

# Drohneneinsatz in der Forstwirtschaft



## Bearbeitung:

- Christian Thiel, Steffen Dietenberger, DLR - Institut für Datenwissenschaften
- Maximilian Johenneken – H-BRS – Institut für Technik, Ressourcenschonung und Energieeffizienz (TREE)
- Ahmad Drak – H-BRS – TREE Institute
- Christin Carl - Landesbetrieb Wald und Holz Nordrhein-Westfalen
- Richard Georgi – OGF mbH
- Andrea Hauck - KWF e.V.

## Stand 11/2023

## Inhalt

1	Einleitung .....	2
2	Begriffsbestimmungen.....	3
3	Rechtliche Grundlagen für den Drohneneinsatz in der Forstwirtschaft (OGF mbH, H-BRS) .....	5
4	Praxiseinsatz.....	8
4.1	Datenerhebung für Information und Planung, Controlling .....	8
4.1.1	Forsteinrichtung (OGF mbH).....	8
4.1.2	Waldinventur (DLR Jena).....	8
4.1.3	Daten für die Holzernte/Bestandsdaten (H-BRS).....	9
4.1.4	Pflege/sonstige Maßnahmen.....	10
4.1.5	Wegezustandserfassung .....	10
4.1.6	Waldbrandmonitoring .....	10
4.1.7	Standortsanalyse (Semantische Bestimmung des Waldbodens) (H-BRS) .....	11
4.1.8	Schadensdokumentationen (H-BRS), Risikoanalyse (Wald und Holz NRW) .....	11
4.1.9	Wiederbewaldungsplanung (Wald und Holz NRW) .....	12
4.2	Operativer Bereich.....	12
4.2.1	Verjüngung von Beständen (Lokalisierung von Saat-/Pflanzplätzen, Saat) .....	12
4.2.2	Pflanzung und Saatgut- bzw. Pflanzentransport, Monitoring des Anwuchses (H-BRS) .....	13
4.2.3	Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln, Verbisschutz .....	15
4.2.4	Gewinnung von Proben aus dem Kronenraum.....	16
4.2.5	Waldbrandbekämpfung .....	16
4.2.6	Wildtiermanagement (OGF).....	16
4.2.7	Borkenkäfermonitoring (OGF) .....	16
4.2.8	Polter- und Schüttgutvermessung .....	17
4.3	Forschung, Prototypenstatus (H-BRS).....	17
4.3.1	Vogelperspektive, neue Daten und –Datenkombinationen (Wald und Holz NRW) .....	17
4.3.2	Forschungsprojekte.....	17

## 1 Einleitung

Die Anwendungen von Drohnen in der Forstwirtschaft sind sehr vielseitig. Bisher wurden sie vor allem bei der Datenerhebung für Information, Planung und Controlling eingesetzt. Der Einsatz unbemannter Luftfahrzeuge (UAV) ermöglicht die Inventur und Überwachung forstwirtschaftlich genutzter Flächen in bisher nicht bekannter Genauigkeit und deutlich erweitertem Umfang. Auch im operativen Bereich gibt es vielfältige Einsatzgebiete, in denen die Nutzung von Drohnen Arbeitsprozesse erleichtern oder sogar erst ermöglichen kann.

Der erfolgreiche Einsatz in der Forstwirtschaft hängt von den Eigenschaften der UAV ab, wie z.B. deren Ausstattung, die Flexibilität in der Einsatzplanung und Zuverlässigkeit, aber auch die verhältnismäßig geringen Kosten gegenüber anderen Verfahren.

### Motivation des Drohneneinsatzes in der Forstwirtschaft (DLR Jena)

Die Bedeutung einer genauen und umfassenden Datengrundlage wird in Zukunft zunehmen und die Relevanz von kostengünstigen und schnellen Verfahren zur Datenerhebung – wie sie per Drohne realisiert werden kann – steigt, was auf mehrere Faktoren zurückzuführen ist:

- a. Die Forstwirtschaft ist von Personalmangel betroffen, z.T. aufgrund mangelnder Finanzierung wie auch durch fehlende Nachwuchskräfte. Das bedeutet, die zu leistende Arbeit muss zukünftig von weniger Personal bewerkstelligt werden, wodurch die Einführung neuer Datenerhebungsverfahren unumgänglich wird.
- b. Klimabedingte Schadereignisse haben in den vergangenen Jahren zu Kalamitäten in ganz Deutschland geführt, sei es durch Sturmereignisse, Trockenheit, Waldbrände oder Insektenbefall. Dies führt zu einer dynamischeren Waldentwicklung, als dies zuvor der Fall war. Einige Ereignisse erfordern zudem ein schnelles Handeln seitens der Forstbetriebe. Da davon auszugehen ist, dass dies aufgrund des Klimawandels zunehmen wird, ist für eine sinnvolle Planung und zielgenaues Handeln eine genauere Datenquelle notwendig.
- c. Die Forstwirtschaft befindet sich bereits seit einiger Zeit im Umbau weg von reinen Monokulturbeständen hin zu mehr Mischwaldflächen. Datenerhebungen per Stichpunktverfahren, wie sie bisher angewandt werden, liefern in heterogenen Beständen allerdings meist nur sehr ungenaue Näherungen.
- d. Zunehmend wird auch in der Forstwirtschaft eine Digitalisierungsstrategie verfolgt, dies erfordert die Entwicklung von auf die Spezifika der Forstwirtschaft angepassten digitalen Verfahren.

## 2 Begriffsbestimmungen

Nachfolgend sind einige wichtige Begriffe, welche in diesem Dokument häufig verwendet sind, kurz erläutert. Die Definitionen stammen von der Seite der Droniq GmbH (<https://droniq.de/glossar/>). Dort finden sich auch weitere Begriffe, die nachfolgend nicht aufgeführt sind. Andere Quellen sind explizit ausgewiesen.

### UAV

Ein unbemanntes Luftfahrzeug (englisch Unmanned Aerial Vehicle, UAV) sowie die Ausrüstung für dessen Fernsteuerung. Synonyme: UAV, unbemanntes Luftfahrtsystem, Unbemanntes Fluggerät, Flugmodell.

### Payload

Instrumente, Mechanismen, Ausrüstungen, Teile, Geräte, Zubehörteile oder Zusatzteile, einschließlich Kommunikationsausrüstungen, die in das Luftfahrzeug eingebaut bzw. an diesem angebracht sind und nicht dazu verwendet werden oder verwendet werden sollen, das Luftfahrzeug im Flug zu betreiben oder zu steuern, ohne jedoch Teil des Flugwerks, eines Motors oder eines Propellers zu sein. Synonym: Nutzlast

### Drohnentypen

**Multikopter** werden all die Modelle benannt, die mehr als zwei Rotoren haben, welche waagrecht angeordnet sind. Der Quadrocopter ist die wohl bekannteste Bauform. Diese Drohnenform hat vier Propeller und Motoren, die waagrecht angeordnet sind. Diese sind die forstlich am meisten genutzten Typen.

**Starrflügler**, auch Fixed Wing Drohnen, erinnern von ihrem Aufbau her sehr stark an Flugzeuge. Sie besitzen eine Tragfläche und einen Motor mit Propeller, wodurch die Drohne in Vorschub versetzt wird.

**VTOL-Drohnen** (Vertical Take-Off and Landing) sind eine Hybridform zwischen den oben genannten Starrflüglern und Multikoptern, die die Vorteile beider Kategorien miteinander verbinden sollen. Dabei startet und landet eine VTOL-Drohne ähnlich einem Multikopter senkrecht und wechselt, sobald eine Mindesthöhe erreicht ist, in den Horizontalflug. Forstlich sind diese (im Moment) nicht von Bedeutung.

### LiDAR

LiDAR (Abkürzung für englisch Light detection and ranging oder Light imaging, detection and ranging), auch Ladar (Light amplification by Stimulated Emission of Radiation detection and ranging), ist eine dem Radar verwandte Methode zur optischen Abstands- und Geschwindigkeitsmessung sowie zur Fernmessung (Wikipedia).

### Multispektral

Als multispektrale Bilddaten werden in der Fernerkundung Datensätze bezeichnet, die aus mehreren Spektralkanälen zusammengesetzt sind. Die Aufnahme erfolgt mit sogenannten Multispektralkameras. (Wikipedia)

### Hyperspektral

Unter hyperspektraler Spektroradiometrie versteht man in der Fernerkundung ein Sensorsystem, das elektromagnetische Signale von sehr vielen, eng beieinanderliegenden Wellenlängen aufzeichnen

kann. Abhängig vom eingesetzten Sensor werden Wellenlängen von 350 nm bis 2500 nm mit spektralen Auflösungen von 3 nm bis 10 nm aufgezeichnet. (Wikipedia)

### **RTK**

Die Echtzeitkinematik (englisch Real Time Kinematic, RTK) ist in der Geodäsie ein Verfahren zur präzisen Bestimmung von Positionskoordinaten mit Methoden der Satellitennavigation. Es wird zum Aufmessen oder Abstecken von Punkten mit Hilfe satellitengestützter Navigationssysteme wie GPS, GLONASS, Beidou oder Galileo verwendet. (Wikipedia)

### **VLOS**

Eine UAS-Betriebsart, bei der der Fernpilot in der Lage ist, einen ununterbrochenen und nicht unterstützten Sichtkontakt mit dem unbemannten Luftfahrzeug aufrechtzuerhalten, sodass er dessen Flugweg so steuern kann, dass Kollisionen mit anderen Luftfahrzeugen, Menschen und Hindernissen vermieden werden.

### **BVLOS**

Der Begriff steht für „beyond visual line of sight“. Bezeichnet den Drohnenbetrieb außerhalb der Sichtweite des Fernpiloten. Für entsprechende Operationen brauchen private und gewerbliche Anwender eine Sondergenehmigung der zuständigen Luftfahrtbehörde. Davon ausgenommen sind BOS-Kräfte. Sie sind im Einsatzfall von entsprechenden Auflagen befreit.

### **U-Space**

Ein U-Space ist ein Luftraumelement für den Einsatz unbemannter Flugobjekte. Der U-Space Airspace ist dabei sowohl mit Blick auf seine maximale Höhe als auch hinsichtlich seiner geographischen Ausdehnung klar vom restlichen Luftraum abgegrenzt. In dem U-Space gibt es klare Organisationsstrukturen und Abläufe, die die einzelnen Drohnenflüge managen (z. B. die An- und Abmeldung einzelner Flüge, die Planung von Flugrouten etc.) und die gleichzeitig dafür sorgen, dass diese sicher ablaufen. Darüber hinaus sorgen diese für eine sichere und reibungslose Interaktion mit dem bemannten Flugverkehr.

### **3 Rechtliche Grundlagen für den Drohneneinsatz in der Forstwirtschaft (OGF mbH, H-BRS)**

Die rechtliche Grundlage für den Betrieb von unbemannten Luftfahrzeugen ist die EU Drohnenverordnung (EU) 2019/947, die insbesondere durch den §21 LuftVO in nationales Recht überführt wird. Für eine umfassende Beschäftigung sei auf diese Verordnung verwiesen. Grundsätzlich kann bei Drohnenflügen zwischen den erlaubnisfreien (offene Kategorie) und erlaubnispflichtigen (spezielle Kategorie) unterschieden werden. Einer Aufstiegsgenehmigung bedarf es seit der Einführung der neuen EU-Drohnenverordnung nicht mehr. Lediglich die Genehmigung des Flächeneigentümers, auf dem das UAV starten und landen soll, ist notwendig.

Auch das Führen eines Flugbuches ist in Deutschland keine Pflicht. Erst der Betrieb des UAV außerhalb der offenen Kategorie kann dazu führen, dass in den Nebenbestimmungen die Protokollierung der Flüge festgelegt ist. Die Form ist dabei nicht vorgeschrieben. Neben dem klassischen Flugbuch gibt es auch Dienste, die eine Protokollierung auf Grundlage der von der Drohne erzeugten Daten weitgehend automatisch erstellen. Ein Betrieb in der speziellen Kategorie erhöht die Pflicht zur Protokollierung vieler Parameter (Flüge, Wartung, Weiterbildung etc.) ohnehin sehr stark.

Für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge aller Betriebskategorien ist eine Haftpflichtversicherung abzuschließen und nachzuweisen, die im Falle eines Unfalls Personen- und Sachschäden abdeckt. Des Weiteren müssen sich Organisationen, die gewerbliche Drohnen betreiben, beim Luftfahrtbundesamt registrieren. Nach erfolgter Registrierung erhält man eine Betreiber-ID. Diese ist an der Drohne anzubringen.

In der offenen Kategorie sind Flüge unter Einhaltung aller vorgegebenen Rahmenbedingungen jederzeit möglich. Es gibt drei Unterkategorien innerhalb der offenen Kategorie: A1, A2, A3. Grob gilt für A1: Flug über einzelnen unbeteiligten Personen, A2: bis 30 m an unbeteiligten Personen und A3: bis 150 m an Wohn-/Gewerbe-/Industrie- und Erholungsgebieten und mit großem Abstand zu unbeteiligten Personen. Die Kategorie A3 ist für die Forstwirtschaft besonders relevant, da Wald üblicherweise abseits von bewohnten Gebieten ist. In dieser Kategorie dürfen Drohnen mit einem maximalen Abfluggewicht von 25 kg geflogen werden.

Der Betrieb von Drohnen in den Kategorien A1 und A3 setzen voraus, dass Piloten im Besitz des A1/A3 Drohnenführerscheins sind. Dieser kann im Onlineportal des Luftfahrt-Bundesamtes (LBA) absolviert werden. Der Drohnenführerschein ist immer mitzuführen und auf Verlangen vorzuzeigen.

Beim Betrieb in der Kategorie A2, also in der Nähe von Menschen, werden höhere Anforderungen an die Kenntnisse des Piloten gestellt. Hierzu gibt es den A2 Drohnenführerschein, der von einer vom LBA lizenzierten Prüfstelle ausgestellt wird. Es gibt verschiedene Anbieter, die die Vorbereitung und Prüfung für den A2 Drohnenführerschein übernehmen. Für die spezielle Kategorie (Specific) gibt es keinen gesonderten Führerschein, hier werden die Voraussetzungen an die am Flug beteiligten Personen sowie Wartungspersonal durch das Betriebshandbuch geregelt, welches mit dem Antrag auf Betriebsgenehmigung eingereicht und geprüft wird. Es kann dort z.B. gefordert werden, dass Piloten auf dem Kenntnisstand eines A2 Piloten sein müssen.

Für Flüge, bei denen die Vorgaben der offenen Kategorie nicht eingehalten werden können, muss eine flächenspezifische Genehmigung eingeholt werden. Dies erfolgt in der Regel über eine sogenannte Betriebsgenehmigung oder den Betrieb in einem Standardszenario. In der speziellen Kategorie ist der Betrieb von Drohnen in fast allen Bereichen möglich, muss aber für jede Fläche separat beantragt werden. Für die Betriebsgenehmigungen sind je nach Bundesland das Luftfahrt-Bundesamt (LBA) oder die jeweils zuständige Landesluftfahrtbehörde zuständig. Ist die Art des Betriebs im Rahmen eines sog.

Standardszenarios (STS) möglich, so ist mit einem einfacheren Antragsverfahren zu rechnen. Es ist dabei zu beachten, dass die Antragstellung und Genehmigung zum Betrieb in der speziellen Kategorie aufgrund der hohen Anzahl an Anträgen einige Wochen oder gar Monate an Vorlauf benötigt.

Da eine Beantragung mit einem nicht unerheblichen Aufwand und damit Kosten und Personalressourcen verbunden ist, kommt dieses Procedere zumeist nur für größere gewerbliche Anwender in Frage. Daher wird nachfolgend nur auf Rahmenbedingungen für den Betrieb in der offenen Kategorie eingegangen und dabei vor allem auf die für Forstwirtschaft relevanten Parameter.

Da viele forstliche Anwendungen die Befliegung großer Flächen erfordern, führt vor allem eine Einschränkung dazu, dass ein Flug in der offenen Kategorie nicht rechtssicher möglich ist: der Flug innerhalb der Sicht (Visual Line Of Sight = VLOS). Die Grenze zwischen dem Sichtflug (VLOS) und Flug außerhalb der Sicht (EVLOS, BVLOS) wird dabei rechnerisch ermittelt und hängt von der maximalen Größe der genutzten Drohne inkl. Propeller (ALOS-Grenze) und der aktuellen Sicht (DLOS-Grenze) ab. Die Berechnung der ALOS-Grenze aufgrund der Dimension der Drohne (Characteristic Dimension = CD) wird wie folgt berechnet.

Drehflügler und Multikopter:  $ALOS_{max} = 327 \times CD + 20 \text{ m}$

Flächenflieger:  $ALOS_{max} = 490 \times CD + 30 \text{ m}$

Bei einer Größe von 1 m (z.B. DJI M30T) liegt die Sichtfluggrenze damit bei gerade einmal 347 m. Für weitere Informationen zu der Thematik wird auf den "Leitfaden zur Dimensionierung von Flight Geography, Contingency Volumen und Ground Risk Buffer" des Luftfahrtbundesamtes, Kapitel 7 verwiesen.

Ein weiterer Aspekt, der die Leistungsfähigkeit der Drohnensysteme einschränken kann, ist die Flughöhe. In der offenen Kategorie darf diese eine Höhe von 120 m über Grund nicht überschreiten. Besonders bei großen Flächen schränkt diese Flughöhe die Flächenleistung der UAV ein und erhöht damit unter Umständen die Kosten der Befliegung.

Einen hohen Aufwand kann auch die Beachtung sogenannter geografischer Zonen gemäß §21h LuftVO darstellen. Eine Befreiung von den in §21h genannten Verboten kann durch unterschiedliche Ansprechpartner erfolgen. Dies kann bei größeren Flächen dazu führen, dass eine Vielzahl an Betreibern/Stellen vor einem Flug kontaktiert werden muss. Zu nennen ist hierbei vor allem die zuständige Naturschutzbehörde bei geplanten Flügen über Naturschutz-, FFH- und SPA-Gebieten sowie in Nationalparks (§ 21h (2) Nr. 6). Diese hat zu prüfen, welche naturschutzfachlichen Aspekte dem Drohnenflug für die zu befliegenden Flächen entgegenstehen und hat zwischen dem öffentlichen Interesse des Drohnenflugs und des Naturschutzes abzuwägen. Hier spielen insbesondere die Flug- und Brutzeiten von Vögeln eine Rolle.

Die Definition von geografischen Gebieten auf EU-Ebene, die Ausgestaltung dieser auf nationaler Ebene und die Genehmigung durch die Vielzahl an zuständigen Behörden auf kommunaler Ebene führt zum einen zu einem erhöhten Aufkommen von Anfragen bei den Behörden. Zum anderen ist es auch für die Betreiber von Drohnen schwieriger, effizient Drohnenflüge zu planen und durchzuführen. Wie genau der Einsatz von Drohnen Vogelpopulationen im Forst, insbesondere in geschützten Gebieten beeinflusst, ist noch nicht ausreichend untersucht. In der Fachliteratur ist umstritten, welches Störpotential Drohnen haben. In einer vom Deutschen Modellflieger Verband e.V. (DMFV) beauftragten Studie wurde der Einfluss von Flugbetrieb auf Modellfluggeländen auf Vogelpopulationen untersucht. Es wurde festgestellt, dass es keinen signifikanten Einfluss auf die Vogelpopulation an Modellfluggeländen im Vergleich zu Referenzflächen gibt. Die Studienergebnisse

lassen sich nur bedingt auf den Einsatz von Drohnen für die Forstwirtschaft beziehen, da sich durch die Regelmäßigkeit des Flugbetriebs womöglich ein Gewöhnungseffekt einstellt und Brutvogelpopulationen in der Normallandschaft untersucht wurden. Es wäre also von Nöten, den Einfluss von Drohnen auf im Wald vorkommende Arten zu untersuchen und das Störungspotential mit den herkömmlichen Herangehensweisen zu vergleichen (z.B. Einsatz von Menschen und Maschinen am Boden).

Im DIPUL-Portal des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr können die in Deutschland vorhandenen Geozonen eingesehen werden: <https://dipul.de/homepage/en/>. Auf dieser Seite finden sich auch weitere umfangreiche Informationen zum Betrieb von UAV in Geografischen Gebieten und zum rechtssicheren Betrieb im Allgemeinen.



## 4 Praxiseinsatz

### 4.1 Datenerhebung für Information und Planung, Controlling

#### 4.1.1 Forsteinrichtung (OGF mbH)

Die periodische Waldinventur stellt noch immer ein wesentliches Instrument in der Steuerung und Ausgestaltung der zukünftigen Bewirtschaftung unserer Wälder dar. Üblicherweise werden derartige bestandesweisen oder stichprobenbasierten Inventurverfahren meist in einem 10-jährigen Turnus durchgeführt. Die klimabedingten Waldschäden der vergangenen Jahre sowie die nachwachsenden strukturreichen Bestände bringen klassische Inventurverfahren dabei zunehmend an ihre Grenzen – zeitlich wie methodisch. Abhilfe können moderne digitale Inventurverfahren schaffen. In den vergangenen Jahren haben sich die Möglichkeiten bei der Erfassung eines digitalen Zwillings des Waldes stark vereinfacht. Durch die Verfügbarkeit geeigneter Algorithmen funktioniert auch die Ableitung vieler relevanter Inventurparameter aus dem digitalen Abbild immer einfacher und zuverlässiger. Am Beispiel von hochaufgelösten Drohnendaten wird vorgestellt, welche Parameter sich bereits heute bei der Durchführung von Waldinventuren in der Praxis mit hoher Genauigkeit und Zuverlässigkeit aus den digitalen Daten ableiten lassen und wie diese in der forstlichen Inventurpraxis genutzt werden können. Insbesondere die Höhe der Einzelbäume inkl. der Ableitung relevanter Berechnungen (Oberhöhe, Mittelhöhe) funktioniert sehr zuverlässig. Es existieren derzeit aber auch noch Hürden, welche die Ableitung weiterer wesentlicher Parameter aus den Daten erschweren oder verhindern. Ein entscheidender Parameter ist dabei die zuverlässige Erkennung der Baumart. Diese muss weitgehend unabhängig von der Jahreszeit sowie weiteren Einflussfaktoren funktionieren, um in der Praxis standardmäßig zum Einsatz kommen zu können. Eine große Herausforderung sind auch sehr strukturreiche Bestände. Hier müssen die Algorithmen in den kommenden Jahren weiterentwickelt und optimiert werden, um eine ausreichend exakte Einzelbaumerkennung zu ermöglichen. Ungeachtet dessen bietet der Einsatz des digitalen Zwillings schon heute enorme Rationalisierungseffekte und kann gleichzeitig die Qualität der erhobenen Daten erhöhen.

Über diese Ausführungen aus Sicht der Praxis hinaus gehende Überlegungen sind im nachfolgenden Unterkapitel (4.1.2) dargestellt.

#### 4.1.2 Waldinventur (DLR Jena)

Waldparameter werden in Deutschland in regelmäßigen Abständen in Forstinventuren erhoben. Die Art der Datenaufnahme, zu erhebende Parameter und Turnus der Inventuren sind durch Bund und Bundesländer gesetzlich geregelt. Für eine nachhaltige Bewirtschaftung des Waldbestandes ist ab einer bestimmten Waldgröße die sog. Forsteinrichtung verpflichtend durchzuführen. Dies betrifft Staats- und Privatwald gleichermaßen. Die Forsteinrichtung besteht aus der Aufnahme wichtiger Waldparameter und einem Betriebsplan für die nächsten Jahre, welcher auf den erhobenen Daten basiert. Die Datengrundlage bietet somit die Basis der forstlichen Planung und wirtschaftlichen Ausrichtung, wie z.B. die Bestimmung der Entnahmemenge an Holz, und ist deshalb von zentraler Bedeutung für die Forstbetriebe. Zusätzlich zur Forsteinrichtung werden Waldparameter auch großräumig im Zuge der Bundeswaldinventuren erhoben.

Die Verwendung von Drohnen ermöglicht die Ableitung wichtiger Forstparameter auf Einzelbaumebene, die auch manuell in Waldinventuren erhoben werden. Zu den Parametern gehören unter anderem die Baumhöhe, Stammfußposition, Stammdurchmesser in Brusthöhe (BHD), Totholz, Holzeinschlag, Kronenausmaße und Lücken im Kronendach. Durch die Kombination von BHD und Baumhöhe kann zusätzlich der Holzvorrat als Wertstoff und der gebundene Kohlenstoff ermittelt werden.

Während der Datenerhebung erfasst die Drohne Daten des jeweiligen Waldbestands, dabei können je nach Anwendungsziel sowohl RGB-Kameras, Multispektralkameras oder Light Detection and Ranging-Sensoren (LiDAR) eingesetzt werden. Die Verwendung von optischen Systemen stellt dabei eine kostengünstige und einfach anzuwendende Möglichkeit der Datenerhebung dar. Abhängig vom abzuleitenden Waldprodukt werden Aufnahmen während des Winter- oder Sommerhalbjahres gemacht. Unterschiedliche Flug- und Kameraeinstellungen können verwendet und kombiniert werden, um ein möglichst komplettes digitales Abbild des Waldbestands mit seinen unterschiedlichen Bestandteilen zu generieren. Aus der erhobenen optischen Datengrundlage werden mithilfe von Structure-from-Motion (SfM) unterschiedliche Datenprodukte erstellt, wie 3D-Punktwolken, Orthomosaik und Höhenmodelle. Die Daten können relief-normalisiert werden und sich auf Teilbereiche des Waldes konzentrieren, so kann z.B. eine detaillierte Punktwolke nur des Waldbodens oder der Baumstämme erzeugt werden. Diese Produkte bilden die Grundlage für die Ableitung der Waldparameter. Hierfür steht eine große Bandbreite an Algorithmen zur Verfügung, welche sowohl die geometrischen als auch spektralen Eigenschaften nutzen können, um hieraus automatisiert Parameter auf Einzelbaumebene auszugeben. Diese Algorithmen können u.a. aus dem Bereich der objekt-orientierten Bildanalyse oder des maschinellen Lernens (z.B. Convolutional Neural Networks) kommen.

Zur Datengewinnung auf anderen Skalenebenen können per Drohnen Daten Modelle trainiert werden, die basierend auf Satellitendaten großflächig Waldparameter ableiten können. Hierbei werden die Ergebnisse zu bestimmten Waldparametern, welche mithilfe von UAV-basierten Verfahren abgeleitet wurden, mit Satellitendaten, z.B. mit Vegetationsindices, korreliert. Dadurch können Modelle aufgestellt werden, welche großflächig Waldparameter bestimmen. Durch dieses „Upscaling“ von Drohnen Daten können diese eine Brücke zwischen manuell erhobenen Ground-Truth-Daten und Satellitendaten bilden.

#### 4.1.3 Daten für die Holzernte/Bestandsdaten (H-BRS)

In der modernen Forstwirtschaft ist die Digitalisierung ein Schlüsselbegriff, der immer mehr an Bedeutung gewinnt. Insbesondere der "Digitale Zwilling" hat das Potenzial, die Art und Weise, wie Wälder bewirtschaftet und geschützt werden, grundlegend zu verändern. Ein Digitaler Zwilling ist eine virtuelle Repräsentation eines physischen Objekts oder Systems. In Bezug auf die Forstwirtschaft bedeutet dies eine digitale Darstellung des Waldes oder eines Einzelbaums, die auf Daten basiert.

Drohnen bieten eine bisher unerreichte Möglichkeit zur Datenerhebung in der Forstwirtschaft. Sie können große Flächen in kurzer Zeit abdecken und dabei hochauflösende Bilder und andere Daten liefern. Diese Daten allein sind jedoch nur so wertvoll wie die Analysen und Erkenntnisse, die daraus gewonnen werden können. Hier kommt der digitale Zwilling ins Spiel. Durch die Integration der von Drohnen gesammelten Daten in einen digitalen Zwilling können Forstbetriebe eine genaue, dreidimensionale Nachbildung eines Waldes erhalten. Da die Daten der Drohnen einen Positionsbezug haben, lassen sich diese Objekte genau im Wald verorten und sind wiederauffindbar. Dies ermöglicht eine detaillierte Betrachtung jedes einzelnen Baumes, von Gruppen und des Bestands.

Die Vorteile eines solchen Systems sind vielfältig. Zum einen ermöglicht es eine präzise Überwachung und Verwaltung des Waldes in all seinen Aspekten. Beispielsweise können Schäden durch Stürme, Schädlinge oder Krankheiten schnell erkannt und lokalisiert werden. Weitere Anwendungsfälle werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

Besondere Relevanz erlangt der Digitale Zwilling des Waldes auch in Zeiten des Klimawandels, in denen mit einer höheren Standortdynamik und häufigerem Auftreten von Störungen des Waldökosystems zu rechnen ist. Die gesammelten Informationen über den Wald eignen sich zur

Modellbildung und Prognose z.B. des Waldwachstums, ökologischer Vielfalt und des Ausfallrisikos durch Störungen des Waldökosystems. Darüber hinaus können durch den Digitalen Zwilling gezielte Maßnahmen geplant und umgesetzt werden, sei es in Bezug auf die Pflege, die Wiederbewaldung oder den Schutz vor Waldbränden. Es öffnet die Möglichkeit vergleichbare Flächen zu finden und evidenzbasiert den Erfolg von Maßnahmen für eine Fläche einzuschätzen und so die Maßnahmen zu optimieren.

Ein weiterer Vorteil des Digitalen Zwillings sind die Möglichkeiten zur Automatisierung. Mit einer genauen digitalen Repräsentation des Waldes können viele Prozesse automatisiert werden, von der Überwachung bis zur Holzernte. Dies kann die Effizienz steigern, gleichzeitig dem Personalmangel entgegenwirken und den Arbeitsschutz verbessern, z.B. an Steilhängen. Das Ziel ist dabei nicht durch Rationalisierung zu einem auf dem Reißbrett geplanten Wald zu gelangen, sondern die natürliche Komplexität naturnaher Wälder zu beherrschen. Der digitale Zwilling ist die Grundlage für den Einsatz von Robotik in der Forstwirtschaft, sei es durch operativen Betrieb durch Drohnen aus der Luft (siehe Kapitel 4.3) oder durch autonome Roboter am Waldboden.

Die Integration von Daten aus verschiedenen Quellen ist ein weiterer wichtiger Aspekt. Letztendlich erscheint es nicht sinnvoll, dass jeder Forstbetrieb seinen eigenen Datenbestand pflegt. Durch die Kombination mehrerer Datenquellen ergeben sich deutliche Vorteile. So eignen sich Drohnen insbesondere, um einen detaillierten Einblick auf eine Fläche zu gewinnen, wenn es nötig ist, z.B. bei der Bestandsbegründung nach einem Kalamitätsereignis. Neben den von Drohnen gesammelten Daten können auch andere Datenquellen in den digitalen Zwilling integriert werden, beispielsweise Wetterdaten, Bodenanalysen, Daten aus Satellitenbildern oder Daten aus der Luftbildvermessung der Länder. Viele dieser Daten liegen in einer geringeren räumlichen, aber höheren und regelmäßigen zeitlichen Auflösung vor. Dies ermöglicht eine umfassende Betrachtung des Waldes und seiner Umgebung und bietet die Möglichkeit, Veränderungen und Trends frühzeitig zu erkennen (Waldmonitoring).

In Bezug auf spezifische Anwendungsfälle wie Waldbrandmonitoring, Standortanalyse, Schadensdokumentation und Wiederbewaldungsplanung bietet der digitale Zwilling eine solide Grundlage für Entscheidungen. Anstatt sich auf unvollständige oder veraltete Daten zu verlassen, können Forstbetriebe auf aktuelle, präzise und umfassende Informationen zugreifen, die in Echtzeit aktualisiert werden.

#### 4.1.4 Pflege/sonstige Maßnahmen

Neben der Flächeninspektion im Vorfeld der geplanten Maßnahmen werden bei der Nachverfolgung von Kultur- und Pflegemaßnahmen Drohnen zur Dokumentation und Anwuchskontrolle eingesetzt.

#### 4.1.5 Wegezustandserfassung

Drohnen werden zur Erstellung von Luftbildaufnahmen zur optisch basierten Wegezustandserfassung genutzt. Sie liefern einen groben Überblick, insbesondere nach Schadereignissen. Eine Wegekategorisierung ist jedoch noch nicht möglich.

#### 4.1.6 Waldbrandmonitoring

Je früher ein Waldbrand erkannt wird, desto größer ist die Chance, dass das Ereignis in einem eng umgrenzten Bereich gehalten werden kann und nicht außer Kontrolle gerät. Ein Netzwerk von Gassensoren, welche mehrere Rauchgase (Wasserstoff, Kohlenmonoxyd und flüchtige Kohlenstoffverbindungen) entdecken können, gepaart mit einer eingebauten künstlichen Intelligenz (KI) kann verlässlich Waldbrände erkennen.

Um frühzeitig eine erweiterte Bewertung der Einsatzlage vornehmen zu können, wird das Frühwarnsystem um eine automatisierte Drohne ergänzt, die im Standardbetrieb auf einer Feuerwache oder Leitstelle vorgehalten werden kann. An die Drohne wird die GPS-Position des auslösenden Sensors übergeben, welche dann von der Drohne automatisiert angefliegen wird. Der Flug kann von einer Leitstelle der Feuerwehr gestartet und überwacht werden, die Leitstelle erhält hierzu Echtzeitbilder von der optischen und der thermalen Kamera der Drohne.

Drohnen helfen der Einsatzleitung bei der Einsatzplanung, da sie die Möglichkeit bieten, den Einsatzort wesentlich genauer einzuschätzen und Gefahren frühzeitig zu erkennen. Mithilfe von Wärmebildkameras erfassen sie selbst kleinste Temperaturunterschiede und identifizieren so Glutnester, die für das menschliche Auge unsichtbar sind. Die gesammelten Daten ermöglichen eine schnellere Reaktion auf Gefahrenquellen. Auch die Identifizierung sicherer Zuwegungen hilft bei der Einsatzplanung.

#### 4.1.7 Standortanalyse (Semantische Bestimmung des Waldbodens) (H-BRS)

Die Standortanalyse ist insbesondere bei der Bestandsbegründung und vor Pflanz- und Saatmaßnahmen z.B. nach Kalamitätsereignissen von Bedeutung. Ziel dieser Analyse ist es, den aktuellen Zustand der relevanten Standortfaktoren zu erheben. Drohnen erlauben eine Betrachtung von Mikrostandorten bis auf die Einzelbaumebene. Neben den herkömmlichen Standortbedingungen wie dem Bodenwassergehalt, Lage, Bodentyp und Nährstoffhaushalt können Drohnen auch Mikrostandortbedingungen großflächig ermitteln.

Durch eine Analyse der Sensordaten nach einer Drohnenbefliegung lassen sich Bereiche mit Naturverjüngung und Begleitvegetation, Baumstümpfe, Totholz, Rückegassen, Rückepfade, Wege und Bestand voneinander abgrenzen. Dadurch lassen sich wiederum Rückschlüsse auf Mikrostandortbedingungen wie Nährstoffvorräte, Konkurrenzvegetation, Bodenverdichtung und Verschattung ziehen.

Eine detaillierte Analyse des Bodenreliefs mit einer Auflösung im Bereich von Zentimetern hat das Potential, zudem Aussagen über die Lichtverhältnisse und Windexposition zu bieten. Da diese Informationen auch im Digitalen Zwilling gespeichert werden, können diese mit den herkömmlichen, aus anderen Quellen verfügbaren Standortdaten verschnitten werden.

Aus diesen hochaufgelösten Karten für die Standortfaktoren lassen sich individuelle kosteneffiziente Maßnahmen ableiten. So kann bereits bestehende und nützliche Naturverjüngung in einer Kombination mit künstlicher Naturverjüngung durch luft-gestützte Direktsaat und Pflanzungen kombiniert werden. Dabei lassen sich die Vorteile aller Techniken kombinieren.

Durch die verfügbaren Daten ist eine Teilautomatisierung der künstlichen Naturverjüngung denkbar, bei der die Planung neuer Pflanz- und Saatplätze, deren Positionierung und Baumartwahl durch Parameter des Forstbetriebs und anderer Stakeholder z.B. auf Basis des Waldbaukonzepts NRW vorgegeben wird.

Eine so auf Basis der verfügbaren Daten erstellte Saat- und Pflanzplanung kann dann auch im operativen Bereich durch Drohnen unterstützt werden (siehe Kapitel operativer Bereich)

#### 4.1.8 Schadensdokumentationen (H-BRS), Risikoanalyse (Wald und Holz NRW)

Waldschädigung können jederzeit auftreten, jedoch hat im Zuge der trockenen Jahre seit 2018 die Schadensdokumentation und Risikoanalyse an Bedeutung gewonnen. Großflächige Waldschäden können sehr effektiv mit Satellitendaten erfasst werden. Kleinflächige, partielle oder z.B. nur die Oberkronen der Bäume betreffende Schäden benötigen jedoch deutlich höhere Bildauflösungen zum

Detektieren. Entsprechend dem Anwendungsbereich können verschiedene Kamerasysteme eingesetzt werden.

Eine essenzielle Bedeutung für das operative Geschäft haben die Schaderkennung und Risikoanalyse im Zuge der Verkehrssicherung und der daraus resultierenden Einleitung von weiteren Sicherheitsmaßnahmen.

#### 4.1.9 Wiederbewaldungsplanung (Wald und Holz NRW)

Durch Trockenheit und überwiegend Borkenkäfer geschädigte Kalamitätsflächen sind aktuell in Deutschland und insbesondere in Nordrhein-Westfalen auf vielen Waldflächen vorzufinden. Der Waldumbau und die Integration der Verjüngung wurden in einigen Beständen realisiert, diese bilden nun den Hauptbestand. Jedoch auf einem Großteil der Flächen sind diese Bedingungen nicht vorzufinden, sodass eine Wiederbewaldungsplanung zur Walderhaltung notwendig ist. Unter Einbeziehung der sukzessive auflaufenden Naturverjüngung und der Integration von Baumarten, die an den Standort auch im Zuge des Klimawandels angepasst sind, werden Wiederbewaldungsplanungen aktuell und in den kommenden Jahren eine enorm wichtige Rolle im Tagesgeschäft der Forstbetriebe spielen. Daher ist die effektive Erhebung des Flächenzustandes wie die Lage von Rückegassen, Gräben, Begleitvegetation, der vorhandenen Naturverjüngung und weitere Besonderheiten essentiell für eine zielgerichtete Planung. Mit Hilfe von aktuellen, hochauflösenden, georeferenzierten Luftbildern können Waldbewirtschaftende eine zielgerichtete Analyse vorhandener Strukturen und die Planung wie z.B. die Einbringung von künstlicher Verjüngung zum Beispiel in einem GIS-System durchführen. Eine detaillierte und genaue Planung der benötigten Pflanzenanzahl und somit auch der Arbeitskapazitäten sind enorm wertvolle Informationen für die Waldbesitzenden und -bewirtschaftenden.

Für diese Analyse und Planung können Drohnen enorm wertvolle Daten liefern und die Detailgenauigkeit, die mit Drohnen erreicht werden kann, ist ein enormer Vorteil zur detaillierten Erfassung von vorhanden und zu planenden Strukturelementen. Hinzu kommt, dass diese Orthofotos mit integrierter Planung ein sehr gute Dokumentationsmöglichkeit sind für die geplanten und durchgeführten Maßnahmen. Wiederholungsaufnahmen können zukünftig die Entwicklung abbilden und die getroffenen Maßnahmen evaluieren.

Im Speziellen z.B. für die Beantragung von Fördermitteln und der Kontrolle von Förderflächen gewinnen detaillierte Informationen zunehmend an Bedeutung, da zunehmend Mischbestände gefördert werden und die Erhaltung der geförderten Baumarten forciert werden.

## 4.2 Operativer Bereich

### 4.2.1 Verjüngung von Beständen (Lokalisierung von Saat-/Pflanzplätzen, Saat)

Aufgrund der Größe der Kalamitätsflächen und der Herausforderung zur Wiederbewaldung müssen alle Möglichkeiten ausgeschöpft werden, um diese Flächen möglichst vor Etablierung einer verjüngungshemmenden Vergrasung wieder in Bestockung zu bringen. Einen Baustein dazu bildet die drohnenbasierte Waldverjüngung.

Die Bestandesbegründung durch Saat bietet gegenüber der klassischen Pflanzung einige Vorteile:

- ungestörte natürliche Wurzelentwicklung, insbesondere wichtig hinsichtlich Sturmfestigkeit und auf wechselfeuchten Standorten,
- optimale Anpassung an den Mikostandort.

Schwer zugängliche Lagen, munitionsbelastete Flächen, Bestände mit Dürrständern oder große Flächen eignen sich besonders für die Aussaat per Drohne.

Durch das vorherige Monitoring der Flächen kann entschieden werden, welche Art der Bodenvorbereitung vonnöten ist. Durch die Verwendung von Kamerasystemen mit gekoppelter Bildauswertung ist es zudem möglich, auf bereits teilweise vergrasteten Flächen das Saat- oder Pflanzgut gezielt in den noch nicht vergrasteten Bereichen auszubringen.

Grundsätzlich erfolgt die Aussaat wie folgt: Das Saatgut wird mit einem unter der Drohne angebauten Ausbringungsmechanismus im Flug über der Fläche ausgebracht. Das Saatgut fällt in der voreingestellten Aussaatstärke aus einem Behälter auf den Boden. Nicht alle Samen müssen dabei unbedingt in den Mineralboden gebracht werden um erfolgreich zu keimen. Bei Saatversuchen auf Kalamitätsflächen in den Bayerischen Alpen hat sich z.B. eindeutig gezeigt, dass die Humusaufgabe, am besten noch mit vorhandener Reisigabdeckung, ein günstiges Keimbett bietet.

Grundsätzlich können Drohnen jedes Saatgut ausbringen, sowohl leichte Nadelholzsamen als auch Eichen oder Bucheckern. Entscheidend dabei ist der Ausbringmechanismus.

Neben vollflächigen Saaten werden überwiegend Streifen- oder auch Plätzeaaten durchgeführt. Dem zu hohen Saatgutverbrauch bei einer Direktsaat kann durch Verwendung von pelletiertem Saatgut begegnet werden, welches einzelstückweise gezielt ausgebracht werden kann. Diese äußere Hülle um den Samen kann zudem noch als Starthilfe für die Wurzelbildung dienen oder auch die Saat vor Schäden durch Mäuse oder auch Wildschweine schützen.

Für eine schnelle Wiederbewaldung großer Katastrophenflächen sind vor allem auch Pflanzen mit Pioniercharakter (Stauden, z.B. Waldweidenröschen; Sträucher, z.B. Hirschholunder; Bäume, z.B. Vogelbeere, Birke) von Interesse. Diese Pflanzen bilden jährlich in großer Menge Samen, so dass hier nicht die Samenverfügbarkeit, sondern nur die Samenernte der limitierende Faktor ist.

#### 4.2.2 Pflanzung und Saatgut- bzw. Pflanzentransport, Monitoring des Anwuchses (H-BRS)

Die Ausbringung von Samen oder Pflanzung im Wald, auch bekannt als Aufforstung oder Wiederaufforstung, ist ein entscheidender Schritt bei der Wiederherstellung und Bewirtschaftung von Wäldern. Verschiedene Methoden sind üblich, die jeweils auf die unterschiedlichen ökologischen Bedingungen, Arten und Projektziele zugeschnitten sind. Im Folgenden werden einige der Methoden zur Ausbringung von Saat- und Pflanzgut im Wald vorgestellt:

- Direktsaat: Das Saatgut wird mit verschiedenen Geräten, wie handbetriebenen oder traktormontierten Sämaschinen oder aus der Luft, gleichmäßig in einem bestimmten Gebiet ausgebracht. Diese Methode eignet sich für Arten mit kleinen, leichten Samen.
- Aussaat aus der Luft: Das Saatgut wird mit einem bemannten oder unbemannten Flugzeug auf großer Fläche ausgebracht, was sich besonders eignet für schwer erreichbare oder unzugängliche Gebiete. Wichtig ist eine sorgfältige Auswahl von Saatgut und Zeitpunkt der Aussaat, um eine erfolgreiche Keimung und Sicherung der Kultur zu gewährleisten.
- Containersetzlinge: Containersetzlinge sind junge Pflanzen, die in Töpfen oder Containern in einer Baumschule gezogen und dann in den Wald verpflanzt werden. In bestimmten Abständen werden Löcher gegraben, in denen die Containersetzlinge gepflanzt werden. Bei dieser Methode wird jeder Setzling individuell behandelt. Alternativ können die Setzlinge auch in Reihen oder Gittern gepflanzt werden, was gleichmäßige Abstände gewährleistet und die Pflege und Überwachung erleichtert.
- Direktes Einpflanzen mit Saatkugeln oder Saatgutpellets: Das Saatgut wird mit einer Schutzschicht aus Lehm, organischer Substanz oder anderen Materialien umhüllt, so dass

Saatkugeln oder -pellets entstehen. Diese werden dann in den Wald gepflanzt. Die Schutzschicht kann dazu beitragen, die Samen vor Räufern, rauem Wetter und anderen Umwelteinflüssen zu schützen.

- Naturverjüngung: In manchen Fällen ist die natürliche Regeneration der künstlichen Anpflanzung vorzuziehen. Dabei wird den vorhandenen Samen im Waldboden erlaubt, zu keimen und natürlich zu wachsen. Diese Methode eignet sich für Gebiete, in denen ausreichend lebensfähiges Saatgut im Boden ist, um den Waldbestand zu regenerieren.

Die Wahl der Verjüngungsmethode hängt von Faktoren wie Standortbedingungen, Klima, Artenauswahl, Projektumfang und verfügbaren Ressourcen ab. Es ist wichtig, den Standort zu beurteilen und ökologische Faktoren zu berücksichtigen, um die am besten geeignete Methode für jede spezifische Aufforstungs- oder Wiederaufforstungs-Maßnahme zu bestimmen. Zudem ist die richtige Pflege und Überwachung nach der Pflanzung entscheidend für den Erfolg jeder Pflanzaktion.

Die Kontrolle des Pflanzenwachstums im Wald mit Hilfe von Drohnen wird aus einer Reihe von ökologischen, umweltpolitischen und praktischen Gründen immer wichtiger. Es folgen einige wichtige Punkte, die die Bedeutung und Notwendigkeit dieser Technologie unterstreichen:

- Erhalt der biologischen Vielfalt: Wälder bieten einer Vielzahl von Pflanzenarten Lebensraum und die Kontrolle ihres Wachstums hilft, die Gesundheit und Vielfalt der Ökosysteme zu beurteilen. Drohnen können wertvolle Daten über seltene oder gefährdete Pflanzenarten liefern und so zum Schutz beitragen.
- Bewertung der Waldgesundheit: Die frühzeitige Erkennung von Stress- oder Krankheitsanzeichen bei Pflanzen ist für die Waldbewirtschaftung entscheidend. Mit Multispektral- oder Wärmebildkameras ausgerüstete Drohnen können Anomalien in der Pflanzengesundheit erkennen, so dass rechtzeitig eingegriffen werden kann, um die Ausbreitung von Krankheiten oder Schädlingen zu verhindern.
- Auswirkungen des Klimawandels: Wälder leisten einen wichtigen Beitrag zur Bekämpfung des Klimawandels, da sie durch Photosynthese Kohlendioxid binden. Die Überwachung des Pflanzenwachstums kann Aufschluss darüber geben, wie sich der Klimawandel auf die Waldökosysteme auswirkt, einschließlich Veränderungen der Wachstumsmuster und der Artenzusammensetzung.
- Ressourcenmanagement: Wälder sind wertvolle Ressourcen für Holz, forstliche Nicht-Holz-Produkte und als Erholungsraum. Die Überwachung des Pflanzenwachstums ermöglicht es der Forstwirtschaft, fundierte Entscheidungen über die nachhaltige Ernte und die Verteilung der Ressourcen zu treffen.
- Kosteneffizienz: Herkömmliche forstliche Überwachungsmethoden erfordern oft arbeitsintensive Feldarbeit, die teuer und zeitaufwendig sein kann. Drohnen können große Flächen schnell und kostengünstig abdecken und so die für die Datenerfassung erforderlichen Ressourcen reduzieren.
- Daten in Echtzeit: Drohnen können Daten in Echtzeit oder nahezu in Echtzeit liefern und ermöglichen so, schnell auf sich ändernde Bedingungen im Wald zu reagieren. Dies ist entscheidend für die Bewirtschaftung der Wälder und die Reaktion auf Umweltbedrohungen.
- Verbesserte Entscheidungsfindung: Von Drohnen gesammelte Daten können für datengestützte Entscheidungen in der Forstwirtschaft, Naturschutz und Katastrophenschutz genutzt werden. Dies kann zu effektiveren und nachhaltigeren Methoden der Waldbewirtschaftung führen.

Die Kontrolle des Pflanzenwachstums erfolgt in der Regel durch Fernerkundungstechniken, einschließlich der Verwendung von Satelliten- oder Luftbildern. Der Vegetationsanteil (engl. fractionated vegetation, FV) bezieht sich auf den Anteil der Landfläche, der in einem bestimmten Gebiet von Vegetation bedeckt ist und kann zur Bewertung von Veränderungen des Pflanzenwachstums im Laufe der Zeit verwendet werden. Der allgemeine Arbeitsablauf für die Überwachung des Vegetationswachstums mit Drohnen lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Datenerfassung: Die Daten können mit Hilfe von Satellitenbildern oder Luftaufnahmen durch Drohnen erfasst werden. Für das anfängliche Wachstum der Vegetation liefern Luftaufnahmen Bilder mit höherer Auflösung, die eine bessere Überwachung im Laufe der Zeit ermöglichen.
- Bildvorverarbeitung: Luftbilder werden verarbeitet, um atmosphärische Störungen, geometrische Verzerrungen und andere Faktoren zu korrigieren, die die Genauigkeit der Berechnungen beeinträchtigen können.
- Bildklassifizierung: Die verarbeiteten Bilder werden in verschiedene Klassen von Bodenbedeckung eingeteilt, darunter Vegetations- und Nicht-Vegetationsflächen. Dieser Schritt hilft bei der Unterscheidung zwischen Pflanzen und anderen Merkmalen auf dem Boden. Vegetationsindizes können auf Fernerkundungsdaten angewendet werden, um die Vegetation hervorzuheben und ihren Zustand und ihr Wachstum zu bewerten. Zu den gängigen Vegetationsindizes gehören der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) und der Enhanced Vegetation Index (EVI). Sobald die Bilder klassifiziert sind, können Methoden wie die fraktionierte Vegetation (FV) je Pixel im Bild berechnet werden. FV steht für den Anteil von Pixeln, die von Vegetation bedeckt sind.
- Zeitliche und räumliche Analyse: Zur Überwachung des Pflanzenwachstums wird eine Reihe von Bildern, die im Laufe der Zeit aufgenommen wurden, analysiert. Durch den Vergleich der FV-Werte in verschiedenen Bildern können Veränderungen in der Vegetationsbedeckung beurteilt werden. Die zeitliche Analyse ermöglicht die Untersuchung von Trends, saisonalen Schwankungen, Auswirkungen von Störungen wie Dürren oder Änderungen der Landnutzung. Räumliche Muster des Pflanzenwachstums können durch die Untersuchung von FV-Werten an verschiedenen Orten innerhalb des Untersuchungsgebiets analysiert werden. Dies kann dazu beitragen, Bereiche mit schnellem Wachstum, Stagnation oder Rückgang der Vegetation zu identifizieren.
- Auswertung der Daten: Die ausgewerteten Daten können Aufschluss über Faktoren geben, die das Pflanzenwachstum beeinflussen, z. B. Klima, Bodenbedingungen und Methoden der Landbewirtschaftung. Forscher und Landnutzer können mit diesen Informationen fundierte Entscheidungen über landwirtschaftliche Praktiken, Forstwirtschaft und Naturschutzmaßnahmen treffen.
- Visualisierung, Berichterstattung und Validierung: Die Ergebnisse werden häufig in Form von Karten, Diagrammen und Berichten dargestellt, um sie den Interessengruppen, politischen Entscheidungsträgern und der Öffentlichkeit zu vermitteln. Die Validierung der Daten ist entscheidend, um ihre Genauigkeit zu gewährleisten. Dies kann durch bodengestützte Messungen und Erhebungen vor Ort geschehen, um die Korrelation zwischen den berechneten Wachstumswerten und der tatsächlichen Vegetationsbedeckung zu bestätigen.

#### 4.2.3 Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln, Verbisschutz

Analog der Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln im Agrarbereich ist der punktgenaue und somit ressourcen- und umweltschonende Einsatz von Pflanzenschutzmitteln im Forstbereich möglich. Bislang verbietet das Gesetz zum Schutz der Kulturpflanzen (Pflanzenschutzgesetz, PflSchG) in § 18 die



Anwendung von Pflanzenschutzmitteln mit Luftfahrzeugen, wobei genehmigungspflichtige Ausnahmen für den Weinbau in Steillagen und im Kronenbereich von Wäldern möglich sind. Die forstlichen Verfahren dazu befinden sich jedoch noch im Probereinsatz. Nähere Erkenntnisse zur Ausbringung von Verbisschutz werden durch das Projekt *Logistik und Routen-Optimierung für den UAV-Einsatz beim Verbisschutz von Baumsetzlingen* (VeBaS-UAV) erforscht. (Siehe auch 4.3.2.)

#### 4.2.4 Gewinnung von Proben aus dem Kronenraum

Aktuell ist der Einsatz von UAV zur Gewinnung von Proben in der Praxis noch die Ausnahme. Es gibt aber bereits erste kommerzielle Payloads, welche für den Zweck der Probegewinnung an Waldbäumen konzipiert sind. Es ist daher davon auszugehen, dass dieser Einsatzzweck von UAV in den kommenden Jahren stark an Bedeutung gewinnen wird.

#### 4.2.5 Waldbrandbekämpfung

Drohnen leisten den Einsatzkräften bei Waldbränden wertvolle Dienste speziell bei der Lageerkundung, der Gefahrenentwicklung, bei der Personensuche mit oder ohne Wärmebildkamera, bei der Entscheidungsfindung bei Großwaldbränden oder zur Entdeckung von Glutnestern.

Feuerlöschdrohnen befinden sich derzeit in der Entwicklungsphase (siehe auch 4.3.2).

#### 4.2.6 Wildtiermanagement (OGF)

Für ein fundiertes Wildtiermanagement spielt die Ermittlung der Abundanz von Wildtieren eine entscheidende Rolle. Dementsprechend existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren mit dem Ziel einer möglichst realistischen Abschätzung dieses Parameters. Der Einsatz von Unmanned Aerial Vehicles (UAV, Drohnen) bietet die Möglichkeit einer sehr genauen Erfassung vieler Wildtierarten, wobei es art- und habitatspezifische Unterschiede gibt. Dabei kommen Payloads zum Einsatz, welche eine Wärmebildkamera und eine RGB-Kamera mit starkem Zoom (> 20 x) bündeln. Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass die Wildtierarten die Drohnen sehr unterschiedlich wahrnehmen. Schwarz- und Rehwild reagieren bei einer Flughöhe um und über 70 m selten auf die Anwesenheit der Drohnen. Rot- und Raubwild hingegen nehmen UAV regelmäßig wahr und reagieren teilweise mit Fluchtverhalten. Da mit den modernen Drohnen bei Beachtung der äußeren Bedingungen eine sichere Detektion und Identifikation vieler Wildtierarten aus über 100 m möglich ist, lassen sich auch die empfindlicheren Wildtierarten gut detektieren. Die hochauflösende Optik der Drohnen erlaubt es, bei Bedarf zusätzlich Informationen zum Geschlechter- und Altersverhältnis zu gewinnen. Über die GPS-genaue Verortung der Tiere und die Verschneidung dieser räumlichen Verteilung mit Daten zur Waldstruktur, dem Jagdregime oder weiteren Aspekten lassen sich viele weitergehende Zusammenhänge ableiten. Die Flächenleistung mit den genannten Modellen liegt bei rund 300 bis über 1.000 ha pro Tag, hängt dabei aber stark von einer Vielzahl an Faktoren ab. Grundsätzlich zeigen die Erfahrungen, dass sich die Abundanz vieler Wildtierarten in fast allen Waldökosystemen sehr genau ermitteln lässt. Die exakte räumliche Verortung bietet weitergehende spannende Analysemöglichkeiten. Forschungsbedarf besteht vor allem bei der Ermittlung des Übersehfehlers bei verschiedenen Waldstrukturen, um daraus einen entsprechenden Korrekturfaktor berechnen zu können.

#### 4.2.7 Borkenkäfermonitoring (OGF)

Eine Vielzahl an Forschungsprojekten hat sich mit der Thematik der Früherkennung von durch Schädlinge befallenen Bäumen beschäftigt, wobei der Fokus meist auf rindenbrütenden Schadinsekten lag. Dabei werden in den meisten Ansätzen die Drohnen mit verschiedenen Payloads, vor allem RGB und Multispektral, überflogen und anschließend prozessiert. Diese Prozessierung dauert in der Regel mind. eine Woche, kann aber auch länger dauern. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass eine zuverlässige Erkennung von frischem Stehendbefall (green attack) nicht möglich

ist. Sobald die Bäume in der Krone zeichnen (mit Rotfärbung), ist eine Erkennung sehr zuverlässig möglich. In der forstlichen Praxis kommen derartige Verfahren nur selten zur Anwendung, da die Kosten für die Befliegung und Auswertung, als auch die Verzögerung zwischen Befliegung und Ergebnisauswertung noch nicht den Anforderungen aus der Praxis entsprechen.

Andere Verfahren nutzen keinen flächigen Überflug und erlauben daher eine schnelle Detektion und Verortung von Bäumen mit deutlich sichtbaren Symptomen in der Baumkrone. Während dies früher lediglich durch Vorwärtseinschneiden (Beobachtung eines Baumes von zwei Punkten und Winkelbestimmung) möglich war, geht dies mit modernen Payloads sehr viel schneller und präziser durch die Nutzung eines integrierten Laserentfernungsmessers. Damit können Bäume auch in über 750 m Entfernung mit für die Praxis ausreichender Genauigkeit lokalisiert werden. Dieser neuartige Ansatz erlaubt es, lediglich durch einen punktuellen Aufstiegs des UAV in 120 m Höhe einen Bereich von über 100 ha auf befallene Bäume zu überblicken. Diese müssen anschließend angelaufen und im Umkreis ggf. frisch befallene Bäume markiert und entfernt werden. Das Verfahren kann aber unter Umständen den vollflächigen Begang obsolet machen.

#### 4.2.8 Polter- und Schüttgutvermessung

UAV-Nahbereichsluftbilder ermöglichen eine flexible, effiziente und genaue räumliche Vermessung von Hackschnitzelhaufen oder anderer großer Lagermengen von Schüttgütern.

Nach der Erstellung eines automatischen Flugplans und virtuellen Luftbildplans mit mind. 80 % Bildüberlappung in beide Flugrichtungen werden Bilder des Untersuchungsobjektes aus verschiedenen Blickwinkeln erstellt. Nach dem Prozessieren der Bilder zu 3D-Punktwolken können die Volumina des Schüttgutes berechnet werden.

Die Vermessung von Holzmengen im Holzpolter, insbesondere bei Großlagern wird durch den Einsatz von Drohnen enorm erleichtert. Nach der Erfassung der Luftbilder mit UAVs wird eine Volumenbestimmung aus den Oberflächenmodellen aus Stereoluftbildern vorgenommen.

### 4.3 Forschung, Prototypenstatus (H-BRS)

#### 4.3.1 Vogelperspektive, neue Daten und –Datenkombinationen (Wald und Holz NRW)

Für die Forschung in allen Bereichen rund um die Thematik Wald ermöglichen Drohnen eine weitere enorm wertvolle Datenquelle zur Erlangung neuer Erkenntnisse und der Datenkombination sowie Korrelation mit anderen z.B. terrestrischen Daten.

#### 4.3.2 Forschungsprojekte

##### **Einsatz autonom bewegter Drohnentechnologie in der Waldinventur (AutoDrone)**

Mit dem Projekt "Einsatz autonom bewegter Drohnentechnologie in der Waldinventur und der Einsatzplanung" soll die Grundlage für ein späteres praktikables, technologisch ausgereiftes Verfahren für die automatisierte Erfassung von Einzelbaumparametern für die Generierung von planungs- und bewirtschaftungsrelevanten Bestandesparametern mit Hilfe von autonom fliegenden Drohnen entwickelt werden.

##### **Implementierung eines drohnengestützten Verfahrens zur Frühdetektion von Borkenkäfern in die FORSTliche PRAXis**

Im Rahmen des Projektes FORSTPRAX wird ein Halbleitersensoren-Prototyp für die forstliche Praxis angepasst und in den Forstbetriebsablauf implementiert. Auf der Basis von Vorergebnissen aus dem FNR Projekt ProtectForest wurden drei wesentliche und notwendige

Entwicklungsschritte für die Betriebsintegration identifiziert: 1) Installation eines Abstandssensors zur Hinderniserkennung in der Flugbahn, wie z.B. Äste, da dadurch keine Höhenprofilberechnung und entsprechende Multispektralflüge vor dem Sensorflug mehr notwendig sind. Dies spart 65 % der Gesamtzeit für das Verfahren. 2) Installation eines PPP (Precise Point Positioning) Systems zur referenzpunktlosen und zentimetergenauen Positionsbestimmung. Dies spart 15 % der Gesamtzeit (5 % bei Flugplanung und 10 % bei Datenauswertung), da keine Positionsmarker im Fluggebiet verteilt werden müssen und keine Nachjustierung der Geodaten zum Verschneiden von Sensordaten und Basiskarte (z.B. Google Maps) mehr notwendig ist. 3) Entwicklung einer Auswerteroutine zur Datenübertragung, Analyse, Darstellung und serverbasierten Veröffentlichung. Dies spart 10 % der Datenauswertungszeit, da sämtliche Prozesse vollautomatisch ablaufen und die HeatMap danach im Internet verfügbar ist. Geltende Datenschutzrichtlinien müssen entsprechend beachtet werden. Diese drei Entwicklungsschritte sollen im Rahmen des Projektes in enger Zusammenarbeit mit Forstbetrieben (Niedersächsische Landesforsten, Bundesforsten, mehrere Privatbetriebe) durchgeführt werden, um die Praxisnähe des zu entwickelnden Prototypen zu gewährleisten.

### **Entwicklung eines automatischen Drohnensystems zur Herstellung stabiler Sprach- und Datenverbindungen zwischen Rettungsdienst und den Hilfesuchenden für Notfälle im Wald (NotRufDrohne)**

Die Mobilfunkabdeckung in den baden-württembergischen Wäldern ist sehr lückenhaft und die Versorgungsqualität ist nicht verlässlich dokumentiert. Zahlreiche forstliche Anwendungen basieren auf Mobilfunkanwendungen, wie z.B. die hochpräzise Satellitennavigation oder die "Rettungskette Forst". Kann bei einem Unfall der Notruf nicht direkt abgesetzt werden, muss sich eine Person vom Unfallort entfernen und einen Ort mit ausreichender Mobilfunkanbindung suchen. In einem solchen Fall ist der Zeitverlust enorm und kann durch den Einsatz von innovativen Technologien deutlich reduziert werden. Projektschritte sind: Präzise Identifikation von mobilfunkunterversorgten Waldgebieten durch Befragung der Vor-Ort-Einheiten in Verbindung mit einer Monitoring-App. Durchführung von systematischen Meßkampagnen mit Drohnen bei den identifizierten "Funklöchern" in verschiedenen Flughöhen über Grund. Ziel ist die Entwicklung und Konfektionierung einer sensorgesteuerten Drohne, die über dem Unfallort eine stabile Mobilfunk-Verbindung herstellt. Das System wird vollständig in den normalen Arbeitsablauf integriert. Ein permanentes, z.B. auf einem Waldarbeiterfahrzeug montiertes Drohnentransport- und -startsystem registriert den Notruf durch den Verunfallten oder den Ersthelfer und erkennt, ob eine Mobilfunkverbindung hergestellt wird. Ist das nicht der Fall, steigt die Drohne automatisch auf und sucht selbständig eine geeignete Flughöhe, bei der eine stabile Mobilfunkanbindung zwischen Anrufer und der Rettungsstelle hergestellt werden kann. Das Verfahren soll medienbruchfrei und endgeräteunabhängig die notwendige Sprach- und Sachdatenverbindung unmittelbar zum Unfallort herstellen und damit das therapiefreie Zeitintervall bei der Rettung grundlegend reduzieren. Auf der Hardwareseite müssen Anpassungen an marktverfügbaren Drohnen durchgeführt, aber auch Entwicklungsarbeit im Bereich der Avionik und der Funkmesstechnik geleistet werden, ebenso wie bei der sicheren Integration in den Luftraum.

### **Charakterisierung des Zustandes sowie kurzfristiger Veränderungen der oberirdischen Biomasse sowie der Kohlenstoffbindung mit Hilfe von UAV-Technologie in Wäldern am Beispiel des Flachlands in Bayern (BY-CS-UAV)**

Im Nachgang zur Kohlenstoffinventur des Bundes (CI 2018) bzw. zeitgleich zur Waldzustandserhebung 2019 werden Inventurpunkte des BWI/WZE-Netzes in Südbayern mit einer Drohne einmalig befliegen. Da die Inventurpunkte im Rahmen der BWI 2012 in Bayern hochpräzise mit GNSS-Technologie eingemessen wurden, ist jeder Baum in seiner Position und Art bekannt und nachvollziehbar. Abgänge sind visuell erkennbar. Die Ermittlung des in oberirdischer Biomasse gebundenen Kohlenstoffs erfolgt auf zwei Wegen: 1) Modellhafte Fortschreibung der Daten der BWI 2012 für das Flachland Bayerns unter Berücksichtigung der Abgänge. 2) Berechnung der aktuell in der oberirdischen Biomasse gebundenen Kohlenstoffmenge über allometrische Beziehungen zwischen Baumhöhe und Kronendurchmesser (aus UAV-Daten) und Baumdurchmesser. Fehlende Größen (z.B. Einwuchs, Totholzersetzung) werden mit Hilfe mathematisch-statistischer Methoden ergänzt. Mit dem skizzierten Ansatz gelingt es, kostengünstig die Kohlenstoffbindung in Bayern zeitnah zu erfassen. Auf diesem Weg kann mittelfristig die Kohlenstoffinventur des Bundes (BMEL) ggf. ersetzt werden. Weiterhin lässt sich der beschriebene Ansatz auf Forstbetriebe jeglicher Größenordnung übertragen. Bei Vorliegen der genauen Lagekenntnis von Einzelbäumen lässt sich z.B. nach Störungen (z.B. Windwurf o.ä.) mit Hilfe von UAV rasch und ungefährlich die Veränderung des Waldaufbaus ermitteln. Es können rasch hochrechnungsbasierte, quantitative Aussagen z.B. zu Vorratsveränderungen oder Veränderungen der Baumartenzusammensetzung angestellt werden. Der vorgestellte Ansatz stellt damit einen Beitrag zur Effizienzsteigerung in der praktischen Forstwirtschaft unter Anwendung von Methoden der Fernerkundung dar. Der vorgestellte Ansatz ist auf Forstbetriebe oder unterschiedliche Eigentumsarten problemlos anwendbar und stellt einen praxisrelevanten, methodischen Fortschritt in der Forstinventur dar.

### **Drohngestützte Detektion phytophager Forstschädlinge mittels Electronic Nose (PROTECTFOREST)**

Im Rahmen des Projektes wurden die Feldtests begleitet und Zeitstudien zu dem Gesamtablauf des neuartigen drohnenbasierten Detektionsverfahrens erstellt. So konnten entscheidende Benchmarks für die weitere Entwicklung definiert werden, die teilweise bereits im Projekt umgesetzt wurden und in einem Folgeprojekt den Schwerpunkt bilden werden. Die Zusammenarbeit mit den kooperierenden Waldbesitzern wurde intensiv begleitet, so dass ein Einstieg der Firma CADMIUM in die Forstpraxis mediiert werden konnte. Weiterhin wurden in Absprache mit Waldbesitzern Effizienzvergleiche zwischen klassischer Bestandesbegehung und dem drohnenbasierten Verfahren durchgeführt. Weiterhin wurde der Sensor in Feld- und Labortests auf die Fähigkeit zur  $\alpha$ -Pinendetektion überprüft. Es wurde weiterhin eine Projektwebpage erstellt.

#### **Aufgabenbeschreibung**

Das Ziel des Projektes PROTECTFOREST© ist der Aufbau und Test eines Halbleitersensoren-Prototyps, der drohngestützt eingesetzt werden kann und in Echtzeit die Information über die Insektenbefallssituation in einem Nadelwaldbestand in ein Netzwerk übermitteln kann. Die dabei ausreichend selektiv und sensitiv zu detektierenden Marker sind Monoterpene, die bei einem Befall durch phytophage Insekten wie z.B. *Ips typographus* oder *Pityogenes chalcographus* im Kronenraum oder exponierten Stammbereich verstärkt emittiert werden. Die Kombination aus Drohneneinsatz und Gassensorik kann Insektenkalamitäten bereits im ersten Jahr des Befalls, bzw. bei nicht sichtbarem Stehendbefall an der Krone (v.a. *Pityogenes chalcographus* oder *Ips typographus* am Kronenansatz), bzw. an exponierten und dadurch besonders gefährdeten Stämmen lokalisieren. Eine Braunfärbung der Nadeln ist für die

Befallsdetektion durch drohnengestütztes Monoterpenmonitoring nicht notwendig. Die Reaktionszeit für den effizienten Forstschutz kann sich so im Vergleich zu konventionellen oder drohnengestützten optischen Verfahren (sichtbares und Infrarotspektrum) um bis zu ein Jahr verkürzen. Im Rahmen des Projektes PROTECTFOREST© wird zudem eine integrierte Analyse dieses neuartigen Detektionsverfahrens in Bezug auf Zeit- und Kosteneffizienz stattfinden.

### **Ressourcenoptimierte Drohnen zur Wiederaufforstung des Waldes: Logistik und Routen-Optimierung für den UAV-Einsatz beim Verbisschutz von Baumsetzlingen (VeBaS-UAV)**

In einem mehrstufigen Prozess sollen zunächst die Positionen der neuen Setzlinge per GPS festgehalten werden. In regelmäßigen Intervallen wird danach das Verbisschutzmittel mittels Drohne (UAV) appliziert. Die Drohne fliegt dabei die bekannten Setzlingspositionen an. Am Setzling findet dabei eine Feinpositionierung mittels Bilderkennung statt, so dass der Terminaltrieb mit dem Spray benetzt wird. Durch die begrenzten Ressourcen in Form von Akkuladung und Traglast ist eine optimale Flugroute für die Drohne zu bestimmen. Konzeptionell ist das eine Form des bekannten Travelling Salesman-Problems, das hier aber dadurch verändert wird, dass den Wegen zwischen den Setzlingen keine festen Kosten zugeordnet werden können. Die Kosten sind immer wieder neu zu bestimmen, um z. B. den aktuellen Wind- und Regenverhältnissen, dem Unterholz etc. Rechnung zu tragen.

Neben der Evaluation geeigneter Algorithmen, die auch den Energieverbrauch der Drohne berücksichtigen, gilt es im Projekt auch, die Schnittstelle zwischen Drohnen, Basisstationen und GIS-Backend-Systemen zu untersuchen. Ziel ist es hierbei, den Drohneneinsatz als durchgängigen Prozess zu betrachten und ihn ressourcenoptimiert auszuführen.

### **Löschdrohnen System zur Waldbrandbekämpfung (PEELIKAN)**

Waldbrände sind Naturkatastrophen mit verheerenden Konsequenzen für die Umwelt und den Menschen. Die Zahl der Wald- und Vegetationsbrände ist durch den fortschreitenden Klimawandel in den letzten Jahrzehnten weltweit stark angestiegen. Ein Grund für uns gemeinsam mit Experten der Feuerwehr ein Löschdrohnen-System zu entwickeln, das die Brandbekämpfung revolutionieren und eine effiziente Ergänzung zu herkömmlichen Löschmethoden darstellen wird.

Von einer mobilen Versorgungsstation fliegt ein Drohnenschwarm zu einem bis zu 5 Kilometer entfernten Brandherd. Gesteuert werden die Drohnen mit Hilfe von Satellitentechnik. Der Abwurf des Löschmittels kann somit zielgenau erfolgen. Der Akkuwechsel und das Auftanken mit Löschmittel funktionieren vollautomatisch. Durch den nahtlosen Drohnenkreislauf können mehr als 140.000 Liter pro Tag zum Brandgeschehen transportiert werden. Die Drohnen sind dabei 24 h nonstop im Einsatz.

Der Drohnenschwarm operiert auch nachts und bei schlechten Sichtverhältnissen. Dabei können die Drohnen auch in munitionsverseuchten Gebieten eingesetzt werden. Allein im Land Brandenburg ist eine Fläche von über 365.000 ha mit Munition belastet. Löschhubschrauber müssen einen Sicherheitsabstand von 1.000 m einhalten, während Einsatzkräfte am Boden diese Bereiche oft gar nicht betreten dürfen.

Die geringen Kosten im Vergleich zu Löschhubschraubern, der Einsatz rund um die Uhr sowie die schnelle Abrufbarkeit ermöglichen einen flexiblen Einsatz und bieten so eine echte Unterstützung für die Einsatzkräfte der Feuerwehr. Unser Löschdrohnen-System ist ein

sicheres, effektives und kostengünstiges Mittel für die Bekämpfung von Wald- und Vegetationsbränden mit geringem Personalbedarf.

Ziel des Forschungsprojekts ist die "Pilothafte Entwicklung und feuerwehrtechnische Erprobung eines Löschdrohnenschwarms zur direkten Vegetationsbrandbekämpfung - PEELIKAN".

([www.peelikan.de](http://www.peelikan.de))

### **Garrulus: Wiederaufforstung und Monitoring geschädigter Waldflächen durch unbemannte Luftfahrzeuge**

Im Verlauf des Projekts **"Garrulus"** soll eine schnelle, zuverlässige und kostengünstige Methode für die Wiederaufforstung und das Monitoring geschädigter deutscher Waldflächen entwickelt werden. Die Direktsaat von Bäumen bietet eine gute Möglichkeit, standortangepasste und damit resiliente Bäume anwachsen zu lassen. Da forstliches Vermehrungsgut nur beschränkt zur Verfügung steht, sollte die Aussaat gezielt an Standorten mit den bestmöglichen Bedingungen erfolgen. Innovative Technologien wie unbemannte Luftfahrzeuge (ugs. Drohnen) und künstliche Intelligenz sollen die Effizienz und Effektivität der Direktsaat durch eine präzise Saatplanung, zielgenaue Drohnensaat und anschließendem Verjüngungsmonitoring praxistauglich machen.

Das Ziel ist es, ein Saatverfahren und Prototypen eines unbemannten Luftfahrzeugs (Saat-UAV) bereitzustellen, das mit einem speziell entwickelten Saatmechanismus ausgestattet ist. Dieses Saat-UAV ist eine Komponente des von uns angestrebten Direktsaatverfahrens. Die zweite Komponente ist ein unbemanntes Luftfahrzeug (Mess-UAV), welches in der Lage ist, effizient umfangreiche Daten in den betroffenen Waldflächen zu erheben.

Im ersten Schritt erfolgt eine Kartierung von einem UAV aus, unter Einsatz einer Vielzahl von Kamerasystemen (RGB, Thermal, Multispektral), Laserscanner sowie Licht- und Abstandssensoren. Die Daten werden automatisch auf Standortmerkmale analysiert und mit Daten aus öffentlichen Quellen, Bildflügen und Satellitendaten angereichert. Eine speziell entwickelte Künstliche Intelligenz wird Erkenntnisse über besonders geeignete Standorte für die Saat bringen und anschließend Daten über das Initialwachstum der Pflanzen liefern. Alle gesammelten Daten werden mit Hilfe eines hochpräzisen GNSS-Systems (RTK-GNSS) in einem geographischen Koordinatensystem verortet, so dass sie zentimetergenau lokalisiert werden können. Schließlich werden sie zusammengeführt und zu einer hochauflösenden Karte sowie einem 3D-Modell verarbeitet, so entsteht ein digitaler Zwilling des Waldbodens. Das daraus entstandene Kartenmaterial quantifiziert die für das Baum- und Pflanzenwachstum wichtigen Standortfaktoren wie Licht, Mikroklima, Nährstoff und Wasserhaushalt sowie den Einfluss von Konkurrenzvegetation.

Zusammen mit Zielvorgaben der forstwissenschaftlichen Expert\*innen und Informationen zum Saatgut (z.B. Art, Keimrate) wird ein optimierter Saatplan berechnet. Das Saat-UAV bringt Saatgutträger gezielt ein gemäß des Saatplans, indem es die Samenträger durch Druckluft in geeigneter Tiefe in den Waldboden einbringt. Der Saatmechanismus enthält hierzu Komponenten und Sensorik zur Berechnung der tatsächlichen Position des gelandeten Samenträgers. Da die Position der Saat bekannt ist, soll das Keimen und anschließende Wachstum durch regelmäßige Datenerhebung z.B. durch das Mess-UAV quantitativ erfasst werden (Monitoring). <https://www.h-brs.de/de/garrulus>

## **Drohngestützte Kulturkontrolle**

Die Fakultät Ressourcenmanagement der HAWK (Göttingen) erprobte in Zusammenarbeit mit den Niedersächsischen Landesforsten im Modul „Einsatz von Drohnen in der Umweltbeobachtung“ die Drohnennutzung zur Kontrolle von Ausfallraten in Forstkulturen. Besonderes Augenmerk lag auf der Treffsicherheit und dem Vergleich der Genauigkeit von manueller Auswertung von RGB- und Multispektralaufnahmen mit einer testweisen automatisierten Auswertung der Bilder, die aus unterschiedlichen Höhen entstanden. Als Kontrolle diente die herkömmliche Erfassung der Ausfallzahlen vor Ort. Die Auswertung ergab bei Höhen von 25 m meist geringere Abweichungen als bei einer Flughöhe von 40 m, die manuelle Erfassung auf Basis der Multispektral-Aufnahmen lieferte die höchste Übereinstimmung. Die automatisierte Auswertung führte im Vergleich zur manuellen zu höheren Abweichungen, da im begrenzten Rahmen der Projektarbeit kein ausreichend umfangreicher und valider Trainingsdatensatz erstellt werden konnte.

