

DRÖNARBASERAD ASKÅTERFÖRING

RAPPORT 2022:901



Drönbaserad askåterföring

ELOF WINROTH

ISBN 978-91-7673-901-3 | © Energiforsk november 2022 | Omslagsfoto Alan Sherrard
Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Återföring av träaskor till skog och mark har långsiktigt goda effekter på tillväxten i skog och motverkar markförurning. Askåterföring begränsas dock av dyr logistik för spridningen i skogen. I det här projektet har spridning med hjälp av drönare testats och gett goda resultat.

Arbetet har genomförts av Elof Winroth på Nordluft automation AB. Projektet har följts av en referensgrupp bestående av: Harald Svensson Stockholm exergi, Stefan Anderson Skogsstyrelsen, Hedvig Johansson Södra och Johan Ekenstedt Sveaskog.

Marie Kofod-Hansen
Programansvarig Askprogrammet, Energiforsk AB

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

Sammanfattning

Vid förbränning av trädbränsle i industriella produktions- och energianläggningar uppstår stora mängder aska som restprodukt. Askan innehåller mineraler och näringsämnen. För ett långsiktigt hållbart skogsbruk behöver detta material återföras till skogen där det bidrar till tillväxt och markförbättring. Idag hamnar stora mängder av materialet i stället på deponi, framför allt på grund av höga kostnader för spridning i skogen. Drönbaserad spridning är en ny metod som kan sänka kostnaderna och komplettera befintliga spridningsmetoder.

Aska från förbränning av trädbränslen sprids i skog dels för att uppnå lång- och kortsiktiga tillväxteffekter i skogen, dels för att producenter av askan ser återföring till skog som ett cirkulärt och attraktivt sätt att kvittbli den. Alternativ till återföring är framför allt täckning av deponier och användning som utfyllnadsmaterial i anläggningsarbeten.

Askåterföring rekommenderas av Skogsstyrelsen för den mark där grot för energiändamål tagits ut. Detta då grot har högre koncentration av mineraler och näringsämnen än rundvirke. Till arealen för grotuttag tillkommer stor ytterligare potential för askåterföring där vissa forskare pekar på uppåt 500 000 hektar. Idag återförs en begränsad mängd aska. Anledningen är framför allt utmaningar i logistiken och ekonomin. Det kostar helt enkelt för mycket att få ut askan i skogen jämfört med de alternativa kvittblivningsmetoderna.

Startupbolaget Nordluft Automation utvecklar drönarteknik för att sprida material från luften. Systemet använder ett antal större drönare som styrs autonomt. Storleken av, och antalet drönare, ger hög spridarkapacitet. Att spridningen sker från luften ger ett oberoende av terrängförhållandena i skogen och en stor flexibilitet. Det har setts en möjlighet i att denna drönarteknik skulle kunna minska de ekonomiska och logistiska hindren som finns för att askåterföring till skog ska kunna öka. Denna rapport beskriver arbetet med en första konceptversion av systemet.

I detta projekt färdigställdes och testades en version av systemet bestående av tre drönare med 30 kg lastkapacitet. Centrala komponenter/funktioner såsom spridare, batterier samt styrsystem utvecklades och testades.

Projektets mål var en spridningsdemonstration som visar potentialen i ett fullt utvecklat system. Målet uppnåddes den 1a december 2021. Då användes ett prototypsystem för att sprida 300 kg granulerad bioaska. Askan kom från Värtaverket i Stockholm och spreds i ett skogsparti utanför Hall, Södertälje. Till spridningen hade projektets referensgrupp, media och vissa branschaktörer bjudits in.

Demonstrationen visade att drönbaserad spridning har potential att komplettera befintliga spridningsmetoder såsom skotare och helikopter. Vilken betydelse drönartekniken får inom askåterföring beror på hur pass långt systemet kan optimeras. Drönarnas flyghastighet, tid för att tömma sin lastbehållare, kö-optimering vid påfyllningsplatsen samt lasthantering på marken är alla områden som behöver utvecklas för att systemet ska få betydelse inom askåterföring. Det är aktiviteter som finns i affärsplanen för det företag som utvecklar systemet.

Nyckelord

Askåterföring, drönare, askgödsling, bioaska, logistik

Summary

In the combustion process of biomass in industrial production and energy plants, bioash is created as waste. This material contains minerals and nutrients which needs to be returned to the ecosystem in order to get a closed loop long term sustainable production system. In a Swedish context the most important biomass is wood from forests. The bioash from use of wood-based fuels is currently to a high extent used as landfill, where the nutrients and minerals inside it does not contribute to the future growth in forests. This is due to high cost of recycling the bioash in forests. Drone based ash recycling is a new method that can lower the costs of spreading and provide a valuable addition to current spreading methods.

Ash from combustion of wood-based fuels is spread in forests partly to achieve long- and short term increased growth and soil health, but also because producers of bioash see forest recycling as a circular and attractive way of disposal. The alternative is in most cases use as landfill where the nutrients inside the ash have no positive effect.

Recirculation of bioash is recommended by the Swedish Forest Agency for forest land used for production of grot (rejected tops and branches). The reason for this is that this material has a higher concentration of minerals and nutrients compared to roundwood. In addition to this land there is large potential for recirculation of wood-ash, some researchers point towards 500 000 hectares in Sweden. Today only a small portion of woof-ash is recycled due to difficulties in the logistic chain and high costs. The costs of getting the ash out to and then spread in the forest is simply too high compared to other methods of disposal.

The startup company Nordluft Automation is developing drone technology for aerial spreading of material. The system uses a group of cargo drones controlled automatically from a central computer. The size of, and number of, drones give high spreading capacity. Because the spreading is aerial, the operations are independent of terrain and a high flexibility is gained. Using this technology for decreasing the logistical and economical barriers of forest ash recirculation has been identified as a promising way to increase bio ash recirculation in forests. This report describes the work of building and testing a concept version of the system.

In this project, a first version of the system was built and tested. It used three drones with 30kg cargo capacity. Central components/functions like spreaders, batteries and control system, were developed and tested.

Main goal of the project was a demonstration that would show the potential in a fully developed drone spreading system. This was acheived the 1st of december 2021 when a prototype system was used to spread 300 kg granulated bioash. The material came from Värtaverket in Stockholm and was recycled in a forest area near Hall, Södertälje. For the demonstration, the project reference group, media and a few industry actors were invited.

The demonstration showed that drone based spreading has a potential to supplement current spreading methods like forwarders and helicopters. To what extent will be determined by how far the system can be optimized. Time for cargo release, flight speed, queue optimization at the refilling spot, and material handling on the ground are all areas that needs development and improvement in order to make the system relevant in ash recycling. These activities are part of the business plan of the company developing the system.

Innehåll

1	Bakgrund och introduktion	9
1.1	Askåterföring	9
1.2	Drönarteknik	10
2	Projektet	12
3	Aktiviteter	14
3.1	Drönaren	14
3.2	Batterisystem	15
3.3	Styrsystem	16
3.4	Spridarmekanism	16
4	Resultat	19
5	Utvärdering av projektet	22
6	Diskussion och fortsatt arbete	23
7	Bilaga A	25

1 Bakgrund och introduktion

I detta avsnitt beskrivs översiktligt bakgrunden till detta projekt. Avsnittet är indelat i två sektioner, en för askåterföring och en för drönartekniken.

1.1 ASKÅTERFÖRING

Vid förbränning av fasta träbaserade skogsbränslen som exempelvis sågspån, flis, och pellets, bildas bioaska som restprodukt. Detta material skapas i stora mängder i trä och pappersindustrier samt i kraft- och värmeproduktion. Dessa industrianläggningar har behov av att bli av med detta material på ett hållbart och ekonomiskt sätt.

Bioaskan innehåller många olika ämnen med olika egenskaper. Av principiella skäl kan hävdas att all bioaska behöver återföras till skogsmarken för att sluta det naturliga kretsloppet och för att göra bränsleuttaget långsiktigt hållbart. I praktiken är det dock en begränsad mängd aska som lämpar sig för spridning. Beroende på förbränningsprocessen får askan olika egenskaper och innehåll. Uppgifter förekommer om att det i Sverige årligen produceras 200 000 ton spridningsbar aska¹.

Bioaska innehåller en rad kemiska komponenter. Störst relevans i skogen har fosfor, kalcium, magnesium och kalium. Ifall det råder brist på något av dessa ämnen i skog som bioaska sprids i, ges en positiv tillväxteffekt av askåterföring. Tillväxteffekten är dock beroende av flera faktorer. Markbundet kväve kan påverkas både avseende omsättning och tillgänglighet av komponenter i bioaskan. Där kvävetillgången är begränsad är därför tillväxteffekten av askåterföring inte säker. Bioaskan är basisk och motverkar därmed försurning av marker och vattendrag.

Torvmarker innehåller generellt begränsade mängder av de näringsämnen som återfinns i bioaska. Projektstudien "Viltfoderproduktion på torvmark med hjälp av aska" från 2017 visar stora tillväxteffekter av askåterföring på torvmark hos de växter som utgör viltfoder, och därmed en attraktiv ekonomisk möjlighet för skogsägare att minska sina betesskador². Uppgifter från Markku Remes vid Finlands skogscentral gör gällande att askåterföring till torvmark ökar virkestillväxten med i medeltal 3 kubikmeter per år och hektar. Askåterföring till torvmark har alltså stor potential att ge skogsägaren minskade kostnader för viltskador, ökad virkestillgång och högre kolinbindning från atmosfären.

Av de 200 000 ton spridningsbar aska så återförs årligen ca en fjärdedel³ till en total areal av ca 13 000 hektar⁴. Rekommenderad giva är mellan 2 och 3 ton torr aska per hektar enligt Skogsstyrelsen. De rekommenderar askåterföring på marker där

¹ Rapport - Produktion och spridning av granulerade askprodukter, Skogforsk 2019

² Rapport - Viltfoderproduktion på torvmark med hjälp av aska, Energiforsk 2017

³ Rapport - Produktion och spridning av granulerade askprodukter, Skogforsk 2019

⁴ Rapport - Simuleringsstudie av ny metod för askåterföring, Skogforsk 2018.

större uttag av grot (avverkningsrester såsom grenar och toppar) görs. Detta material innehåller högre koncentration av näringsämnen jämfört med rundvirke. Uttag av grot bedöms annars orsaka alltför stor försurande effekt och näringsutarmning för att kunna definieras som uthålliga. Skogsstyrelsen gör bedömningen att gränsen går vid uttag av grot i samband med slutavverkning i granskog på 200 m³sk eller mer, vilket motsvarar ungefär ett halvt ton aska. Uttag av grot på tallmarker understiger ofta gränsen på ett halvt ton.⁵

Enligt Stefan Andersson på Skogsstyrelsen kräver gällande lagstiftning att skogsägare kompenserar för näringsuttag, men bara 25-30 % av askan från biobränsleuttag återförs⁶. Resten av askan hamnar på deponi, deponitäckning eller används som anläggningsmaterial. I dessa användningsområden kommer inte näringsämnena i askan till nytta och utan återförande av dessa riskerar skogsmarkens långsiktiga produktionsförmåga att minska.

Anledningen till att mer bioaska inte återförs till skogen är framförallt att den logistik som krävs är dyr. Askan behöver först förbehandlas genom befuktning och härdning för att inte dess kemiska reaktivitet ska skada vegetationen. Sedan tillkommer kostnaden för transport till skogen och för spridning. Spridningen görs framför allt med anpassade skogsmaskiner och traktorer, men även med helikopter. Vid spridning behöver hänsyn tas till markförhållanden och väderlek för att inte skapa körsador.

Kostnaden för hantering av askan bärs till stor del av askproducenten, men ett mindre bidrag kommer i många fall från skogsägaren⁷. En hållbar omställning av energisystemet kommer att innebära en ökad andel el och värme från förnybara bränslen och därmed kommer behovet av askåterföring att öka.

Askprogrammets första effektmål i delområdet "Skog och mark" är att mängden aska som kan återföras till skog ökar.

1.2 DRÖNARTEKNIK

Drönare är ett samlingsnamn på motorförsedda luftfartyg utan pilot ombord som kan flyga autonomt eller fjärrstyras. Det finns idag ingen tydlig gränslinje mot modellflyg. Det är dock, till skillnad från modellflyg, ovanligt att drönare byggs för att utseendemässigt efterlikna bemannade luftfarkoster. Drönartekniken har sitt ursprung i det militära men idag används tekniken inom de flesta samhällssektorer. Några exempel är:

- Leverans av mediciner på den afrikanska landsbygden. Se bolaget Zipline.
- Akut utkörning av hjärtstartare i ett område i Västsverige. Se bolaget Everdrone.
- Besprutning av risfält i Asien. Se bolagen DJI och XAG.
- Inspektion av infrastruktur såsom broar, järnväg och elnät.
- Eftersökning av personer och djur hos blåljusverksamhet.

⁵ Informationsblad – Återför aska till skogen, Skogsstyrelsen 2014

⁶ Artikel läst maj 2022 - <https://bioenergitidningen.se/kulor-av-aska-ska-oka-aterforing-av-naring-till-svenska-skogar/>

⁷ Mailkontakt - Harald Svensson, Stockholm Exergi 2019

Drönare finns av en rad olika typer och varianter. En gränsdragning kan göras mellan vingförsedda drönare (liknande flygplan), kallade fixed-wing, och de som får sin lyftkraft från en eller flera horisontella propellrar, kallade rotary-wing. Hybrider mellan dessa finns också, så kallade VTOL (vertical take off and landing).

Något förenklat, har fixed-wing fördelarna låg energiförbrukning och hög hastighet men begränsningar i att de inte kan stå still i luften, de är relativt stora, och de behöver en bana för start och landning. Rotary-wing har fördelarna att de är kompakta, kan stå still i luften, kan starta och landa vertikalt. Nackdelar med den konstruktionen är hög energiförbrukning och begränsad flyghastighet. VTOL får de bästa egenskaperna från både konstruktionerna men designen medför vissa kompromisser.

I aktuellt projekt används drönare av rotary-wing design och mer specifikt multikopter med fyra propellrar, en quadcopter, se bild nedan i figur 1.



Figur 1. Quadcopter – Exempel på multikopter med fyra propellrar

Denna typ av flygfarkost provades under tidigt 1900 tal men fick då ingen praktisk betydelse. Problemet med konstruktionen var den inneboende instabiliteten. Lyftkraften ute på de fyra armarna måste alltid regleras och balanseras noggrant för att flygfarkosten ska flyga horisontellt. I stället blev helikoptern den dominerade konstruktionen då den till viss del är självstabiliserande.

Med framsteg i prestanda och pris hos mikroelektronik uppstod nya möjligheter för multikoptern under senare tid. Från tidigt 90 tal och framåt har en enorm utveckling skett. En mängd multikoptrar lanserades som flygande leksaker men också dyra arbetsredskap. Bättre, billigare, mindre och lättare IMU:er (rörelsesensorer baserade på tröghet), GPS:er, mikrodatorer, laddbara batterier, kolfiberkomponenter och kameror har haft enorm betydelse för hur tekniken spridits på marknaden.

2 Projektet

Företaget Nordluft Automation AB grundades 2017. Grundarna såg att drönarapplikationer baserade på kameror, sensorer och datainsamling dominerade marknaden. De insåg att drönarens förmåga att bära last och utföra fysiska arbetsuppgifter ofta förbises och undervärderas. Efter att en tid ha funderat igenom hur denna förmåga skulle kunna kommersialiseras och i vilka applikationer så utkristalliserade sig affärsidén. Faktorer såsom lönsamhet, säkerhet och möjligheten att säkra flygtillstånd behövde noga beaktas.

Innovationen och affärsidén kom att bli att bygga ett högeffektivt drönarbaserat maskinsystem för att sprida material från luften. Idékomponenter för utformningen var:

- Systemet skulle använda drönare av multikoptertyp för att smidigt kunna operera på relativt korta avstånd.
- Drönaren skulle vara av sådan storlek att kapaciteten skulle maximeras men att drönaren ändå skulle gå att hantera manuellt utan lyfthjälpmedel.
- Systemet skulle använda en grupp drönare för större total kapacitet.
- En operatör sköter och övervakar systemet. Detta kommer behövas inom överskådlig framtid av legala skäl.
- Drönarna styrs automatiskt av en dator och navigerar med hjälp av GPS för att säkert och effektivt täcka in valt arbetsområde. Styrsystemet tar batteriförbrukning, tid för att sprida en last och flyghastigheten i beaktan för att minimera köbildning.
- Drönarna utgår på marken från en fordonsbaserad basstation. Denna har en mekanism för att möjliggöra snabb och smidig lastpåfyllning så att en drönare endast behöver stå still på marken några sekunder innan den kan påbörja sin nästa spridningsrunda.
- Systemet designas för spridningsapplikationer inom skogsbruk och jordbruk. Här finns behoven, flygavstånden är korta och miljöerna är fördelaktiga ur säkerhetssynpunkt då det här är liten sannolikhet för att drönaren behöver flyga över människor.

Askåterföring identifierades tidigt som en intressant applikation för systemet.

Fördelar sågs i:

- Potentiell sänkning av spridningskostnaden. En driftkalkyl visar potential till sänkning mellan 30 och 40 % för ett fullt utvecklat system.
- Oberoende av terräng och markegenskaper (ex dålig bärighet) gör att spridning kan utföras på fler områden och året runt.
- Genom att endast baseras på ett fordon och en operatör och därigenom innebära låga uppstartskostnader, skulle systemet möjliggöra spridning på mindre områden jämfört med andra spridarmetoder.
- Relativt tyst och miljövänlig spridning genom eldrift

Ovanstående fördelar skulle öka den totala mängden återförd aska och därmed svarar konceptet mot målsättningar hos både Skogsstyrelsen och Askprogrammet.

Vid denna tidpunkt har drönbaserad spridning endast förekommit där volymerna av material varit små och kraven på precision varit höga, exempelvis inom spridning av växtskyddsmedel inom vinodling. Nordlufts unika koncept kombinerar fördelarna med drönbaserad spridning tillsammans med hög kapacitet och spridningseffektivitet. En driftkalkyl visar att systemet fullt utvecklat och intrimmat kan nå en spridningskapacitet på över 6 ton i timmen.

Under slutet av 2017 startades dialogen med Askprogrammet och Stockholm Exergi. Innovationsidén uppmuntrades men befann sig i för tidigt skede för att kvalificera sig för ekonomiskt stöd. Teamet bakom bolaget jobbade under tiden med prototyper av framför allt drönare och styrsystem, som utgjorde de kritiska komponenterna. Indata till driftkalkyl för ett fullt utvecklat spridarsystem avstämades under denna period med experter på Stockholm Exergi.

Finansiering och andra resurser säkrades från bl.a. Vinnova, Energimyndigheten, inkubatorn InnoEnergy, Robotdalen, sidouppdrag på konsultbasis samt genom egen obetald arbetstid.

I början av 2020 hade bolaget uppnått en annan mognadsnivå avseende tekniken. Flera drönare med 30 kg lastkapacitet hade byggts, flygtillstånd var säkrat och styrsystemet var nära en fungerande prototypversion. Finansiering var dock en begränsande faktor för att Nordluft skulle kunna ta sin teknik vidare.

Ny kontakt togs då med Askprogrammet. En formell projektansökan skickades in med målet att färdigställa en prototypversion av systemet och genomföra en mindre demonstrationsspridning. 250 tkr i stöd beviljades i slutet av januari 2020. Projektets målsättnings stämde bra överens med askprogrammets mål om att öka mängden aska som kan återföras till skog och mark samt att främja resurseffektiva lösningar för askanvändning.

Upplägget av projektet var att drönarsystemet skulle utvecklas vidare avseende själva drönaren och styrsystemet. Därefter testning och slutligen demonstration ske med tre stycken drönare. Vid demonstrationen skulle granulerad aska från Stockholm Exergis anläggning i Värtahamnen spridas. Samarbete var redan initierat med Daniel Glimtoft och företaget Svensk Skogsgödsling kring det granulerade materialet samt för praktiska frågor avseende själva spridningen.

Slutrapportering var planerad att ske i slutet av 2020, men risk för förseningar identifierades kopplat till den tekniska utvecklingen, leverans av komponenter samt erforderliga flygtillstånd från Transportstyrelsen.

3 Aktiviteter

Detta avsnitt beskriver arbetet hos Nordluft för att vidareutveckla drönarsystemet och förbereda för demonstrationsspridning. Den tekniska utvecklingen kretsade kring delarna:

- **Drönaren – Den flygande plattformen**
- **Batterisystem – Lösning för energiförsörjning av drönarna**
- **Styrsystem – Mjukvara och datalänk för att koordinera och styra drönarna**
- **Spridarmekanism – Mekaniskt system för spridningen av material från drönarna**

3.1 DRÖNAREN

I slutet av januari 2020 när detta projekt beställdes från Askprogrammet, hade Nordluft byggt två olika fullskaliga drönare med kapacitet att lyfta 30 kg. Den tredje designen var under framtagning och var den som bolaget planerade använda i demonstrationsspridningen. En rad brister upptäcktes dock senare vilket förlängde utvecklingsarbetet. Bilaga A visar en översikt över Nordlufts tidiga drönarkonstruktioner.

Den första konstruktionen var en mycket utrymmeskrävande octokopter som dessutom tog lång tid för montering ute i fält. Den andra designen var en quadcopter med fyra fällbara armar och elektriskt fällbara landningsställ. Den hade brister i motorinfästningen, var inte vattentålig och landningsställena var ej tillräckligt starka.

Den andra quadkoptervarianten var uppgraderad med vädersäkrad design och huvudplattor i sandwich-material för lägre vikt. Under våren 2020 upptäcktes bristande strukturell styvhet i flygkroppen och i motorfästena, vilket orsakade dåliga flygegenskaper. Vidare visade det sig att motorerna som hade använts till båda varianterna av quadcopters inte var tillförlitliga. Det visade det också att batterierna som användes inte längre var kapabla att ge tillräcklig effekt för längre flygningar med full last. Detta efter en rad incidenter, reparationer och felanalyser. Byte av motorer och batterilösning visade sig vara nödvändigt för att komma vidare.

Efter modifieringar fungerade drönaren bra. Designen var gjord för ett integrerat batteri monterat i en "låda" i kroppen. Ansvarig för batteriet var företaget Miuta Electric Company, Arnhem, Holland. Batteriet blev dock aldrig levererat och företaget gick under jord. För ökad flexibilitet kring batterilösningar bestämde sig då teamet hos Nordluft för att frånga det integrerade batteriet i nästa design. Istället placerades batteriutrymmet ovanpå huvudkroppen. Detta möjliggör även för central placering av flightcontroller (styrdator), vilket främjar goda flygegenskaper.

Designarbetet med version 4 startade under sommaren 2020 parallellt med testning och modifiering av version 3. Version 4 kom att bli den variant som bedömdes tillräckligt bra för att användas i demoprojekt. Den var vädertålig, hade säkra flygegenskaper och var relativt enkel att hantera på marken. Komponenter köptes in och i slutet av 2020 var 3 drönare monterade och testade.

Det kan nämnas att landningsställ i alla konstruktioner varit en större utmaning än vad bolagets ingenjörer trott. Det är önskvärt med en konstruktion som är lätt, kompakt, enkelt borttagbar för transport, elektriskt uppfällbar, samt ändå ska tåla en hård landning med full last. Många iterationer gick igenom innan bolaget bestämde sig för en enkel lösning med fyra lätt vinklade stela ben i kolfiber.

3.2 BATTERISYSTEM

Nordluft använde för sina första drönarprototyper batterier av typen litium-polymer för hobbybruk. Batterier är dyra och bolaget ville hålla nere kostnaden innan man bestämt sig för en mer långsiktig lösning. Nackdel med de batterierna var att de var små och att det därför krävdes 6 st av dem sammankopplade för kraftförsörjningen. Detta innebar extra tidsåtgång för inkoppling samt bortkoppling och vidare är livslängden på dessa batterier begränsad.

Därför beställdes i januari 2020 ett specialbyggt litium-jon provbatteri från ett holländskt företag, Miuta Electric Company. Batteriet betalades i förskott men levererades aldrig och företaget gick därefter under jord. Teamet spenderade många timmar på att försöka få tag på leverantören i Holland, och senare på att försöka hitta en alternativ lösning. Det visade sig svårt då utbudet av leverantörer villiga att sälja små serier specialbyggda litium-jon batterier för ett rimligt pris, var litet.

Det bestämdes att Nordluft i stället skulle köpa in ett cellblock, alltså en sammansättning av ihopsvetsade cylindriska litium-jon celler, och bygga själva batterihöljet in-house. Utbudet av leverantörer för cell-block var något bättre än för kompletta batterier.

Två olika batterier byggdes enligt denna princip och båda fungerade mycket bra. Litium-jon-typen av batterier har generellt högre energidensitet jämfört med litium-polymer, men har nackdelen av ett större spann i spänningsnivå mellan full laddning och urladdat. Detta kan dock justerade inställningar i drönarens flygelektronik kompensera för. Under hösten 2020 beslutades att bolaget skulle fortsätta med litium-jon-varianten. Det var dock fortsatt svårt att hitta leverantörer. De två leverantörerna av olika cellblock som användes för provbatterierna bedömdes vara för dyra för en komplett lösning till 3 drönare. Andra bolag var endast intresserade av större volymer. Det dröjde en bit in på 2021 innan kontrakt skrevs med ett företag i Göteborg för leverans av 10 st kompletta batteripack med hölje och aktiv kylning.

3.3 STYRSYSTEM

Under början av år 2020 övertog en inhyrd konsult det arbete som var påbörjat av en grupp utvecklare och studenter i Lund. Vissa delar av arkitektur och algoritmer kunde användas men det mesta ersattes med ny kod i språket python.

”Dronekit” är en kodplattform för utveckling av styrsekvenser till drönare genom relativt enkel programmering i python eller Android. Det är en hög-nivå lösning och är därför enkel att implementera. Initialt var detta det självklara valet för att bygga styrsystemet. Basfunktionen var på plats i maj 2020. Efter ytterligare testning och förberedelser för att implementera mer avancerade funktioner, upptäcktes att dronekit inte är underhållet (i takt med utvecklingen av annan mjukvara som kommunicerar med dronekit) och att tillgänglig dokumentation inte är komplett. Det gick alltså inte att använda utan en stor ”städinsats”.

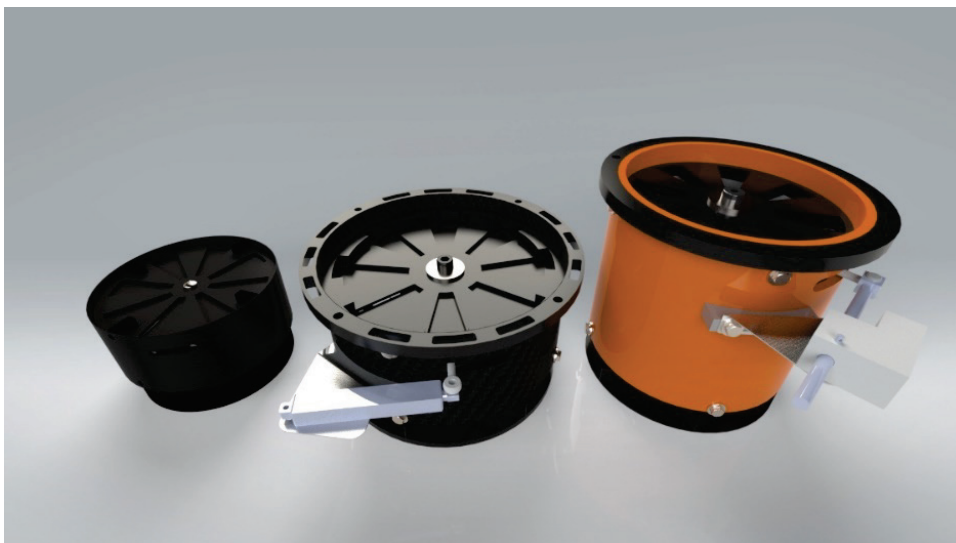
Bedömningen gjordes att bästa alternativet var att lämna dronekit och istället bygga systemet i ROS, ett programmeringsspråk för professionella robotsystem. Under sommarn 2020 byggdes systemet ut genom MAVROS för att kunna prata med MAVLINK, det normala kommunikationsinterfacet hos drönare. I simulering fungerade allt mycket bra. I verkliga flygtester tappas dess dock mängd data i den trådlösa länken, detta är något naturligt i sådana förbindelser. Det upptäcktes då att ROS och MAVROS inte kan hantera sådana dataförluster. Det upptäcktes också problem med hur ROS loggar data. Konsekvenser av dessa brister blev under testning på flygfältet tappade kommandon och långa väntetider.

Efter diskussion med ett antal experter konstaterades att ROS inte var en framkomlig väg för stora delar av systemet. Funktioner behövde lösas genom låg-nivå-programmering anpassad för trådlös kommunikation. Detta för att bygga ett robust system. Ändringar genomfördes under början av 2021.

Parallellt med utveckling av styrsystemet pågick en utveckling och utprovning av kommunikationslänk. Lösningar som prövades var utomhusanpassade wifi-modem, 3G modem, LoRa modem och radiolänk. Slutligen valdes ett system med enkla radiomodem baserade på en öppen låg frekvens.

3.4 SPRIDARMEKANISM

Drönarprototyp 1 och 2 var utrustade med spridare, men de användes mycket lite. Främst därför att bolagets ingenjörer hade fokus på andra tekniska utmaningar och förbättringsidéer. När spridaren på drönarprototyp 3 började genomgå mer omfattande tester, märktes det att konstruktionen inte var robust. Granuler fastnade i ventilmekanismen och orsakade att det elektroniska ställdonet brändes ut. Detta i kombination med att spridaren behövde vara lättviktig visade sig vara en utmaning. Figur 3 nedan visar CAD illustrationer över de första spridarmekanismerna, alla baserade på den ventilstängningsprincip som visade sig problematisk.



Figur 2. Tidigare spridarmekanismer

I samarbete med företaget Vännäs Verkstad AB togs en avancerad spridare fram. Den var tänkt att kunna fungera både för askåterföring och skogsgödsling. Den var byggd med två elmotorer och hade ingen ventil där granuler kunde fastna. En motor reglerade utmatning från lastbehållaren genom en roterande tallrik på vilken granulerna i lastbehållaren tryckte. Tallriken hade en hög kant över vilken granulerna tvingades vid rotation. När de tvingats över kanten föll de på en spridartallrik som drevs av en andra elmotor. Denna konstruktion fungerade bra och gav möjlighet att styra både mängden granuler och spridningsbredd individuellt. Nackdelen var dock att konstruktionen blev stor och tung samt att spridningskapaciteten var begränsad. Figurer nedan visar en första version.



Figur 3. Avancerad spridarmekanism monterad på lastbehållare.



Figur 4. CAD illustration över avancerad spridarmekanism.

Då projektet redan var försenat av andra skäl valde teamet att använda erfarenheterna från de olika konstruktionerna för att bygga en enkel spridare anpassad endast för askgranuler. Denna utgjordes av en tallrik med höga kanter och en trång spalt. När tallriken stod still låser friktionen flödet från lastbehållaren. När en motor roterar tallriken tvingas granuler upp över tallrikens kant och ned på ett brätte sammansatt med tallriken. De ges genom det viss spridningsbana. Konstruktionen blev lyckad men ökat flöde hade varit önskvärt.

4 Resultat

Efter flertalet förseningar på grund av tekniken, leveransproblem och coronapandemin kunde demonstrationsspridningen äntligen planeras den 1a december 2021. Genom samarbete med Stockholm Exergi och Svensk Skogsgödsling säkrades material att sprida och en lämplig spridningsplats.

Fastighetsägare Mats Ruhne tillät spridning i en skogbeksädd slänt ned mot Södertälje kanal, söder om området vid Hall. Nordluft hade dagen innan förberett genom att transportera dit 300 kg granulerad aska paketerad i 15 kg enheter (mestadels hinkar). Askan kom från flisförbränning i Stockholm Exergis anläggning i Värtahamnen. Ursprungligen var idén att sprida en större mängd aska, uppåt 3 ton för att täcka 1 hektar skog. Kapaciteten och effektiviteten hos prototypsystemet gjorde dock detta onödigt tidskrävande vid demonstrationstillfället.

Till demonstrationen var följande parter inbjudna att delta som åskådare:

- Projektets referensgrupp i Askprogrammet
- Askprogrammets Helena Sellerholm
- Projektets samarbetspartner Stockholm Exergi
- Projektets samarbetspartner Svensk Skogsgödsling
- Robotdalen, en organisation som stöttat Nordluft sedan starten med resurser och rådgivning inom områdena robotik och automation.
- Media i form av tidningen BioEnergy International och Tidningen Skogen
- Aktörer från spridningsbranschen i form av Skogens Gödslings, Dala skogsvitalisering och Svensk Näringsåterföring.

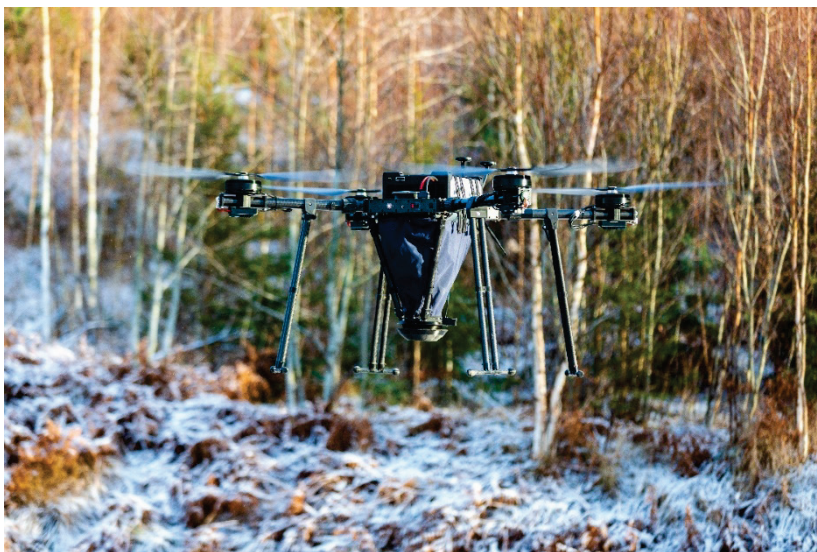
Nordluft Automation AB hade tre personer på plats.

Efter en viss fördröjning på grund av tekniska skäl kunde spridningen börja på förmiddagen runt kl 11. Tre drönare användes då för att i skytteltrafik sprida totalt 300 kg granulerad bioaska. Tidsåtgång för spridningen var 30 min. Nordlufts personal skötte under spridningen lastpåfyllning och batteribyten.

Spridningsdemonstrationen avslutades med gemensam lunch i Södertälje. Representanter från Robotdalen spelade in rörligt bildmaterial, vilket redigerades till en film som finns tillgänglig på videostreamingsplattformen Youtube samt Robotdalens hemsida. Följande figurer illustrerar spridningsdemonstrationen.

Bolaget anser att spridningsdemonstrationen var lyckad. Askspridning med drönare visades upp. En betydande mängd material spreds med hjälp av flera autonoma drönare.

Önskvärt hade varit en högre effektivitet i spridningen och bättre data över prestanda och spridningsprecision. Med projektets alla utmaningar och den begränsade resurstillgång som bolaget haft, ser bolaget att ett bättre resultat hade varit svåruppnåeligt. Det uppfyllde syftet att visa upp konceptet drönarbaserad askåterföring.



Figur 5. Drönare som startar. Fotograf Alan Sherrard.



Figur 6. Drönare som sprider. Fotograf Alan Sherrard



Figur 7. Grupp av drönare redo för take-off

5 Utvärdering av projektet

Projektet slutfördes med avsett resultat. Drönbaserad askåterföring har demonstrerats inför kunniga representanter från energisektor och spridningsbranschen. Rapportförfattaren menar att potentialen i tekniken kan erkännas. Dock återstår mycket utveckling innan den affärsmässiga nyttan kan kvantifieras och bekräftas. I detta skede har det handlat om att visa upp att grundkonceptet fungerar.

Genom projektet har ett av askprogrammets syften, det om att stödja resurseffektiva lösningar för askanvändning, uppfyllts. Detta gör att rapportförfattaren anser projektet i stort vara lyckat. En rad komplikationer medförde dock en betydande försening. Vid tillfället för ansökan var tidplanen att projektet skulle vara avrapporterat i november 2020 med en demonstrationsspridning under våren 2020. Detta kom att försenas med ett och ett halvt år.

Av förseningen kan flera lärdomar dras. Nordluft är ett ungt bolag med stora visioner. Sedan starten har dess ledning gång på gång missbedömt den tid och den resursåtgång som krävs för att nå ett visst tekniskt resultat. Projekt och tidplaner har formulerats med orimliga målsättningar. Detta är något som bolagets ledning varit medveten om och arbetat med, men bevisligen inte tillräckligt.

En rad tekniska komplikationer bidrog till förseningen. Vissa av dem hade bolagets ingenjörer kunnat förutse och hanterat bättre. Andra var mer av olyckliga omständigheter. Ett exempel på detta var bolagets beställning av batteri från företaget Miuta Electric Company. Detta var ett av få företag som levererade små serier av specialbyggda litiumbatterier för en rimlig kostnad. Företaget fick order på ett provbatteri, fick betalt i förskott, och meddelade i februari 2020 att leveransen var försenad. Det levererades dock aldrig något batteri och bolaget har inte svarat på kommunikation sedan augusti 2020. Osäkerheten kring batterilösning var orsak till en stor del av förseningen. Det dröjde till sommaren 2021 innan en godtagbar batterilösning för lastdrönarna var på plats.

Större höjd borde ha tagits i projektplaneringen för att tekniska utvecklingsaktiviteter tar tid. Detta skulle ha resulterat i en utvidgad tidplan för det aktuella projektet. Ett alternativ skulle kunna ha varit att minska omfattningen av projektet, exempelvis till att endast visa upp ett fungerande styrsystem med små icke-spridande drönare, eller att visa upp en enda spridningsdrönare optimerad för askåterföring men utan styrsystem.

Vid tiden för projektansökan såg dock resultaten lovande ut. Ansvariga ingenjörer för drönare och styrsystem var optimistiska om att ursprunglig tidplan kunde hållas. Därefter uppstod av rad olika problem som enskilt inte var så allvarliga, men som sammantaget innebar en betydande försening och fördröjning av i projektet.

Coronapandemin bidrog till förseningen på olika sätt. Den gjorde spridningsdemonstration olämplig under perioden mars 2020 till hösten 2021. Pandemin påverkade också utvecklingsarbetet hos Nordluft. Vissa i bolagets personal kände sig skyldiga att i perioder arbeta hemifrån, vilket minskade takten i framdriften. Efterhand skapades också förseningar genom komponentbrist.

6 Diskussion och fortsatt arbete

Efter ett utdraget men lyckat projekt fortsätter Nordluft att utveckla drönarsystemet. Flera milstolpar har nåtts men mycket arbete återstår innan drönarspridningens fulla potential kan erbjudas till kund på kommersiella villkor.

En stor utmaning på vägen till kommersialisering av tekniken är flygtillstånd. Bolaget hade fram till sista december 2021 ett flygtillstånd för obemannade luftfartyg kategori 5C. Tillståndet innebar att Nordluft fick använda sina stora lastbärande drönare på vissa specifika platser. Dessa platser har bolaget i god tid ansökt för, och Transportstyrelsen har genom handläggning godkänt dessa. En av platserna var spridningsområdet för det aktuella projektet. Principerna för detta tillstånd togs fram enligt den tidigare nationella lagstiftningen. Från och med 2022 gäller endast tillstånd enligt den nya EU-harmoniserade lagstiftningen.

Efter att ha blivit vägledda till, och efter att ha satsat betydande resurser på ansökningen för ett PDRA-G01 tillstånd enligt den EU-harmoniserade lagstiftningen under 2021, svarade Transportstyrelsen att detta tillstånd endast kan ges för specifika platser, alltså samma princip som för tidigare 5C tillstånd. Vid uppskalning av verksamheten med utveckling, testning, demoprojekt och tidig kommersiell spridning behövs en stor flexibilitet kring områden. Lösningen för att komma förbi detta är ett flygtillstånd enligt kategori LUC, som ger stor handlingsfrihet under ansvar. Arbetet, dokumentationen och ansökningsavgiften som krävs för att säkra ett sådant tillstånd är dock mycket omfattande och inget som Nordluft i dagsläget klarar av. Därför togs ett strategiskt beslut under hösten 2021 om att tillfälligt övergå till en mindre spridningsdrönare med maximal vikt av 25 kg. Sådana drönare kräver inget specialtillstånd.

Under första halvåret 2022 har företaget arbetat med produktion av en grupp av den mindre drönaren. Svärmspridning med den drönaren beräknas börja i månadsskiftet juni/juli 2022. En mindre drönare innebär mindre lastkapacitet och därigenom mindre totalkapacitet för ett helt spridarsystem. Med den mindre drönaren blir utmaningarna med att nå kommersiellt konkurrenskraftig prestanda därför större, speciellt inom askåterföring där det är en stor mängd material som ska spridas.

Det finns dock en rad andra aspekter/komponenter i spridarsystemet som på kort sikt har stor betydelse för effektivitet och totalkapacitet, och som bolaget avser att vidareutveckla. B.l.a:

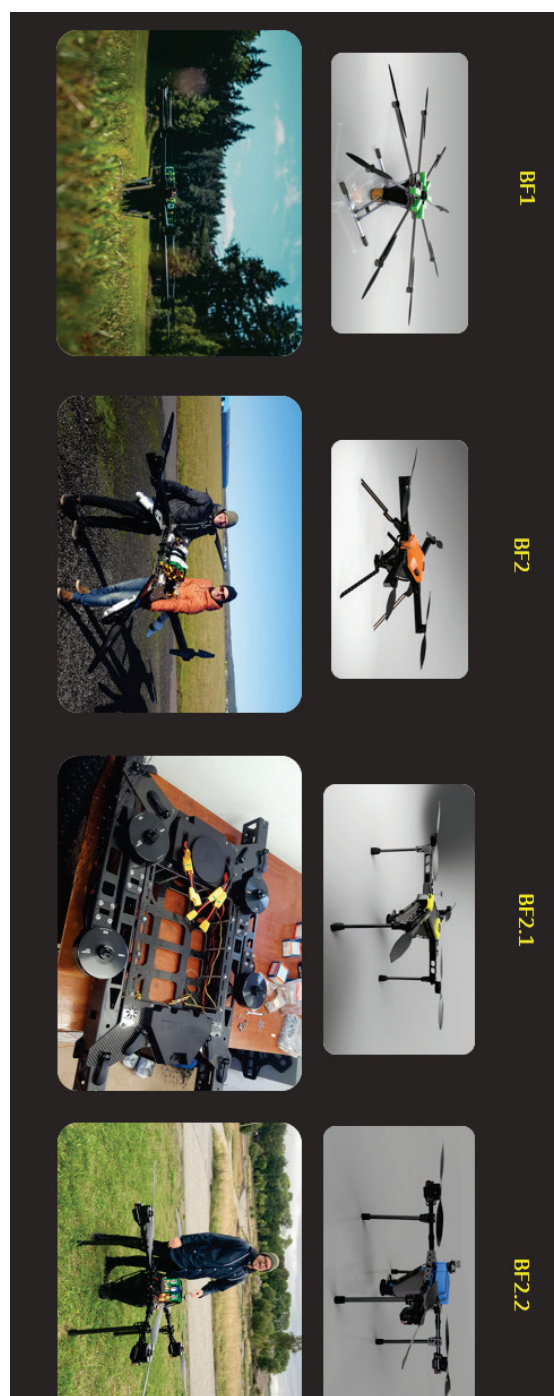
- Intrimning av flygdatorns inställningar (tuning) för att uppnå högre säkra flyghastigheter under ett spridningsuppdrags alla delar.
- Optimering av svärmkoordineringen, så att drönarna i systemet köar kortare tid.
- En spridningsmekanism som släpper ut materialet med gravitation, snarare än aktiv spridning med roterande tallrik. Detta för snabbare tömningstider. Spridningsbredden kommer att bli mindre men kan kompenseras av högre flyghastighet under spridning.
- Fler drönare som opererar i systemet.

- Sensorsystem för terrängavläsning så att drönarna kan flyga och sprida närmre marken utan att kollidera med träd och andra hinder. Detta skulle minska de säkerhetsavstånd som behövs i flygplaneringen och därmed höja effektiviteten.
- Semimanuell påfyllningsmekanism för att göra lastpåfyllningar i drönarna snabbare och mer ergonomiska.
- Slutligen den kompletta fordonsbaserade basstationen med påbyggd påfyllningsmekanism, lastbehållare, kran för extern lasthantering, laddningslösning för drönarbatterier samt förvaringslösning för drönare och batterier.

När implementationen av ovanstående punkter är genomförd, helt eller delvis, kommer effektivitet och kapacitet ha ökat mångdubbelt mot idag. I det läget har förhoppningsvis bolaget en helt annan stabilitet och resursbas. Då är övergången till en större drönare med kapacitet på 30 kg eller mer samt LUC tillstånd ett genomförbart steg för att nå ytterligare höjning av kapacitet och effektivitet.

Avseende applikationen askåterföring är det svårt att säga vilka av ovanstående utvecklingsinsatser som behöver genomföras för att systemet ska bli kommersiellt intressant. I ett första steg kommer med stor sannolikhet drönarspridning bli ett alternativ där det inte finns förutsättningar för andra spridningsmetoder, exempelvis där markbärigheten inte tillåter spridning med markgående maskiner. Målsättningen om ett fullt utvecklat system med kapacitet på 6 ton i timmen kvarstår dock. Hur snabbt det nås styrs till stor del av hur framgångsrikt bolaget är när det kommer till säkring av utvecklingskapital samt att hitta kunniga medarbetare.

7 Bilaga A



Figur 8. Översikt Nordluft första drönarkonstruktioner

DRÖNARBASERAD ASKÅTERFÖRING

Återföring av träaskor till skog och mark har långsiktigt goda effekter på tillväxten i skogen och motverkar markförurning. Skogsstyrelsen rekommenderar åtgärden där grot tas ut. Askåterföring begränsas dock kraftigt av dyr logistik för spridningen i skogen.

Spridning med hjälp av större autonoma drönare i grupp har i det här projekt demonstrerats med goda resultat. Metoden gör spridningen flexibel och oberoende av markförhållanden. Mycket utvecklingsarbete återstår dock innan metoden är kommersiellt gångbar.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk