

Simulation von Bildspektrometer Daten: 3D Waldmodellierung basierend auf LiDAR and in situ Daten

FABIAN D. SCHNEIDER¹, REIK LEITERER¹, FELIX MORSDORF¹, JEAN-PHILIPPE GASTELLU-ETCHEGORRY² & MICHAEL E. SCHAEPMAN¹

Zusammenfassung: Fernerkundung bietet einzigartige Möglichkeiten um Waldökosysteme zu untersuchen, indem räumlich und zeitlich verteilte Information erfasst und mit biophysikalischen und biochemischen Variablen verlinkt werden kann. Um diesen Link herzustellen, stellen wir Verfahren zur Modellierung des Strahlungstransfers eines temperierten Mischwaldes vor. Das 3D Modell DART wurde aufgrund von flugzeuggestütztem Laserscanning und in situ Messungen parametrisiert. Dabei wurden zwei Ansätze zur Waldrekonstruktion verglichen: 1) basierend auf einem Voxelgitter und 2) basierend auf Einzelbaumdetektion. Im direkten Vergleich der simulierten Radianzwerte mit Bildspektrometerdaten zeigt sich, dass Ersterer zu bevorzugen ist. Räumliche Muster sind vergleichbar, wobei absolute Werte je nach Wellenlänge stark abweichen können.

1 Einleitung

Fernerkundung bietet einzigartige Möglichkeiten um Waldökosysteme über Raum und Zeit zu untersuchen. Die Ableitung von biochemischen Blatteigenschaften aus Fernerkundungsdaten ist von grossem Interesse, da diese Eigenschaften Aufschluss über Photosynthese, Gesundheit, Funktionstyp und Art der Pflanzen geben können. Aufgrund der strukturellen Komplexität des Waldes ist die Skalierung von Beobachtungen auf Bestandesebene auf die Blattebene jedoch nicht trivial. Deshalb werden häufig physikalisch basierte Strahlungstransfermodelle verwendet, um spektrale Information zu skalieren.

Diese Studie basiert auf SCHNEIDER et al. (2014) und hat zum Ziel, das Strahlungstransfermodell DART (GASTELLU-ETCHEGORRY et al., 2013) mit Hilfe von in situ und flugzeuggestützten Daten zu parametrisieren und simulierte Radianzwerte mit Messungen eines flugzeuggestützten Bildspektrometers zu vergleichen. Das Untersuchungsgebiet befindet sich auf den Lägern, einem temperierten Mischwald der sich durch steile Hänge, heterogenen Untergrund und hohe Artenvielfalt auszeichnet (47°28'42.0" N, 8°21'51.8" E, 682 m, Schweiz). Um die Komplexe Architektur des Waldes abzubilden, wurden zwei Modelle zur Waldrekonstruktion verglichen: 1) basierend auf einem Voxelgitter und 2) basierend auf einer Einzelbaumdetektion. Beide Methoden lassen sich auf unterschiedliche Waldökosysteme und Skalenebenen anwenden. Das Resultat dieser Studie zeigt das Potenzial der Modellierung einer komplexen Waldszene für die Validation und Kalibration auf Radianz-, Reflektanz- und Produkt-Ebene.

1) Remote Sensing Laboratories, Department of Geography, University of Zurich, Winterthurerstrasse 190, CH-8057 Zurich, Switzerland; E-Mail: fabian-daniel.schneider@geo.uzh.ch, reik.leiterer@geo.uzh.ch, felix.morsdorf@geo.uzh.ch, michael.schaepman@geo.uzh.ch

2) Centre d'Études Spatiales de la Biosphère, Paul Sabatier University – CNES – CNRS – IRD, 18 Avenue Edouard Belin, BPI 2801, 31401 Toulouse, Cedex 9, France; E-Mail: jean-philippe.gastellu-etchegorry@cesbio.cnes.fr

2 Materialien und Methoden

Das DART Modell wurde verwendet, um den Strahlungstransfer eines 300 x 300 m grossen Ausschnitts natürlichen Mischwaldes zu simulieren. Die DART Waldszene ist auf einem 3D Voxelgitter mit einer Voxelgrösse von 2^3 m aufgebaut. Zur Simulation von Vegetation werden Voxel mit einem trüben Medium gefüllt, das über blattoptische Eigenschaften (LOP), Blattwinkelverteilung (LAD) und Blattflächenindex (PAI) parametrisiert wird. DART bietet zudem die Möglichkeit, detaillierte 3D Modelle mit individuellen optischen Eigenschaften zu importieren.

Um die blattoptischen Eigenschaften zu bestimmen wurden 90 Blätter von 10 Laubbäumen und 70 Zweige mit 8 – 10 Nadeln von 12 Nadelbäumen gesammelt und in einer Ulbricht-Kugel gemessen. Schliesslich wurden mittlere Spektren für Blätter und Nadeln der oberen, mittleren und unteren Kronenschichten berechnet, um den unterschiedlichen Lichtverhältnissen gerecht zu werden. Basierend auf in situ Messungen des durchschnittlichen Blattwinkels (ALA) und PISEK ET AL. (2013) wurde eine plagiophile und sphärische LAD für Laub- und Nadelbäume gewählt.

2.1 3D Waldrekonstruktion

Die Waldrekonstruktion basiert auf flugzeuggestütztem Laserscanning (ALS), wobei Daten mit und ohne Belaubung erhoben wurden. Nach EVANS et al. (2007) wurden die ALS Bodenechos verwendet, um ein digitales Geländemodell abzuleiten. Eine Klassifikation des Waldbodens wurde aufgrund der ALS Punktverteilung und statistischer Variablen der ALS Wellenformen durchgeführt (LEITERER et al., 2013). Spektrale Eigenschaften des Waldbodens wurden mit Feld-Spektrometern gemessen und entsprechend der Klassifikation zugewiesen.

Während in vorhergehenden Studien Baumkronen und -positionen über verallgemeinernde Regeln bestimmt wurden (e.g., MALENOVSKÝ et al., 2013), wurde in dieser Studie jeder Baum individuell parametrisiert (Einzelbaumansatz). Um die dafür nötigen geometrischen Variablen abzuleiten, wurde die ALS Punktwolke nach MORSDORF et al. (2004) in Gruppen von Echos eingeteilt, von denen man annimmt dass sie von einem Einzelbaum stammen. Jedem Einzelbaum wurde dann aufgrund der Punktverteilung und in situ Messungen (digitale hemisphärische Fotografie) ein PAI-Wert zugewiesen.

Anstatt Einzelbäume zu extrahieren, kann man aber auch direkt ein Voxelgitter parametrisieren. Dazu wurde zunächst der PAI für 2 x 2 m Gitterzellen berechnet nach SOLBERG et al. (2009) und FLECK et al. (2012):

$$PAI = c \cdot \ln \left(\frac{1 \cdot t_1 + \frac{1}{2} \cdot t_2 + \dots + \frac{1}{7} \cdot t_7}{1 \cdot g_1 + \frac{1}{2} \cdot g_2 + \dots + \frac{1}{7} \cdot g_7} \right),$$

wobei t_1, t_2, \dots, t_7 der gesamten Anzahl Echos innerhalb einer Zelle und g_1, g_2, \dots, g_7 der Anzahl Bodenechos entspricht für Laserpulse mit 1, 2, ..., 7 Echos. Der Kalibrationsfaktor c passt die berechneten Werte den in situ Messungen an. Schlussendlich wird der PAI jedes Voxels aufgrund der vertikalen Verteilung der ALS Punkte berechnet.

3 Resultate und Diskussion

Das Resultat des Einzelbaumansatzes ist eine 3D Repräsentation der Waldszene mit 1526 Laub- und 312 Nadelbäumen (Abb. 1). Da die Berechnungen in DART immer auf einem Voxelgitter durchgeführt werden, wandelt DART die Kronengeometrien des Einzelbaumansatzes automatisch in ein entsprechendes 3D Gitter um. Mit dem Voxelgitter-Ansatz kann dieses direkt parametrisiert werden. Vergleicht man die 2D PAI-Karten in Abb. 1, so erkennt man die Schwächen des Einzelbaumansatzes. Das Muster ist grundsätzlich vergleichbar, aber der Einzelbaumansatz ist weniger gut zur Modellierung einer dichten, mehrheitlich geschlossenen Waldecke geeignet. Der Einsatz des Voxelgitter-Ansatzes führt zu einer viel gleichmässigeren, realitätsnahen Verteilung der Biomasse, da die abgeleitete 3D Architektur des Waldes näher an der zu Grunde liegenden ALS Punktwolke liegt.

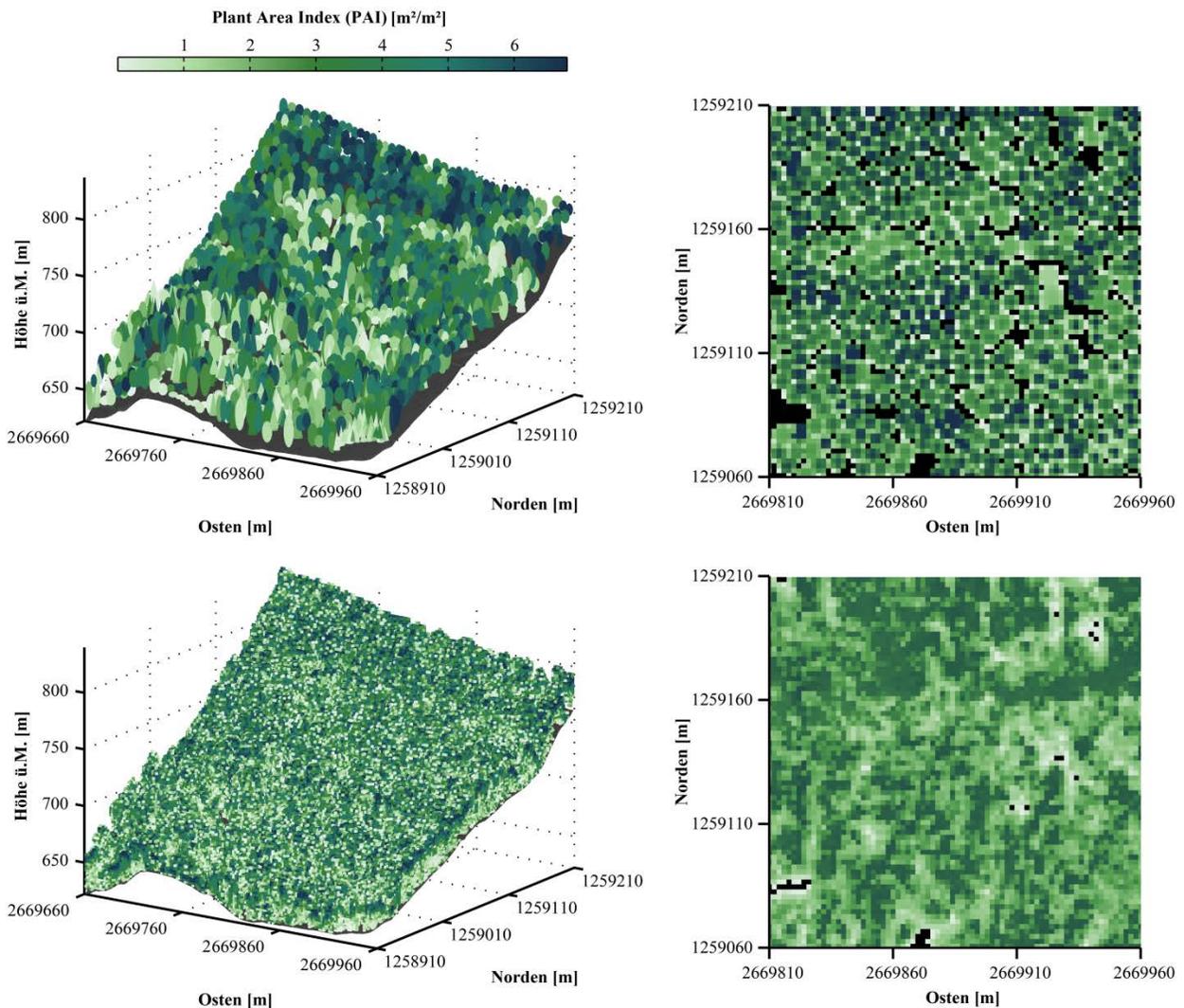


Abb. 1: Waldrekonstruktion mit dem Einzelbaum- (oben) und dem Voxelgitter-Ansatz (unten) in 3D (links) und 2D (rechts). Die Ausschnitte in 2D zeigen den nordwestlichen Teil der Szene. Modifiziert nach SCHNEIDER et al. (2014).

Ein pixelweiser Vergleich mit den gemessenen Bildspektrometerdaten in vier ausgewählten Wellenlängen bestätigt diese Erkenntnis: Der Determinationskoeffizient (R^2) ist 0.55, 0.56, 0.39, 0.48 mit dem Voxelgitter-Ansatz und 0.41, 0.41, 0.29, 0.34 mit dem Einzelbaumansatz bei 533, 570, 680, 780 nm. Deshalb basiert die weitere Diskussion auf dem Vergleich der DART Daten, die mit dem Voxelgitter-Ansatz simuliert wurden, mit den Bildspektrometerdaten, die mit dem APEX Sensor gemessen wurden (Airborne Prism EXperiment, JEHLÉ et al., 2010). Die simulierten und gemessenen Radianzbilder bei 570 und 780 nm und die entsprechenden Differenzbilder sind in Abb. 2 dargestellt.

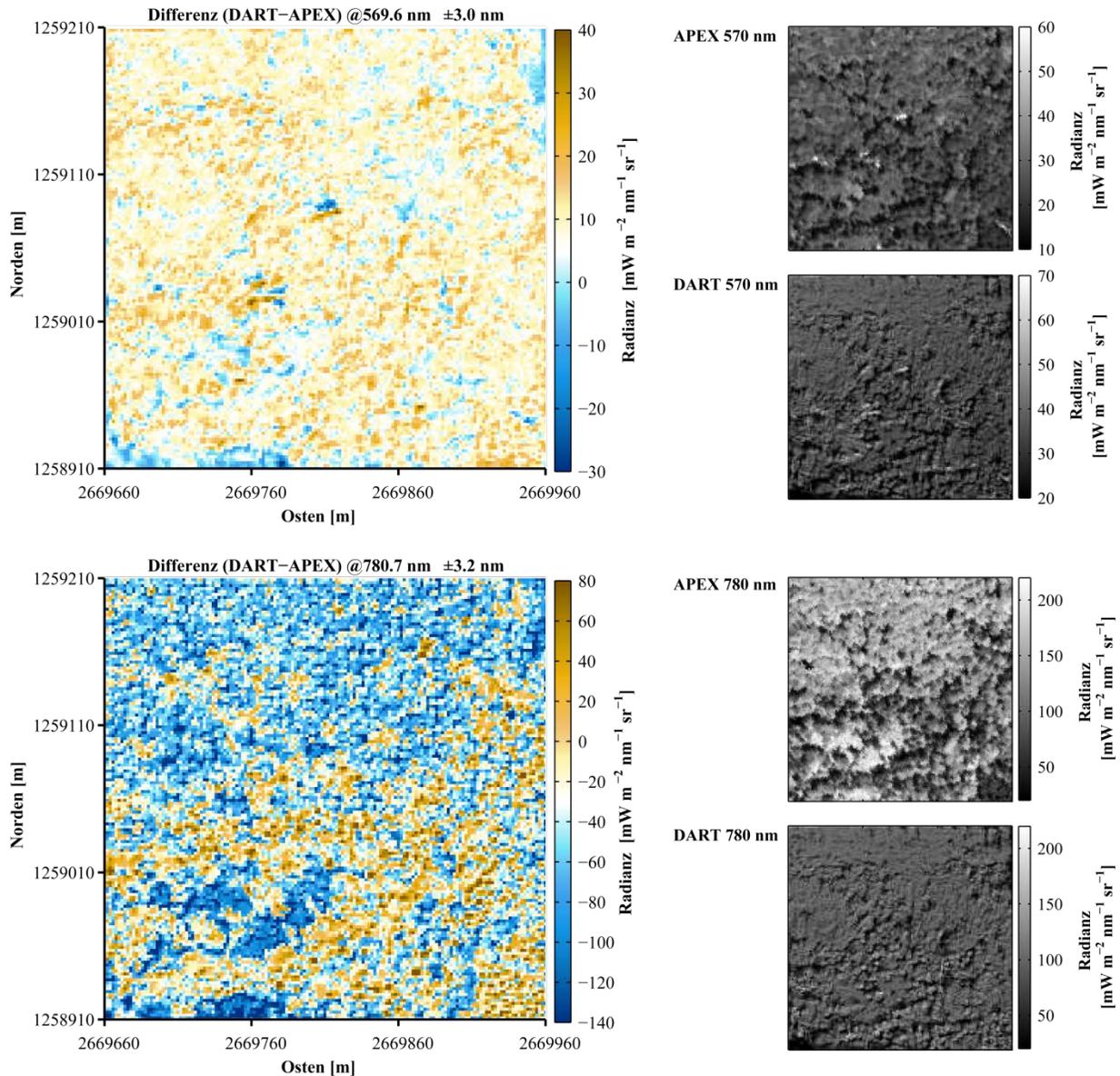


Abb. 2: Gemessene (APEX) und simulierte (DART) Radianzbilder und entsprechende Differenzbilder bei 570 und 780 nm. Simulationen wurden mit dem Voxelgitter-Ansatz durchgeführt, Differenzen durch die Subtraktion des APEX vom DART Bild berechnet. Modifiziert nach SCHNEIDER et al. (2014).

Im Differenzbild bei 570 nm wird deutlich, dass die DART Radianzwerte durchschnittlich 8 - 10 $\text{mW m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$ höher als diejenigen von APEX sind. Es handelt sich dabei um eine systematische Abweichung aufgrund atmosphärischer Einflüsse, die in allen Wellenlängen des sichtbaren Bereichs auftritt. Im Modell wurde eine zu starke atmosphärische Streuung simuliert, obwohl die Atmosphäre in DART aufgrund von in situ Aerosol Messungen vom Zeitpunkt des APEX Überflugs parametrisiert wurde. Abgesehen davon sind simulierte und gemessene räumliche Muster vergleichbar. Das Modell war fähig mittel- bis grossskalige Eigenschaften des 3D Strahlungsregimes zu simulieren. Stärkere Abweichungen treten nur lokal auf, da die Projektion der DART und APEX Daten nicht direkt vergleichbar ist.

Das auffälligste räumliche Muster tritt im nahinfraroten Bereich auf (z.B. bei 780 nm). Über- und Unterschätzung der APEX Radianzwerte deckt sich mit der räumlichen Verteilung von Nadel- und Laubbäumen. Es gibt mehrere mögliche Gründe, weshalb im Modell das Signal von Laubbäumen zu gering und dasjenige von Nadelbäumen zu stark ist. Unser Ansatz ist limitiert in der Beschreibung von kleinskaligen Strukturen, was die Überschätzung des Signals von Nadelbäumen erklärt. Die Mehrfachstreuung innerhalb eines Nadelzweigs wird als wichtigster struktureller Effekt angesehen, der zur niedrigen Reflektanz von Nadelbäumen im Nahinfraroten führt (RAUTIAINEN et al., 2005). Die daraus resultierende Absorption und spezifische Streuung der Nadelzweige kann mit dem von uns verwendeten Ansatz des trüben Mediums zur Simulation von Vegetation jedoch nicht modelliert werden.

Eine Sensitivitätsanalyse der Variablen, die zur Parametrisierung der Vegetationsvoxel verwendet wurden (LOP, LAD, PAI), zeigt auf, dass sich die starke Variation in den LOP Messungen auf Blattebene auf die Sensorebene überträgt. Allerdings ist es nicht möglich, die enorme Variabilität der natürlich auftretenden Blattspektren komplett einzufangen und zu modellieren. Ein Grund für die zu tiefen Werte für Laubbäume im Nahinfraroten könnte sein, dass die in situ gemessenen Spektren eine relativ hohe Absorption aufweisen. Dazu kommt, dass die Anwendung einer universellen LAD Funktion für Laub- und Nadelbäume der tatsächlich auftretenden Blattwinkelverteilung innerhalb einer Kronendecke nicht gerecht werden kann, auch wenn die entsprechende Parametrisierung aufgrund von ALA Messungen und Literaturangaben als gute Approximation angesehen wird (PISEK et al., 2013).

4 Fazit und Ausblick

In dieser Studie haben wir das Potenzial eines State of the Art 3D Strahlungstransfermodells untersucht, Bildspektrometerdaten eines temperierten Mischwaldes zu simulieren. Um die komplexe 3D Architektur des Waldes abzubilden, haben wir zwei Ansätze zur Waldrekonstruktion entwickelt und verglichen: ein Einzelbaum- und ein Voxelgitter-Ansatz. Unsere Resultate zeigen, dass der neu entwickelte Voxelgitter-Ansatz der Parametrisierung basierend auf Einzelbäumen vorzuziehen ist, da die Waldstruktur wesentlich realistischer abgebildet wird. Die mit dem Voxelgitter-Ansatz simulierten Daten sind deshalb mit den APEX Daten vergleichbar, wobei absolute Werte je nach Wellenlänge stark abweichen können.

Unter mehreren Faktoren konnten zwei identifiziert werden, die einen besonders starken Einfluss auf die Simulation hatten: einerseits die hohe spektrale Variabilität der blattoptischen Eigenschaften und andererseits kleinskalige Struktureffekte, die zum Beispiel durch die Anordnung von Nadeln innerhalb eines Zweiges hervorgerufen werden. Folglich sind weitere Studien nötig, um das Verständnis über den Einfluss der Blattoberfläche und des Blattinnern sowie der direkten und diffusen Streuung auf die spektrale Variabilität der Blätter zu verbessern. Ausserdem muss ein Schwerpunkt auf die Modellierung von kleinskaligen Struktureffekten gelegt werden.

5 Literaturverzeichnis

- EVANS, J., & HUDAK, A., 2007: A multiscale curvature algorithm for classifying discrete return LiDAR in forested environments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **45** (4), S. 1029-1038.
- FLECK, S., RASPE, S., CATER, M., SCHLEPPI, P., UKONMAANAHO, L., GREVE, M., HERTEL, C., WEIS, W., & RUNPF, S., 2012: Leaf area measurements. In: *Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests*. Hamburg: UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre.
- GASTELLU-ETCHEGORRY, J.-P., GRAU, E., & LAURET, N., 2012: DART: a 3D model for remote sensing images and radiative budget of earth surfaces. In C. ALEXANDRU (Ed.), *Modeling and Simulation in Engineering*, Kapitel 2.
- JEHLE, M., HUENI, A., DAMM, A., D'ODORICO, P., WEYERMANN, J., KNEUBÜHLER, M., SCHLÄPFER, D., SCHAEPMAN, M. E., & MEULEMAN, K., 2010: APEX – current status, performance and validation concept. *2010 IEEE Sensors*, S. 533-537.
- LEITERER, R., MÜCKE, W., HOLLAUS, M., PFEIFER, N., & SCHAEPMAN, M. E., 2013: Operational forest structure monitoring using airborne laser scanning. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation*, S. 173-184.
- MALENOVSKÝ, Z., HOMOLOVÁ, L., ZURITA-MILLA, R., LUKEŠ, P., KAPLAN, V., HANUŠ, J., GASTELLU-ETCHEGORRY, J.-P., & SCHAEPMAN, M. E., 2013: Retrieval of spruce chlorophyll content from airborne image data using continuum removal and radiative transfer. *Remote Sensing of Environment*, **131**, S. 85-102.
- MORS DORF, F., MEIER, E., KÖTZ, B., ITTEN, K. I., DOBBERTIN, M., & ALLGÖWER, B., 2004: LiDAR-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management. *Remote Sensing of Environment*, **92** (3), S. 353-362.
- PISEK, J., SONNENTAG, O., RICHARDSON, A. D., & MÖTTUS, M., 2013: Is the spherical leaf inclination angle distribution a valid assumption for temperate and boreal broadleaf tree species?. *Agricultural and Forest Meteorology*, **169**, S. 186-194.
- RAUTIAINEN, M., & STENBERG, P., 2005: Application of photon recollision probability in coniferous canopy reflectance simulations. *Remote Sensing of Environment*, **96** (1), S. 98-107.
- SCHNEIDER, F.D., LEITERER, R., MORS DORF, F., GASTELLU-ETCHEGORRY, J.-P., LAURET, N., PFEIFER, N., & SCHAEPMAN, M.E., 2014: Simulating imaging spectrometer data: 3D forest modeling based on LiDAR and in situ data. *Remote Sensing of Environment*, in revision.
- SOLBERG, S., BRUNNER, A., HANSEN, K. H., LANGE, H., NÆSSET, E., RAUTIAINEN, M., & STENBERG, P., 2009: Mapping LAI in a Norway spruce forest using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment*, **113** (11), S. 2317-2327.