

Nicht-invasive Sensortechniken am Blattapparat der Zuckerrübe zur Populations-schätzung von *Heterodera schachtii*

Nemaplot Dr. Kai Schmidt, Bonn, Abschlussbericht CROP.SENSE.net, 2015, Projekt ZS2/AP7, unter Datenverwendung von Dr. M. Daub, JKI Eldorf und der Arbeitsgruppe Bareth, Prof. Dr. G. Bareth, Institut für Geographie, Uni Köln, EU-Förder-Nr.: z1011bc001a

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts AP7/ZS2 wurden Verfahren zur quantitativen und qualitativen Analyse von hyperspektralen Messwerten weiterentwickelt. Am Beispiel der Abundanzschätzung des Zuckerrübennematoden *Heterodera schachtii* wurden auf der Basis multivariater Verfahren wie Diskriminanzanalysen (DA) und Allgemeines lineares Modellieren (ALM) untersucht, wie aus Änderungen im hyperspektralen Signal am oberirdischen Blattapparat Informationen über den bodenbürtigen Schädling abgeleitet werden können. Aufgrund der multiplen Wechselwirkungen innerhalb des Systems wird die Zielgröße Eier & Larven/100 ml Boden von mehreren übergeordneten Faktoren maskiert. Dazu zählen Sortenwahl, Jahr und Vegetationsperiode. Führt man die Analyse auf der kleinsten Einheit durch, i.e. einen Messtermin, wo alle übergeordneten Faktoren konstant sind, erzeugen beide Verfahren statistische Parameter, die mit den gemessenen Nematodenpopulationen korrelieren. Leider sind die Parameter und die Verfahrensgüte nicht konstant über die Zeit. Eine Transformation auf Biologische Zeiten mit der Intention der Reduzierung des Zeiteffekts, hat zwar einen Trend erkennen lassen, inwieweit sich das hyperspektrale Signal über die Zeit ändert, aber die erwünschte allgemeine Übertragbarkeit wurde nicht erreicht. Nichtsdestotrotz, nicht-invasive Verfahren auf der Basis hyperspektraler Sensoren eignen sich zur Auswertung und Unterscheidung der kontrollierenden Einflussgrößen mehrfaktorieller Versuche oder Systeme und es wurden allgemeine Grundlagen für weiterführende Messmethoden geschaffen.

Einleitung

Ziel des Projekts ist es, die bisherige Abundanzschätzung des Zuckerrübennematoden *Heterodera schachtii* anhand arbeits- und kostenintensiver Bodenproben durch nicht-invasive Verfahren abzulösen, wie z.B. durch hyperspektrale Messungen des Blattapparates. Mit anderen Worten, es geht um die Entwicklung von arbeitsexensiven und kostengünstigen Hochdurchsatzverfahren in/für Feldsituationen. Das Projekt AP7/ZS2 testet die Hypothese, dass nematodeninduzierte, physiologische Effekte an der Wirtswurzel sich auch in entsprechenden Signaländerungen am Blattapparat nachweisen lassen. Zur Analyse ist geplant, die relativen Änderungen der Signaturen als interaktive Funktion der drei gleichzeitig zu berücksichtigen Faktoren Nematodendichte, Pflanzenalter und Temperatur über entsprechende Modelle abzubilden. Es wird vermutet, dass die relativen Änderungen zeitlich limitiert sind, d.h. mögliche Effekte verschwinden mit dem Wachstum des Blattapparates der Zuckerrübe. Es gilt die spektralanalytische Differenz von befallener zu befallsfreier Pflanze/Fläche zum gegebenen Termin auf eine biologisch relevante Größe zu transformieren. Theoretisch müsste in einem zweiten Schritt anhand des Temperaturverlaufs iterativ auf die Ausgangsverseuchung zurückgerechnet werden. Dazu müssten die Dynamiken sowohl des Wirtes als auch der Nematoden auf die Skalen der hyperspektralen Signale abgebildet werden. Basierend auf einem altersstrukturierten (Leslie-) Modell und einem Differentialgleichungssystem (Pflanzenmodell) wurde eine javabasierte Analyseplattform entwickelt, in der die verschiedenen Dynamiken verarbeitet werden können.

Es war geplant folgende Fragestellungen zu bearbeiten:

- a) Gibt es ein zeitlich befristetes Wachstumsfenster, welches über hyperspektrale Signaturen des Blattapparates die indirekte Quantifizierung der Nematodenpopulation und deren Verteilung im Bestand ermöglicht?
- b) Wie variiert ein Sensorsignal bei unterschiedlichen Populationsdichten?
- c) Wie wird das Sensorsignal durch die jahresspezifische Witterung verzerrt/verändert?
- d) Wie wirkt sich die Sortenwahl (anfällig, tolerant, resistent) auf die Signaturen aus?
- e) Besteht die Möglichkeit die simultan auftretenden Einflussfaktoren in ihre Komponenten zu zerlegen und zu quantifizieren?
- f) Gelingt es, anhand der erfassten Information im Jahre X eine Beratungsempfehlung für den nächsten Zuckerrübenanbau zu erstellen.

Motivation und Zielsetzung:

Der Rübenematode *Heterodera schachtii* bleibt trotz des Einsatzes von resistenten/toleranten Sorten ein limitierender Faktor im Rübenanbau. In der Praxis müssen zahlreiche Entscheidungen (Fruchtfolge, Sortenwahl, Zwischenfruchtanbau) in Bezug auf Ertragsminderung oder erhöhten Ressourcenverbrauch berücksichtigt werden, um die Nematodenpopulationen auf einem tolerierbaren Niveau zu halten. Hierbei handelt es sich um Entscheidungen, die eventuell eine oder mehrere Fruchtfolgen im Voraus gefällt werden. Eine großflächige Dichteschätzung durch Bodenproben ist aufgrund der hohen Kosten ökonomisch nicht vertretbar, kostengünstigere Methoden sind zwingend erforderlich. Innerhalb des Systems *Beta vulgaris* – *Heterodera schachtii* zeigt sich, dass nematodenbedingte Differenzierungen in der Morphologie/ Wachstumsdynamik nicht nur eine Funktion des Nematodenbesatzes sind, sondern dass phänologische Ausprägungen sich aus der Dynamik beider Systeme ergeben und sowohl durch Temperatureffekte als auch Sortenwahl maskiert werden.

Material und Methoden

Um ein biologisches Problem modellmäßig in seine Varianzkomponenten und Interaktionseffekte zerlegen zu können, sind kontrastierende Datensätze auf verschiedenen Skalenebenen (Freiland, Gewächshaus unter kontrollierten und konstanten Bedingungen bei unterschiedlichen Nematodendichten, etc.) notwendig.

Versuchsanlagen am JKI

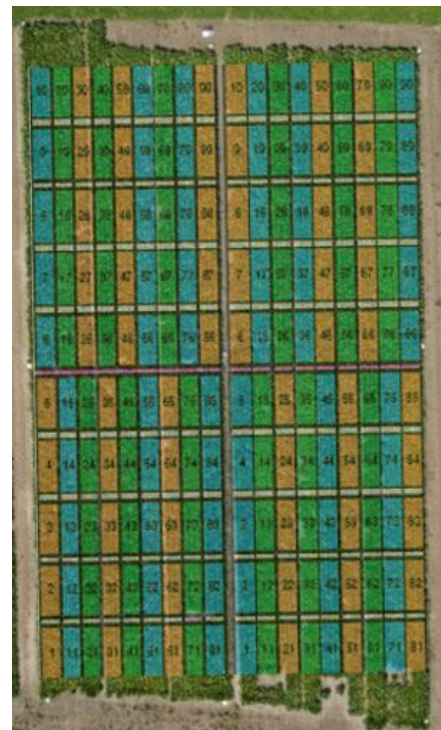


Abb. 1: Versuchsanlage 2012 mit 180 Parzellen und Wirtschaftspfaden, Anlage JKI, Luftbild AG Bareth, verändert.

Das Projekt ZS2 konnte in den Jahren (2011 im Vorlauf) 2012 bis 2014 an einen zeitgleich stattfindenden Freilandversuch des JKI Eldorf (Projektleitung Dr. M. Daub, Julius Kühn-Institut (JKI), Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Pflanzenschutz in Ackerbau und Grünland, Eldorf) angegliedert werden, bzw. der Versuch wurde dem Bedarf von ZS2 entsprechend erweitert. Das Versuchsfeld zeichnete sich dadurch aus, dass in einer Streifenanlage mit einer durchschnittlichen Parzellengröße von ca. 4.5 m x 1.8m verschiedene Nematodendichten über eine Vielzahl von Kleinparzellen eingestellt sind, deren a)





Abb. 2: RGB Bild des Versuchsfelds 2012

b) langfristige Historie bekannt ist und b) kleinräumige und exakte Informationen der Populationsdichte zur Saat Zuckerrübe vorliegen. Angebaut wurden die Sorten Beretta (anfällig), Theresa, bzw. Kristallina in 2014 (tolerant) und Nemata (resistent). Die vorhandenen Nematodendichten zur Saat lagen im Bereich von 0 bis über 6000 E&L/100 ml Boden. Das Erzielen solcher Populationspektren auf kleinstem Raum ist einzigartig und ideal für dieses Projekt. Die Parzellenzahl (und damit Stichprobenumfänge) variierte von 81 in 2013 bis zu 180 in 2012 verteilt auf die 3 Sorten. Die räumliche Nähe innerhalb des Versuchsfelds ermöglichte die Erstellung von Nematodenbesatzkarten (Siehe Anhang C). In allen Jahren führte multipler Pathogenbefall gegen Ende der Vegetationsperiode, bzw. Messsaison zu einer massiven Vergilbung der Bestände, somit wurden die Nematodeneffekte durch dominantere Stresssymptome überlagert. Daher wurden die Messungen Ende August eingestellt, bzw. Messungen Anfang September konnten für eine allgemeine Auswertung nicht mehr verwendet werden.

Eine visuelle Betrachtung des Versuchsfeldes zeigte in allen Jahren mehr oder weniger ausgeprägte Bestandsunterschiede, wobei es sich bei den visuellen Unterschieden hauptsächlich um Sortenunterschiede handelte. Eine deutliche Abgrenzung einzelner Parzellen (i.e. Nematodeneffekt) war selten bis gar nicht zu erkennen. Auch die fotografische Darstellung der Unterschiede erwies sich als schwierig (Abb. 2), da die nematodenbedingten Welkesymptome nur selten auftraten. Ein völlig anderes Bild, als was nach den immensen Populationsdichten zu erwarten gewesen wäre.

Messmethoden

Nemaplot standen für die Messungen folgende hyperspektrale Sensoren zur Verfügung:

1. ASD FieldSpec, Wellenlängenbereich ca. 400 bis 1050 nm (Gerät wird nicht mehr produziert, Leihgabe der AG Bareth, Uni Köln), Messungen erfolgten ca. 50 cm über dem Bestand, Montage des Sensors auf einer Holzkonstruktion, die ca. 1m in die Parzelle hineinreichte. Transport über Schubkarre, ca. 20 Wiederholungen pro Parzelle. 
2. Wie oben, aber Messungen mit „Plant Probe“, d.h. Reflexionsmessung mit aktiver Beleuchtung, Leihgabe des INRES Phytomedizin, Universität Bonn. Dabei wird die Reflexion des Blattquerschnittes gemessen, ergibt das „sauberste“ Signal, da ungestört von äußeren Einflüssen; langwierige Messungen, da einzelne Blätter angefasst werden müssen. 
3. AgroSpec der Fa. TEC5, Wellenlängenbereich von 300 bis 1600 nm, 4 Aufnahmen in 2012

4. ASD FieldSpec4 (Bereich 350 bis 2500 nm, ebenfalls Leihgabe der AG Bareth, Uni Köln), einmalige Messung in 2013, eine 2. Messung war wegen Überbelichtung nicht auswertbar.

Die Messungen fanden in der Regel in den späten Vormittags- Mittagsstunden statt, während durch die im Zenit stehende Sonne die geringste Schattenbildung stattfand. Um den Versuchs möglichst ungestört zu lassen und den sich entwickelnden Blattapparat nicht zu beschädigen, wurde nur in Parzellen benachbart zu Wirtschaftspfaden gemessen, die Zentralparzelle wurde ausgelassen. Daher wurden pro Messtermin nur 2/3 der Parzellen sensorisch (hyperspektral) erfasst. Die Messungen mit der Plant Probe beschränkte sich auf 2011 und zu Beginn der Messperiode 2012. Es wurde kein Vorteil zur Bestandsreflexion gesehen. Zu Beginn der Messungen wurden 10, in den späteren Jahren 20 Wiederholungen pro Parzelle gemacht. Die Messung einer Parzelle dauerte in der Regel 20 Sekunden.

Die Bestandsreflexion wurde je nach verwendetem Sensor aus verschiedenen Höhen erfasst wurde (0.5m bis 1m über dem Bestand). Die Messungen erfolgten hauptsächlich mit dem ASD *FieldSpec*. In 2013 wurden einmalig die Parzellen auch mit dem *FieldSpec4* gescannt. Das im Rahmen des Projekts beschaffte *AgroSpec* von Tec5 stand Nemaplot nur 2012 zur Verfügung und war nur bis Mitte Juli funktionsfähig. Insgesamt wurden an 4 Messterminen Daten mit dem Gerät erhoben.

Tab. 1: Messtermine und Biologische Zeitäquivalente (BZ)

2011, Vorversuche, BZ		2012	BZ	2013	BZ	2014	BZ
27.6.	32.7	21.6.	26.1	17.6.	19.7	23.7.	46.3
1.8.	48.5	21.6. ²	26.1	26.6.	24.4	5.8.	54.8
11.8.	53.6	5.7. ²	33.6	5.7.	28.4	21.8.	61.8
1.9.	63.8	11.7.	36.7	11.7.	32.1	4.9.	67.2
		11.7. ²	36.7	18.7. ²	36.4		
		20.7. ²	40.3	2.8.	47.6		
		24.7.	42.3	20.8.	57.5		
		1.8.	47.3	29.8.	62.1		
		16.8.	55.7				
		30.8.	64.6				
ASD FieldSpec mit Plant Probe		ASD FieldSpec, ² AgroSpec, Tec5		ASD FieldSpec, ² ASD FieldSpec4		ASD FieldSpec	

Gemessen wurde in der Regel am späten Vormittag/Mittag, der Sonnenstand im Zenit vermied eine übermäßige Selbstbeschattung durch die Geräte.

Witterung

Die wichtigsten Witterungsparameter wurden über die JKI-eigene Wetterstation erhoben. Eine Zusammenfassung der biologisch relevanten Witterungsparameter ist im Anhang A dargestellt. 2011 hatte die höchsten Temperatursumme und höchste Lichteinstrahlung. Gepaart mit einer doch längeren Periode schwacher Niederschläge während der Hauptwachstumsphase im Juli zeigten sich die markanten nematodenverursachten, aber reversiblen Welkesymptome. In den tatsächlichen Versuchsjahren 2012 bis 2014 traten diese Symptome nur bedingt auf. Aufgrund der ausreichenden Wasserversorgung und der kontinuierlichen Nachlieferung über die Vegetationsperiode hinweg zeigten die Pflanzen in 2012 keinerlei



Stresssymptome. Der Blattapparat war in allen Varianten voll, bzw. überproportional entwickelt und zeigte in den Sommermonaten in keinem Fall das typische Welken. 2013 waren hängende Blätter, bedingt durch kurze Trockenperioden während der Vegetationsperiode, zu beobachten, die am späten Nachmittag wieder aufgehoben waren. In 2014 schien es keine limitierenden Witterungsfaktoren gegeben zu haben, wie auch die Erträge auf sehr hohem Niveau demonstrierten.

Eine weitere Anmerkung zu dem Versuch in 2013 ist notwendig: der Feldaufgang war relativ ungleichmäßig, z.T. bestanden in den Parzellen großflächige Bereiche ohne Rüben. Diese Parzellen mussten aus der Analyse herausgenommen werden, da hier mehrheitlich das hyperspektrale Signal den Boden darstellt (und nicht den Nematodeneinfluss).



Auswertung

Modell *Heterodera schachtii* - Zuckerrübe

Einleitend wurde auf die Komplexität des Systems Zuckerrübe – *Heterodera schachtii* hingewiesen. Um der zeitlichen Dynamik des Pflanzen-Schädling Problems gerecht zu werden, wurden in einem ersten Schritt für die Beschreibung der Nematodendynamik alterstrukturierte Leslieprozesse für jedes Entwicklungsstadium des Nematoden erstellt. Die witterungsbedingten Responsefunktionen sind auf numerische Algorithmen adaptiert worden. Für die Simulation des Pflanzenwachstums wurde ein kleines Differentialgleichungssystem implementiert. Die dritte Komponente ist die Funktion der Wirt-Parasit-Interaktion (Schmidt, 1992). Alle Komponenten wurden in einem in Java programmierten Analysetool zusammengefasst, um sowohl die zeitliche Änderung des Bestands als auch die Änderungen im hyperspektralen Signal erklären zu können.

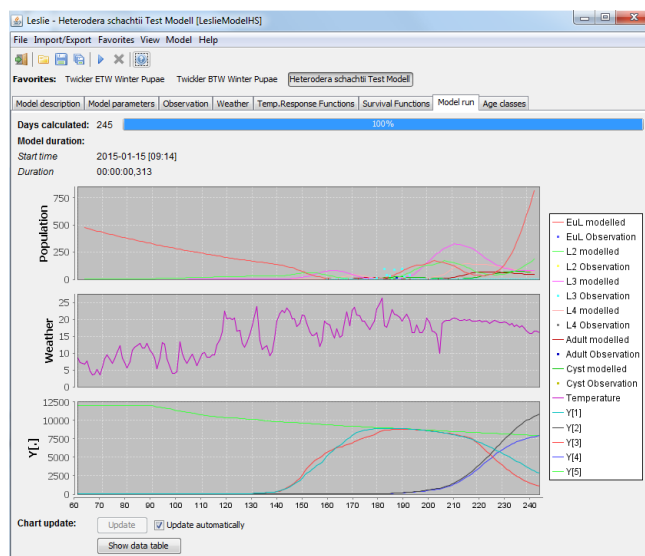


Abb. 3: Überblick über das Nematoden- und Pflanzenmodell auf einem Java basierten Analysetools

Hyperspektralanalyse

Bei der Analyse hyperspektraler Signaturen wird es als Vorteil angesehen die gesamte Information eines Sensors zu verwenden. Zu diesem Zweck wird ein patentierter Transformationsalgorithmus auf der Basis additiv gekoppelter Weibullfunktionen eingeführt (Schmidt, 2009; 2011).

Weibullmodell

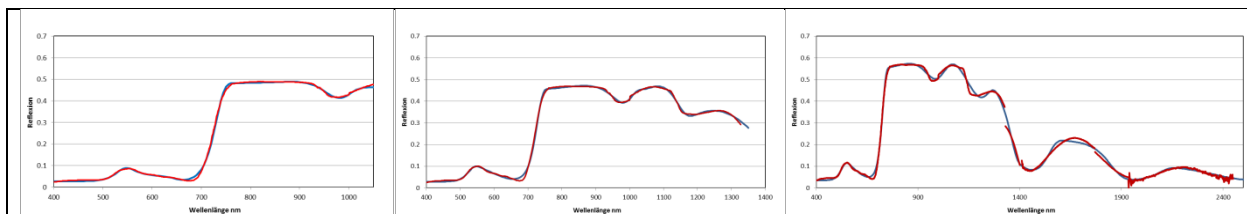
Weil das im Bereich des sichtbaren und des nah-infraroten Lichts aufgenommene Spektrum der Wellenlänge nm durch folgende generelle Funktion beschrieben wird:

$$F_{(nm)} = A + \sum_{i=1}^n B_i \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{nm}{nm_{\alpha_i}}\right)^{\alpha_i}} \right) \cdot e^{-\left(\frac{nm}{nm_{\beta_i}}\right)^{\beta_i}} \quad \text{Gl. 1}$$

kann durch Änderung der Parameter A , B_1 bis B_n , α_1 bis α_n und β_1 bis β_n obige Funktion an jede hyperspektrale Signatur angepasst werden. Dieses Modell ist auf alle Wellenlängen im sichtbaren, Nahinfrarot- und kurzwelligen Infrarotbereich anwendbar und nicht nur auf Pflanzen beschränkt.

Es wird ein Parametervektor ermittelt, der eine vereinfachte Übermittlung des Ergebnisses und eine Auswertung durch Vergleich mit anderen Parametervektoren ermöglicht. Diese Analyse verwendet die Gesamtinformation der vorliegenden, technisch möglichen, Auflösung entsprechender Sensoren. Die additiv gekoppelten doppelten Weibullfunktionen erlauben die Abbildung hyperspektraler Signaturen mit hoher Genauigkeit.

Tab. 2: Gültig- und Genauigkeitsbereich des gefitteten Weibullmodells. Links: ASD FieldSpec, Mitte: TEC5 AgroSpec, Rechts: ASD FieldSpec4



Das Modell lässt sich an beliebige spektrale Signaturen mit sehr hoher Genauigkeit anpassen ($R^2 > 0.99$) und komprimiert die komplexe spektrale Signatur ohne Informationsverlust auf einige wenige, sekundäre Parameter. Es beinhaltet eine hohe Trennschärfe und eignet sich für die Klassifizierung und Unterscheidung auch nah beieinander liegender Signaturen. Der resultierende Parametervektor charakterisiert den Objekt-, oder hier Bestandszustand und ist statistisch mit Standardmethoden auswertbar.

Weiterführende Auswertungen

Die resultierenden Parametervektoren werden dann in folgenden Analyseschritten mit Hilfe multivariater Verfahren ausgewertet. Sind die Klassifikatoren entsprechend des Versuchsdesigns bekannt, bietet sich eine Diskriminanzanalyse an. Lässt sich eine Einteilung a priori nicht erstellen, ist eine

Clusteranalyse auf die Modellparameter eine mögliche Wahl. Diese multivariaten Verfahren wurden mit SPSS (Ver. 22) durchgeführt.

Diskriminanzanalyse (DA)

Der Vorteil der Anwendung einer Diskriminanzanalyse liegt nicht nur in der Klassifikation der Signaturen, sondern das die komplexen Parametervektoren aus dem Weibullmodell auf 2 (oder 3) Dimensionen komprimiert werden und visuell auf einer kanonischen Ebene dargestellt werden können (Abb. 5 ff). Ein definierter Zustand der untersuchten Pflanze ist durch eine relativ enge Diskriminanzfläche charakterisiert. Die einzelnen Versuchsfaktoren sind nicht nur deutlich zu differenzieren, die Varianzen sind darstellbar, sondern über die dimensionslosen, kanonischen Distanzen auch quantitativ bestimmbar. In der Regel kann man ab einer Distanz von 2 von einem signifikanten Unterschied sprechen. Unterstützt werden die Entscheidungsprozesse durch eine Reihe von statistischen Parametern als Bestätigung für den visuellen Abgleich. Das Verfahren ist generell für zahlreiche Versuche und auch komplexere Versuchsdesigns anwendbar, deren Entscheidungsprozesse auf hyperspektralen Informationen basieren. Die Messungen mit hyperspektralen Sensoren sind nicht nur detailgenauer, sondern vor allem zeit- und arbeitsexensiv, die Qualität der Auswertungsmöglichkeiten ist als gleichwertig zu der Verwendung von SI- Einheiten anzusehen. Natürlich kommt es an den Grenzbe- reichen zu Überlappungen, wo keine eindeutige Klassifikation möglich ist. In dem Fall gibt es keinen Unterschied zwischen den Behandlungseffekten. Da die Diskriminanzanalyse einen Hauptbestandteil der Auswertung ausmacht, wird der Begriff im Folgenden mit DA abgekürzt. Es werden die kanoni- schen Distanzen als Maß für einen Unterschied nur graphisch dargestellt.

Allgemeines Lineares Modellieren (ALM)

SPSS bietet eine weitere Prozedur an, die für dieses Projekt essentiell ist. Gesucht ist ja nicht eine qualitative Größe, sondern in Bezug zur Populationsschätzung eine quantitative Größe (Eier & Lar- ven/100 ml Boden [EuL]). In Kombination mit den Weibullmodells und eines „Allgemeinen linearem Modells“ (ALM) ergibt sich (Gl. 2):

$$\text{EuL} = C + \sum_{i=1}^n W_i \cdot X_i$$

Die Zielgröße EuL (oder jede andere Zielgröße) ist ein Summenprodukt der nichtlinearen Parameter des Weibullmodells (W_i) mal einer entsprechenden Linearkonstanten X_i . Die SPSS Prozedur „Auto- matische lineare Modellierung“ liefert den gesuchten Vektor X.

Ergebnisse

Auf den ersten Blick unterscheiden sich die Signaturen nur minimal, d.h. die Struktur über die Wel- lenlänge verläuft gleichmäßig und ohne Ausreißer. Im sichtbaren Wellenlängenbereich gibt es keine bis geringe Unterschiede, typische Ergebnisse für ein gesundes grünes Blatt. Die Varianzen im NIR dagegen sind auf der y-Achse messbedingt hoch, da in der Signatur sowohl die phänologische Aus- prägung der Sorte als auch alle Faktoren, die auf die Pflanze bis zu diesem Termin beeinflusst haben, kombiniert sind und auf den ersten Blick nur im NIR zu ersehen sind. Negativ ausgedrückt, die hohe

sensitive Auflösung der hyperspektralen Sensoren erfasst alle möglichen Faktoren, so dass die eigentliche Zielgröße nicht offensichtlich oder nur schwer zu erfassen ist.

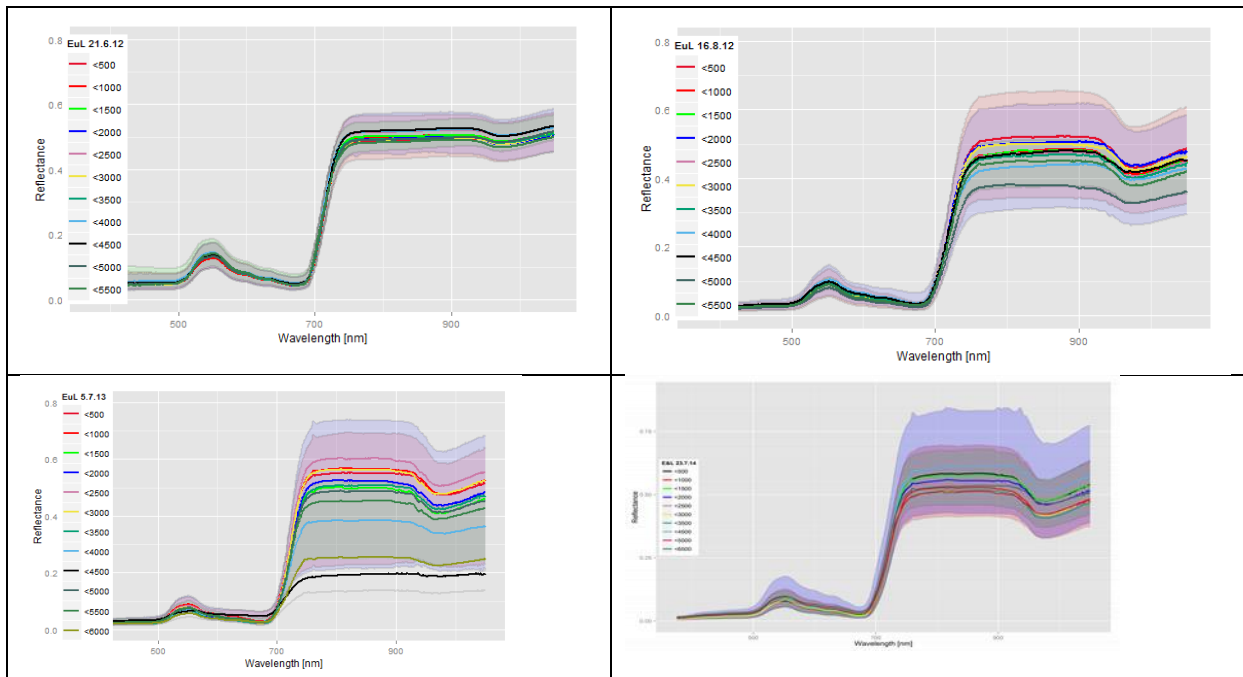


Abb. 4: Beispiele für hyperspektrale Signaturen mit 95% Vertrauensbereichen, aufgeteilt nach Dichteklassen; oben links) frühe Messung, oben rechts) späte Messung; unten links: 2013 mit Fehlstellen im Bestand (schwarze Signatur); unten rechts: Nematodeneffekt und Streuung in 2014;

Trotz der hohen Varianz in den Signaturen approximiert das System im Mittel auf die zu untersuchenden Faktorstufen eines Versuches.

Eine zeitliche Übersicht über alle gemessenen Spektren, wie in Abb. 4, aufgeteilt nach Sorte, bzw. nach Nematodendichte, ist im Anhang B zusammengefasst. Es scheint in den Signalen des Infrarotbereichs Streuungen zu geben, die mit den Nematodendichten assoziiert werden könnten. Insgesamt sind dort im Anhang auch die unterschiedlichen Wellenlängenbereiche der Sensoren dargestellt, inklusive der Ausreißer in bestimmten Wellenlängenbereichen.

Ein Ergebnis der Vorversuche in 2011 ergab, dass die DA ein besseres Ergebnis liefert, wenn nur die Mittelwerte aus einer Parzelle verwendet werden. Um die Frage nach den Populationsdichten mit Hilfe der DA zu klären, lassen sich die gemessenen Dichten zu Klassen zusammenfassen. Für 2011 wurden 3 Klassen gewählt, null, gering, hoch, multipliziert mit den 3 Sorten, ergibt zusammen 9 Sorten x Dichte Klassen. Bewertet man die Spektren dieser Kombination mit der DA ergibt sich folgendes Bild auf der kanonischen Diskriminanzfläche (Abb. 5). Die Diskriminanzfläche als graphische Darstellungsform steht stellvertretend für die folgenden Analysen, je größer der Unterschied zwischen den Mittelwerten oder Medianen, desto größer ist der Faktorunterschied. Wie erwartet bestand eine starke Interaktion von Sorte und Nematodendichte, wobei die DA eine signifikante Unterscheidung der Sorten ermöglichen, die Nematodenklassen innerhalb der Sortenklassen aber keinen Unterschied aufwiesen (2011), oder aber nur bei der anfälligen Sorte ein signifikanter Effekt zu beobachten war (2012). Der Sortenfaktor überlagert den Nematodeneffekt. Dieses Ergebnis wiederholte sich für alle Jahre und mit verschiedenen Sensoren, in der Regel waren nur die Sorten sehr gut in und anhand der Spektren zu unterscheiden (Abb. 6). In den beiden Beispielen mit verschiedenen Sensoren und aus verschiedenen Jahren zeigt sich eine größere Distanz von Baretta (anfällig) zu der toleranten,

bzw. resistenten Sorte, während die kanonische Distanz von Nemata zu Theresa etwas kleiner ist. D.h. die „genetische Ähnlichkeit“ zwischen Tolerant/Resistenz ist größer als zur anfälligen Sorte.

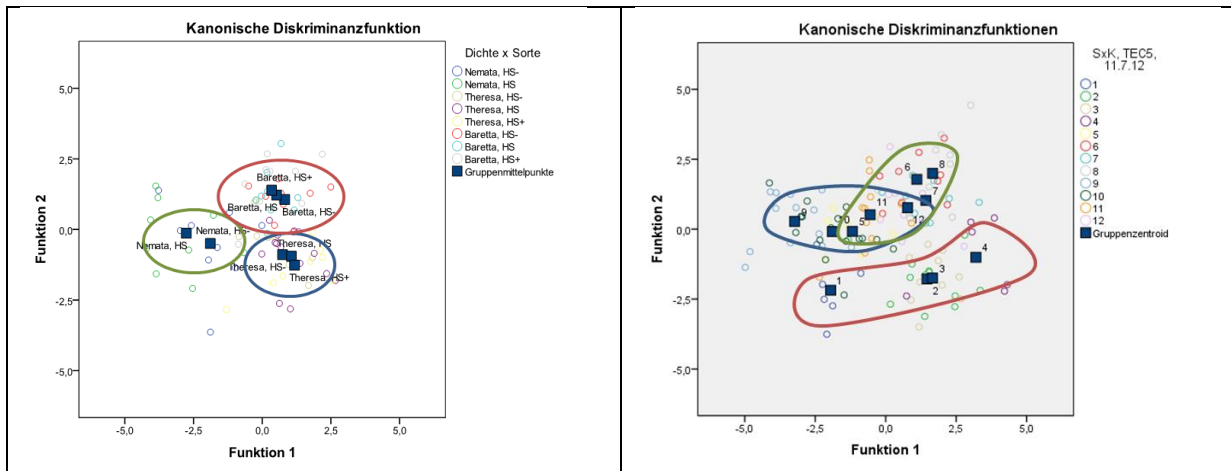


Abb. 5: Diskriminanzanalyse für die Sorte-Dichte Kombination (Mittelwerte), links 2011, rechts 2012

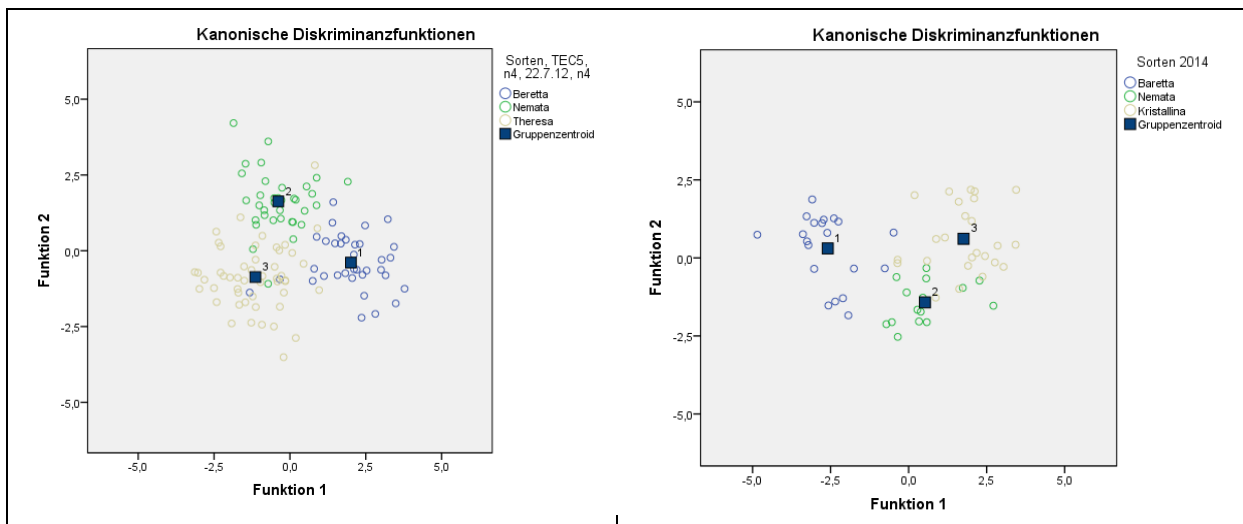


Abb. 6: DA Test auf Sorteneffekt in 2012 (links mit TEC5) und 2014 (rechts mit ASD)

Nachdem sich die Komplexität des System Zuckerrübe - *Heterodera schachtii* auch in den hyperspektralen Signaturen bestätigt hat, musste im Folgenden geklärt werden, welche weiteren überlagernden Varianzursachen vorliegen, die Einfluss auf die primäre Zielgröße haben. Auch hierfür bietet sich die DA an. Wie erwartet gibt es einen deutlichen Jahreseffekt (Abb. 7) in den Signaturen.

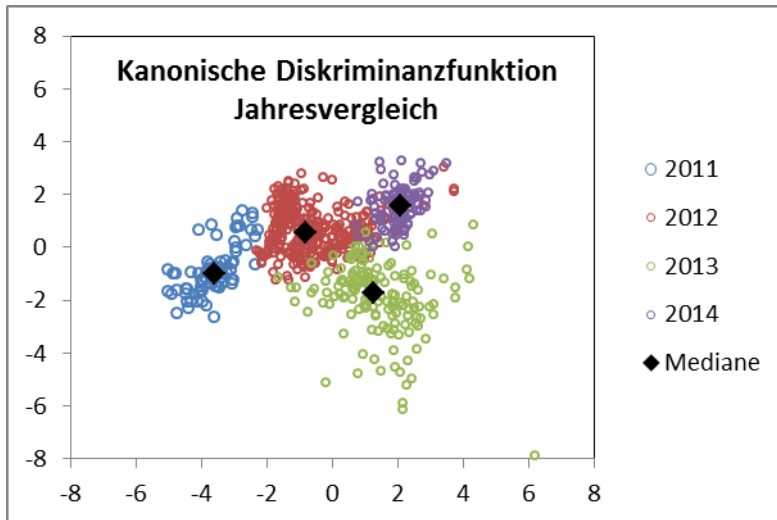


Abb. 7: DA Test auf Jahresvergleich von 2011 bis 2014

Auch wenn die Witterung in den Jahren Unterschiede aufwies, extreme Stresssituation von andauernder Trockenheit etc. sind 2012 bis 2014 nicht aufgetreten. In der Regel sind die Bestände kontinuierlich mit Wasser versorgt worden. 2011 ist eine kleine Ausnahme, hier können die hohen Temperaturen zu trockenstressähnlichen Situation im Juli geführt haben. Es bleibt festzuhalten, in den hyperspektralen Signaturen ist ein signifikanter Jahreseffekt enthalten.

Messungen über die Vegetationsperiode

In (Abb. 8) entsprechen die Legendenummerierungen den Messterminen aus Tab. 1. So wie die Blattmasse über die Zeit einer exponentiellen Wachstumskurve folgt, hat der Messtermin einen eindeutigen Einfluss auf das Signal. Die kanonischen Distanzen über die Wachstumsperiode hinweg sind außergewöhnlich hoch, was im Wachstumsverhalten der Blätter begründet ist (siehe auch Abb. 13). Zu Beginn der Messungen Mitte/Ende Juni sind die Blätter noch sehr klein, hohes Hintergrundrauschen des Bodens beeinflusst das Signal. Nach Bestandsschluss haben wir eine Phase, in der sich der Blattapparat verdichtet (Juli/Mitte August), während gegen Ende August die schon erwähnten Vergilbungen zu anderen Signalen führten. Leider ist der Zusammenhang in den Signaturen nicht so eindeutig zeitbezogen, wie es von der modellhaften Vorstellung zu erwarten gewesen wäre. Während 2011 der Zeiteffekt eindeutig ist, kann dieses Ergebnis nicht auf 2012 übertragen werden. Wie in Abb. 8 zu sehen ist, zwischen Messtermin 3 (24.7.12) und 1 ist in 2012 kein Unterschied zu erkennen, während Termin 2 und 4 eine deutliche Entwicklung beschreiben, Termin 5 entspricht dem Zeitpunkt Mitte August, der Stagnationsphase der Massenbildung der Blätter, bzw. beginnendes Absterben der Blätter. Termin 6 entspricht den beobachteten Vergilbungsprozessen. Die Distanzen sind groß und beschreiben einen signifikanten Unterschied zu den vorherigen Terminen. 2013 verhält sich wiederum anders: die ersten 4 Messungen liegen dicht beieinander, entsprechend einer langsamen Jugendentwicklung der Blattmasse, erst ab August (= Messung 5) zeigt sich eine signifikante Veränderung im Signal, Messung 6 und 7 erfassen erneut die Vergilbungen der Blätter. 2014 lässt sich sehr gut die Wachstumsdynamik der Blattmasse in den Signaturen wiederfinden, aber die 1. Messung hat erst im fortgeschrittenen Entwicklungsstadium stattgefunden.

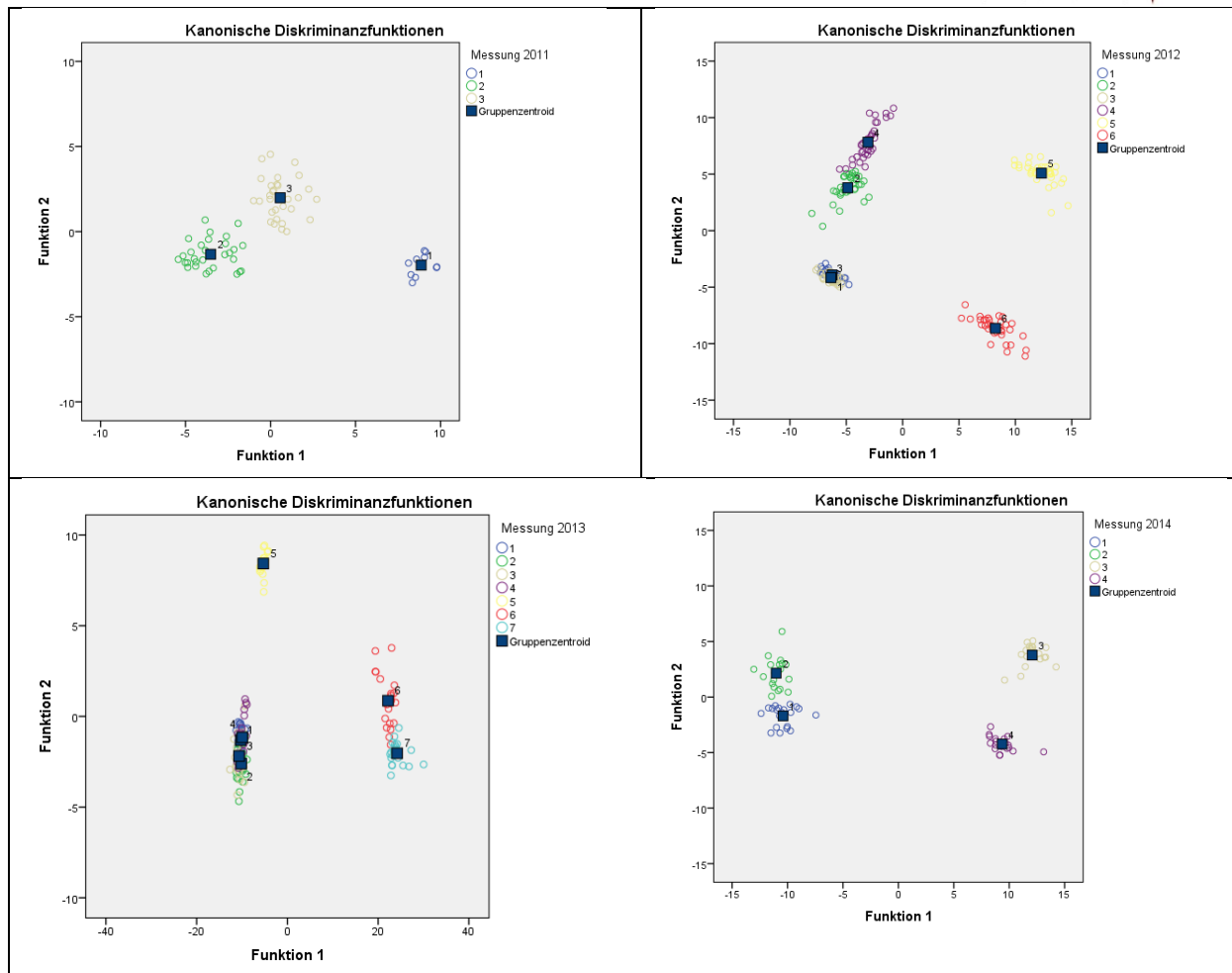


Abb. 8: DA Test auf Einfluss des Messzeitpunkts über die Vegetationsperiode, alle Messungen mit ASD FieldSpec

Eine weitere Varianzursache sind die eigentlichen Sensoren. Die DA hat extreme Distanzen ergeben. Es unterscheiden sich sowohl die beiden ASD Geräte auf der Basis der Daten von 2013, als auch das TEC5 von dem ASD FieldSpec anhand der Daten von 2012. Letzterer Vergleich wurde natürlich im gleichen Wellenlängenbereich bis 1050 nm durchgeführt.

Unabhängig von der tatsächlich vorliegenden Nematodendichten, die über Wechselwirkungen mit dem Wirt theoretisch das hyperspektrale Signal beeinflussen, ergibt sich zusammenfassend aus diesen Versuchen, dass das hyperspektrale Signal eines Geräts im Wesentlichen von den drei übergeordneten Faktoren Sorte (Abb. 6), Zeit (Abb. 8) und Jahr (Abb. 7) beeinflusst wird und nur schwach bis gar nicht von den Nematodendichten (Abb. 5).

Nach der Zerlegung der Varianzkomponenten sind zwei unterschiedliche Strategien für die eigentliche Zielgröße Eier & Larven/100 ml Boden verfolgt worden. Können wenigstens zu einem Messtermin, individuell für jede Sorte und damit unter Ausschluss der obigen Faktoren, Hinweise auf die Nematodendichte in den hyperspektralen Signalen entdeckt werden? Diese Vorgehensweise ist naheliegend, beinhaltet aber einen großen Nachteil. Der Stichprobenumfang wird massiv reduziert und die Anzahl der notwendigen Stichproben/Messwerte für die multivariaten Verfahren sind im Grenzbereich der numerischen Durchführbarkeit. Daher werden für eine gegebene Sorte (Bsp. Beretta) a) die E&L-Messungen eines Jahres in gröbere diskrete Dichteklassen und b) alle Messungen eines Jah-

res zusammengefasst. Damit sind ausreichende Bedingungen für die DA geschaffen. Für die gewählten Klasseneinteilungen siehe Abb. 9. Es werden nur die Ergebnisse für die Sorte Beretta vorgestellt. Die Klassengrenzen sind bewusst eingeteilt in niedrige Dichtebereiche (ungefähr der Schadschwelle entsprechend), mittlere Dichtebereiche, hohe und sehr hohe Dichtebereiche. Es wird eine übliche, dichteabhängige Nachweisgrenze vermutet, d.h. mit zunehmender Dichte existiert eine abnehmende Grenzveränderung.

Die Begründung für diese Vorgehensweise: Gelingt es eine signifikante Klassifikation bei bekannten Klassifikatoren (= Dichteklassen) zu erstellen, kann bei unbekanntem Populationsdichten (und unbekanntem Klassifikatoren) eventuell eine Klassifikation mittels einer Clusteranalyse einen Hinweis auf die Nematodenbelastung geben. Die gewählte Vorgehensweise verbessert die diskriminatorischen Möglichkeiten der DA. In allen Jahren ist für die Sorte Beretta ein signifikanter Unterschied zwischen den Dichteklassen zu erkennen (Abb. 9).

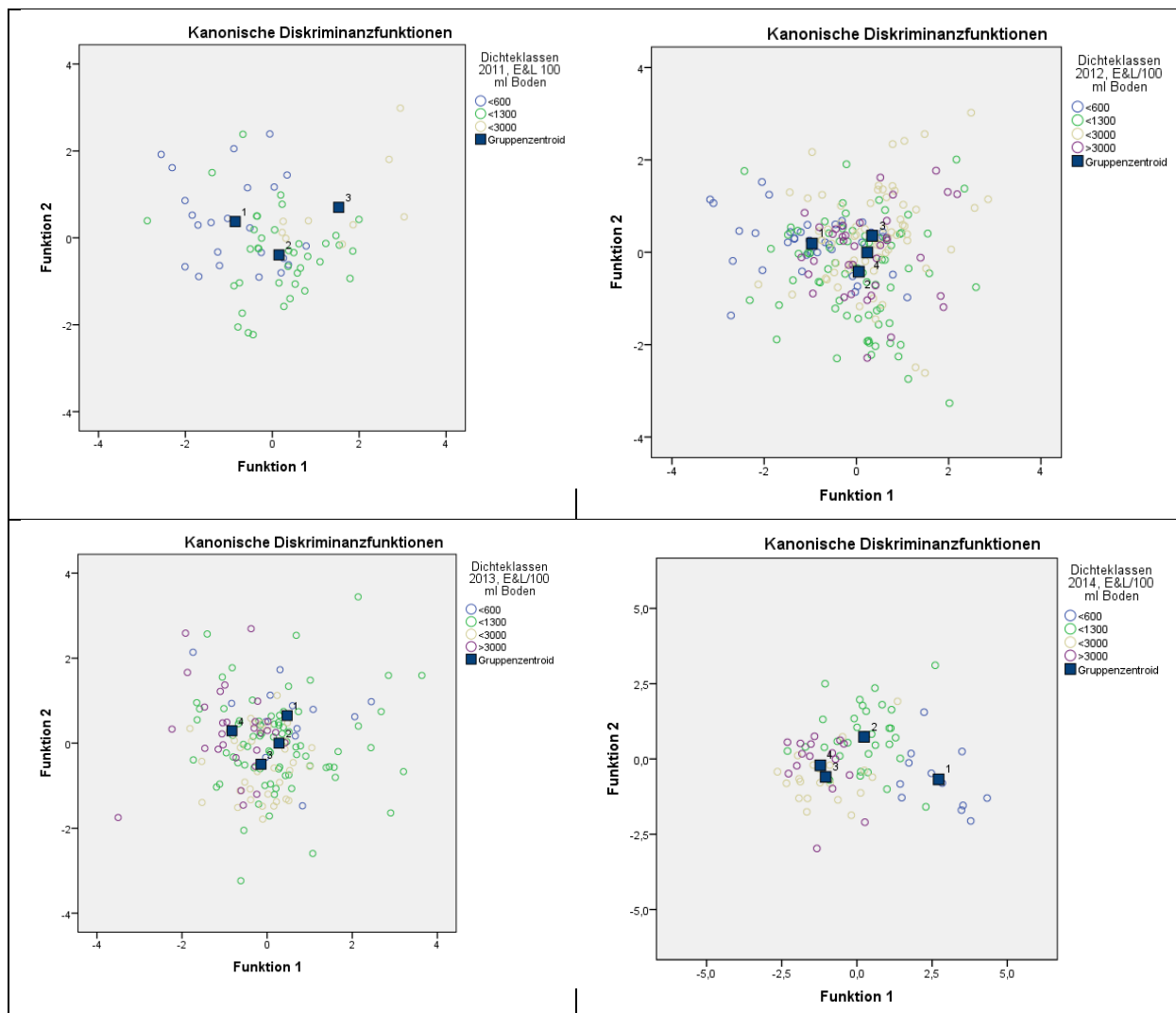


Abb. 9: DA über die Populationsdichten von 2011 bis 2014 für Sorte Beretta unter Einschluss aller Messungen einer Vegetationsperiode

Aber es gibt kein einheitliches Bild. Während 2011 die 3 vorhandenen Dichteklassen signifikant verschieden sind, gibt es in 2012 nur eine Unterscheidung in <600 und >600 E&L. 2013 ist nur ein Ver-

hältnis von <3000 zu >3000 E&L zu erkennen, während 2014 die beiden höchsten Dichteklassen nicht zu unterscheiden sind, aber der Übergang von Klasse 1 zu 2 und weiter zu 3, bzw. 4 entspricht der Hypothese vom abnehmenden Nematodeneffekt bei größer werdenden Populationen. Über die kanonischen Distanzen unter Ausschluss der Störgrößen ist es möglich, bei einer groben Populationsabstufung Unterschiede zu erkennen.

Mit Hilfe der SPSS Prozedur „Allgemeines lineares Modellierung“ wird ein alternativer Weg der Populationsschätzung vorgestellt. Als Beispiel werden die Messungen mit dem TEC5 aus 2012 vorgestellt. Dabei wird über die Schätzparameter des Weibullmodells mit dem Linearvektor der SPSS Prozedur die gesuchte Zielgröße E&L vorhergesagt.

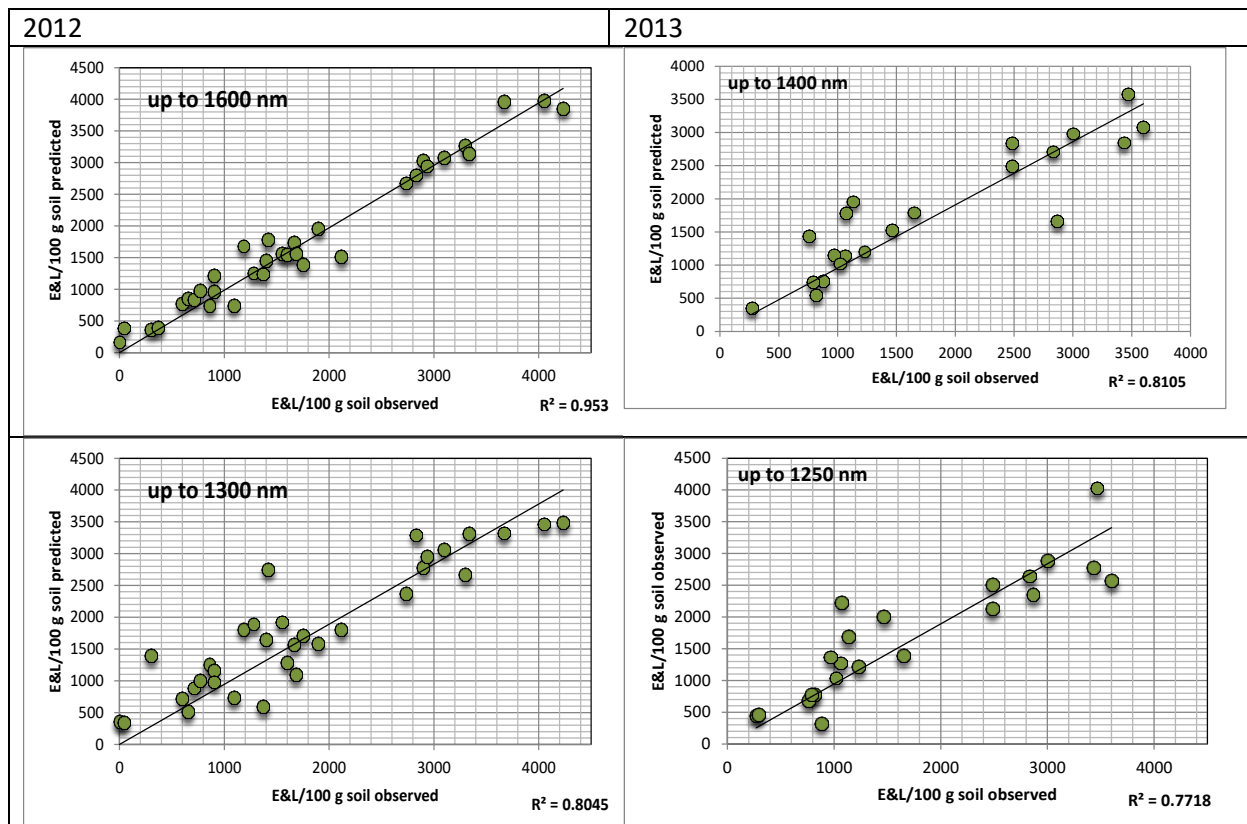
Mess-termin	Vorhersageergebnisse des TEC5 AgroSpec nach Sorten		
21.6.12			
5.7.12			
11.7.12			
20.7.12			

Abb. 10: Anwendung der SPSS Prozedur „Allgemeines Lineares Modellieren“ auf die E&L Messungen, aufgeteilt nach Sorte und Messzeitpunkt, TEC5 Daten bis 1600 nm unter Ausschluss der Wasserbänder.

Unter Verwendung der gesamten Sensorinformation wurde zu jedem Messtermin ein Linearvektor geschätzt. Die 1:1 Linien in den Diagrammen von Abb. 10 und das Bestimmtheitsmaß ergeben die Güte der Anpassungen. Dabei ist es ebenso wichtig, dass es zu keiner systematischen Abweichung von der 1:1 Linie kommt. Für die anfällige Sorte Beretta funktioniert das ganze Verfahren hervorragend, aber es lässt sich ein Zeiteffekt beobachten, der bei den anderen Sorten wesentlich größer ausfällt. Die frühen Messungen sind noch „relativ“ schwach, während für die Messungen Mitte Juli extrem hohe Bestimmtheitsmaße erreicht werden. Bei Nemata werden zu Beginn der Messungen hohe Werte erreicht, mit der Zeit verliert das Verfahren an statistischer Power. Nur für die tolerante Sorte Theresa bleibt das Ergebnis dürftig, hier bleibt die Beziehung schwach und ist von einer hohen Streuung charakterisiert. Die Unterschiede können daran liegen, dass bei den Sorten jeweils unterschiedliche Abwehrmechanismen auf den Nematodenbefall zum Tragen kommen, wie auch immer

die im Detail aussehen mögen. So überzeugend die Vorhersage erscheint, man muss bei diesem Verfahren einige Einschränkungen machen. Die Stabilität der aus der SPSS Prozedur geschätzten Parameter ist aufgrund des geringen Stichprobenumfangs pro Sorte numerisch sehr instabil, daher sollte man dieses gute Ergebnis nicht überinterpretieren. Eine Übertragbarkeit dieses Parametervektors auf andere Situationen ist schwierig und wahrscheinlich für eine Prognose zu ungenau.

Im Folgenden wird die Analyse weiterhin auf die Sorte Beretta reduziert. Der Sorteneffekt erfordert eine individuelle Analyse für jede Sorte, aber die Auswertungsprinzipien wiederholen sich. Der TEC5 Sensor mit einem Wellenlängenbereich bis 1600 nm ist nur 2012 bei einer doppelten Feldversuchsgröße verwendet wurde. Die Frage lautet nun, wie viel Informationen gehen verloren, wenn der Sensor nicht den Kurzwelleninfrarotbereich (SWIR) umfasst. Wie viel hyperspektraler Information ist notwendig, wie wichtig ist der NIR und SWIR Bereich für die Möglichkeit eine Aussage zu treffen? Dazu wurde die in die ALM Analyse eingehende Parameterzahl schrittweise reduziert bis runter auf das Niveau des ASD FieldSpec, und zuletzt mit der Messung des FieldSpec verglichen (Abb. 11, linke Spalte). Während bei der Verwendung des gesamten Spektrums extrem gute Bestimmtheitsmasse in 2012 erreicht werden, verliert man gute 20% der Güte, wenn man eine Amplitude auslässt, weitere 30%, wenn man nur noch Daten bis 1050 nm verwendet. Das ASD FieldSpec (bis 1050 nm) zeigt für diesen Messtag eine sehr schlechte Performance, nicht nur das R^2 ist niedrig, sondern systematische Abweichungen von der 1:1 Linie sind zu beobachten. Im Vergleich zu 2013 und 2014 ist die Vorhersage mit den Sensordaten bis 1050 nm für 2012 generell von sehr geringer Güte (siehe Anhang D)



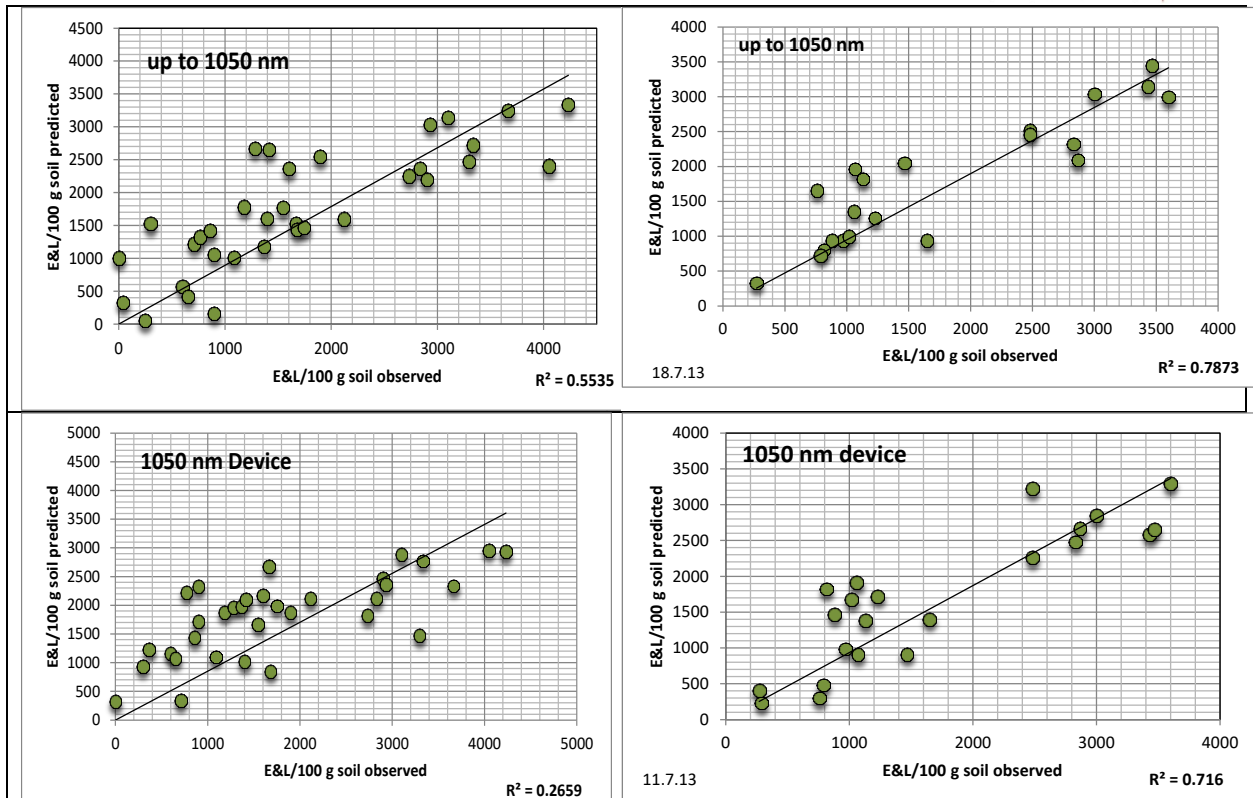


Abb. 11: ALM Verhalten bei reduzierten Wellenlängenbereichen für die Sorte Beretta, linke Spalte in 2012, rechte Spalte 2013 bei abnehmenden Wellenlängenbereich.

In 2013 ist das Ergebnis längst nicht so offensichtlich (Abb. 11, rechte Spalte). 1) ist der Informations- und Güteverlust kaum vorhanden, und 2) ist das ASD FieldSpec dem einmalig verwendeten FieldSpec4 noch ebenbürtig. Insgesamt reicht die Güte nicht an die Ergebnisse von 2012 mit dem Tec5 AgroSpec heran. Mit Ausnahme der einmaligen Messung mit ASD FieldSpec4 in 2013 ist für 2013 und 2014 ausschließlich das alte ASD FieldSpec verwendet worden. In beiden Jahren zeigte sich die schon in 2012 registrierte Zeitabhängigkeit des Ergebnisses. In Anhang D ist die Performance zu allen Terminen in 2013 und 2014 dargestellt, hier daher nur die Güte zum „optimalen Termin“ (Abb. 12).

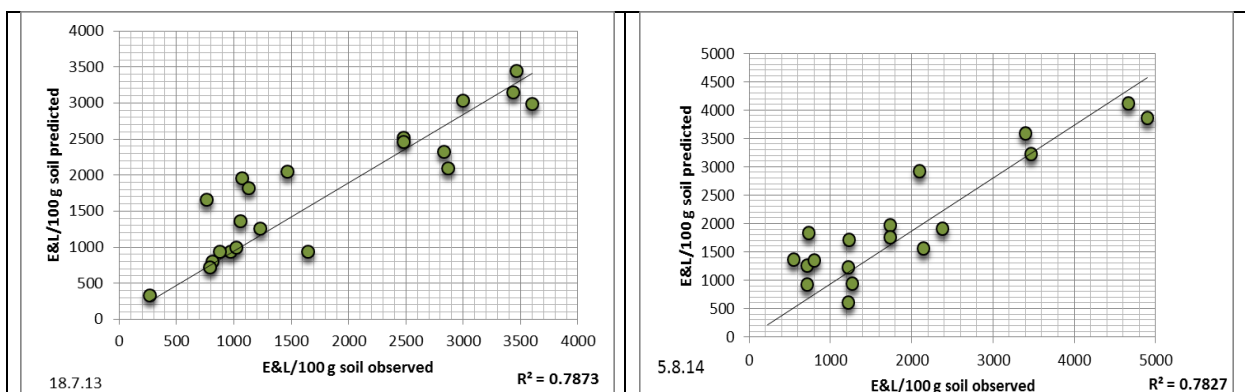


Abb. 12: Erreichte Güte des ASD FieldSpec zum optimalen Termin in 2013 und 2014, Übersicht in Anhang D

Die Zeitabhängigkeit als Varianzursache ist einerseits von der Vorstellung über die Dynamik des Blattwachstums und vom theoretischen Lesliemodell (Nematodendynamik) zu erwarten gewesen, hat sich aber auch auf den verschiedenen Skalen der Analyse gezeigt. Unter der Annahme, der Unter-

schied innerhalb eines Jahres, bzw. zwischen den Jahren ist eine Funktion der Witterung, kann eine Vereinfachung der Blattmassendynamik auf einer Modellbasis entwickelt werden. Ziel ist es, den Zeiteffekt über einem gemeinsamen Nenner aller Daten einzudämmen. In Abb. 13 ist, basierend auf dem primären Zuckerrübenmodell (Abb. 3), der anhand der Witterung von 2011 bis 2014 der Verlauf der oberirdischen Pflanzenmasse auf einer künstlichen Höhenskala dargestellt. Es handelt sich um ein einfachstes Pflanzenwachstumsmodell mit einer zeitdynamischen Kapazität. Formuliert man die intrinsische Wachstumsrate eines logistischen Modells als Funktion der Temperatur (und/oder anderer Witterungsfaktoren), erhält man auf der Basis der Temperatur eine standardisierte Biologische Zeit (Richter, 1985), die nicht nur den Unterschied zwischen den Jahren ausgleicht, sondern auch erlaubt, die einzelnen Messtermine in entsprechender Relation darzustellen (Abb. 13, rechts). Als Grundlage für eine Temperaturresponsefunktion dienen nicht-lineare Ansätze.

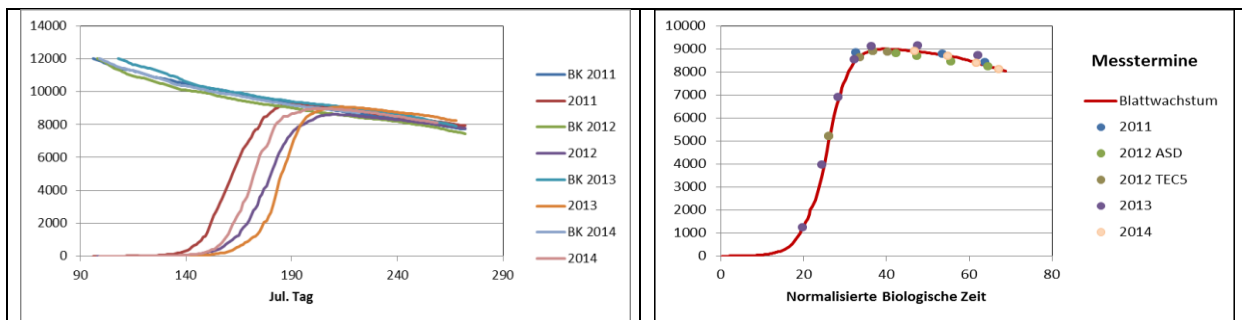


Abb. 13: Simulierte Blattwachstumsdynamik anhand der Witterung des Versuchszeitraums (links); Transformation der realen Zeit auf eine Biologische Zeit und entsprechende normalisierte Blattwachstumsdynamik und entsprechende Messezeitpunkte

Die entsprechenden Biologischen Zeiten sind in schon in Tab. 1 vorgestellt worden. Basierend auf den theoretischen Grundlagen und angewandt auf die Sorte Beretta sollte die verbleibende Varianz damit nematodenbedingt sein. Und im Folgeschritt sollten die Parameter des ALM Verfahren vereinheitlicht sein. Dies ist nicht der Fall, hat daher so nicht funktioniert. Es ist, basierend auf reinen Felddaten, vorerst nicht gelungen, in Anlehnung an die Biologische Zeit entsprechend normalisierte Parameter innerhalb des ALM zu identifizieren.

Aber es gibt einen Zusammenhang zwischen der Biologischen Zeit (BZ) und den hyperspektralen Signaturen. D.h. ist BZ bekannt, und das ist sie aus den Witterungsdateien, kann abgeleitet werden, welches hyperspektrale Signal zu jedem Messtermin zu erwarten wäre.

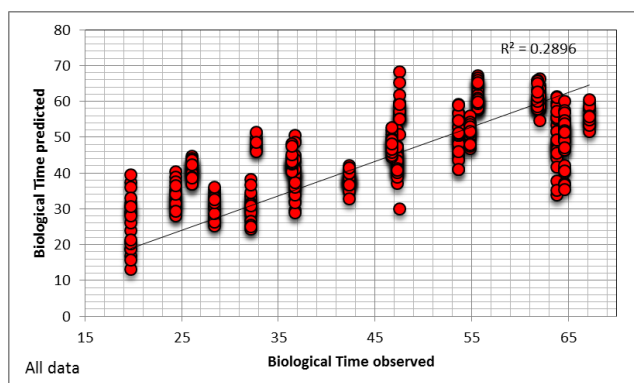


Abb. 14: Vorhersage der Biologischen Zeit anhand von hyperspektralen Signaturen von Zuckerrübenblättern

Die Korrelation ist nicht sehr hoch, aber es gibt einen Trend und die Daten streuen hoch innerhalb eines Messtermins (Abb. 14). Die Daten bei einer BZ von über 60 sollten aufgrund der schon erwähnten multiplen Pathogenbelastung nicht mehr berücksichtigt werden. Abweichungen von diesem erwarteten Spektrum könnten dann nematodenbedingt sein. Beurteilt man die Güte der ALM Prozedur in Abhängigkeit von BZ, so zeigt sich für 2012 und 13 eine BZ von 35 bis 40 als optimaler Messtermin, während 2014 der optimale Zeitpunkt für die Messung bei einer BZ über 50 liegt (Eine BZ von 35 bis 40 wurde hier verpasst).

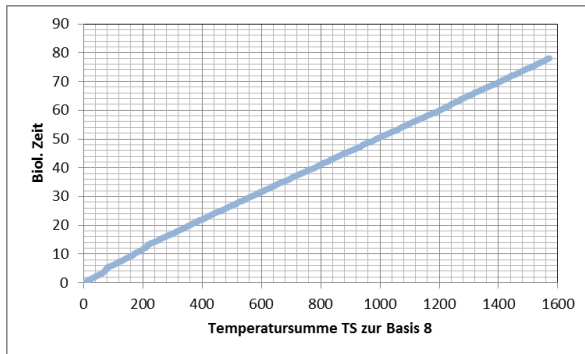


Abb. 15: Transformation der gewählten BZ auf Temperatursumme

Die BZ basiert auf einer nicht-linearen Temperaturresponsefunktion, auch u.a. um Abweichungen im niedrigen Temperaturbereich zu berücksichtigen. Geläufiger ist die Verwendung von Temperatursummen (TS_8) als linearer Ansatz, für *Heterodera schachtii* zumeist zur Basis 8. Es besteht ein enger Zusammenhang von BZ zu TS_8 (Abb. 15). Auch wenn die Datengrundlage für eine Schlussfolgerung suboptimal ist, ist zu vermuten, dass die besten Messtermine bei einer BZ von 35 bis 40 liegen. Dies entspricht einer TS_8 von 700 bis 800 oder aber kurz nachdem die Blattmassebildung das Maximum erreicht hat.

Diskussion

Das Projekt ZS2 wurde u.a. initiiert, um Hyperspektralmessungen auf Hochdurchsatzverfahren in Feldsituationen anzuwenden. Hyperspektrale Signaturen beinhalten eine große Menge von Informationen, aber auch Varianzen, es ist die Herausforderung der Analyse eine gewünschte Zielgröße aus dem allgemeinen Rauschen herauszuarbeiten. Für das hier behandelte Problem der Dichteschätzung von Nematoden hat sich einerseits ergeben, dass es a) hinter einer Kaskade von Wechselwirkungen versteckt ist und b) keine einfache, gradlinige Lösung für das Problem gibt. Es wurde versucht, über die modellmäßige Zerlegung der Varianzkomponenten einen Zusammenhang von mittlerer hyperspektraler Signatur zu dem bodenbürtigen Schädling zu erstellen. Es haben sich einige Verfahren ergeben, die mehr oder weniger stark mit der Dichte der *Heterodera schachtii* Population korrelieren.

Zu Projektbeginn sind einige Eingangsfragen postuliert worden, die es mit dem Projekt zu lösen galt. Welche Annahmen sind in welcher Form bestätigt worden? Wie erwartet ist die Zielgröße E&L in jedem Jahr unter einer großen Anzahl interagierender Faktoren versteckt. Es gelingt anhand der Kombination von hyperspektraler Information, Modellanpassung und Diskriminanzanalyse die simultan auftretenden Einflussfaktoren zu erkennen und zu zerlegen. Natürlich waren diese Faktoren theoretisch zu erwarten, und man hätte sich mit der Analyse direkt auf die kleinste Einheit (= ein Messtermin) konzentrieren können. Aber es geht auch um den Nachweis, auf welcher Ebene die Verfahren funktionieren und die Gültigkeit näher zu spezifizieren. Größter Faktor für einen Messtermin

bleibt die Sorte. Der Sorteneffekt ist so dominant, so dass kein horizontaler Vergleich möglich ist und die ganzen Verfahren für jede Sorte einzeln durchgeführt werden müssen. Die zeitliche Variabilität während der Vegetationsperiode ist kohärent mit der Annahme eines zeitlich befristeten Wachstumsfensters, aber tatsächlich verhält sich das System anders als erwartet. Für die Messungen bedeutet das, dass vor Bestandsschluss die Signale durch die Reflexion des Bodens gestört werden. Aus den Messungen dieser Wachstumsphase ließen sich in der Regel keine Beziehungen zu der eigentlichen Zielgröße erstellen. Ausgehend von der ursprünglichen Modellbasis war der größte Einfluss mit dem Eindringen der 1. Generation in die Rübenwurzel erwartet. Das wäre noch vor Bestandsschluss. Tatsächlich werden die plausibel auswertbaren Signale mit einer akzeptablen Güte erst später gewonnen.

Über die DA lassen sich die Jahre vergleichen. Wird eine Vegetationsperiode über ihre spezifische Witterung definiert, so sind die Unterschiede erkennbar und über die Biologische Zeit quantifizierbar. Den geringsten Einfluss wiederum hat am Ende die Nematodendichte auf das Signal. Wie die jahreszeitliche Witterung im Detail das Signal beeinflusst, ist nicht genau zu differenzieren. Aber insgesamt ließen sich über das berührungslose und mehrfach wiederholbare Verfahren die simultan auftretenden Einflussfaktoren erkennen.

Auch wenn die Zusammenfassung der Populationsdichten in 4 diskrete Dichteklassen die Güte der DA erhöht hat, zeigt das uneinheitliche Ergebnis wiederum den Jahreseinfluss, bzw. die individuellen klimatischen Bedingungen über die Vegetationsperiode. Theoretisch müssten die klimatischen Faktoren mit Bestandteil der DA werden, eine praktikable Lösung für dieses Problem kann anhand dieser Ergebnisse derzeit nicht gegeben werden, da die Zusammenhänge doch sehr komplex erscheinen und von Daten ausschließlich auf der Skala von Feldversuchen diese Informationen nicht abgeleitet werden können.

Mit Hilfe der ALM kann eine signifikant lineare Beziehung vom hyperspektralen Signal zu E&L/100 ml Boden zu erstellt werden. Dies gelingt von herausragend bis weniger gut für einige, aber nicht über alle Messtermine. Bei den frühen Messungen überwog das Hintergrundrauschen des freiliegenden Bodens. Mit zunehmender Zeit überwogen die Wachstumseffekte der Blätter. Nach Bestandsschluss sorgte die partielle Seneszenz der Blätter für weitere Streuungen. Es bleibt festzuhalten, es gibt diese Beziehungen, aber es ist nicht gelungen, eine Parameterkonstellation zu identifizieren, die allgemein übertragbar ist. Eine Extrapolation der Ergebnisse von 2012 und 2013 auf die Daten von 2014 war nicht erfolgreich. Der Versuch über die Biologische Zeit, also eine Funktion der Temperatur, eine übertragbare Konstellation zu erhalten, ist nur bedingt gelungen. Bisher hat sich die Biologische Zeit aus dem Pflanzenmodell des Simulationsmodells (Abb. 3) ergeben. Wenn sich dieses Konzept zu 100% auf die Situationen des Feldversuches in den 4 Jahren übertragen ließe, hätte man auf einer Zeitskala der Biologischen Zeit kleinere Streuungen in den Signaturen erwartet. Für die Adaption des Konzepts der biologischen Zeit ist eine größere Datenbasis notwendig und vermutlich die Formulierung über weitere Witterungsfaktoren.

Von Interesse ist aber auch die unterschiedliche Güte der Sensoren im Hinblick auf die verarbeitete Wellenlänge. Am Beispiel von 2012 ist zu ersehen, wie schnell die Güte der Anpassung abnimmt, wenn der Infrarotbereich weniger berücksichtigt werden kann. Es ist zu vermuten, dass die für das vorliegende Problem interessanten Wellenlängenbereiche oberhalb von 1100nm liegen. Die abnehmende Güte der ALM Prozedur deutet darauf hin, dass der SWIR Bereich eine hohe Bedeutung für

die Abschätzung der Nematodenpopulation hat. Biologische Gründe für die Notwendigkeit des SWIR anzugeben ist nicht möglich, es handelt sich um eine rein empirische Ableitung.

Auch wenn der Versuch „nur“ drei Jahre umfasste, es gibt eine Tendenz was ein optimaler Zeitpunkt für hyperspektrale Messungen innerhalb des Systems Zuckerrübe sein könnte. Bei dem in diesen Versuchen eindeutig schwachen und nicht unbedingt typischen Auswirkungen des Nematodenbefalls auf die Zuckerrübe erschien der Einfluss der 1. Generation nicht vorhanden. Das Muster der Zeitabhängigkeit der ALM-Güte wandelt sich von schlecht zu gut zu schlecht zu gut. Wie schon mehrfach erwähnt, die Güte zu den letzten Terminen muss nicht unbedingt was mit den Nematoden zu tun haben, daher kann hier keine Aussage getroffen werden. Es gibt gewisse Indizien aus den Daten, dass ein „guter“ Messzeitpunkt im Bereich der BZ von 35 bis 40, was einem Temperatursummenäquivalent von 700 bis 800 °C entspräche. Vom Verhalten des Javamodells abgeleitet, entspricht diese Zeit in etwa dem Eindringen der L2 der 2. Generation. Die massive Besiedlung setzt die Pflanze erneut unter Druck, so dass es zu Änderungen der Blattsignaturen kommt und in dieser Phase das ALM-Verfahren zu hohen R^2 führt. Da die Entwicklung des Nematoden unterirdisch und im Feld nicht beobachtbar abläuft, sind das alles Vermutungen, die sich ausschließlich auf das Modellverhalten beruhen und nicht durch Fakten verifiziert werden können.

Die aufwendigen Versuche des JKI Elsdorf waren zur Lösung der Fragestellungen des Projekts ideal, es bestand in der Regel ein ausreichender Stichprobenumfang bei bekannten Eigenschaften des Versuches. Vor allem die aufwendige Populationsspreizung und die intensiven Bodenproben waren eine zwingende Voraussetzung. Die Versuchsanlage mit kleinen Wirtschaftspfaden ermöglichte ein schnelles und einfaches Messen im Hochdurchsatz. Der Aufwand pro Parzelle lag bei 20 Sekunden. Trotzdem müssen auch bezüglich einer Übertragbarkeit der Ergebnisse die Versuche aus nematologischer Sicht hinterfragt werden, da die Versuchsergebnisse aus den 3 oder 4 Jahren etwas unerwartet sind. Obwohl es über den als Vorfrucht angebauten Senf mit unterschiedlichen Resistenzeigenschaften gelungen ist, die *Heterodera schachtii* Populationen extrem zu spreizen und Dichten von 0 bis über 6000 E&L/100 ml Boden zu generieren, sind die Konsequenzen von solch extremen Populationsdichten im Bestand nicht zu beobachten. Erwartet gewesen wären, dass zumindest die Parzellen mit extremer Nematodenabundanz deutliche Depressionen in der Blattmasse entwickelt hätten. Dies war in keinem Jahr der Fall. Selbst die Fehlstellen in 2013 sind nicht auf hohe Nematodendichten zurückzuführen, sondern eher durch Nichtaufgang (eventuell Fraßschäden, etc.) der Saat zu begründen. Die AG von Prof. Bareth (Uni Köln) hat mit (MCA)-Kamera bestückte Oktocoptern testweise Luftbilder der Versuchsfelder erstellt. Auch hier waren keine Unterschiede zwischen den Parzellen innerhalb der Luftbilder ersichtlich (Abb. 17). Als Konsequenz einer ad hoc Vermutung in 2012 wurde ein Bedarf auf einen höheren Wellenlängenbereich durch entsprechende Filter vermutet, u.a. auch bestätigt durch die Messungen mit dem TEC5 AgroSpec.



Abb. 16: Octokopter mit MCA Kamera der AG Bareth, Köln

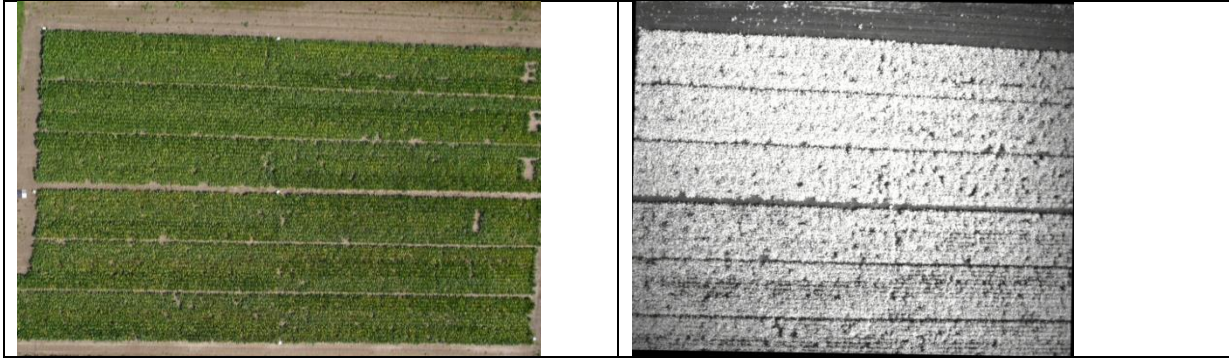


Abb. 17: RGB-Luftbild des Versuchsfelds in 2012 (links), entsprechendes Infrarotbild der MCA Kamera (rechts), Luftbilder der AG Bareth, Köln; die einzelnen Parzellen sind nicht erkennbar

Aber für die fehlenden Unterschiede müssen auch andere Gründe diskutiert werden. Zuerst waren da die Witterungsbedingungen in den 3 Jahren. Niederschläge waren in der Regel ausreichend, Welkesymptome traten nur temporär während des Tages auf. In 2014 wurden in der Praxis die höchsten Erträge erzielt, ein Indiz, dass die klimatischen Bedingungen optimale Wachstumsbedingungen für die Zuckerrübe bedeuteten. Auch die Erträge in 2012 und 2013 waren über dem Durchschnitt. Unter solchen Bedingungen ist die Kapazität der Rübe für den Nematoden am größten, im Prinzip wird vermutet, dass das Rübenwachstum entweder ausreichend Energie auch für den Nematoden liefert, ohne mit Wachstumsdepressionen zu reagieren, oder aber das Wurzelsystem dem Nematoden „davonwächst“.

Eine 2. Vermutung ist die Hypothese der fruchtfolgespezifischen Verseuchungsdichte, mit den zu diskutierenden Einflüssen des sogenannten antagonistischen Potentials und/oder schwache Pathogenitäten der vorliegenden Populationen. Typisch für Heterodera schachtii sind Gleichgewichtsdichten, die sich je nach Produktionssystem und Fruchtfolge nach einer gewissen Zeit einstellen. Die Ursachen der Gleichgewichtsdichten werden u.a. mit einer Zunahme von Antagonisten erklärt, die die Populationsdichten kontrollieren. In der Konsequenz, es liegt zwar eine hohe Population vor, aber die Mortalitätsrate der Nematoden ist aufgrund der Antagonisten hoch. Wei-



Abb. 18: Vermutete Nematodenschäden in Sept. 2013 in einem Praxisschlag, Bornheim, Rheinland

tere Indizien zur Unterstützung der Vermutung sind einerseits die enge räumliche Nähe zum langjährigen Monokulturversuch Zuckerrübe des JKI, d.h. ein hohes antagonistisches Potential wird vermutet, welches sich in den Versuchsflächen ausgebreitet haben könnte. Hinzu kommen die relativ niedrigen Ertragsverluste bei hohen Populationsdichten, wo es ab 1000 E&L/100 ml Boden keine Unterschiede mehr gibt. Diese Relation entspricht ungefähr den in Abb. 9 dargestellten DA – Distanzen für 2012. Dass es in den Jahren zu den symptomatischen Veränderungen im Bestand gekommen ist, zeigen Bilder aus Praxisschlägen in 2013 (Abb. 18), aber nicht in den Versuchsfeldern. Eine weitere Begründung könnte eine vermutete abnehmende Pathogenität sein. Es handelte sich um „alte“ Populationen, die schon lange aus Versuchsgründen mit anfälligen Brassicaceae künstlich erhöht werden. Auch hier kann sich die Zusammensetzung der Population geändert haben und ihre Pathogenität bezüglich der Zuckerrüben geändert haben.

Gelingt es, anhand der erfassten Information im Jahre X eine Beratungsempfehlung für den nächsten Zuckerrübenanbau zu erstellen? Falls ein guter Schätzer der Population vorhanden ist, kann man relativ einfach über die durchschnittliche Sterberate bis zur Saat des nächsten Zuckerrübenanbaus eine Empfehlung zu geben. Insgesamt wird die Übertragbarkeit der hier vorgestellten Ergebnisse auf die Praxissituationen aus den diskutierten Gründen als kritisch angesehen. Obwohl manche Ergebnisse vielversprechend erscheinen, handelt es sich um Grundlagen in der Verbindung von hyperspektralen Signalen und quantitativen Merkmalen.

Literatur

Richter, O., (1985) Simulation des Verhaltens ökologischer Systeme: mathematische Methoden und Modelle, VCH-Verlag, Weinheim, 220 S.

Schmidt, K. (1992), Zeitdiskrete Modelle zur Vorhersage der Populationsdynamik des Zuckerrübenmatschens *Heterodera schachtii* (Schmidt) in Abhängigkeit von der Fruchtfolge und des Temperaturmusters, Diss., 137. S.

Schmidt, Kai (2009), Verfahren zur Identifikation und Ermittlung des Zustandes von Pflanzen und anderen Objekten mittels Fernerkundung, Patentantrag 10 2009 040 944.0 beim Deutschen Patent- und Markenamt, 19 S.

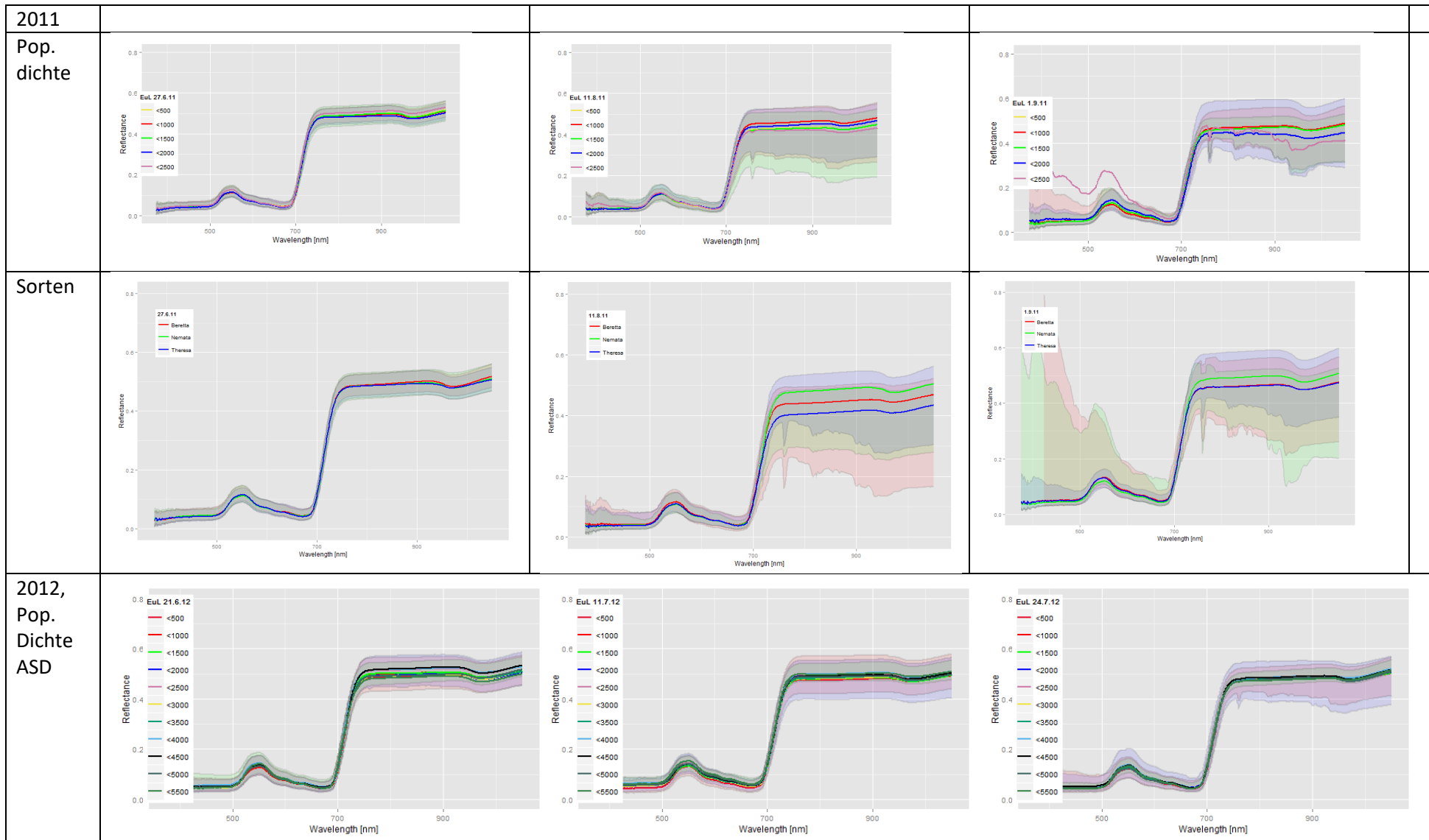
Schmidt, K. (2011), Analyse hyperspektraler Signaturen mit doppelten Weibull-Funktionen, PFG Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation Jahrgang 2011 Heft 5 (2011), p. 349 - 359.

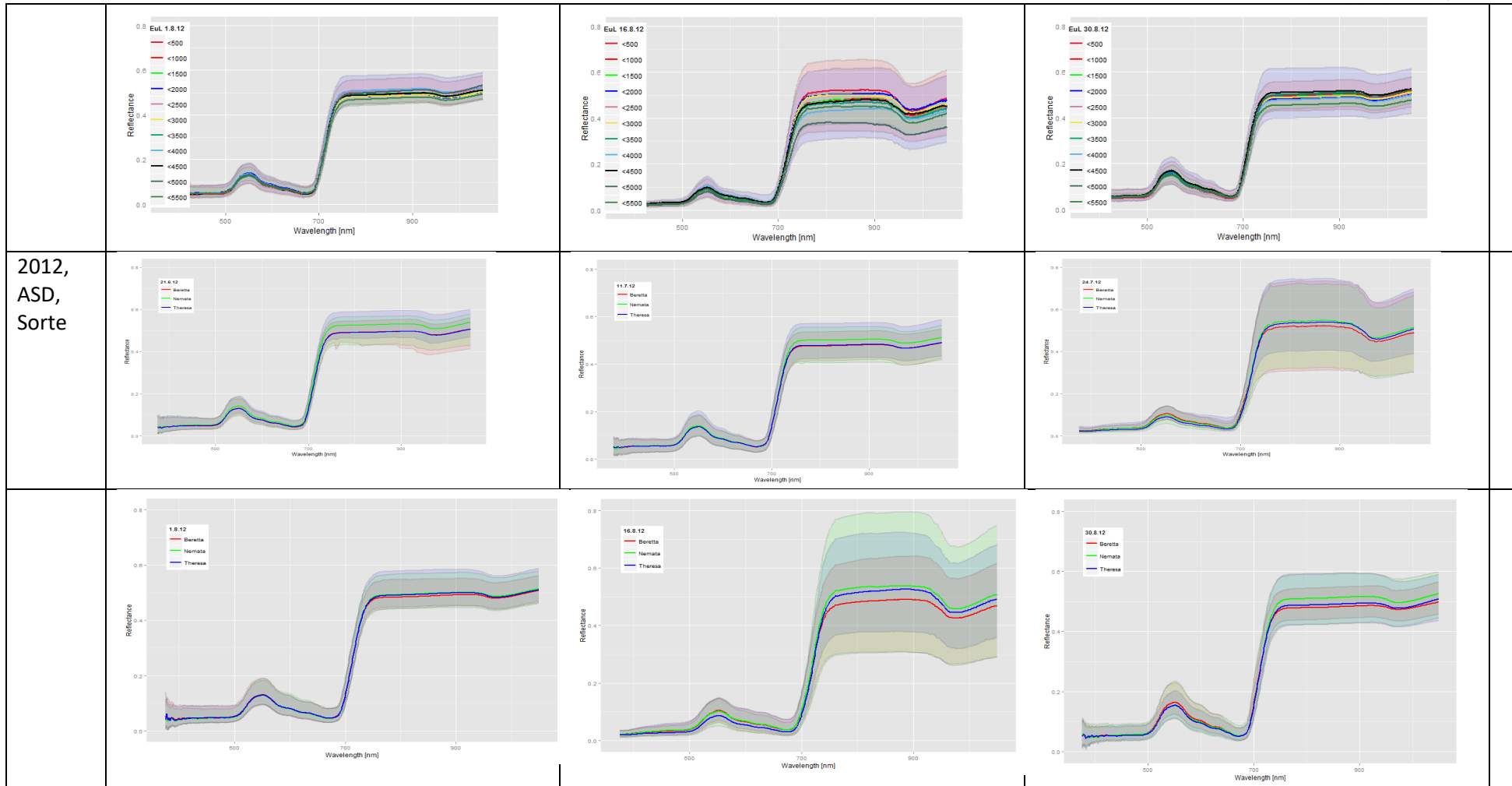
Anhang A bis D

Anhang A: Witterungsüberblick JKI Eldorf von 2011 bis 2014

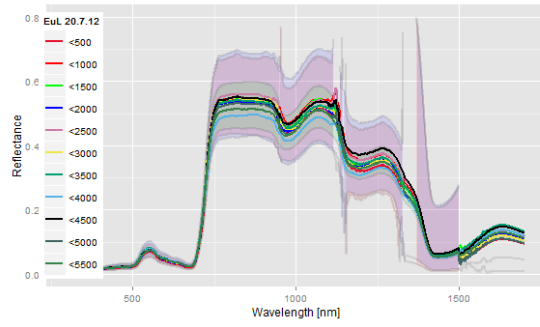
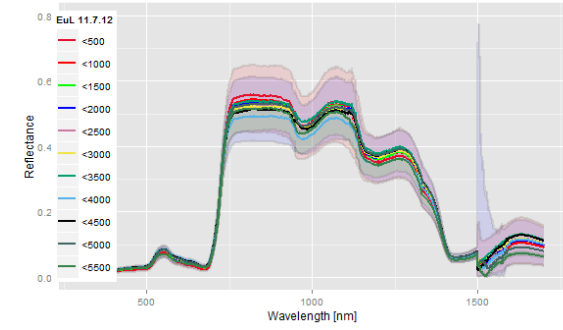
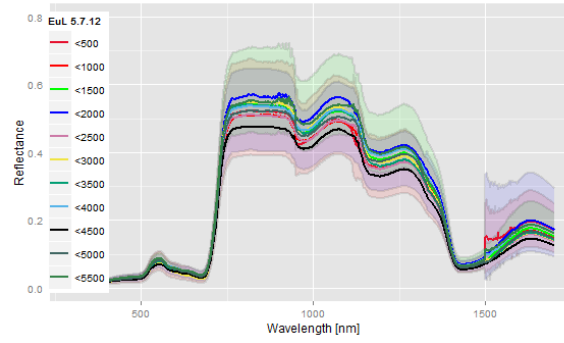
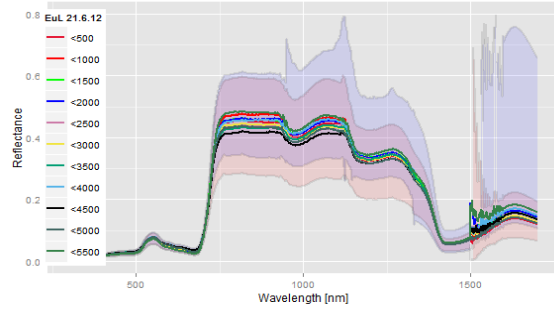
	<p>Zur Demonstration möglichen Trockenstresses wird der Niederschlag als gleitender Durchschnitt aus 10 Tagen dargestellt. Sind die Böden tiefgründiger kann die Tageszahl erhöht werden, bei sandigen Böden mit geringer Feldkapazität wird die Tageszahl reduziert. Speziell 2011: Sehr hohe Temperatursumme (Basis 8°C), leichter Trockenstress Mitte Juli, sehr hohe Strahlung.</p>
	<p>Durchschnittliche Temperatursumme in 2012, ausreichende Wasserzufuhr über die gesamte Vegetationsperiode, Pflanzen zeigten keinen Wasserstress, hohe Strahlung während der Hauptwachstumsphase, reduziert im Herbst während der Ertragsbildung.</p>
	<p>Durchschnittliche Temperatursumme in 2013, stärkerer Wasserstress im Juli während der Blattbildungsphase, die Bestände zeigten typische nematodenbedingte, aber reversible Welkesymptome. Ausreichende Wasserversorgung im Herbst, niedrige Strahlung während der Wachstumsphasen.</p>
	<p>2014, hohe Temperatursummen, kurze Trockenperiode vor Bestandsschluss, mehr als ausreichende Wasserversorgung während der Vegetationsperiode, erst im Herbst eine weitere Trockenperiode, hohe Lichteinstrahlung ab Juli. Keine nematodenbedingte Welkesymptome, Jahr mit dem höchsten Ertrag.</p>
	<p>Akkumulierte Strahlung in den Jahren 2011 bis 2014</p>

Anhang B: Zusammenfassung der gemessenen Spektren in den Jahren 2011 bis 2014, aufgeteilt nach Sorte und Populationsdichte (EuL/100 ml Boden)

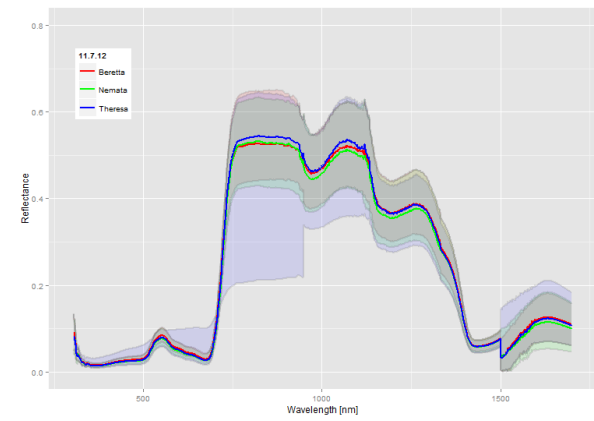
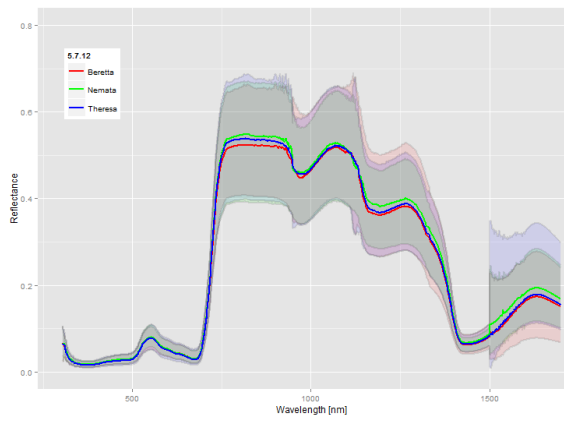
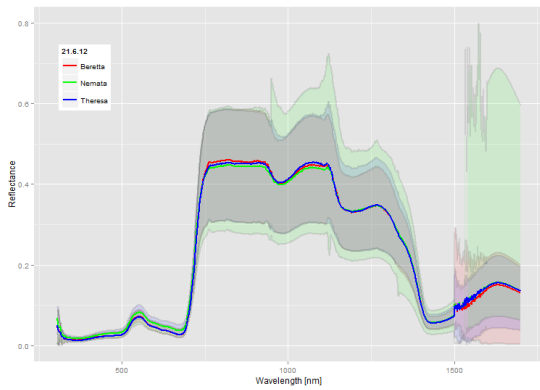


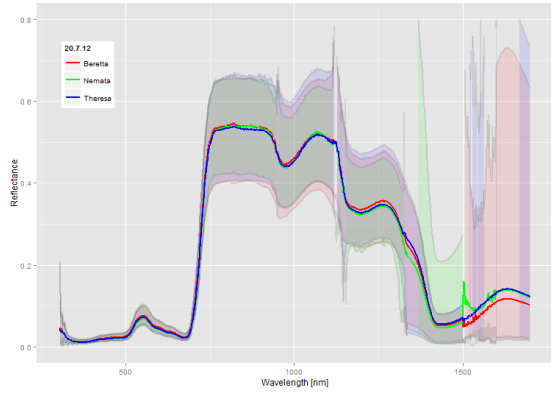


2012,
 TEC5,
 Dichte

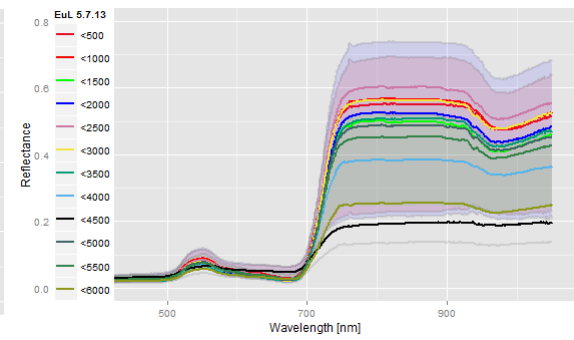
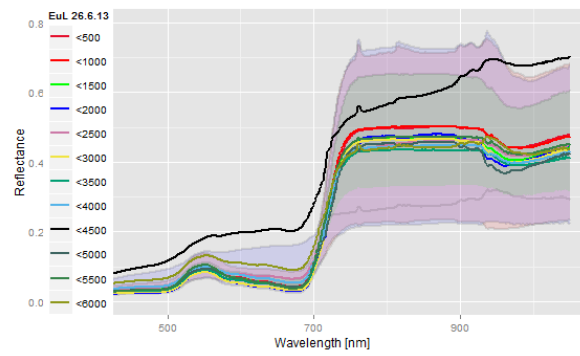
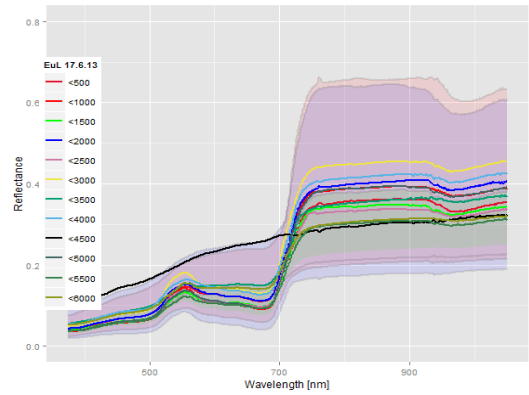


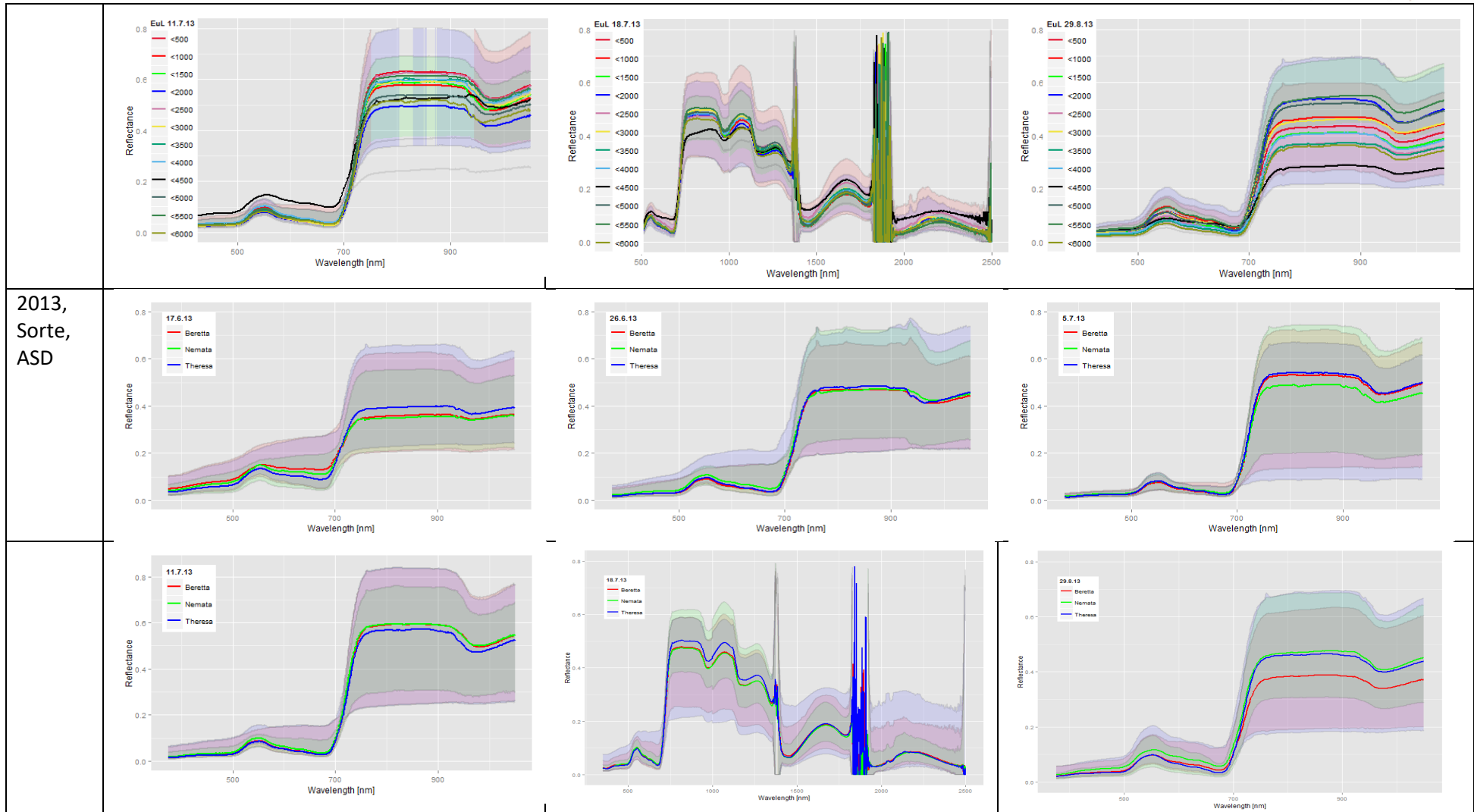
2012,
 TEC5,
 Sorte



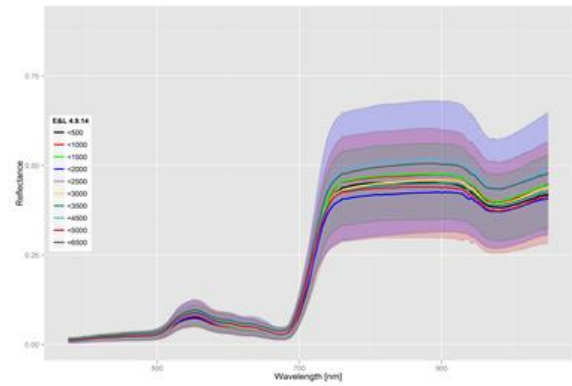
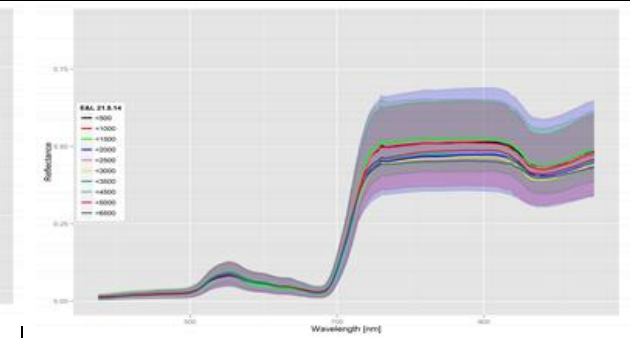
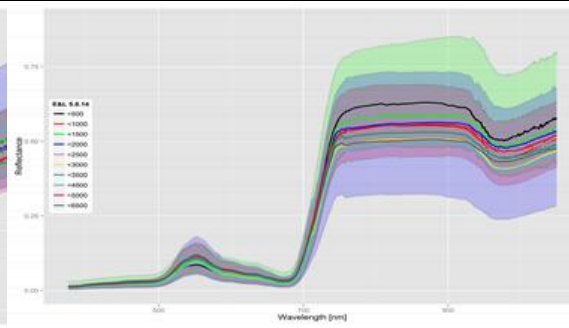
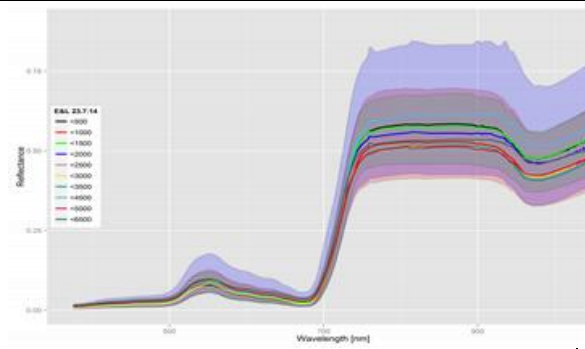


2013,
 Pop.
 Dichte,
 ASD

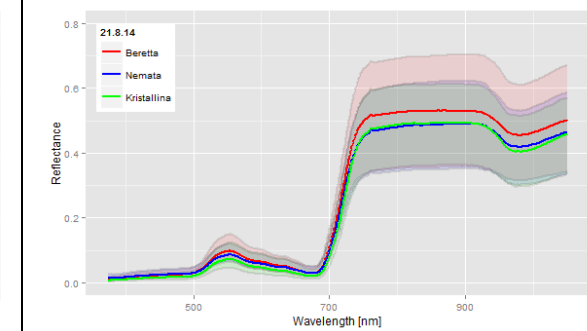
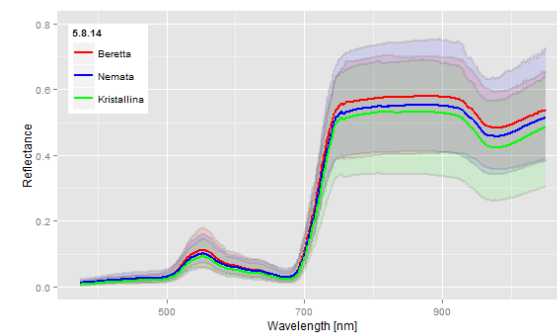
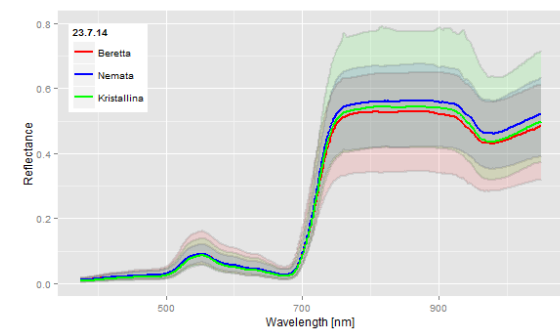


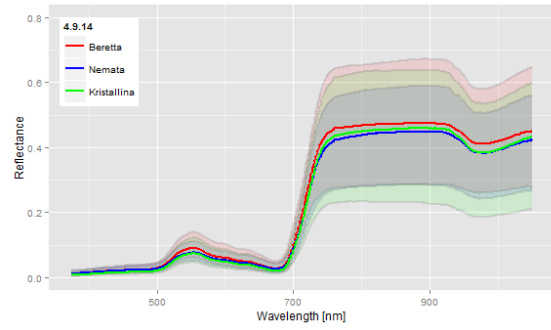


2014,
 Pop.
 Dichte,
 ASD

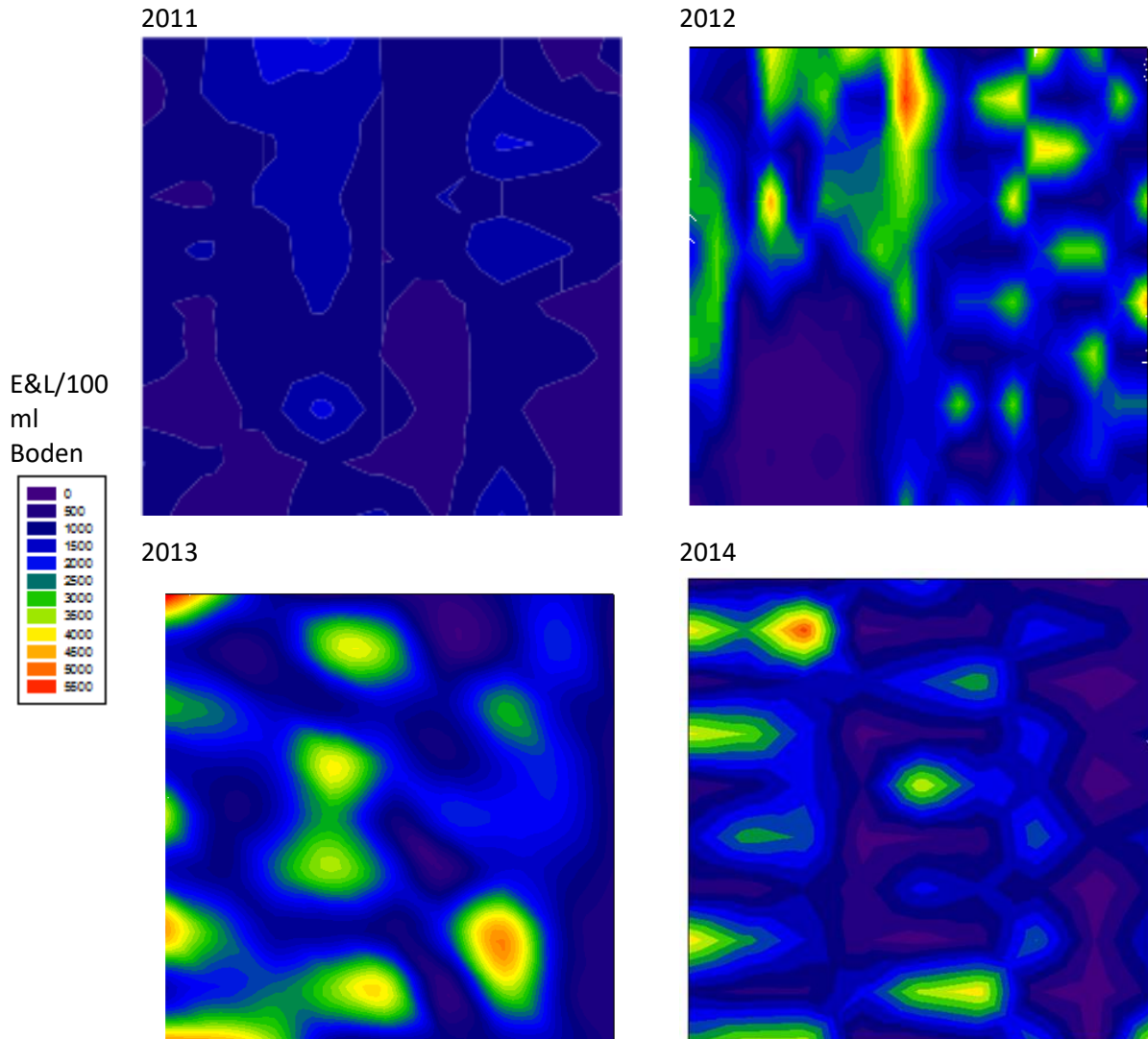


2014,
 Sorte,
 ASD

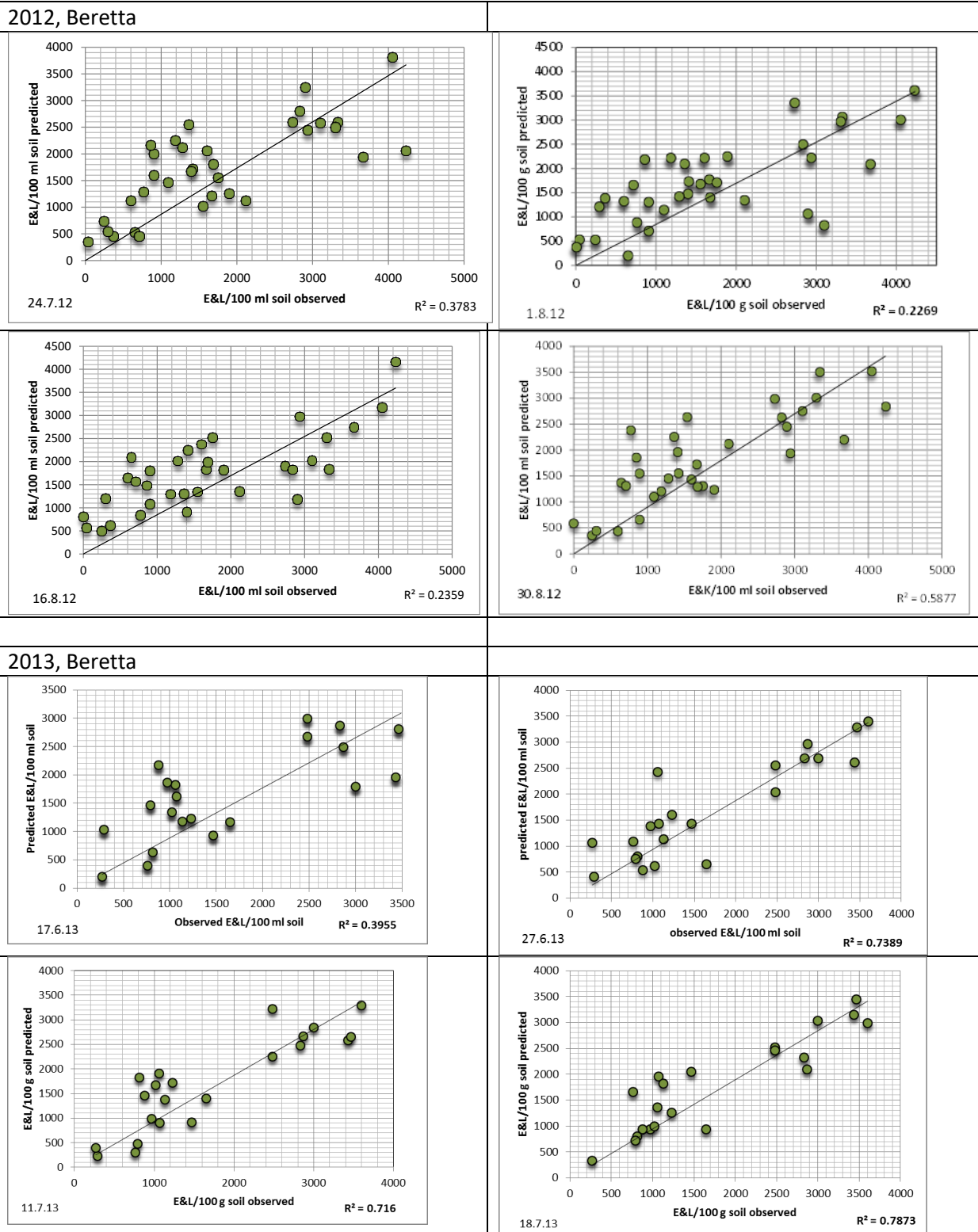


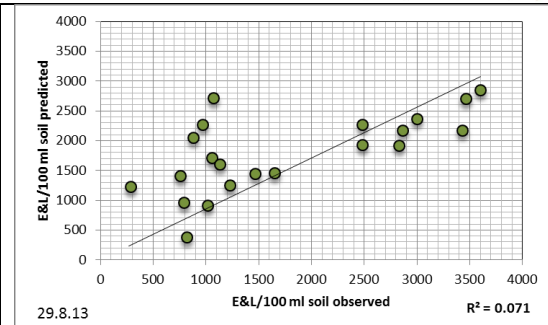
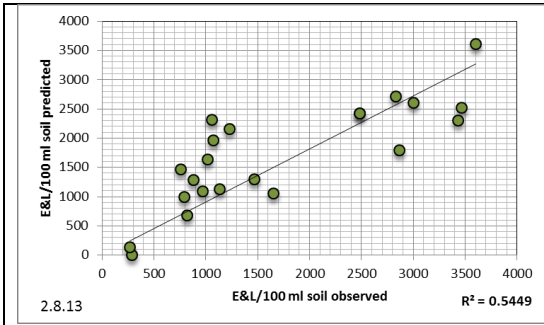


Anlage C, Räumliche Verteilung der Heterodera schachtii Populationen im Versuchsfeld von 2011 bis 2014



Anlage D: Chronosequenz des ALM für die Sorte Beretta; Sensor: ASD FieldSpec





2014, Beretta

