
Beiträge der forstlichen Fernerkundung für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung

Adelheid Wallner, Christoph Straub und Rudolf Seitz

Schlüsselwörter: Nachhaltige Datenquelle, Fernerkundungssysteme, Wald-Offenland-Abgrenzung, Baumartenklassifizierung, Höhenmodellierung, Regionalisierung von Stichprobeninventuren, pixel- und objektbasiert, visuell und semiautomatisch

Zusammenfassung: Die forstliche Fernerkundung blickt auf eine lange Tradition zurück. Seit dem Ende des 19. Jahrhunderts liefert sie forstliche Grundlagendaten, die auch im Rahmen der Diskussion um eine nachhaltige Waldbewirtschaftung von hoher Relevanz sind. Die Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) bearbeitet eine Vielzahl an forstlichen Fernerkundungsprojekten, die sich auf die möglichst automatisierte Erfassung forstlicher Parameter wie zum Beispiel Waldflächenabgrenzung, Baumartenerfassung, Bestandshöhen etc. fokussieren. Die resultierenden Produkte dienen dabei zum Beispiel als Status quo-Aussage der aktuellen Baumartenverteilung im Zusammenhang mit Klimarisikokarten sowie als Hilfsmittel für die forstliche Beratung. Kronenhöhenmodelle ermöglichen die Regionalisierung von Waldinventuren und verbessern so deren Aussagekraft. Erste Untersuchungen zur Detektion von Vitalitätseinschränkungen von Waldbäumen aus Fernerkundungsdaten lassen hoffen, dass die Fernerkundung in Zukunft einen Beitrag zur Waldzustandserhebung liefern könnte. In einem Ausblick werden mögliche Entwicklungsperspektiven der Fernerkundung an der LWF unter Berücksichtigung neuer Sensoren und Verfahren aufgezeigt und deren Anwendungsbereiche beleuchtet.

Die forstliche Fernerkundung beschäftigt sich im Wesentlichen mit der Bereitstellung von Datengrundlagen, die gerade auch im Hinblick auf die Nachhaltigkeitsbetrachtung eine Planungs- und Entscheidungsbasis bieten. Dies betrifft im Rahmen der Beratung der Waldbesitzer zur Verbesserung der nachhaltigen Waldbewirtschaftung sowohl ökologische als auch ökonomische Aspekte.

Der Einsatz von Fernerkundungstechnik in der Forstwirtschaft besitzt eine lange Tradition. Im Jahre 1887 wurde im Berliner Tageblatt die Nutzung von Luft-

bildern von einem Forstmann erstmals erwähnt (Huss 1984). In den 1950er Jahren startete die Satellitenbild-Fernerkundung mit relativ grober Auflösung für großflächige Aussagen, die in Kombination mit hochauflösenden Luftbildern für vertiefende Detailinterpretationen die Möglichkeit bietet, langjährige Zeitreihen zu erstellen und zu analysieren. Durch diese Form der »Veränderungsdetektion« liefert die Fernerkundung einen wichtigen Beitrag im Bereich des Monitorings für die nachhaltige Bewirtschaftung unserer Wälder. Bereits seit Beginn der Waldschadensdiskussion in den 1980er Jahren verwendet die Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) Fernerkundungsdaten wie Luftbilder und Satellitendaten, um die unterschiedlichsten Fragestellungen zu bearbeiten. Die Möglichkeit, zeitnah den Status quo großer Flächen wahlweise mit geringer oder höchster Auflösung dokumentieren zu können und dabei die Informationen unterschiedlicher spektraler Kanäle nutzen zu können, ließ die Fernerkundung zu einem wichtigen Werkzeug werden. Bedingt durch die starke art- bzw. vitalitätsspezifische Reflexion der Vegetation im Bereich des nahen Infrarots, begannen die forstlichen Akteure, sich vermehrt auf Luftbilder dieser Darstellungsart sowie entsprechende Satellitendaten zu spezialisieren.

Aktuelle Fernerkundungsprojekte an der LWF

Derzeit laufen an der LWF eine große Anzahl unterschiedlicher Fernerkundungsprojekte, die wichtige Datengrundlagen für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung liefern. Die forstliche Fernerkundung an der LWF basiert auf Sensorsystemen, die an Bord von Satelliten die Erde umkreisen (spaceborne) sowie auf Kamerasystemen in Form von optischen Kameras und Laserscannern, die an Bord von (Klein-) Flugzeugen digitale Daten liefern (airborne). Terrestrische Fernerkundungssysteme wie beispielsweise terrestrische Laserscanner spielen aufgrund ihrer derzeit noch mangelnden Praxistauglichkeit für die Verwendung innerhalb der Forstverwaltung aktuell keine Rolle.

In den letzten Jahren konzentrierte sich der technische Fortschritt im Bereich der Luftbilder auf die Etablierung digitaler Luftbildkameras unterschiedlicher Bildformate, die im Rahmen landesweiter Bildflugkampagnen eingesetzt werden. Die Aufnahme der vier Kanäle »Blau«, »Grün«, »Rot« und »nahes Infrarot« hat sich dabei als Standard durchgesetzt, eine Farbtiefe von 12 Bit und eine Auflösung von 20 cm stellen die Regel dar.

Die aktuellen Satellitensysteme zeichnen sich durch eine hohe Wiederholungsfrequenz (1–10 Tage) ihrer Aufnahme sowie verschiedene (bis zu ca. 260 Kanäle) spektrale Abbildungseigenschaften aus. Die modernen Sensoren werden an der LWF zur Beantwortung verschiedener Anforderungen aus der forstlichen Praxis zunächst im Rahmen von Projekten herangezogen.

So konnten durch das Kooperationsprojekt *EUS-FH (Entscheidungs-Unterstützungs-System für die Forst-Holz-Kette)* mit der Technischen Universität München (TUM) sowie dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) wichtige Erkenntnisse über die Parametererfassung von Waldflächen erlangt werden. Im Vordergrund dieses Projektes stand die Analyse des Nutzungspotenzials von Satellitensystemen wie dem optischen Rapid-Eye-System und dem Radarsatelliten TerraSAR-X. Hierbei lag der Fokus auf der Ableitung forstlicher Parameter für die forstliche Betriebsplanung (Schneider et al. 2013). Zunächst wurde das Potenzial für die Abgrenzung von Waldflächen untersucht (Rappl et al. 2011). Die Ableitung forstlicher Parameter wurde anhand von Schätzverfahren erforscht, um diese für den Wachstumssimulator SILVA (Pretzsch 2000) bereitstellen zu können. Ein nächster Schritt testete die Verwendbarkeit dieser Satellitendaten für biotische und abiotische Kalamitäten. Die Detektion biotischer Kalamitäten, in diesem Falle der Eichenprozessionsspinner (*Thaumetopoea processionea*) im Steigerwald, zeigte auch Grenzen für beide Systeme auf. Als abiotische Kalamität wurde hierbei die zeitliche Verfügbarkeit und Erfassbarkeit von Sturmschadensflächen im Bayerischen Wald untersucht. Ergebnisse der Studie finden sich sowohl in Elatawneh et al. (2012) als auch in Rappl et al. (2012).

Hauptziel des aktuellen Projektes »Semi-automatische Parameterextraktion aus digitalen Luftbildern (SAPEX-DLB)« ist die Entwicklung innovativer und effizienter Methoden zur automatisierten, flächendeckenden Informationsgewinnung für die forstliche Beratung auf Grundlage aktuell verfügbarer amtlicher Luftbilder. In diesem Zusammenhang werden unter anderem Metho-

den zur Wald-Nichtwald-Trennung, Baumartenklassifizierung sowie zur Regionalisierung von Waldinventuren mit hochaufgelösten Fernerkundungsdaten entwickelt. Die bisherigen Ergebnisse belegen, dass die amtlichen Luftbilder der regelmäßigen Bayernbefliegung eine geeignete Datengrundlage zur Erfassung von zahlreichen waldkundlichen und waldschutzrelevanten Kenngrößen sind. Die Bilder eignen sich sowohl für visuelle Interpretationen (in 2D und 3D) als auch für automatisierte Auswertungen (Straub und Stepper 2013).

Als einjährige Studie beschäftigt sich das Projekt *SAPEX-SAT*¹ mit der Problematik der Erstellung von Oberflächenmodellen (analog zu SAPEX-DLB), jedoch auf Satellitenebene.

Die im Rahmen der Diskussion über die Auswirkungen des Klimawandels auf die bayerischen Wälder durchgeführten Untersuchungen des Forschungsprojektes KLIP 4² resultieren in der Bereitstellung von Klimarisikokarten. Diese Potenzialdarstellungen benötigen eine Aussage über das tatsächliche Vorkommen der betroffenen Baumart auf der Fläche. Im Rahmen des Projektes *TreeIdent_Fi/Kie*³ wird 2013 angestrebt, die Verbreitung der besonders gefährdeten Baumarten Fichte und Kiefer in einem 100×100m Raster bayernweit darzustellen.

Der Vitalitätszustand der Wälder wird von 2013 bis 2015 im Rahmen des Projektes *VitTree*⁴ untersucht. In diesem dreijährigen Projekt liegt das Augenmerk auf der Fragestellung, ob Vitalitätsveränderungen von Waldbäumen in Satellitendaten zu identifizieren sind, bevor diese terrestrisch erfasst werden können. Hierzu finden die Daten des Sensorsystems »WorldView 2« Verwendung.

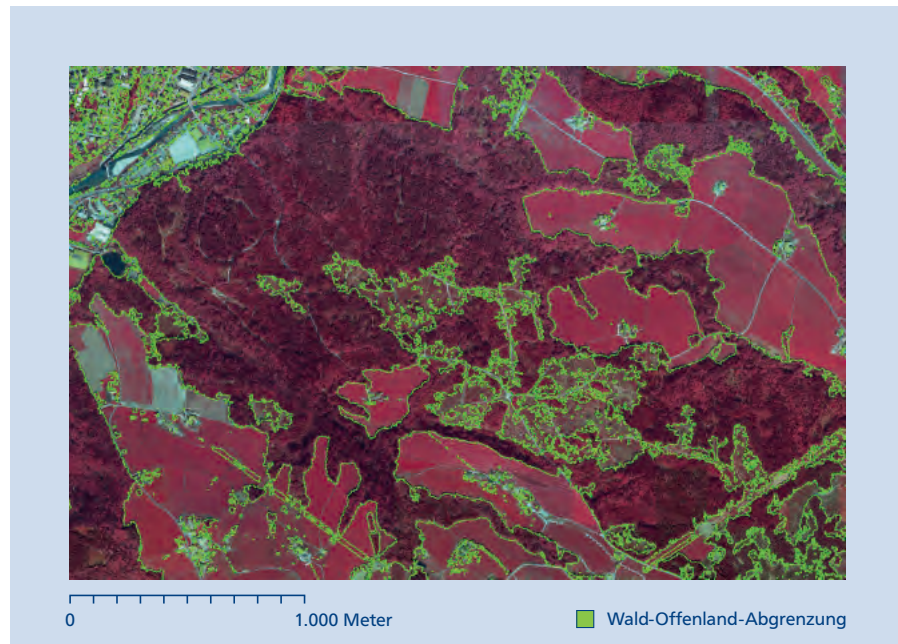
1 SAPEX_SAT: Regionalisierung von großflächigen Inventurdaten (BWI)

2 KLIP 4: Flächendeckende Prognose hinsichtlich der Baumarteneignung unserer Standorte im Jahr 2100

3 Treedent_Fi/Kie: Identifikation anpassungsnotwendiger Fichten- und Kiefernbestände auf Basis von digitalen Standortinformationen und Satellitendaten

4 VitTree: Erfassung der Vitalität von Waldbäumen aus WorldView 2-Daten

Abbildung 1:
Ergebnis einer Wald-
Offenland-Abgrenzung für
das Untersuchungsgebiet
»Stadtwald Traunstein«



Derzeitige Produkte der forstlichen Fernerkundung als Grundlage für die nachhaltige Waldbewirtschaftung

Die an der LWF erforschten Methoden zur Erstellung der für die nachhaltige Waldbewirtschaftung relevanten Produkte orientieren sich dabei an den aus der forstlichen Praxis artikulierten Informationsdefiziten. In diesem Zusammenhang führten Felbermeier et al. (2010) eine umfangreiche Bedarfsanalyse zum Einsatz der Fernerkundung in der Bayerischen Forstverwaltung durch. Die Studie erfolgte auf der Grundlage von Literaturstudien, Befragungen von Experten sowie einer Umfrage unter den Mitarbeitern der Bayerischen Forstverwaltung an den Ämtern für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (ÄELF). Es konnten dabei zahlreiche potenzielle Einsatzbereiche für die Fernerkundung in der Bayerischen Forstverwaltung identifiziert werden. Großer Bedarf wurde bei der Verbesserung der Datengrundlage für die Beratung und Förderung der Waldbesitzer gesehen⁵.

Umsetzung einer fernerkundungsbasierten »Wald-Offenland-Abgrenzung«

Zur Erfassung von Waldflächen mit Fernerkundungsdaten ist eine geeignete Definition, basierend auf fernerkundlich erfassbaren Kenngrößen von Nöten. Das Waldgesetz von Bayern liefert im Rahmen seiner Walddefinition keine fernerkundungstaugliche Beschreibung von Wäldern. Waldbauliche Kriterien, die zur Abgrenzung der Waldfläche von der Offenlandfläche notwendig sind, stellen der Beschirmungsgrad, das Waldinnenklima und die Bodenvegetation (Burschel und Huss 1997) dar. Weitere Abgrenzungsmerkmale sind die Flächengröße, die Höhe der Bäume und das Verhältnis Länge zu Breite der betrachteten Fläche (Bacher 2011). Aufgrund der mangelnden Walddefinitionen ist die Abgrenzungsdefinition von Lebensraumtypen nach der Fauna-Flora-Habitat (FFH)-Richtlinie in Bayern ein brauchbarer Richtwert; Aspekte der luftbildgestützten Fernerkundung kommen hier bereits zum Einsatz. Im Handbuch der Lebensraumtypen nach Anhang I der FFH-Richtlinien in Bayern (LFU und LWF 2010) wurden für die Kartierung von Wäldern, die »als von Bäumen geprägte Gesellschaften« verstanden werden, Kartierungsanweisungen herausgegeben, die Erfassungsschwellen und Mindestflächen beinhalten, die durch Fernerkundungssysteme erfasst werden können.

⁵ ST 237: Bedarfsanalyse zum Einsatz der Fernerkundung in der Bayerischen Forstverwaltung

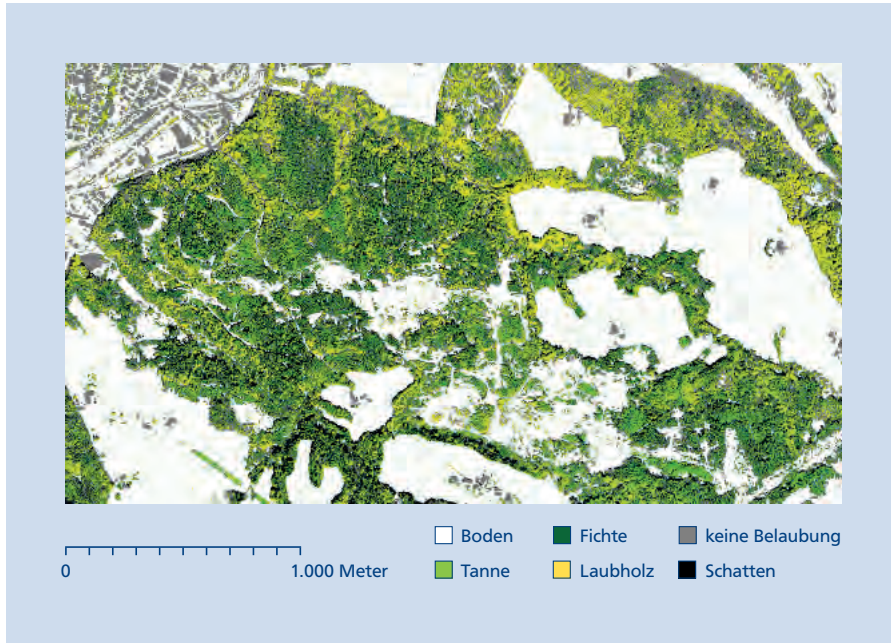


Abbildung 2:
Ergebnis einer pixelweisen Maximum-Likelihood-Klassifikation: eine erste Baumartenklassifikation für das Untersuchungsgebiet »Stadtwald Traunstein«

Eine fernerkundungsbasierte Abgrenzung des Waldes zum Offenland (Abbildung 1) hin erfolgt im Rahmen der aktuellen Erfassung von FFH-Lebensraumtypen im Hochgebirge durch den kombinierten Einsatz von Kronenhöhenmodellen (KHM) und automatisierter Baumartenklassifikation. In Zweifelsfällen ist jedoch stets die abschließende Begutachtung eines forstlichen Experten im Rahmen einer 3D-Luftbildinterpretation notwendig.

Automatisierte Erfassung der Baumartenverteilung in Bayern

Das Wissen über das tatsächliche Vorkommen der Baumarten im nicht-staatlichen Waldbesitz Bayerns beschränkt sich meist auf lokales Expertenwissen. Derzeit existiert keine Übersichtsinformation zu diesem Thema. Das traditionelle Vorgehen der Baumartenunterscheidung anhand von Fernerkundungsdaten fußt auf der visuellen Interpretation digitaler Luftbilder an 3D-Arbeitsplätzen. Dies erfordert sowohl eine spezielle Hard- und Softwareausstattung als auch speziell geschulte, erfahrene Luftbildinterpreten. Für großflächige, wirtschaftlich vertretbare Auswertungen sind daher automatisierte Klassifikationsverfahren nötig. Die Baumartenklassifikation unter Verwendung optischer Fernerkundungsdaten (z.B. digitaler Luftbilder oder Satellitendaten) kann automatisiert mit Hilfe von zwei verschiedenen Ansätzen, nämlich pixelbasiert oder objektbasiert, durchgeführt werden. Die pixelbasierte Methode verwendet für die weitere Analyse jeweils die

durch die Reflexion der Sonneneinstrahlung erzeugten, einzelnen Farbwerte des beobachteten Landschaftsausschnitts auf der Ebene der Kamerapixel, wie sie in Abbildung 2 umgesetzt wurde und eine Klassifikation in sechs Klassen zeigt. Beim objektbasierten Ansatz hingegen werden aufgrund ihrer Farbwerte ähnliche Pixel zu Objekten zusammengefasst (Baatz und Schäpe 2000). Beiden Ansätzen ist gemein, dass Trainingsgebiete, d.h. möglichst homogene Bestände, deren Lage und Baumartenzusammensetzung bekannt ist, zum Training von Klassifikations-Algorithmen verwendet werden. Für den Klassifikations-Algorithmus stehen verschiedene bewährte Modelle wie zum Beispiel Maximum Likelihood, Random Forest und Nearest Neighbour (Lillesand et al. 2004) zur Verfügung.

Ziel ist es, Übersichtsinformationen über die aktuelle Verteilung der Baumarten in Bayern für die Waldgebiete zu erhalten, in denen diese Informationen nicht aus Ergebnissen von Forstinventuren oder Forsteinrichtungswerken vorliegen. Der Detaillierungsgrad und die Genauigkeit der Ergebnisse sind stark von der Qualität (d.h. Farbtiefe, Kontrast und Homogenität) des verwendeten Eingangsdatenmaterials abhängig.

Die im Moment aus dem Projekt SAPEX-DLB vorliegenden Erkenntnisse belegen, dass bei guter Qualität der Eingangsdaten (d.h. Orthophotos und Trainingsdaten) die Hauptbaumarten theoretisch mit für die forstliche Praxis ausreichender Qualität automatisiert zu erfassen sind (Abbildung 2). Ergebnisse aus der

Vorstudie »TreelDent«⁶ ergeben ein vergleichbares Bild unter Verwendung optischer Daten des Satellitensensors »WorldView 2«. Als erste praxistaugliche Übersicht über die Baumartenverteilung in Bayern wird somit im Rahmen des Projektes »TreeIdent_Fi/Kie« bis Anfang 2014 eine flächendeckende Karte über das aktuelle Vorkommen der Fichte und Kiefer in Bayern mit einer Auflösung von einem Hektar erstellt. Sie soll als Planungsgrundlage zunächst unter anderem zur Ergänzung der Klimarisikokarten des KLIP4-Projektes dienen.

Erstellung und Informationsgewinn aus fernerkundungsbasierten »Höhenmodellen«

Höheninformationen aus Fernerkundungsdaten sind in der Regel die wichtigsten Variablen zur Schätzung von dendrometrischen Kenngrößen, um beispielsweise den Holzvorrat oder die Biomasse abschätzen zu können. Höhenmessungen können sowohl über »aktive« Fernerkundungsverfahren (d.h. der Sensor strahlt aktiv Energie aus und misst die Reflexion von der Oberfläche, z. B. Laserscannermessung) als auch über »passive« Fernerkundungsverfahren (d.h. der Sensor verwendet die Sonne als Energieemittent, z. B. Luftbildaufnahme) gewonnen werden.

In den vergangenen Jahren wurde in zahlreichen Forschungsprojekten insbesondere die flugzeuggetragene Laserscannermessung (englisch: Airborne Laser Scanning) zur Ableitung von hochaufgelösten Höheninformationen in Waldgebieten und zur Optimierung von Waldinventuren untersucht. Laserscanner haben gegenüber anderen Fernerkundungsverfahren den entscheidenden Vorteil, dass sie bei reich strukturierten Objekten (wie beispielsweise Vegetation) mehrere Echos der rückgestreuten Laserenergie detektieren können. Dadurch ist eine Trennung von ersten Reflexionen, Zwischenreflexionen und letzten Reflexionen möglich. Die ersten Reflexionen erfolgen häufig von der Kronenoberfläche und eignen sich deshalb zur Ableitung eines Modells der Baumkronenoberfläche, während die letzten Reflexionen mit höherer Wahrscheinlichkeit als »Bodentreffer« zu klassifizieren sind. Dies gilt besonders für Befliegungen im laubfreien Zustand. Auf Grundlage der »Bodentreffer« können mit geeigneten Filteralgorithmen hochgenaue Geländemodelle des Waldbodens berechnet werden (z.B. Lindenberger 1993; Kraus und Pfeifer 1998).

Neben Untersuchungen zur flugzeuggetragenen Laserscannermessung konnte zum Beispiel in den Arbeiten von Hobi und Ginzler (2012), Straub und Seitz (2011), Baltavias et al. (2008) oder Korpela und Anttila (2004) das Potenzial von stereoskopischen Luftbildern und auch Satellitendaten zur automatisierten Generierung hochaufgelöster Oberflächenmodelle über Image Matching Verfahren in Waldgebieten aufgezeigt werden. Beim Image Matching wird hierbei die Baumkronenoberfläche vermessen. Nur bei größeren Lücken im Kronendach ist auch die Erfassung des Waldbodens möglich. Steht zusätzlich zu den Luftbildern oder Satellitendaten ein Geländemodell vom Waldboden aus Laserscannermessung zur Verfügung, kann aus der Differenz von Oberflächenmodell und Geländemodell ein KHM abgeleitet werden (Ginzler 2012). Je nach Auflösung der Fernerkundungsdaten können hierbei Modelle mit unterschiedlichem Detailierungsgrad berechnet werden. Abbildung 3 zeigt beispielhaft verschiedene KHM berechnet aus Luftbildern, Satellitendaten oder Laserscannerdaten. Das Projekt SAPEX-DLB der LWF bestätigt seit nunmehr zwei Jahren eindrucksvoll, dass die aus den Luftbildern der amtlichen Bayernbefliegung erzeugten KHM für die Ableitung forstlich relevanter Parameter wie zum Beispiel Bestandeshöhen, Lückigkeit und horizontale Schichtigkeit verwendet werden können. Als Resultat können somit großflächige, modellhafte Übersichtsaussagen über beispielsweise die Höhen, die Lückigkeit, den Beschirmungsgrad sowie die Vorräte von Waldflächen erstellt werden, die im Rahmen von Planungsprozessen im Bereich der nachhaltigen Waldbewirtschaftung von großer Bedeutung sind.

Erhöhung der Aussagekraft forstlicher Stichprobeninventuren durch »fernerkundungsbasierte Regionalisierung«

Die Verwendung verschiedener Fernerkundungsdaten zur Regionalisierung von Stichprobeninventuren ist ein sehr aktuelles Forschungsfeld in der forstlichen Fernerkundung. Unter Regionalisierung wird hierbei die Übertragung von Stichprobenmessungen einer Waldinventur auf die gesamte Waldfläche mittels Hilfsinformationen aus Fernerkundungsdaten verstanden. Sind ausreichend aktuelle und georeferenzierte Inventurpunkte (z. B. permanente Stichprobenpunkte einer Betriebsinventur im Staatswald oder der Bundeswaldinventur [BWI]) verfügbar, so können Zusammenhänge zwischen Fernerkundungsmerkmalen (z. B. abgeleitet aus KHM) und dendrometrischen Kenngrößen an den Stichprobenpunkten untersucht und quantifiziert wer-

⁶ TreelDent: Semi-automatische Erfassung der Hauptbaumarten aus »WorldView 2-Daten«

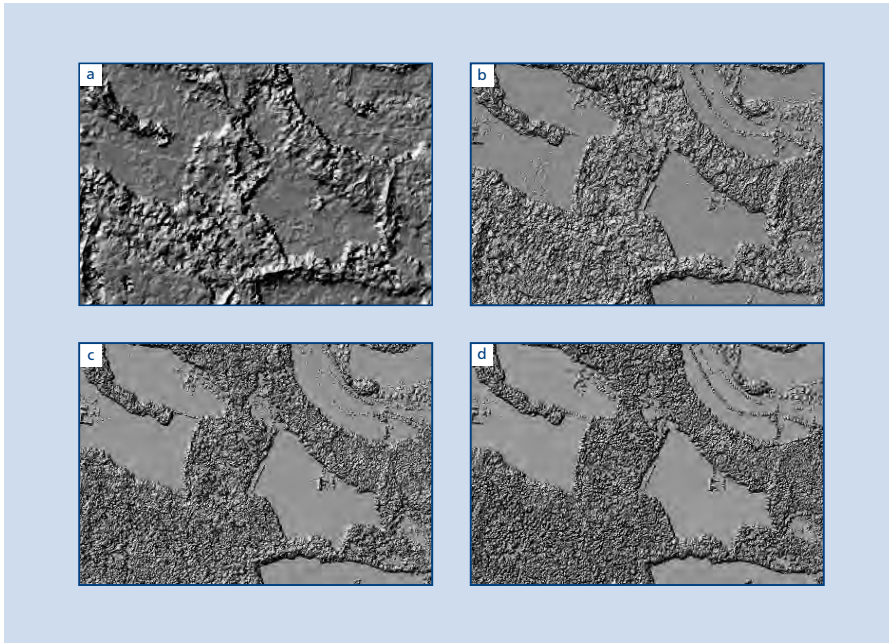


Abbildung 3:
Gegenüberstellung der KHM aus Fernerkundungsdaten unterschiedlicher Auflösungen und Sensoren;
a: KHM aus CartoSat Satellitendaten Auflösung 5 m;
b: KHM aus WorldView 2 Satellitendaten Auflösung 1 m;
c: KHM aus Stereo-Luftbilddaten Auflösung 1 m;
d: KHM aus Laserscannerdaten Auflösung 1 m.

den. Diese Zusammenhänge sind, wie in Næsset (2002) beschrieben, zur Schätzung von Kenngrößen sowohl für die gesamte Waldfläche als auch für einzelne Waldbestände nutzbar. In diesem Zusammenhang werden häufig die folgenden Vorgehensweisen unterschieden (Hyypä et al. 2009):

- Schätzung von Einzelbaumkenngrößen (Einzelbaumverfahren)
- Schätzung von Kenngrößen auf Inventurpunktebene (plotweises Verfahren)

Beim Einsatz von Einzelbaumverfahren wird vorausgesetzt, dass einzelne Baumkronen in den Fernerkundungsdaten zuverlässig abgegrenzt werden können. Im Idealfall kann hierfür ein automatisiertes Segmentierungsverfahren verwendet werden. Automatisierte Methoden der Kronensegmentierung sind zum Beispiel in Persson et al. (2002), Koch et al. (2006) oder Kaartinen et al. (2012) beschrieben. Zusätzlich muss eine ausreichende Anzahl von Referenzbäumen terrestrisch hinreichend genau lokalisiert und vermessen werden, um diese den abgegrenzten Kronensegmenten in den Fernerkundungsdaten zuverlässig zuzuordnen. Aufgrund dieser Voraussetzungen für Einzelbaumverfahren werden plotweise Verfahren als robuster angesehen. Zusätzlich gibt es Ansätze, die als Kombination aus Einzelbaum- und plotweisem Verfahren beschrieben werden können (sogenannte semi-individual tree crown-Verfahren), um die genannten Voraussetzungen für Einzelbaumverfahren teilweise zu umgehen. Hierbei können einem abgegrenzten Segment nicht immer

nur ein Baum, sondern auch mehrere terrestrisch gemessene Bäume zugeordnet werden (Breidenbach et al. 2010).

In den letzten Jahren wurden insbesondere flugzeuggetragene Laserscannerdaten zur Regionalisierung forstlicher Kenngrößen untersucht (z. B. Næsset 2002; Hollaus et al. 2007; Breidenbach 2008), welche in Norwegen bereits seit 2002 operational bei Waldinventuren eingesetzt werden (Næsset 2004 und 2007). Aktuelle Untersuchungen im Projekt SAPEX-DLB der LWF belegen zusätzlich die Eignung von KHM aus amtlichen Stereo-Luftbildern der Bayernbefliegung zur flächendeckenden Schätzung von Oberhöhen, des Holzvorrats sowie der Grundfläche pro Hektar (Straub und Seitz 2012; Straub et al. 2013). Außerdem erscheinen derzeitige Forschungsansätze zur Schätzung von Holzvorräten mit Stereo-Satellitendaten im Rahmen des Projektes SAPEX-SAT sehr vielversprechend. Durch eine Verknüpfung von Fernerkundungsdaten mit terrestrischen Stichprobenpunkten könnten dadurch in Zukunft flächendeckende Schätzungen verschiedener forstlicher Kenngrößen für Planungszwecke ermöglicht werden. Flächige Informationen wären in der forstlichen Praxis unter anderem für die einzelbestandsweise Planung im Rahmen der Forsteinrichtung des Staatswaldes als auch für forstliche Beratungsaufgaben im Privatwald von entscheidendem Vorteil. Darüber hinaus könnte eine Übertragung der BWI-Ergebnisse auf größere Planungsregionen qualitativ höherwertige Aussagen über die Verfügbarkeit des Rohstoffes Holz liefern.

Bereitstellung von Aussagen über die »Vitalität von Wäldern«

Der Gesundheitszustand der Wälder ist im Rahmen der Nachhaltigkeitsbetrachtung von entscheidender Bedeutung. Neben der akuten Schädigung durch tierische Schädlinge ist auch ein langfristig zu beobachtender Vitalitätsrückgang von Wäldern ein alarmierendes Zeichen. Dies trifft vor dem Hintergrund des Klimawandels in verstärktem Maße zu und gefährdet den Fortbestand von Wäldern insbesondere auf für sie ungeeigneten Standorten.

Aus Sicht der Fernerkundung stellen sich Vitalitätseinbußen von Waldbäumen durch den Verlust oder die physiologische Veränderung ihrer Assimilationsorgane dar. Bislang wurde dies im Rahmen aufwendiger visueller Analysen von Experten in optischen Daten, vor allem aus Luftbildbefliegungen vorgenommen. Da sich der Rückgang der Baumvitalität anhand der Reflexionsintensität in besonders starkem Maße im Bereich der Wellenlänge des nahen Infrarots sowie der sogenannten »Red Edge« (Übergang vom roten zum infraroten Bereich der spektralen Reflexion) manifestiert, wurden hierzu entsprechende Daten untersucht. Neben der Dokumentation des Vitalitätstrends der Baumarten rückt insbesondere bei der Fichte (*Picea abies*) die Problematik des Befalls durch Borkenkäfer in den Fokus der forstlichen Praxis. Das Projekt »Vit-Tree« der LWF befasst sich aus diesem Grund mit der Problematik der fernerkundungsbasierten Früherkennung von Vitalitätseinschränkungen an Fichte und Eiche. Die Forschungshypothese lautet hierbei, dass die Disposition von Fichten gegenüber Borkenkäferbefall in direktem Zusammenhang mit ihrer Vitalität steht. Untersuchungsgegenstand ist daher, in wieweit und wie zuverlässig der Gesundheitszustand einzelner Fichten oder von Fichtenbeständen aus Satellitendaten oder digitalen Luftbildern erfassbar ist. Fernziel ist es hierbei, durch konkrete Hinweise auf disponierte Bäume bzw. Bestände die Beobachtung der Ausbreitung zum Beispiel des Borkenkäfers im Rahmen der vor-Ort-Kontrolle zu unterstützen. Hinweise auf mögliche Befallsherde sollen dabei gegeben werden, bevor man diese über terrestrische Aufnahmen erfassen kann.

Wie kann die forstliche Fernerkundung die forstliche Nachhaltigkeitsbetrachtung zukünftig vermehrt stärker unterstützen?

Erkenntnisgewinn aus neuen Fernerkundungs-Datenquellen

Der Schwerpunkt der Entwicklung der Fernerkundungssysteme liegt vorwiegend im Bereich der Sensorik. Neben einer Erhöhung der räumlichen Auflösung wird hierbei auch eine Erhöhung der qualitativen spektralen Erfassung durch eine Einbeziehung einer Vielzahl an Spektralkanälen angestrebt. Die Einführung von digitalen vierkanaligen Luftbildkameras sowie von spaceborne Hyperspektral-Sensoren mit mehr als 260 Kanälen bestätigt dies. Darüber hinaus kann eine Kontinuität in der Bereitstellung gebräuchlicher Satellitendatenprodukte verzeichnet werden (vgl. die Fortführung der Landsat-Mission durch die Landsat Continuity Mission Landsat 8). In zunehmendem Maße liefern aktuelle, satellitenbasierte Sensoren wichtige Datengrundlagen für die Erfassung und Analyse von Vegetationsflächen durch die Bereitstellung von Daten aus dem für Vegetationsuntersuchungen wichtigen spektralen Bereich des sichtbaren Lichts sowie des nahen Infrarots. Ein weiterer Trend ist die Entwicklung kleinerer, agilerer Satelliten mit einem Gesamtgewicht von ≤ 1 t. Dies deutete sich bereits bei der Planung der fünf RapidEye-Satelliten ab und setzt sich zum Beispiel bei den CNES-Sensoren Pleiades sowie den Sensoren für die Disaster Monitoring Konstellation (DMK ist ein Verbund von Erdbeobachtungssatelliten) fort. Der Vorteil dieser Systeme liegt neben ihrer relativ kostengünstigen Entwicklung und dem Transport auch in einer höheren Flexibilität bezüglich der Programmierung ihrer Flugbahn. Durch die gleichzeitige Installation mehrerer Satelliten im Rahmen eines Programms (z. B. fünf RapidEye, zwei Pleiades, je zwei SENTINEL etc.) wird eine nahezu täglich wiederkehrende Datenaufnahme ermöglicht.

Neben den digitalen Luftbildkameras, die seit vielen Jahren in diesem forstlich relevanten Spektralbereich Daten liefern, entwickeln sich somit satellitenbasierte, kommerzielle Sensoren zunehmend zu einer verlässlichen, nachhaltigen Datenquelle. Dies umso mehr, als moderne Systeme in vermehrtem Umfang Stereodaten liefern können, die zur Berechnung von Oberflächenmodellen benötigt werden.

Für die Erstellung hoch präziser, großflächiger Geländemodelle werden in nächster Zeit zunehmend die Ergebnisse der deutschen Radarsatellitenmission TanDEM-X (TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement) herangezogen werden, die mittels »Syn-

thetic Aperture Radar« (SAR) im X-Band die Erdoberfläche stereographisch vermessen soll. Das System aus zwei nahezu baugleichen Satelliten verfügt über ein abgestuftes Auflösungsvermögen der Bodenbedeckung von 1 m, 3 m und 16 m bei einer Höhenauflösung von besser als 2 m.

In der Diskussion um CO₂-Senken und der Verfügbarkeit von Biomasse vor dem Hintergrund des Klimawandels wird der weiteren Erforschung der Möglichkeiten des sogenannten »Large Footprint Laserscannings« große Bedeutung auf globaler Ebene zugewiesen. Dabei handelt es sich um satellitenbasierte Laserscanning-Sensoren, die große Gebiete bei relativ geringer Auflösung abdecken, so sind großflächige Aussagen über die Veränderung von zum Beispiel weitläufigen Moorkomplexen möglich.

Das europäische Erdbeobachtungsprogramm Copernicus⁷ (vormals GMES: Global Monitoring for Environment and Security) besteht aus einem komplexen Datenerfassungssystem auf der Basis unter anderem von Airborne- und Spaceborne-Sensoren. Die erfassten Daten werden zentral prozessiert und mittels »Services« den Anwendern zur Verfügung gestellt. Öffentliche Behörden und politische Entscheidungsträger sind hierbei die Hauptadressaten. Bezüglich der verwendeten Satellitensysteme fokussieren sich die Bemühungen auf die Installation der sogenannten SENTINEL-Satelliten. Insbesondere der optische SENTINEL 2, der 2013 ins All befördert werden soll, verspricht Daten mittlerer Auflösung (10–60 m) in 13 spektralen Bändern. Darunter befinden sich mehrere, für die Erfassung von Vegetation besonders interessante Bandkombinationen. Derzeit ist geplant, die Daten den Behörden kostenlos zur Verfügung zu stellen. Aktuell stimmt die LWF ihre Fernerkundungsvorhaben dergestalt ab, dass die entwickelten Methoden ebenfalls mit Daten der SENTINEL-Flotte umsetzbar sind.

Anwendung neuer Methoden der Dateninterpretation

Die oben erwähnte Verfügbarkeit von hochauflösenden, mehrkanaligen Fernerkundungsinformationen für große Flächen mit hoher Wiederholungsfrequenz stellt hohe Anforderung an das Datenmanagement und die Analysemethoden. Den stetig wachsenden Anforderungen im Bereich des Datenmanagements begegnet die LWF mit der Bereitstellung geeigneter Soft- und Hardwarelösungen. Die Umsetzung wird im Rahmen einer eigens hierfür zuständigen Planstelle »Rasterdatenmanagement« sichergestellt.

⁷ <http://copernicus.eu/pages-principales/overview/copernicus-in-brief/>

Die wachsenden Möglichkeiten der aktuellen und zukünftigen Fernerkundungsdaten bedingt auch eine Anpassung der Analysemethoden. Zunehmend wird eine Kombination pixel- und objektbasierter Klassifikationsalgorithmen anzuwenden sein. Methoden des »maschinellen Lernens« wie zum Beispiel neuronale Netze werden dazu beitragen, die notwendigen Prozessschritte weiter zu automatisieren.

Ein weiterer Aspekt der aktuellen forstlichen Fernerkundungsforschung, der zukünftig einen Beitrag zu Erhöhung der Klassifikationsgenauigkeit im Rahmen der Differenzierung von Waldökosystemen liefern kann, ist die nähere Betrachtung der bidirektionalen Reflektanzverteilungsfunktion. Sie beschreibt das unterschiedliche Reflexionsverhalten von (Vegetations-) Oberflächen in Abhängigkeit des Einfallswinkels der Sonne. Durch die Einbeziehung dieser Effekte könnte die Klassifizierungsgenauigkeit von Waldtypen zukünftig gesteigert werden.

Zukünftige Produkte: fernerkundungsbasierte Erfassung von Veränderungen des Ökosystems Wald

Im Rahmen von Nachhaltigkeitsbetrachtungen gewinnt die Erfassung von Veränderungen der Wälder (change detection) zunehmend an Bedeutung. Dies umfasst sowohl die Gewinnung und Dokumentation von langfristigen Veränderungen wie Vitalität und dendrometrische Kenngrößen wie zum Beispiel die Biomasse. Die Etablierung der oben beschriebenen Verfahren im Rahmen der forstlichen Bewirtschaftung stellt eine der Kernaufgaben der forstlichen Fernerkundung dar.

Zur Bewältigung von Kalamitäten, zum Beispiel Windwurf, mangelt es an einem unmittelbar umsetzbaren, praxisbezogenen System zur Bereitstellung von Basisdaten aus der Fernerkundung, das der forstlichen Praxis eine zeitnahe Unterstützung im Rahmen der Aufarbeitung bietet. Die wichtigsten Kriterien hierfür werden die Geschwindigkeit der Datenverfügbarkeit (lag time) sein sowie Datenkosten und der im Rahmen der Interpretation anfallende Aufwand. Neue Sensoren (u. a. WorldView 2) sowie die geplanten Systeme SENTINEL 1 (Mikrowellen) und 2 (optisch) werden auf ihre Verfügbarkeit und Verwendbarkeit getestet. Dies beinhaltet auch eine Gegenüberstellung mit Ergebnissen älterer Systeme. Abschließend erfolgt die Erstellung einer besitzartenübergreifenden Handlungsanweisung, die vor dem Hintergrund der einzelnen Szenarien der Forstverwaltung und der Bayerischen Staatsforsten (BaySF) die bedarfsgerechte Nutzung der jeweils optimalen Fernerkundungssysteme ermöglicht. Ziel ist die zeitnahe Bereitstellung GIS-basierter Datenebenen, die quantitative Aussagen über Art und Ausmaß (betroffene

Flächen und angefallene Holz mengen) der Schäden liefern und gegebenenfalls rasch aktualisierbar sind. Dies kann in eine GIS-gestützte Prozesskette münden, die sämtliche Stadien der Aufarbeitung der anfallenden Holz mengen abdeckt und die nötigen digitalen Grundlagendaten für eine Vielzahl weiterführender Überlegungen der Entscheider liefert. So kann beispielsweise die Planung und das Management von Holz lagerplätzen durch die Abschätzung des baumartengruppenweisen Holzanfalls unterstützt werden. Ferner können aus diesen Daten lagegetreue Flächeninformationen über die zu erwartenden Flächen der Wiederaufforstung, den benötigten Pflanzenbedarf sowie der damit verbundenen Arbeitsplanung gewonnen werden.

Die genannten Informationsprodukte werden in aktualisierbarer Form erstellt und über zentrale GIS (z. B. BayWIS) den forstlichen Praktikern zur Unterstützung einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung zur Verfügung stehen.

Die genannten Methoden und Produkte weisen eine hohe Komplexität auf. Die Einbeziehung externer Dienstleister zur Bearbeitung von Teilarbeitsschritten ist daher stets im Rahmen von Wirtschaftlichkeitsanalysen im Verlauf der Projektentwicklung zu überprüfen. Aus diesem Grund ist es zukünftig von wachsender Bedeutung, eine intensive Vernetzung zu anderen Forschungspartnern zu unterhalten und Erkenntnisse auszutauschen.

Literatur

Baatz, M.; Schäpe, A. (2000): Multiresolution Segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. AGIT-Symposium Salzburg 2000, Salzburg, XII, S. 12–23

Bacher, U. (2011): Bildanalyse mit IMAGINE Objektiv zur Erfassung von forstrelevanten Parametern. GEOSYSTEMS Fachtagung: Wald – Bild – Daten. 1. u. 2.2.2011, Fürstenfeldbruck

Baltsavias, E.; Gruen, A.; Eisenbeiss, H.; Zhang, L.; Waser, L.T. (2008): High quality image matching and automated generation of 3D tree models. *International Journal of Remote Sensing*, 29 (5), S. 1243–1259

LFU und LWF – Bayerisches Landesamt für Umweltschutz; Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (Hrsg.) (2010): Handbuch der Lebensraumtypen nach Anhang I der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie in Bayern. Stand: 03/2010, Augsburg, Freising-Weißenstephan

Breidenbach, J. (2008): Regionalisierung von Waldinventuren mittels aktiver Fernerkundungstechniken. Dissertation, Freiburg

Breidenbach, J.; Næsset, E.; Lien, V.; Gobakken, T.; Solberg, S. (2010): Prediction of species specific forest inventory attributes using a nonparametric semi-individual tree crown approach based on fused airborne laser scanning and multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 114 (4), S. 911–924

Burschel, P.; Huss, J. (1997): Grundriss des Waldbaus. Pareys Studententexte 49, Berlin

Elatawneh, A.; Rappl, A.; Schneider, T.; Knoke, T. (2012): A semi-automated method of forest cover losses detection using RapidEye images: a case study in the Bavarian forest National Park. 4. RESA Workshop 3/2012, Neustrelitz, Borg, Daedalow, Johnson (Hrsg.), ISBN 978-3-942183-61-1, S. 183–200

Elatawneh, A.; Rappl, A.; Rehush, N.; Schneider, T.; Knoke, T. (2013): Forest tree species identification using phenological stages and RapidEye data: a case study in the forest of Freising. 5. RESA Workshop 4/2013, Berlin

Felbermeier, B.; Hahn, A.; Schneider, T. (2010): Study on user requirements for remote sensing applications in forestry. In: Proc. ISPRS Commission VII. Symp., Wien, 1. bis 7.7.2010

Ginzler, C. (2012): Vom Punkt in die Fläche. *LFI info*, 14, S. 1–4

Hobi, M. L.; Ginzler, C. (2012): Accuracy assessment of digital surface models based on WorldView 2 and ADS80 stereo remote sensing data. *Sensors*, 12, S. 6347–6368

Hollaus, M.; Wagner, W.; Maier, B.; Schadauer, K. (2007): Airborne laser scanning of forest stem volume in a mountainous environment. *Sensors* (7), S. 1559–1577

Huss, J. (1984): Luftbildmessung und Fernerkundung in der Forstwirtschaft. Karlsruhe

Hyypä, J.; Hyypä, H.; Xiaowei, Y.; Kaartinen, H.; Kukko, A.; Holopainen, M. (2009): Forest inventory using small-footprint airborne LiDAR. In J. Shan, & C. K. Toth, *Topographic Laser Ranging and Scanning, Principles and Processing* (S. 335–370). Boca Raton., CRC Press, Taylor and Francis Group

Kaartinen, H.; Hyypä J.; Yu, X.; Vastaranta, M.; Hyypä, H.; Kukko, A.; Holopainen, M.; Heipke, C.; Hirschmugl, M.; Morsdorf, F.; Næsset, E.; Pitkänen, J.; Popescu, S.; Solberg, S.; Wolf, B.M.; Wu, J.-C. (2012): An International Comparison of Individual Tree Detection and Extraction Using Airborne Laser Scanning. *Remote Sensing*, (4), S. 950–974

Koch, B.; Heyder, U.; Weinacker, H. (2006): Detection of individual tree crowns in airborne lidar data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72 (4), S. 357–363

Korpela, I.; Anttila, P. (2004): Appraisal of the mean height of trees by means of image matching of digitised aerial photographs. *Photogrammetric Journal of Finland*, 19(1), S. 23–36

Kraus, K.; Pfeifer, N. (1998): Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 53, S. 193–203

Lillesand, T.; Kiefer, R.; Chipman, J. (2004): *Remote Sensing and Image Interpretation*. New York

- Lindenberger, J. (1993): Laser-Profilmessungen. Dissertation, Stuttgart
- Maltamo, M.; Malinen, J.; Packalén, P.; Suvanto, A.; Kangas, A. (2006): Nonparametric estimation of stem volume using airborne laser scanning, aerial photography and stand-register data. *Canadian Journal of Forest Research*, 36 (2), S. 426–436
- Næsset, E. (2002): Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sensing of Environment*, 80 (1), S. 88–99
- Næsset, E. (2004): Practical large-scale forest stand inventory using a small-footprint airborne scanning laser. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19, S. 164–179
- Næsset, E. (2007): Airborne laser scanning as a method in operational forest inventory: status of accuracy assessments accomplished in Scandinavia. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 22, S. 433–442
- Persson, Å.; Holmgren, J.; Södermann, U. (2002): Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68(9), S. 925–932
- Pretzsch, H. (2000): Modellierung des Waldwachstums. Berlin, Wien
- Rappl, A.; Rahlf, J.; Elatawneh, A.; Schneider, T.; Knoke, T. (2011): Möglichkeiten der Waldmaskierung mit RapidEye Daten – ein Vergleich mit amtlichen Geodaten. DGPF Tagungsband 20/2011, Mainz, S. 251–260
- Rappl, A.; Elatawneh, A.; Thiele, A.; Troycke, A.; Schneider, T.; Knoke, T. (2012): Einsatz der Fernerkundungssysteme TerraSAR-X und RapidEye im Katastrophenmanagement von Windwurfereignissen. GIL Tagungsband 32/2012, Freising, S. 235–238
- Reitberger, J.; Krzystek, P.; Stilla, U. (2008): 3D Segmentation and Classification of Single Trees with Full-Waveform LIDAR Data. In *Proceedings of SilviLaser 2008*, Edinburgh, UK, 17–19 September 2008, S. 216–225
- Schneider, T.; Elatawneh, A.; Rahlf, J.; Kindu, M.; Rappl, A.; Thiele, A.; Boldt, M.; Hinz, S. (2012): Parameter determination by RapidEye and TerraSAR-X data – a step toward a remote sensing based inventory, monitoring and fast reaction system on forest enterprise level. In: Krisp, J.M.; Meng, L.; Pail, R.; Stilla, U. (Eds.), *Earth Observation of Global Changes (EOGC)*, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, ISBN: 978-3-642-32713-1, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013, doi: 10.1007/978-3-642-32714-8_6, S. 81–107
- Schneider, T.; Elatawneh, A.; Rappl, A.; Thiele, A. (2013): FöKZ 50EE0919: Methodenentwicklung zur Nutzung von Parametern aus Satellitendaten im Rahmen der forstlichen Betriebsplanung und des forstlichen Katastrophenmanagements. Endbericht 04/2013. Freising
- Straub, C.; Seitz, R. (2011): Möglichkeiten der automatisierten Generierung von Oberflächenmodellen in Waldgebieten aus digitalen Luftbildern. DGPF Tagungsband 20/2011, Mainz, S. 153–162
- Straub, C.; Seitz, R. (2012): Möglichkeiten der Schätzung von Bestandesoberhöhen und des Holzvorrats auf der Grundlage von digitalen Stereo-Luftbildern – ein Vergleich mit flugzeuggetragenen Laserscannerdaten. Beitrag im Tagungsband der 32. GIL Jahrestagung (Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft) vom 29. Februar bis 1. März 2012 in Weihenstephan
- Straub, C.; Stepper, C. (2013): Projekt E49: Semi-automatische Parameterextraktion aus digitalen Luftbildern (SAPEX – DLB) – Teil II. Zwischenbericht 01/2013, LWF Freising
- Straub, C.; Stepper, C.; Seitz, R.; Waser, L. T. (2013): Möglichkeiten einer stratifizierten Schätzung von forstlichen Kenngrößen unter Verwendung von amtlichen Stereo-Luftbildern, Orthophotos und Laserscannerdaten. DGPF Tagungsband 22/2013 – Dreiländertagung DGPF, OVG, SGPF, Freiburg, S. 186–193

Keywords: sustainable data source, remote sensing system, forest non forest delineation, tree species classification, height model, regionalization of inventory plots, pixel and object based, visual and semi automatically

Summary: Looking back into the past, forest remote sensing has a long tradition. Since the end of the 19th century, remote sensing delivered essential data about forests, which are of high relevance for sustainable forest management. The Bavarian State Institute of Forestry (LWF) is currently working on several forest remote sensing projects, which have a focus on automated extraction of forest parameters, for example forest area delineation, tree species detection or to extract stand heights. As an example, the resulting products can provide status quo information about tree species distribution in relation to climate risk maps, and can support forest consultancy. Crown height models can support the regionalization of forest inventories and thus improve their value. Initial studies on remote sensing data to detect vitality decrease of trees seem promising that remote sensing may contribute to forest condition surveys in the future. In the outlook an overview is given about new remote sensing sensors and techniques as well as their potential applications.