting and correcting nutrient imbalances in Norway spruce. *Ecological Bulletins*, 44/ 1995, s 178-196.
17. Magnusson T. Slam och aska i intensivodling. Slutrapport Fiberskogsprojektet. 2006.
18. Möller G. Borbristsskador efter upprepad kvävegödsling på fastmark. Institutet för skogsförbättring, Uppsala 1982. Årsbok 1982, s 47-70.
19. Nilsson L O och Wasielewski D. Influence of fertilization in a natural *Populus tremula* stand. *Scandinavian Journal of Forest Research* 2/1987, s 343-348.
20. Parfitt R I och Stott K G. The effects of nitrogen, phosphorus, and potassium levels on the productivity of 13 willow clones. *Biomass for energy and industry*, 4th EC Conf., Orleans, s 546-550.
21. Persson T och Wirén A. Effekter av skogsmarkskalkning på kväveomsättningen. Staaf H, Persson T och Bertills U. Skogsmarkskalkning – Resultat och slutsatser från Naturvårdsverkets försöksverksamhet. Naturvårdsverket, rapport 4559. 1996.
22. Rytter L. Produktionspotential hos asp, björk och al – en litteratur studie över möjligheter till och konsekvenser av biomassa- och gagnvirkesuttag. *Skogforsk*, 2004, Redogörelse 4/2004.
23. Rytter L, Stener L-G och Werner M. 2002. Hybridasp – ett lönsamt alternativ som passar i det nya skogsbruket. *SkogForsk*, 2002, resultat 10/2002.
24. Savolainen V och Berggren H. Wood fuels basic information pack. Saarijärvi, 2000. ISBN 952-5165-19-1.
25. Schlyter P, Sonesson K, Stjernquist I och Thelin G. Forest conditions — A regional overview. Sverdrup H och Stjernquist I, *Developing principles for sustainable forestry in Sweden*, Dordrecht 2002, s 256-271. ISBN 1-4020-0999-2.
26. Sikström U, Nohrstedt H-Ö, Pettersson F och Jacobson S. Stem-growth response of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* to nitrogen fertilization as related to needle nitrogen concentration. *Trees*, 12/1998, s 208-214.
27. Statsrådsberedningen - Kommissionen mot oljeberoende. 2006. På väg mot ett oljefritt Sverige. Statsrådsberedningen 2006.
28. Sverdrup H och Rosén K. Long-term base cation mass balances for Swedish forests and the concepts of sustainability. *Forest Ecology and Management*, 110/1998, s 221-236.
29. Sverdrup H och Stjernquist I. 2002. *Developing principles for sustainable forestry in Sweden*, Dordrecht 2002, ISBN 1-4020-0999-2.
30. Thelin G. Askåterföring till gran- och bokbestånd – effekter på näring, tillväxt, kvävedynamik och kolbalans. *Värmeforsk* 2006, Rapport Q4-221.
31. Thelin G, Rosengren-Brinck U, Nihlgård B och Barkman A. Trends in needle and

-
- soil chemistry of Norway spruce and Scots pine stands in South Sweden 1985-1994. Environ. Pollut., 99/1998, s 149-158.
32. Turvey N D och Grant B R. Copper deficiency in coniferous trees. Forest Ecology and Management, 37/1990, s 95-122.

Värmeforsk är ett organ för industrisamverkan inom värmeknisk forskning och utveckling. Forskningsprogrammet är tillämpningsinriktat och fokuseras på energi- och processindustriernas behov och problem.

Bakom Värmeforsk står följande huvudmän:

- Elforsk
- Svenska Fjärrvärmeföreningen
- Skogsindustrin
- Övrig industri

VÄRMEFORSK SAMARBETAR MED
STATENS ENERGIMYNDIGHET

VÄRMEFORSK SERVICE AB

101 53 Stockholm

Tel 08-677 25 80

Fax 08-677 25 35

www.varmeforsk.se

Beställning av trycksaker

Fax 08-677 25 35