



Abbildende und nichtabbildende Geländespektrometrie zur Untersuchung von Stressphänomenen an Buchenpflanzen

OXSANA STERN, BARBARA PASCHMIONKA, JOHANNES STOFFELS, HENNING BUDDENBAUM & JOACHIM HILL, Trier

Keywords: abbildende Spektrometrie, Trockenstress, Vegetationsindizes

Zusammenfassung: Im Zuge des prognostizierten Klimawandels wird sich der Einfluss von Hitze und Trockenheit auf Waldökosysteme verschärfen. Somit nimmt die Bedeutung quantitativer Monitoringmethoden in Bezug auf biochemische und biophysikalische Parameter in der Vegetationsanalyse zu. Dies setzt höhere spektrale und räumliche Auflösungen von Sensoren voraus. Diese Arbeit soll das Potenzial von spektral hochauflösenden, abbildenden und nichtabbildenden Sensoren zur Erfassung von Vegetationsparametern während eines induzierten Trockenstresses untersuchen. Hierzu wurde in den Jahren 2011 und 2012 ein Austrocknungsexperiment an Buchen (*Fagus sylvatica* L.) durchgeführt. Aus der Auswertung von Bilddaten und der spektralen Reflexionssignale sowie der daraus abgeleiteten Vegetationsindizes werden Aussagen über den pflanzenphysiologischen Zustand getroffen. Die detaillierte Analyse befasst sich vor allem mit den ausgewählten Vegetationsindizes und deren Eignung für die Trockenstressanalyse sowie deren Sensitivität gegenüber Änderungen von Blattwasser- und Chlorophyllgehalten.

Summary: *The use of imaging and non-imaging Spectroscopy for the determination of stress phenomena of beech trees.* Regarding the predicted climate change, extreme weather events, like heat waves and drought episodes, will be more frequent and thus their impact on forest ecosystems is expected to be stronger. In this context, sustainable forest management and monitoring strategies have to be adapted for saving the multifunctional role of forests. The retrieval of biophysical and biological parameters from remote sensing hyperspectral imagery is a substantial issue for the accurate assessment of forest decline. In this study, we tested the potential of high resolution imaging and non-imaging spectroscopy data for detecting biochemical vegetation parameters during an induced drought stress. For this we implemented a controlled drying-experiment on the European Beech (*Fagus sylvatica* L.) during two field campaigns in 2011 and 2012. The assessment of image data, spectral signatures and the derived vegetation indices give conclusions about the plant physiological conditions. The analysis includes the abilities of the chosen vegetation indices concerning drought analysis and their sensitivity towards changes in chlorophyll and water contents.

1 Einführung

Die Klimaveränderung stellt Risiken für die Wälder und deren nachhaltige multifunktionale Nutzung dar (BOLTE et al. 2009). Das häufigere Auftreten von schweren Hitze- und Dürreperioden als Folge des Klimawandels kann Artenzusammensetzungen und Struktur der Wälder in vielen Regionen verändern (ALLEN et al. 2010). Fernerkundlich erhobe-

ne Daten sind in der Lage, in diesem Kontext eine umfassende Informationsgrundlage zu liefern.

Bei Laboruntersuchungen zur Stresstoleranz und Veränderung der Reflexion aufgrund sinkenden Wassergehalts, welche auf Blattebene durchgeführt werden, kann davon ausgegangen werden, dass solche Studien keinen naturgemäßen Bedingungen unterliegen. Außerdem fehlt der Direktbezug zu Beobach-

Tab. 1: Rahmenbedingungen des Experimentaufbaus in den Versuchsjahren. Hervorgehoben sind die Neuerungen der zusätzlich verwendeten Messgeräte gegenüber dem Vorjahr (KG = Kontrollgruppe, TSG = Trockenstressgruppe).

2011		2012		2013	
Setting					
Aug./Sept.	6 Wochen	August	3 Wochen	Geplant: Juli / August	
KG	9 Töpfe (22 Pflanzen)	KG	10 Töpfe (29 Pflanzen)	KG	tba
TSG	8 Töpfe (24 Pflanzen)	TSG	10 Töpfe (28 Pflanzen)	TSG	tba
Auswertung auf Topfebene		Auswertung auf Bauebene			
Messungen					
<ul style="list-style-type: none"> • Referenzmessungen <ul style="list-style-type: none"> • Bodenfeuchte • Blattwassergehalt • Chlorophyllgehalt • Nichtabbildende Spektrometrie <ul style="list-style-type: none"> • ASD FieldSpec II • Abbildende Spektrometrie <ul style="list-style-type: none"> • HySpex VNIR-1600 		<ul style="list-style-type: none"> • Referenzmessungen <ul style="list-style-type: none"> • Bodenfeuchte • Blattwassergehalt • Chlorophyllgehalt • Nichtabbildende Spektrometrie <ul style="list-style-type: none"> • ASD FieldSpec II • Abbildende Spektrometrie <ul style="list-style-type: none"> • HySpex VNIR-1600 • HySpex SWIR-320m-e 		<ul style="list-style-type: none"> • Referenzmessungen <ul style="list-style-type: none"> • Bodenfeuchte • Blattwassergehalt • Chlorophyllgehalt • Nichtabbildende Spektrometrie <ul style="list-style-type: none"> • ASD FieldSpec II • Abbildende Spektrometrie <ul style="list-style-type: none"> • HySpex VNIR-1600 • HySpex SWIR-320m-e • Hyperthermalmessungen <ul style="list-style-type: none"> • TELOPS HyperCam 	

tungen von Satellitensystemen. Durch gezielte Freilandbeobachtungen und -experimente unter kontrollierten Extrembedingungen lassen sich vorhandene Erfahrungen zusammenfassen und neue Erkenntnisse gewinnen, welche somit auf räumlich größere Skalen übertragen werden können.

Im Rahmen eines mehrjährigen (2011 bis 2013) Forschungsprojekts der Universität Trier wurde das Potenzial von spektral hochauflösenden, abbildenden optischen Sensoren zur Erfassung von biochemischen Vegetationsparametern während eines induzierten Trockenstresses an Buchenjungpflanzen untersucht.

Nach aktuellem Stand der Forschung führt der Wassermangel einerseits zur Dehydratisierung der Zelle, was sich schädigend für Enzyme und Funktionsstrukturen wie z. B. Membranen auswirkt. Weiterhin behindert der durch Wassermangel bewirkte Stomataverschluss die CO₂-Zufuhr, welche für den Prozess der Photosynthese essenziell ist (SITTE et al. 2002). Die resultierende Veränderung

der internen Blattstruktur sowie die Abnahme des Chlorophyllgehalts, welcher mit der photosynthetischen Aktivität der Pflanzen in Beziehung steht, sollten während der Experimentreihe mittels des nichtabbildenden ASD FieldSpec-Spektrometers auf Blattebene sowie der Hyperspektralkamera HySpex auf Individuenebene aufgezeigt werden.

Tab. 1 gibt einen Überblick über die Rahmenbedingungen der Experimente aus 2011 und 2012. Im Sommer 2013 soll das Trockenstressexperiment wiederholt werden. Im Folgenden werden die Ergebnisse des Austrocknungsexperiments aus 2011 vorgestellt.

2 Material und Methoden

Im Jahr 2011 vom 23. August bis zum 27. September wurde ein sechswöchiges Austrocknungsexperiment an vierjährigen Buchenpflanzen (*Fagus sylvatica* L.), einer der wirtschaftlich bedeutendsten Baumarten Deutsch-

lands, durchgeführt. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurden die Testpflanzen demselben Herkunftsgebiet entnommen.

Alle Untersuchungen wurden an den Pflanzen der Trockenstressgruppe (TSG) und der bewässerten Kontrollgruppe (KG) vorgenommen. Die KG setzte sich aus 9 Töpfen mit insgesamt 22 Buchenpflanzen und die TSG aus 8 Töpfen mit 24 Bäumen zusammen.

Um eine unmittelbare Beeinflussung durch direkte Sonneneinstrahlung, Regen und Wind zu vermeiden, wurden die Pflanzen unter einem halbdurchsichtigen Kunststoffdach untergestellt (Abb. 1).

In einem wöchentlichen Rhythmus fanden Blattwassergehaltmessungen und Chlorophyllmessungen mit dem Minolta Chlorophyll Meter „SPAD-502“, welcher den relativen Chlorophyllgehalt durch die Lichtabsorption des Blattes an 650 nm und 940 nm bestimmt, statt (MARKWELL et al. 1995). Das Messgerät berechnet daraus einen dimensionslosen Wert, den SPAD-Wert. Des Weiteren wurden Aufnahmen der Spektralsignaturen mit Hilfe des Labor- und Geländespektrometers ASD FieldSpec auf der Blattebene durchgeführt, sowie die Aufnahme der beiden Baumgruppen mit dem bildgebenden Spektrometer HySpex VNIR-1600, welches im Labor, für Geländemessungen oder auch flugzeuggestützt eingesetzt werden kann. Außerdem wurden biometrische Kennwerte (Knospenanzahl und Baumhöhe) zur Vergleichbarkeit unterschiedlicher Reaktionen der Töpfe erhoben.



Abb. 1: Standort und Aufbau des Trockenstressversuchs.

2.1 Radiometrische Messungen

Spektrometermessung (ASD FieldSpec II)

Die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Messungen der spektralen Reflexion wurden mit dem FieldSpec II der Firma Analytical Spectral Devices Inc., welches einen Wellenlängenbereich von 350 nm bis 2500 nm abdeckt, durchgeführt. Im UV/VNIR Bereich von 350 nm bis 1000 nm wird ein Silizium-Detektor verwendet. Der Detektor setzt sich aus 512 Photodioden zusammen, die so angebracht sind, dass sie das Licht innerhalb einer 1,4 nm schmalen Bande empfangen. Die spektrale Auflösung beträgt 3 nm. Im SWIR1 und SWIR2 (1000 nm bis 1800 nm und 1800 nm bis 2500 nm) werden zwei thermoelektrisch gekühlte Indium-Gallium-Arsenid-Detektoren verwendet, welche über eine spektrale Auflösung von 10 nm verfügen. Für die Messung der Blattspektren wurde der ASD Leafclip eingesetzt. Der Leafclip bietet eine nicht destruktive Möglichkeit zur Aufzeichnung der Reflexion und Transmission eines einzelnen Blattes.

Bildgebende Spektrometrie (HySpex VNIR-1600)

Die HySpex VNIR-1600 der Firma Norsk Elektro Optikk ist eine Hyperspektralkamera, welche, ausgestattet mit 160 Kanälen, einen spektralen Bereich zwischen 410 nm und 990 nm abdeckt. Die spektrale Auflösung der Kanäle beträgt 3,7 nm. Mit einem Sichtfeld von 17 Grad quer zum Aufnahmestreifen (FOV across track) detektiert die Kamera eine Zeile von 1600 Pixeln.

Die Aufnahmen mit der Hyperspektralkamera erfolgten auf dem Gewächshausgelände der Universität Trier. Der Sensor wurde auf einem Gestell in 3,8 m Höhe über Grund montiert (Abb. 2). Neben den drei parallel angeordneten Töpfen wurde ein rechteckiges Referenzpanel aus Spectralon® im Aufnahmebereich platziert. Die Datenvorprozessierung beinhaltet zuerst eine radiometrische Kalibrierung der Daten. Die Daten werden in Strahldichtewerte (at-sensor-radiance, $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$) umgerechnet. Dabei werden auch



Abb. 2: Versuchsaufbau für die Hyperspektralaufnahmen. Die Bewegungsrichtung des Sensors ist mit dem Pfeil angedeutet.

Streifen im Bild eliminiert, die durch unterschiedliche Empfindlichkeiten der einzelnen Sensorelemente zustande kommen. Anschließend erfolgt eine räumliche Aggregation, bei der vier Pixel zu einem zusammengefasst werden. Durch Division der Strahldichtewerte durch das mittlere Spektrum des Referenzpanels wird schließlich die relative Reflexion berechnet.

2.2 Vegetationsindizes

Zahlreiche Autoren (u.a. PEÑUELAS et al. 1995, ROBERTS et al. 2012) haben sich in den letzten Jahren bereits mit der Entwicklung von Indizes, die darauf hinzielen, eine hohe Korrelation mit relevanten Vegetationsparametern wie Blattfläche, Gesamtbiomasse, Pflanzenzustand, Pigment- und Wassergehalt herzustellen, beschäftigt. Für diese Arbeit wurden zwölf Indizes ausgewählt, die sich in zahlreichen Studien bezüglich ihrer Eignung zur Ableitung von biochemischen und biophysikalischen Vegetationsparametern bewährt haben

Tab. 2: Übersicht über die Vegetationsindizes. Mit (*) sind Indizes markiert, die nur für hyperspektrolale Sensoren geeignet sind. ρ gibt den Reflexionsgrad bei der jeweiligen Wellenlänge an.

Vegetationsindex	Indexgleichung	Referenz
Simple Ratio	$SR = \rho_{NIR} / \rho_{ROT}$	JORDAN (1969)
Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{ROT}) / (\rho_{NIR} + \rho_{ROT})$	ROUSE et al. (1973)
Green Normalized Difference Vegetation Index	$Green\ NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{GRÜN}) / (\rho_{NIR} + \rho_{GRÜN})$	GITELSON et al. (1996)
Red-Edge Normalized Difference Vegetation Index*	$NDVI\ 705 = (\rho_{750} - \rho_{705}) / (\rho_{750} + \rho_{705})$	GITELSON & MERZLYAK (1994)
Structure Intensive Pigment Index*	$SIPi = (\rho_{800} - \rho_{450}) / (\rho_{800} + \rho_{680})$	PEÑUELAS et al. (1995)
Plant Senescence Reflectance Index*	$PSRI = (\rho_{680} - \rho_{500}) / \rho_{750}$	MERZLYAK et al. (1999)
Chlorophyll Reflectance Index*	$Chl-Ri = \rho_{860} / (\rho_{708} \cdot \rho_{550})$	GITELSON & MERZLYAK (2004)
Red-Edge Chlorophyll Reflectance Index*	$Chl-Ri_{Red-Edge} = (\rho_{750-800}) / (\rho_{695-800}) - 1$	GITELSON & MERZLYAK (2004)
Moisture Stress Index	$MSI = \rho_{1600} / \rho_{820}$	HUNT & ROCK (1989)
Water Index*	$WI = \rho_{900} / \rho_{970}$	PEÑUELAS et al. (1993)
Photochemical Reflectance Index*	$PRI = (\rho_{531} - \rho_{570}) / (\rho_{531} + \rho_{570})$	GAMON et al. (1992)
Red-Edge Vegetation Stress Index*	$RVSI = ((\rho_{714} - \rho_{752}) / 2) - \rho_{733}$	MERTON (1998)

(vgl. Tab. 2). Unter den diskutierten Indizes befinden sich traditionelle Indizes wie der SR, der NDVI und der MSI, welche ursprünglich für Multispektralsensoren entwickelt wurden. Von besonderem Interesse sind jedoch Indizes, die für Hyperspektralsensoren konzipiert wurden und für ihre Berechnung sehr enge Spektralbereiche erfordern.

3 Ergebnisse

3.1 Referenzdaten

Während des Experiments wurde die Austrocknung vieler Baumindividuen anhand von Blattfärbungen und Einrollen von Blättern sichtbar. Eine Auskunft über die tatsächliche Veränderung der Bodenfeuchte bzw. den Chlorophyll- und Blattwassergehalt geben experimentelle Messungen (Abb. 3).

Zur Beschreibung des Chlorophyllgehaltes, der den Vitalitätszustand der Pflanzen widerspiegelt, wurden SPAD-Messwerte verwen-

det. Im Laufe der sechs Wochen ist ein kontinuierlicher Abfall der Werte zu beobachten. Dadurch, dass das Experiment bis Ende September dauerte, wird die kontinuierliche Abnahme des Chlorophyllgehaltes in beiden Gruppen durch Beginn der Seneszenz mitgesteuert. In der TSG wird der Abbau von Chlorophyllpigmenten offensichtlich in der letzten Woche durch die Austrocknung verstärkt.

Bei dem Blattwassergehalt ist in der KG keine Abnahme im Laufe der Messperiode von sechs Wochen zu verzeichnen. In der TSG sinkt der Blattwassergehalt erst ab dem vierten Termin, wobei bei Topf 22 eine Abnahme schon nach der dritten Woche zu sehen ist. Trotz des fortschreitenden Austrocknungsprozesses ist der späte Rückgang der Werte darauf zurückzuführen, dass den Bäumen in den ersten drei bis vier Wochen das im Boden gespeicherte Wasser zu Verfügung steht. Dies führt dazu, dass nachweisbare Veränderungen im Blattwassergehalt erst dann sichtbar werden, wenn das Substrat austrocknet und kein pflanzenverfügbares Wasser mehr vorhanden ist.

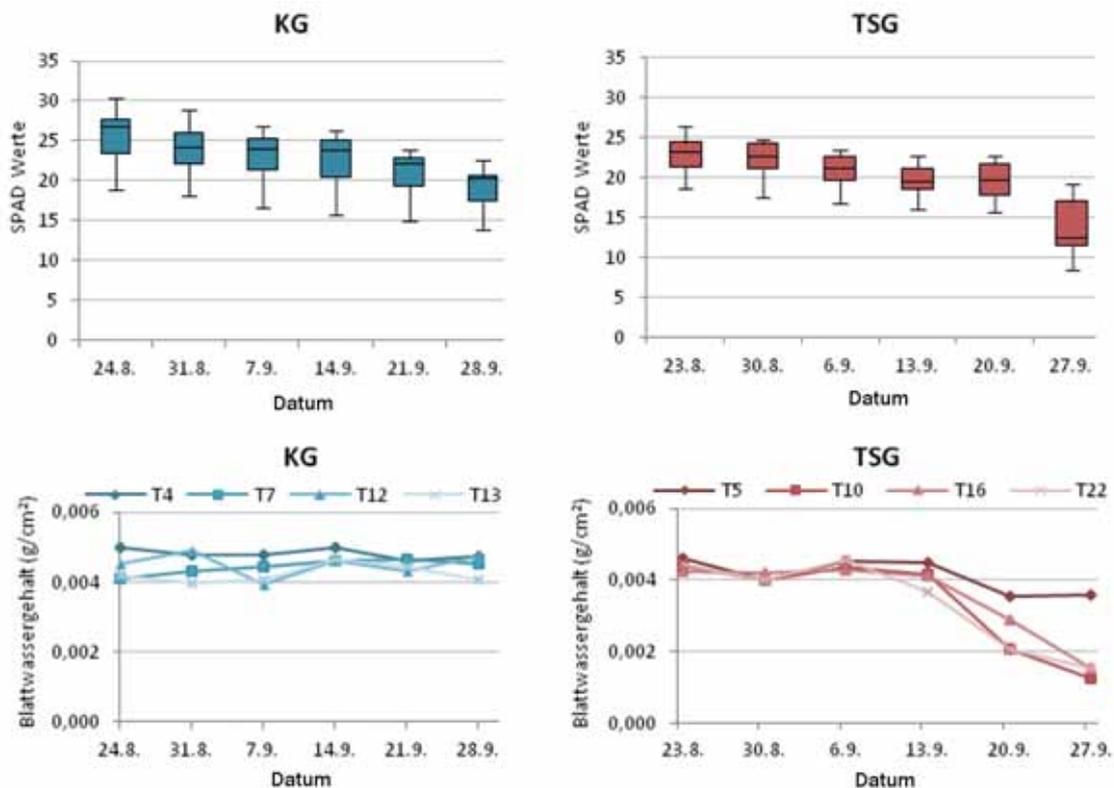


Abb. 3: Entwicklung der SPAD-Werte und des Blattwassergehaltes für die Kontrollgruppe (links) und Trockenstressgruppe (rechts). „T0“ = Topfnummer.

3.2 Nichtabbildende Geländespektrometrie (ASD FieldSpec II)

Spektrale Signaturen

Anhand der spektralen Reflexionssignaturen des Labor- und Geländespektrometers ASD FieldSpec II konnten typische Merkmale der Austrocknung, wie die Abschwächung der Absorption bei den Chlorophyllabsorptionsbanden, die Verschiebung des *Green Peaks* in Richtung des langwelligen Bereiches, der Anstieg der Reflexion im nahen Infrarot und die Abschwächung der Reflexion in den Wasserabsorptionsbanden beobachtet werden. In Abb. 4 werden die Ergebnisse des ersten (23./24.8.) und letzten (27./28.9.) Messtermins dargestellt.

Schätzung des Chlorophyll- und Blattwassergehaltes mithilfe von Vegetationsindizes

Beim Vergleich der Vegetationsindizes mit dem gemessenen Chlorophyllgehalt wurde festgestellt, dass die Indizes NDVI, SIPI und PSRI, welche die Reflexion im roten Bereich des elektromagnetischen Spektrums verwenden, nicht sensitiv für ein breiteres Konzentrationsspektrum sind. Die Indexwerte sättigen bei steigendem Chlorophyllgehalt auf und bleiben unverändert (vgl. Abb. 5a). Besonders hohe Korrelationen erzielen Indizes, welche Kanäle im *Red-Edge*-Bereich nutzen (vgl. Abb. 5b). Dazu gehören der NDVI 705, der $Chl-RI_{Red-Edge}$ und der RVSI. Diese Indizes erwiesen sich als sensitiv unabhängig von der Höhe der Blattchlorophyllkonzentration. Sie sind demzufolge in der Lage, die Auswirkungen des Trockenstresses früher wahrzunehmen.

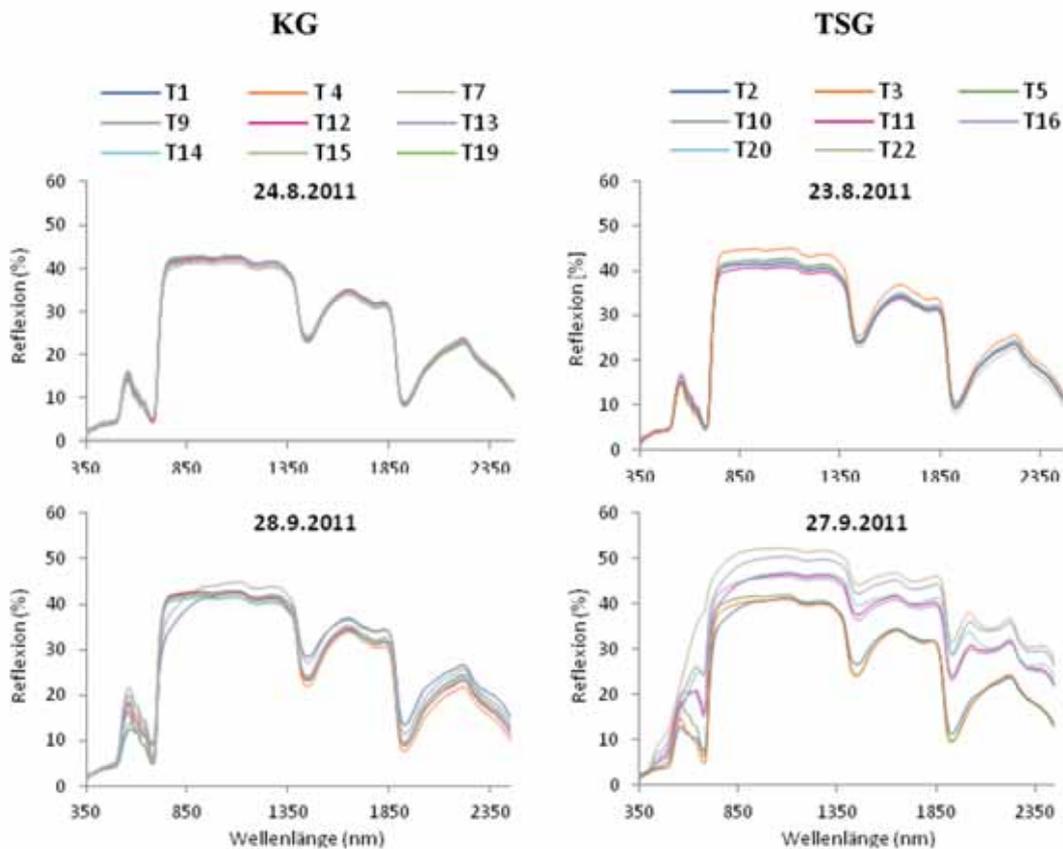


Abb. 4: Spektrale Signaturen (ASD FieldSpec) für die Kontrollgruppe (linke Spalte) und die Trockenstressgruppe (rechte Spalte). „T0“ = Topfnummer.

men, und können somit als potentielle Stres-
sindikatoren verwendet werden.

Obwohl der PRI nicht zu der Gruppe der In-
dizes gehört, die sensitiv auf den Chlorophyll-
gehalt reagieren, zeigt sich trotzdem ein pro-
portionaler Zusammenhang ($R^2 = 0,757$). Des
Weiteren wurden in dieser Arbeit wassersensi-
tative Indizes (MSI und WI) untersucht und
mit dem gravimetrisch ermittelten Blattwas-
sergehalt verifiziert. Alle Indizes zeigen hohe
Korrelationen, die besten Ergebnisse lieferte
der MSI (vgl. Abb. 5c).

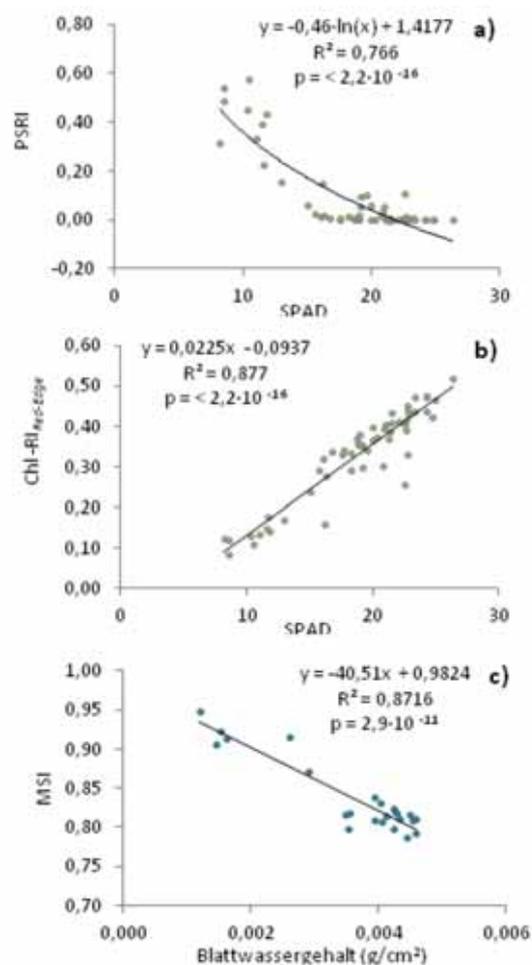


Abb. 5: Zusammenhang zwischen den Vegetationsindizes und den SPAD-Werten (a,b) bzw. dem Blattwassergehalt (c). Bei den SPAD-Werten bzw. dem Blattwassergehalt handelt es sich um Topfmittelwerte gemessen vom 23. August bis zum 27. September in der TSG.

3.3 Abbildende Geländespektrometrie (HySpex VNIR-1600)

Innerhalb der Experimentwochen fanden die spektralen Aufnahmen der Baumgruppen mit der Hyperspektralkamera HySpex zu fünf Zeitpunkten statt. Abb. 6 zeigt exemplarisch die Ergebnisse zu drei Messterminen. Die Signaturen zeigen in diesem Abschnitt des elektromagnetischen Spektrums einen ähnlichen Verlauf wie die FieldSpec-Signaturen. Bei den Spektralsignaturen ist der *Green Peak* zu sehen, der sich mit der Austrocknung in Richtung des langwelligen Bereiches verschiebt. Die Reflexionssignaturen zeigen außerdem eine deutlich ausgeprägte Wasserabsorptionsbande bei ca. 970 nm. Die Gesamtreflexion ist höher als die Reflexion eines einzelnen Blattes. Die Reflexionsspektren zeigen ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis bis auf den Bereich ab ca. 850 nm. Außerdem wird das Spektrum durch die Sauerstoffabsorptionsbande bei 760 nm beeinflusst.

Die HySpex-Aufnahmen bieten zwei Möglichkeiten, um Vegetationsindizes zu berechnen. Die erste ist die Berechnung der Indizes auf Basis von hyperspektralen Bilddaten. Das Ergebnis ist ein hochaufgelöstes Rasterbild der Baumkronen, in dem einzelnen Pixeln ein bestimmter Indexwert zugeordnet wird. Eine weitere Möglichkeit ist die Berechnung

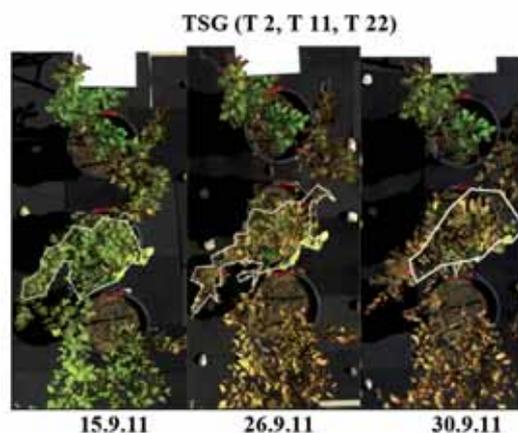


Abb. 6: Echtfarbandarstellung von HySpex-Aufnahmen (Kanäle 55, 41, 12) für die Töpfe 2, 11 und 22 (Trockenstressgruppe; Reihenfolge von oben nach unten) und die Änderung der spektralen Reflexionssignatur für Topf 11. „T0“ = Topfnummer.

der Indizes aus den extrahierten Topfmittelspektren, die in einem linearen Verlauf dargestellt werden.

Das unterschiedliche Verhalten der Indizes über den Messzeitraum zeigt sich auch bei den Indizes auf Basis der HySpex-Messungen. Abb. 7 stellt exemplarisch eine zeitliche Entwicklung des PSRI und PRI der TSG an fünf Messterminen dar. Der PSRI zeigt in früheren Austrocknungsstadien keinen Unterschied in den Reaktionen der verschiedenen Töpfe. Der PRI zeigt schon an den ersten beiden Terminen ein differenziertes Bild der Baumkronen. Das heißt, der Index ist in der Lage, kleinste physiologische Unterschiede zwischen einzelnen Baumindividuen zu identifizieren. Gleichmaßen wie der PRI erwiesen sich die Indizes NDVI 705, RVSI und $\text{Chl-RI}_{\text{Red-Edge}}$ als

sehr sensitiv gegenüber der durch Trockenstress verursachten Veränderungen.

4 Diskussion

Die spektralen Reflexionssignaturen des ASD FieldSpec-Spektrometers zeigen typische Merkmale der Austrocknung. Unterschiedliche Reaktionen der Töpfe innerhalb der Trockenstressgruppe (vgl. Abb. 4) können durch die Beziehung zwischen den Indizes $\text{Chl-RI}_{\text{Red-Edge}}$ und MSI, welche sich für die Schätzung von Chlorophyll- und Blattwasser-gehalt als geeignet erwiesen haben, und den biometrische Kennwerte erklärt werden (vgl. Abb. 8).

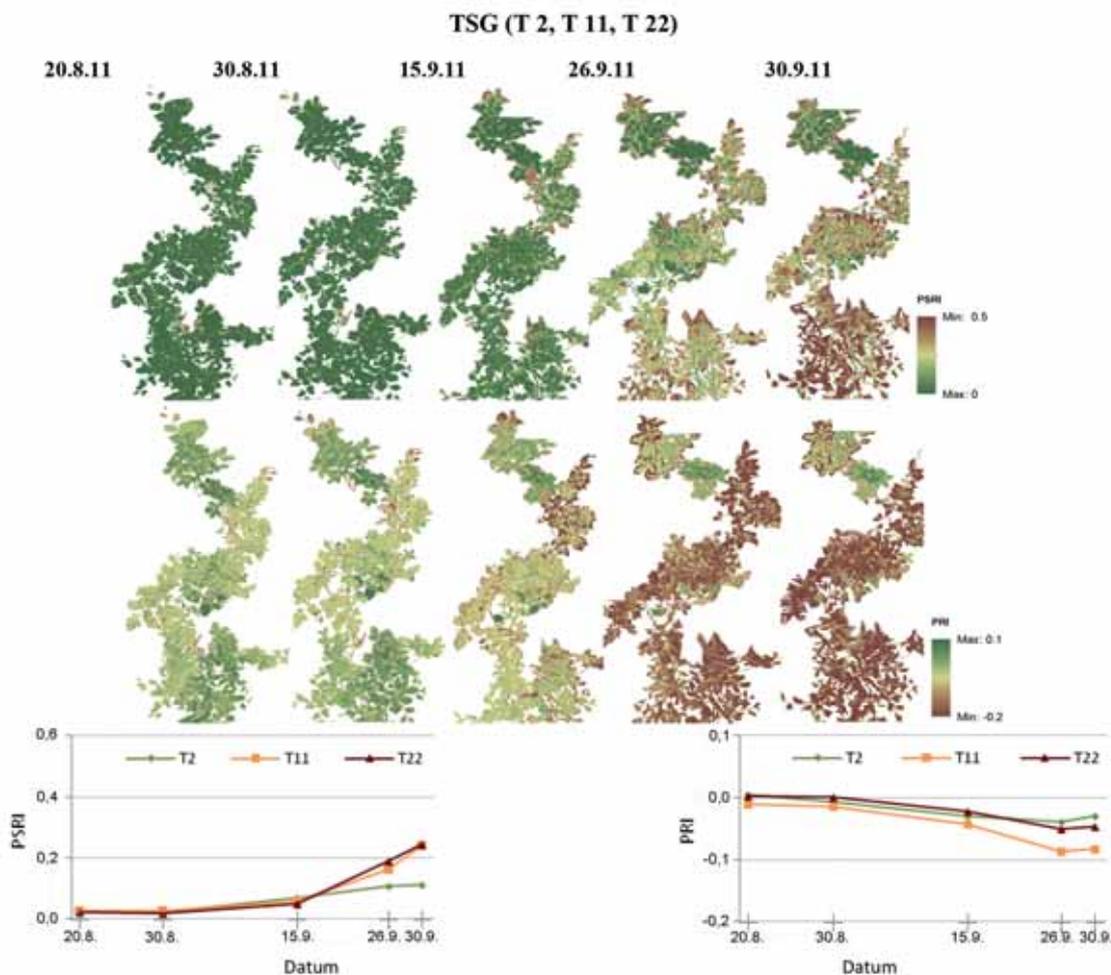


Abb. 7: Verlauf des PSRI und PRI für die Töpfe 2, 11 und 22 der Trockenstressgruppe (Reihenfolge von oben nach unten). „T0“ = Topfnummer.

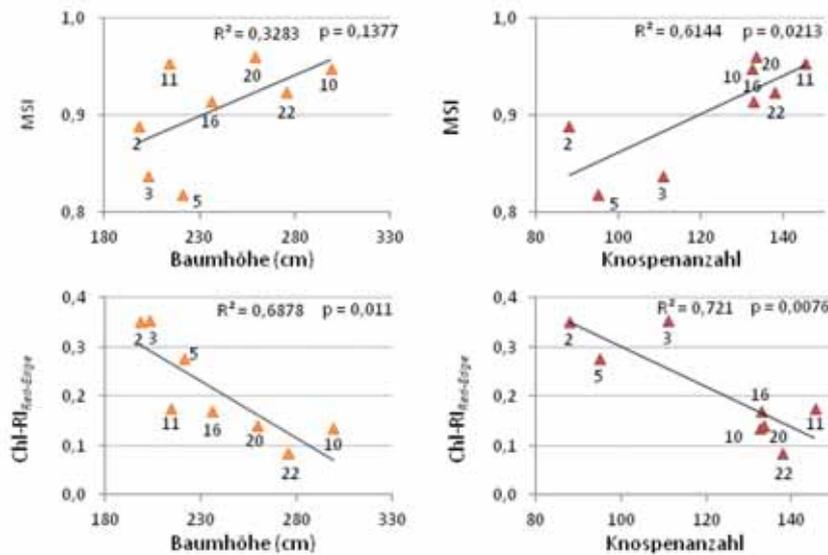


Abb. 8: Zusammenhang zwischen den Vegetationsindizes (MSI und Chl-Rl_{Red-Edge}) und den pro Topf aufsummierten Baummerkmalen (Baumhöhe, Knospenanzahl).

Bei den HySpex-Aufnahmen können sich auf Grund der Lage der Sauerstoffabsorptionsbande mit einem Maximum bei 760 nm Ungenauigkeiten bei der Berechnung von Indizes, welche diese Wellenlängen verwenden, ergeben. Bei Betrachtung der HySpex-Reflexionssignatur fällt auf, dass das Spektrum in dem Bereich zwischen 746 nm und 764 nm, in dem die Absorptionsbande liegt, verrauscht ist. In unserem Fall konnten zwei Faktoren festgestellt werden, welche zu einer Erhöhung der Indexwerte beitragen. Zum einem ist dies durch das Auftreten des Schattens innerhalb der Baumkronen begründet. Zum anderen verändert sich die Aufnahmegeometrie der Untersuchungspflanzen während der Austrocknung, z. B. Einrollen der Blätter.

Es ist zu empfehlen, den Beginn des Trockenstressexperiments in zukünftigen Studien früher in die Sommermonate zu setzen, um den Einfluss der natürlichen Seneszenz so gering wie möglich zu halten.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Verfahren der abbildenden und nichtabbildenden Spektrometrie getestet, um physiologische Veränderung einzelner Blattorgane und Baumindiv-

viduen von Buchen (*Fagus sylvatica* L.) während einer sechswöchigen induzierten Trockenstressphase zu untersuchen. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, wurden die relevanten Daten an einer Trockenstressgruppe, welche über den Messzeitraum keine Wasserzufuhr erhielt, und an einer stetig bewässerten Kontrollgruppe gemessen. Während des Experiments fanden Ermittlungen des Boden- und Blattwassergehalts, Chlorophyllmessungen mit dem SPAD-502-Chlorophyllmeter sowie Erhebungen der spektralen Signaturen einzelner Buchenblätter mit dem nichtabbildenden Geländespektrometer ASD FieldSpec II statt. Weiterhin wurden Aufnahmen der Pflanzen mittels der bildgebenden Hyperspektralkamera HySpex durchgeführt. Durch Wassermangel wurde die Aktivität der Photosynthese in den einzelnen Buchenindividuen in unterschiedlichem Ausmaß herabgesetzt, was anhand der experimentellen Befunde und den verwendeten Vegetationsindizes belegt werden konnte.

Danksagung

Unser herzlicher Dank gilt den Mitarbeitern des Faches Umweltfernerkundung und Geoinformatik (Universität Trier) für die tatkräfti-

ge Unterstützung bei der Datenerhebung sowie für ihre wertvollen Anregungen und Ideen während der Auswertung der Daten. Weiterhin bedanken wir uns bei dem Leiter des Lehrstuhls für Geobotanik (Universität Trier) Prof. Dr. WILLY WERNER für sein Engagement und die hilfreichen und konstruktiven Vorschläge.

Literatur

- ALLEN, C.D., MACALADY, A.K., CHENCHOUNI, H., BACHELET, D., MCDOWELL, N., VENNETIER, M., KITZBERGER, T., RIGLING, A., BRESHEARS, D.D., HOGG, E.H., GONZALEZ, P., FENSHAM, R., ZHANG, Z., CASTRO, J., DEMIDOVA, N., LIM, J.-H., ALLARD, G., RUNNING, S.W., SEMERCI, A. & COBB, N., 2010: A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. – *Forest Ecology and Management* **259**: 660–684.
- BOLTE, A., EISENHAEUER, D.-R., EHRHART, H.-P., GROSS, J., HANEWINKEL, M., KÖLLING, C., PROFFT, I., ROHDE, M., RÖHE, P. & AMERELLER, K., 2009: Klimawandel und Forstwirtschaft – Übereinstimmungen und Unterschiede bei der Einschätzung der Anpassungsnotwendigkeiten und Anpassungsstrategien der Bundesländer. – *Landbauforschung – vTI agriculture and forestry research* **59**: 269–278.
- GAMON, J.A., PEÑUELAS, J. & FIELD, C.B., 1992: A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. – *Remote Sensing of Environment* **41**: 35–44.
- GITELSON, A.A. & MERZLYAK, M.N., 1994: Spectral Reflectance Changes Associated with Autumn Senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. Leaves. Spectral Features and Relation to Chlorophyll Estimation. – *Journal of Plant Physiology* **143**: 286–292.
- GITELSON, A.A., KAUFMAN, Y.J. & MERZLYAK, M.N., 1996: Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. – *Remote Sensing of Environment* **58**: 289–298.
- GITELSON, A.A. & MERZLYAK, M.N., 2004: Non-destructive assessment of chlorophyll, carotenoid and anthocyanin content in higher plant leaves: Principles and algorithms. – STAMATIADIS, S., LYNCH, J.M. & SCHEPERS, J.S. (eds.): *Remote Sensing for Agriculture and the Environment*: 78–94, Ella, Griechenland.
- HUNT, E.R. & ROCK, B.N., 1989: Detection of changes in leaf water content using near- and middle-infrared reflectance. – *Remote Sensing of Environment* **30**: 43–54.
- JORDAN, C.F., 1969: Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. – *Ecology* **50**: 663–666.
- MARKWELL, J., OSTERMAN, J.C. & MITCHELL, J.L., 1995: Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter. – *Photosynthesis Research* **46**: 467–472.
- MERTON, R.N., 1998: Monitoring community hysteresis using spectral shift analysis and the red-edge vegetation stress index. – *Seventh Annual JPL Airborne Earth Science Workshop*, Pasadena, CA, USA.
- MERZLYAK, J.R., GITELSON, A.A., CHIVKUNOVA, O.B. & RAKITIN, V.Y., 1999: Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. – *Physiologia Plantarum* **106**: 135–141.
- PEÑUELAS, J., FILELLA, I., BIEL, C., SERRANO, L. & SAVE, R., 1993: The reflectance at the 950–970 region as an indicator of plant water status. – *International Journal of Remote Sensing* **14**: 1887–1905.
- PEÑUELAS, J., BARET, F. & FILELLA, I., 1995: Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll-a ratio from leaf spectral reflectance. – *Photosynthetica* **31**: 221–230.
- ROBERTS, D.A., ROTH, K.L. & PERROY, R.L., 2012: Hyperspectral vegetation indices. – THENKABAIL, P.S., LYON, J.G. & HUETE, A. (eds.): *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation*: 141–165, CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- ROUSE, J.W., HAAS, R.H., SCHELL, J.A. & DEERING, D.W., 1973: Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. – 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351: 309–317, Washington DC, USA.
- SITTE, P., WEILER, E.W., KADEREIT, J.W., BRESINSKY, A. & KÖRNER, C., 2002: *Strasburger Lehrbuch der Botanik für Hochschulen*. – 35. Auflage, 1124 S., Spektrum, Heidelberg.

Adresse der Autoren:

OKSANA STERN, BARBARA PASCHMIONKA, JOHANNES STOFFELS, HENNING BUDDENBAUM & JOACHIM HILL, Fernerkundung und Geoinformatik, Universität Trier, Behringstr. 15, D-54286 Trier, e-mail: {stern}{s6bapasc}{stoffels}{buddenbaum}{hill}@uni-trier.de

Manuskript eingereicht: Juni 2013
Angenommen: November 2013