



DIPLOMARBEIT

Untersuchung der radiometrischen Qualität digitaler Orthophotos

ausgeführt am

Department für Geodäsie und Geoinformation der Technischen Universität Wien

Forschungsgruppe Photogrammetrie

unter der Anleitung von

Univ. Prof. Dipl. Ing. Dr. techn. Norbert Pfeifer

Ao. Univ. Prof. Dipl. Ing. Dr. techn. Josef Jansa

durch

Bernhard Pammer, B. Sc.

Berchtesgadnerhofgasse 21,

3400 Klosterneuburg

Matr. Nr.: 0726728

Wien, im November 2013

Danksagung

Ich möchte Fr. Dr. Christine Ressler vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen meinen herzlichen Dank aussprechen. Ihre Vorschläge und Anregungen sowie die Möglichkeit, sie jederzeit um Rat zu fragen, haben bei der Entstehung der vorliegenden Diplomarbeit einen bedeutenden Beitrag geleistet.

Darüber hinaus möchte ich Hr. DI Michael Franzen und Hr. DI Wolfgang Gold für die Möglichkeit danken, meine Diplomarbeit in Kooperation mit dem BEV zu verfassen sowie allen Mitarbeitern der Abteilung V2-Fernerkundung am BEV für ihre Unterstützung.

Ich danke weiters Prof. Norbert Pfeifer und Prof. Josef Jansa von der Forschungsgruppe Photogrammetrie der TU-Wien für ihre profunde und stets konstruktive und wertvolle Kritik während der Entstehung dieser Masterarbeit.

Allen Studienkollegen, Freunden und Begleitern während meines Studiums danke ich dafür, dass dieser Lebensabschnitt unvergesslich wurde.

Meinen Eltern, Helga und Josef Pammer, möchte ich an dieser Stelle meinen ganz besonderen Dank aussprechen – schlicht und einfach für alles, in jeder Lebenslage!

KURZFASSUNG

Die Ansprüche an digitale Orthophotos haben sich in den letzten Jahren verändert. Heutzutage wird an sie nicht mehr nur die Forderung gestellt, die dargestellte Szene visuell ansprechend wiederzugeben. Es sollen darüber hinaus Folgeprodukte abgeleitet und eine automatische Klassifizierung durchgeführt werden können. Kritisch im Hinblick auf diese neuen Aufgabenfelder ist die in den digitalen Orthophotos enthaltene Radiometrie.

Die vorliegende Arbeit setzt sich zum Ziel, Erfahrungen über das Verhalten der Radiometrie digitaler Orthophotos zu gewinnen und Beurteilungskriterien zu entwickeln, anhand derer fundierte Aussagen über die enthaltene radiometrische Qualität getroffen werden können. Den Mittelpunkt dieser Diplomarbeit bilden daher auf Basis vorhandener digitaler Orthophotomosaiken entwickelte Methoden, die eine objektive und konsistente Beurteilung der Radiometrie ermöglichen. Diese Methoden werden in der vorliegenden Diplomarbeit ausführlich erläutert und ihre Möglichkeiten und Grenzen geschildert. Der Echtfarbbereich (Rot-, Grün-, Blau-Kombination = RGB-Bereich) und der nahe Infrarotkanal (NIR) werden dabei getrennt voneinander analysiert. Während die Methode des RGB-Bereichs anhand von grauen, befestigten Flächen die Homogenität und Ausgewogenheit des Datenmaterials aufzuzeigen vermag, besteht das Hauptkriterium der Analyse des NIR-Bereichs darin, Aussagen über die Trennbarkeit von Vegetation und Nicht-Vegetation mit Hilfe des NDVIs für eine nachfolgende Klassifizierung treffen zu können.

Weiters wird untersucht ob es möglich ist, anhand der vorliegenden Daten und durchgeführten empirischen Untersuchungen Empfehlungen zu formulieren, welche Schwellwerte bei der Beurteilung digitaler Orthophotomosaiken eingehalten werden sollen. Es wurde darauf geachtet, dass die Aussagen über die Qualität bzw. die Eignung zur Klassifizierung anhand einiger weniger Kennwerte erfolgen kann, um die empfohlenen Methoden abgesehen von darauf aufbauenden wissenschaftlichen Untersuchungen auch für den praktischen Gebrauch attraktiv zu machen. Da die Beurteilung von digitalen Orthophotomosaiken ein sehr komplexes und umfangreiches Gebiet darstellt sind die vorgestellten Beurteilungsmethoden und deren Schwellwerte generell als Empfehlungen zu verstehen, die nach dem derzeitigen Wissensstand und auf Basis vorhandener Daten verfasst wurden. Durch künftige Untersuchungen mit weiteren Daten können die Beurteilungskriterien vermutlich weiter verfeinert werden.

ABSTRACT

The requirements for digital orthophotos have changed over the past few years. Nowadays it is demanded that they not solely provide the represented scene in a visual pleasing way. Beyond that derived products and automated classification shall be obtained. The critical factor concerning these tasks is the radiometry within the digital orthophotos.

This thesis aims to gain experience regarding the behavior of the radiometry of digital orthophotos and to develop evaluation criteria with which profound knowledge about the radiometry can be achieved. The focus of this thesis is on the development of methods, based on existing image data, that allow to form an opinion about the radiometry in an objective and consistent way. These methods are explained in detail and their strengths and limits are described. The red-, green-, blue-, combination (=RGB-field) and the near infrared- (=NIR) field are analyzed separately. While the method of the RGB-field is capable of pointing out the homogeneity and balance of the data with the help of grey and solid underground, the NIR-field's main goal is to obtain information about the possibility of separating vegetation and non-vegetation with the help of NDVI values for a subsequent automated classification.

Furthermore it is tested whether it is possible to derive recommendations from the conducted experiments, which thresholds shall be met during the evaluation of digital orthophoto mosaics. It has been taken care that the information about the quality and the eligibility to use the data for subsequent classification can be obtained by only a few criteria in order to make the recommended methods also attractive for practical purpose beside scientific research. Due to the fact that the evaluation of digital orthophoto mosaics is a very complex and extensive topic, the methods and thresholds established in this thesis can be seen as recommendations that are given with current state of knowledge and available data. Future research with additional data might allow to refine and adjust the evaluation criteria.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	9
1.1	Motivation und Zielsetzung der vorliegenden Diplomarbeit	9
1.2	Struktur der vorliegenden Diplomarbeit.....	10
2	Grundlagen der Fernerkundung.....	11
2.1	Fernerkundungssysteme	11
2.2	Elektromagnetische Strahlung	11
2.3	Einfluss der Atmosphäre auf die elektromagnetische Strahlung.....	14
2.4	Bedeutung des nahen Infrarotbereichs	15
2.5	Grundlagen der Bilderfassung.....	16
2.5.1	Grauwerthistogramme	17
2.6	Geometrische Auflösung.....	18
2.7	Radiometrische Aspekte.....	19
2.7.1	Radiometrische Auflösung (Bildtiefe).....	19
2.7.2	Radiometrische Kalibrierung.....	20
2.7.2.1	DSNU und PRNU	20
2.8	Spektrale Auflösung	21
2.9	Pansharpening.....	22
3	Flugplanung und Durchführung des Aufnahmeprozesses.....	25
3.1	Aufnahmesysteme für die digitale Luftbilderfassung	26
3.1.1	Flächenkameras.....	27
3.1.2	Zeilenkameras	28
4	Orthophotos	29
4.1	Orthophotoerstellung	29
4.1.1	Berechnung von Orthophotos.....	30
4.1.1.1	Geometrische Entzerrung.....	30
4.1.1.2	Grauwertinterpolation	31
4.2	Herstellung eines Orthophotoverbandes.....	32
5	Verwendete Testdaten zur Untersuchung der Qualität von digitalen Orthophotos	33
5.1.1	Auswahlkriterien für die Testgebiete	34
5.1.2	Vorstellung der Testgebiete	35

5.1.2.1	Testgruppe Positiv	35
5.1.2.2	Testgruppe Negativ	37
6	Möglichkeiten der Beurteilung.....	40
6.1	Visuelle Beurteilung	42
6.1.1	RGB-Bereich.....	42
6.1.2	NIR-Bereich.....	43
6.2	Untersuchung der radiometrischen Informationen anhand statistischer Kennwerte.....	45
6.2.1	Vorbereitende Massnahmen.....	45
6.2.2	Operationelle Aspekte beim Messen von Musterflächen.....	47
6.2.3	Analyse des RGB-Bereichs	49
6.2.3.1	Methodik für die Analyse des RGB-Bereichs.....	49
6.2.3.2	Erkenntnisse aus den Analysen	52
6.2.3.2.1	Blaudominanz in dunklen Bereichen	52
6.2.3.2.2	Rotdominanz in hellen Bereichen	53
6.2.3.3	Fazit	54
6.2.4	Analyse des NIR-Bereichs	55
6.2.4.1	Evaluierung der RGB-Methode für den NIR-Bereich.....	55
6.2.4.2	Methodik für die Untersuchungen des NIR-Bereichs mit Hilfe des NDVI	56
6.3	Histogrammbeurteilung	58
7	Untersuchungen zur Ermittlung von Schwellwerten für die Beurteilung.....	59
7.1	RGB-Bereich.....	59
7.1.1	Befestigte Flächen	59
7.1.1.1	Schlussfolgerungen.....	64
7.1.2	Vegetation	66
7.1.3	Fazit der Analyse des RGB-Bereichs	68
7.2	NIR-Bereich.....	70
7.2.1	Validierung der NDVI-Analyse mit zusätzlichen Nicht-Vegetationsklassen	70
7.2.1.1	Resultate TV_1.....	72
7.2.1.2	Resultate TV_2.....	73
7.2.1.3	Resultate TV_3.....	74
7.2.2	Resultate der NDVI-Analyse für die Testgruppe „Positiv“	76
7.2.3	Resultate der NDVI-Analyse für die Testgruppe „Negativ“	80
7.2.4	Fazit der NDVI-Analyse	84
7.3	Musterbeispiel.....	85

8	Conclusio	89
8.1	Fazit	89
8.1.1	Fazit RGB-Bereich	89
8.1.2	Fazit NIR-Bereich	90
8.2	Ausblick	91
	Literaturverzeichnis.....	92
	Abbildungsverzeichnis.....	93
	Tabellenverzeichnis.....	94

Abkürzungsverzeichnis

BRDF – Bidirektionale Reflektanzverteilungsfunktion
CCD – Charge-coupled Device
DGM – Digitales Geländemodell
DN – Digitale Nummer
DOM – Digitales Oberflächenmodell
DOP – Digitales Orthophoto
DSNU – Dark Signal Non-Uniformity
EMS – Elektromagnetische Strahlung
GPS – Global Positioning System
GSD – Ground Sampling Distance
GWS – Grauwertstufen
IMU – Inertial Measurement Unit
LUT – Look-Up Table
MTF - Modulationstransferfunktion
NDVI – Normalized Difference Vegetation Index
NIR – Nahes Infrarot
PRNU – Photo Response Non-Uniformity
RG – Referenzgebiet
SNR – Signal-to-noise ratio
UC – UltraCam

1 EINLEITUNG

1.1 MOTIVATION UND ZIELSETZUNG DER VORLIEGENDEN DIPLOMARBEIT

Diese Diplomarbeit wurde am Department für Geodäsie und Geoinformation, Forschungsgruppe Photogrammetrie, unter der Betreuung von Prof. Dr. Norbert Pfeifer und Prof. Dr. Josef Jansa, in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) unter der Betreuung von Dr. Christine Ressler verfasst.

Österreichweit werden in einem dreijährigen Befliegungszyklus flächendeckend Luftbildflüge im Rahmen einer Kooperation zwischen Bund (Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen - BEV, und Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft) und den Bundesländern durchgeführt. Für den Zyklus der Jahre 2013-2015 ist das BEV für die Abwicklung der Ausschreibung verantwortlich. Mit Hilfe dieser digitalen Luftbilder lassen sich diverse Folgeprodukte ableiten. Ein sehr bedeutendes stellt dabei das digitale Orthophoto (DOP) dar. Durch Zusammenfügen vieler digitaler Orthophotos zum Orthophotomosaik ist es möglich, eine entzerrte, kartenähnliche Darstellung der Erdoberfläche zu erstellen. Viele Leser kennen und schätzen Orthophotomosaiken aus Angeboten wie Google Maps. Sie helfen, einen Eindruck eines Gebietes aus der Luft zu erhalten, die Bodenbedeckung grob zu erfassen sowie den Verlauf von Straßen, Flüssen etc. nachzuverfolgen. In der Fernerkundung spielt jedoch nicht mehr nur die visuelle Darstellung und das ansprechende Erscheinungsbild von Orthophotos eine Rolle. Vielmehr gewinnt die automatisierte Ableitung weiterer Informationen in den letzten Jahren mehr und mehr an Bedeutung, allen voran die automatische Klassifizierung. Um automatische Analyseverfahren zuverlässig durchführen zu können, muss die in den Daten enthaltene *radiometrische Information* der DOPs von zufriedenstellender, homogener Qualität über große Flächen sein. Vom Luftbild zum Orthophoto sind zahlreiche Bearbeitungsschritte notwendig und jeder dieser Bearbeitungsschritte verändert die Radiometrie des Ausgangsmaterials. Während für die Kontrolle der geometrischen Information bereits langjährige Erfahrungen vorliegen, stellt die Radiometrie digitaler Orthophotos noch ein verhältnismäßig junges Forschungsgebiet dar. Der aktuelle Trend neigt zu immer kürzeren Befliegungszyklen und in Folge dessen auch zu immer kürzeren Aktualisierungsintervallen der Folgeprodukte. Als Konsequenz daraus ergibt sich die Notwendigkeit, über die enormen Datenmengen, die bei der Durchführung der Luftbildflüge entstehen, in verhältnismäßig kurzer Zeit Aussagen treffen zu können über deren Qualität und die Möglichkeit Folgeprodukte abzuleiten.

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung von Orthophotomosaiken hinsichtlich der enthaltenen Radiometrie. Abgesehen von der unabdinglichen visuellen Beurteilung sollen Methoden gefunden werden, um die Qualität und die Eignung zur Weiterverarbeitung, speziell für das Klassifizieren, einschätzen zu können. Die Entwicklung der Methoden zur Qualitätsbeurteilung, die in dieser Arbeit vorgestellt wird, basiert auf dem vorhandenen Datenbestand des BEV und stellt eine empirische Untersuchung der verfügbaren Daten dar. Es soll untersucht werden, ob es möglich ist, objektive Kriterien zu entwickeln, um eine konsistente Beurteilung digitaler Orthophotos zu gewährleisten. Dafür werden der Echtfarbbereich und der Infrarotbereich anhand der vorhandenen Daten getrennt voneinander analysiert.

1.2 STRUKTUR DER VORLIEGENDEN DIPLOMARBEIT

Nachdem in Kapitel 1 die Motivation und Zielsetzung dieser Diplomarbeit erläutert wurde, wird in Kapitel 2 näher auf die Grundlagen der Fernerkundung, speziell der flugzeuggestützten, eingegangen. Wesentliche Begriffe werden eingeführt und auf maßgebliche Eigenschaften der elektromagnetischen Strahlung eingegangen.

Kapitel 3 behandelt daraufhin die Thematik rund um die Flugplanung und die Durchführung des Luftbildfluges. Die Funktionsweise aktueller Aufnahmesensoren wird erläutert.

Kapitel 4 beschreibt die Vorgehensweise, um vom digitalen Luftbild zum digitalen Orthophoto zu gelangen. Es wird auf das Prinzip der Entzerrung, die Methoden der Grauwertinterpolation und auf die Problematik der Mosaikierung eingegangen.

Nachdem bis hierhin die radiometrischen Aspekte der Orthophotoerstellung dargestellt wurden, widmet sich Kapitel 5 den für die Untersuchungen herangezogenen Testdaten. Die beiden Testgruppen werden vorgestellt sowie Hintergründe erläutert, die im Bezug auf die Auswahl der Testdaten getroffen wurden.

Kapitel 6 schildert die verschiedenen Möglichkeiten der Analyse digitaler Orthophotos. Zusätzlich zu den bereits etablierten Methoden werden jeweils für den RGB- und den NIR-Bereich eine im Zuge dieser Diplomarbeit entwickelte Methode detailliert vorgestellt und deren Vorteile und Grenzen geschildert.

Daraufhin werden in Kapitel 7 die durchgeführten Experimente und deren Ergebnisse erläutert. Darüber hinaus wird die Fragestellung behandelt, ob und wie es möglich ist, digitale Orthophotos anhand einiger weniger Kriterien zu beurteilen. Empfehlungen werden formuliert und eine Validierung der Erwartungen zeigt auf, ob die Methoden durchgreifend sind für die Beurteilung von digitalen Orthophotos.

In Kapitel 8 erfolgt die Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse und Empfehlungen für die Analyse von digitalen Orthophotos. Weiters enthält dieses Kapitel einen Ausblick und Vorschläge, wo bei aufbauenden Untersuchungen angesetzt werden kann um Fragestellungen zu untersuchen, auf die in dieser Arbeit nicht eingegangen wurde.

2 GRUNDLAGEN DER FERNERKUNDUNG

Jedes Bild, das im Prozess der Fernerkundung gewonnen wird, ist ein Abbildungsprozess, der sowohl geometrische (räumliche) als auch radiometrische (physikalische) Aspekte aufweist. Das folgende Kapitel geht auf die grundlegenden Vorgänge rund um die digitale Bilderfassung ein und erläutert Begriffe, die im Zuge dieser Diplomarbeit von großer Relevanz sein werden.

2.1 FERNERKUNDUNGSSYSTEME

Wesentliche Komponenten jedes Fernerkundungssystems sind die Strahlungsquelle (Sonne, Satellit), der Strahlungsweg (Atmosphäre), das Objekt (Erdoberfläche) und der Sensor (Antenne, Kamera). Diese vier Komponenten sind wellenlängenunabhängig. Der geometrische Aspekt gibt an, dass eine Information aus einer bestimmten räumlichen Richtung kommt; der physikalische Aspekt informiert über die Intensität und die spektrale Zusammensetzung der Strahlung, die zur Bildentstehung beiträgt. Bei der Ausmessung und Interpretation der Bilder werden beide Arten der Information genutzt (Albertz, 2009 S. 9 f).

Die Systeme der Fernerkundungssensoren müssen daher so ausgelegt sein, dass sie bei der Aufnahme von Luft- und Satellitenbildern sowohl die Richtung, aus der die Strahlung kommt, als auch deren Intensität ermitteln. Nach der Quelle der empfangenen Strahlung unterscheidet man passive und aktive Systeme. Bei passiven Systemen geht die elektromagnetische Strahlung von einer in der Natur vorhandenen Quelle aus (z.B. Sonnenstrahlung), die an der Erdoberfläche reflektiert wird. Aber auch die Eigenstrahlung, die von jedem Körper auf Grund seiner Oberfläche und Temperatur abgegeben wird, kann aufgenommen werden (Thermalstrahlung). Bei aktiven Systemen sendet der Sensor vom Flugzeug oder Satelliten selbst elektromagnetische Strahlung aus und empfängt die reflektierte künstliche Strahlung. Die im Zuge dieser Diplomarbeit untersuchten digitalen Orthophotos entstehen aus digitalen Luftbildern, die mit Luftbildkameras aufgenommen wurden. Diese Sensoren zeichnen reflektierte und gestreute Sonnenstrahlung auf und sind demnach den passiven Systemen zuzurechnen.

2.2 ELEKTROMAGNETISCHE STRAHLUNG

Elektromagnetische Strahlung (EMS) entspricht einem sich ständig ändernden elektromagnetischen Feld. Charakterisiert wird EMS durch ihre Wellenlänge und ihr Frequenz die über $\lambda = \frac{c}{\nu}$ zusammenhängen. Es gilt λ ...Wellenlänge, c ...Lichtgeschwindigkeit, f ...Frequenz. Je größer also die Wellenlänge λ , desto geringer ist die Frequenz.

Folgende Beziehungen gelten:

$$1 \text{ nm} = \text{Nanometer} = 10^{-9} \text{ m}$$

$$1 \text{ }\mu\text{m} = 1 \text{ Mikrometer} = 10^{-6} \text{ m} = 1000 \text{ nm}$$

$$1 \text{ mm} = 1 \text{ Millimeter} = 10^{-3} \text{ m}$$

Das sogenannte elektromagnetische Spektrum beschreibt die Gesamtheit der vorkommenden EMS und wird zur besseren Unterscheidbarkeit in verschiedene Bereiche unterteilt. Es reicht von Höhenstrahlung ($f \sim 10^{21-23}$ Hz, $\lambda \sim 10^{-14}$ m) über den Bereich des für den Menschen sichtbaren Lichts und die Radar- und Mikrowellenstrahlung bis hin zur Extremely-Low Frequency ($f \sim 3-30$ Hz, $\lambda \sim 10^7$ m).

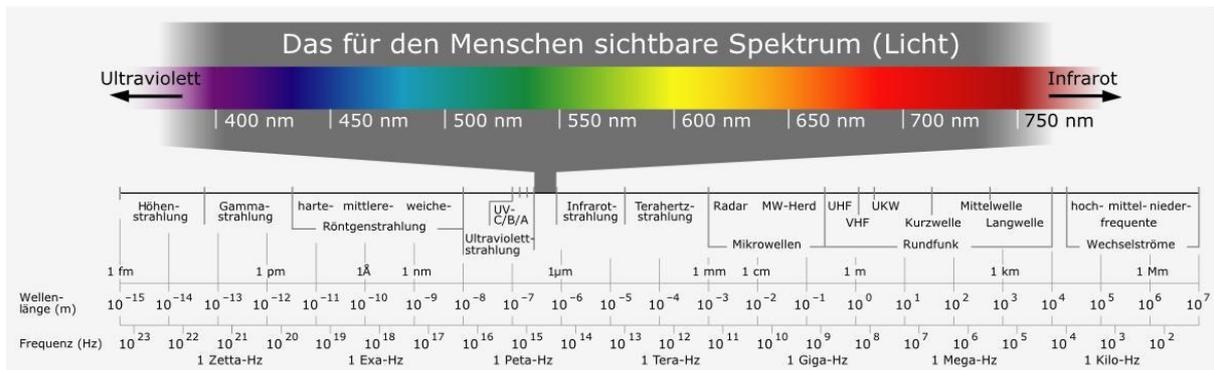


Abb. 1 Elektromagnetisches Spektrum – Quelle: (CIA)

Für die Fernerkundung spielt einerseits der Bereich der Radar- und Mikrowellenstrahlung von ca. 10^{-3} bis 10^0 m eine Rolle. In dieser Arbeit wird das Hauptaugenmerk jedoch auf das für den Menschen sichtbare Spektrum gelegt. Dieser Wellenlängenbereich wird allgemein *Licht* genannt und erstreckt sich, vom ultravioletten Bereich kommend, hin zur Infrarotstrahlung über folgende Spektren:

Tab. 1 Übersicht über den Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts

[nm]	von	bis
Violett	380	430
Blau	430	490
Grün	490	570
Rot	640	780
Nahes Infrarot (NIR)	780	1000

Diese Angaben entsprechen nur ungefähren Werten, da das Farbspektrum kontinuierlich verläuft und eine klare Abgrenzung daher nicht möglich ist. Abgesehen davon ist das Farbempfinden subjektiv und wird von jedem Menschen anders wahrgenommen. Infrarotstrahlung ist für den Menschen bekanntermaßen nicht sichtbar, jedoch sei es in der Tabelle angefügt, da dieser Wellenlängenbereich, der unmittelbar an das sichtbare Spektrum anschließt, in dieser Arbeit von wesentlicher Bedeutung sein wird.

Wenn elektromagnetische Strahlung auf einen Körper trifft, findet immer eine Wechselwirkung statt, die von den spezifischen Eigenschaften der Strahlung bzw. des Körpers abhängt. Es kommt zu teilweiser Reflexion, Absorption und bei durchlässigen Körpern zu Transmission. Deren Werte hängen von der Wellenlänge von der auftreffenden Strahlung ab und werden nach (Albertz, 2009 S. 12 f) mit folgenden dimensionslosen Verhältniszahlen angegeben:

$$\text{Reflexionsgrad } \rho = \Phi_r / \Phi$$

$$\text{Absorptionsgrad } \alpha = \Phi_a / \Phi$$

$$\text{Transmissionsgrad } \tau = \Phi_d / \Phi$$

wobei Φ dem auf den Körper treffenden Strahlungsfluss entspricht und die tiefgestellten Buchstaben dem jeweiligen Anteil. Üblicherweise hat man es mit undurchlässigen Körpern zu tun, für die gilt $\rho + \alpha = 1$, da die Summe den gesamten ankommenden Strahlenfluss darstellt.

Diese Werte sind jedoch idealisiert und treffen in der Praxis nicht zu. Grund dafür ist, dass das angestrahlte Objekt (Untergrund) nicht isotrop, das heißt in alle Richtungen gleich stark reflektiert. Ein solches Objekt würde man als *Lambertschen Strahler* bezeichnen. Vielmehr hängt der Wert der reflektierten Strahlung bei natürlichen Untergründen von der Betrachtungsrichtung und der Belichtungsrichtung (i. A. dem Sonnenstand) ab. Um diesen richtungsabhängigen Effekt zu berücksichtigen, verwendet man die sogenannte *bidirektionale Reflektanzverteilungsfunktion (BRDF)*. Die BRDF ist wellenlängenabhängig und beschreibt die Streuung des Lichts, das aus der Halbkugel einfällt und in eine andere Richtung der Halbkugel reflektiert wird. BRDF-Korrekturen müssen berücksichtigt werden, wenn Luftbilder, die zu unterschiedlichen Zeiten – und damit Sonnenständen – bzw. unterschiedlichen Flugrichtungen aufgenommen wurden, zu einem Bildverband zusammengefügt werden sollen (Sandau, 2005 S. 150). Es existieren mehrere Modelle für Reflektanzverteilungsfunktionen, konische und halbkugelförmige. Hierzu sei jedoch auf Fachliteratur verwiesen, zum Beispiel auf (Schaepman-Strub, et al., 2006).

2.3 EINFLUSS DER ATMOSPHÄRE AUF DIE ELEKTROMAGNETISCHE STRAHLUNG

Jede Strahlung, die vom Fernerkundungssensor empfangen wird hat zumindest einen Teil der Atmosphäre durchlaufen. Je nachdem, ob reflektierte Sonnenstrahlung empfangen wird oder ein Objekt mittels aktiver Verfahren künstlich beleuchtet wurde, hat die Atmosphäre mehr oder weniger Einfluss, den es zu berücksichtigen gilt. Während die Atmosphäre auf Mikrowellen keinen Einfluss hat („nicht dispersiv“ ist), gilt diese Aussage nicht für Licht. Wolken können von sichtbarem Licht und NIR bekanntermaßen nicht durchdrungen werden, weswegen für die Fernerkundung mittels Luftbilder ein (quasi-)wolkenloser Himmel gefordert werden muss.

Abgesehen davon erfährt Strahlung nach (Albertz, 2009 S. 14) auf ihrem Weg durch die Atmosphäre eine *Absorption* und *Streuung*. Unter Absorption versteht man die Energieumwandlung eines Teils der EMS in andere Formen wie zum Beispiel Wärme. Hauptverantwortlich für die Streuung sind kleinste Materialteilchen aus Dunst, Staub o. ä., die Teile der Strahlung nach allen Richtungen ablenken. Diese Materialteilchen werden *Aerosole* genannt. Je nach Wellenlänge der Strahlung und Größe der Aerosole erfährt die Strahlung eine mehr oder minder starke Streuung auf ihrem Weg durch die Atmosphäre. Absorption und Streuung bewirken also insgesamt eine Abschwächung der Strahlung sowie, dass zwei verschiedene Arten von Strahlung auf den Sensor auftreffen - das direkt reflektierte Sonnenlicht und das auf Grund der Atmosphäre diffus gestreute *Luftlicht*. Abb. 2 stellt die Situation anschaulich dar. Abgesehen von der Kontrastminderung kann Luftlicht auch eine Verschlechterung der automatischen Klassifizierungsmöglichkeiten bewirken.

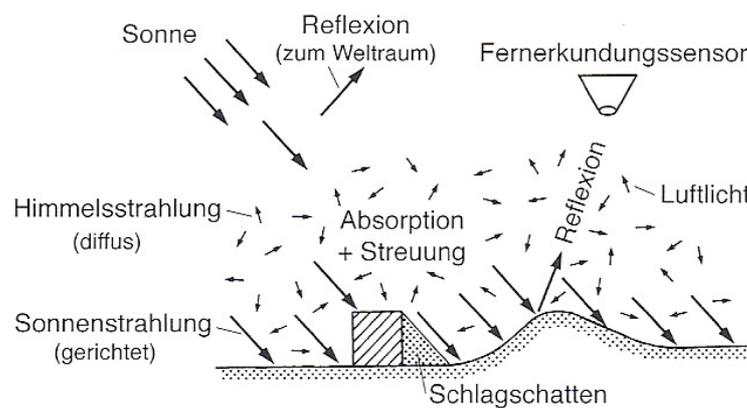


Abb. 2 Schematische Strahlungssituation nach (Albertz, 2009 S. 15)

2.4 BEDEUTUNG DES NAHEN INFRAROTBEREICHS

Wie bereits weiter oben erläutert werden Reflexionseigenschaften von Objekten und Körpern mit Hilfe des Reflexionsgrads ρ angegeben. Dieser Wert ist wellenlängenabhängig, daher spricht man üblicherweise vom spektralen Reflexionsgrad. Eine wesentliche Bedeutung in der Fernerkundung spielt die Tatsache, dass sichtbares Licht und NIR trotz ihrer ähnlichen Wellenlänge sehr unterschiedliche Reflexionseigenschaften aufweisen, die man sich zu Nutze macht. Grüne Pflanzen weisen auf Grund des in ihnen enthaltenen Chlorophylls in diesem Spektralbereich (ca. ab 750nm) einen deutlichen Anstieg des Reflexionsgrades (auf ca. 40-50%) auf. Demgegenüber beträgt die Absorption in diesem Wellenlängenbereich durch die Vegetation weniger als 10%. Unbewachsener Boden weist hingegen einen mehr oder weniger stetigen Verlauf auf.

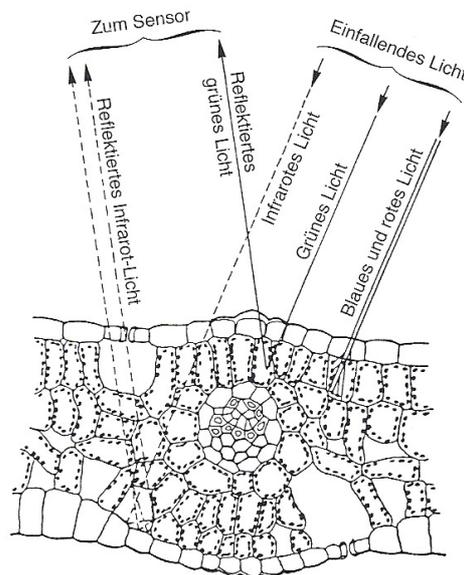


Abb. 3 Reflexionseigenschaften von grünen Blättern. Rotes und blaues Licht wird großteils absorbiert, grünes und IR hingegen reflektiert. Nach (Albertz, 2009 S. 19).

Dies ist der Grund warum uns Pflanzen grün erscheinen. NIR wird innerhalb der Pflanzen (an den Zellwänden) mehrfach gespiegelt und dadurch ebenfalls zu einem hohen Anteil reflektiert. Laut (Baldenhofer) reflektiert Chlorophyll im nahen Infrarot ungefähr sechsmal stärker als im sichtbaren Spektrum.

Mit Kenntnis dieser Eigenschaft ist es möglich, die Änderung des Chlorophyllgehalts im Laufe des Jahres zu beurteilen und Informationen über die Vitalität der Vegetation zu sammeln. Vereinfacht lässt sich sagen, „je stärker eine Pflanze im NIR-Bereich reflektiert, desto gesünder ist sie.“ Um die Vitalität vergleichbar zu machen bedient man sich der sogenannten *Vegetationsindices*, die aus den verschiedenen Spektralkanälen berechnet werden können.

Eine besondere Bedeutung kommt dabei dem *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)* zu, der sich folgendermaßen berechnet.

$$NDVI = \frac{(NIR-ROT)}{(NIR+ROT)} \quad (1.1)$$

Wie man an der Formel erkennen kann, werden damit Daten aus dem NIR-Bereich mit dem Rot-Bereich verknüpft, auf den die Vitalität der Vegetation keinen Einfluss hat. Die Normierung durch den Nenner bewirkt, dass der NDVI im Intervall von [-1; 1] definiert ist und Werte dadurch vergleichbar werden. Je geringer der NDVI, desto weniger Chlorophyll ist im angestrahlten Objekt vorhanden. Für Felsen, befestigte Bauwerke, Wüsten etc. ergeben sich daher sehr geringe, meist negative NDVI-Werte. Spärliche oder nicht vitale Vegetation erreicht oft einen NDVI um 0 oder knapp positiv. Dies erscheint einleuchtend, wenn man sich vor Augen führt, dass Felsen oder Bauwerke mit Moos, Kletterpflanzen oder Unkraut bewachsen sein können. Nach (NASA) „[...] hat kein grünes Blatt einen NDVI in der Nähe von 0. 0 bedeutet keine Vegetation.“ Je mehr sich der NDVI +1 nähert, desto gesünder und „grüner“ ist die beobachtete Vegetation. Bei unzureichender radiometrischer Qualität des vorliegenden Datenmaterials kann es auch bei eindeutiger Vegetation bzw. Nicht-Vegetation zu dazu kommen, dass die soeben getätigten Aussagen nicht zutreffen. Untersuchungen des NDVI und dessen Verhalten bei Vegetation bzw. Nicht-Vegetation sind Teil dieser Diplomarbeit.

2.5 GRUNDLAGEN DER BILDERFASSUNG

Bis vor einigen Jahren spielten *analoge Bilder* noch eine größere Rolle. Diese analogen Bilder entstehen, indem (elektromagnetische) Strahlung auf eine lichtempfindliche Schicht des Films trifft, der auch als Speichermedium dient. Die Vorteile dieser Methode sind die gleichzeitige flächenhafte Aufnahme sowie die Speicherung großer Datenmengen auf kleinem Raum bei geringen Kosten und die vielseitigen Möglichkeiten der Auswertung der fotografischen Bilder. Diesen Vorteilen stehen aber auch Nachteile gegenüber, denn die radiometrische Kalibrierung fotografischer Systeme ist schwierig und unsicher, außerdem ist der fotografisch erfassbare Spektralbereich begrenzt.

Heute wird die gesamte Luftbilderstellung ausschließlich digital durchgeführt. Als Speichermedium dient ein CCD-Sensor, der die Reflexion der Oberfläche aufzeichnet bzw. abbildet. Die *digitale Bilderfassung* hat den Vorteil, dass alle notwendigen Datentypen für die Weiterverarbeitung der Luftbilder auf einen PC direkt in einem Arbeitsgang zur Verfügung stehen. Das gesamte optisch nutzbare Spektrum kann also synchron ausgeschöpft werden.

Digitale Bilder enthalten sogenannte Bildelemente. Sie sind in einer Matrix angeordnet und werden als Pixel (vgl. **P**icture **x** **e**lement) bezeichnet. Geraden, Kreise oder andere Linien werden nicht mehr als Abfolge von Punkten dargestellt, sondern als zusammengesetztes treppenförmiges Band aus Pixeln. Die Pixelmatrix ist der Informationsträger. Je höher die geometrische und die radiometrische Auflösung sind, desto mehr Information kann ein Bild enthalten. Beide Faktoren hängen von der verwendeten Luftbildkamera ab.

2.5.1 GRAUWERTHISTOGRAMME

Ein (Luft-)Bild kann grafisch-quantitativ analysiert werden, indem das zugehörige Histogramm erstellt wird. Ein Häufigkeitshistogramm stellt in anschaulicher Form die Grauwertverteilung eines Bildes dar, d. h. es zeigt, wie oft die einzelnen Grauwerte in einer Szene vorkommen. Je nach Bildtiefe reicht demzufolge ein Histogramm von 0 (schwarz) bis 2^x (weiß) Grauwerten, wobei x der Bildtiefe in [Bit] entspricht. Oft überwiegen in den Original-Bilddaten die Grauwerte eines engen Bereichs, während andere mögliche Grauwerte gar nicht vorkommen. Dies ist bei einem kontrastarmen und somit schwer interpretierbaren Bild der Fall. (Albertz, 2009 S. 104) Das menschliche Auge hingegen erwartet ein ausgewogenes Bild, in dem der gesamte mögliche Grauwertbereich ja nach Bildinhalt so gut wie möglich abgedeckt ist. Durch Umrechnen der Grauwerte mittels einer *Transferfunktion* kann eine Kontrastverbesserung erreicht werden, die der spezifischen Empfindlichkeit des menschlichen Auges Rechnung trägt.

Um bei der Umsetzung der Transferfunktion Rechenzeit zu sparen, arbeitet man mit sogenannten *Look-Up Tables (LUT)*. Dabei werden für alle Grauwerte im Ausgangsbild die korrespondierenden Grauwerte nach der Grauwertveränderung berechnet und in einer Tabelle abgespeichert. Wenn eine Bildverarbeitung durchgeführt werden soll, muss man nur noch aus der Look-Up Table den gesuchten Grauwert entnehmen, eine Berechnung ist nicht mehr erforderlich. Mit Hilfe diverser Verfahren kann man also die Grauwertverteilung eines Bildes verändern und damit die Darstellung und Interpretierbarkeit verbessern.

In der Praxis wird häufig eine sogenannte *Streckung (stretching)* durchgeführt. Dabei wird der Grauwertbereich des gegebenen Bildes auf den gesamten verfügbaren Bereich gleichmäßig verteilt. Stretching ist nur möglich, wenn irgendwo im Grauwertebereich des Bildes keine Grauwerte vorhanden sind, zum Beispiel in der Nähe der Ränder. Es kommt dadurch ebenfalls zu Lücken im Grauwertverlauf. Die folgende Abbildung aus (Albertz, 2009 S. 105) zeigt die Veränderung eines Bildes durch Histogrammstretching.

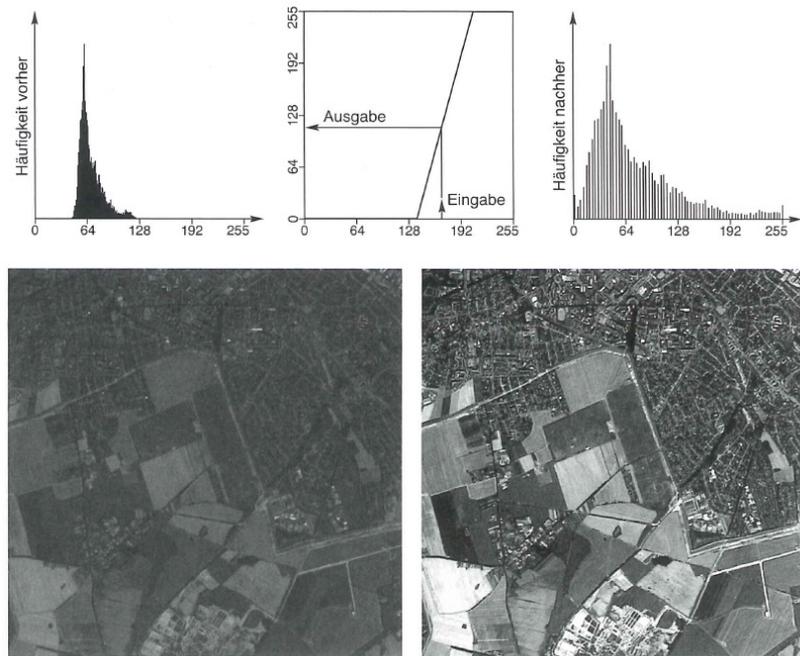


Abb. 4 Ursprüngliches Bild (l. u.) mit sehr engem Grauwertbereich und (r. u.) nach einer Grauwertanpassung, oben die zugehörigen Histogramme – Quelle: (Albertz, 2009 S. 105)

Auch bei der Analyse von digitalen Luftbildern bzw. DOPs können Histogramme hilfreich sein. Man erkennt, wie gut der vorhandene Grauwertbereich ausgenutzt ist und ob ein Stretching durchgeführt wurde. Um aus Histogrammen stichhaltige Informationen ableiten zu können braucht es einen geübten Bearbeiter. Nichtsdestotrotz helfen Histogramme dabei, die Bildinhalte und deren Kontraste zu interpretieren und Bilder miteinander zu vergleichen. Diese Diplomarbeit enthält keine Untersuchungen von Histogrammen. Durch Analysen im Bezug auf die radiometrische Qualität kann es unter Umständen möglich sein, hilfreiche Aussagen über den Bildinhalt zu treffen und eine Beurteilung durchzuführen. Siehe dazu Kapitel 6.3 und 8.

2.6 GEOMETRISCHE AUFLÖSUNG

Das geometrische Auflösungsvermögen beschreibt inwieweit zwei getrennte Objekte auch getrennt wahrgenommen werden können. Traditionellerweise betrachtet man Schwarz-Weiß-Balkenmuster mit verschiedenen Balkenbreiten und drückt das Auflösungsvermögen in „Linienpaaren pro Längeneinheit“ (manchmal auch Linien pro Längeneinheit) aus, bezogen auf jene Balkenbreite, die gerade noch als getrenntes Linienpaar wahrgenommen werden kann. Eine etwas umfassendere Aussage erhält man durch die Angabe der Kontrasttransferfunktion (auch auch Modulationstransferfunktion (MTF)), welche auch noch den Kontrast zwischen hellen und dunklen Balken berücksichtigt, und zwar für alle Balkenbreiten.

In digitalen Bildern ist das Auflösungsvermögen durch das Abtasttheorem gegeben, welches besagt, dass nur solche Balkenpaare wiedergegeben werden können, deren Breite größer als die doppelte Pixelausdehnung ist. Das Auflösungsvermögen wäre somit 2-mal die Pixelausdehnung. Weil die

Pixelausdehnung das Auflösungsvermögen eines jeden digitalen Bildes bestimmt, hat man sich zur Gewohnheit gemacht, die Pixelausdehnung (oft auch als Pixelgröße bezeichnet) als Maß für die Auslösung zu verwenden. Dies erscheint sinnvoll, denn je kleiner die Pixel, desto differenzierter können Details der aufgenommenen Szene dargestellt werden. Digitale Luftbildkameras haben eine physische Pixelgröße, d.h. die Größe eines Sensorelements und gleichzeitig Abstand eines Sensorelements von dessen Nachbarn, von 5-7 μm . Projiziert auf das aufgenommene Objekt ergeben sich eine Pixelgröße, die als Sensor-Footprint bezeichnet wird, und ein Pixelabstand, der als Ground Sampling Distance (GSD) bezeichnet wird. Vereinfacht wird angenommen, dass Footprint und GSD immer identisch sind, und daher wird die GSD oft auch als Maß für die Auflösung am Objekt herangezogen. Welche Auflösung am Objekt tatsächlich gilt, hängt aber nicht nur von den geometrischen Verhältnissen in der Kamera und von den Sensor-Element-Größen ab, sondern noch von der Abbildequalität des optischen Systems, von den atmosphärischen Bedingungen und natürlich auch noch von Verarbeitungsprozessen, die im Kamerasystem durchgeführt werden, bevor die Bildmatrix für die weitere Nutzung zur Verfügung steht. Gängige Werte für die GSD bei Luftbildern liegen bei 15-25 cm, wobei die GSD von Flughöhe, Gelände und verwendeter Luftbildkamera abhängig ist.

2.7 RADIOMETRISCHE ASPEKTE

Neben den geometrischen Beziehungen zwischen Bilddaten und Objekt bestehen auch physikalische Zusammenhänge, die man unter dem Begriff *Radiometrie* zusammenfasst. Nach (Honkavaara, et al., 2009 S. 581) und (Honkavaara, 2008) bedeutet

„... Radiometrie die Messung von Strahlung. Ein digitaler Sensor misst eintreffende Strahlung und speichert die Werte als digitale Zahl. Zwei zentrale Prozesse in der Bildentstehung sind der Strahlungstransfer vom Objekt in das (Kamera-, Anm.) System und die Umwandlung von Strahlung, die im System eintrifft in digitale Nummern innerhalb des Systems.“

Als Folge der bei der Bildentstehung bestehenden Intensität und der spektralen Zusammensetzung der elektromagnetischen Strahlung ergeben sich *radiometrische Eigenschaften*, die ein Bild kennzeichnen.

2.7.1 RADIOMETRISCHE AUFLÖSUNG (BILDTIEFE)

Unter radiometrischer Auflösung versteht man die Anzahl der Grauwerte, die vom Sensor unterschieden werden können und durch die ein Bild in weiterer Folge dargestellt wird, man sagt auch *Bildtiefe oder Wertebereich*. Ein häufig angewandter Wertebereich sind 8 Bit pro Farbkanal. Dies bedeutet, dass die Bildinformation mit 256 Grauwerten dargestellt wird (2^8 Bitkombinationen entspricht 256 Zuständen). Das menschliche Auge kann etwa 50 Abstufungen differenzieren, daher liegt der Wertebereich von 0-255 deutlich über dem Differenzierungsvermögen des menschlichen Auges. Ein Grauwert von 0 wird als schwarz und ein Grauwert von 255 als weiß interpretiert. Auch

Computermonitore können oft nur 8 Bit pro Farbkanal darstellen, was für die täglichen Anwendungen ausreichend ist.

Digitale Luftbilder stellen jedoch spezialisierte Produkte dar, an die höhere Anforderungen gestellt werden. Aus diesem Grund zeichnen Luftbildkameras oft mit deutlich höherer radiometrischer Auflösung von 12 ($2^{12} = 4096$ Werte) oder sogar 14 Bit ($2^{14} = 16384$ Werte) auf. Eine Gruppe von 8 Bit wird zusammengefasst zu einem Byte. Bilder, die mehr als 8 Bit (1 Byte) Bildtiefe haben, werden daher als 16 Bit Bild ($2^{16} = 65.536$ Werte = 2 Byte) gespeichert. Es kann so die gesamte Information der aufgezeichneten Szene erhalten bleiben. Die 16 Bit sind dann zwar nicht „ganz ausgefüllt“, dies bedeutet jedoch keinerlei Nachteil. Der Vorteil von 16 Bit Luftbildern ist der, dass bei Transformationen bzw. Histogrammoperationen ein wesentlich breiterer Wertebereich zur Verfügung steht. Die Wahrscheinlichkeit, dass es zu Stauchungen kommt ist also sehr gering und eine harmonisch verlaufende Grauwertanpassung wird möglich. Der Nachteil dieser Bildtiefe besteht im um den Faktor 2 größeren Bedarf an Speicherplatz. Während ein (reduziertes) 8 Bit PAN-Luftbild eine Größe von ca. 200 MB hat, so braucht ein 16 Bit (Original-) PAN-Luftbild ca. 400 MB des vorhandenen Speicherplatzes. Orthophotomosaik weisen üblicherweise eine Bildtiefe von 8Bit auf, daher wurde auch im Zuge dieser Arbeit ausschließlich mit 8Bit-Testdaten gearbeitet. In Kapitel 8 wird darauf hingewiesen, dass durch aufbauende Untersuchungen mit 16 Bit-Daten weitere Informationen zur Beurteilung von digitalen Orthophotos gewonnen werden könnten.

2.7.2 RADIOMETRISCHE KALIBRIERUNG

Nach (Honkavaara, et al., 2009 S. 584) legt die *radiometrische Kalibrierung* die radiometrischen Eigenschaften eines Messsystems fest, sodass kalibrierte Sensorsysteme vergleichbare Ergebnisse liefern, idealerweise unabhängig vom Aufnahmesystem. Man unterscheidet zwischen absoluter und relativer Kalibrierung. Erste bestimmt für jeden Kanal das Modell und die Parameter, um die DN in Strahlungseinheiten umzurechnen, demgegenüber gewährleistet die relative Kalibrierung eine homogene und einheitliche Bildentstehung über die gesamte Sensorfläche. Radiometrische Kalibrierung kann auf verschiedene Arten erfolgen, so zum Beispiel unter idealisierten Bedingungen im Labor oder „on the fly“ nach dem Überflug über ein Testfeld. Jede Methode hat ihre Vor- und Nachteile, dafür sei jedoch auf weiterführende Literatur wie (Honkavaara, 2008), (Honkavaara, et al., 2009), (Ryan, et al., 2009) verwiesen.

2.7.2.1 DSNU und PRNU

DSNU- (*Dark Signal Non-Uniformity, Dunkelsignalungleichförmigkeit*) und PRNU- (*Photo Response Non-Uniformity, Empfindlichkeitsungleichförmigkeit*) werden als Festmusterrauschen bezeichnet und sollen hier kurz erwähnt werden. Wie bei Parametern der radiometrischen Kalibrierung üblich werden auch sie kameraintern unmittelbar nach der Bildaufnahme angebracht. Daten, an denen bereits die kamerainterne Korrektur der radiometrischen Kalibrierung angebracht wurde, die abgesehen davon aber noch unprozessiert sind, werden als *Level-02 Daten* bezeichnet. Das sogenannte Festmusterrauschen von Zeilen- und Flächensensoren wird nach (Sandau, 2005 S. 96)

und (Beisl, 2006) durch Ungleichförmigkeit der CCD-Elemente verursacht und kann mittels Systemkorrektur behoben werden.

Unter *Dark Signal Non-Uniformity* versteht man, dass ein Signal vom CCD-Sensor produziert wird, obwohl kein Licht einfällt. Die Stärke dieses Signals ist abhängig von Temperatur, Integrationszeit und Pixelposition. Durch künstliche Kühlung wird der Sensor auf konstanter Temperatur gehalten. Die Abhängigkeit der Integrationszeit wird mit Hilfe einer Kontrollschleife von künstlich abgedunkelten Pixeln eliminiert und für jedes Pixel wird ein individueller Korrekturwert berechnet und vom Signal abgezogen.

Die *Photo Response Non-Uniformity* kommt durch herstellungsbedingte, unterschiedliche Pixelabmessungen bzw. unterschiedliche Lichtempfindlichkeit der Pixel zustande. Es entsteht dadurch ein Randlichtabfall. Zur Behebung wird für jedes Pixel aus dem Verhältnis von Maximalwert zu tatsächlichem Pixelwert ein Korrekturwert berechnet.

Sowohl DSNU als auch PRNU sind zeitlich konstant, weshalb eine Korrektur der Effekte möglich ist. Da im Voraus im Labor Korrekturwerte berechnet werden, zählen diese beiden Phänomene zur *radiometrischen Kalibrierung*.

2.8 SPEKTRALE AUFLÖSUNG

Eine weitere wichtige Kenngröße von Fernerkundungsdaten stellt die *spektrale Auflösung* dar. Sie wird durch die Anzahl der Spektralkanäle und deren jeweiliger Bandbreite bestimmt. Mit ihr können Unterschiede in der Reflexionscharakteristik verschiedener Oberflächen erfasst werden.

Um die spektrale Auflösung bestimmen zu können, ist eine spektrale Kalibrierung notwendig, mit der die Abhängigkeit der Messwerte von der Wellenlänge der detektierten Strahlung erfasst wird (Albertz, 2009 S. 81). Werden keine speziellen Maßnahmen getroffen, lässt der CCD-Sensor gewöhnlich breitbandige Strahlung hindurch, wie es beim panchromatischen Kanal der Fall ist. Ein CCD-Sensor kann Strahlung im gesamten visuellen und im nahen Infrarotbereich bis zu ca. $1\mu\text{m}$ detektieren. Werden spezielle Filter angewendet, kann man den Spektralbereich stark verkleinern, sodass der Sensor nur noch für bestimmte Wellenlängen empfindlich ist. Je enger der Wellenlängenbereich, desto höher die spektrale Auflösung.

Bei digitalen Luftbildkameras wird zwischen Multispektralkameras und Hyperspektralkameras unterschieden. Erstere zeichnen Daten in mehr als einem Kanal auf (z.B. RGBI + panchromatisch), wohingegen man von Hyperspektralsensoren spricht, wenn sehr viele (ab ca. 20 bzw. bis zu 100 und mehr) sehr schmalbandige Kanäle vorhanden sind. (Sandau, 2005 S. 96 f) Die Breite eines Spektralkanals darf nicht beliebig verkleinert werden, da mit sinkender Kanalbreite auch die zu messende Strahlungsleistung abnimmt und damit das Signal-Rausch-Verhältnis gegen 0 ginge.

Wird nur ein einzelner Spektralkanal dargestellt, erscheint er als schwarzweiß Bild. Da die Kanäle zwar identische Geometrie, aber unterschiedliche Radiometrie aufweisen, ist es möglich, sie mittels additiver Farbmischung des Rot-, Grün- und Blaukanals zu einem Echtfarbbild zu kombinieren. Die Zuordnung der Spektralkanäle ist frei wählbar, daher können auch Bilder mit anderen

Kanalkombinationen erzeugt werden. (Albertz, 2009 S. 112). Der NIR-Kanal kann in ähnlicher Weise dargestellt werden wie die R-, G-, B-Kanäle. Diese ebenfalls dreikanalige Darstellung nennt man CIR (Color- Infrarot)-Bild, bestehend aus einer Kombination des NIR-Kanals, des Rotkanals und des Grünkanals. Das Ergebnis ist ein Falschfarbbild in dem der NIR-Kanal visualisiert wird. In dieser Arbeit wird ab hier die Kombination des R-, G-, und B- Kanals, also das Echtfarbbild, als *RGB-Bereich* bezeichnet. *NIR-Bereich* bezeichnet den Infrarotkanal bzw. dessen Visualisierung als CIR-Bild.

2.9 PANSHARPENING

Wie bereits erwähnt erfassen moderne, digitale Luftbildkameras das aufgenommene Objekt in verschiedenen Kanälen mit unterschiedlichen Eigenschaften. Die unterschiedlichen Kanäle weisen jeweils Vor- und Nachteile auf, sodass in der Nachbearbeitung der Daten oft eine Kombination der Informationen angestrebt wird um das bestmögliche Bildprodukt zu erhalten. Einer der wesentlichsten Schritte in der Bearbeitung digitaler Luftbilddaten von Flächenkameras stellt das sogenannte *Pansharpening* dar (auch „resolution merge“ genannt). Darunter versteht man die Kombination des hochauflösenden, jedoch schwarzweißen panchromatischen Kanals mit den geringer auflösenden, multispektralen Kanälen. Voraussetzung für die Kombination ist, dass die Daten dieselbe Bildgeometrie aufweisen, also den gleichen Bildinhalt haben (Albertz, 2009 S. 119). Das Ergebnis ist ein Bild mit der hohen räumlichen Auflösung des PAN-Kanals mit der Farbinformation der Multispektralkanäle, also im Prinzip ein Farbbild mit hoher Auflösung und gutem Kontrast.

Da beim Pansharpening die spektralen Informationen verschiedener Kanäle fusioniert werden, bewirkt dies auch eine Veränderung der radiometrischen Eigenschaften. Im Laufe der Zeit wurden mehrere Methoden für das Pansharpening entwickelt, sowohl für hyperspektrale Satellitendaten als auch für multispektrale Luftbilddaten. Eine der gängigsten Algorithmen für das Pansharpening ist die IHS-Methode. Dabei werden die Multispektraldaten in den I, H, S-Bereich (Intensity, Hue, Saturation – Intensität, Farbton, Sättigung) transformiert und der Intensitätskanal, der der durchschnittlichen Helligkeitsinformation entsprechen sollte, dann durch den panchromatischen Kanal ersetzt. Durch Rücktransformation vom PAN, H, S in den RGB Farbraum erhält man das verbesserte Bild. Abb. 5 zeigt schematisch den Vorgang der IHS-Methode.

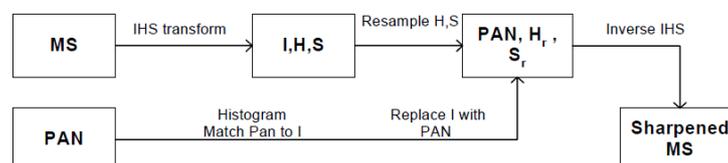


Abb. 5 Workflow Diagramm der IHS Transformation – Quelle: (Vijayaraj, 2004)

Je nach verwendeter Methode werden die Grauwerte verändert. Dies kann sich negativ auf weitere digitale Auswertungen (z.B. Klassifizierung) auswirken, bei denen die ursprünglichen Grauwerte so weit wie möglich erhalten bleiben sollen, ermöglicht hingegen eine zuverlässige visuelle Interpretation bei hohem Kontrast. Je nach Anforderung an das Ergebnis mag also eine andere

Methode des Pansharpenings zielführend sein. In (Hirschmugl, et al., 2005) werden verschiedene Pansharpening-Methoden für Daten der UltraCam-D (UC-D) getestet, und deren Eigenschaften untersucht.

Die Kriterien für die Untersuchung bei (Hirschmugl, et al., 2005) waren einerseits die visuellen Interpretationsmöglichkeiten und andererseits der Erhalt der Grauwerte. Es hat sich dabei gezeigt, dass vor allem eine Fusionierung des PAN-Kanals mit dem NIR-Kanal erschwert ist, wenn bei der Bilderfassung keine spektrale Überdeckung der Kanäle herrscht. Folgende Abbildungen zeigen die spektrale Empfindlichkeit der UC-Eagle.

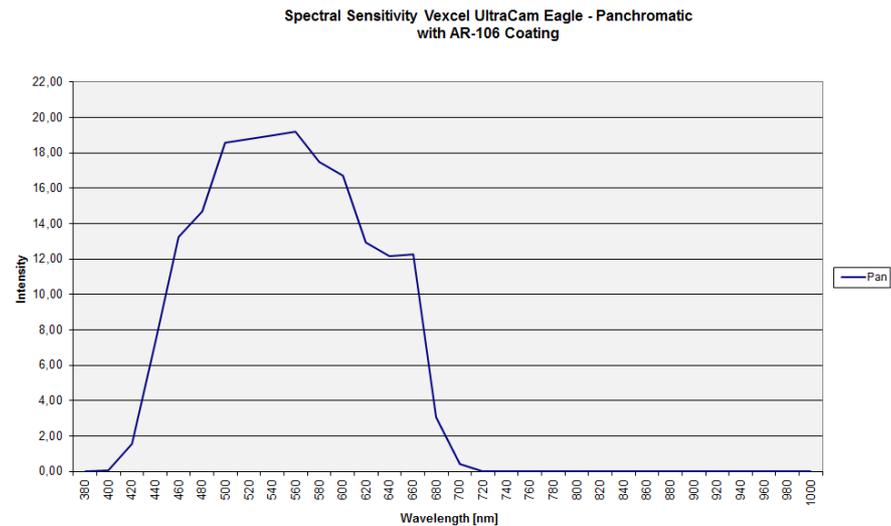


Abb. 6 Spektrale Empfindlichkeit der UC Eagle für den Panchromatischen Kanal –
Quelle: (Vexcel Imaging, 2012)

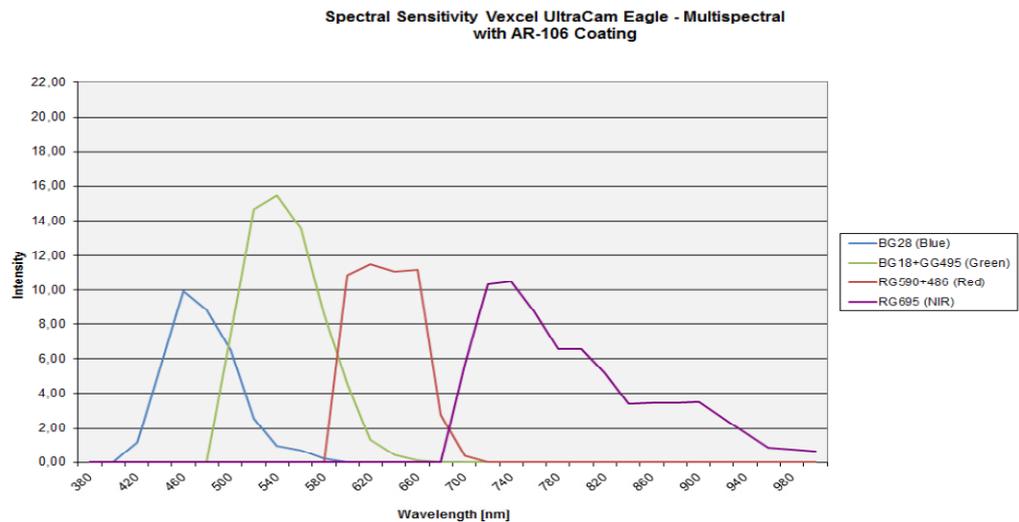


Abb. 7 Spektrale Empfindlichkeit der UC Eagle für die multispektralen Kanäle –
Quelle: (Vexcel Imaging, 2012)

Wie man sieht, reicht der PAN-Kanal der UC-D bis zu einer Wellenlänge ca. 690nm, wo der NIR-Kanal erst beginnt. Auf Grund dessen ergibt sich für UC-Daten eine schlechte Korrelation zwischen diesen beiden Kanälen, was dazu führt, dass die spektralen Intensitäten der Farbkanäle nach dem

Pansharpening nicht mehr den original aufgenommenen entsprechen. In Abb. 8 sind die Korrelationen der UC Multispektralkanäle mit dem PAN-Kanal an Hand eines Scattergramms dargestellt. Am Verlauf von links unten nach rechts oben ist die positive Korrelation zwischen dem Grün-Kanal und dem PAN-Kanal gut zu erkennen. Im Gegensatz dazu herrscht zwischen dem NIR-Kanal und dem PAN-Kanal keine eindeutige Korrelation. Pansharpening wird üblicherweise auf Level-02 Daten angewandt. Nach dem Pansharpening bezeichnet man die Daten als Level-03 Daten¹.

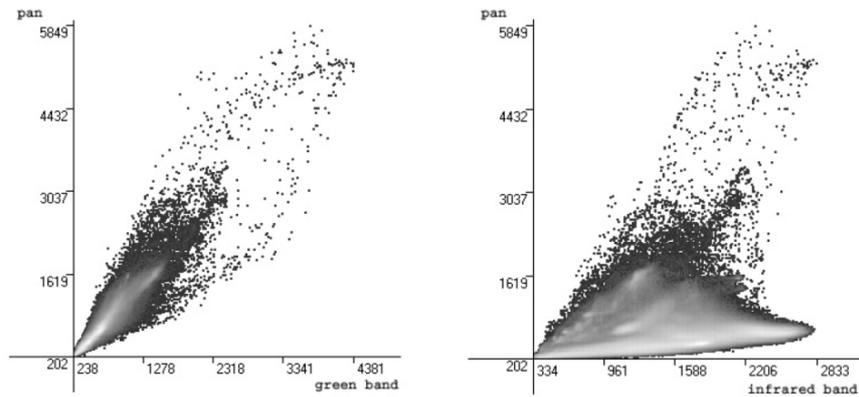


Abb. 8 Scattergramm zwischen MS Daten und PAN-Kanal. Links: Korrelation zw. PAN und Grünkanal (stellvertretend für alle drei Kanäle des sichtbaren Lichts) Rechts: Korrelation zw. PAN und NIR-Kanal - aus (Hirschmugl, et al., 2005)

¹ In 2.7.2.1 wird erklärt, was Level-02 Daten sind. In dieser Arbeit werden jene Daten als Level-03 verstanden, bei denen ein Pansharpening durchgeführt wurde. Es konnte nicht mit Sicherheit geklärt werden, ob weitere Bearbeitungsschritte zwischen Level-02 und Level-03 Daten liegen bzw. ob es für Luftbilddaten eine klare Definition an sich gibt.

3 FLUGPLANUNG UND DURCHFÜHRUNG DES AUFNAHMEVORGANGES

Ein wichtiger Aspekt bei der flugzeuggestützten Luftbildaufnahme ist die Flugplanung, da mehrere Voraussetzungen für einen erfolgreichen Bildflug erfüllt sein müssen.

Grundsätzlich sind im Vorfeld folgende wesentliche Aspekte zu klären:

- Welches Aufnahmesystem soll eingesetzt werden? Flächen- oder Zeilenkamera?
- Welche Genauigkeiten müssen eingehalten werden?
- Welche Spektralkanäle sollen aufgezeichnet werden?
- Mit welcher Frequenz arbeiten GPS und IMU (Inertial Measurement Unit)?
- Wie wird die äußere Orientierung bestimmt?
- Welches Referenzsystem wird verwendet?
- Welche Überlappung der Luftbilder muss eingehalten werden?

Um eine Stereoauswertung und eine Aerotriangulation durchführen zu können, müssen sich die Luftbilder innerhalb eines Flugstreifens und zwischen zwei Parallelstreifen überlappen. Jeder Punkt ist in zwei Luftbildern enthalten, wenn eine Längsüberlappung von mindestens 50-60% erfüllt ist. Oft wird auch bis zu 80% gefordert. Der Abstand zwischen den Flugstreifen ist abhängig von der vorgegebenen Querüberlappung. Ein gängiger Wert hierfür liegt bei ca. 40%. Bei Zeilenkameras wird keine Längsüberdeckung angegeben, die Querüberlappung liegt bei ca. 30%. Entscheidende Faktoren für die Überlappung sind die Fluggeschwindigkeit und die Bildwiederholungsrate (Koukal, et al., 2012 S. 9). Die Bildflugsituation für Flächenkameras ist in Abb. 9 dargestellt.

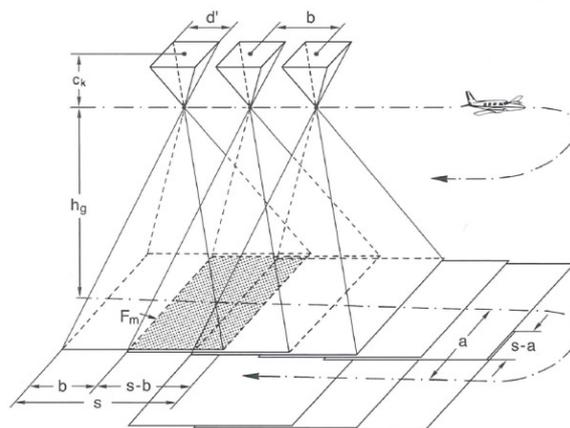


Abb. 9 Schematische Darstellung eines Bildfluges. Gut erkennbar ist die Längs- und Querüberlappung der erfassten Bildbereiche - (Albertz, 2009 S. 38)

Die Längsüberdeckung ergibt sich aus der Differenz der Bildseite im Gelände s und der Basis b . Die Fläche F_m ist damit in zwei aufeinanderfolgenden Bildern abgebildet. Da man während eines Fluges speziell in Österreich oft Täler und Gebirge überfliegt, sollte man die Längs- und Querüberdeckungen stets für die höchsten Geländebereiche planen, da so in ebenen Gebieten eine größere Überdeckung erreicht wird. Auf Grund diverser technischer Hilfsmittel wie GPS und IMU ist es mit verhältnismäßig

geringem Aufwand möglich, Bildflüge zu planen und präzise durchzuführen (Albertz, 2009 S. 37 f.). Die aktuelle Position kann mit GPS permanent erfasst und so Abweichungen von der Soll-Trajektorie korrigiert werden. Die IMU, bestehend aus Neigungs- und Beschleunigungssensoren, zeichnet die kurzperiodischen Bewegungen des Flugzeugs auf (Roll-, Nick, Gierwinkel), sodass die äußere Orientierung für die Luftbilder sehr genau berechnet werden kann. Idealerweise bilden zwei aufeinanderfolgende Bildhälften einen „Normalfall der Zweibildauswertung“. In der Praxis hängt die tatsächliche Aufnahmekonfiguration jedoch von vielen Faktoren ab (tatsächliche Flughöhe, Verdrehungen des Flugzeugs, Abweichung von der geplanten Flugbahn, etc.), sodass man von einem genäherten Normalfall sprechen sollte, bei dem die Bedingung einer Senkrechtaufnahme nicht exakt erfüllt ist (Kraus, 2004 S. 144 f). Soll beim Bildflug eine (Drei-) Zeilenkamera eingesetzt werden ist zusätzlich zu den erwähnten Faktoren noch die Fluggeschwindigkeit zu beachten.

Um einen Bildflug erfolgreich durchführen zu können, müssen darüber hinaus gute meteorologische Voraussetzungen vorliegen. Es sollte wolkenlos sein, da diese Schatten werfen und die auf den Sensor einfallende Strahlung beeinflussen. Regentropfen, Dunst und Nebel haben eine ablenkende Wirkung auf die Strahlenwege, sodass nur bei trockenem Wetter geflogen werden kann. Weitere wichtige Faktoren für die Flugplanung bilden die Wahl der Flughöhe und des Bildmaßstabs (Verhältnis Bildstrecke : Geländestrecke) sowie die Wahl der Jahreszeit und der Tageszeit der Befliegung. *Flughöhe und Bildmaßstab* bestimmen die erreichbare Auflösung (GSD) und damit in weiterer Folge die erreichbare Genauigkeit für Folgeprodukte. *Jahreszeitliche Veränderungen* der Landschaften dürfen ebenfalls nicht außer Acht gelassen werden. Im Winter hat man üblicherweise die beste Bodensicht, da die Vegetation blattlos ist. Dennoch werden Luftbildflüge häufig von Mai bis September durchgeführt, da in dieser Jahreszeit die Wahrscheinlichkeit für gutes Flugwetter am höchsten ist und die Vitalität der Vegetation mit Hilfe des NDVI erfasst werden kann. Die *Tageszeit* bestimmt durch den Sonnenstand in bedeutender Weise die Beleuchtungsverhältnisse. Vom späten Vormittag bis zum frühen Nachmittag ist der Sonnenstand relativ hoch, bei geringer Elevation ist hingegen mit langem Schattenwurf zu rechnen, was sich negativ auf die Qualität der Bilder auswirkt. Durch die Veränderung des Sonnenstands kommt es außerdem zu Helligkeitsunterschieden in den Flugstreifen, die durch Nachbearbeitung ausgeglichen werden müssen.

3.1 AUFNAHMESYSTEME FÜR DIE DIGITALE LUFTBILDERFASSUNG

Während bei der herkömmlichen Fotografie jeweils ein Gesamtbild einer größeren Geländefläche gewonnen wird, beobachten digitale Aufnahmesysteme nur kleine Flächenelemente. Die CCD-Sensoren enthalten für jeden Bildpunkt einen Photosensor. Durch Belichtung (d. h. Auftreffen von Photonen) werden Ladungen erzeugt, die eine Bildzeile in Form eines digitalen Signals ergeben (Albertz, 2009 S. 46). Durch optische Systeme wird die Reflexion in Spektralbereiche getrennt, mittels der Kombination unterschiedlicher Farbkanäle kann ein Mehrkanal-Bild erzeugt werden. Das Hauptziel aller Aufnahmesysteme besteht darin, dass gleiche Objekte und Oberflächen in verschiedenen Luftaufnahmen die gleichen radiometrischen Eigenschaften aufweisen. Dies ist idealisiert der Fall, wenn unter gleichen Aufnahmebedingungen Strahlungsintensitäten gleicher Objekte die gleichen Intensitäten am Sensor aufweisen.

Bei digitalen Aufnahmesystemen wird unterschieden zwischen Einzel- vs. Mehrkopfaufbau, Großformat- vs. Kleinformatkameras, Multi- vs. Hyperspektralsensoren (vgl. 2.8) und aktiven vs. passiven (vgl. 2.1) Systemen. Das wichtigste Unterscheidungsmerkmal ist jedoch die Anordnung der CCD-Sensoren in Zeilen- und Matrixkameras.

3.1.1 FLÄCHENKAMERAS

Die CCD-Sensoren sind bei diesen Luftbildkameras flächig in einer Matrix angeordnet, daher ist auch der Begriff Matrixkameras gebräuchlich. Wie bei analogen Luftbildern entstehen rechteckige, zentralperspektivische Aufnahmen mit einer Anordnung der Pixel in Zeilen und Spalten (vgl. 2.5). Während bei analogen Luftbildern das Bildkoordinatensystem durch die Bildrahmenmarken bestimmt wird, sind bei digitalen Luftbildern für die Bildorientierung Informationen über die Matrixgröße (Sensorgröße), die Anzahl der Pixel in x- und y-Richtung oder die Pixelgröße erforderlich. (Koukal, et al., 2012 S. 17 f).

Flächenkameras bilden oft eine Kombination von Sensorarrays mit mehreren Objektiven, um die verschiedenen Spektralkanäle erfassen zu können (Mehrkopfaufbau) Multispektrale Bilder mit geringerer Auflösung werden in einem anderen Sensor erfasst als das PAN Bild. Hochauflösende farbige Bilder werden dann mit Hilfe des *Pansharpenings* (vgl. 2.9) erzeugt (Albertz, 2009 S. 50 f). Die *UltraCam*[®] von Vexcel Imaging/Microsoft und die *DMC*[®] (Digital Mapping Camera) von Z/I stellen zwei Vertreter von Flächenkameras dar. Im Zuge dieser Diplomarbeit wurden ausschließlich Daten von Flächenkameras verwendet.

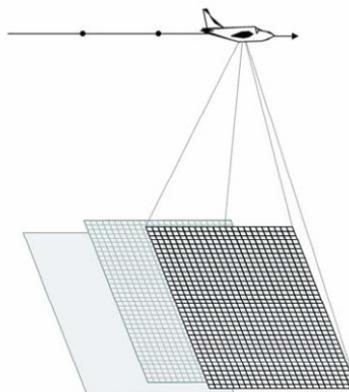


Abb. 10 Aufnahmeschema einer Flächenkamera – Quelle: (Koukal, et al., 2012)

3.1.2 ZEILENKAMERAS

Obwohl Zeilenkameras in dieser Arbeit keine weitere Rolle spielen werden, sei an dieser Stelle der Vollständigkeit halber ihr Funktionsprinzip erläutert.

Bei Zeilenkameras entsteht das Bild durch zeilenweise angeordnete CCD-Sensoren. Zur Bildaufnahme von Flugzeugen oder Satelliten aus werden CCD-Sensoren quer zur Flugrichtung in der Bildebene eines Objektivs angeordnet. Durch die Eigenbewegung der Aufnahmeplattform (Fortbewegung des Flugzeugs) werden alle Pixel einer Zeile quer zur Flugrichtung gleichzeitig erfasst. Ein beliebig langer, und konstant breiter Geländestreifen wird dadurch zeilenweise abgebildet und kann später zusammengefügt werden.

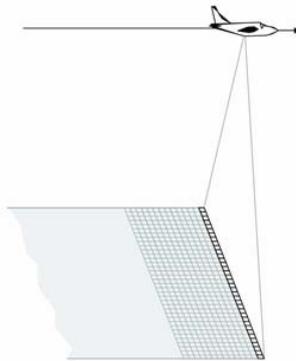


Abb. 11 Aufnahmeschema einer Zeilenkamera – Quelle: (Koukal, et al., 2012)

Die hochgenaue Aufzeichnung der sechs Orientierungsparameter ($x, y, z, \omega, \varphi, \kappa$) mit GPS und IMU ist zwingend erforderlich, da sich die äußere Orientierung von Zeile zu Zeile ändert. Üblicherweise werden Drei- oder Mehrzeilenkameras eingesetzt, deren Aufnahme durch geneigte Objektive in Rückblick, Nadirblick und Vorblick eingeteilt werden kann. Nach der Zeilenkorrektur auf Grund der Änderung der äußeren Orientierung liegen die Bildstreifen in einer zentralperspektivischen Abbildung quer zur Flugrichtung vor. (Koukal, et al., 2012 S. 6) Die Stereofähigkeit wird durch die konvergente Anordnung der Bildzeilen gewährleistet. Die ADS® (Airborne Digital Sensor), die in Zusammenarbeit von LH Systems und dem DLR entwickelt wurde, ist eine Zeilenkamera, um nur einen Vertreter zu nennen.

4 ORTHOPHOTOS

Luftbilder geben die Landschaft auf Grund der Zentralprojektion und auf Grund von unterschiedlichen Geländehöhen verzerrt wieder. Im Gegensatz zu Landkarten hat dies den Nachteil, dass es nicht möglich ist, Distanzen oder Geometrien zu messen. Oft ist es daher erforderlich, Luftbilder geometrisch zu korrigieren und das Luftbild auf ein vorgegebenes Koordinatensystem einzupassen. (Koukal, et al., 2012 S. 33 f) Orthophotos bieten dem Nutzer solche geometrisch korrekten, kartengleichen Abbildungen der Landschaft im Sinne einer orthogonalen Parallelprojektion.

4.1 ORTHOPHOTOERSTELLUNG

Der quadratische Raster, der dem Orthophoto zugrunde liegt, entspricht dem verzerrungsfreien, längentreuen Abbild der Erdoberfläche. In Abb. 12 ist das natürliche Gelände in einem XY-Raster dargestellt, dessen Höheninformationen mittels Z-Koordinaten visualisiert sind.

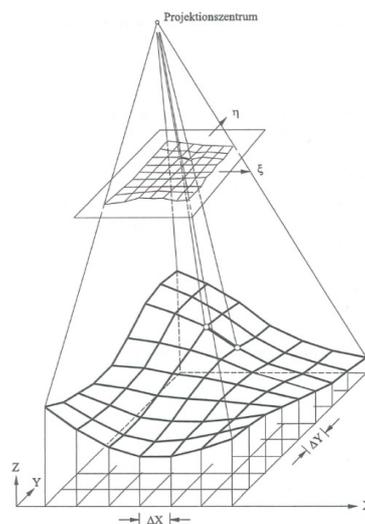


Abb. 12 Darstellung des Entzerrungsvorgangs von der Bildebene (ξ, η) zur regelmäßigen Rasterebene (X, Y) – Quelle: (Kraus, 2004 S. 412)

Die Verzerrungen werden rechnerisch eliminiert, indem der Zentralprojektion ein Höhenmodell des aufgenommenen Gebiets zugrunde gelegt wird. Zur Orthophotoberechnung können nach (Koukal, et al., 2012 S. 33) zwei unterschiedliche Arten von Höhenmodellen herangezogen werden:

1. Das digitale Geländemodell (DGM) beschreibt die Höhe des Erdbodens (Gelände) ohne Gebäude oder Vegetation.
2. Das digitale Oberflächenmodell (DOM) beschreibt die Höhe der Erdoberfläche einschließlich aller natürlichen und künstlichen Objekte wie z. B. Vegetation und Gebäude.

Zusätzlich müssen die drei Parameter der inneren sowie die sechs Parameter der äußeren Orientierung bekannt sein. Das Ergebnis ist ein digitales Orthophoto, also ein maßstäbliches Luftbild mit kartengleicher Parallelprojektion. Es sei jedoch erwähnt, dass je nach verwendetem Höhenmodell bei der Erstellung von Orthophotos immer einen Kompromiss zu treffen ist zwischen Lagegenauigkeit und dem Verlust von Bildtextur.

4.1.1 BERECHNUNG VON ORTHOPHOTOS

Der Übergang vom verzerrten Eingangsbild mit den Bildkoordinaten (ξ, η) zum entzerrten Orthophoto mit den zugehörigen Koordinaten (X, Y) gelingt mit Hilfe der Kollinearitätsgleichungen. Für eine detaillierte Herleitung des Formalapparats sei auf (Kraus, 2004 S. 20 f) verwiesen.

Grundsätzlich gibt es zwei Verfahren um die Herstellung von Orthophotos zu bewerkstelligen – das direkte und das indirekte Verfahren. Beim direkten Verfahren können jedoch Lücken im Orthophoto entstehen, daher bietet es eine geringere Qualität und wird hier nicht näher ausgeführt.

Bei der indirekten Weise wird in der späteren Orthophotoebene eine leere, regelmäßige Bildmatrix initialisiert, deren korrespondierende Punkte im Ausgangs-Luftbild berechnet werden. Die (X, Y) - Ebene entspricht der Orthophotoebene. Eine gängige Rasterweite beträgt 20x20cm für Luftbilddaten, wohingegen die Gitterpunkte des DGM einen größeren Abstand von 1m und mehr aufweisen.

4.1.1.1 Geometrische Entzerrung

Eine Entzerrung kann als Transformation einer Eingabebene in eine Ausgabebene verstanden werden. Es wird also eine diskrete zweidimensionale Grauwertfunktion $f(\xi, \eta)$ mittels Transformation in eine ebenfalls diskrete zweidimensionale Grauwertfunktion $f'(X, Y)$ umgebildet. (Albertz, 2009 S. 97). Mit Hilfe dieser Beziehungen ist es möglich, das verzerrte Luftbild in ein digitales Orthophoto überzuführen.

Die indirekte Umbildung kann entweder pixelweise durchgeführt werden, dies ist jedoch mit hohem Rechenaufwand verbunden. Alternativ ist es auch möglich, die Transformationen nur für die Gitterpunkte des DGM (Ankerpunkte) zu berechnen und die anderen Bildelemente mittels bilinearer Interpolation zu bestimmen. Die Einsparung an Rechenaufwand dieser *Ankerpunktmethode* ist direkt proportional zur Gitterweite des DGM, jedoch muss dadurch auch ein Genauigkeitsverlust akzeptiert werden (Kraus, 2004 S. 427). Die indirekte Umbildung entspricht gleichsam der Umkehrung der direkten Entzerrung. Es wird eine leere Bildmatrix definiert, deren Pixelmittelpunkte (X, Y) koordinativ bekannt sind (weiße Kreise in Abb. 13). Für diese Punkte werden Grauwerte aus dem ursprünglichen Bild bestimmt. Diese Umkehrung hat im Gegenzug zur direkten Umbildung den Vorteil, dass die Regelmäßigkeit des Orthophotorasters erhalten bleibt.

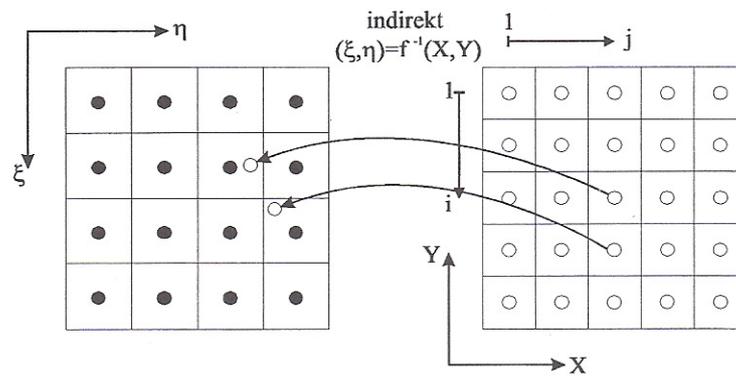


Abb. 13 Schematische Darstellung der indirekten Umbildung nach (Kraus, 2004 S. 40)

Wie bei der direkten Umbildung werden die transformierten Punkte im Luftbild keinen orthogonalen Raster bilden und nicht auf den Pixelmittelpunkten des Luftbildes liegen. Durch die Umsortierung der Bildelemente im Zuge der Orthophotoerstellung ist es notwendig, eine Grauwertinterpolation durchzuführen.

4.1.1.2 Grauwertinterpolation

Eine Möglichkeit der Grauwertinterpolation bildet das Verfahren der *nächsten Nachbarschaft* (*nearest neighbourhood, NN*). Dabei wird der Grauwert des ursprünglichen Pixels an der Stelle in der neuen Matrix positioniert, die dem transformierten Pixelmittelpunkt koordinativ am nächsten liegt (Kraus, 2004 S. 39 f). Das Verfahren hat den Vorteil, dass keine Grauwerte interpoliert werden und die ursprüngliche Radiometrie so weitestgehend erhalten bleibt. Nachteil ist jedoch, dass die interpolierten Pixel im schlechtesten Fall um bis zu einer halben Pixelgröße verschoben werden müssen. Diese Verschiebungen finden nicht immer in die gleiche Richtung statt, sodass es bei zwei benachbarten Pixeln zu Versetzungen von bis zu einem Pixel kommen kann, was im Orthophoto zu einem Sägezahn Effekt und zu unterschiedlicher Linienbreite führt.

Eine Alternative zu NN bildet die *bilineare Interpolation*. Hierbei wird der gesuchte Grauwert mittels der vier Grauwerte der umliegenden Pixelmittelpunkte interpoliert. Bei dieser Methode werden die Grauwerte als Höhe interpretiert. In weiterer Folge beschreibt die Gleichung

$$f(\xi, \eta) = a_0 + a_1\xi + a_2\eta + a_3\xi\eta \quad (4.1)$$

eine Oberfläche, die man hyperbolisches Paraboloid nennt. Die vier Koeffizienten $a_1 - a_4$ können berechnet werden, wodurch man den gesuchten, interpolierten Grauwert erhält.

Eine weitere Möglichkeit zur Interpolation ist die *bikubische Interpolation*. Sie entspricht der Vorgehensweise der bilinearen Interpolation, es werden jedoch die umliegenden 4×4 Pixel verwendet um eine Interpolation höherer Ordnung zu ermöglichen. Diese Methode liefert üblicherweise die besten Ergebnisse (Albertz, 2009 S. 102). Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Radiometrie der Luftbilder im Zuge Grauwertinterpolation verändert wird. Die Auswirkungen auf die Farbwiedergabe sind jedoch im Verhältnis zu anderen Prozessierungsschritten (vgl. nächstes Kapitel) minimal.

4.2 HERSTELLUNG EINES ORTHOPHOTOVERBANDES

Ein Orthophoto wird immer nur für eine begrenzte Umgebung aus einem bzw. wenigen Luftbildern berechnet. Um eine größere Fläche abdecken zu können, müssen die einzelnen (benachbarten) Orthophotos zusammengefügt werden. Diesen Prozess nennt man *Mosaikierung*. Da geometrische Fehler zum Bildrand der Ausgangsbilder hin zunehmen, sollten beim Mosaikieren von Orthophotos möglichst nur zentrale Bildteile der originalen Luftbilder verwendet werden (Koukal, et al., 2012 S. 34). Um ein Orthophotomosaik erstellen zu können, müssen die Orthophotos in einem einheitlichen Koordinatensystem gelagert sein. Das Zusammenfügen an sich wird dann mit Hilfe von geeigneten Computerprogrammen bewerkstelligt. Die Orthophotos werden von der Software an automatisch erstellten Grenzen zusammengefügt. Diese Nahtlinien („*Seamlines*“) verlaufen nach Möglichkeit entlang von natürlichen Grenzen, wodurch sie so gut wie möglich an die Umgebung angepasst sind. Abb. 14 und Abb. 15 zeigen den Ausschnitt eines Orthophotomosaiks mit gut sichtbaren Seamlines.



Abb. 14 Ausschnitt eines CIR-Orthophotomosaiks. Gelb sind die Seamlines dargestellt, wodurch man die für die Mosaikierung verwendeten Bereiche der einzelnen Luftbilder erkennt.

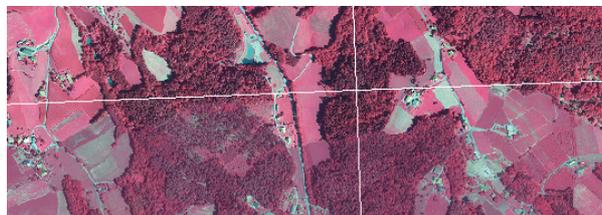


Abb. 15 Derselbe Ausschnitt ohne Seamlines. Gut erkennbar ist der Farbsprung entlang der horizontal verlaufenden Seamlinegrenze, der in einem ausgewogenen Orthophotomosaik nicht vorkommen soll.

Für die übergangsmäßigen Anpassungen (auch „color balancing“ oder „dodging“) zwischen verschiedenen Orthophotos stehen mehrere Verfahren zur Verfügung. Das Ergebnis ist idealerweise ein homogen erscheinendes Orthophotomosaik (RGB und CIR) ohne sichtbare Seamlines. Dodging stellt jedoch massive Eingriffe in die Radiometrie des Orthophotos in den Anpassungsbereichen oder sogar im gesamten Mosaik dar. Die Farbkanäle reagieren während des Aufnahmevorgangs unterschiedlich auf atmosphärische Einflüsse. Im Zuge der Mosaikierung kommt es zu einer kanalweisen Anpassung was eine Änderung der Radiometrie und der Farbbalance zur Folge hat. Radiometrische Fehler nach der Mosaikierung zeigen sich als Grauwertsprünge sowie durch Farbinhomogenitäten und Farbstiche innerhalb des DOPs.

5 VERWENDETE TESTDATEN ZUR UNTERSUCHUNG DER QUALITÄT VON DIGITALEN ORTHOPHOTOS

Bis hierhin wurde auf die Prozessierungsschritte eingegangen die notwendig sind, um vom „rohen“ digitalen Luftbild zum digitalen Orthophoto zu gelangen. Viele dieser Schritte beeinflussen die radiometrische Information, was sich in weiterer Folge negativ auf das Ergebnis auswirken kann. In den folgenden Kapiteln werden empirische Untersuchungen geschildert, die durchgeführt wurden, um eine objektive Beurteilung der Qualität von digitalen Orthophotos zu ermöglichen. Damit in den späteren Kapiteln der Lesefluss nicht unterbrochen wird, soll zunächst in diesem Kapitel auf die für die Untersuchungen herangezogenen Testdaten und deren Auswahlkriterien eingegangen werden.

Das BEV vergibt die Befliegungsaufträge an externe Auftragnehmer in Form von sogenannten „Losen“. Ein Los deckt einen Teil des österreichischen Hoheitsgebiets in der Größe von bis zu 3000km² ab. In Abb. 16 sieht man eine stumme Karte von Österreich, um einen Eindruck von deren Ausdehnung zu erhalten, sind die Umrisse der Lose dargestellt.

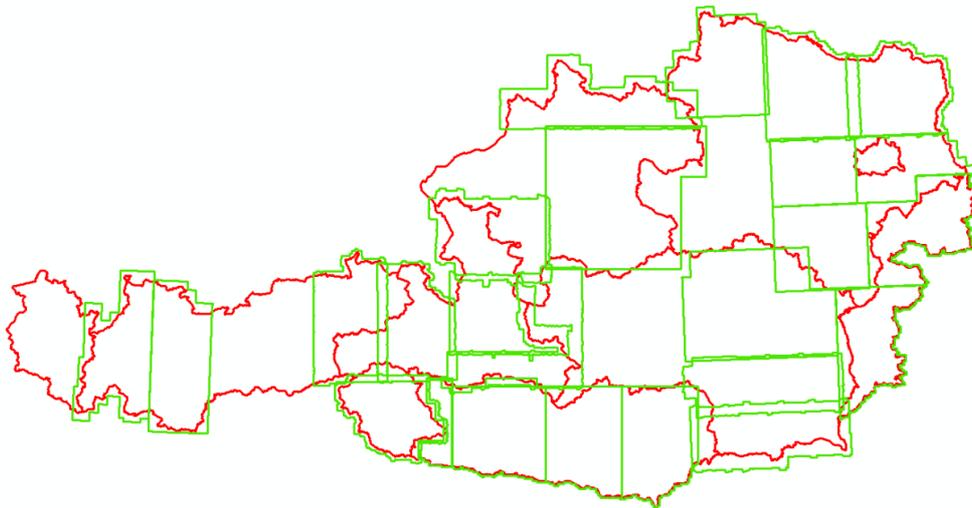


Abb. 16 Umrise von Losen zur Durchführung von Luftbildflügen

Für diese Diplomarbeit standen Orthophotomosaike (=Lose) aus den Jahren 2010, 2012 und 2013 aus dem Datenbestand des BEV zur Verfügung. Die zugrunde liegenden Luftbilder wurden teilweise mit der UltraCam (Xp oder Eagle) und teilweise mit der DMC II erfasst. In den Ausschreibungsunterlagen des BEV ist grundsätzlich festgelegt, dass nur Daten von Flächenkameras akzeptiert werden, somit scheiden Zeilenkameras aus. Wie in Kapitel 6 noch ausführlich erläutert wird, sollte eine umfassende Beurteilung aus einer Kombination von visueller und statistischer Analyse erfolgen. Während die visuelle Analyse sowohl für großflächige Mosaike als auch für Detailausschnitte durchgeführt werden kann, ist eine detaillierte statistische Analyse im Zuge des in dieser Diplomarbeit entwickelten Verfahrens auf Grund des Aufwandes zur Erlangung der statistischen Eingangsdaten nicht großflächig, sondern nur stichprobenweise möglich.

Die Aufgabe im Zuge der statistischen Beurteilung der Daten bestand zunächst darin, eine sinnvolle Darstellung und Beurteilungsmöglichkeit zu entwickeln. Dazu wurden, wie in Kapitel 6.2.1 noch näher

ausgeführt, „Musterflächen“ ausgewählter Bodenbedeckungsklassen manuell klassifiziert und die in diesen Musterflächen enthaltenen statistischen Informationen zur Radiometrie visualisiert. Um dies bewerkstelligen zu können, wurden vorab Daten ausgewählt, anhand derer die Untersuchungen durchgeführt werden konnten.

5.1.1 AUSWAHLKRITERIEN FÜR DIE TESTGEBIETE

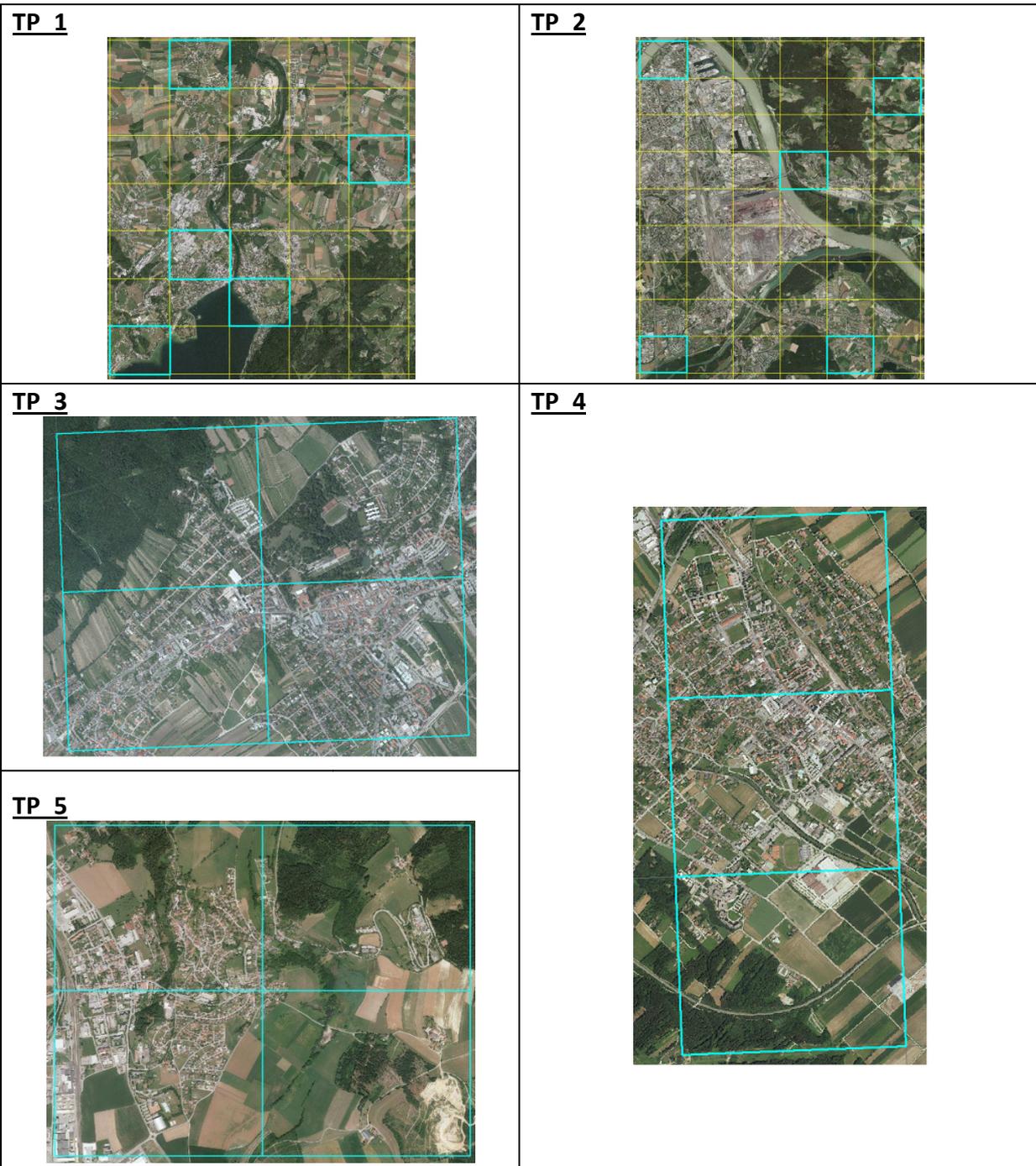
Bevor mit der Auswahl begonnen werden konnte, musste die Testeinheit definiert werden. In Frage kamen Luftbilder, „Einzelorthophotos“ – also einzelne entzerrte Luftbilder - sowie Ausschnitte aus dem DOP-Mosaik. Für Luftbilder und Einzelorthophotos hätte gesprochen, dass noch keine Farbanpassung stattgefunden hätte und die Radiometrie somit weniger verändert worden wäre. Beim Orthophotomosaik wird bekanntlich eine automatische Farbanpassung durchgeführt, um die Übergänge zwischen den einzelnen Luftbildern homogen zu machen. Nichtsdestotrotz fiel die Wahl letztendlich auf Ausschnitte des Orthophotomosaiks. Die Gründe dafür sind folgende. Aus rein ökonomischen Gründen war das Orthophoto das favorisierte Produkt, weil es unmittelbar vorhanden war, wohingegen die anderen beiden speziell hätten prozessiert werden müssen. Vor allem aber stellte das Orthophotomosaik die praktisch logische Wahl dar, da im BEV und vermutlich in jeder vergleichbaren Institution die Orthophotomosaik als finales Produkt gelten, das es zu beurteilen gilt und das für eine allfällige Weiterverarbeitung herangezogen wird.

Da es zunächst noch keine Möglichkeit gab, die Orthophotomosaik fundiert beurteilen zu können, wurde entschieden, dass die Experten des BEV auf Grund ihrer jahrelangen Erfahrung eine Auswahl aus den vorhandenen Losen auf Basis der RGB-Darstellung unter Einbeziehung der Bildfluginformationen (Flugzeiten einzelner Streifen etc.) treffen. Aus diesen Losen wurden dann Stichproben in Form von mehreren DKM-Blättern ausgewählt (DKM=Digitale Katastralmappe, ein DKM-Blatt hat eine Ausdehnung von 1x1,25km pro Blatt), die im Folgenden „Testgebiete“ genannt werden. Die Testgebiete wurden in zwei Gruppen „Positiv“ und „Negativ“ unterteilt. Bei der Auswahl wurde darauf geachtet, dass die einem Testgebiet zugehörigen DKM-Blätter in sich streng homogen und visuell ausgewogen mit natürlicher Farbgebung erscheinen, sowie keine erkennbaren Farbverläufe, Seamlines o. Ä. aufweisen. Weiters wurde darauf geachtet, dass ein möglichst ausgewogenes Verhältnis zwischen bebautem und unbebautem Gebiet vorliegt und die Testgebiete sinnvoll über das Los verteilt sind. Die Testgebiete sollen das Verhalten des gesamten Loses möglichst repräsentativ wiedergeben, damit ein gegebenfalls inhomogenes Farbverhalten des Loses aufgezeigt werden kann und von annähernd gleicher Größe sein. Um keine Bewertung von externen Auftragnehmern bzw. deren Weg der Prozessierung durchzuführen, werden den Testgebieten in dieser Arbeit anonyme Bezeichnungen zugeteilt. Für die Gruppe „Positiv“ TP_## und für die Gruppe „Negativ“ TN_##.

5.1.2 VORSTELLUNG DER TESTGEBIETE

Die Testgebiete sind in ihrer Darstellung nicht 100% konsistent. Sie stammen aus unterschiedlichen Flugjahren und sind daher auf andere Weise aufbereitet. Für jedes Testgebiet sind die DKM-Blattgrenzen eingezeichnet, um einen Größenbezug herstellen zu können. Die Testgebiete erscheinen unterschiedlich, dies hat jedoch nicht zwangsläufig mit deren Qualität zu tun. Ein homogen helles DOP mit warmer Farbgebung kann genauso zufriedenstellend sein wie ein eher dunkleres und kühleres. Kritisch sind die Homogenität der Testgebiete sowie deren enthaltene radiometrische Information.

5.1.2.1 Testgruppe Positiv



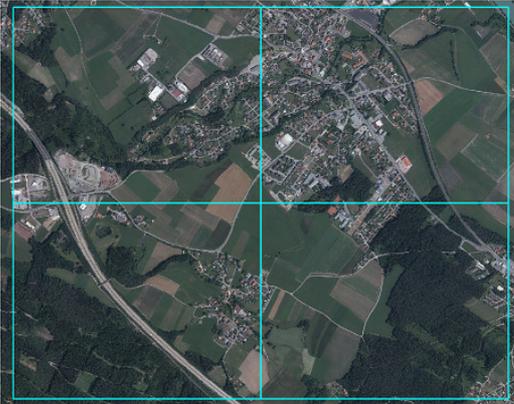
TP 6



TP 7



TP 8



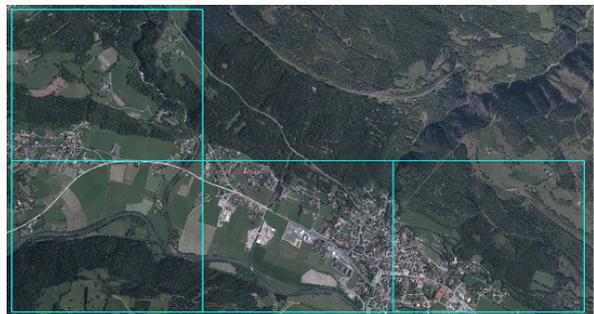
TP 9



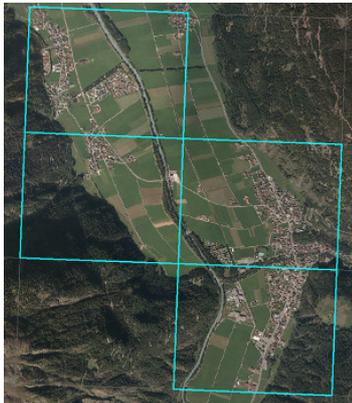
TP 10



TP 11



TP 12



TP 13



TP 14



TP 15



TP 16



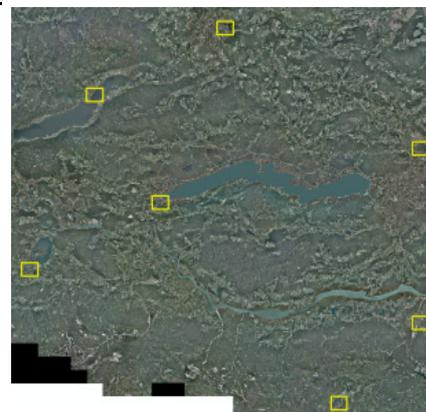
5.1.2.2 Testgruppe Negativ

Die DKM-Blätter der Testgruppe „Negativ“ sind etwas verstreuter als jene der Gruppe Positiv. Dies liegt daran, dass auf bereits vorhandene Daten zurückgegriffen wurde. Auch hier wurde darauf geachtet, dass die DKM-Blätter einer Testgruppe in sich streng homogen sind und insgesamt eine ähnliche Stichprobengröße aufweisen wie die Gruppe „Positiv“.

TN 1



TN 2



TN 3



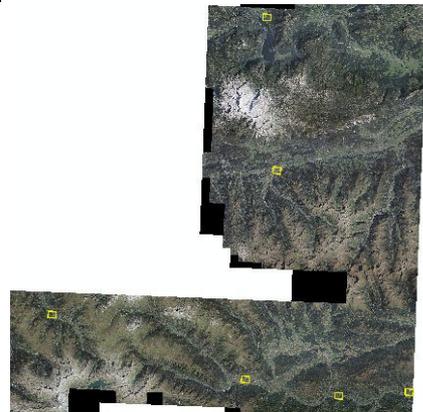
TN 4



TN 5



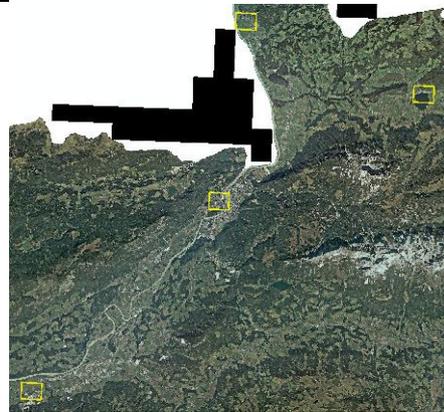
TN 6



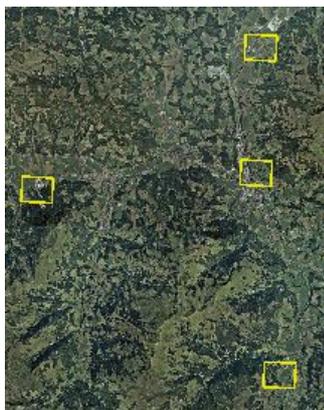
TN 7



TN 8

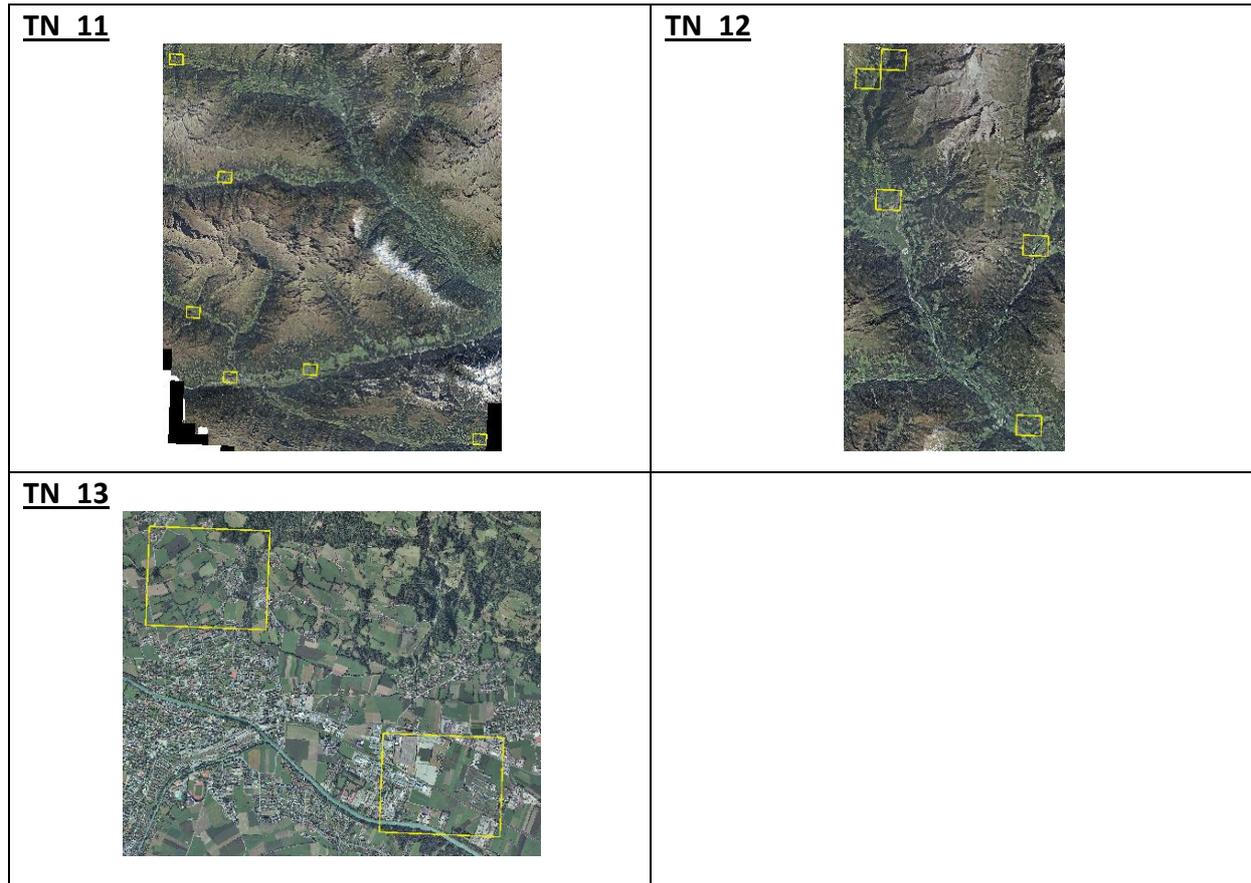


TN 9



TN 10





Teilweise mag es beim Betrachten der Gebiete so erscheinen, als ob kaum ein Unterschied zu den Abbildungen der Gruppe „Positiv“ feststellbar wäre. Dies liegt daran, dass teilweise ein größeres Gebiet abgebildet ist, um sämtliche DKM-Blätter eines Testgebiets darstellen zu können. In manchen Fällen ist die Zuweisung nur im Detailausschnitt nachzuvollziehen in anderen wiederum erscheint die Gesamtdarstellung des Loses unansprechend. Farbstiche bzw. „flaue“ Darstellungen oder geringe Kontraste können also sowohl lokal als auch global auftreten. Bei der Auswahl der Testgebiete wurde darauf geachtet, dass jedes Testgebiet in sich möglichst homogen ist. Ein Farbstich (o.Ä.), der in einem DKM-Blatt ersichtlich ist, soll in den anderen desselben Testgebiets ebenfalls nachvollzogen werden können. Im Folgenden ist angeführt, aus welchem Grund das jeweilige Testgebiet der Gruppe „Negativ“ zugeordnet wurden.

Tab. 2 Begründung der Zuweisung zur Testgruppe „Negativ“

Testgebiet	Begründung
TN_1, TN_2	Visuell äußerst unansprechend, global wenig Kontrast
TN_3	Rotstich
TN_4	Grünstich
TN_5	Überstrahlung
TN_6, TN_8, TN_9, TN_10	Darstellung nicht ansprechend
TN_7	Flau
TN_11, TN_12, TN_13	Unnatürliche Darstellung, Blaustichig

6 MÖGLICHKEITEN DER BEURTEILUNG

Wie aus den vorangegangenen Kapiteln hervorgeht, ist der Herstellungsprozess von Orthophotos von vielen Faktoren abhängig. Auf manche kann man als Bearbeiter Einfluss nehmen, wie zum Beispiel auf die gewählte Methode des Pansharpenings. Auf andere wiederum, wie zum Beispiel das Wetter während des Luftbildflugs oder die kamerainterne Kalibrierung, hat man keinen Einfluss. Auf Grund der Tatsache, dass bis zum fertigen Orthophotomosaik mehrere Prozessierungsschritte durchlaufen werden, die sich jeweils positiv oder negativ auf die Radiometrie auswirken, ist die Beurteilung des fertigen Produktes sehr komplex. In den folgenden Kapiteln sollen Erfahrungen und Vorschläge vorgestellt werden, die im Zuge der Untersuchung von Orthophotos gewonnen wurden. Auf Grund der Komplexität war es nicht möglich, sämtliche Ideen und Anhaltspunkte zu überprüfen, daher folgt im letzten Kapitel ein Ausblick, der Hinweise gibt, wo bei aufbauenden Untersuchungen angesetzt werden kann.

In dieser Diplomarbeit soll auf Basis von empirischen Untersuchungen vorhandener digitaler Orthophotomosaik eine objektive, an Zahlen begründbare Beurteilung von digitalen Orthophotomosaiken entwickelt werden, anhand derer generell gültige Aussagen über die radiometrische Qualität getroffen werden können. Wie sich gezeigt hat, sind auf Grund der Fülle der Einflussfaktoren und der vielfältigen Anforderungen an ein „gutes“ Orthophotomosaik zuverlässigere Informationen zu gewinnen, wenn mehrere Aspekte der Beurteilung in Betracht gezogen werden. Das folgende Diagramm zeigt die vorgeschlagenen Methoden der Beurteilung, die kombiniert eine fundierte Aussage über die Qualität der Orthophotos und speziell über deren enthaltene Radiometrie zulassen.

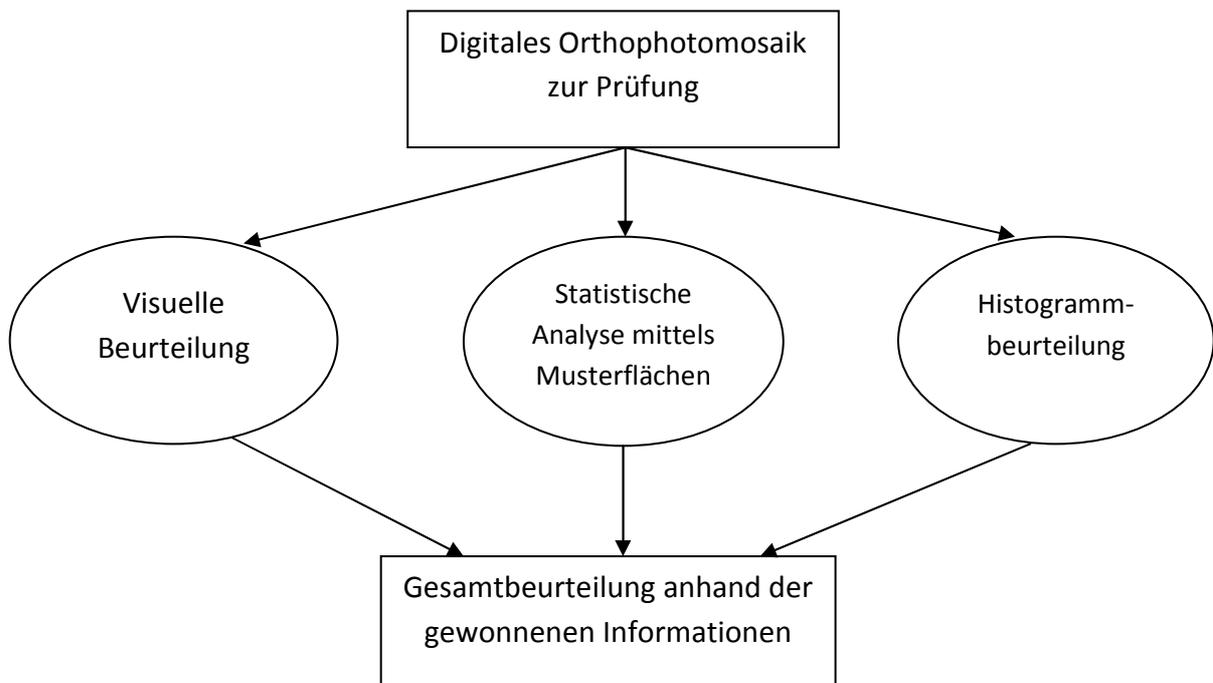


Abb. 17 Schematische Darstellung des empfohlenen Beurteilungsvorgangs

Zusammen ermöglichen diese drei Methoden einen Großteil der Informationen des DOPs zu beurteilen, denn jede von ihnen spricht einen anderen Aspekt an. Die erste Kontrolle, die visuelle Beurteilung, wird verständlicherweise bei jeder Qualitätsuntersuchung angewandt und ist auch in Zukunft unerlässlich. Auf die gewonnenen Informationen bezüglich der visuellen Kriterien wird in Kapitel 6.1 eingegangen. Die zweite Kontroll-Methode wurde im Zuge dieser Diplomarbeit entwickelt und bildet den Großteil der in dieser Arbeit vorgestellten Methoden. Detaillierte Schilderungen über die Vorgehensweise, die Erwartungen und die Resultate sind in Kapitel 6.2 und 7 zu finden. Die dritte Möglichkeit Informationen über die Qualität der Orthophotos zu gewinnen, stellen die in 2.5.1 vorgestellten Histogramme und deren Histogrammoperationen dar. In dieser Arbeit werden Informationen, die aus Histogrammen gewonnen werden, nicht ausführlich behandelt. Die grundlegenden Aspekte werden jedoch in Kap. 6.3 erwähnt.

6.1 VISUELLE BEURTEILUNG

Eine Möglichkeit, ein Orthophoto zu analysieren, ist die visuelle Betrachtung des Bildmaterials. Diese Methode ist verständlicherweise schon lange erprobt, weil dadurch in kurzer Zeit eine erste grobe Aussage über die Güte des Datenmaterials getroffen werden kann. An die Erscheinung des RGB-Bereichs stellt der Betrachter die Erwartung, die aufgenommene Szene so natürlich wie möglich wieder zu geben, d.h. so, wie der Mensch seine Umgebung mit dem Auge bei Tageslicht wahrnimmt. Für den CIR-Bereich gilt dies nicht. Beide Arten der Darstellung haben jedoch gemeinsam, dass sie homogen, ohne wahrnehmbare Farbstiche und nahtlos, ohne sichtbare Seamlinegrenzen wahrgenommen werden sollen.

6.1.1 RGB-BEREICH

Der menschliche Sehsinn ist in der Lage, Unschärfen, unnatürliche Farbsprünge sowie flau und kontrastarme Bilder schnell und ohne aufwendige technische Analyse wahrzunehmen. Ein geübter Bearbeiter vermag darüber hinaus Überstrahlungen und Farbstiche zu erkennen. Diese Wahrnehmung ist jedoch immer subjektiv und bis zu einem gewissen Maße abhängig vom verwendeten Monitor und dem während des Betrachtens vorhandenen Licht. Für eine erste grobe Beurteilung spielt sie jedoch eine wesentliche Rolle und wird auch in Zukunft unabdingbar sein. Im Folgenden sind Beispiele abgebildet, bei denen auf den ersten Blick erkennbar ist, dass keine ausgewogene Farbbalance gegeben ist beziehungsweise Überstrahlungen auf Grund von unzureichenden Bearbeitungsschritten im Zuge der Orthophotoerstellung auftreten oder Seamlines des Orthophotomosaiks deutlich sichtbar sind.



Abb. 18 Sichtbare Seamlines über Land (links entlang des Waldes, ab der Bildmitte entlang der Bahntrasse) und auf einem See

Der Verlauf der Seamlines in Abb. 18 innerhalb des markierten Bereichs ist mit freiem Auge zu erkennen, links entlang des Waldes und der Bahntrasse, rechts quer durch den See. Der Ausschnitt erscheint in der unteren Hälfte anders als in der oberen. Diese Farbfehler treten sowohl im RGB-Bereich als auch im NIR-Bereich auf und sind zu vermeiden. Sie entstehen auf Grund der Mosaikierung der Orthophotos und des dadurch notwendigen color balancing („dodging“) und auf Grund von unterschiedlichen Wetter- oder Lichtverhältnissen während des Luftbildflugs. Durch eine

erneute Mosaikierung bzw. Nachbearbeitung des Mosaiks können diese Fragmente oft vermieden werden.



Abb. 19 Rotstich und Übergang zu Blaustich in unmittelbarer Nachbarschaft

In Abb. 19 ist ein Bild mit einem deutlichen Rotstich entlang des Seeufers abgebildet. Je weiter man sich vom Seeufer wegbewegt, desto kühler wirkt die Farbgebung. Am unteren Bildrand erscheint der Ausschnitt sogar blaustichig. Hier ist durch einen langsamen Übergang des Farbverlaufs keine konkrete Seamline sichtbar. Bei einem Bild, in dem ein Grünstich vorhanden ist, kann die vorhandene Vegetation zu einem Trugschluss führen, d. h. auch der Bildinhalt vermag die visuelle Wahrnehmung in ihrer Objektivität zu beeinträchtigen. Die zweite Methode zur Kontrolle von DOPs, die in 6.2 erläutert wird, kann Farbstiche, die durch einen unnatürlich dominanten Farbkanal entstehen, anhand statistischer Kennwerte aufzeigen.

6.1.2 NIR-BEREICH

Ein grundsätzliches Problem beim Infrarotbereich ist die Tatsache, dass das menschliche Auge den NIR-Bereich nicht wahrnehmen kann. Aus diesem Grund kann der Bearbeiter bei der Darstellung des NIR-Kanals (CIR-Darstellung, vgl. Kap. 2.8) nicht auf die Erfahrung und Vergleiche der visuellen Betrachtung der Umgebung zurückgreifen. Grundsätzlich gilt je vitaler und dominanter die Vegetation ist, desto rötlicher sie im CIR-Bild. Bebaute Flächen und Nicht-Vegetation erscheinen grau-bläulich, Wasser meist sehr dunkel bis schwarz.



Abb. 20 CIR-Darstellung eines Testgebietes. Die weißen Rasterlinien zeigen den DKM-Blattschnitt, im Detail sind Seamlines sichtbar. Siehe dazu auch Abb. 14 und Abb. 15 auf S.32.

Wie bei Echtfarbbildern soll gefordert werden, dass die Darstellung homogen ist, ohne Überstrahlungen und ohne sichtbare Seamlines. Eine visuelle Kontrolle durch einen geübten Betrachter ist hier ebenfalls der erste Schritt der Analyse und auch hier gibt es Beispiele anhand derer klar ersichtlich ist, dass das Ergebnis nicht zufriedenstellend ist.



Abb. 21 Unnatürliche Überstrahlungen entlang des Seeufers

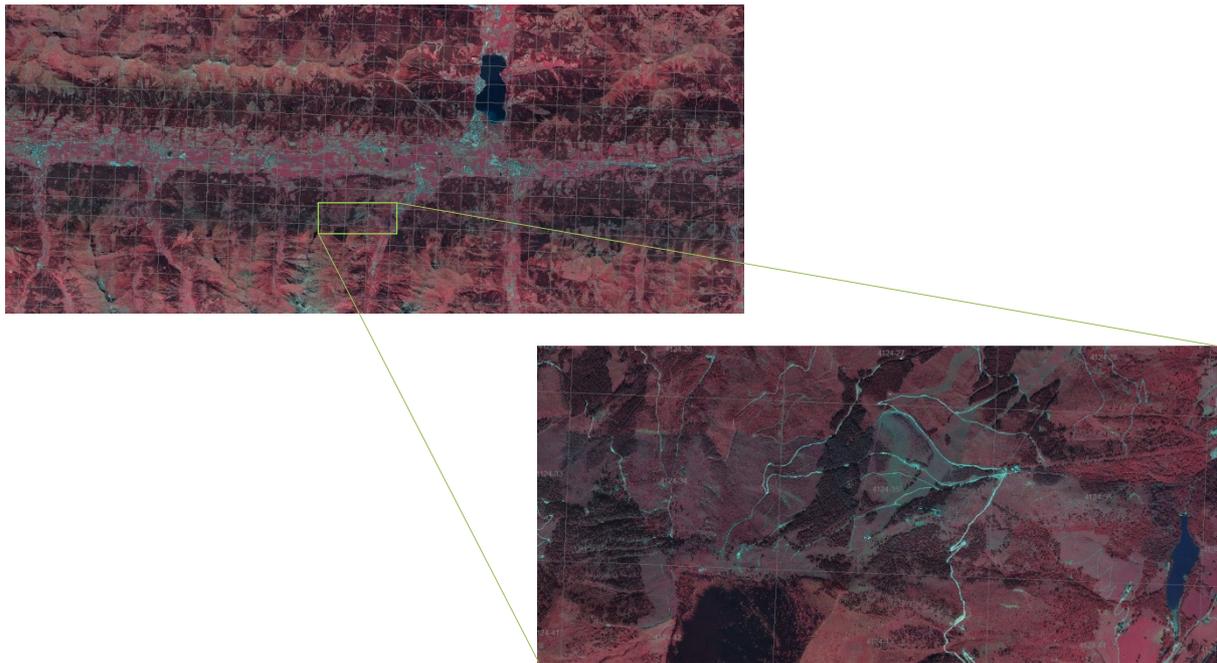


Abb. 22 Inhomogenitäten im CIR-DOP

Die visuelle Kontrolle der in Abb. 21 und Abb. 22 abgebildeten CIR-Mosaik lässt unmittelbar die vorkommenden Inhomogenitäten erkennen. Das unnatürlich aufgehellt Seeufer ist vermutlich durch eine Aufhellung des Wassers beim Übergang von Wasser zu Seeufer entstanden. Die beiden auffälligen blauen Bänder in der unteren Abbildung, die horizontal durch das Bild verlaufen, sind ebenfalls nicht natürlich. Der Detailausschnitt zeigt die Inhomogenität der Farbdarstellung noch deutlicher. Über ein homogenes Erscheinungsbild hinaus können speziell für den NIR-Kanal schwer weitere Aussagen bzw. Erwartungen für die visuelle Beurteilung formuliert werden.

Zusammenfassend kann man sagen, dass eine visuelle Beurteilung durch einen erfahrenen Betrachter wertvolle Informationen gewinnen lässt. Es darf daher auch in Zukunft nicht ausschließlich auf statistische Analysemethoden übergangen werden. Ein digitales Orthophoto hat unter anderem nach wie vor für viele Anwendungen den Zweck, die aufgenommene Szene ansprechend darzustellen. Für diese Kriterien ist die visuelle Beurteilung ein geeignetes Instrument.

6.2 UNTERSUCHUNG DER RADIOMETRISCHEN INFORMATIONEN ANHAND STATISTISCHER KENNWERTE

So sehr die visuelle Beurteilung eines RGB- oder eines CIR- Bildes geeignet sein mag, um das Bild in „gefällig“, „nicht gefällig“, „farbstichig“, „flau“ etc. einzuteilen, ist es dennoch nicht möglich, damit die enthaltene radiometrische Information anhand konkreter Zahlenwerte zu erfassen. Da nur wenige Erfahrungen mit der Beurteilung von Multispektraldaten vorlagen und de facto keine eine objektive Beurteilung möglich war, musste eine Methode entwickelt werden, die vorhandenen Daten aufzubereiten. Da das gesamte Forschungsfeld der Radiometrie für Bildflugdaten noch ein relativ junges ist, gibt es vor allem für den NIR-Bereich kaum Untersuchungen und daher auch kaum Erfahrungswerte, um ein gewünschtes Verhalten über das Grauwertspektrum anstreben zu können. Da keine Kenntnisse darüber vorliegen, wie der ideale Verlauf der NIR-Kanals aussieht, können Hypothesen wenn überhaupt nur mit Vorbehalt formuliert werden. Es schien daher günstig, die Untersuchungen für den RGB-Bereich und den CIR-Bereich getrennt durchzuführen. Zuvor musste die radiometrische Information aus den Bilddaten aufbereitet werden. Grundsätzlich stehen dafür zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Radiometrische Informationen können anhand einzelner Pixel untersucht werden. Es ist jedoch aus Gründen der Robustheit günstiger, Mittelwerte homogener Bildsegmente als statistische Eingangsdaten für die Analyse zu verwenden.

6.2.1 VORBEREITENDE MASSNAHMEN

Mit Hilfe geeigneter Software wurden die bereits ausgewählten Testgebiete auf Basis des RGB-Bildes automatisch segmentiert, sodass der Bildinhalt in Segmente mit annähernd homogener Farbgebung unterteilt ist. Vom Operator wurden vorab Bodenbedeckungsklassen definiert. Nun kann als nächster Schritt die manuelle Klassifizierung von homogenen Segmenten aus dem RGB-Bild erfolgen. Die einer Bodenbedeckungsklasse zugewiesenen homogenen Segmente werden ab hier als *Musterflächen* bezeichnet. In dieser Diplomarbeit wird in einem ersten Schritt zwischen den *Hauptklassen Vegetation und Nicht-Vegetation* unterschieden. Für die Analyse wird weiter differenziert in folgende Unterklassen:

Tab. 3 Hauptklassen und deren Unterklassen

Vegetation:	Nicht-Vegetation:
– Offene Wiese	– Befestigt - mittel
– Wald - hell	– Befestigt - hell
– Wald - dunkel	– Befestigt - dunkel
– Vegetation-beschattet	– Befestigt - beschattet

Die hier differenzierten Unterklassen stellen keine typischen Bodenbedeckungsklassen im Sinne einer Klassifizierung dar. Sie sollen dem Bearbeiter jedoch dabei helfen, Musterflächen über den gesamten Grauwertbereich von Schatten/dunkel zu hell auszuwählen.

„Offene Wiese“, „Wald-hell“ sowie „Wald-dunkel“ werden in dieser Diplomarbeit als „*Vegetation*“, „Befestigt-mittel“, „Befestigt-hell“ und „Befestigt-dunkel“ als „*Befestigt*“ bezeichnet. Die Unterteilung kann nahezu beliebig weit fortgeführt werden. Schotter, Asphalt, Ziegeldach, Eternit, etc. für Nicht-Vegetation; Sträucher, Nadelbäume, Laubbäume, Latschen, etc. für Vegetation. An dieser Stelle sei Folgendes angemerkt: Die manuelle Zuweisung der Segmente zu ihren jeweiligen Klassen erfolgt von einem menschlichen Bearbeiter aus einem Orthophotomosaik, dessen zugrunde liegende Luftbilder aus einer Höhe von ca. 3,5km erfasst wurden. Fehlzuweisungen sind daher nicht auszuschließen. Nicht-Vegetation kann ab hier als *grauer, befestigter Untergrund* (größtenteils Asphaltflächen) verstanden werden. Für die Weiterverwendung des vorhandenen Bildmaterials, zum Beispiel zur automatischen Klassifizierung, wird eine detailliertere Differenzierung der Klassen notwendig sein als es an dieser Stelle der Fall ist. Ziel dieser Arbeit hingegen ist es, einfache, leicht umsetzbare Beurteilungskriterien für die radiometrische Qualität des Bildmaterials angeben zu können. Es sollen also möglichst zuverlässige Aussagen darüber getroffen werden können, ob das vorhandene Multispektralbild den Anforderungen einer Ableitung von Folgeprodukten genügt oder ob im Zuge der Bilderfassung und -verarbeitung (Pansharpening, Color Balancing, Dodgen, Entzerren, Mosaikieren) die Radiometrie soweit verfälscht wurde, dass die Voraussetzungen für eine Weiterverwendung nicht mehr erfüllt sind. Die Beschränkung auf die angeführten Hauptklassen hält auch den Aufwand der Untersuchungen in akzeptablen Grenzen, sodass die Beurteilung innerhalb kurzer Zeit erfolgen kann. In Kap. 7.2.1 wird auf die Frage eingegangen, wie sich weitere differenzierte Nicht-Vegetation Klassen im NIR-Bereich ähnlich der hier vorhandenen Testklassen verhalten.

Für die den Klassen manuell zugeordneten Musterflächen wurden folgende statistische Kennwerte der enthaltenen radiometrischen Information exportiert.

- Mean NIR
- Mean RED
- Mean GREEN
- Mean BLUE
- Mean NDVI

Für jede einer Klasse zugewiesene Musterfläche werden diese Mittelwerte berechnet. Die GSD des Orthophotomosaiks beträgt 20cm/Pixel, störende Elemente innerhalb eines Segment, wie zum Beispiel Bitumenflecken o. ä., können daher nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Da ein Segment jedoch aus einer Vielzahl an Pixeln besteht, werden einzelne störende Pixel das Ergebnis

nicht verfälschen. Das Ergebnis ist eine Textdatei, in der in jeder Zeile die Kennwerte für das jeweilige Segment eingetragen sind. Abb. 23 zeigt einen kleinen Ausschnitt des Exportfiles.

1	scene name;class name;Mean NIR;Mean RED;Mean GREEN;Mean BLUE;Mean NDVI
2	5317-46;Baum - hell;169.33136792;101.4375;106.29363208;93.337264151;0.25205829878;
3	5317-46;Baum - hell;171.24529262;101.70687023;106.98167939;92.001017812;0.25563393554;
4	5317-46;Baum - hell;198.11473788;117.62116716;130.07814045;98.184965381;0.25674552599;
5	5317-46;Baum - hell;176.54310345;131.80172414;145.51724138;150.52586207;0.14508918801;
6	5317-46;Baum - hell;139.6761488;119.57768053;116.56236324;101.9868709;0.078090576748;
7	5317-46;Baum - hell;187.56512141;115.47019868;132.48785872;96.350993377;0.23807412646;
8	5317-46;Baum - hell;147.37275986;113.2688172;121.54121864;99.422939068;0.12630479799;
9	5317-46;Baum - hell;156.43814433;111.06271478;107.30841924;88.110824742;0.16942366629;
10	5317-46;Baum - hell;140.72222222;99.932098765;106.47530864;84.444444444;0.16816398844;
11	5317-46;Baum - hell;186.03252033;117.15447154;128.74525745;112.61517615;0.22791000898;

Abb. 23 Auszug aus dem exportierten Statistikfile

- 1 - Die erste Zeile enthält die Information, welcher Wert in welcher Spalte zu finden ist
- 2 - Zeigt das aktuelle DKM-Blatt
- 3 - Definition, welcher Klasse die Werte zuzuordnen sind
- 4 - Zahlenwerte. Bei einem 8 Bit DOP im Intervall [0; 255]

6.2.2 OPERATIONELLE ASPEKTE BEIM MESSEN VON MUSTERFLÄCHEN

Die beiden Hauptklassen enthalten jeweils differenzierte Unterklassen von hell bis dunkel bzw. beschattet. Man kann also davon ausgehen, dass diese Klassen, aus denen statistische Kennwerte berechnet werden, gemeinsam den gesamten Grauwertbereich so gut wie möglich abdecken. Es lag jedoch zunächst keine Information über die tatsächliche Verteilung der gemessenen Musterflächen über das gesamte Grauwertspektrum vor. So wurden gemessene Musterflächen von Testbeispielen herangezogen und deren Verteilung visualisiert. Für die Darstellung der Verteilung wurde das Grauwertspektrum in 25 Intervalle unterteilt, von denen jedes 10 Grauwerte enthält. Diese Aggregationsstufe wird sich in Kap. 6.2.3.1 auch für die Methodik zur Analyse des RGB-Bereichs als günstig erweisen. Abb. 24 zeigt die Verteilung der Musterflächen für die Hauptklasse „Nicht-Vegetation“, exemplarisch für einen Datensatz. Die Daten wurden einmal mit dem Faktor 2 und einmal mit dem Faktor 5 ausgedünnt.

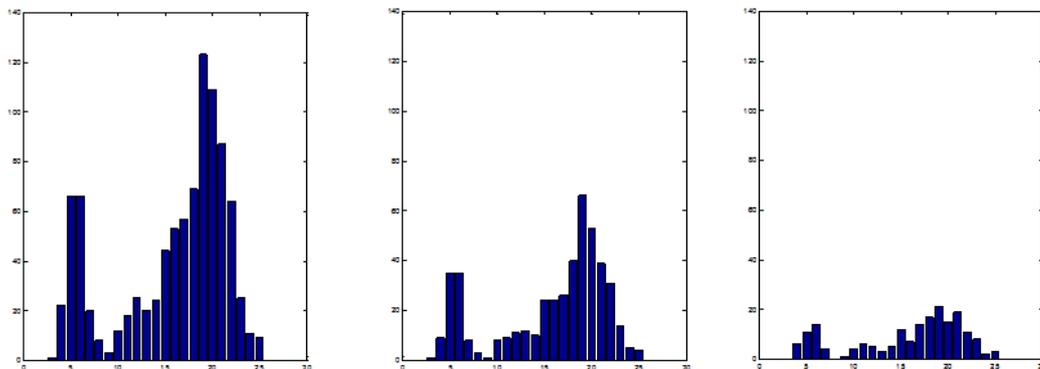


Abb. 24 Verteilung und Anzahl der Musterflächen für einen Datensatz, unterteilt in 25 Intervalle. Links: 936 Musterflächen, Mitte: 468, Rechts: 188. Auf der Abszisse ist das Grauwertspektrum unterteilt in 25 Intervalle aufgetragen, die Ordinate stellt die Anzahl an Musterflächen je Intervall dar.

Die linke Abbildung zeigt die Verteilung aller gemessenen Musterflächen. Gut zu erkennen ist die ungleiche Verteilung der Musterflächen. Während in den hellen Bereichen tendenziell sehr viele Musterflächen zugewiesen sind, so ist beim Übergang von Schatten zu dunkel (Grauwerte von ca. 70-110) hingegen nur eine geringe Anzahl vorhanden. Ein sehr ähnliches Verteilungsbild wurde bei quasi allen Testgebieten festgestellt, bei denen die Anzahl der Musterflächen je Unterklasse während der Messung nicht bewusst beobachtet wurde. Eine derart ungleiche Verteilung der Musterflächen über das Grauwertspektrum erschien unzweckmäßig. Da das Messen von Musterflächen darüber hinaus zeitaufwendig ist und Personalressourcen bindet wurde ab diesem Zeitpunkt darauf geachtet, dass annähernd eine Gleichverteilung an Musterflächen über das Grauwertspektrum gegeben ist. Die Menge an selektierbaren Flächen hängt zwar zum Teil vom Bildinhalt ab, dennoch wurde zur Steigerung der Effizienz die Anzahl beobachtet um Erfahrung zu gewinnen, welche Anzahl sich als günstig herausstellt. Eine Gleichverteilung wie in Abb. 25 wurde angestrebt, konnte jedoch auf Grund der verschiedenen Bildinhalte nicht in jedem Fall erreicht werden. Es enthalten nicht alle 25 Intervalle Werte, da dies ebenfalls vom Bildinhalt abhängig ist. Eine Anzahl von 5-20 Musterflächen pro Intervall wurde als ausreichend angesehen. Alles darüber hinaus würde einen unverhältnismäßig hohen Zeitaufwand mit sich bringen, ohne einen vermehrten Nutzen für die statistische Analyse zu gewinnen.

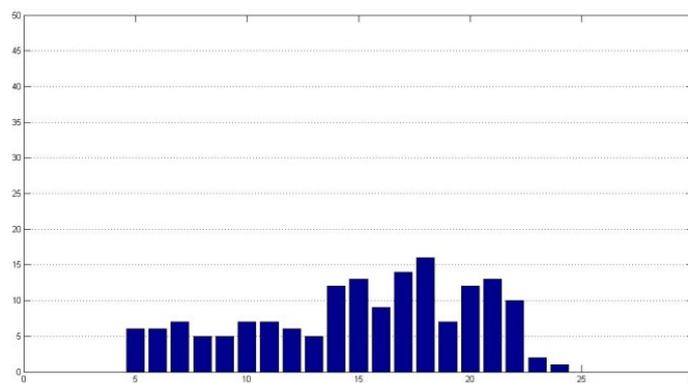


Abb. 25 Eine Gleichverteilung der Musterflächen über das Grauwertspektrum wird angestrebt. Auf der Abszisse ist das Grauwertspektrum unterteilt in 25 Intervalle aufgetragen, die Ordinate stellt die Anzahl an Musterflächen je Intervall dar.

6.2.3 ANALYSE DES RGB-BEREICHS

Nach dem Export der statistischen Kennwerte bestand der nächste Schritt darin die Daten so darzustellen, dass sie vergleichbar werden. Dafür wurde das Programm *MatLab*[®] der Firma der Firma The MathWorks verwendet (<http://www.mathworks.de/products/matlab>).

6.2.3.1 Methodik für die Analyse des RGB-Bereichs

Um eine objektive Untersuchung durchführen zu können, war es notwendig, Annahmen zu treffen, die sich sowohl begründen lassen als auch zahlenmäßig überprüfbar sind. Folgende Hypothese wurde formuliert um den RGB-Bereich in einem ersten Schritt beurteilen zu können:

Es wird angenommen, dass befestigte Flächen wie Straßen, Parkplätze und Einfahrten in der Natur näherungsweise „grau“ sind. In einem digitalen Orthophoto mit ausgeglichener Farbbalance, dessen Farbdarstellung der des menschlichen Sehens entspricht (also RGB), sollen diese Flächen ebenfalls ausgewogen grau abgebildet werden. Wenn dies der Fall ist, können die grundlegenden Voraussetzungen einer homogenen Darstellung als erfüllt betrachtet werden.

Der Grund, warum hier spezielles Augenmerk auf befestigte graue Flächen gelegt wird und nicht zum Beispiel auf Vegetation, liegt darin, weil Vegetation eine Vielzahl an Farbabstufungen aufweist und zu verschiedenen Jahreszeiten ein unterschiedliches Erscheinungsbild hat. Asphaltflächen hingegen verändern sich über das Jahr hinweg nicht – abgesehen von Schneebedeckung – und sollten dadurch konstant gleich erscheinen. Ein weiterer Grund ist, dass befestigte Flächen häufig grau sind. Grau bedeutet, dass der gleiche Anteil an Rot, Grün und Blau vorhanden ist. Die Differenz zur mittleren Intensität sollte daher für jeden Kanal annähernd 0 sein, unabhängig davon, ob eine Szene dunkler oder heller erscheint. Farbige, befestigte Flächen wie Radwege, Sportplätze oder markierte Straßenflächen werden nicht in die Untersuchungen einbezogen.

Um diese Behauptung überprüfen zu können musste ein Weg gefunden werden, um die Anteile an Rot, Grün und Blau über das Grauwertspektrum zu visualisieren. Idealerweise sollen die Ergebnisse vergleichbar sein, weshalb eine Reduzierung auf den Mittelwert vorgenommen wurde. Würde man nur den RGB-Farbverlauf darstellen, wären die Ergebnisse auch bei einem ausgewogen grauen Bildinhalt unterschiedlich. Um dem Rechnung zu tragen, wurde mit Hilfe des exportierten Statistikfiles in *MatLab*[®] die mittlere Intensität des RGB-Kanals für jeden Grauwert der zuvor klassifizierten Flächen befestigten Untergrunds berechnet.

Mittlere Intensität =

$$\sum_{i=1}^n \frac{MeanRED_i + MeanGREEN_i + MeanBLUE_i}{3} \quad (6.1)$$

n ... Anzahl der vorhanden Grauwerte

Um den Verlauf über das Grauwertspektrum darstellen zu können wurde anschließend die Musterflächen gemäß ihrer berechneten Intensität aufsteigend sortiert. Im nächsten Schritt wurde dann für jeden RGB-Kanal die Differenz zur mittleren Intensität gebildet und grafisch dargestellt. Es zeigte sich, dass die schlichte Darstellung aller Werte suboptimal ist. Deshalb wurden die Daten in einem weiteren Schritt zu 10 bzw. 25 Intervallen aufsteigender Intensität zusammengefasst. Die Mittelwerte der Intervalle und deren Standardabweichungen stellen den Verlauf der Grauwertdifferenzen übersichtlich und leicht erfassbar dar.

In einem idealen Bild ohne Farbstich in den grauen Flächen ist zu erwarten, dass die Verläufe der Kurven der RGB-Kanäle annähernd horizontal mit einer Differenz von ca. 0 zur mittleren Intensität verlaufen. Dieses Ergebnis wird wegen der vielen Einflussfaktoren nie erreicht werden, jedoch hat sich diese Methode als geeignet herausgestellt, um die Farbbalance eines Echtfarbbildes ansprechend zu visualisieren. Das Ergebnis ist in Abb. 26 dargestellt. Zu Beginn wurde mit der Aggregationsstufe 10 Intervalle gearbeitet. Wie man an den Grafiken jedoch erkennen kann, wird der Kurvenverlauf dadurch sehr stark geglättet. Dies ist ungünstig für die weitere Analyse, da ein spezielles Verhalten kaum dargestellt wird und Lücken in den gemessenen Musterflächen übergangen werden. Abb. 26 (a) suggeriert einen stetigen Verlauf der Intervallmittelwerte und damit auch der einzelnen Grauwertverläufe, in Abb. 26 (b) ist die Lücke auf den ersten Blick erkennbar, da – wie in Abb. 26 (c) zu sehen – im besagten Intervall zwischen Grauwert [120-130] keine Werte vorhanden sind. Weiters fällt bei Abb. 26 (c) auf, dass an den Rändern des Grauwertspektrums nur noch sehr vereinzelt Werte vorhanden sind, die das Ergebnis unter Umständen verfälschen. Wenn ein Intervall nur einen Grauwert enthält, würde dieser Wert direkt in das Diagramm einfließen und eine statistische Mittelbildung kann nicht mehr erfolgen. Um dem zu begegnen, wurde das 1%-Quantil der Daten entfernt. Für weitere Untersuchungen wurde ab diesem Zeitpunkt vorrangig mit der Aggregationsstufe 25 Intervalle gearbeitet, da dies einen günstigen Kompromiss zwischen schneller Erfassbarkeit und Wiedergabe des tatsächlichen Grauwertverlaufs darstellte.

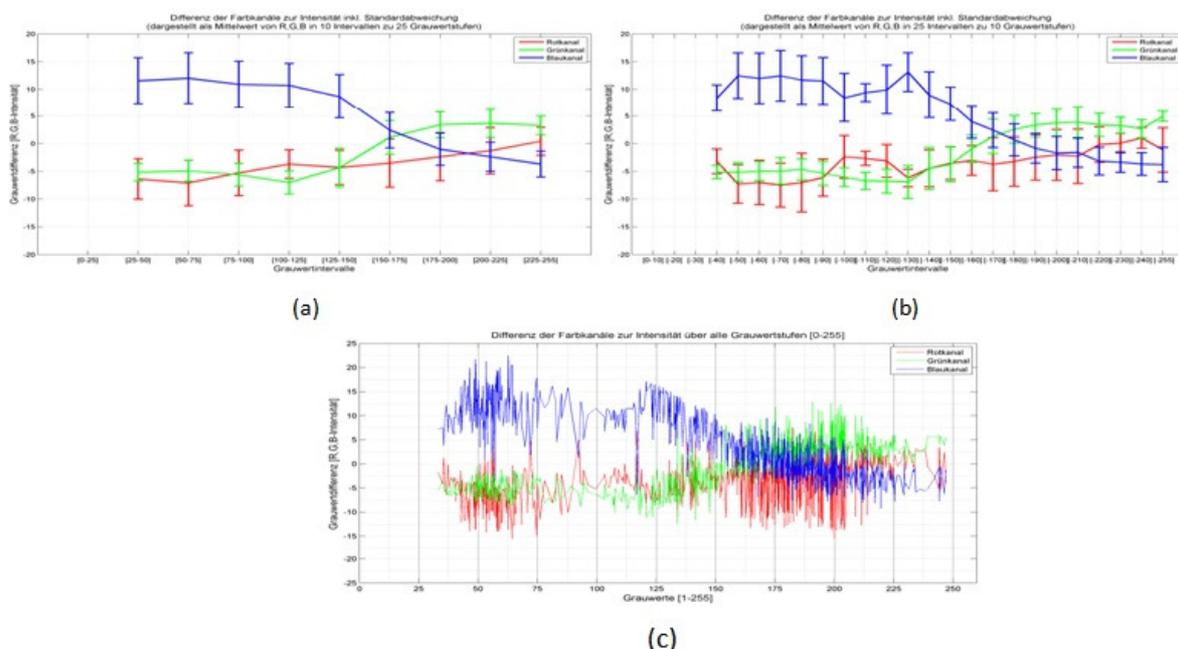


Abb. 26 Auf der Abszisse ist die aufsteigende Intensität (bzw. zusammengefasst in Intervalle) dargestellt, die Ordinate gibt die Differenz des jeweiligen MS-Kanals von der mittleren Intensität an. a: Darstellung der Multispektralkanäle in 10 Intervallen á 25 Grauwertstufen inkl. Standardabweichung. - b.: 25 Intervalle á 10 Grauwertstufen - c: Alle Grauwerte

Man erkennt, dass die Diagrammkurven nicht annähernd horizontal verlaufen. Zusätzlich ist ein „Kreuzen“ der Farbkanäle zu beobachten, das in vielen untersuchten Datensätzen erkennbar ist. In diesem Beispiel ist Blau in den dunklen Bereichen dominant, wohingegen die Farbbalance in den hellen Bereichen relativ ausgewogen scheint.

Bis hierhin wurde eine Möglichkeit gefunden, die Daten des Multispektralbildes von grauem, befestigtem Untergrund darzustellen. In weiterer Folge ist es das Ziel, eine qualitative Beurteilung zu ermöglichen, die leicht umsetzbar ist. Der nächste Schritt bestand daher darin, die erhaltenen Grafiken zahlenmäßig beurteilen zu können. Um dies zu ermöglichen, war es zuvor notwendig, die Verläufe der Grauwertdifferenzen anhand einiger weniger Zahlen erfassbar zu machen. Hierfür bot es sich an, Regressionspolynome einzuführen und anhand der Polynomkoeffizienten eine Methode zu entwickeln, den Bildinhalt zu analysieren. Es hat sich schnell gezeigt, dass Polynome zweiter und höherer Ordnung nicht optimal dafür geeignet sind. Grund dafür ist zum einen, dass die Grafiken unübersichtlich werden und die visuelle Erfassbarkeit darunter leidet und zum anderen, dass Polynome höherer Ordnung dem erwarteten, linearen, Farbverlauf nicht entsprechen. Es wurden daher Regressionsgeraden, also Polynome erster Ordnung, angewandt. Obwohl sie die einfachste Form einer Ausgleichung darstellen, zeichnen sie sich dadurch aus, dass der Verlauf gut ersichtlich ist und sie durch zwei Parameter definiert sind (Steigung k und Achsabstand d).

Folgende Darstellung (Abb. 27) wurde zur Analyse des RGB-Bereichs eines Datensatzes herangezogen:

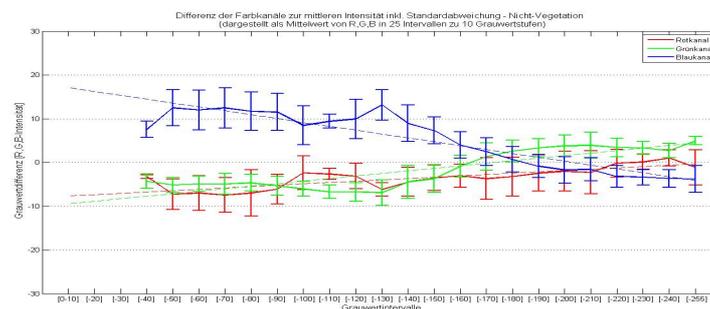


Abb. 27 Dieselbe Darstellung wie Abb. 26 (b), ergänzt um die Regressionsgeraden der Farbkanäle

Der Verlauf der Grauwertdifferenzen der Klasse befestigter Untergrund zwischen der aufsteigenden mittleren Intensität aus RGB und dem jeweiligen Spektralkanal ist gut ersichtlich. Die Verläufe werden mit Hilfe der zugehörigen Regressionsgeraden ausgeglichen. Die starke Variation der Verläufe je nach betrachtetem Datensatz soll durch zwei weitere Beispiele illustriert werden.

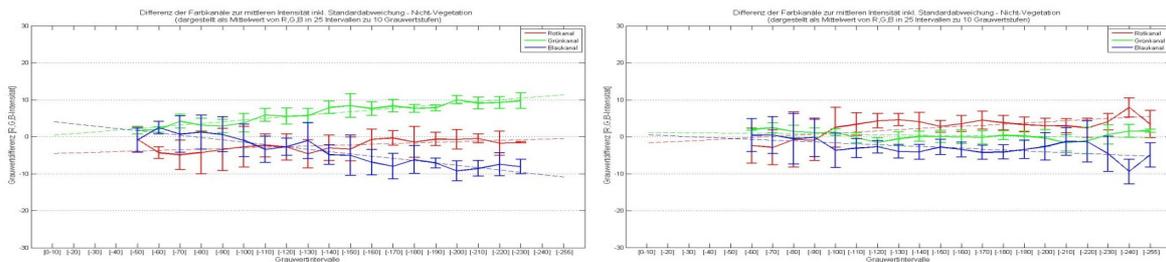


Abb. 28 Weitere Beispiele für den Farbverlauf

Im Gegensatz zu Abb. 27, in der die „Scher“ zu Beginn des Grauwertspektrums geöffnet ist, verlaufen die Farbkanäle in Abb. 28 (links) zu Beginn relativ parallel und driften in den helleren Bereichen auseinander. Erwähnenswert bei diesem Beispiel ist außerdem, dass es eines der seltenen Fälle ist, in denen der Grünkanal dominant ist. Abb. 28 (rechts) stellt den angestrebten Farbverlauf bereits relativ gut dar. Als optimal wird ein horizontaler Geradenverlauf aller Farbkanäle um 0 (entspricht mittlerer Intensität aus RGB) angesehen.

6.2.3.2 Erkenntnisse aus den Analysen

Die soeben vorgestellte Methode wurde auf eine Vielzahl an Datensätzen angewandt. Teilweise wurden die analysierten Bilder als „gut“ angesehen, teilweise als weniger gut, manchmal mit sichtbaren Seamlines oder anderen Inhomogenitäten. Im Zuge der Analyse wurden also sämtliche verfügbaren Szenarien überprüft. Zusammenfassend lassen sich folgende Erkenntnisse formulieren.

6.2.3.2.1 Blaudominanz in dunklen Bereichen

Unter der Prämisse, dass die befestigten Flächen (Asphalt, etc.) in der Natur näherungsweise „grau“ sind, müssen sich diese Flächen auch im DOP in der RGB-Darstellung ebenfalls näherungsweise in einem Grauton abbilden. Für Bildinhalte, bei denen diese Annahme zutrifft, konnte eine eindeutige Verifizierung der Erwartung festgestellt werden, nämlich dass die Diagramm-Kurven für die Farbkanäle R, G, B bei und um Null verlaufen (vgl. Musterbeispiel auf S. 85). Obwohl bei eingehender visueller Betrachtung des jeweiligen Bildmaterials kein Farbstich erkannt werden kann ist es oft der Fall, dass der Blaukanal in den dunklen, d. h. auch in den beschatteten Bereichen des Grauwertspektrums dominant war. Dieses Phänomen lässt sich vermutlich durch das Vorhandensein des Luftlichts erklären, das bereits in Kapitel 2.3 auf Seite 13 angesprochen wurde. Auf jedes mit Sonnenlicht bestrahlte Objekt treffen zwei Arten von Strahlung auf, nämlich die direkte, gerichtete Sonnenstrahlung und das diffuse *Luftlicht*. Letzteres entsteht durch die Reflexion des Lichts an winzigen Teilchen in der Luft („Aerosole“) mit der Eigenschaft, dass der kurzweilige Bereich, also vor allem der Blauanteil, dominiert. Da Schatten definiert ist als (direkt-) unbeleuchtete Fläche ist das Blau des Luftlichts vorherrschend. Es kann nicht mit Gewissheit behauptet werden, dass sich die Blaudominanz im dunklen Bereich ausschließlich daraus ergibt. Dennoch zeigte sich, dass ein überrepräsentierter Blaukanal im dunklen Bereich bis zu einem gewissen Grad akzeptiert werden kann, ohne dass die visuelle Wahrnehmung einer harmonischen Farbgebung durch den menschlichen

Sehsinn dadurch beeinträchtigt wird. Dies lässt den Schluss zu, dass das menschliche Auge auf mittlere und hellere Bereiche sensibilisiert ist, wie sie auch in der Natur bei Tageslicht üblicherweise vorkommen.

6.2.3.2.2 Rotdominanz in hellen Bereichen

Rot ist im Gegensatz zu Blau in den dunklen Bereichen oft nicht wie gefordert ausgeglichen, sondern unterrepräsentiert. Mit steigendem Grauwertverlauf nimmt der Rotanteil in einem unausgewogenen Bild deutlich zu, bis er Blau und Grün dominiert. Es kann daher in solchen Bildern oft das charakteristische „Kreuzen“ zwischen dem Blau- und Rotkanal festgestellt werden, während Grün in den meisten Fällen sehr gleichmäßig um 0 verläuft. In Analysen guter Bilddaten ist dieses Kreuzen auf Grund des annähernd horizontalen Kurvenverlaufs nur sehr gering ausgeprägt oder gar nicht zu beobachten. Im Gegensatz zu der Tatsache, dass eine gewisse Blaudominanz in den dunklen Bereichen des Grauwertspektrums akzeptabel ist, kann dies für den Rotanteil in den hellen Bereichen nicht gelten. Der Kreuzungspunkt der Farbkanäle liegt in den meisten Analysen zwischen Grauwert 110 und 160. Je früher es zum Kreuzungspunkt kommt und je deutlicher rot dominant wird, desto eher ist dies auch im Bild visuell nachzuvollziehen. Im folgenden Ausschnitt ist dieser Sachverhalt erkennbar.

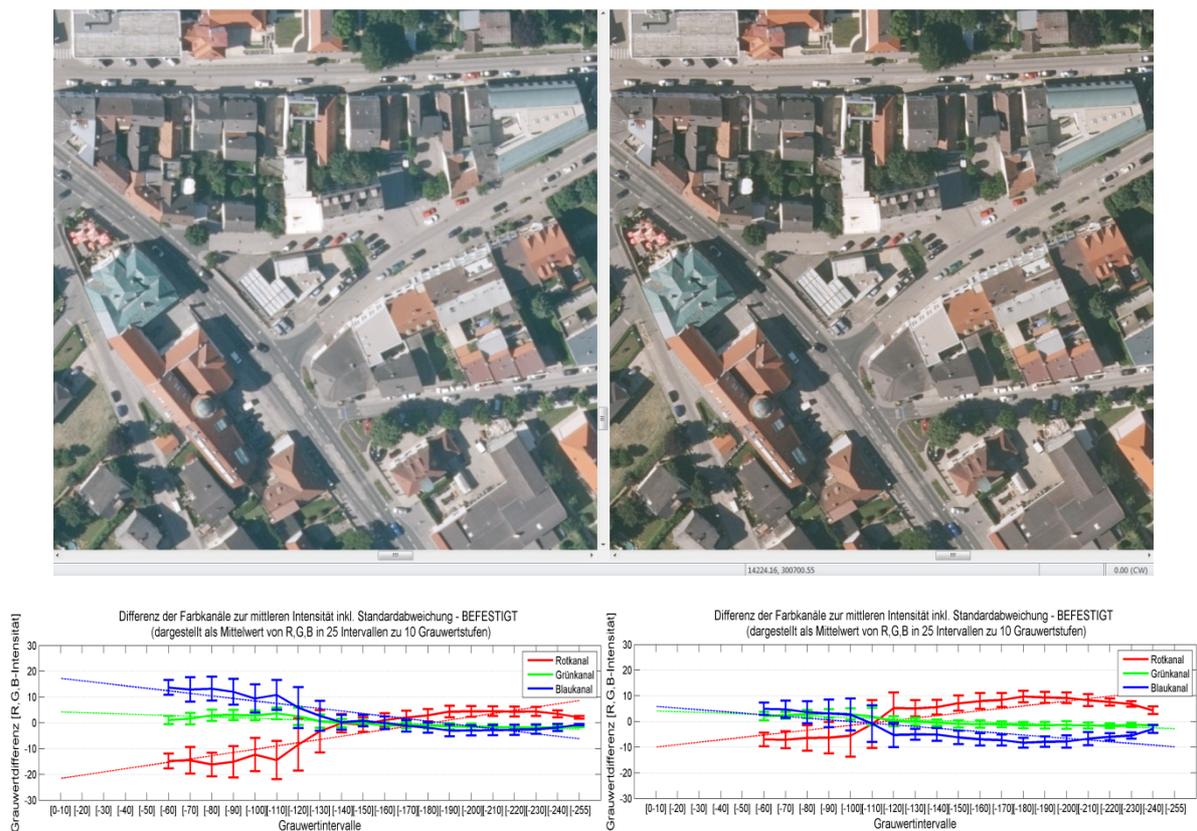


Abb. 29 Zwei Abbildungen der gleichen Szene und deren Diagrammkurven. Das linke Bild wirkt visuell ausgewogen, das rechte rotstichig.

Eine geringere Rotdominanz im hellen Bereich hat folglich größere Auswirkungen auf die visuelle Wahrnehmung als eine deutlicher ausgeprägte Blaudominanz im dunklen Bereich. Abb. 29 (links) wirkt sehr natürlich, ohne Farbstich und ausgewogen. Dennoch ergibt die Analyse eine Blaudominanz von ca. 15 Grauwertdifferenzen im dunkeln Bereich. Abb. 29 (rechts) weist einen deutlichen Rotstich auf. In der Analyse ist der dunkle Bereich zwar nun ausgewogener, die Dominanz des Rotkanals hat jedoch deutlich zu genommen. Er ist nicht nur in den grauen, befestigten Flächen zu erkennen, deren Musterflächen die Grundlage für die Analyse bilden. Stattdessen wirkt die gesamte Abbildung rötlich. Auch der Kreuzungspunkt hat sich weiter nach links verschoben. Lag er in der linken Abbildung noch bei GWS 150-160, ist er in der rechten Abbildung ca. bei GWS 110 zu finden. Grundsätzlich sollte angestrebt werden, dass alle drei Farbkanäle von dunkel bis hell gleichmäßig verlaufen, denn je eher die resultierenden Diagramm-Kurven der Farbkanäle der grauen, befestigten Flächen um 0 verlaufen, desto weniger Farbstich ist in den Bildinhalten generell zu erkennen. Der Erfüllung dieser Forderung bezüglich der Rotdominanz im hellen Bereich sollte jedoch den Untersuchungen nach eine hohe Priorität zuerkannt werden. In anderen Datensätzen waren auch andere Farbstiche (Grün, Blau) im hellen Bereich visuell erkennbar.

6.2.3.3 Fazit

Die Analysen des RGB-Bereichs haben die Erwartungen über das Verhalten des Farbverlaufs von grauen, befestigten Flächen bestätigt. Es wurde bewiesen, dass die Methode in der Lage ist, Farbstiche und unausgewogene Farbbalancen aufzuzeigen. Zusätzlich konnte festgestellt werden, dass ein Rotstich im hellen Bereich dem menschlichen Sehsinn offenbar stärker auffällt als ein Blaustich in dunklen Gebieten. Weiters hat sich durch die Untersuchungen gezeigt, dass ein sichtbarer Farbstich, der durch graue, befestigte Flächen analytisch aufgezeigt wird, nicht nur über grauen Flächen sondern in der gesamten Szene wahrgenommen werden kann.

6.2.4 ANALYSE DES NIR-BEREICHS

Für den RGB-Bereich wurde eine Methode gefunden, mit deren Hilfe die Daten aufbereitet werden können und anhand derer eine Beurteilung des Bildinhaltes möglich wird. Dasselbe galt es nun für den NIR-Bereich zu bewerkstelligen. Die CIR-Darstellung kann den NIR-Kanal zwar visualisieren, es liegen für das Resultat jedoch keine konkreten Erwartungen vor. Im Gegensatz zum RGB-Bereich vermag das menschliche Auge den NIR-Bereich nicht wahrzunehmen. Im Folgenden wird zuerst der Frage nachgegangen, ob die Methode, die für den RGB-Bereich angewandt wird auch Informationen im NIR-Bereich erkennen lässt. Danach wird auf die Hauptanwendung des NIR-Bereichs und dessen Beurteilung eingegangen.

6.2.4.1 Evaluierung der RGB-Methode für den NIR-Bereich

Das Ziel bestand darin, Erfahrungen über den grundsätzlichen Verlauf des NIR-Kanals zu gewinnen. Es wurde dazu der NIR-Kanal in gleicher Weise dargestellt wie die RGB-Kanäle. Das Ergebnis mutet teilweise überraschend an. Wie erwartet verläuft der NIR-Kanal bei befestigtem Untergrund großteils unter RGB, bei Vegetation darüber. In vielen Fällen beschreibt der NIR-Kanal unerwarteterweise einen „bauchigen“ Verlauf, bei befestigtem Untergrund mit der Wölbung nach unten, bei Vegetation mit der Wölbung nach oben. In anderen Beispielen fällt der NIR-Kanal mehr oder weniger stetig ab, ohne, dass ein solches Verhalten aus dem CIR-Bild zu vermuten wäre. Man muss hier erwähnen, dass die Darstellung der Differenz zwischen dem NIR-Kanal und der mittleren Intensität aus RGB entspricht, der NIR-Kanal bei der Berechnung der Intensität also nicht beigetragen hat. Um diesen Aspekt zu untersuchen, wurden für mehrere Testgebiete die Differenzen zwischen NIR-Kanal und RGB-Intensität, zwischen NIR-Kanal und R-G-NIR-Intensität sowie zwischen NIR-Kanal und R-G-B-NIR-Intensität gebildet und grafisch dargestellt. Das Resultat änderte sich jeweils nur sehr geringfügig, deshalb soll hier nicht weiter darauf eingegangen werden. Es wurde bewusst die Entscheidung getroffen, weiterhin, das heißt auch für den NIR-Kanal, mit der RGB Intensität zu arbeiten. Begründet wird dieser Schritt mit der Tatsache, dass auf diese Weise eine Konsistenz zwischen RGB und RGNIR gewährleistet ist und dass die RGB Intensität auf fundierten, begründbaren Argumenten basiert. Für den Verlauf des NIR-Kanals existieren dagegen vorab keine Erwartungen. Aus diesem Grund kann die RGB Intensitäts-Differenz durchaus als Referenz herangezogen werden, da keine absoluten, sondern relative Vergleiche erstellt werden. Das Ergebnis ist in Abb. 30 dargestellt. Zusätzlich wurde der NDVI berechnet, skaliert mit Faktor 10, da andernfalls kaum eine Schwankung erkennbar wäre.

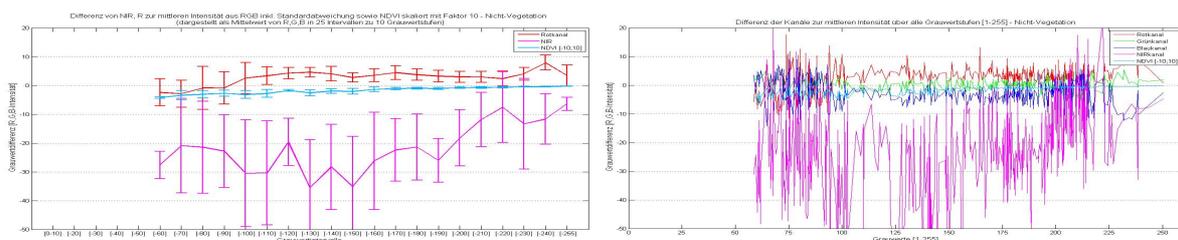


Abb. 30 Das gleiche Testgebiet wie in Abb. 26 für befestigten Untergrund, in rosa der NIR- Kanal mit dem beschriebenen bauchigen Verlauf, in türkis der errechnete NDVI, links: 25 Intervalle, rechts: alle Werte.

Man sieht, dass der NIR-Kanal stark ausschlägt und Grauwertdifferenzen von über 50 im Vergleich zur mittleren Intensität aufweist. Dies entspricht 20% des gesamten Grauwertspektrums und wird daher als sehr hoch angesehen. Folgendes ist dennoch ersichtlich. Ein Kreuzen des NIR-Kanals mit dem Rotkanal, wie es in Abb. 31 der Fall ist, ist ein Indiz für ein nicht zufriedenstellendes Ergebnis der Analyse des NIR-Bereichs. Diese Aussage kann nicht generalisiert werden, aber sie hilft bei der Einschätzung der Erwartungen.

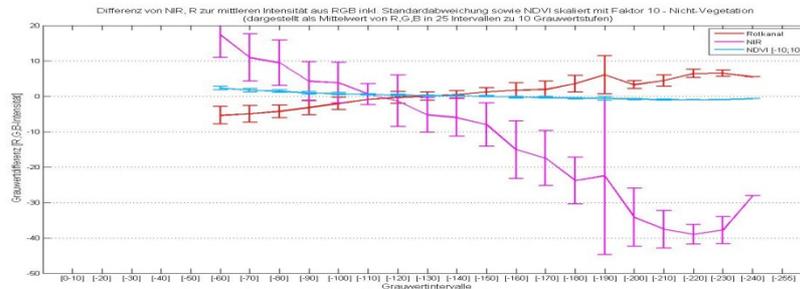


Abb. 31 Kreuzung der Kanäle von Rot und NIR

Auf Grund der enormen Schwankungsbreite und des oft unregelmäßigen und unerwarteten Verlaufs erwies sich diese Art der Analyse für den NIR-Kanal nur als bedingt hilfreich. Allerdings kann sie für den geübten Betrachter Informationen enthalten bzw. Erwartungen bestätigen und sollte daher nicht ignoriert werden.

6.2.4.2 Methodik für die Untersuchungen des NIR-Bereichs mit Hilfe des NDVI

DOPs werden oft herangezogen, um eine automatische Klassifizierung durchzuführen. Hierbei spielt der NIR-Kanal eine viel größere Rolle als bei der ausbalancierten Farbgebung. Eine automatische Klassifizierung ist nur möglich, wenn die im DOP enthaltene radiometrische Information den Ansprüchen genügt, also in erster Linie eine klare Trennung von Vegetation und Nicht-Vegetation möglich ist. Ist dies nicht der Fall, kann eine weitere Differenzierung der Hauptklassen nicht erfolgen. Eine Aussage über die visuelle Erscheinung lässt sich daraus nicht formulieren. Ob diese Bedingung der Trennungsmöglichkeit erfüllt ist, kann anhand einer visuellen Beurteilung nicht beantwortet werden. In diesem Fall muss das Datenmaterial einer statistischen Prüfung unterzogen werden.

Es existieren mittlerweile verschiedene Vegetationsindices. In dieser Arbeit wurde der NDVI zur Analyse herangezogen. Der Grund dafür liegt darin, dass dieser Index weit verbreitet ist und sich häufig für die Klassifikation von Vegetation bewährt hat. Darüber hinaus kann der NDVI relativ einfach berechnet werden. Ob der NDVI der am besten geeignete Index zur Trennung von Vegetation und Nicht-Vegetation ist wurde im Zuge dieser Diplomarbeit nicht untersucht.

Wie bei den bisherigen Untersuchungen wird vorausgesetzt, dass das vorhandene Datenmaterial möglichst den gesamten Grauwertbereich von dunkel bis hell sowie beschattete und unbeschattete Flächen abdeckt, um ein möglichst umfassendes Ergebnis zu erhalten. Bereits im Vorfeld dieser Arbeit wurde angenommen, dass 0 als Grenze für die Trennung von Vegetation und Nicht-Vegetation geeignet sein könnte. Es schien jedoch relativ unwahrscheinlich, dass ein generalisierter Grenzwert für sämtliche Daten das optimale Ergebnis liefert. Das gesamte Datenmaterial wurde für die

Untersuchungen wieder in die zwei bekannten Hauptklassen und deren jeweils vier Unterklassen differenziert. Für jede dieser acht Unterklassen wird nun der prozentuale Anteil an Musterflächen ermittelt, der mit Hilfe des generalisierten Grenzwerts seiner Klasse korrekt getrennt werden kann:

NDVI für befestigte Flächen und befestigte Flächen-beschattet < 0

NDVI für Vegetationsflächen und Vegetationsflächen-beschattet > 0

Die bis dahin vermutete Schranke von 0 musste also zum einen überprüft werden. Zum anderen sollte eine Methode entwickelt werden, um das bestmögliche Ergebnis zu erhalten, das mit einem einzelnen Grenzwert pro Datensatz erhalten werden kann. Die Methode der Grauwertdifferenzen und Regressionsgeraden haben sich für den NIR bzw. den daraus abgeleiteten NDVI nicht bewährt. Es wurden daher die NDVIs von Vegetation und Nicht-Vegetation gegenüber gestellt und direkt untersucht. Das Ergebnis ist in folgender Abbildung illustriert.

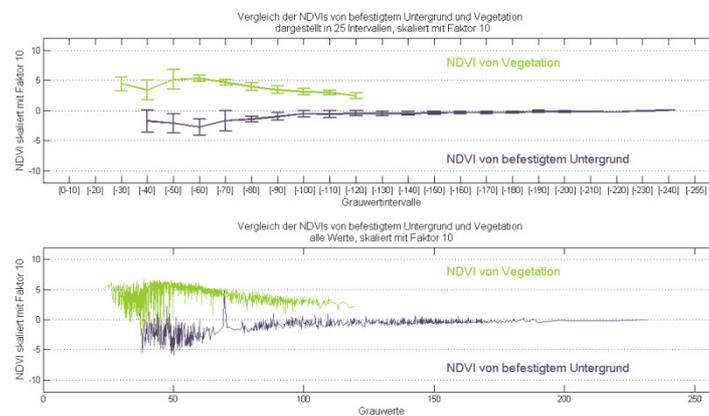


Abb. 32 Darstellung der NDVIs eines Testbeispiels von befestigtem Untergrund vs. Vegetation. Oben: 25 Intervalle, Unten: alle Werte. Im dunklen Bereich ist ein größeres Rauschen feststellbar.

Man erkennt, dass sich die beiden NDVIs asymptotisch in etwa 0 annähern und sich somit die Vermutung bestätigt, dass der Grenzwert 0 einen günstigen Vergleichswert darstellt. Nachdem die Trennbarkeit anhand mehrerer Beispiele empirisch festgestellt wurde, sollten die erlangten Erkenntnisse zahlenmäßig festgehalten werden. Es sollte wieder die Voraussetzung eingehalten werden, dass die Methode mit vertretbarem Aufwand anwendbar ist. Es wurden zwei Bedingungen formuliert, die für jedes Testgebiet individuell getestet werden sollen:

1.) Betrachtet wird die Darstellung der 25 Intervalle. Die minimale Voraussetzung für einen sinnvollen Grenzwert zur Trennung von Vegetation und Nicht-Vegetation kann gefunden werden, wenn der kleinste Mittelwert des Vegetations-NDVIs größer ist als der größte Mittelwert des NDVIs von befestigtem Untergrund.

$$\min(\bar{x}_{veg}) > \max(\bar{x}_{Bef}) \quad (6.2)$$

Wenn Bedingung (1) erfüllt ist wird die Differenz der beiden jeweiligen Mittelwerte gebildet und gemittelt. Das Ergebnis stellt den errechneten Grenzwert dar. Die zweite Bedingung lautet:

2.) Der bestmögliche Grenzwert unter den gegebenen Voraussetzungen kann gefunden werden, wenn Bedingung (1) erfüllt ist und zusätzlich der minimale Vegetations-Mittelwert minus dessen Standardabweichung noch immer größer ist als der maximale Mittelwert von befestigtem Untergrund plus dessen Standardabweichung. Die Mittelung dieser Differenz ergibt den Grenzwert.

$$\min(\bar{x}_{veg}) - \sigma_{\min(\bar{x}_{veg})} > \max(\bar{x}_{Bef}) + \sigma_{\max(\bar{x}_{Bef})} \quad (6.3)$$

Sollte auch Bedingung (2) erfüllt sein, ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass eine klare und zufriedenstellende, jedoch nicht zwangsläufig perfekte Trennung zwischen Vegetation und Nicht-Vegetation möglich ist. Grund dafür ist, dass es zum einen in den beschatteten und dunklen Bereichen des Grauwertspektrums häufig zu größerem Rauschen kommt und in weiterer Folge zu stark variierenden NDVI-Werten für beide Klassen. Dies zeigt sich auch in den Ergebnissen, bei denen vor allem in den beschatteten Bereichen schlechtere Ergebnisse erzielt wurden. Zum anderen werden Mittelwerte für die Analyse herangezogen, die eine gewisse Unsicherheit mit sich bringen. Wie auch bei den Untersuchungen des RGB-Bereichs wurde das Hauptaugenmerk auf die Darstellung der 25 Intervalle gelegt. In diesem Fall enthält auch die Darstellung aller Werte wichtige Informationen, vor allem über das Rauschverhalten. Anhand dieser Darstellung ist das größere Rauschen in den dunkleren Bereichen und in den Schattenbereichen zu erkennen.

6.3 HISTOGRAMMBEURTEILUNG

Wie in Kap. 2.5.1 beschrieben können mit Hilfe von Histogrammen die im Bild enthaltenen Grauwerte und deren Häufigkeit visuell dargestellt werden. Man erhält dadurch Informationen, wie gut der vorhandene Grauwertbereich ausgenutzt wurde und in vielen Fällen auch ob ein „stretching“ durchgeführt wurde. Zusätzlich wird ersichtlich, ob die verschiedenen Spektralkanäle, vor allem Rot und NIR, den Grauwertbereich in ähnlicher Weise ausnützen. Ergibt sich hierbei eine markante Differenz ist dies ein Indiz dafür, dass die Kanäle getrennt voneinander bearbeitet wurden und in weiterer Folge auch die Analyse kein zufriedenstellendes Ergebnis liefert. Im Zuge dieser Arbeit wurden keine Histogrammbeurteilungen durchgeführt. Es ist jedoch möglich, dass Untersuchungen und Vergleiche der Histogramme der in dieser Arbeit verwendeten Testdaten Muster erkennen lassen. Da die Histogramme vom Bildinhalt abhängen wird man nur sehr schwer eindeutige Grenzen formulieren können. Möglicherweise könnte mit Hilfe von statistischen Verteilungswerten untersucht werden, ob sich für positive und negative Beispiele charakteristische Histogrammverläufe oder Kennzahlen finden lassen anhand derer Aussagen über die Qualität getroffen werden können. Sollte durch diese Methode eine Automatisierung für die Beurteilung von DOPs ermöglicht werden, würde dies einen Fortschritt im Vergleich zur derzeitigen Methode bedeuten, die Zeit- und Personalaufwand erfordert.

7 UNTERSUCHUNGEN ZUR ERMITTLUNG VON SCHWELLWERTEN FÜR DIE BEURTEILUNG

In Kapitel 6 wurden Methoden entwickelt, anhand derer eine analytische Darstellung der Bildinhalte möglich ist. Der nächste Schritt besteht darin festzustellen, ob mit Hilfe dieser Methoden eine objektive, also mit Zahlen begründbare Beurteilung der analysierten Daten erfolgen kann. In Kapitel 5 wurde erläutert, dass zwei Gruppen von Testgebieten ausgewählt wurden. Ziel dieser Untersuchungen war es herauszufinden, ob sich zwischen den beiden Gruppen signifikant unterschiedliche Resultate ergeben, anhand derer eine Unterteilung in „zufriedenstellend“ bzw. „nicht zufriedenstellend“ für zukünftige Analysen möglich ist. Weiters soll die Frage beantwortet werden, ob ein Zusammenhang zwischen den Resultaten der RGB-Analyse und der NIR-Analyse besteht. Die oben erläuterten Methoden für den RGB-Bereich und den CIR-Bereich wurden daher auf sämtliche Testgebiete der beiden Gruppen angewandt.

7.1 RGB-BEREICH

7.1.1 BEFESTIGTE FLÄCHEN

Die beiden Parameter Steigung k und Achsabstand d der Regressionsgeraden dienen als Maß für die Qualität (vgl. Kap. 6.2.3.1 ab Seite 49). Wenn die Annahme zutrifft, dass ausgewogen graue Testflächen der Gruppe „Positiv“ annähernd horizontale Regressionsgeraden mit einem geringen Achsabstand um 0 ergaben, sollte sich in den Untersuchungen eine deutliche Clusterung (Häufung) der Datenpunkte in einem engen Bereich zeigen, wohingegen bei der Gruppe „Negativ“ eine breitere Streuung erwartet wurde. Zu Anfang bestand die Analyse darin, die Geradensteigung gegen den Achsabstand in der Mitte des Grauwertspektrums (also bei Intervall Nr. 12, entspricht Grauwerten 110 bis 120) darzustellen, um allfällige extreme Werte zu Beginn und am Ende des Spektrums zu vermeiden. Auf Grund des häufig auftretenden Kreuzens der Kurven der einzelnen Kanäle konnte diese Methode das Datenmaterial nicht repräsentativ wiedergeben. Der Kreuzungspunkt liegt oft im Bereich der mittleren Intervalle, deshalb wäre der Achsabstand in diesem Bereich oft sehr klein und eine objektive Beurteilung des Geradenverlaufs wäre unmöglich. Stattdessen wurde dazu übergegangen, jeweils die Achsabstände des ersten und des letzten Intervalls heranzuziehen, für das ein Mittelwert berechnet werden konnte, also in dem Grauwerte vorhanden waren. Der Vorteil besteht darin, dass dadurch einerseits gegebenenfalls das Kreuzen erkannt werden kann, ohne die Farbverlaufskurven für jedes einzelne Testgebiet zu kennen, andererseits wird die gesamte Grauwertdifferenz ersichtlich, die jede Regressionsgerade von Beginn bis zum Ende des abgedeckten Spektrums durchläuft. Weiters wurden zusätzlich die absoluten Grauwertdifferenzen jeder Regressionsgerade als Balkendiagramm dargestellt.

Abb. 33 zeigt die Resultate für die Testgruppe „Positiv“ und Abb. 34 die Resultate für Testgruppe „Negativ“. Die Abbildungen zu den Testgebieten werden ab Kap. 5.1.2 vorgestellt.

Die Analyse wurde für die Aggregationsstufe 25 Intervalle durchgeführt. Die Abbildungen links stellen die beiden Parameter der Regressionsgeraden dar. Auf der Abszisse ist die Steigung aufgetragen, auf der Ordinate der Achsabstand des Anfangsintervalls (+) und Endintervalls (o). Die Abbildungen auf der rechten Seite zeigen, wie viele absolute Grauwertdifferenzen die jeweiligen Regressionsgeraden des R-, G-, und B-Kanals von Beginn bis Ende der Intervalle durchlaufen. Je geringer die Steigung, desto parallel verläuft die Gerade zur mittleren Intensität und desto geringer ist die Anzahl der absolut durchlaufenen Grauwertdifferenzen. Da aus den beiden oberen Grafiken nicht zu entnehmen ist, ob die Geraden in der Nähe von 0 verlaufen oder einen vertikalen Offset aufweisen, stellt die untere Grafik die Lage der jeweiligen Gerade dar.

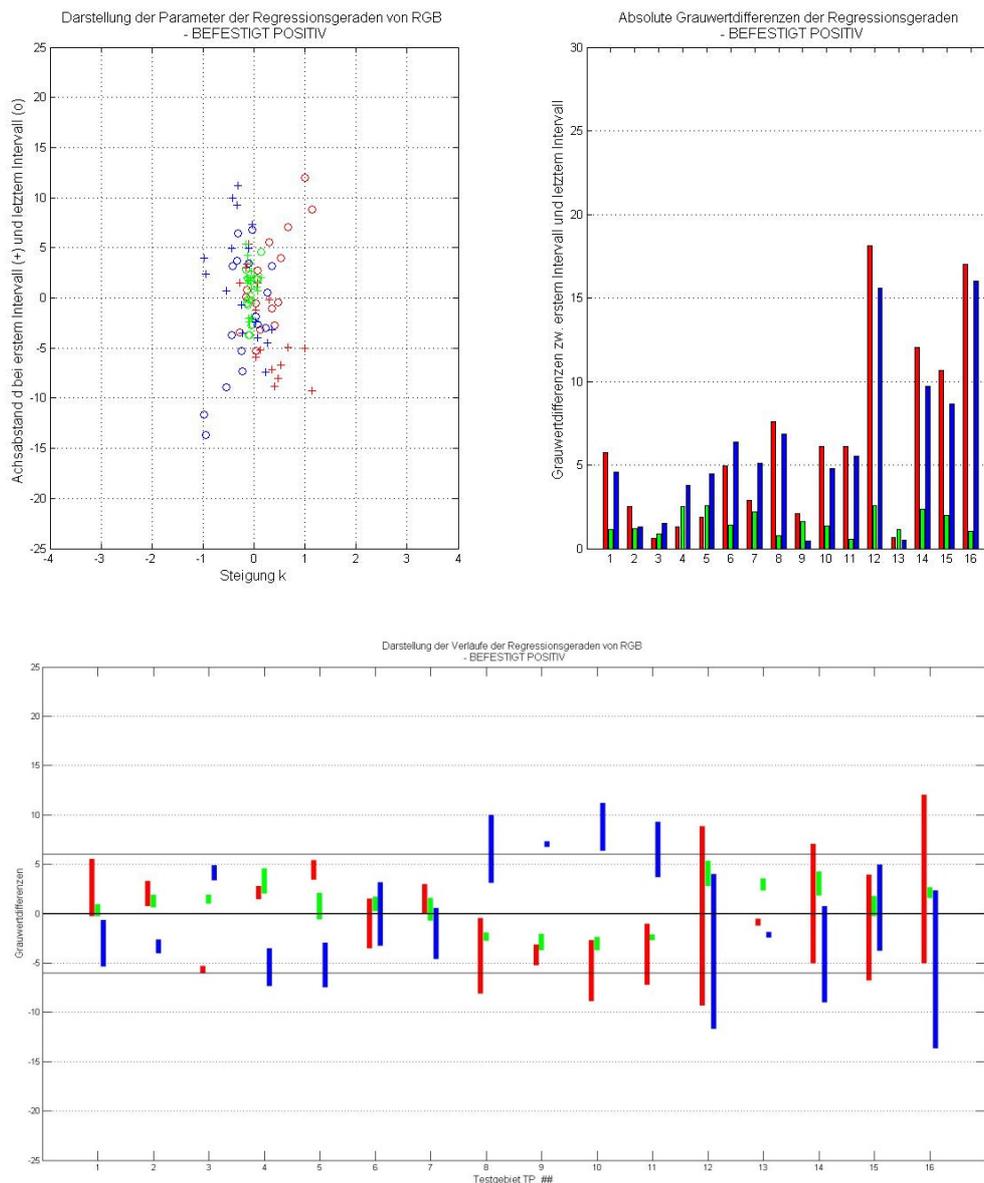


Abb. 33 Resultate Testgruppe „Positiv“. Links oben: Darstellung der Steigung und des Achsabstands, Rechts oben: Absolute Grauwertdifferenzen vom ersten bis zum letzten Intervall, Unten: Zusätzlich zur Steigung (Länge der Balken) ist die absolute Lage der Geraden um die mittlere Intensität (Nulllinie) ersichtlich. Die beiden anderen durchgehenden Linien liegen bei ± 6 Grauwertdifferenzen.

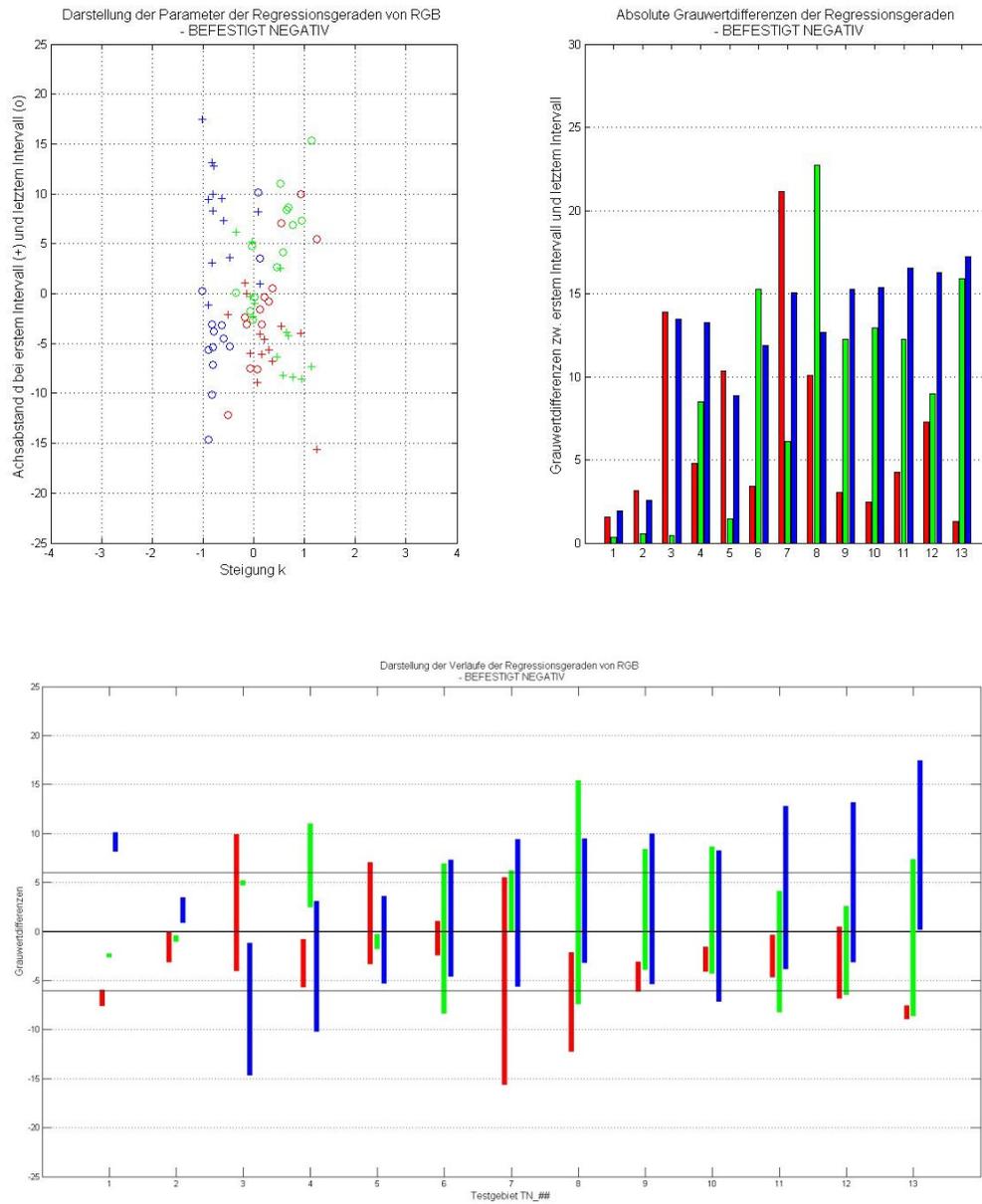


Abb. 34 Resultate der Testgruppe „Negativ“

Folgendes ist aus den Grafiken zu entnehmen:

- Die Datenpunkte der linken Grafik von „Positiv“ weisen eine deutliche Häufung im Zentrum auf. Dies ist bei der Testgruppe „Negativ“ nicht feststellbar (Grafik l. o.).
- In 7/16 Gebieten (44%) von „Positiv“ liegen alle drei Farbverläufe innerhalb von 5 absoluten Grauwertdifferenzen (Grafik r. o.). Bei „Negativ“ wären das 2/13 oder 15%. Darüber hinaus liegen die Farbverläufe von weiteren fünf Testgebieten von „Positiv“ unter 8 Grauwertdifferenzen, also in Summe 12/16 (75%), während das bei „Negativ“ auf kein weiteres Gebiet zutrifft.

- Der Grünkanal durchläuft bei „Positiv“ in keinem Fall mehr als 5 Grauwertdifferenzen (Grafik r. o.). Er ist demnach in allen Analysen der Testgruppe „Positiv“ der ausgewogenste. In der Testgruppe „Negativ“ kann dieses Verhalten des Grünkanals nicht beobachtet werden. Gründominanzen kommen hier in gleicher Weise vor, wie es bei Rot und Blau der Fall ist.
- Die beiden oberen Grafiken helfen dabei, die Geradenparameter sowie deren absolute Grauwertdifferenzen zu erfassen. Ein Verlauf über nur wenige Grauwertstufen allein bedeutet jedoch nicht zwangsläufig, dass die Gerade um 0 verläuft. Den beiden unteren Grafiken aus Abb. 33 und Abb. 34 ist die tatsächliche Lage der Regressionsgeraden zu entnehmen (ob die Geraden steigen oder fallen, kann nicht entnommen werden). Wie man sieht kommt es vor, dass Geraden annähernd horizontal verlaufen, aber dennoch einen deutlichen vertikalen Offset aufweisen. Ein Beispiel hierfür ist der Blaukanal von TN_1, der nur 1.5 Grauwertdifferenzen durchläuft, diese jedoch bei einer Differenz von ca. 10 GWS zur mittleren Intensität. Zusätzlich zu den Vorgaben der absoluten Grauwertdifferenzen wird für eine durchgreifende Beurteilung empfohlen, einen Bereich an Grauwertdifferenzen zu definieren, innerhalb dessen alle drei Regressionsgeraden eines Datensatzes zu jedem Zeitpunkt verlaufen sollen.
Für die durchgeführten Tests hat sich folgendes ergeben: 6/16 Gebieten von „Positiv“ verlaufen stets innerhalb von ± 6 Grauwertdifferenzen und weitere 7 innerhalb von ± 10 Grauwertdifferenzen. In Summe also 13/16 (81%).
Für die Gruppe „Negativ“ ergeben sich folgende Werte: 1/13 innerhalb von ± 6 Grauwertdifferenzen und weitere fünf innerhalb von ± 10 Grauwertdifferenzen. In Summe also 6/13 (46%).
- Das Kreuzen von Rot und Blau kann in beiden Testgruppen erkannt werden (Grafik l. o.). Die blauen + befinden sich tendenziell bei positivem Achsabstand und negativer Steigung („links oben“), was eine Dominanz in den dunklen Grauwertbereichen bedeutet, die mit steigender Intensität abnimmt. Die roten + sind eher bei negativem Achsabstand und positiver Steigung zu finden („rechts unten“), was genau dem umgekehrten Verhalten des blauen Kanals entspricht. In der Grafik der Testgruppe „Positiv“ fallen die Kreuzungen weniger deutlich aus.
- *Kommentar zu TP_12 und TP_16 sowie zu TN_1, TN_2:*
TP_12 und TP_16 wirken zwar relativ dunkel, jedoch nicht gravierend im Vergleich zu anderen Testgebieten. Die Ergebnisse konnten bei visueller Nachkontrolle nicht nachempfunden werden.

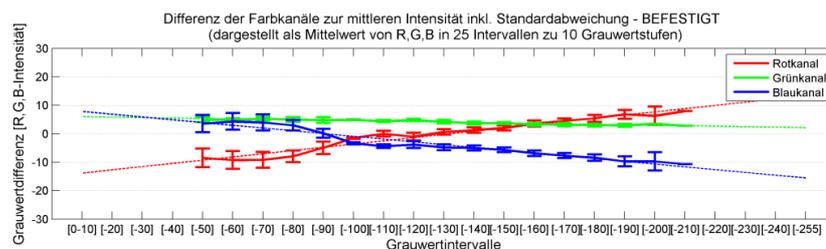


Abb. 35 Verlauf von TP_12

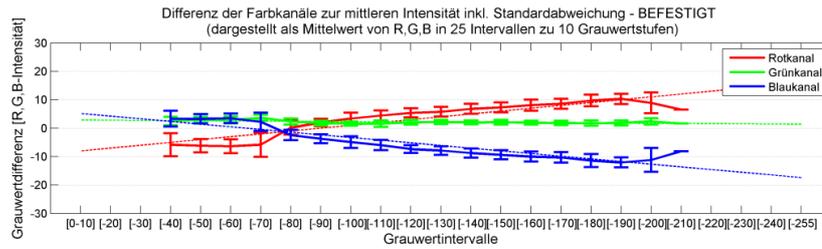


Abb. 36 Verlauf von TP_16

Das Auseinanderdriften der Farbkanäle sowie deren hohe Grauwertdifferenzen waren nicht zu erwarten. IN TP_16 dominiert der Rotkanal, was auf einen Rotstich im Bild hindeutet. Auf Grund der dunklen Darstellung des Testgebietes konnte dies visuell nicht erkannt werden.

Das Los, in denen die Gebiete TN_1 und TN_2 enthalten sind, erscheint in der Gesamtdarstellung visuell äußerst unansprechend. Das Los erscheint global sehr flau, „fleckig“ und unnatürlich mit geringen Kontrasten, wie in den Abbildungen von Kap. 5.1.2 ersichtlich ist. Bei dem hohen Detailfaktor der Testgebiete fällt das negative Gesamtbild des Loses nicht mehr auf. Offenbar enthalten die Testgebiete in sich jeweils eine lokale homogene Farbgebung, die durch die angewandte Methode ein insgesamt zufriedenstellendes Los erwarten lässt. Diese Tatsache ist eine Bestätigung für die Empfehlung, dass die erste Kontrolle eines Loses immer visuell durch einen geübten Betrachter stattfinden sollte. Das besagte Los würde zur Nachbearbeitung und ansprechenderen Visualisierung reklamiert werden, obwohl die statistische Analyse ein gutes Resultat ergibt.

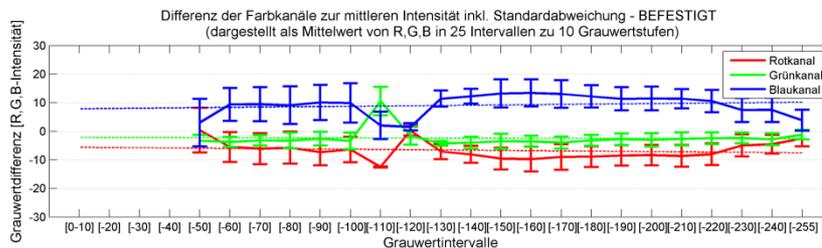


Abb. 37 Verlauf von TN_1

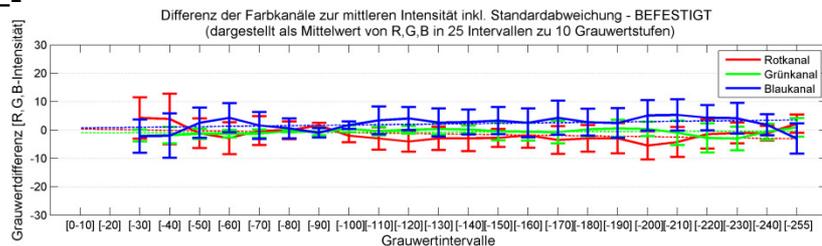


Abb. 38 Verlauf von TN_2

7.1.1.1 Schlussfolgerungen

Das Ziel, Kriterien und Schwellwerte zur objektiven Beurteilung von DOPs zu entwickeln, kann wie folgt kommentiert werden. Auf Grund einer Vielzahl durchgeführter Analysen wurde viel Erfahrung über die Aussagekraft der entwickelten Methode gewonnen. Die Erwartungen über das Verhalten der Regressionsgeraden konnten bestätigt werden. In visuell gefälligen DOPs, die eine homogene Farbgebung über das Los aufweisen und in denen kein Farbstich zu erkennen ist, kann erwartet werden, dass die Regressionsgeraden von grauen, befestigten Flächen einen annähernd horizontalen Verlauf um die mittlere Intensität aufweisen.

Die in dieser Arbeit vorgestellte Methodik zur Beurteilung des RGB-Bereichs ermöglicht eine objektive Beurteilung des Bildinhaltes, die mit vertretbarem Aufwand durchführbar ist. Es wird jedoch empfohlen, alle Aspekte der Regressionsgeraden zu betrachten und nicht nur einen ausgewählten. Die Methode ist in der Lage, unausgewogene Farbverläufe aufzuzeigen und anhand einiger weniger Kriterien zu beschreiben, sie vermag jedoch die visuelle Beurteilung nicht vollständig zu ersetzen.

Mit derzeitigem Wissensstand wird die Anwendung von Schwellwerten zur Beurteilung nach folgenden Kategorien empfohlen:

Qualitätskategorie (1):

Wenn ein Testgebiet beide folgenden Bedingungen erfüllt, kann das Ergebnis als äußerst zufriedenstellend angesehen werden.

- Keiner der drei Multispektralkanäle soll von Anfang bis Ende des abgedeckten Spektrums **mehr als fünf** Grauwertdifferenzen durchlaufen.
- Zusätzlich zu den durchlaufenen Grauwertdifferenzen sollen die Regressionsgeraden zu jedem Zeitpunkt innerhalb des **Bereichs von ± 6** Grauwertdifferenzen verlaufen.

Beispiele für Testgebiete, die diese Ansprüche erfüllen sind TP_2, TP_3 und TP_13.

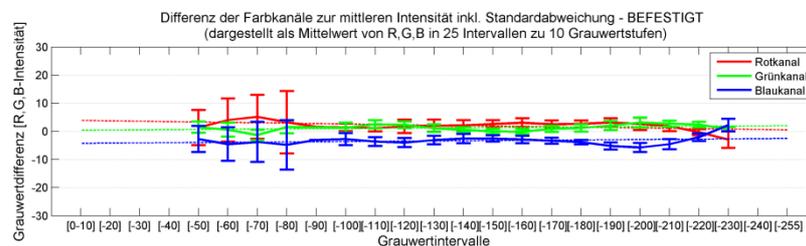


Abb. 39 Verlauf von TP_2

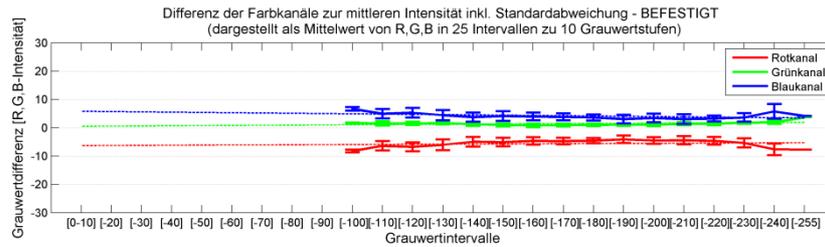


Abb. 40 Verlauf von TP_3

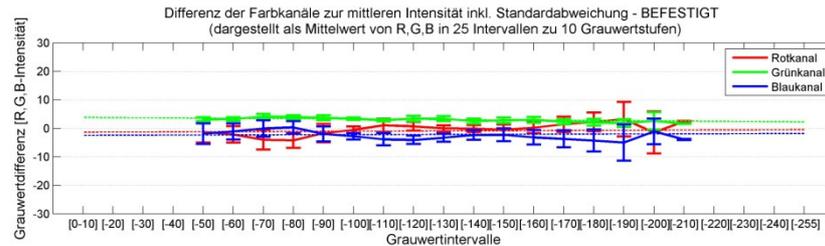


Abb. 41 Verlauf von TP_13

Für eine grobe Beurteilung können folgende Schwellwerte herangezogen werden.

Qualitätskategorie (2):

- Keiner der drei Multispektralkanäle soll von Anfang bis Ende des abgedeckten Spektrums **mehr als acht** Grauwertdifferenzen durchlaufen.
- Zusätzlich zu den durchlaufenen Grauwertdifferenzen sollen die Regressionsgeraden zu jedem Zeitpunkt innerhalb des **Bereichs von ± 10** Grauwertdifferenzen verlaufen.

Wenn ein Testgebiet diese Voraussetzungen erfüllt wird empfohlen, die visuelle Darstellung mit einzubeziehen und eine individuelle Entscheidung zu treffen, ob das Los den Ansprüchen genügt.

Testgebiete der *Qualitätskategorie (3)*, also jene Gebiete, die die Schwellwerte von Qualitätskategorie (2) übersteigen, sollen erneut prozessiert werden. Es wurde anhand diverser Analysen festgestellt, dass durch erneutes Prozessieren der DOPs eine deutliche Verbesserung der Resultate erzielbar ist. Es ist demnach möglich, die Testergebnisse von Orthophotos, die nicht den Kriterien entsprechen, soweit zu verbessern, dass sie den Anforderungen genügen.

7.1.2 VEGETATION

Zusätzlich zu befestigtem Untergrund, der ja üblicherweise nur einen Teil des tatsächlichen Bildinhaltes repräsentiert, wurden auf die gleiche Weise auch die Daten der Hauptklasse „Vegetation“ visualisiert und analysiert. Wurde bei Nicht-Vegetation das 1%-Quantil entfernt, so wurde entschieden, bei Vegetation das 99%-Quantil zu entfernen, da sich Ausreißer hier am helleren Ende des Spektrums zeigten. Es sollte untersucht werden, ob die Verläufe der Grauwertdifferenzen von den Vegetationsklassen ein charakteristisches Verhalten aufweisen. Da für Vegetation keine Annahmen in der Art werden getroffen können, wie es bei befestigtem Untergrund der Fall war, bestanden die Untersuchungen darin zu überprüfen, ob eine Korrelation bei visueller Beurteilung der Grafiken zwischen dem Verhalten von befestigtem Untergrund und Vegetation feststellbar ist. Abgesehen von der Tatsache, dass der Grünkanal bei Vegetation wie erwartet sehr dominant war, wurde festgestellt, dass die Verläufe der Regressionsgeraden von Vegetation keinem erkennbaren Muster folgen. Folgende Resultate ergaben sich.

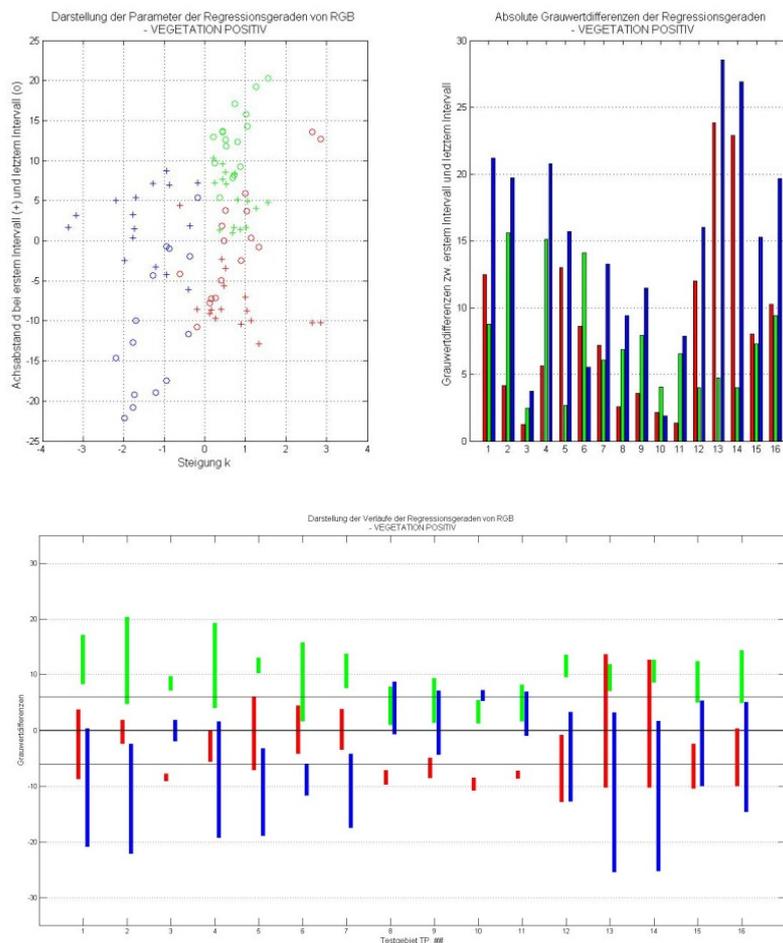


Abb. 42 Resultate der Testgruppe „Positiv“ – Vegetation

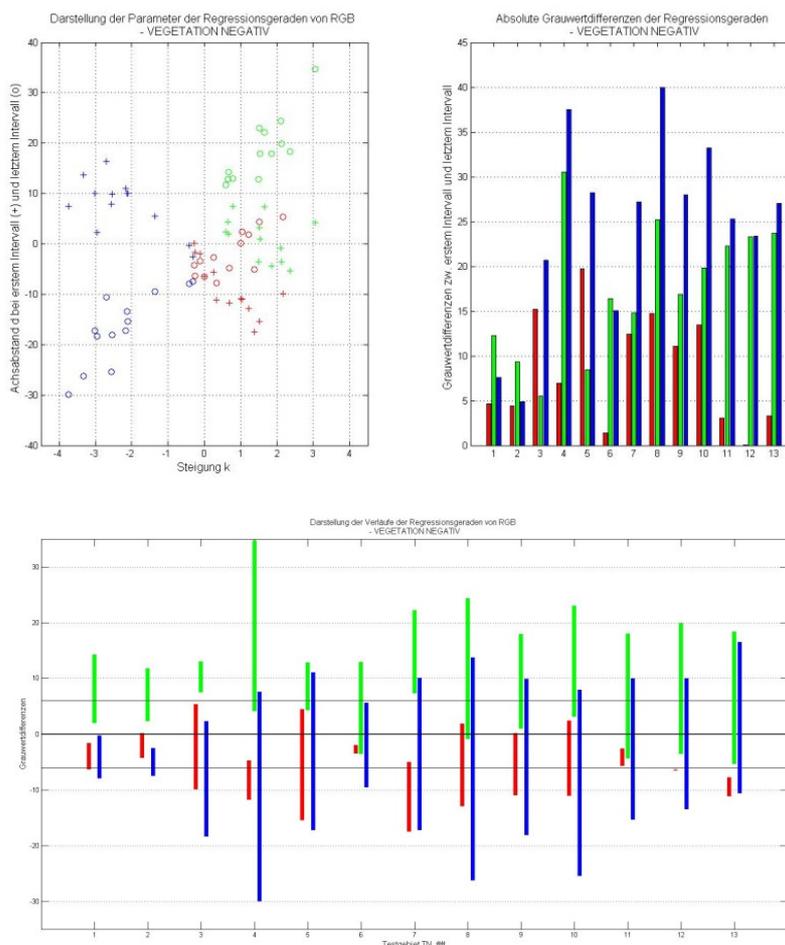


Abb. 43 Resultate der Testgruppe „Negativ“ - Vegetation

Es konnte keine eindeutige Korrelation festgestellt werden. Tendenziell liegen die Datenpunkte der Testgruppe „Positiv“ weiter im Zentrum und die absoluten Grauwertdifferenzen sind geringer. Eindeutige und allgemein gültige Aussagen über das Verhalten von Vegetation zu treffen ist anhand der vorliegenden Analyse nicht möglich. Die Streuung der Datenpunkte ist bei beiden Testgruppen deutlich ausgeprägter als bei grauen Flächen. Die Dominanz des Grünkanals wird ersichtlich durch die Tatsache, dass sowohl die + als auch die o von Grün tendenziell über den Datenpunkten von Rot und Blau zu liegen kommen. Das Kreuzen von Rot und Blau ist auch hier wieder feststellbar. Alles in allem ergibt sich der Farbverlauf der Regressionsgeraden von Vegetation als extremer. Die Achsen beider Grafiken mussten verändert werden, um die Daten vollständig darstellen zu können. Grauwertdifferenzen von 30 und mehr kommen bei Vegetation durchaus vor.

Aussagen über das Verhalten der Farbkanäle von Vegetation anhand von Informationen über den Verlauf von befestigten Flächen können nicht getroffen werden. Um mit der Hilfe von Vegetationsklassen eine umfassendere Beurteilung des Bildinhalts zu ermöglichen, sind weitere Untersuchungen erforderlich.

7.1.3 FAZIT DER ANALYSE DES RGB-BEREICHS

Zusammenfassend können anhand der Untersuchung folgende Schlüsse gezogen werden:

- Das vorgestellte Verfahren ergänzt die subjektive bzw. von äußeren Rahmenbedingungen (Monitor, Raumbeleuchtung, Bildinhalte) beeinflusste visuelle Beurteilung. Es objektiviert die Prüfung der Farbgebung im RGB-Bereich mit statistischen Zahlen und Fakten. Vergleiche zwischen mehreren Testgebieten sowie zwischen Erstprozessierung und etwaiger Nachprozessierung sind relativ einfach durchführbar.
Die Methodik leistet hingegen keine Beurteilung von lokalen/globalen Kontrasten oder ob Übersättigungen vorkommen. Inwieweit der Grauwertbereich eines Testgebiets ausgenutzt wurde kann anhand der erhaltenen Grauwertverläufe erkannt werden.
- Die Erwartung, dass die Farbkanäle von grauen, befestigten Flächen von homogenen, visuell ansprechenden Testgebieten bis auf geringe Abweichungen in der Nähe der mittleren Intensität verlaufen, wurde bestätigt. Eine ausgewogene, natürliche Farbgebung im RGB-Bereich ist mit Hilfe grauer, befestigter Flächen gut nachvollziehbar.
- Für eine objektive Beurteilung reicht es nicht aus, nur die absoluten Grauwertdifferenzen, die die Geraden durch das Grauwertspektrum durchlaufen, zu berücksichtigen. Um eine umfassende Aussage treffen zu können, sollte auch die Information mit einbezogen werden, in welchem Abstand zur mittleren Intensität die Geraden verlaufen.
- Auf Grund der Untersuchungen war es möglich, Empfehlungen zu formulieren, die für eine objektive und konsistente Beurteilung herangezogen werden können. So kann bei derzeitigem Wissensstand davon ausgegangen werden, dass Testgebiete, die beide Bedingungen aus Qualitätskategorie (1) erfüllen, ohne weitere Begutachtung akzeptiert werden können. Jene Testgebiete, die den Bedingungen aus Qualitätskategorie (2) entsprechen sollten unter Hinzunahme des visuellen Erscheinungsbildes individuell beurteilt werden. Für Testgebiete der Qualitätskategorie (3) wird empfohlen, eine erneute Prozessierung durchzuführen, um ein zufriedenstellendes Ergebnis zu erhalten. Tab. 4 fasst die empfohlenen Schwellwerte nochmals zusammen.

Tab. 4 Zusammenfassung der empfohlenen Qualitätskriterien

	Absolut durchlaufene Grauwertdifferenzen zwischen erstem und letztem Intervall	Verlauf innerhalb von [GWS]	Erfüllt von TP_#	Erfüllt von TN_#
Qualitätskategorie (1)	max. 5	±6	2, 3, 13	2
Qualitätskategorie (2)	max. 8	±10	1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11	1
Qualitätskategorie (3)	>8	>10	10, 12, 14, 15, 16	3-13

- Obwohl die Verläufe in den meisten Fällen den Vermutungen entsprachen, kann nicht ausgeschlossen werden, dass sowohl positive als auch negative Ausnahmen vorkommen. Die visuelle Beurteilung ist durch diese Methodik nicht zu ersetzen.
- Jene Untersuchungen, die in Analogie zu grauen, befestigten Flächen mit der Klasse „Vegetation“ durchgeführt wurden, enthielten keine weiteren Informationen. Dies war zu erwarten. Dennoch wurde dadurch festgestellt, dass keine visuell erkennbare Korrelation zwischen den beiden Hauptklassen vorhanden ist.

7.2 NIR-BEREICH

Für die Untersuchungen des NIR-Bereichs wurden die in 6.2.4.2 erwähnten Bedingungen formuliert. Es ging beim NIR-Bereich im Gegensatz zum RGB-Bereich nicht darum, einen allgemein gültigen Schwellwert zu definieren, anhand dessen eine Beurteilung erfolgt. Die Erscheinung des CIR-Bildes sollte weiterhin grob mittels visueller Beurteilung geprüft werden. Vielmehr wurde untersucht, ob sich die Kriterien zur Trennbarkeit von Vegetation und Nicht-Vegetation bewähren und ob die Qualität des RGB-Bereichs in einem direkten Zusammenhang mit den Resultaten des NIR-Bereichs steht. Es ist hier zu erwähnen, dass die Entwicklung der Methodik darauf abzielte, die Beurteilung anhand eines Grenzwertes bewerkstelligen zu können. Mit aufwändigeren Modellen und feineren Kriterien ist eine Steigerung der Trennbarkeit sehr wahrscheinlich, die leichte Umsetzbarkeit würde jedoch darunter leiden. Es wurde darauf geachtet, Musterflächen der Hauptklassen in sämtlichen Grauwertbereichen zu erfassen, sodass das ganze Spektrum bestmöglich abgedeckt ist. Es wurde hingegen noch nicht untersucht, ob die Methode für eine weitere Differenzierung, das heißt auch für andere Nicht-Vegetationsklassen, durchgreifend ist. Bevor mit der NDVI-Analyse begonnen werden konnte, musste daher festgestellt werden, ob sich die NDVIs anderer Nicht-Vegetationsklassen ähnlich wie graue befestigte verhalten, sodass deren Resultat generell als repräsentativ für Nicht-Vegetation angesehen werden kann. Der große Vorteil darin bestünde in der Tatsache, dass nicht für sämtliche Unterklassen Musterflächen zu messen wären. Wenn die diversen Unterklassen von Nicht-Vegetation signifikant unterschiedliche NDVI-Verläufe ergeben, kann eine zuverlässige Aussage über die Trennbarkeit anhand grauer, befestigter Flächen nicht erfolgen.

7.2.1 VALIDIERUNG DER NDVI-ANALYSE MIT ZUSÄTZLICHEN NICHT-VEGETATIONSKLASSEN

Um die Aussagekraft der Resultate von grauen, befestigten Flächen zu evaluieren war es daher zunächst notwendig, zu den bisher definierten Musterflächen weitere Nicht-Vegetations Unterklassen hinzuzufügen und für sie ebenfalls Musterflächen zuzuweisen. Es wurden folgende Unterklassen ergänzt:

- „Eternitdächer“ – graue Dächer, nicht zwangsläufig ausschließlich Eternit
- „Ziegeldächer“ – rote und orangefarbene Dächer (Ziegel sowie andere rötliche Dachflächen)
- „Offener Boden“

Begründet wird diese Entscheidung mit der Tatsache, dass Hausdächer in DOPs naturgemäß häufig vertreten sind. Die Unterscheidung zwischen „Eternitdächern“ und „Ziegeldächern“ erschien sinnvoll, weil sie auf der einen Seite ein völlig unterschiedliches Erscheinungsbild haben. Während Eternitdächer eher grau-violett wirken, sind Ziegeldächer deutlich rot dominiert. Dies ist auch der Grund warum eine Verifizierung der Untersuchungen des RGB-Bereichs mit diesen Klassen nicht durchgeführt wird. Für die Forderungen des RGB-Bereichs erfüllen diese beiden Klassen nicht die Voraussetzung grau zu sein. Zum anderen galt es zu klären, ob zwischen diesen beiden Klassen unterschieden werden muss. Obwohl beide ganz eindeutig zu Nicht-Vegetation zu zählen sind, war nicht klar, ob sie sich ähnlich verhalten oder zum Beispiel teilweise Unkraut oder andere Grünpflanzen vereinzelt auf den Dächern zu finden sind, die das Ergebnis verfälschen.

Die dritte Klasse wurde ausgewählt um zu untersuchen, ob offener Boden eindeutig zu Nicht-Vegetation gezählt werden kann. Auf offenem Boden besteht immer die Möglichkeit, dass kleine Pflanzen oder Unkrautbewuchs vorhanden sind. Wenn dies der Fall ist, würde der NDVI verfälscht und eine eindeutige Trennung könnte vermutlich nicht mehr erfolgen.

Zur Validierung wurden drei Testgebiete (TV_1 bis TV_3), die in keiner der beiden bisherigen Testgruppen vorkamen, ausgewählt und Musterflächen gemessen. Anschließend wurde die Methode der NDVI-Analyse getrennt für die drei zusätzlichen Klassen durchgeführt. Dazu ist zu sagen, dass TV_1 und TV_2 dieselben Musterflächen enthalten. Sie unterscheiden sich hingegen darin, dass TV_2 einer Nachprozessierung von TV_1 entspricht. Konkret wurde in TV_1 das Ergebnis der NDVI-Analyse, speziell für „Befestigt-beschattet“ reklamiert. Das Kreuzen des Rot- und NIR-Kanals und der enge Verlauf insgesamt im dunklen Bereich ließen ein entsprechendes Ergebnis vermuten.

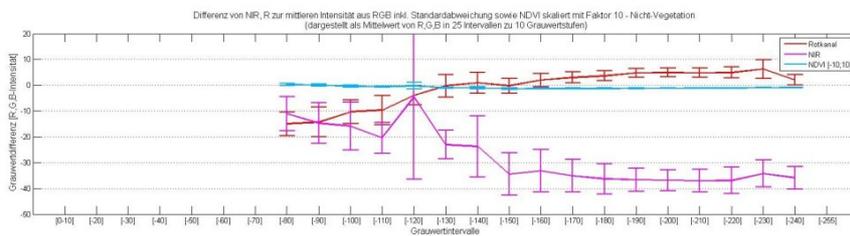


Abb. 44 Kreuzen des NIR-Bereichs von TV_1 im dunklen Bereich und Peak bei Intervall Nr. 12

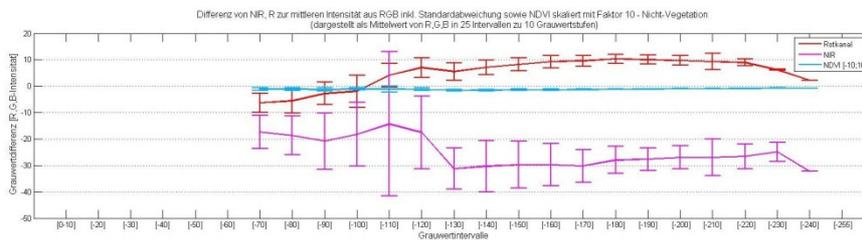


Abb. 45 In der Grafik von TV_2 kommt es zu keiner Kreuzung mehr zwischen Rot und NIR. Der Peak in Intervall Nr. 12 ist abgeschwächt. Das Ergebnis auf Seite 73 drückt die Verbesserung zwischen TV_1 und TV_2 für „Befestigt-beschattet“ in Zahlen aus

Nachfolgend sind die Ergebnisse für die Testgebiete angeführt. Jede Zusatzklasse für sich wurde mit dem NDVI von Vegetation verglichen. Am Ende sind jeweils die Ergebnisse angeführt, die sich ergaben, wenn sämtliche Unterklassen mit einbezogen werden. Die Formulierung der Bedingungen ist in 6.2.4.2 auf Seite 56 nachzulesen.

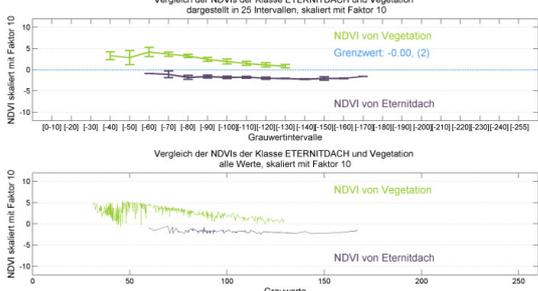
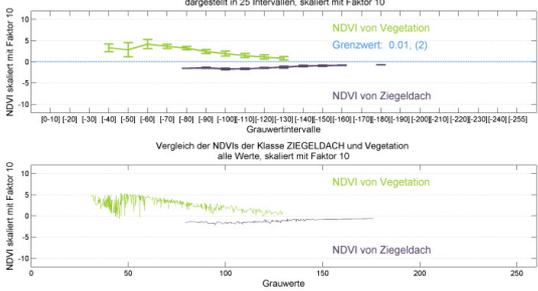
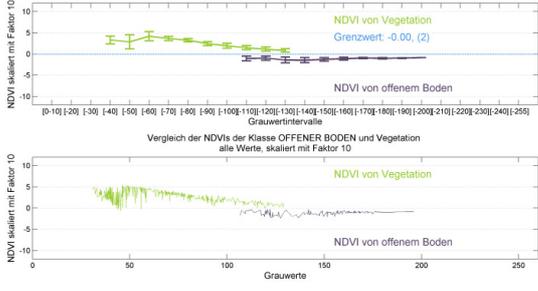
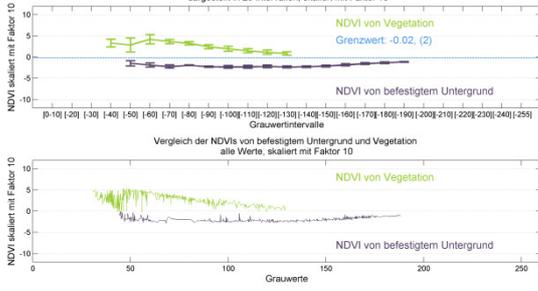
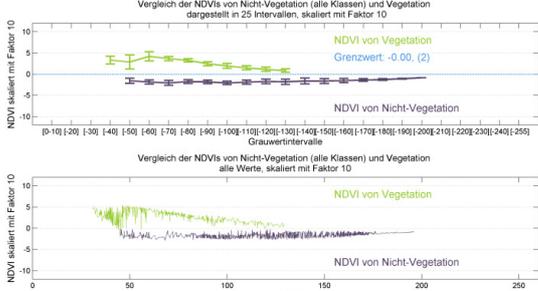
7.2.1.1 Resultate TV_1

	Grenzwert	0	0,06 Bedingung (2)
	Eternitdach	95,8%	100%
	Grenzwert	0	0,03 Bedingung (2)
	Ziegeldach	100%	100%
	Grenzwert	0	0,07 Bedingung (2)
	Offener Boden	92,2%	98,6%
	Grenzwert	0	0,06 Bedingung (1)
	Befestigt	99,6%	99,9%
	Grenzwert	0	0,06 Bedingung (1)
	Nicht-Vegetation (Alle 7 Klassen)	98,7%	99,8%
	Vegetation	99,5%	98,8%
	Vegetation-beschattet	98,3%	98,3%
	Vegetation	99,5%	99,5%
	Vegetation-beschattet	98,3%	98,3%
	Vegetation	99,5%	98,8%
	Vegetation-beschattet	98,3%	98,3%
	Vegetation	99,5%	99,8%
	Vegetation-beschattet	98,3%	98,3%
	Vegetation	99,5%	99,2%
	Vegetation-beschattet	98,3%	98,3%

7.2.1.2 Resultate TV_2

<p>Vergleich der NDVIs der Klasse ETERNITDACH und Vegetation dargestellt in 25 Intervallen, skaliert mit Faktor 10 Grenzwert: 0,03, (2)</p> <p>Vergleich der NDVIs der Klasse ETERNITDACH und Vegetation alle Werte, skaliert mit Faktor 10</p>	Grenzwert	0	0,03 Bedingung (2)
	Eternitdach	100%	100%
	Vegetation	99,7%	99,5%
	Vegetation- beschattet	97,8%	95%
<p>Vergleich der NDVIs der Klasse ZIEGELDACH und Vegetation dargestellt in 25 Intervallen, skaliert mit Faktor 10 Grenzwert: 0,03, (2)</p> <p>Vergleich der NDVIs der Klasse ZIEGELDACH und Vegetation alle Werte, skaliert mit Faktor 10</p>	Grenzwert	0	0,03 Bedingung (2)
	Ziegeldach	100%	100%
	Vegetation	99,7%	99,5%
	Vegetation- beschattet	97,8%	95%
<p>Vergleich der NDVIs der Klasse OFFENER BODEN und Vegetation dargestellt in 25 Intervallen, skaliert mit Faktor 10 Grenzwert: 0,10, (2)</p> <p>Vergleich der NDVIs der Klasse OFFENER BODEN und Vegetation alle Werte, skaliert mit Faktor 10</p>	Grenzwert	0	0,10 Bedingung (2)
	Offener Boden	87,9%	100%
	Vegetation	99,7%	98,7%
	Vegetation- beschattet	97,8%	89%
<p>Vergleich der NDVIs von befestigtem Untergrund und Vegetation dargestellt in 25 Intervallen, skaliert mit Faktor 10 Grenzwert: 0,03, (2)</p> <p>Vergleich der NDVIs von befestigtem Untergrund und Vegetation alle Werte, skaliert mit Faktor 10</p>	Grenzwert	0	0,03 Bedingung (2)
	Befestigt	99,7%	99,8%
	Befestigt - beschattet	94,4%	97,2%
	Vegetation	99,7%	99,5%
<p>Vergleich der NDVIs von Nicht-Vegetation (alle Klassen) und Vegetation dargestellt in 25 Intervallen, skaliert mit Faktor 10 Grenzwert: 0,03, (2)</p> <p>Vergleich der NDVIs von Nicht-Vegetation (alle Klassen) und Vegetation alle Werte, skaliert mit Faktor 10</p>	Grenzwert	0	0,03 Bedingung (2)
	Nicht- Vegetation (Alle 7 Klassen)	98,9%	99,4%
	Nicht- Vegetation beschattet	94,4%	97,2%
	Vegetation	99,7%	99,5%
Vegetation- beschattet	97,8%	95%	

7.2.1.3 Resultate TV_3²

	Grenzwert	0	0,00 Bedingung (2)
	Eternitdach	100%	100%
	Vegetation	99,5%	99,5%
	Vegetation- beschattet	97,2%	97,2%
	Grenzwert	0	0,01 Bedingung (2)
	Ziegeldach	100%	100%
	Vegetation	99,5%	99,5%
	Vegetation- beschattet	96,3%	94,4%
	Grenzwert	0	0,00 Bedingung (2)
	Offener Boden	100%	100%
	Vegetation	99,5%	99,5%
	Vegetation- beschattet	96,3%	95,3%
	Grenzwert	0	-0,02 Bedingung (2)
	Befestigt	100%	100%
	Befestigt - beschattet	98,1%	97,1%
	Vegetation	99,5%	100%
	Grenzwert	0	0,00 Bedingung (2)
	Nicht- Vegetation (Alle 7 Klassen)	100%	100%
	Nicht- Vegetation beschattet	98,1%	98,1%
	Vegetation	99,5%	99,5%
	Vegetation- beschattet	96,3%	95,3%

² Bei TV_3 ist teilweise trotz gleicher Grenzwerte ein geringfügig anderes Ergebnis angegeben. Dies liegt daran, dass der berechnete Grenzwert nicht exakt 0 ist. Die Differenz liegt stets innerhalb von 2 Musterflächen und ist zu vernachlässigen.

Die Ergebnisse der zusätzlichen Testklassen korrespondieren in hohem Maße mit jenen der Klasse „Befestigt“. Sowohl die Resultate mit Grenzwert 0 als auch jene der optimalen Grenzwerte entsprechen einander bis auf minimale Diskrepanzen. Es konnten für alle drei Testgebiete durchwegs sehr gute Resultate erzielt werden, die in einem Großteil der Fälle sogar den Anspruch erfüllen, über 97% zu liegen. Wie bisher wurde dies am ehesten in den Schattenbereichen nicht erzielt. Das Ermitteln, welche Trennbarkeitsbedingungen gegeben waren, half dabei, optimale Grenzwerte anzuwenden. Auch die Untersuchungen, in denen sämtliche Nicht-Vegetationsklassen berücksichtigt wurden (unterste Grafik von 7.2.1.1-3), ergaben vergleichbare Trennbarkeitsquoten und in allen drei Testbeispielen konnte zumindest Bedingung (1) erfüllt werden.

Diese Resultate lassen den Schluss zu, dass es nicht notwendig ist, Musterflächen sämtlicher Nicht-Vegetationsklassen in die Analyse mit einfließen zu lassen. Alle drei weisen ein annähernd gleiches NDVI-Verhalten wie bei grauen, befestigten Flächen auf. Die Rotdominanz von Ziegeldächern oder eventuelle vereinzelt vorkommende Vegetation innerhalb der Flächen von offenem Boden wirken sich offenbar nicht auf den Verlauf der NDVIs aus.

7.2.2 RESULTATE DER NDVI-ANALYSE FÜR DIE TESTGRUPPE „POSITIV“

Nachdem gezeigt wurde, dass die Ergebnisse der Klasse „Befestigt“ stellvertretend für Nicht-Vegetation angesehen werden kann, wurden die Untersuchungen der Testgebiete durchgeführt. Die Testgebiete wurden nach den Gesichtspunkten der NDVI-Analyse getestet um zu sehen, wie häufig Bedingung (2), Bedingung (1) bzw. keine Bedingung erfüllt ist. Die Resultate für die Testgruppe „Positiv“ sind in Tab. 5 angeführt.

Tab. 5 Ergebnisse der NDVI-Analyse, Testgruppe Positiv

	Grenzwert v. Bedingung (2)	Grenzwert v. Bedingung (1)	Keine Bedingung erfüllt
TP_1		0,05	
TP_2	0,03		
TP_3	0,06		
TP_4	0,01		
TP_5	-0,02		
TP_6	0,02		
TP_7	0,01		
TP_8	-0,09		
TP_9	-0,12		
TP_10	-0,10		
TP_11	0,03		
TP_12	0,19		
TP_13			X
TP_14			X
TP_15	0,12		
TP_16		0,08	
Anzahl	12	2	2

In 75% der Testgebiete (12/16) waren Bedingung (1) und (2) erfüllt, in 12,5% der Testgebiete (2/16) nur Bedingung (1). Bei ebenfalls 12,5% konnte kein sinnvoller Grenzwert ermittelt werden. Anhand der Zahlen in der Tabelle erkennt man, dass sich sowohl positive als auch negative Grenzwerte ergaben, was wiederum darauf schließen lässt, dass 0 einen günstigen generalisierten Grenzwert darstellt, wenn keine weiteren Analysen des vorhandenen Datenmaterials erfolgen sollen. Interessant ist, dass bei TP_12 ein Grenzwert von fast 0,20 ermittelt wurde, was sehr hoch ist wenn man bedenkt, dass sich in den meisten Untersuchungen der NDVI von Nicht-Vegetation 0 angenähert hat. Es gibt also offenbar „Ausreißer“, bei denen diese Tatsache nicht zutrifft, das Kriterium einer klaren Trennbarkeit aber grundsätzlich dennoch erfüllt ist. Würde man auf dieses Testgebiet nur den generalisierten Grenzwert verwenden, erhielte man ein sehr schlechtes Ergebnis. Nachdem festgestellt war, dass für die „positiven“ Testgebiete eine Trennbarkeit von Vegetation und Nicht-Vegetation zu 75% (inkl. Bedingung (1) zu 87,5%) möglich ist, bestand der nächste Schritt darin, die Güte der Trennung zu untersuchen. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass ein zufriedenstellendes Resultat in den nicht-beschatteten Klassen höher priorisiert wird als die Ergebnisse in den beschatteten Bereichen.

Tab. 6 zeigt Ergebnisse der Testgebiete, sowohl für den generellen Schwellwert 0 als auch für die individuell ermittelten. Es wurde ein Ampelsystem mit folgenden Parametern angewandt:

Verbesserung um mehr als 1%
Schwankung um $\pm 1\%$
Verschlechterung um bis zu 5%
Verschlechterung um mehr als 5%

Tab. 6 Detaillierte Ergebnisse für die Trennbarkeit von Vegetation und Nicht-Vegetation für die Testgruppe „Positiv“. Die Prozentangaben stehen für den Anteil an Musterflächen, der mit Hilfe des jeweiligen Grenzwertes seiner Klasse korrekt zugeordnet werden konnte.³

Testgebiet	Klassen	Bedingung	Grenzwert 0 [%]	Grenzwert ermittelt [%]	Differenz [%]
TP_1	Befestigt	(1)	100	100	0
	Befestigt-beschattet		100	100	0
	Vegetation		99,8	99,8	0
	Vegetation-beschattet		82,1	73,1	-9
TP_2	Befestigt	(2)	100	100	0
	Befestigt-beschattet		100	100	0
	Vegetation		100	100	0
	Vegetation-beschattet		98,4	95,9	-2,5
TP_3	Befestigt	(2)	98,2	100	1,8
	Befestigt-beschattet		87,1	97,1	10
	Vegetation		100	99,6	-0,4
	Vegetation-beschattet		100	100	0
TP_4	Befestigt	(2)	100	100	0
	Befestigt-beschattet		100	100	0
	Vegetation		100	99,7	-0,3
	Vegetation-beschattet		85,2	81,8	-3,4
TP_5	Befestigt	(2)	100	100	0
	Befestigt-beschattet		100	100	0
	Vegetation		99,4	100	0,6
	Vegetation-beschattet		72,5	73,6	1,1
TP_6	Befestigt	(2)	100	100	0
	Befestigt-beschattet		99,4	100	0,6
	Vegetation		99,6	99,4	-0,2
	Vegetation-beschattet		84	75	-9
TP_7	Befestigt	(2)	99,6	100	0,4
	Befestigt-beschattet		98,6	100	1,4
	Vegetation		99,6	99,6	0
	Vegetation-beschattet		92,9	91,9	-1

³ Es wurden 16 Testgebiete mit jeweils 4 Unterklassen untersucht, in Summe erhielt man demnach 64 Trennbarkeitsquote

TP_8	Befestigt	(2)	100	99,3	-0,7
	Befestigt-beschattet		97,3	94,6	-2,7
	Vegetation		98,6	100	1,4
	Vegetation-beschattet		87	99,4	12,4
TP_9	Befestigt	(2)	100	100	0
	Befestigt-beschattet		95,2	92,9	-2,4
	Vegetation		99,1	100	0,9
	Vegetation-beschattet		90,7	99,3	8,6
TP_10	Befestigt	(2)	100	99,7	-0,3
	Befestigt-beschattet		98,9	94,5	-4,4
	Vegetation		98,7	100	1,3
	Vegetation-beschattet		86,8	98,8	12
TP_11	Befestigt	(2)	100	100	0
	Befestigt-beschattet		79,7	87,5	7,8
	Vegetation		100	99,4	-0,6
	Vegetation-beschattet		99,3	99,3	0
TP_12	Befestigt	(2)	77,8	100	22,2
	Befestigt-beschattet		5,9	91,2	85,3
	Vegetation		100	99,4	-0,6
	Vegetation-beschattet		100	100	0
TP_13	Befestigt	X	75,4	100	24,6
	Befestigt-beschattet		0	68,8	68,8
	Vegetation		100	98,6	-1,4
	Vegetation-beschattet		100	100	0
TP_14	Befestigt	X	40	99,1	45,1
	Befestigt-beschattet		0	70,5	70,5
	Vegetation		100	95,1	-4,9
	Vegetation-beschattet		100	100	0
TP_15	Befestigt	(2)	91,5	100	8,5
	Befestigt-beschattet		90,3	98,1	7,8
	Vegetation		100	99,6	-0,4
	Vegetation-beschattet		96,1	87,3	-8,8
TP_16	Befestigt	(1)	97,7	99,6	1,9
	Befestigt-beschattet		90,1	97,7	7,6
	Vegetation		100	100	0
	Vegetation-beschattet		99	95,9	-3,1

- Eine Verbesserung mit dem individuell ermittelten Schwellwert konnte in 31% (20/64, inkl. TP_13 und TP_14) der Testklassen erreicht werden, wobei hier darauf hinzuweisen ist, dass für diese Testgruppe der Schwellwert 0 bereits sehr gute Ergebnisse erzielt hat. Eine grobe Verschlechterung der Trennbarkeit ergab sich in 5% der Fälle (3/64), durchwegs in der Klasse beschattet Vegetation. Dies ist auf das bereits erwähnte große Rauschen in diesem Bereich zurückzuführen. In den anderen Klassen konnten dafür durchwegs sehr gute Ergebnisse erzielt werden.

- Insgesamt konnte eine Trennbarkeitsquote von mindestens 97% der Musterflächen für 75% (48/64, inkl. TP_13 und TP_14) der Klassen erreicht werden. Mit dem generalisierten Grenzwert 0 läge dieser Wert bei 67% (43/64). Darüber hinaus ist zu beachten, dass bei den Gebieten, deren Schwellwert nicht in der Nähe von 0 liegt, signifikante Verbesserungen erzielt wurden. Der ermittelte Grenzwert von Testgebiet TP_12 ergab sich zu 0,19. Die Trennbarkeitsquote von „Befestigt“ konnte um 22%, jene von „Befestigt-beschattet“ um 85% gesteigert werden.
- Für TP_13 und TP_14 war keine Bedingung erfüllt. Beide Testgebiete entstammen dem gleichen Los. Dies lässt den Schluss zu, dass der NIR-Kanal in diesem Los noch nicht ausreichend prozessiert ist, um die Anforderungen zu erfüllen. Im Folgenden sind die NDVI-Kurven der beiden Testgebiete abgebildet, um das Resultat visuell nachvollziehen zu können.

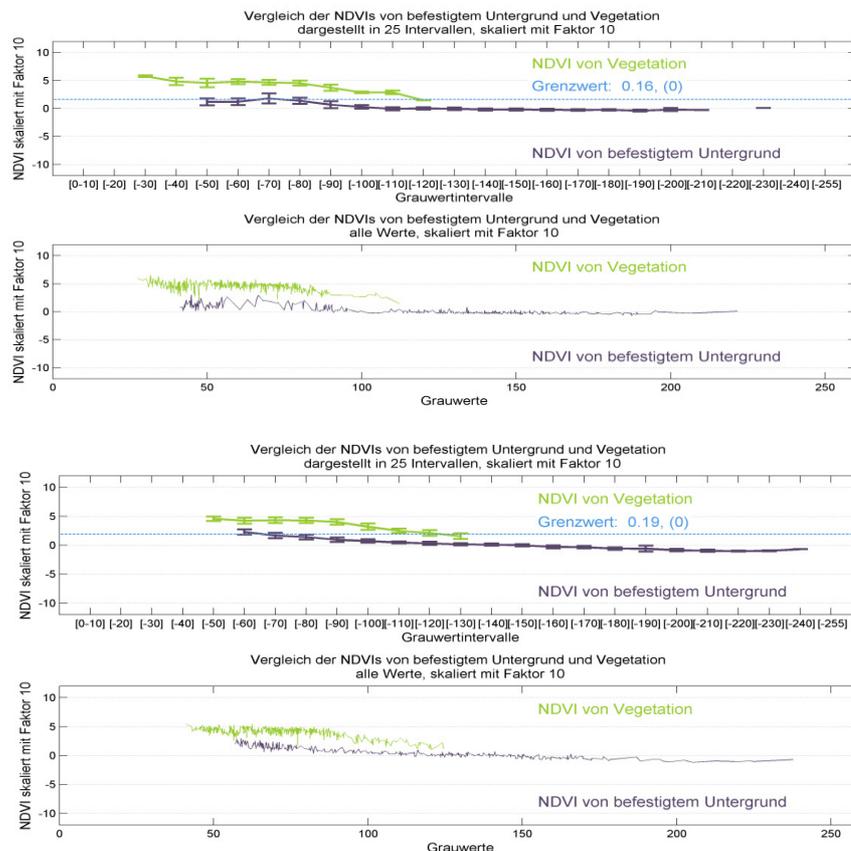


Abb. 46 Oben: NDVIs von TP_13, Unten: NDVIs von TP_14

Beide NDVIs zeigen zwar ein verhältnismäßig geringes Rauschen, der NDVI des befestigten Untergrunds verläuft jedoch in einem großen Bereich des Grauwertspektrums über 0. Dies hat zur Folge, dass der Grenzwert 0 äußerst schlechte Ergebnisse liefert. Der ermittelte Grenzwert ermöglicht Steigerungen um bis zu 70,5% (vgl.

Tab. 6). Dennoch ist die Trennbarkeitsquote in beiden Testgebieten, vor allem der Klasse „Befestigt-beschattet“, äußerst unzufriedenstellend. Diese beiden Testgebiete können als weiteres Beispiel dafür angesehen werden, dass nur eine kombinierte Aussage aus ermitteltem Grenzwert und erfüllten Bedingungen zu einem zuverlässigen Ergebnis führen. Folgende Grafik soll illustrieren, dass

man sich nicht darauf verlassen sollte einen ermittelten Grenzwert anzuwenden, ohne die Information welche Bedingungen erfüllt sind oder die NDVI-Grafik.

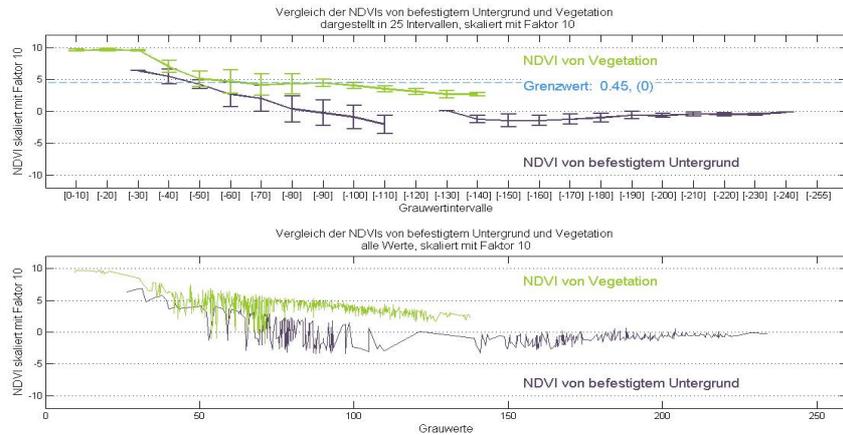


Abb. 47 Ungünstiges NDVI-Verhalten eines Datensatzes, der nicht für die Untersuchung verwendet wurde

Ein äußerst ungünstiger Verlauf des NDVIs von Nicht-Vegetation ist zu erkennen. Dieses Verhalten nachzuvollziehen ist nicht möglich ohne das Vorliegen der NDVI-Darstellung. Mit der Information ob eine, besser jedoch beide Bedingungen erfüllt sind kann es jedoch ausgeschlossen werden.

7.2.3 RESULTATE DER NDVI-ANALYSE FÜR DIE TESTGRUPPE „NEGATIV“

Die Resultate für die Testgruppe „Negativ“ sind in Tab. 7 angeführt.

Tab. 7 Ergebnisse der NDVI-Analyse, Testgruppe Negativ

	Grenzwert v. Bedingung (2)	Grenzwert v. Bedingung (1)	Keine Bedingung erfüllt
TN_1			X
TN_2		-0,02	
TN_3		0,03	
TN_4			X
TN_5	0,09		
TN_6	-0,01		
TN_7		0,23	
TN_8	0,08		
TN_9	0,10		
TN_10	0,08		
TN_11	0,05		
TN_12	0,13		
TN_13	0,10		
Anzahl	8	3	2

In 62% der Testgebiete (8/13) waren Bedingung (1) und (2) erfüllt, in 23% der Testgebiete (3/13) nur Bedingung (1). Bei 15% (2/13) konnte kein sinnvoller Grenzwert ermittelt werden. Zu den Resultaten dieser Testgruppe ist zu sagen, dass Bedingung (2) weniger häufig erfüllt wurde als bei Gruppe „Positiv“, in Summe jedoch in 85% der Fälle zumindest eine Bedingung erfüllt war. Dieser Wert entspricht relativ genau jenem der anderen Gruppe. Dies bestätigt zum einen die Vermutung, dass die Analyse des NIR-Bereichs anhand statistischer Kennwerte durchgeführt werden sollte, da es visuell kaum möglich ist. Zum anderen lässt das Ergebnis den Schluss zu, dass der RGB- und der NIR-Bereich nicht notwendigerweise korreliert sind. Über ein ansprechendes RGB-Orthophoto kann demnach keine verlässliche Aussage über das Verhalten und die Qualität des NIR-Kanals getroffen werden. Die nachfolgende Tabelle enthält die detaillierten Ergebnisse der Testgruppe „Negativ“.

Tab. 8 Detaillierte Ergebnisse für die Trennbarkeit von Vegetation und Nicht-Vegetation für die Testgruppe „Negativ“. Die Prozentangaben stehen für den Anteil an Musterflächen, der mit Hilfe des jeweiligen Grenzwertes seiner Klasse korrekt zugeordnet werden konnte.⁴

Testgebiet	Klassen	Bedingung	Grenzwert 0 [%]	Grenzwert ermittelt [%]	Differenz [%]
TN_1	Befestigt	X	99,4	99,6	0,2
	Befestigt-beschattet		91,2	100	8,8
	Vegetation		95,9	77	-18,9
	Vegetation-beschattet		96,9	84,9	-12
TN_2	Befestigt	(1)	98,9	96,8	-2,1
	Befestigt-beschattet		52	50,3	-1,7
	Vegetation		99,1	99,5	0,4
	Vegetation-beschattet		96,9	96	-0,9
TN_3	Befestigt	(1)	98,9	99,6	0,7
	Befestigt-beschattet		98,3	100	1,7
	Vegetation		99,7	99,5	-0,2
	Vegetation-beschattet		95	92,1	-2,9
TN_4	Befestigt	X	100	76,5	-23,5
	Befestigt-beschattet		98,4	98,4	0
	Vegetation		99,1	99,1	0
	Vegetation-beschattet		50	56,9	6,9
TN_5	Befestigt	(2)	86,8	99,8	13
	Befestigt-beschattet		80,7	98,2	17,5
	Vegetation		100	100	0
	Vegetation-beschattet		100	100	0
TN_6	Befestigt	(2)	99,5	99,3	-0,2
	Befestigt-beschattet		97,3	97,3	0
	Vegetation		99,9	99,9	0
	Vegetation-beschattet		92	92,6	0,6
TN_7	Befestigt	(1)	98,9	100	1,1
	Befestigt-beschattet		42,9	87,1	44,2
	Vegetation		100	95,5	-4,5
	Vegetation-beschattet		96,3	88,9	-7,4

⁴ Es wurden 13 Testgebiete mit jeweils 4 Unterklassen untersucht, in Summe erhielt man demnach 52 Trennbarkeitsquoten

TN_8	Befestigt	(2)	50	99,5	49,5
	Befestigt-beschattet		73,2	91,6	18,4
	Vegetation		99,6	97,5	-2,1
	Vegetation-beschattet		99,3	96	-3,3
TN_9	Befestigt	(2)	79,6	100	20,4
	Befestigt-beschattet		81,3	98,9	17,6
	Vegetation		99,7	97,9	-1,8
	Vegetation-beschattet		99,5	98,4	-1,1
TN_10	Befestigt	(2)	46,4	99,4	53
	Befestigt-beschattet		53,3	86,7	33,4
	Vegetation		100	98,5	-1,5
	Vegetation-beschattet		97,9	97,9	0
TN_11	Befestigt	(2)	86,3	100	13,7
	Befestigt-beschattet		75,6	88,9	13,3
	Vegetation		100	99,8	-0,2
	Vegetation-beschattet		99,5	97,7	-1,8
TN_12	Befestigt	(2)	65,7	100	34,3
	Befestigt-beschattet		66	96,2	30,2
	Vegetation		100	100	0
	Vegetation-beschattet		98,1	82,2	-15,9
TN_13	Befestigt	(2)	70,8	100	29,2
	Befestigt-beschattet		50,9	98,2	47,3
	Vegetation		100	99,3	-0,7
	Vegetation-beschattet		100	94,2	-5,8

- Eine Verbesserung mit dem individuell ermittelten Schwellwert konnte in 36% der Testklassen (19/52, inkl. TN_1 und TN_4) erreicht werden, eine grobe Verschlechterung ergab sich bei 11,5% (6/52, inkl. TN_1 und TN_4). Mit dem errechneten Grenzwert ergab sich eine Trennbarkeitsquote von mindestens 97% für 63% (33/52 inkl. TN_1 und TN_4) aller Testklassen. Mit dem generalisierten Grenzwert 0 läge dieser Wert bei 54% (28/52).
- Die groben Verschlechterungen treten abgesehen von den Testgebieten, in denen keine Bedingung erfüllt ist, wieder durchwegs in der Klasse „Vegetation-Schatten“ auf.
- Für TN_1 und TN_4 war keine Bedingung erfüllt. Hier ergab sich eine deutliche Verschlechterung der Trennbarkeitsquote auch innerhalb von nicht-beschatteten Flächen. So ergab sich eine in TN_1 für „Vegetation“ eine Verschlechterung um fast 19% und für TN_4 eine Verschlechterung von über 23% in der Klasse „Befestigt“. Im Folgenden sind die NDVI-Kurven der beiden Testgebiete abgebildet.

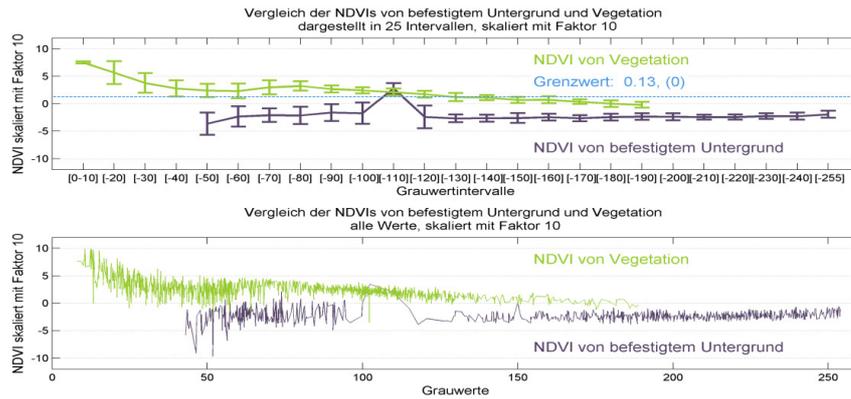


Abb. 48 NDVIs von TN_1

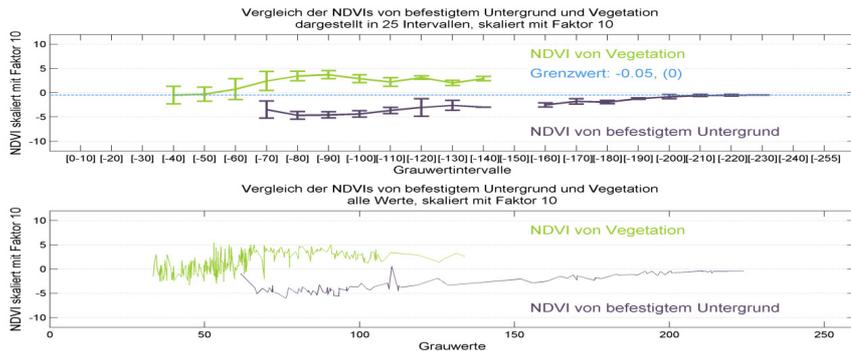


Abb. 49 NDVIs von TN_4

Der NDVI-Verlauf von befestigtem Grund in TN_1 zeigt einen deutlichen Peak im Intervall 100-110, der vermutlich durch eine Fehlzuweisung im Zuge der manuellen Klassifizierung zustande gekommen ist. Der berechnete Grenzwert wird dadurch verfälscht und das gesamte Ergebnis verschlechtert. Ein Peak wie dieser kann wieder durch die NDVI-Darstellung oder das Prüfen der Bedingungen ausgeschlossen werden. Obwohl die Resultate mit Grenzwert 0 für dieses Beispiel besser sind, können sie nicht als genügend angesehen werden.

Die Grafik von TN_4 lässt erkennen, dass in diesem Fall der NDVI von Vegetation teilweise deutlich unter 0 verläuft, während sich jener von befestigtem Untergrund erwartungsgemäß zeigt. Abgesehen von der Tatsache, dass es durch den ermittelten Grenzwert wegen des ungewöhnlichen NDVIs von Vegetation zu einer deutlichen Verschlechterung von „Befestigt“ kommt, liegt die Trennbarkeitsquote von „Vegetation-Schatten“ bei beiden Grenzwerten um ca. 50%, was in keinem Fall als genügend angesehen werden kann.

7.2.4 FAZIT DER NDVI-ANALYSE

Zusammenfassend können anhand dieser Untersuchung folgende Schlüsse gezogen werden:

- Die Trennbarkeit der beiden Hauptklassen ist ein Hauptkriterium für eine nachfolgende automatische Klassifizierung. Es wurde ein Weg gefunden, um objektive und fundierte Aussagen treffen zu können über das Verhalten des NDVI und eine mögliche Trennbarkeit der Klassen. Die Darstellung des NDVIs von grauen, befestigten Flächen gegen jenen von Vegetation hat sich als sehr hilfreich herausgestellt. Es lässt sich dadurch schnell feststellen, ob eine Trennung von Vegetation und Nicht-Vegetation möglich ist oder ob eine Neuprozessierung durchgeführt werden sollte.
- Wenn beide geforderten Bedingungen erfüllt sind, kann eine zufriedenstellende Trennung von Vegetation und Nicht-Vegetation der verwendeten Klassen erfolgen. Wenn nur Bedingung (1) zutrifft, sind die Resultate tendenziell schlechter, wobei auch in diesem Fall das Ergebnis den Ansprüchen genügen kann. Wenn keine Bedingung erfüllt ist, empfiehlt es sich, das Ergebnis zu hinterfragen. Keine erfüllte Bedingung ist nicht zwangsläufig ein Ausschlusskriterium, dennoch sollten zusätzliche Informationen wie die Gegenüberstellung der NDVIs berücksichtigt werden, bevor eine Entscheidung getroffen wird. Es kann in diesem Fall zu signifikanten Verschlechterungen des Ergebnisses im Vergleich zum Grenzwert 0 kommen.
- Für nicht-beschattete Flächen kann gefordert werden, dass 99% der Daten mit Hilfe des individuellen Grenzwerts korrekt zugeordnet werden.
- In den beschatteten Bereichen werden oft schlechtere Werte erreicht als in den beleuchteten. In den dunklen Bereichen ist in fast allen Daten ein erhöhtes Rauschen zu beobachten. Es können in diesem Bereich daher geringfügig niedrigere Trennungsquoten akzeptiert werden.
- Der RGB-Bereich und der NIR-Bereich eines DOPs sind nicht notwendigerweise korreliert. Es können aus den Resultaten der RGB-Analyse demnach keine Schlüsse über die Analyse des NIR-Bereichs gezogen werden.
- Ziel dieser Untersuchungen war es, den Grenzwert von 0 zu überprüfen und festzustellen, ob ein mit Hilfe eines individuell ermittelten Grenzwerts signifikant bessere Ergebnisse zu erzielen sind. 0 hat sich als brauchbarer Grenzwert erwiesen, wenn keine nähere Analyse des vorhandenen Datenmaterials durchgeführt werden soll. Der individuelle Grenzwert hat sich in den meisten Fällen wie erwartet als günstigere Alternative erwiesen. Obwohl auch mit dem Grenzwert 0 oft zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden konnten, ist ein vertikaler Versatz des NDVIs damit nicht festzustellen. Um diese Information zu erhalten, sollten entweder die NDVIs direkt verglichen oder die Information herangezogen werden, ob ein Grenzwert bei gleichzeitiger Erfüllung von mindestens einer Bedingung gefunden werden kann.

7.3 MUSTERBEISPIEL

Testgebiet TP_2 dient zur Demonstration, welche Resultate angestrebt und realistisch erreicht werden können. Im Folgenden sind Ausschnitte unterschiedlicher Detailstufen des RGB-Orthophotomosaiks dargestellt. Unabhängig von der Detailstufe wirkt die dargestellte Szene natürlich und entsprechend unserer Wahrnehmung. Auch bei eingehender Betrachtung und hohem Detailfaktor sind keine Farbstiche oder andere störende Fragmente zu erkennen. Die Schattenbereiche erfüllen ebenfalls die Voraussetzungen. Sie wirken nicht zu dunkel und es sind Details wie im Schatten befindliche Objekte sowie Gehsteigkanten etc. gut zu erkennen.



Für das DOP des oben abgebildeten Ausschnitts ergibt sich folgender Grauwertverlauf für befestigte Flächen.

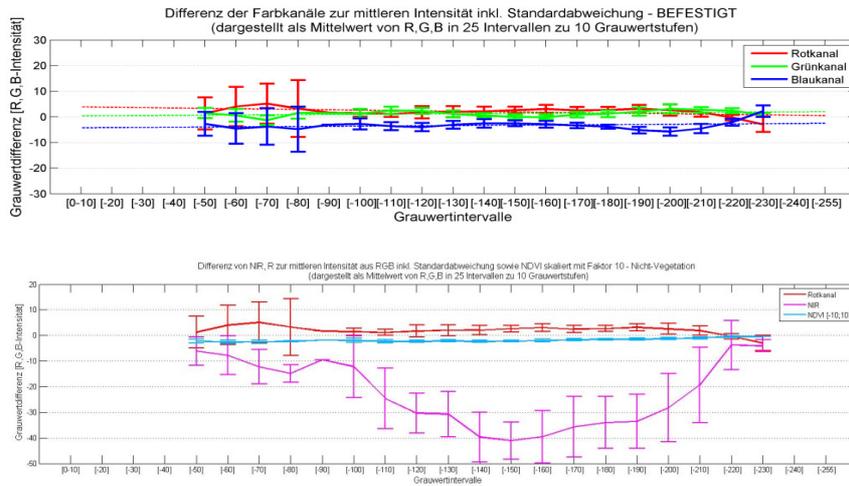


Abb. 50 Musterbeispiel TP_2, Verlauf der Diagrammkurven für befestigte, graue Flächen. Oben: RGB-Kanäle, Unten: Rot, NIR, NDVI

Der RGB-Verlauf der Grauwertdifferenzen erfüllt die Erwartungen bestmöglich. Ein horizontaler Verlauf der Regressionsgeraden um 0 ist erreicht. Im dunklen Bereich kann man anhand der größeren Standardabweichungen der Intervallmittelwerte das bereits erwähnte Rauschen erkennen. Alle drei Regressionsgeraden liegen über das gesamte Grauwertspektrum innerhalb eines Bereichs von ± 5 Grauwertdifferenzen. Kein Farbkanal dominiert in einem Bereich des Grauwertspektrums, es kommt zu keinem Kreuzen zwischen Rot und Blau. Zur fundierteren Einschätzung ist ebenfalls der Rotkanal und der NIR-Kanal dargestellt inkl. NDVI dargestellt. Der bauchige Verlauf tritt wieder auf; dies ist nur eine Feststellung und keine Bewertung. Man sieht, dass der NIR-Kanal wie vorab vermutet konstant unter dem Rotkanal verläuft. An den Rändern des Grauwertspektrums findet eine Annäherung statt, es kommt aber zu keiner Überschneidung. Ein Resultat wie dieses ist ein Indiz dafür, dass auch die Ergebnisse der NDVI-Analyse zufriedenstellend sein werden. Unten abgebildet ist für dieses Beispiel der Verlauf der Vegetationsklassen.

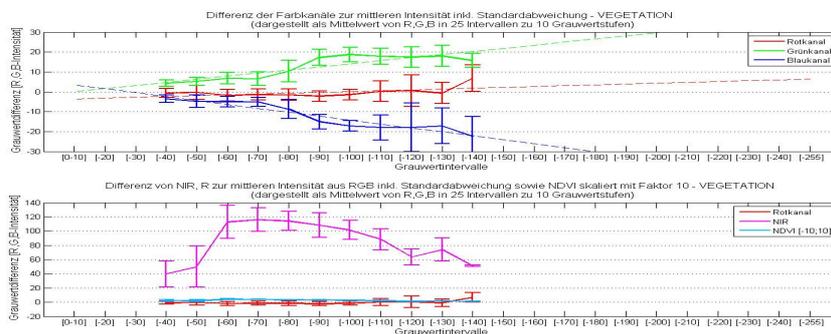
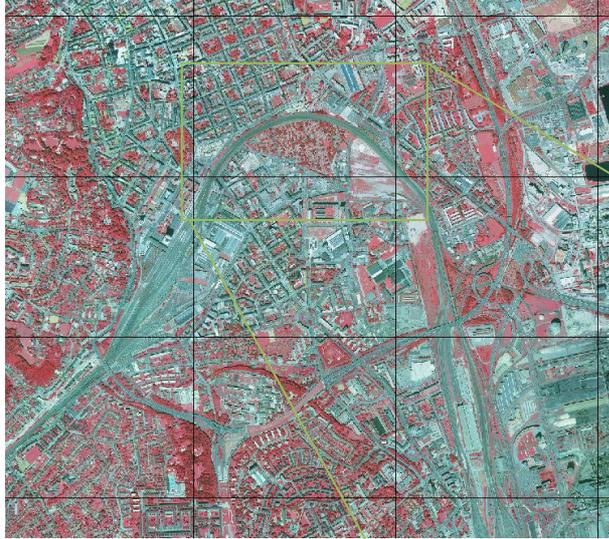


Abb. 51 Musterbeispiel TP_2, Vegetationsflächen

Die Dominanz des Grünkanals ist zu beobachten, wie dies bei Vegetation stets der Fall sein muss. Ein charakteristischer Verlauf der drei Farbkanäle im Bezug auf den RGB-Verlauf kann darüber hinaus nicht festgestellt werden, die Farbkanäle driften auseinander. In der unteren Abbildung sieht man

erneut deutlich den bauchigen Verlauf sowie die Dominanz des NIR-Kanals für Vegetation auf Grund der Reflexionseigenschaften im nahen Infrarotbereich. Die Skala auf der Ordinate musste von 70 auf 140 erhöht werden um den Verlauf vollständig darstellen zu können. Auch hier findet keine Überschneidung zwischen Rot und NIR statt, was auch in den Vegetationsbereichen zufriedenstellende Ergebnisse in der NDVI-Analyse vermuten lässt. Der Vollständigkeit halber seien hier dieselben Ausschnitte aus dem CIR-Mosaik dargestellt. Sie wirken sehr homogen, ohne sichtbare Überstrahlungen.



Folgende Abbildung zeigt den Vergleich der NDVIs.

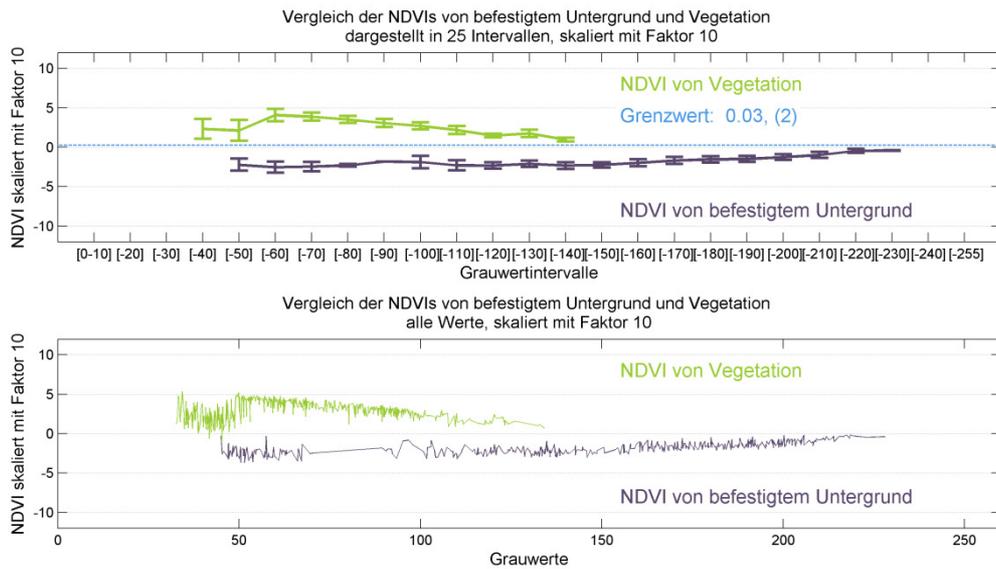


Abb. 52 Vergleich der NDVIs für TP_2

Die NDVIs von Vegetation und befestigtem Untergrund weisen ein günstiges Trennungsverhalten auf, beide Trennungsbedingungen sind erfüllt. In den dunklen Bereichen von Vegetation kommt es zu größerem Rauschen, was sich auch in den Ergebnissen der NDVI Analyse wieder spiegelt.

Tab. 9 Ergebnisse der NDVI Analyse für TP_2

	Grenzwert 0	Grenzwert 0,03 Bedingung (2)
Befestigt	100%	100%
Befestigte-beschattet	100%	100%
Vegetation	100%	100%
Vegetation- beschattet	98%	96%

Das hier angeführte Musterbeispiel soll veranschaulichen, welche Resultate für die Beurteilung der radiometrischen Qualität digitaler Orthophotos anzustreben empfohlen wird. Sowohl die Analyse des RGB-Bereichs, als auch die des NDVI liefern zufriedenstellende Ergebnisse, anhand derer davon ausgegangen werden kann, dass das vorliegende Orthophotomosaik den Ansprüchen entspricht.

8 CONCLUSIO

Das Ziel dieser Diplomarbeit bestand darin, die radiometrische Qualität von digitalen Orthophotos zu untersuchen. Es sollten Erfahrungen gewonnen werden über das Verhalten der in den Bildern enthaltenen Radiometrie und deren Auswirkungen, sowohl bezüglich der visuellen Darstellung also auch bezüglich der Möglichkeit weitere Folgeprodukte, wie z. B. eine Klassifizierung daraus abzuleiten.

Dazu wurden empirisch auf Basis vorhandener DOP-Mosaik sowohl für den RGB-Bereich als auch für den NIR-Bereich Methoden entwickelt, um eine fundierte Beurteilung anhand standardisierter Analysen durchzuführen. Die Entwicklung und Durchführung dieser Untersuchungen erfolgten stets vor dem Hintergrund, dass das Ergebnis mit ökonomisch vertretbarem Aufwand in relativ kurzer Zeit erhalten werden kann. Weiters wurde darauf geachtet, dass die Aussagen über die Qualität bzw. die Eignung zur Klassifizierung anhand einiger weniger Kennwerte erfolgen kann, um die empfohlenen Methoden - abgesehen von darauf aufbauenden wissenschaftlichen Untersuchungen - auch für den praktischen Gebrauch attraktiv zu machen.

8.1 FAZIT

8.1.1 FAZIT RGB-BEREICH

Für den RGB-Bereich wurde das Hauptaugenmerk auf das Verhalten und die Darstellung grauer, befestigter Flächen gelegt. Das deshalb, weil diese Klasse in digitalen Orthophotos des österreichischen Staatsgebiets üblicherweise enthalten ist und sich die Bedingung „grau zu sein“ verhältnismäßig einfach überprüfen lässt. Dazu wurden manuell Musterflächen von grauen, befestigten Flächen gemessen, um in weitere Folge die Differenz der einzelnen Farbkanäle zu deren mittlerer Intensität zu bilden. Für ausgewogene und homogene Gebiete wurde erwartet, dass die Differenz aller drei Kanäle zur mittleren Intensität minimal ist.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass eine Beurteilung anhand der formulierten Bedingung möglich ist. Farbstiche in den grauen, befestigten Flächen, die anhand der vorgestellten Methode aufgezeigt werden, können als repräsentativ für die gesamte beurteilte Szene gesehen werden. Weiters wurden anhand zweier Testgruppen Untersuchungen durchgeführt um zu testen, ob Schwellwerte für die Beurteilung formulierbar sind, damit konsistente und objektive Kriterien angewandt werden können. Aus den Resultaten der Untersuchungen wurden drei Qualitätskategorien formuliert, anhand derer eine Beurteilung ermöglicht wird. Die drei Qualitätskategorien entsprechen einem Ampelsystem und enthalten jeweils empfohlene Schwellwerte. Auf Grund der vielfältigen Aspekte, die bei der Beurteilung eines digitalen Orthophotos zu beachten sind, sollte eine visuelle Beurteilung weiterhin zusätzlich durchgeführt werden, um umfassende Aussagen über das Datenmaterial treffen zu können. Die in dieser Diplomarbeit entwickelte Methode ermöglicht es darüber hinaus, das Datenmaterial statistisch zu analysieren und anhand weniger Kennzahlen zu beurteilen.

Darüber hinaus wurde untersucht, ob die Analyse der Hauptklasse „Vegetation“ weitere Informationen für die Beurteilung enthält. Im Zuge der Untersuchungen der vorliegenden Diplomarbeit konnten keine stichhaltigen Informationen aus weiteren Klassen gewonnen werden.

8.1.2 FAZIT NIR-BEREICH

Um eine zufriedenstellende automatische Klassifizierung durchführen zu können, wird an den NIR-Bereich die grundlegende Bedingung gestellt, dass eine Trennung von Vegetation und Nicht-Vegetation zu einem hohen Grad erfolgen kann. Für die durchgeführten Untersuchungen wurde der NDVI herangezogen um zu testen, ob sich mit dessen Hilfe Aussagen bezüglich einer Trennbarkeit formulieren lassen. Weiters wurde untersucht, ob es möglich und sinnvoll ist, die Trennung anhand eines generellen Grenzwerts durchzuführen, oder ob es trotz des höheren Aufwands günstig ist, für jedes untersuchte Gebiet einen individuellen Schwellwert zu ermitteln. Zur Ermittlung der Schwellwerte wurden zwei Bedingungen formuliert, mit deren Hilfe es möglich ist, Aussagen über die Trennbarkeit zu treffen.

Um die Konsistenz und Repräsentativität der Aussagen zu überprüfen, wurden zusätzlich zu den grauen, befestigten Flächen weitere Nicht-Vegetationsklassen manuell klassifiziert. Anhand derer sollte untersucht werden, ob Nicht-Vegetationsklassen generell ein ähnliches NDVI-Verhalten aufweisen wie graue, befestigte Flächen.

Die Experimente haben gezeigt, dass Aussagen über die Trennbarkeit zwischen Vegetation und Nicht-Vegetation (in Form von grauen, befestigten Flächen) anhand der NDVIs der beiden Klassen erfolgen können. Der generelle Grenzwert 0 lieferte in vielen Experimenten ähnlich zufriedenstellende Ergebnisse wie der individuell ermittelte, was darauf schließen lässt, dass dies ein günstiger Wert für Untersuchungen darstellt, die keiner weiteren Prüfung unterzogen werden sollen. Testgebiete, deren Trennbarkeit zwar grundsätzlich gegeben ist, deren NDVIs aber einen Shift nach oben oder unten aufweisen, konnten ausschließlich mit Hilfe des individuell ermittelten Schwellwerts erkannt werden. Aus diesem Grund wird empfohlen, sowohl die Darstellung der NDVIs von Vegetation und Nicht-Vegetation als auch die Überprüfung der beiden Bedingungen zu berücksichtigen, um eine umfassende Aussage über eine weiterfolgende Klassifizierbarkeit tätigen zu können.

Die Resultate der zusätzlichen Nicht-Vegetationsklassen haben jenen von grauen, befestigten Flächen in hohem Maße entsprochen. Daraus kann mit einiger Sicherheit geschlossen werden, dass das manuelle Messen von Musterflächen nicht für jede Unterklasse zu erfolgen hat, sondern die Ergebnisse von grauen, befestigten Flächen als repräsentativ angesehen werden können.

Die Resultate der NDVI-Analyse der Testgruppe „Positiv“ und „Negativ“ ließen keine Korrelation zu jenen der RGB-Analyse erkennen. Es wird daher empfohlen beide Beurteilungen durchzuführen, um umfassendere Kenntnisse über das Datenmaterial zu gewinnen.

8.2 AUSBLICK

Im Zuge dieser Diplomarbeit konnten im Hinblick auf Beurteilungsmöglichkeiten digitaler Orthophotos viele neue Erfahrungen und Erkenntnisse gewonnen werden. Die Validierung der entwickelten Beurteilungsmethoden und der vorgeschlagenen Bedingungen mit weiteren, zukünftigen Datensätzen wird weitere Erkenntnisse bringen und Verfeinerungen ermöglichen. Auf Grund der Vielfalt an Einflussfaktoren war es nicht möglich auf sämtliche Fragestellungen einzugehen. Im Folgenden sind Empfehlungen angeführt, wo bei aufbauenden Untersuchungen angesetzt werden kann bzw. welche weiteren Vertiefungen zweckmäßig erscheinen.

- **Zusammenführen der Teilgebiete:** Wenn die Testgebiete den Kriterien entsprechen, kann auf Grund dessen eine Beurteilung stattfinden. Für eine in weiterer Folge durchgeführte Klassifizierung ist es nicht nur von Bedeutung, dass die einzelnen Testgebiete den Kriterien entsprechen, sondern dass das gesamte Los ein ähnliches Resultat aufweist. Für den RGB-Bereich soll also über das ganze Los eine homogene Farbgebung erreicht werden und für den NIR-Bereich ein sinnvoller Grenzwert für die Trennbarkeit von Vegetation und Nicht-Vegetation gefunden werden. Untersuchungen, in welcher Weise sich die Resultate verändern, wenn die Datensätze einzelner Testgebiete des gleichen Loses zusammengeführt werden, können daher den nächsten Schritt darstellen.
- **Methode des Pansharpenings:** Die verwendeten Testdaten durchliefen alle standardmäßig eine Methode des Pansharpenings, deren Vorgehensweise und Parameter nicht näher bekannt waren. Die Untersuchung, inwieweit verschiedene Methoden mit unterschiedlichen Parametern das Endergebnis beeinflussen, kann dabei helfen, die optimale Konfiguration zu finden.
- **Radiometrische Auflösung:** Sämtliche Testdaten lagen als 8 Bit-Daten vor. Nähere Untersuchungen der Frage, bis zu welchem Prozessierungsschritt mit 16 Bit-Daten günstigerweise gearbeitet werden soll, erscheinen sinnvoll.
- **Vegetationsindices:** Im Zuge der Untersuchungen wurde der NDVI verwendet. Welche Resultate mit anderen Vegetationsindices zu erzielen sind, wurde nicht untersucht.
- **Trennungsbedingungen für die NDVI-Analyse:** Die Trennung von Vegetation und Nicht-Vegetation und in weiterer Folge die Aussagen darüber erfolgten auf Basis eines einzelnen Grenzwerts, sei es der generalisierte 0 oder ein individuell ermittelter Wert. Wie anhand der vorgestellten NDVI-Grafiken vermutet werden kann, ist es mit komplexeren Modellen wahrscheinlich möglich, die Trennbarkeit weiter zu steigern.
- **Histogrammoperationen:** Wenn es gelingt, zwischen den Resultaten der in dieser Diplomarbeit vorgestellten Methoden und den Testgebieten zugehörigen Histogrammen einen Zusammenhang herzustellen, kann ein weiterer Schritt zur Automatisierung erfolgen. Die Analyse der Testdaten kann bereits jetzt automatisiert durchgeführt werden, das Messen der Musterflächen ist jedoch zeitintensiv.

LITERATURVERZEICHNIS

- Albertz, J. (2009)** *Einführung in die Fernerkundung*. Darmstadt: WBG, 2009. 978-3-534-23150-8.
- [Baldenhofer]: Baldenhofer, K.:** Online, Lexikon der Fernerkundung, 27. August 2013, <http://www.fe-lexikon.info/lexikon-v.htm#vegetationsindex>.
- Beisl, U. (2006)** *Absolute spectroradiometric calibration of the ADS 40 Sensor*. Heerbrugg, In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Commission I, WG I/1.
- [CiA]:** Online, Chemie im Alltag, 3. September 2013, <http://www.chemie-im-alltag.de/articles/0107/>.
- Hirschmugl, M. (2005)** *Pansharpening - Methoden für digitale, sehr hoch auflösende Fernerkundungsdaten*, Proceeding of 17th AGIT Symposium.
- Honkavaara, E. (2008)** *Calibrating Digital Photogrammetric Airborne Imaging Systems Using a Test Field*, Ph.D. Dissertation, Helsinki University of Technology, Finland.
- Honkavaara, E. (2009)** *Digital Airborne Photogrammetry - A New Tool for Quantitative Remote Sensing? - A State-of-the-Art Review On Radiometric Aspects of Digital Photogrammetric Images*, Remote Sensing 2009, Vol. 1, Seiten 577-605, ISSN: 2072-4292.
- Koukal, T. (2012)** *Das digitale Luftbild - Ein Praxisleitfaden für Anwender im Forst- und Umweltbereich*, Göttingen, Universitätsverlag Göttingen, 2012. Vol. 7, ISBN: 978-3-86395-055-2.
- Kraus, K. (2004)** *Photogrammetrie - Band 1*, 7. Auflage, Berlin, Walter de Gruyter Verlag, 2004, ISBN: 3-11-017708-0.
- [NASA]:** Online, <http://earthobservatory.nasa.gov>. - 3. September 2013. - http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php.
- Ryan, R. (2009)** *Enhanced Absolute and Relative Radiometric Calibration for Digital Aerial Cameras*, Stuttgart, Photogrammetrische Woche 2009.
- Sandau, R. (2005)** *Digitale Luftbildkamera - Einführung und Grundlagen*, Heidelberg, Herbert Wichmann Verlag, ISBN: 3-87907-391-0.
- Schaepman-Strub G. (2006)** *Reflectance quantities in optical remote sensing - definitions and case studies*, In: Remote Sensing of Environment Volume 103, Issue 1, S. 27-42. - doi: 10.1016.
- Vexcel Imaging (2012)** *Calibration Report of Ultracam Eagle* - Graz: Mai 2012.
- Vijayaraj, V. (2004)** *A quantitative analysis of pansharpened images*, Master Thesis, Mississippi: Mississippi State University, USA.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1 Elektromagnetisches Spektrum	12
Abb. 2 Schematische Strahlungssituation	14
Abb. 3 Reflexionseigenschaften von grünen Blättern	15
Abb. 4 Ursprüngliches Bild und nach einer Grauwertanpassung	18
Abb. 5 Workflow Diagramm der IHS Transformation	22
Abb. 6 Spektrale Empfindlichkeit der UC Eagle für den Panchromatischen Kanal	23
Abb. 7 Spektrale Empfindlichkeit der UC Eagle für die multispektralen Kanäle	23
Abb. 8 Scattergramm zwischen MS Daten und PAN-Kanal	24
Abb. 9 Schematische Darstellung eines Bildflugs	25
Abb. 10 Aufnahmeschema einer Flächenkamera	27
Abb. 11 Aufnahmeschema einer Zeilenkamera	28
Abb. 12 Darstellung des Entzerrungsvorgangs	29
Abb. 13 Schematische Darstellung der indirekten Umbildung nach	31
Abb. 14 Ausschnitt eines CIR-Orthophotomosaiks	32
Abb. 15 Derselbe Ausschnitt ohne Seamlines	32
Abb. 16 Umrisse von Losen zur Durchführung von Luftbildflügen	33
Abb. 17 Schematische Darstellung des empfohlenen Beurteilungsvorgangs	40
Abb. 18 Sichtbare Seamlines über Land und auf einem See	42
Abb. 19 Rotstich	43
Abb. 20 CIR-Darstellung eines Testgebietes	43
Abb. 21 Unnatürliche Überstrahlungen entlang des Seeufers	44
Abb. 22 Inhomogenitäten im CIR-DOP	44
Abb. 23 Auszug aus dem exportierten Statistikfile	47
Abb. 24 Verteilung und Anzahl der Musterflächen für einen Datensatz	47
Abb. 25 Eine Gleichverteilung der Musterflächen über das Grauwertspektrum wird angestrebt	48
Abb. 26 Aggregationsstufen	50
Abb. 27 Dieselbe Darstellung wie Abb. 26 (b), ergänzt um die Regressionsgeraden	51
Abb. 28 Weitere Beispiele für den Farbverlauf	52
Abb. 29 Abbildung einer ausgewogenen und einer rotstichigen Szene	53
Abb. 30 Das gleiche Testgebiet wie in Abb. 26 für befestigten Untergrund	55
Abb. 31 Kreuzung der Kanäle von Rot und NIR	56
Abb. 32 Darstellung der NDVIs eines Testbeispiels von befestigtem Untergrund vs. Vegetation	57
Abb. 33 Resultate Testgruppe „Positiv“)	60
Abb. 34 Resultate der Testgruppe „Negativ“	61
Abb. 35 Verlauf von TP_12	62
Abb. 36 Verlauf von TP_16	63
Abb. 37 Verlauf von TN_1	63
Abb. 38 Verlauf von TN_2	63
Abb. 39 Verlauf von TP_2	64
Abb. 40 Verlauf von TP_3	65
Abb. 41 Verlauf von TP_13	65
Abb. 42 Resultate der Testgruppe „Positiv“ – Vegetation	66
Abb. 43 Resultate der Testgruppe „Negativ“ - Vegetation	67
	93

Abb. 44 NIR-Bereich von TV_1	71
Abb. 45 NIR-Bereich von TV_2	71
Abb. 46 NDVIs von TP_13, NDVIs von TP_14	79
Abb. 47 Ungünstiges NDVI-Verhalten eines Datensatzes	80
Abb. 48 NDVIs von TN_1	83
Abb. 49 NDVIs von TN_4	83
Abb. 50 Musterbeispiel TP_2, Verlauf der Diagrammkurven von grauen, befestigten Flächen	86
Abb. 51 Musterbeispiel TP_2, Vegetationsflächen	86
Abb. 52 Vergleich der NDVIs für TP_2	88

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1 Übersicht über den Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts	12
Tab. 2 Begründung der Zuweisung zur Testgruppe „Negativ“	39
Tab. 3 Hauptklassen und deren Unterklassen	46
Tab. 4 Zusammenfassung der empfohlenen Qualitätskriterien.....	68
Tab. 5 Ergebnisse der NDVI-Analyse, Testgruppe Positiv	76
Tab. 6 Detaillierte Ergebnisse für die Testgruppe „Positiv“	77
Tab. 7 Ergebnisse der NDVI-Analyse, Testgruppe Negativ.....	80
Tab. 8 Detaillierte Ergebnisse für die Testgruppe „Negativ“	81
Tab. 9 Ergebnisse der NDVI Analyse für TP_2	88