

**Florian Edlinger**

# **Analyse des Einflusses der Topographie auf die Signatur von Satellitenbilddaten**

**MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Ingenieur

Masterstudium Geomatics Science



**Technische Universität Graz**

Betreuer:

Univ.-Prof. Dr. Mathias Schardt

Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie

Graz, August 2013

Deutsche Fassung:  
Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008  
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 28.08.2013

Florian Edelinger  
(Unterschrift)

Englische Fassung:

## STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

28.08.2013  
date

Florian Edelinger  
(signature)

---

## Kurzfassung

Das Reflexionsverhalten (Signatur) von Waldbeständen in einem Satellitenbild wird maßgeblich von deren Beleuchtung durch das Sonnenlicht beeinflusst. Neben dem Sonnenstand zum Zeitpunkt der Aufnahme entscheidet vor allem die Topographie in der näheren Umgebung, ob ein Waldstück besonnt oder beschattet ist und somit trotz gleicher Bestockung verschiedene Grauwerte im Bild aufweist. Bei vielen Anwendungen in der Fernerkundung ist dieser Beleuchtungsunterschied problematisch und führt zu Fehlern in der Auswertung. Um dem entgegenzuwirken, wurden topographische Normalisierungsmethoden entwickelt.

In dieser Masterarbeit wird der angesprochene Einfluss des Reliefs auf die Signatur anhand von sechs IRS- und vier Landsat-Satellitenszenen in einem geeigneten alpinen Testgebiet untersucht. Zu diesem Zweck werden Regressionsanalysen basierend auf selbstdefinierten Referenzgebieten durchgeführt. Anschließend werden für die dabei gewonnen Erkenntnisse Erklärungsansätze aus Untersuchungen basierend auf Laserscannerdaten abgeleitet. Mit Hilfe der Laserscannerdaten werden Schattensimulationen durchgeführt, die es ermöglichen, die Schattenanteile innerhalb der Referenzgebiete zu berechnen.

Des Weiteren werden zwei gebräuchliche Methoden zur topographischen Normalisierung getestet und evaluiert. Abschließend wird ein Ansatz zur Weiterentwicklung des vom Joanneum Research verwendeten Tools für die Beleuchtungskorrektur vorgestellt.

---

## Abstract

The reflection behavior (signature) of forest stands in a satellite image is significantly influenced by the illumination of sunlight. Apart from the position of the sun at time of recording mainly the topography in the nearby area determines, whether a forest is exposed to the sun or shade and thus shows different gray values in the image under same stand conditions. In many applications in remote sensing this illumination difference is problematic and leads to errors in the analysis. To reduce this problem, topographic normalization methods have been developed.

In this master thesis, the influence of the relief on the signature is investigated for six IRS- and four Landsat-satellite scenes in a suitable alpine test site. For this purpose, regression analyses based on user-defined reference areas are performed. For the previous gained insights will then derive explanations from the studies based on laserscanner data. Using the laserscanner data shadow simulations are carried out, which make it possible to calculate the shadow shares within the reference areas.

In addition, two common methods for topographic normalization are tested and evaluated. Finally, an approach for a development of the topographic normalization tool used by Joanneum Research is presented.

---

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich im Laufe meines Studiums und insbesondere bei der Verfassung der Diplomarbeit fachlich und persönlich unterstützt haben. Allen voran gilt dieser Dank meiner Familien, die mir diese Ausbildung erst ermöglicht hat und mir bei Höhen und Tiefen stets zur Seite gestanden ist. All die Zeit und Geduld, die sie und meine Freunde aufgebracht haben, ist für mich von unschätzbarem Wert. Dafür widme ich ihnen diese Arbeit, damit sie nie vergessen, wie wichtig sie mir waren und immer bleiben werden.

Im Anschluss daran ist es mir ein großes Anliegen, meinem Betreuer Univ.-Prof. Dr. Mathias Schardt sowie den Herrn DI Heinz Gallaun und DI Martin Steinegger besonderen Dank auszusprechen, die sich jederzeit und mit vollstem Engagement für fachliche Ratschläge und Hilfestellungen zur Verfügung gestellt haben und mir somit tatkräftig bei der Durchführung meiner Untersuchungen beigestanden sind.

---

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
1.1	Einführung und Problemstellung .....	1
1.2	Zielsetzung .....	2
1.3	Struktur der Arbeit .....	5
2	Reflexionseigenschaften von Baumbeständen .....	7
2.1	Reflexion von Blattorganen .....	7
2.2	Reflexion von Baumbeständen .....	9
3	State of the Art – Topographische Normalisierung .....	12
3.1	Allgemein .....	12
3.2	Ratio – Bildung .....	12
3.3	Kosinus-Methode .....	13
3.4	Minnaert-Methode .....	14
3.5	Modifiziertes Minnaert-Modell .....	15
3.6	Einfache, stratifizierte Minnaert-Korrektur .....	16
3.7	Self Calibrating Topographic Normalization .....	17
4	Theoretische Grundlagen – Regressionsanalyse .....	20
4.1	Allgemein .....	20
4.2	Das lineare Regressionsmodell .....	21
4.3	Qualitätskenngrößen .....	24
5	Datengrundlagen und Untersuchungsgebiet .....	26
5.1	Landsat .....	26
5.2	IRS .....	31
5.3	Untersuchungsgebiet .....	36
6	Beschreibung und Aufbereitung der Basisdaten .....	37
6.1	Luftbilder .....	38
6.2	Digitales Geländemodell .....	38
6.3	LIDAR-Daten .....	40
6.4	Satellitenbilder .....	42
7	Datenverarbeitung .....	45
7.1	Inzidenzwinkel-Berechnung .....	45
7.2	Schattenflächen-Berechnung .....	46
7.3	Topographische Normalisierung der Satellitenbilder .....	48
7.4	Referenzgebiete .....	51
7.4.1	Aufnahme der Referenzgebiete .....	51
7.4.2	Beschreibung der Referenzgebiete .....	53

---

7.4.3	Auszug aus dem Referenzgebiete-Katalog.....	55
8	Durchführung der Analyse .....	59
8.1	Beschreibung der verwendeten Signaturen .....	59
8.2	Untersuchung des Einflusses der Topographie auf die Reflexion.....	61
8.2.1	Beeinflussung durch niedere Beschirmungsgrade .....	61
8.2.2	Ohne gering beschirmte Referenzgebiete.....	62
8.3	Analysen unter Zuhilfenahme der Schattensimulationen .....	62
8.3.1	Beschirmung vs. Schattenanteil .....	63
8.3.2	Reflexion der Waldtypen vs. Schattenanteil .....	63
8.3.3	Illumination vs. Schattenanteil.....	64
8.4	Evaluierung der verschiedenen topographischen Normalisierungen .....	65
9	Ergebnisse und Analyse .....	66
9.1	Beschreibung der verwendeten Signaturen .....	66
9.2	Grauwert vs. Illumination.....	70
9.2.1	Beeinflussung durch niedere Beschirmungsgrade .....	73
9.2.2	Ohne gering beschirmte Referenzgebiete.....	75
9.3	Analysen unter Zuhilfenahme der Schattensimulationen .....	78
9.3.1	Beschirmung vs. Schattenanteil .....	78
9.3.2	Reflexion der Waldtypen vs. Schattenanteil .....	82
9.3.3	Illumination vs. Schattenanteil.....	83
9.4	Evaluierung der verschiedenen, topographischen Normalisierungen .....	87
10	Ansatz zur Weiterentwicklung des Self-Calibrating-Topographic-Normalization Tools	93
10.1	Ansatz .....	94
10.2	Ablauf .....	95
10.3	Gemeinsamer Schnittpunkt.....	96
11	Zusammenfassung und Ausblick .....	99
	Literatur.....	102
	Anhang A: Untersuchung des Einflusses der Topographie auf die Reflexion.....	104
	Anhang B: Analysen unter Zuhilfenahme der Schattensimulationen .....	128
	Anhang C: Evaluierung der verschiedenen topographischen Normalisierungen.....	148

---

## Tabellenverzeichnis

1	Orbitparameter von Landsat-5.....	27
2	Frequenzkanäle beim Sensor "Thematic Mapper" .....	28
3	Frequenzkanäle der Sensoren von Landsat-7 und Landsat-8 im Vergleich.....	30
4	Sensorspezifikationen von IRS-P6.....	33
5	Satellitenspezifikationen von IRS-P6.....	33
6	Übersicht der aktiven IRS-Satelliten.....	35
7	Die zehn verwendeten Satellitenbilder.....	43
8	Default-Werte der Topo. Normalisierung des Programms Impact vom Joanneum Research (Auszug).....	48
9	Minnaert-Konstanten für die 2. Normalisierung in ERDAS .....	50
10	Aufnahmezeitpunkte der Datengrundlagen.....	52
11	Referenzgebiete und ihre Verteilung auf unterschiedliche Illuminationen (Sonnenelevation 60°).....	53
12	Beispiele für Testgebiete der Vegetationsklassen .....	56
13	Referenzgebiete im Satellitenbild i_32_35_060722 .....	68
14	Bild i_32_35_060722 - Statistische Werte der linearen Regression .....	72
15	reduzierte Anzahl der Referenzgebiete im Satellitenbild i_32_35_060722.....	75
16	Bild i_32_35_060722 - Statistische Werte der linearen Regression bei Referenzgebieten mit CC > 75 % .....	77
17	Bild i_32_35_060722: Statistische Wert zur linearen Regression bezüglich Schatten und Illumination .....	84
18	Vergleich der statistischen Qualitätswerte bei der linearen Regression für die .....	92



---

## Abbildungsverzeichnis

1	Beleuchtungsunterschiede in einem Satellitenbild (nach Riano et al 2003: S 1056).....	1
2	Zusammenhang zwischen Hangneigung, Hangorientierung und Sonnenstand (nach Riano et al. 2003: S. 1057) .....	3
3	Strahlengang des Lichts beim Treffen auf ein Pflanzenblatt (nach Schardt 2008: S. 111).....	7
4	Reflexionsverhalten eines Pflanzenblattes in Abhängigkeit von der Wellenlänge (nach Schardt 2008: S. 112) .....	8
5	Reflexionsverhalten von Laub- (oben) und Nadelwald (unten) in Abhängigkeit der Illumination im 4.Kanal des Landsat-TM (Schardt 1990: S. 126).....	10
6	Workflow der Topographischen Normalisierung der Impact Software vom Joanneum Research .....	19
7	Funktionsweise eines Multispektralabtasters (nach <a href="http://www.wikipedia.org">www.wikipedia.org</a> , Stand: Juni 2013).....	29
8	Überblick über sämtliche Landsat-Missionen (nach <a href="http://landsat.gsfc.nasa.gov">landsat.gsfc.nasa.gov</a> , Stand: Juni 2013).....	30
9	Ausschnitt eines CIR-Luftbildes .....	38
10	Digitales Geländemodells.....	39
11	Ausschnitt aus dem verwendeten DSM_Weiz .....	41
12	Ausschnitt aus dem verwendeten NDSM_Hartberg.....	42
13	IRS-Szene i_32_35_080711 .....	44
14	Landsat-Szene l20110629 .....	44
15	Ausschnitt eines Inzidenzwinkel-Bildes.....	46
16	Ausschnitt eines Hillshade-Bildes .....	47
17	Abhängigkeit der mittleren Grauwerte im Kanal 4 (nahes Infrarot) vom Beschirmungsgrad bei Nadelbeständen in einem Thematic Mapper Satellitenbild (nach Schardt 1997: S. 88) .....	60
18	Einfluss von Inklination und Exposition eines Hanges auf den Schattenwurf (siehe Buhk 2000: S. 10).....	64
19	Bild i_32_35_060722: Scatterplot - Grün vs. NIR.....	67
20	Bild i_32_35_060722: Scatterplot - Beschirmung vs. Grauwert .....	69
21	Bild i_32_35_060722: Lineare Regression - Illumination vs. Grauwert .....	71

---

22	Bild i_32_35_060722: Vergleich der linearen Regressionen in der Vegetationsklasse Nadel_Alt im SW-IR Kanal – alle Referenzgebiete links und nur mit Referenzgebieten über 75 % CC rechts.....	74
23	Bild i_32_35_060722: Lineare Regression - Illumination vs. Grauwert mit CC > 75 % .....	76
24	Bild i_32_35_060722: Beschirmung vs. Schattenanteil nach Vegetationsklassen .....	79
25	Bild i_32_35_060722: Beschirmung vs. Schattenanteil nach Hanglage zur Sonne ....	81
26	Bild i_32_35_060722: Schattenanteil vs. Grauwert (NIR) .....	82
27	Bild i_32_35_060722: Illumination vs. Schattenanteil bei 60° Sonnenelevation .....	84
28	Bild i_32_35_050422: Illumination vs. Schattenanteil bei 53° Sonnenelevation .....	86
29	Satellitenbild i_32_35_060722.....	87
30	Topographische Normalisierung mit Default-Werten für die Minnaert-Konstanten in Erdas (Kosinus-Methode).....	87
31	Topographische Normalisierung mit editierten Werten für die Minnaert-Konstanten in Erdas (Mikkola).....	88
32	Topographische Normalisierung in Impact .....	88
33	Bild i_32_35_060722: Vergleich der topographischen Normalisierungen mit Impact, ERDAS mit Defaultwerten und ERDAS mit editierten Werten für die Minnaert-Konstanten (Frequenzbänder Grün(1) und Rot(2)) .....	89
34	Bild i_32_35_060722: Vergleich der topographischen Normalisierungen mit Impact, Erdas mit Defaultwerten und Erdas mit editierten Werten für die Minnaert-Konstanten ( Frequenzbänder NIR(3) und SWIR(4)) .....	90
35	Lineare Regressionsfunktionen bei Vegetationspixeln in einem Satellitenbild .....	94
36	Bild i_32_35_060722: Gemeinsamer Schnittpunkt bei linearer Regression (NIR) .....	97

# 1 Einleitung

Das erste Kapitel widmet sich der Einführung in die Masterarbeit und erläutert die Problemstellung. Es werden die Ziele der Arbeit beschrieben und der strukturelle Aufbau kurz zusammengefasst.

## 1.1 Einführung und Problemstellung

Waldbestände besitzen in Satellitenbildern charakteristische Reflexionseigenschaften, die sie als solche identifizieren lassen. Das Reflexionsverhalten (Signatur) der Pflanzen bzw. der durchscheinenden Bodenvegetation und die Schattenflächen zwischen den Bäumen prägen den Grauwert des jeweiligen Waldtyps im Satellitenbild. Im Flachland können die Waldklassen somit leicht unterschieden werden. Im Gelände ist dies jedoch schwieriger.

Berghänge sind in einem Satellitenbild je nach Einstrahlungswinkel bzw. –Richtung der Sonne, Geländeneigung und Exposition mehr oder weniger besonnt oder beschattet (siehe Abbildung 1). Der Licht- und Schattenwechsel hilft dem Betrachter, einen dreidimensionalen Eindruck von der Szenerie zu gewinnen. Bei der Klassifizierung einer Satellitenbildszene sind solche topographischen Effekte jedoch unerwünscht, da sie die spektralen Eigenschaften der Landoberflächen verfälschen und zu einer falschen Klassenzuordnung dieser führen. Das bedeutet, dass auch die Topographie auf der Erdoberfläche Einfluss auf die Grauwerte in einem Satellitenbild hat.

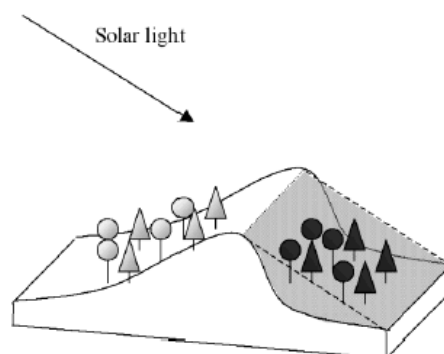


Abbildung 1: Beleuchtungsunterschiede in einem Satellitenbild (nach Riano et al 2003: S 1056)

Mit Hilfe einer topographischen Normalisierung können die oben beschriebenen Beleuchtungsunterschiede minimiert werden, und das Gelände erscheint danach idealerweise so, als würde es gleichmäßig beleuchtet und frei von reliefbedingtem Schatten sein. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden verschiedene Korrekturmethode entwickelt.

Joanneum Research betreibt ein Softwaretool basierend auf einem stratifizierten Minnaert-Modell zur Reliefkorrektur von Satellitenbildern, welches hervorragende Ergebnisse für diese Aufgabenstellung liefert.

### ***1.2 Zielsetzung***

Ziel der Arbeit ist es, den Effekt der Topographie auf die Reflexion von Waldbeständen zu untersuchen.

Die vom Relief hervorgerufenen, lokalen Belichtungsverhältnisse werden durch die Illumination beschrieben. Sie ist gleichbedeutend mit dem Kosinus des sogenannten Inzidenzwinkels, also des Einfallswinkels der Sonnenstrahlung auf der Erdoberfläche zum Zeitpunkt der Überfliegung des Satelliten. (Vgl. Smith et al. 1980: S. 1183 – 1189)

Die Bildung des Inzidenzwinkels wird in Abbildung 2 erläutert.

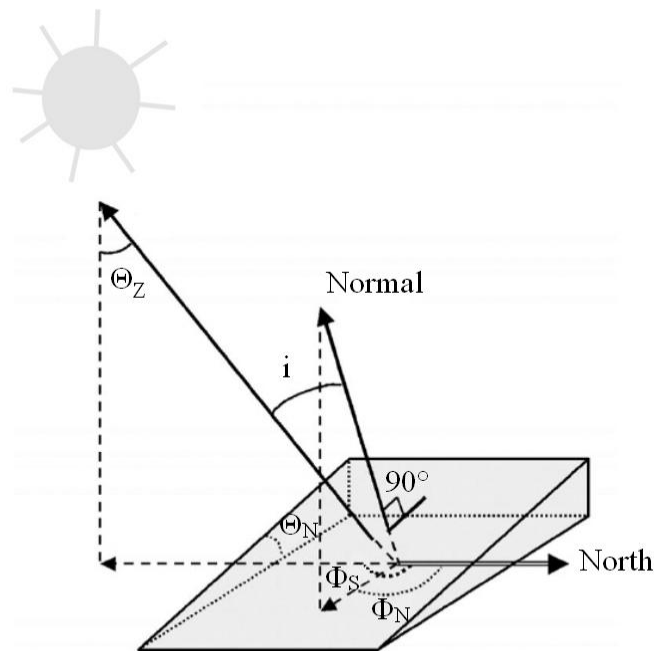


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen Hangneigung, Hangorientierung und Sonnenstand (nach Riano et al. 2003: S. 1057)

- $i$  ... lokaler solarer Einfallswinkel (Inzidenzwinkel)
- $\Theta_N$  ... Inklination des Geländes (Neigungswinkel, Slope)
- $\Phi_N$  ... Exposition des Geländeausschnitts (Aspect-Winkel)
- $\Theta_Z$  ... Zenitwinkel der Sonneneinstrahlung
- $\Phi_S$  ... Azimut der Sonneneinstrahlung

In dieser Arbeit wird der Zusammenhang zwischen Grauwert eines Frequenzbandes und Illumination in einem Satellitenbild mit Hilfe einer Regressionsanalyse untersucht. In der Dissertation „Verwendbarkeit von Thematic Mapper Daten zur Klassifizierung von Baumarten und natürlichen Altersklassen“ (1990) beschreibt Schardt diesen Zusammenhang als linear. Da die unterschiedlichen Waldtypen verschieden stark auf die Beleuchtungsabnahme reagieren, wird die lineare Regression für jede Waldklasse einzeln durchgeführt. Die erhaltenen Ergebnisse werden anschließend analysiert und Erklärungsansätze für eventuelle Auffälligkeiten geliefert.

Unter Zuhilfenahme von digitalen Oberflächenmodellen (DSM) aus Laserscannerdaten werden Hillshade-Szenen erzeugt. Da Bäume damit einzeln identifiziert werden können, ist es möglich, aus der Höheninformation und dem Sonnenstand zusätzlich die Schlagschatten der Pflanzen zu simulieren. Nun kann der Schlagschattenanteil innerhalb eines Waldgebietes prozentuell berechnet und der Einfluss von Schattenflächen auf die zuvor durchgeführten Grauwert-Analysen untersucht werden. Es wird erwartet, dass die Grauwerte innerhalb eines Waldgebiets mit Zunahme des Schattenanteils abnehmen.

Das Ziel einer topographischen Normalisierung ist es, den zuvor erwähnten Zusammenhang zwischen Illumination und Grauwert zu eliminieren und die Szene somit von Artefakten der Beleuchtungsinkonsistenz zu befreien. Wie gut das bei unterschiedlichen Normalisierungsmethoden gelingt, wird in einem weiteren Schritt untersucht. Es werden derzeit gängige Methoden für die topographische Normalisierung vorgestellt und anhand von Testdaten verglichen. Abschließend wird versucht, mit Hilfe der zuvor gewonnenen Erkenntnisse eine Vereinfachung des vom Joanneum Research verwendeten, stratifizierten Minnaert-Algorithmus zur Topographischen Normalisierung anzudiskutieren.

Die beschriebenen Analysen werden mit Hilfe von zehn Satellitenbildern durchgeführt. Dabei handelt es sich um IRS- und Landsat-Szenen, die in verschiedenen Epochen aufgenommen wurden, jedoch dasselbe Untersuchungsgebiet darstellen. Durch die unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkte ergeben sich immer andere Beleuchtungskonstellationen und phänologische Ausprägungen der Vegetation bei der Datenaufnahme. Dadurch kann das breite Spektrum, das die Vegetation in Satellitenbildern an Grauwerten haben kann, abgedeckt und Rückschlüsse auf Gemeinsamkeiten oder Systematiken gezogen werden.

### **1.3 Struktur der Arbeit**

Nach der kurzen Einleitung und Definition der Zielsetzung der Arbeit wird in Kapitel 2 auf die Grundlagen der Reflexion von Lichtstrahlen an Pflanzenbeständen näher eingegangen. Zuerst werden die Rückstrahlungscharakteristiken bei einzelnen Blattorganen erklärt und in weiterer Folge die komplexeren Zusammenhänge der Lichtreflexion an ganzen Waldkulturen beleuchtet.

Kapitel 3 widmet sich der topographischen Normalisierung. Dabei wird dieser Verarbeitungsschritt bei Satellitenbildern genau beschrieben und derzeit gängige Methoden vorgestellt. Es werden die Vor- und Nachteile der verschiedenen Modelle erläutert und auch Formeln für die Berechnung der Korrekturwerte angegeben.

Im darauffolgenden Kapitel 4 werden die mathematischen Grundlagen wiederholt, welche für das Verständnis der durchgeführten Analysen notwendig sind. Konkret handelt es sich dabei um die Regressionsanalyse. Es wird das verwendete lineare Regressionsmodell ausführlich beschrieben und statistische Kennzahlen, mit Hilfe derer die Qualität der Regression bewertet werden kann, angeführt.

Da Satellitenbilddaten die Basis für die durchgeführten Untersuchungen bilden, werden in Kapitel 5 die beiden Satellitensysteme IRS und Landsat vorgestellt. Es werden die einzelnen Satellitenmissionen der beiden Systeme in chronologischer Reihenfolge kurz thematisiert und detaillierter auf die beiden Satellitensysteme eingegangen, von denen die angesprochenen Szenen stammen. Des Weiteren wird das in der Steiermark liegende Testgebiet genau definiert und Details bezüglich der dortigen Vegetation präsentiert.

Anschließend werden in Kapitel 6 die Basisdaten beschrieben. Es folgen detaillierte technische Spezifikationen und allgemeine Beschreibungen der verwendeten Luftbilder, des digitalen Geländemodells, der Laserscannerdaten, und es werden die verwendeten Satellitenbilder angeführt. Zudem werden die Vorverarbeitungsschritte erklärt, die notwendig sind, um die Daten für eine gemeinsame Weiterverarbeitung aufeinander abzustimmen.

Mit Kapitel 7 beginnt die Beschreibung des praktischen Teiles der Masterarbeit. Es widmet sich der Datenverarbeitung, welche mit Hilfe von Spezialsoftware am Joanneum Research durchgeführt wurde. In mehreren Unterkapiteln werden die Inzidenzwinkelberechnung für die späteren Illuminations-Analysen, die Schattenflächenberechnung für die Schattensimulationen und die unterschiedlichen Einstellungen der verschiedenen, topographischen Normalisie-

rungsvarianten erläutert. Ein weiterer wichtiger Punkt in Kapitel 7 ist die Beschreibung und Darstellung der für die Analysen benötigten Referenzgebiete.

Kapitel 8 heißt „Durchführung“ und bietet einen Überblick über die angedachten Signaturanalysen. Es wird auf den Ablauf der Untersuchungen näher eingegangen und erklärt, zu welchem Zweck diese gemacht werden. Jedes angeführte Unterkapitel beschreibt dabei einen Analyseansatz. Nach der Beschreibung der Referenzgebiete in Form von Scatterplots wird der erwartete Einfluss der Topographie auf die Reflexionscharakteristiken von Waldbeständen untersucht, indem die Grauwerte eines Satellitenbildes und die herrschenden Beleuchtungsverhältnisse (Illumination) innerhalb einer Abbildung gegenübergestellt werden. Anschließend wird versucht, die gewonnenen Erkenntnisse anhand der Schattensimulationen zu erklären. Zum Schluss werden noch verschiedenartig topographisch normalisierte Satelliten szenen mit Hilfe der Referenzgebiete miteinander verglichen und bewertet.

In Kapitel 9 werden die Ergebnisse zu den in der „Durchführung“ beschriebenen Fragestellungen präsentiert und diskutiert, wobei die in Kapitel 8 gewählte Gliederung beibehalten wird.

Der bereits bei der Zielsetzung erwähnte Versuch einer Weiterentwicklung des vom Joanneum Research verwendeten Tools für die Reliefkorrektur ist Thema in Kapitel 10. Hier werden der Ansatz für die Optimierung vorgestellt und Details in Bezug auf die Implementierung angesprochen.

Schließlich endet die Masterarbeit mit einer Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse und einem Ausblick auf mögliche weiterführende Untersuchungen.



## 2 Reflexionseigenschaften von Baumbeständen

Der Grauwert eines Pixels im Satellitenbild, welches ein Waldgebiet darstellt, wird nicht nur von der Reflexionseigenschaft der einzelnen Blätter bestimmt. Vielmehr ist die Reflexion des gesamten Bestandes als ein Zusammenspiel von mehreren Faktoren zu sehen, welche in diesem Kapitel erläutert werden. Die Werke „Fernerkundung und Luftbildmessung“ (Hildebrandt 1996) und „Beobachtungen von Waldschäden im niedersächsischen Harz mit Methoden der Fernerkundung und Aufbau eines Waldinformationssystems“ (Schardt 1997) dienen hier als Informationsgrundlage für die Ausführungen.

### 2.1 Reflexion von Blattorganen<sup>1</sup>

Der prinzipielle Verlauf des Strahlengangs bei Reflexion/Absorption an einem Blatt ist in Abbildung 3 dargestellt:

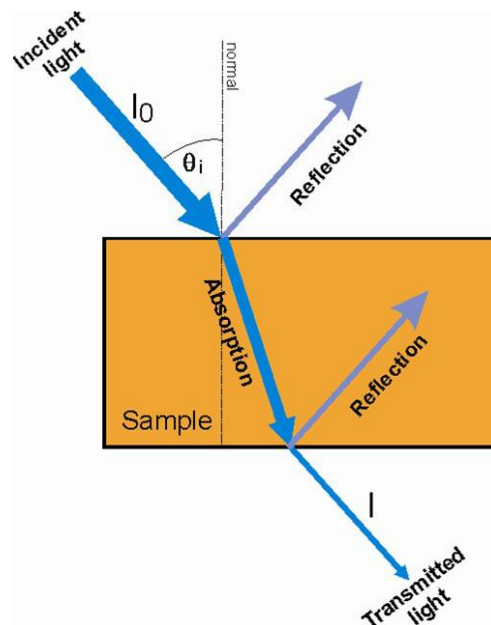


Abbildung 3: Strahlengang des Lichts beim Treffen auf ein Pflanzenblatt (nach Schardt 2008: S. 111)

Das auf die Blattoberfläche einfallende Licht wird teilweise reflektiert, transmittiert und absorbiert. Beim Eindringen in das Blatt wird der Lichtstrahl aufgrund des höheren Brechungsindex der Pflanze zum Lot hin abgelenkt. Auf der Blattunterseite wird der Lichtstrahl

<sup>1</sup> Vgl. hierzu und in Folge Schardt 1997: S. 27 – 31

nun einerseits wieder reflektiert, und andererseits verlässt er das Blatt wieder. Dabei erfolgt die Brechung nun vom Lot. Der Durchgang des Lichts durch die Pflanze wird als Transmission bezeichnet.

Je nach Blattart sind die Anteile an Reflexion, Absorption und Transmission verschieden, wobei Laubblätter in der Regel heller reflektieren als Nadeln.

Einen weiteren Faktor stellt die Wellenlänge der Strahlung dar. Zusammen mit dem roten und grünen Frequenzbereich wird das nahe Infrarot zumeist für die Forstauswertung herangezogen. Eine detaillierte Übersicht über das Reflexionsverhalten in Abhängigkeit zur Wellenlänge der Strahlung bietet Abbildung 4.

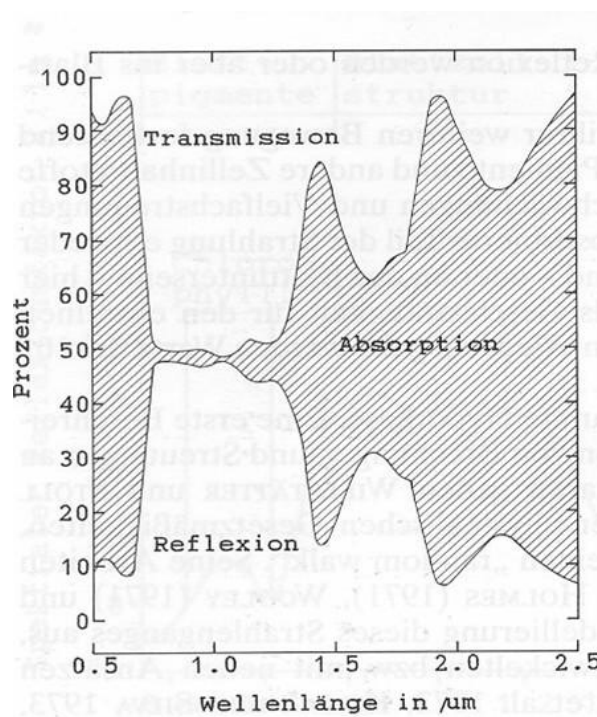


Abbildung 4: Reflexionsverhalten eines Pflanzenblattes in Abhängigkeit von der Wellenlänge (nach Schardt 2008: S. 112)

In Abbildung 4 kann man erkennen, dass bei Pflanzenbeständen im sichtbaren Frequenzbereich (0.45 - 0.7) ein hoher Absorptionsgrad von etwa 80 % vorherrscht. Dafür verantwortlich ist hauptsächlich die Chlorophyll-Absorption der Blattpigmente. Die Einbuchtung bei 0.52 - 0.60 zeigt, dass im grünen Bereich dabei die meiste Reflexion stattfindet. Im nahen Infrarot zwischen 0.8 und 1.4 Mikrometer hingegen wird der Lichtstrahl fast ausschließlich reflektiert oder transmittiert, was in diesem Wellenlängenbereich Großteils von der art- und zustands-spezifischen Zellstruktur bestimmt wird. Im mittleren Infrarot wird die Reflexion vermehrt vom Feuchtigkeitsgehalt der Pflanze beeinflusst. Gut zu erkennen sind die Wasserabsorpti-

onsbanden bei den Wellenlängen 1.4 und 1.9 Mikrometer, wobei aber der Absorptionsgrad gegenüber dem nahen Infrarot generell wieder höher ist.

Weitere Einflussfaktoren bei der Reflexion des Lichts sind Alter, phänologischer Zustand und Gesundheitszustand des Blattes.

## ***2.2 Reflexion von Baumbeständen<sup>2</sup>***

Das Reflexionsverhalten von Waldbeständen ist komplexer als die zuvor beschriebene Reflexion an einer einzelnen homogenen Blattoberfläche. Dafür verantwortlich sind die Rauigkeit des Kronendachs sowie diverse Störfaktoren, die die Rückstrahlung dämpfen. Dazu zählen:

- Baumart, wobei Laub heller als Nadel reflektiert
- Jahreszeit (Nadelwald immer ähnlich, Laub im Winter keine Blätter)
- Gesundheitszustand
- Alter, junge Kulturen beim Nadelwald mehr Reflexion als alte
- Beschirmungsgrad (durchscheinende Bodenvegetation, Schatten)

Neben den bereits genannten Einflüssen, die direkt von den Baumbeständen hervorgerufen werden, beeinflussen auch das Relief des Kronendachs und der Sonnenstand die Reflexion. Durch das bereits erwähnte, raue Kronendach entsteht bei tief stehender Sonne vor allem bei Waldgebieten viel Schatten. Das hat einen Verdunkelungseffekt zur Folge.

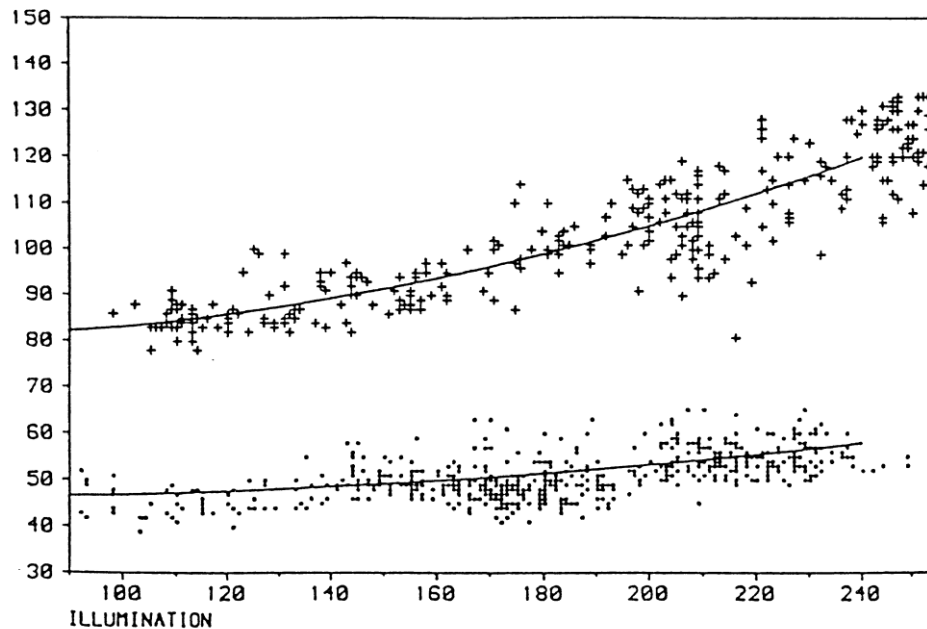
Ein stark reliefiertes Terrain kann diesen Effekt noch verstärken. Je nach Lage (Nord- oder Südhang) und Steilheit des Geländes wird der Einfallswinkel der Sonnenstrahlung verändert, und die unterschiedliche Beleuchtung ändert wiederum das Aussehen im Satellitenbild.

Es muss auch zwischen den verschiedenen Baumarten differenziert werden, da diese verschieden stark auf den Einfluss der Beleuchtung reagieren.

Abbildung 5 zeigt das unterschiedliche Reflexionsverhalten von Laub- und Nadelwald bei zunehmender Illumination als Beispiel für die zuvor beschriebene Besonderheit.

---

<sup>2</sup> Vgl. hierzu und in Folge Schardt 1997: S. 31 – 34



**Abbildung 5: Reflexionsverhalten von Laub- (oben) und Nadelwald (unten) in Abhängigkeit der Illumination im 4.Kanal des Landsat-TM (Schardt 1990: S. 126)**

So hängt die gerichtete Reflexion von Buchenbeständen stärker als jene von Fichtenbeständen von der Beleuchtung ab. Dafür hauptverantwortlich ist laut Schardt die vertikale Struktur des Kronendachs (vgl. Schardt 1990: S. 124 – 132).

Die Unterscheidbarkeit von Baumarten, Baumalter oder Gesundheitszustand ist abhängig vom betrachteten Spektralbereich. Eine Differenzierung von Laub- und Nadelwald beispielsweise ist in den Infrarotkanälen gut möglich (für NIR siehe wiederum Abbildung 5), wobei Laubbestände dort stärker reflektieren als Nadelwaldbestände. Junger Nadelwald reflektiert in allen Frequenzbändern heller als alter. Bei Laubwäldern gibt es diesbezüglich nicht so große Unterschiede.

Während gesunde Vegetation im sichtbaren Frequenzbereich geringere Reflexionseigenschaften besitzen als geschädigte, ist es im Infrarotbereich genau umgekehrt. Dort reflektieren gesunde Pflanzen mehr.

Ein weiteres Thema in Satellitenbildern sind Mischpixel. Sie entstehen, wenn verschiedene Vegetationstypen auf der Erdoberfläche innerhalb eines Bildpunkts der Satellitenszene interpretiert werden und sich der Grauwert dieses Bildpunkts dann aus diesen spektral unterschiedlichen Objekten zusammensetzt. Der so entstandene Grauwert unterscheidet sich von den Grauwerten der umliegenden Pixel, welche aus reinen Pflanzenbeständen stammen, dadurch merklich.

In Mischwäldern sind solche Mischpixel thematisch sinnvoll, da sie eben aus Laub- und Nadelwäldern zusammengesetzt sind und der dadurch entstehende Grauwert das Erscheinungsbild dieser Klasse prägt.

Sie können auch ein Indiz für geringeren Beschirmungsgrad sein, wobei sie dann aus Bäumen und der durchscheinenden Bodenvegetation bzw. der Schattenflächen gebildet werden.

Je geringer die Bodenauflösung eines Sensors ist, desto mehr Mischpixel entstehen, weil dabei eine größere Fläche der Erdoberfläche abgedeckt wird und somit die Chance auf unterschiedliche Vegetation innerhalb des Pixels größer ist.

### **3 State of the Art – Topographische Normalisierung**

Das folgende Kapitel widmet sich dem aktuellen Stand der Forschung in Bezug auf die topographische Normalisierung, und es werden dabei die gängigsten Methoden vorgestellt.

#### **3.1 Allgemein**

Prinzipiell gehört die topographische Normalisierung zu einem wichtigen Schritt der Datenvorverarbeitung bei der automatischen Bildinterpretation. In gebirgigen Bereichen beeinflusst das Relief die Intensität der Grauwerte von Flächen mit an sich gleichen Oberflächeneigenschaften in einem Satellitenbild. In flachen Gegenden tritt dieser Effekt nicht auf, und die Grauwerte werden nur von den atmosphärischen Bedingungen verfälscht, welche allerdings auch im Gebirge einen Einfluss haben.

Die meisten einfachen Methoden für die Beleuchtungskorrektur (z.B.: Kosinus-Methode) basieren auf dem Prinzip der Lambert'schen Reflexion. Es besagt, dass einfallende Strahlung unabhängig von der Struktur des sich am Boden befindenden Objekts gleichmäßig in alle Richtungen rückgestrahlt wird, also in alle Richtungen diffus reflektiert.

Diese Vereinfachung der Reflexion weist auf der Erdoberfläche aufgrund von Absorption, der Rauigkeit des Geländes oder sich dort befindlicher Objekte allerdings keine generelle Gültigkeit auf, sondern ist nur unter bestimmten Voraussetzungen stimmig. (vgl. Smith et al. 1980: S. 1183 – 1189)

In den meisten Fällen ist ein digitales Geländemodell Grundlage für die topographische Normalisierung einer Satellitenszene. Daraus können Hangneigung bzw. Exposition einer Fläche berechnet werden. Weitere benötigte Parameter sind der Sonnenazimut und –elevation zum Aufnahmezeitpunkt, welche dem Header des Satellitenbildes entnommen werden können.

#### **3.2 Ratio - Bildung**

Ganz ohne Zusatzdaten, wie z.B. ein DGM, kommt das Verfahren der Ratio-Bildung aus. Dabei werden einfach Verhältnisse zwischen den einzelnen Grauwertkanälen eines Multi-

spektralbildes erzeugt. Da reliefbedingte Helligkeitsunterschiede in einem hohen Maße multiplikativ sind (Objekt A ist auf einem beleuchteten Hang  $x$  mal heller als auf einem beschatteten) und nichts mit der Wellenlänge zu tun haben, zeigen die dabei erzeugten Ratio-Kanäle eine geringere Abhängigkeit von topographischen Effekten.

Es wird einfach der Grauwert des Pixels in Kanal a mit demselben Pixel in Kanal b dividiert:

$$\hat{\rho}_{ijRATIO} = \frac{\rho_{ijA}}{\rho_{ijB}} * k \quad (1)$$

mit

$\hat{\rho}_{ijRATIO}$ ... neuer Wert

$\rho_{ijA}, \rho_{ijB}$ ... Grauwerte aller Bildelemente  $i, j$  von Kanal A bzw. B

$k$  ... Faktor, mit dem der Quotient auf neuen Grauwert hochgerechnet wird

Da der Atmosphäreneinfluss die Spektralbänder verschieden stark beeinflusst, ist eine Atmosphärenkorrektur vor der Berechnung des Ratio-Kanals notwendig. (Vgl. Hildebrandt 1996: S. 495 – 496.)

Ein Nachteil der Ratio-Bildung von Grauwertkanälen ist, dass dadurch auch wertvolle Bildinformation verloren geht. Diese Methode hat daher in der Fernerkundung wenig Bedeutung.

### **3.3 Kosinus-Methode**

Bei der Kosinus-Methode, die auf dem Lambert'schen Strahlungsmodell beruht, wird der lokale Einstrahlungswinkel der Sonne (Illumination) in jedem Pixel des Satellitenbildes benötigt. Dieser kann aus den bereits erwähnten Parametern Sonnenstand und Neigung bzw. Exposition des Hanges berechnet werden (siehe Abbildung 2 auf Seite 3).

$$IL = \cos(i) = \cos(\Theta_N) * \cos(\Theta_S) + \sin(\Theta_S) * \sin(\Theta_N) * \cos(\Phi_S - \Phi_N) \quad (2)$$

mit

$IL$  ... Illumination

$i$  ... lokaler solarer Einfallswinkel (Inzidenzwinkel)

$\Theta_N$ ... Neigungswinkel (Slope)

$\Theta_S$ ... Zenitwinkel der Sonnenstrahlung

$\Phi_S$ ... Azimut der Sonnenstrahlung

$\Phi_N$ ... Exposition des Geländeausschnitts (Aspect)

Die normalisierte Signatur berechnet sich aus der Sensorsignatur und der Illumination: (Vgl. Hildebrandt 1996: S. 496)

$$L_H = L_T * \frac{\cos(\Theta_S)}{\cos(i)} \quad (3)$$

mit

$L_H$ ... Reflexionswert für eine horizontale Oberfläche (korrigierter Wert)

$L_T$ ... Reflexionswert für eine geneigte Oberfläche

$\Theta_S$ ... Zenit der Sonnenstrahlung

$i$  ... lokaler solarer Einfallswinkel (Inzidenzwinkel)

Wie viele Studien beweisen (Smith et al. 1980, Meyer et al. 1993, Herold et al. 2000), führt die Kosinus-Methode in steilen Gebieten und an beschatteten Hängen zu einer Überkorrektur, und hellt die Grauwerte in diesen Bereichen zu stark auf. Dieser Effekt ist auf die unzureichende Vereinfachung des Reflexionsmodells (Lambert'sche Reflexion) zurückzuführen. Zudem wird auch das objekttypische Reflexionsverhalten von Pflanzenbeständen nicht berücksichtigt (siehe Abbildung 5 auf Seite 10).

### **3.4 Minnaert-Methode**

Um die zu starke Aufhellung in sonnenabgewandten Gebirgsflanken in den Griff zu bekommen, wird die Kosinus-Methode um die sogenannte Minnaert-Konstante  $k$  erweitert. Diese



wird für jeden Grauwertkanal einer Satellitenszene empirisch durch lineare Regression zwischen den Grauwerten und den Illuminationswerten der Pixel berechnet, wobei  $k$  als Steigung der Regressionsgeraden zu betrachten ist und sich zwischen 0 und 1 bewegt. (Vgl. Smith et al. 1980: S. 1183 – 1189)

Die Formel für die Minnaert-Korrektur lautet wie folgt (vgl. Minnaert 1941: S. 403 – 410):

$$L_H = L_T * \left( \frac{\cos \Theta_S}{\cos(i)} \right)^k \quad (4)$$

mit

$L_H$ ... Reflexionswert für eine horizontale Oberfläche (korrigierter Reflexionswert)

$L_T$ ... Reflexionswert für eine geneigte Oberfläche

$\Theta_S$ ... Zenitwinkel der Sonnenstrahlung

$i$  ... lokaler solarer Einfallswinkel (Inzidenzwinkel)

$k$ ... Minnaert-Konstante

Die nach der Minnaert-Korrektur erhaltenen Signaturwerte folgen nicht mehr dem Prinzip der Lambert'schen Reflexion. Mit der Minnaert-Konstante wird viel mehr die Abweichung zum Lambert'schen Modell beschrieben ( $k=1 \rightarrow$  Lambert'sche Reflexion). Sie variiert im Bild und hängt unter anderem mit der Oberflächenbeschaffenheit zusammen.

### **3.5 Modifiziertes Minnaert-Modell**

Das durch den Neigungswinkel der betreffenden Fläche erweiterte Minnaert-Modell wird als modifiziertes Minnaert-Modell bezeichnet. Dadurch wird auf den Einfluss der Geländelage stärker Rücksicht genommen. Weitere Details wie das genaue Herleiten der Formel oder die Bestimmung der Minnaert-Konstanten sind Smith et al. (1980: S. 1183 – 1189) oder Colby (1991: S. 531 – 537) zu entnehmen.

$$L_H = L_T * \cos(\Theta_N) * \left( \frac{\cos(\Theta_S)}{\cos(i) * \cos(\Theta_N)} \right)^k \quad (5)$$

mit

$L_H$ ... Reflexionswert für eine horizontale Oberfläche (korrigierter Reflexionswert)

$L_T$ ... Reflexionswert für eine geneigte Oberfläche

$\Theta_N$ ... Neigungswinkel (Slope)

$\Theta_S$ ... Zenitwinkel der Sonnenstrahlung

$i$  ... lokaler solarer Einfallswinkel (Inzidenzwinkel)

$k$ ... Minnaert-Konstante

Diese Normalisierungsmethode wird in der vorliegenden Masterarbeit neben der Kosinus-Korrektur (Kapitel 3.3) und der Self Calibrating Topographic Normalization (Kapitel 3.7) verwendet und die Durchführung im Programm ERDAS Imagine in Kapitel 7.3 erläutert.

### **3.6 Einfache, stratifizierte Minnaert-Korrektur**

Wie bereits in Kapitel 2.2 erwähnt, bekommt ein und dieselbe Vegetationsklasse auf der Erdoberfläche reliefbedingt durch unterschiedliche Beleuchtung eine unterschiedliche Signatur im Satellitenbild. Da der Grad der Beeinflussung nicht nur rein von Sonnenstand und Hanglage abhängt, sondern mit der Rauigkeit der Klasse zunimmt, wird die stratifizierte Minnaert-Korrektur eingeführt (vgl. Twele & Erasmi 2005: S. 227 - 234). Somit kann auf die individuellen Reflexionseigenschaften der verschiedenen Objektklassen Rücksicht genommen werden. Es wird ein Bild durch unüberwachte Klassifizierung in Straten ähnlicher Grauwerte unterteilt und anschließend für jedes Stratum in jedem Spektralband einzeln eine Minnaert-Konstante bestimmt.

Die unüberwachte Klassifizierung erfolgt in den meisten Fällen durch Einbindung des NDVI (fernerkundungsgestützter Landoberflächenindikator), der Informationen über die Art der Vegetation liefert. Der NDVI gibt Aufschluss über Parameter wie Dichte des Bewuchses oder Alter bzw. Gesundheitszustand der pflanzlichen Zellen und ist zudem sensibler bei der Erkennung auch relativ spärlich vorkommender Vegetation.

Eine Stratifizierung kann prinzipiell mit jedem, auf dem Minnaert-Modell basierenden Verfahren durchgeführt werden. Die besten Ergebnisse wurden laut Twele & Erasmi mit der im vorherigen Kapitel erklärten modifizierten Minnaert-Methode erzielt (siehe Formel (5), mit je nach Landoberfläche optimierter Minnaert-Konstante  $k$ ).

### ***3.7 Self Calibrating Topographic Normalization<sup>3</sup>***

Die Forschungsgruppe Fernerkundung und Geoinformation des Joanneum Research entwickelte ein eigenes Tool für die topographische Normalisierung von Satellitenbilddaten. Dieses wurde in das firmeninterne Softwarepaket IMPACT integriert und hat den großen Vorteil, dass es Bilder mit Hilfe des dazugehörigen DGMs völlig automatisch und ohne weitere Referenzdaten beleuchtungskorrigiert. Das ist bei der Bearbeitung einer höheren Anzahl von Satellitenbildern ein großer Vorteil.

Basierend auf dem stratifizierten Minnaert-Modell, welches von einer getrennten Berechnung der Minnaert-Konstanten für die jeweiligen Vegetationsklassen ausgeht, wird ein iterativer Ansatz verfolgt, um die Topographische Korrektur schrittweise zu verbessern.

In einem ersten Schritt werden Verhältnisse von den Multispektralbändern der Fernerkundungsdaten gebildet. Diese weisen, wie bereits erwähnt, eine geringere Abhängigkeit von Beleuchtungseffekten auf. Die Ratio-Bilder werden anschließend in einer ersten Iteration unüberwacht klassifiziert und in spektral einheitliche Bereiche unterteilt. Für die enthaltenen Vegetationsklassen werden anschließend separat Minnaert-Konstanten berechnet. Dies geschieht durch lineare Regression der Grauwerte der Originalbänder des Satellitenbildes und der Illuminationswerte der Pixel, die aus dem DGM berechnet werden.

Nun wird die Szene mit Hilfe des Mittelwertes der klassenspezifischen Minnaert-Konstanten topographisch normalisiert.

Das erhaltene Ergebnisbild aus der ersten Iteration wird als Input für eine weitere unüberwachte Klassifizierung in der zweiten Iteration verwendet. Es werden wiederum die Minnaert-Konstanten für die jeweiligen Vegetationsklassen separat berechnet und mit dem Mittelwert erneut eine topographische Normalisierung gerechnet.

Auch in der dritten Iteration wird die mittlerweile zweimal topographisch korrigierte Szene als Basis für eine unüberwachte Klassifizierung herangezogen. Nach der Berechnung der

---

<sup>3</sup> Vgl. hierzu und in Folge Gallaun 2007: S. 2 – 3

Minnaert-Konstanten für die jeweiligen Landnutzungsklassen wird nun allerdings nicht der Mittelwert gebildet, sondern jede Klasse einzeln mit ihrer dazugehörigen Minnaert-Konstante im Bild korrigiert.

Die Formel für die iterative Minnaert-Korrektur lautet in diesem Fall (siehe Smith et al. 1980: S. 1183 – 1189):

$$L_H = \frac{L_T * \cos(\Theta_N)}{(\cos(i) * \cos(\Theta_N))^k} \quad (6)$$

mit

$L_H$ ... Reflexionswert für eine horizontale Oberfläche (korrigierter Reflexionswert)

$L_T$ ... Reflexionswert für eine geneigte Oberfläche

$\Theta_N$ ... Neigungswinkel (Slope)

$i$  ... lokaler solarer Einfallswinkel (Inzidenzwinkel)

$k$ ... Minnaert-Konstante (für jedes Stratum)

Abbildung 6 zeigt eine schematische Darstellung des Ablaufs der topographischen Normalisierung.

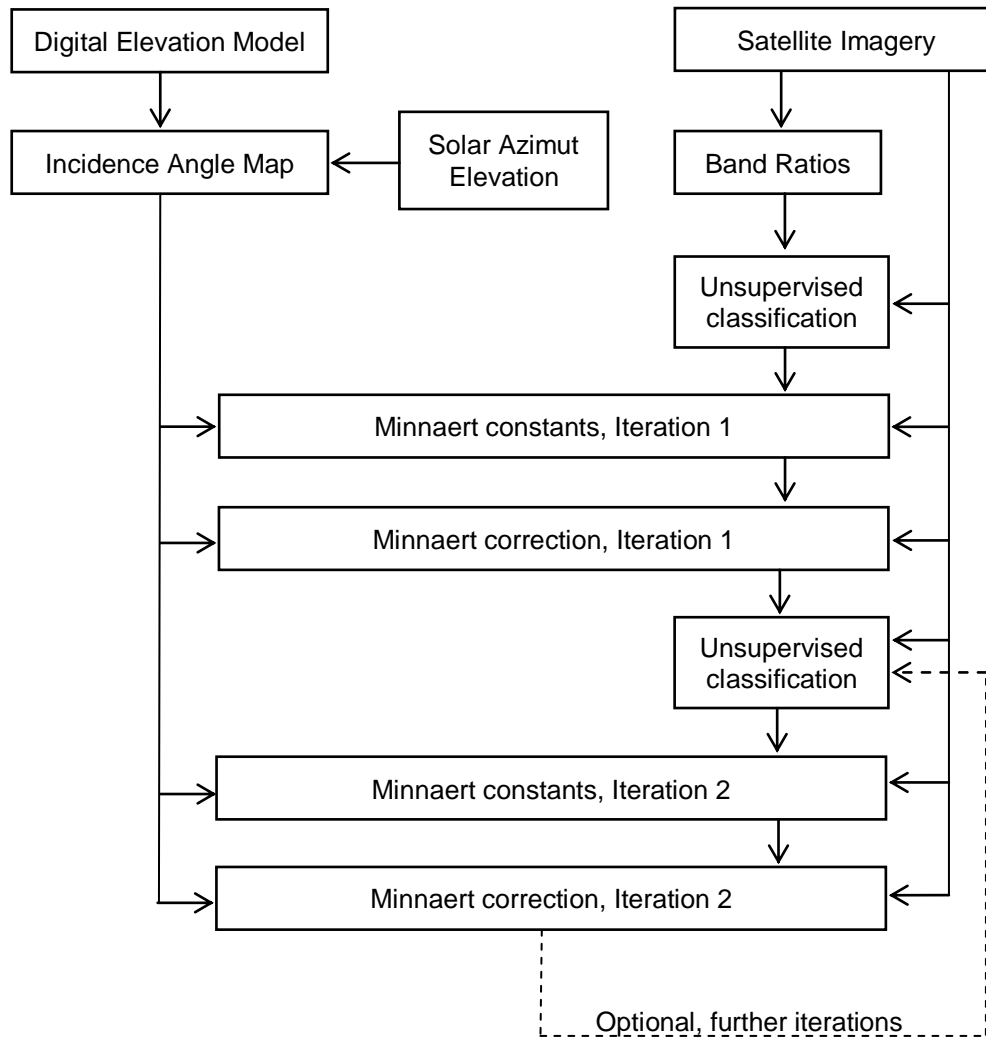


Abbildung 6: Workflow der Topographischen Normalisierung der Impact Software vom Joanneum Research

## 4 Theoretische Grundlagen – Regressionsanalyse

Für die Untersuchung des Einflusses der Topographie auf die Reflexion wird in dieser Arbeit die Regressionsanalyse verwendet. Sie ist ein Verfahren der Statistik, und die ihr zugrunde liegenden mathematischen Grundlagen werden in diesem Kapitel näher erläutert. Als Informationsquelle für die Regressionsanalyse dient das Werk „Regression“ (Härdle 2007).

### 4.1 Allgemein<sup>4</sup>

Setzt sich eine bestimmte Zielgröße  $y$  aus einen oder mehreren anderen Größen (erklärende Variablen, Kovariablen  $x_1, \dots, x_k$ ) zusammen, besteht zwischen diesen ein Zusammenhang  $f(x_1, \dots, x_k)$ . Um die Art des Zusammenhangs festzustellen bzw. den Einfluss der Kovariablen auf die Zielgröße zu untersuchen, sind Regressionsanalysen geeignet.

Um die Zielgröße bestimmen zu können, werden in der Regel mehrere Beobachtungen gemacht, welche zumeist leicht unterschiedlich sind. Das bedeutet, dass die Zielgröße nicht exakt als Funktion der Kovariablen definiert werden kann, sondern mit zufälligen Abweichungen (Störgröße, Fehlerterm  $\varepsilon$ ) behaftet ist. Sie ist also eine Zufallsvariable.

Der anhand der Beobachtungen modellierte Wert (Mittelwert) für die Zielgröße wird als Erwartungswert  $E(y)$  bezeichnet. Bei der Regressionsanalyse wird versucht, in den gegebenen Daten durch Schätzung des systematischen Anteils, den stochastischen Anteil, also den zufälligen Einfluss der Störgrößen, zu isolieren:

$$y = E(y|x_1 \dots x_k) + \varepsilon = f(x_1 \dots x_k) + \varepsilon \quad (7)$$

Es existiert eine Vielzahl an Regressionsmodellen, die zur Lösung verschiedenster Problemstellungen entwickelt wurden. Die einfachste Variante ist dabei das lineare Regressionsmodell, das für die Anwendungen in dieser Arbeit ausreicht und näher erläutert wird.

---

<sup>4</sup> Vgl. hierzu und in Folge Härdle 2007: S. 19 – 111

## 4.2 Das lineare Regressionsmodell

Beim linearen Regressionsmodell ist der Zusammenhang zwischen den Daten eine Linearkombination der Kovariablen plus der Störgröße (Additivität). Ein Spezialfall ist das Standardmodell der linearen Einfachregression, das nur eine Kovariable besitzt. Für einen Datensatz erhält man:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (8)$$

Des Weiteren gelten folgende Modellannahmen:

$$E(\varepsilon_i) = 0 \text{ und } \text{Var}(\varepsilon_i) = \sigma^2$$

Die Fehler sind unabhängig und identisch verteilt. Das bedeutet, dass die Störungen im Mittel Null und ihre Varianzen konstant sind. Eine weitere zu erfüllende Eigenschaft ist die Existenz von gleich großen Varianzen der Fehlervariablen und wird als Homoskedastizität bezeichnet.

Wenn die Fehler (zumindest approximativ) zusätzlich normalverteilt sind, spricht man von einer linearen Normalregression.

$$\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$$

Wenn dies der Fall ist, können problemlos Hypothesentests und die Konstruktion von Konfidenzintervallen durchgeführt werden und es gilt auch zusätzlich für die Zielvariablen die Normalverteilung.

$$E(y_i) = \beta_0 + \beta_1 x_i, \quad \text{Var}(y_i) = \sigma^2 \quad (9)$$

In der Formel (9) werden nun die unbekannt Parameter  $\beta_0$  und  $\beta_1$  geschätzt. Dafür sind zumindest mehr Beobachtungen als Regressionskoeffizienten nötig.

Danach werden die Schätzgrößen, die durch ein „Dach“ gekennzeichnet sind, in die Modellgerade eingesetzt. Die geschätzte Regressionsgerade entspricht bei bekannter Kovariable dem Erwartungswert von  $y$  und kann zur Prognose der Zielgröße  $y$  herangezogen werden:

$$\hat{y} = E(\widehat{y|x}) = \hat{f}(x) = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x \quad (10)$$

Die Schätzfehler, also die Abweichungen der Schätzwerte vom wahren Wert, werden als Residuen bezeichnet. Sie sind also Schätzungen der Störgröße und beinhalten die Reststreuung der Daten:

$$\hat{\varepsilon}_i = y_i - \hat{y}_i \quad (11)$$

Üblicherweise werden die Regressionsparameter nach der von Legendre im Jahre 1906 erfundenen Methode der kleinsten Quadrate geschätzt. Für die Beschreibung der Parameterschätzung betrachten wir den allgemeinen Ansatz der linearen Regression und wechseln in die Matrixnotation:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (12)$$

Dabei sind  $\mathbf{y}$ ,  $\boldsymbol{\varepsilon}$  und  $\boldsymbol{\beta}$  die Spaltenvektoren für die Zielgrößen, Störgrößen und unbekanntem Parameter und  $\mathbf{X}$  die sogenannte Designmatrix, die den funktionellen Zusammenhang beschreibt:

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{nk} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}'_1 \\ \vdots \\ \mathbf{x}'_n \end{pmatrix}$$

Die Schätzwerte werden so bestimmt, dass die Summe der quadratischen Abweichungen minimal wird.

$$KQ(\boldsymbol{\beta}) = \sum_{i=1}^n (y_i - \mathbf{x}'_i \boldsymbol{\beta})^2 = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \boldsymbol{\varepsilon}' \boldsymbol{\varepsilon} \quad (13)$$

In weiterer Folge also:

$$KQ(\boldsymbol{\beta}) = \boldsymbol{\varepsilon}' \boldsymbol{\varepsilon} = (\mathbf{y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta})' (\mathbf{y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}) = \mathbf{y}' \mathbf{y} - 2\mathbf{y}' \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\beta}' \mathbf{X}' \mathbf{X} \boldsymbol{\beta} \quad (14)$$



Nach Differentiation nach  $\boldsymbol{\beta}$  und diversen Umformungen erhält man zur Lösung des Minimierungsproblems durch Nullsetzen die Normalgleichung:

$$\mathbf{X}'\mathbf{X}\boldsymbol{\beta} = \mathbf{X}'\mathbf{y} \quad (15)$$

Da  $\mathbf{X}'\mathbf{X}$  positiv definit und invertierbar ist, folgt eine eindeutig lösbare Schätzung für die Parameter:

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}'\mathbf{y} \quad (16)$$

Damit kann der Erwartungswert für die Zielgröße bestimmt werden:

$$\widehat{E(\mathbf{y})} = \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X}\hat{\boldsymbol{\beta}} \quad (17)$$

Nach dem Einsetzen des QR-Schätzers erhält man:

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X}(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}'\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{y} \quad (18)$$

Die  $n \times n$  – Matrix  $\mathbf{H}$  wird als Prädiktionsmatrix bezeichnet. Sie ist symmetrisch und mit ihrer Hilfe lassen sich die Residuen berechnen:

$$\hat{\boldsymbol{\varepsilon}} = \mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{y} = (\mathbf{I} - \mathbf{H})\mathbf{y} \quad (19)$$

### 4.3 Qualitätskenngrößen

Zur Qualitätsvalidierung der Regressionsanalysen werden in dieser Arbeit zwei statistische Kenngrößen verwendet, die in diesem Kapitel erklärt werden.

#### Bestimmtheitsmaß

Nach der Anpassung eines Regressionsmodells an einen Datensatz kann die Modellgüte mit Hilfe des Bestimmtheitsmaßes gemessen werden. Es wird mit  $R^2$  bezeichnet und setzt sich wie folgt zusammen:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \hat{\varepsilon}_i^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (20)$$

$R^2$  liegt zwischen Null und Eins. Je näher es sich bei Eins befindet, desto kleiner ist die Residuenquadratsumme ( $\sum \hat{\varepsilon}_i^2$ ) und desto besser die lineare Regressionsanpassung. Ist etwa  $R^2=0$ , so besitzen die Kovariablen keinerlei Erklärungsgehalt für den Erwartungswert der Zielgröße. Die Regressionsanalyse wäre somit nicht sinnvoll.

Für die einfache lineare Regression gilt zudem:

$$R^2 = r_{xy}^2$$

Das Bestimmtheitsmaß stimmt hier also mit den quadrierten, empirischen Korrelationskoeffizienten zwischen x und y überein.

Bei der Beurteilung von verschiedenen Regressionsmodellen müssen folgende Kriterien erfüllt sein, sodass ein Vergleich anhand des Bestimmtheitsmaßes zulässig ist:

- Gleiche Zielgröße in allen Modellen
- Gleiche Anzahl an Regressionskoeffizienten in allen Modellen
- Eine Konstante  $\beta_0$  in allen Modellen

Außerdem wächst das Bestimmtheitsmaß bei Hinzunahme von weiteren erklärenden Variablen ins Modell an.

### Variationskoeffizient<sup>5</sup>

Der Variationskoeffizient (coefficient of variation) vereint die Größen Standardabweichung  $s$  und arithmetischer Mittelwert  $\bar{x}$  einer Datenreihe zu einer statistischen Kenngröße. Er gibt das Verhältnis der beiden Größen zueinander an und wird deshalb auch als relatives Streuungsmaß bezeichnet:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \quad (21)$$

Da die Höhe der Standardabweichung nur in Kombination mit dem Mittelwert Aufschluss über die Qualität einer Messreihe gibt, ist diese Größe sehr sinnvoll. Datensätze mit großen Mittelwerten weisen im Allgemeinen größere Standardabweichungen auf als welche mit geringen Mittelwerten. Der Variationskoeffizient erlaubt also den Vergleich von Datenreihen mit sehr unterschiedlichen Mittelwerten. Da er eine dimensionslose Größe ist, sind damit auch Vergleiche von Sets mit unterschiedlichen Einheiten möglich.

Generell gilt, je kleiner der Variationskoeffizient, desto weniger streuen die Daten.

---

<sup>5</sup> Vgl. hierzu und in Folge [www.paux.com/w/statistik/s.67-variationskoeffizient](http://www.paux.com/w/statistik/s.67-variationskoeffizient), Stand: Juni 2013

## 5 Datengrundlagen und Untersuchungsgebiet

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der verwendeten Satellitenbilddaten erläutert. Für die Untersuchungen werden Landsat-5 TM – Szenen sowie IRS – Szenen verwendet, auf welche in Kapitel 6.4 näher eingegangen wird. Die folgenden Ausführungen beleuchten die historische Entwicklung der beiden erwähnten, passiven Sensorsysteme und beschreiben die technischen Details bzw. Orbitparameter der Satelliten. Die für die Verfassung des Kapitels notwendigen Informationen wurden aus elektronischen Datenquellen (Online – Ressourcen) entnommen.

Ferner wird das Untersuchungsgebiet kurz vorgestellt.

### 5.1 Landsat<sup>6</sup>

Die Landsat – Satelliten zählen zur Reihe der Erdbeobachtungssatelliten. Ihre Satellitenbilder dienen der „National Aeronautics and Space Administration“ (NASA) und vielen anderen kommerziellen Nutzern zur Erkundung der Erdoberfläche und Küstenregionen. Insgesamt wurden acht Landsat-Satelliten gestartet, wobei zwischen drei Baureihen unterschieden werden kann.

Die Landsat-Mission startete vor über 30 Jahren mit dem ersten Satelliten „Earth Resources Technology Satellite-1 (ERTS-1)“ im Jahre 1972. Dieser wurde auf Basis eines Nimbus-Wettersatelliten entwickelt und erst 1975 in „Landsat-1“ umbenannt.

Landsat-1, -2 und -3 entstammten derselben Baureihe und besaßen deshalb auch dieselben Orbitparameter. In 907 bis 913 km Höhe durchliefen sie einen quasipolaren, sonnensynchronen Orbit mit  $99,2^\circ$  Inklination. Dieser Orbit wurde gewählt, um für annähernd konstante Aufnahmebedingungen zu sorgen, da der Satellit täglich zur selben Zeit dieselbe Position auf der Erdoberfläche passierte bzw. observierte. Der Äquator beispielsweise wird täglich um 9:30 (lokale Zeit) überflogen. Für eine Erdumrundung benötigte Landsat etwa 100 Minuten. Daraus folgte, dass die Erde pro Tag 14 Mal umlaufen und an jedem 18. Tag derselbe 185 km breite Streifen abgetastet wurde.

---

<sup>6</sup> Vgl. hierzu und in Folge Url: [landsat.gsfc.nasa.gov](http://landsat.gsfc.nasa.gov), Stand Juni 2013

Ausgestattet war der Satellit mit einem Videosensor (Return Beam Vidicon RBV) im multi-spektralen Modus und einem Multispektralscanner (MSS), wobei vier Spektralkanäle (grün, rot, NIR, NIR 2) unterstützt wurden und der Satellit eine geometrische Auflösung von 79 Metern besaß.

Landsat-1 war sechs Jahre lang in Betrieb und wurde 1978 eingestellt.

Bereits 1975 wurde Landsat-2 in den Orbit geschossen und arbeitete mit denselben Instrumenten an Board wie sein Vorgänger.

Landsat-3 nahm 1978 mit optimierten Sensoren den Einsatz auf. Dabei wurden zwei RBV in panchromatischen Modi mit resultierender besserer Bodenauflösung installiert und MSS mit einem Thermalband erweitert. 1983 wurde sowohl der Betrieb von Landsat-2 wie auch der von Landsat-3 eingestellt.

Landsat-4 startete 1982, lief aber nur kurz problemlos und ging 1987 schon wieder offline. Dabei kam erstmals das satellitengestützte, opto-mechanische System „Thematic Mapper“ (TM) zur Erfassung von Fernerkundungsdaten zum Einsatz. Dieser Sensor wird später noch ausführlicher erklärt.

Aufgrund der angesprochenen Probleme von Landsat-4 ging die nachfolgende Landsat-5 – Mission mit identischen Sensorpaketen bereits 1984 in Betrieb und blieb bis zum 06.01.2013 im operablen Zustand. Damit wurde sie mit 29 Jahren, drei Monaten und vier Tagen und insgesamt über 2.5 Millionen aufgenommener Bildern zur längst-dienenden Erdbeobachtungs-Mission der Geschichte. Da die Landsat-Satellitenbilddaten für diese Arbeit allesamt Produkte von Landsat-5 sind, wird auf diesen Satelliten näher eingegangen.

Landsat-5 TM wurde am 01.03.1984 von der Vandenberg Air Force Base in Kalifornien, USA von der NASA mit der Trägerrakete Delta 3920 gestartet. Der 1407 kg schwere Satellit umkreist die Erde auf einer polaren, sonnensynchronen und nahezu kreisförmigen Umlaufbahn mit ähnlichen Orbitparametern wie bei den Satelliten Landsat 1 - 3. (siehe Tabelle 1)

**Tabelle 1: Orbitparameter von Landsat-5 ([landsat.usgs.gov/about\\_landsat5.php](http://landsat.usgs.gov/about_landsat5.php), Stand: Juni 2013)**

Umlaufzeit:	99 min
Inklination:	98,2°
Repeat Coverage:	16 Tage
Höhe:	705 km
Swath-Breite:	185 km

Der Äquator wird täglich um 9:45 Uhr bei einer Streuung von +/- 15 Minuten überflogen.

Mit dem erstmals bei Landsat-4 verwendeten Sensorsystem „Thematic Mapper“ wird eine Optimierung in mehreren Bereichen der Akquirierung von Fernerkundungsdaten erreicht. Bei der technischen Weiterentwicklung des Multispektral-Scanners MSS wird die spektrale Auflösung vergrößert. Die Strahlung wird in sieben Frequenzbänder aufgezeichnet, wobei im sichtbaren Bereich der blaue Kanal und im infraroten Bereich zwei zusätzliche Infrarot-Kanäle ergänzt wurden. (siehe Tabelle 2)

**Tabelle 2: Frequenzkanäle beim Sensor "Thematic Mapper" ([landsat.usgs.gov/about\\_landsat5.php](http://landsat.usgs.gov/about_landsat5.php), Stand: Juni 2013)**

Kanal	Strahlungsart	Wellenlänge (µm)	Auflösung (m)
1	blau	0.45 – 0.52	30
2	blaugrün + grüngelb	0.52 – 0.60	30
3	orange + rot	0.63 – 0.69	30
4	Nahes Infrarot	0.76 – 0.90	30
5	Kurzwelliges Infrarot	1.55 – 1.75	30
6	Thermales Infrarot	10.40 – 12.50	120
7	Kurzwelliges Infrarot	2.08 – 2.35	30

Im Detail basiert der Sensor auf 100 Spektraldetektoren. Mit Hilfe eines oszillierenden Spiegels wird die von der Erdoberfläche ausgehende Lichtstrahlung auf die sieben Frequenzkanäle verteilt. Die Bänder 1 bis 5 und 7 besitzen jeweils 16 Detektoren in Flugrichtung mit einer räumlichen Auflösung von 30 x 30 Metern und das sechste Band vier Detektoren mit nur 120 x 120 Metern Auflösung. Eine dieser Abtastreihen (16 Detektoren á 30 m in Folge) bildet folglich einen 480 Meter langen Streifen der Erdoberfläche in Flugrichtung ab. Da bei einer Spiegelumdrehung etwa 6300 Messungen aneinandergehängt werden, ergibt sich eine Abtastbreite von 185 km (30m \* ~6300) am Boden.

Abbildung 7 stellt das beschriebene Prozedere grafisch dar.

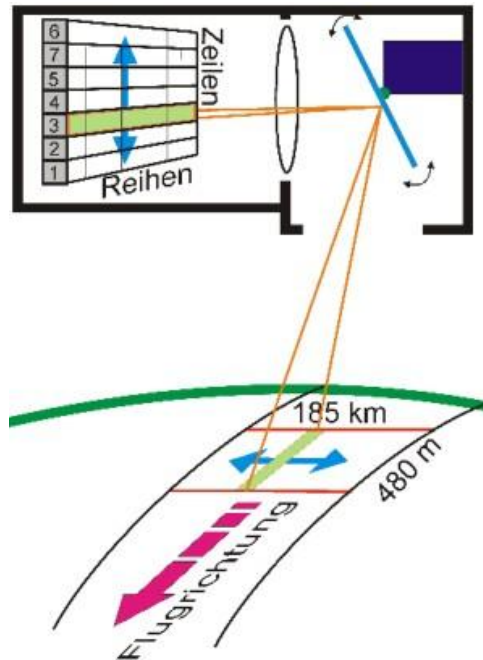


Abbildung 7: Funktionsweise eines Multispektralabtasters (nach [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org), Stand: Juni 2013)

Die Spektraldetektoren haben eine radiometrische Auflösung von 8 Bit. Es können also 256 Graustufen differenziert werden.

Die Inbetriebnahme der sechsten Landsat-Mission im Jahre 1993 misslang, da der Satellit bereits beim Start verloren ging, und somit wurde 1999 die bislang letzte Mission von Landsat, Landsat-7, gelauncht. Bei Landsat-7 gab es sensortechnisch eine Weiterentwicklung.

ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) ist eine Erweiterung des „Thematic Mapper“, welche bei Landsat-7 erstmals zum Einsatz kommt. Es wird ein zusätzlicher, panchromatischer Kanal zu den bereits bestehenden sieben Kanälen hinzugefügt, welcher eine geometrische Auflösung von 15 x 15 Meter besitzt. Außerdem kann die Bodenauflösung des Thermalbandes auf 60 Meter verbessert werden.

1986 bekam Landsat erstmals Konkurrenz von einem zweiten kommerziellen Anbieter von Fernerkundungsdaten. Die französische Satellitenmission SPOT ging in Betrieb und beseitigte die bisherige Monopolstellung von Landsat auf diesem Sektor.

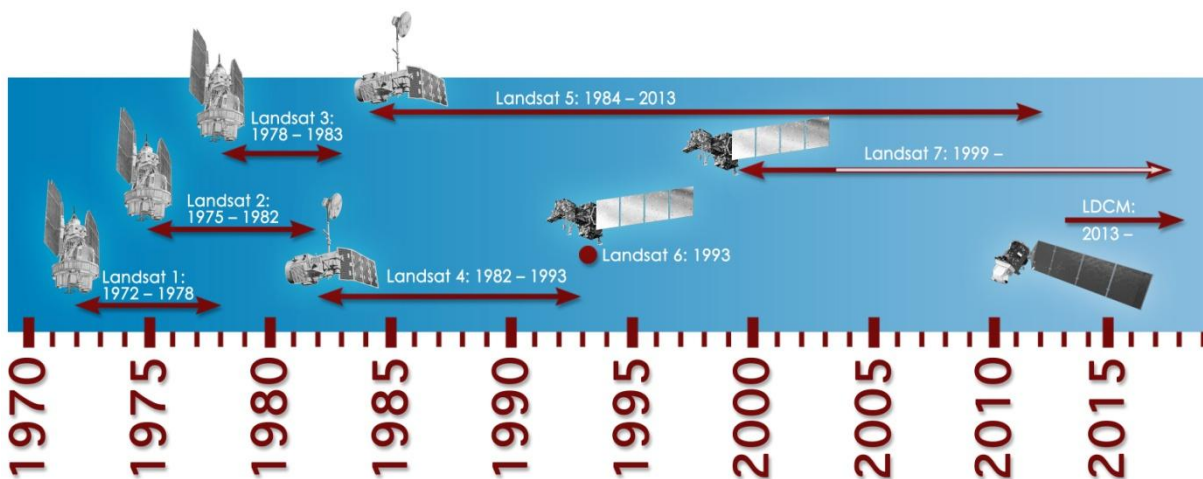
Die derzeit aktuellste Landsat-Mission ist Landsat-8 und wurde von der NASA in Zusammenarbeit mit der U.S. Geological Survey (USGS) am 11.02.2013 mit einer Atlas-V 401 Rakete von der Vandenberg Air Force Base in Kalifornien gelauncht. Der Satellit bewegt sich in einer Höhe von 705 km und ist mit dem neuartigen Push-Broom Sensor OLI („Operational

Land Imager“) und dem Thermal Infrared Sensor (TIRS) ausgestattet, mit deren Hilfe die Erdoberfläche mit einer räumlichen Auflösung von 30 Metern im sichtbaren und infraroten Spektralbereich, 100 Metern im thermalen und 15 Metern im panchromatischen Bereich abgetastet wird. Die Anzahl der Frequenzbänder wurde auf elf erhöht, wobei eine genaue Aufschlüsselung der Kanäle im Vergleich zu Landsat-7 ETM+ in Tabelle 3 dargestellt ist. Der Küsten und Aerosol-Kanal (Band 1), der Cirrus-Kanal (Band 9) sowie ein zusätzlicher Thermalkanal (Band 11) sind hierbei die wesentlichsten Neuerungen.

**Tabelle 3: Frequenzkanäle der Sensoren von Landsat-7 und Landsat-8 im Vergleich ([landsat.gsfc.nasa.gov](http://landsat.gsfc.nasa.gov), Stand: Juni 2013)**

Landsat-7 ETM+ Bands (µm)			Landsat-8 OLI and TIRS Bands (µm)		
			30 m Coastal/Aerosol	0.435 - 0.451	Band 1
Band 1	30 m Blue	0.441 - 0.514	30 m Blue	0.452 - 0.512	Band 2
Band 2	30 m Green	0.519 - 0.601	30 m Green	0.533 - 0.590	Band 3
Band 3	30 m Red	0.631 - 0.692	30 m Red	0.636 - 0.673	Band 4
Band 4	30 m NIR	0.772 - 0.898	30 m NIR	0.851 - 0.879	Band 5
Band 5	30 m SWIR-1	1.547 - 1.749	30 m SWIR-1	1.566 - 1.651	Band 6
Band 6	60 m TIR	10.31 - 12.36	100 m TIR-1	10.60 - 11.19	Band 10
			100 m TIR-2	11.50 - 12.51	Band 11
Band 7	30 m SWIR-2	2.064 - 2.345	30 m SWIR-2	2.107 - 2.294	Band 7
Band 8	15 m Pan	0.515 - 0.896	15 m Pan	0.503 - 0.676	Band 8
			30 m Cirrus	1.363 - 1.384	Band 9

Abschließend wird in Abbildung 8 ein Überblick über alle Landsat-Missionen und ihre Lebensdauer präsentiert.



**Abbildung 8: Überblick über sämtliche Landsat-Missionen (nach [landsat.gsfc.nasa.gov](http://landsat.gsfc.nasa.gov), Stand: Juni 2013)**



Für nähere Informationen bezüglich Landsat wird auf die Online-Ressource „[landsat.gsfc.nasa.gov](http://landsat.gsfc.nasa.gov)“ verwiesen.

## 5.2 IRS<sup>7</sup>

IRS steht für Indian Remote Sensing und ist der Name einer Reihe von Low Earth Orbit (LEO) Satelliten, die zur Erdbeobachtung verwendet werden. Mit zwölf sich in Betrieb befindlichen Satelliten ist IRS die größte zivile Fernerkundungsmission der Welt. IRS-Daten finden in den unterschiedlichsten Bereichen Anwendung, unter anderem in der Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Ressourcenmanagement, Katastrophenmanagement oder Stadtentwicklung.

Der erste indische Fernerkundungssatellit IRS-1A wurde am 17. März 1988 vom russischen Kosmodrom in Baikonur aus in seinen polaren, sonnensynchronen Orbit (gilt für fast alle IRS-Fernerkundungssatelliten) gebracht. Der 975 kg schwere Satellit war mit zwei LISS (Linear Imaging Self-scanning Sensor) Kameras bestückt, die Bildauflösungen von 72.50 und 36.25 Metern besaßen und die Erdoberfläche mit einer Streifenbreite von 140 km (LISS I) bzw. 74 km (LISS II) im visuellen und nahen Infrarotbereich abtasteten. IRS-1A hatte eine Lebensdauer von acht Jahren und vier Monaten und ging im Juli 1996 offline.

Auf IRS-1A folgte IRS-1B, da der geplante, zweite indische Fernerkundungssatellit SPOSS auf dem Weg in den Orbit verloren ging. Der Satellit IRS-1B, der weiterentwickelte, aber von den Modellen her gleiche Instrumente wie sein Vorgänger an Bord hatte (LISS I und II), wurde am 29. August 1991 im Orbit platziert. Er war über 12 Jahre in Betrieb und beendete die Datenübertragung am 20. Dezember 2003.

Im Jahre 1993 versuchte die indische Raumfahrtbehörde ISRO (Indian Space Research Organisation) erstmals, einen Satelliten mit einer selbstgebauten Trägerrakete ins Weltall zu befördern. Die Satellitenmission (IRS-1E) scheiterte allerdings, da es zu Problemen mit dem Launchvehikel PSLV (Polar Satellite Launch Vehicle) kam.

Den nächsten Raketenstart wagte die ISRO am 15. Oktober 1994 mit der IRS-Mission IRS-1P und dieser war erfolgreich. An Bord des im Vergleich zu seinen Vorgängern etwas leichteren

---

<sup>7</sup> Vgl. hierzu und in Folge [www.isro.org](http://www.isro.org), Stand: Juni 2013

Satelliten befand sich die modifizierte LISS-Kamera LISS-IIM. IRS-1P war bis 1997 aktiv und beendete bereits nach drei Jahren seine Arbeit.

Ein Jahr später ging IRS-1C in Betrieb. Es war der Beginn der sogenannten zweiten Generation von Fernerkundungssatelliten in Indien. Bestückt mit den Sensoren LISS-III, PAN und WiFS (Wide Field Sensor) stellte diese Mission verglichen mit den früheren Satellitenmissionen eine klare Weiterentwicklung in technischer Hinsicht dar. Mit Hilfe der panchromatischen Kamera PAN konnte nun eine räumliche Auflösung von unter sechs Metern erreicht werden und LISS-III erweiterte das abgedeckte Wellenlängenspektrum um einen Kanal und in den Short-Wave-Infrarot-Bereich, bei einer räumlichen Auflösung von 23.5 Metern. Die verbesserte Qualität der Instrumente manifestierte sich auch in der Lebensdauer und ermöglichte einen über elf jährigen Betrieb bis 21. September 2007.

Am 21. März 1996 startete die nächste indische Satellitenmission vom SHAR Center in Sriharikota, Indien. IRS-P3 besaß neben der bereits zuvor erwähnten WiFS-Kamera einen MOS (Multispectral Optoelectronic Scanner) -Scanner für die Aufzeichnung der radiometrischen Strahlung der Erdoberfläche vom optischen bis zum Shortwave-Infrarot-Bereich. Zusätzlich waren ein Payload für die Untersuchung von Röntgenstrahlung auf der Erde sowie ein C-Band-Transponder für Radarkalibrierungen inkludiert. Die IRS-P3 Mission endete nach neun Jahren und zehn Monaten im Jänner 2006.

Der nächste indische Fernerkundungssatellit in chronologischer Reihenfolge war IRS-1D. Er gehört zur zweiten Generation der IRS-Reihe und ist von seinen technischen Voraussetzungen (z.B. räumliche und spektrale Auflösung) mit IRS-1C vergleichbar. Der Satellit war, wie auch schon sein Vorgänger, mit den drei Push-Broom-Kameras WiFS, LISS-III und PAN bestückt, zeichnete sich allerdings durch eine höhere Bildqualität aus. IRS-1D war von Ende September 1997 bis Jänner 2010 im Einsatz.

Am 26. Mai 1999 wurde mit Oceansat, auch IRS-P4 genannt, die erste indische Satellitenmission gestartet, die sich hauptsächlich mit der Erforschung von Ozeanen beschäftigte. Dafür wurden zwei neue Sensoren verwendet: MSMR (Multifrequency Scanning Microwave Radiometer) und OCM (Ocean Color Monitor). MSMR ist ein Radiometer, das im Mikrowellen-Frequenzbereich operiert. OCM bezeichnet einen gering auflösenden Multispektralscanner, der Strahlung in acht Spektralkanäle zerlegt und speichert. Zudem erweiterte Oceansat durch die Aufnahme von gewohnten Fernerkundungsbildern in bisher nicht abgedeckten Bereichen der Erdoberfläche das bisherige Kontingent von IRS-Satelliten. Oceansat wurde am 8. August 2010 beendet.

Nach vier Jahren Pause kam es wieder am 17. Oktober 2003 zu einer Fortführung der IRS-Kampagne durch die ISRO. Der zehnte IRS-Satellit Resourcesat-1 (IRS-P6) unterstützte bzw. erweiterte nicht nur die beiden IRS-Urgesteine IRS-1C und 1D bei der Aufnahme von mittel- und hochauflösenden Fernerkundungsdaten, sondern verbesserte durch zusätzliche neue Sensoren, LISS IV anstatt PAN und AWiFS (Advanced WiFS) als Upgrade zu WiFS, die Qualität indischer Satellitenbilder. Bei LISS IV konnte zwischen panchromatischer und multispektraler Aufnahme (drei Frequenzkanäle im visuellen Spektralbereich) unterschieden, und eine räumliche Auflösung von 5.8 Metern bei Schwadbreiten von 23.9 und 70.3 Kilometern erreicht werden. Zudem war auch noch eine LISS-III-Kamera mit wie bereits zuvor erwähnten technischen Spezifikationen an Board. Resourcesat-1 ist noch immer in Betrieb.

Da alle IRS-Szenen in dieser Arbeit von IRS-P6 stammen, sind Sensorspezifikationen in Tabelle 4, technische Spezifikationen und Orbitparameter des Satelliten in Tabelle 5 angeführt.

**Tabelle 4: Sensorspezifikationen von IRS-P6 (<http://www.ga.gov.au/earth-observation/satellites-and-sensors/legacy/resourcesat-1-irs-p6-satellite-data.html>, und [www.cps-amu.org/sf/notes/m1-1-8e.htm](http://www.cps-amu.org/sf/notes/m1-1-8e.htm), Stand: Juni 2013)**

Sensor		AWiFS	LISS-III	LISS-IV
Geometrische Auflösung [m]		60 – 70	23.5	5.8
Schwadbreite [km]		740	141	23.9 MS/ 70.3 PAN
Radiometrische Auflösung [bit]		10	7	7
Spektrale Auflösung [m]	Rand 2 (Grün)	0.52 - 0.59	0.52 - 0.59	0.52 - 0.59
	Band 3 (Rot)	0.62 - 0.68	0.62 - 0.68	0.62 - 0.68
	Band 4 (NIR)	0.77 - 0.86	0.77 - 0.86	0.77 - 0.86
	Band 5 (SWIR)	1.55 - 1.70	1.55 - 1.70	

**Tabelle 5: Satellitenspezifikationen von IRS-P6 (<http://www.ga.gov.au/earth-observation/satellites-and-sensors/legacy/resourcesat-1-irs-p6-satellite-data.html>, Stand: Juni 2013)**

<b>Orbithöhe [km]</b>	817
<b>Orbittyp</b>	kreisförmig, polar, sonnensynchron
<b>Inklination [°]</b>	98.7
<b>Durchlauf am Äquator</b>	Absteigender Knoten: 10:30
<b>On-board Speicher [GB]</b>	120 (solid state)

Anschließend an Resourcesat-1 wurden die beiden Satelliten Cartosat 1 und 2, respektive IRS P5 und P7, in ihren Orbit platziert. Ausgestattet mit sehr hochauflösenden, panchromatischen Kameras (< 5 m) ermöglichten diese Trabanten auch erstmals In-Orbit Stereo-Bilder. Sie wurden am 05. Mai 2005 sowie am 10. Jänner 2007 gelauncht und sind weiterhin operabel.

Am 28. April 2008 beförderte eine indische PSLV-Rakete zwei weitere Satelliten in ihre Umlaufbahn, die heute noch funktionieren. Zusammen mit dem low-cost Mikrosatelliten IMS-1 startete Cartosat-2A (IRS-P8) in seine Fernerkundungsmission. Als Payload befand sich eine neue, panchromatische Kamera (PAN) an Board, die eine räumliche Auflösung von unter einem Meter bei einem Swath von 9,6 Kilometern auf der Erdoberfläche möglich machte.

Im Jahre 2009 wurden zwei IRS-Missionen durchgeführt. RISAT-2 erschien am 20. April, ist ein Radar-Satellit und kann somit unabhängig vom Wetter oder Tageszeit Satellitenbilder der Erde liefern. Aufgrund der Terroranschläge in Mumbai im November 2008 wurde die Entwicklung von RISAT-2 beschleunigt und noch vor RISAT-1 gestartet, weshalb vielerorts von einer militärischen Nutzung des Satelliten ausgegangen wird. Am 23. September folgte Oceansat-2 (IRS-2B) und sollte Oceansat-1 bei der Beobachtung der Weltmeere unterstützen. Er ist allerdings in technischer Hinsicht unter anderem durch den Besitz eines „Scanning Scatterometers“ (ein auf dem Prinzip von RADAR basierendes Instrument zum Scannen der Erdoberfläche) höher entwickelt als sein Vorgänger und ist nach dem Ausfall von Oceansat-1 im Jahre 2010 wieder der einzige seiner Art im Orbit.

Am 12. Juli 2010 wurde der bislang letzte Satellit der Serie Cartosat gelauncht. Cartosat-2B besitzt eine ähnliche panchromatische Kamera wie Cartosat-2A (gleiche Auflösung und Swath-Width), nur dass diese schwenkbar ist. Dies macht Stereo-Mapping möglich, also die Gewinnung von dreidimensionaler Information durch Stereoskopie.

Das Jahr 2011 stand in der indischen Raumfahrt ganz im Zeichen von Resourcesat-2 und Megha-Tropiques. Resourcesat-2, gestartet am 20. April 2011, wartete eine Reihe von technischen Veränderungen gegenüber seinem Vorgänger Resourcesat-1 auf: Optimierung der radiometrischen Auflösung von LISS III und LISS IV von sieben auf zehn Bits und bei AWiFS von zehn auf zwölf Bits; Erhöhung der multispektralen Schwadbreite bei LISS IV von 23 auf 70 Kilometer; Verkleinerung der On-Bord-Elektronik etc.

Megha-Tropiques ist eine indo-französische Satelliten-Mission (ISRO und CNES), die sich auf die Untersuchung der Energieverteilung im Tropischen Konvektionssystem und dessen Auswirkungen auf Wetter und Klima in dieser Region spezialisiert hat, und am 12. Oktober 2011 in Betrieb genommen wurde.

Der bislang schwerste indische Fernerkundungssatellit heißt Radar Satellite-1 (RISAT-1) und läuft seit dem 26. April 2012. Ausgestattet mit dem aktiven Radar-Sensor SAR (Synthetic Aperture Radar), der im Mikrowellenbereich arbeitet, ist er der zweite Radarsatellit und der insgesamt zwanzigste, erfolgreich mit einer PSLV-Rakete gelaunchte Satellit der ISRO. Der Orbit von RISAT-1 liegt bei 536 km Höhe und ist damit der niederste aller IRS-Satelliten.

Der aktuellste, von der ISRO in Kooperation mit der French National Space Agency CNES betriebene Trabant heißt SARAL (Satellite with ARGOS and ALTIKA). Die Indo-Französische Satellitenmission wird hauptsächlich für ozeanographische Studien verwendet. Neben den bereits im Namen vorkommenden Payloads ARGOS und ALTIKA, die von CNES stammen, ist auch noch ein solid-state C-band Transponder (SCBT) an Board. Zusammen bilden sie die nötige Infrastruktur für operationelle Ozeanographie, Klimamonitoring, Überwachung des Kontinentaleises, maritime Meteorologie und vieles mehr. SARAL wurde am 25. Feber 2013 gelauncht und hat eine geplante Missionsdauer von fünf Jahren.

Derzeit sind insgesamt elf IRS-Satelliten in Betrieb. Eine Übersicht der Satelliten und ihrer Launchdaten ist in Tabelle 6 zu finden.

**Tabelle 6: Übersicht der aktiven IRS-Satelliten ([www.isro.org/scripts/currentprogrammein.aspx#IRS](http://www.isro.org/scripts/currentprogrammein.aspx#IRS), Stand: Juni 2013)**

	<b>Satellite:</b>	<b>Launch-Date:</b>
1.	SARAL	Launched on Feb 25, 2013 by PSLV-C20
2.	RISAT-1	Launched on Apr 26, 2012 by PSLV-C19
3.	Megha-Tropiques	Launched on Oct 12, 2011 by PSLV-C18
4.	RESOURCESAT-2	Launched on Apr 20, 2011 by PSLV-C16
5.	CARTOSAT-2B	Launched on July 12, 2010 by PSLV-C15
6.	OCEANSAT-2	Launched on Sept 23, 2009 by PSLV-C14
7.	RISAT-2	Launched on Apr 20, 2009 by PSLV-C12
8.	CARTOSAT-2A	Launched on Apr 28, 2008 by PSLV-C9
9.	CARTOSAT - 2	Launched on Jan 10, 2007 by PSLV-C7
10.	CARTOSAT-1	Launched on May 05, 2005 by PSLV-C6
11.	RESOURCESAT-1	Launched on Oct 17, 2003 by PSLV-C5

Zusätzliche technische Details oder Orbitparameter diverser IRS-Satelliten können der Online-Ressource der ISRO ([www.isro.org](http://www.isro.org)) entnommen werden.

### **5.3 Untersuchungsgebiet**

Das zur Untersuchung von verschiedenen Methoden der topographischen Normalisierung und Effekten der Topographie auf die Reflexion von Pflanzenbeständen ausgewählte Gebiet befindet sich in der Steiermark nördlich von Graz im Bereich der Städte Frohnleiten und Hartberg. Es ist etwa 2200 Quadratkilometer groß und Großteils bewaldet. Die gebirgigen Bereiche im Nordwesten mit steilen Geländekanten und einem hohen Anteil an Nadelwäldern, hauptsächlich Fichten, stehen im Kontrast zu den flachen, intensiv genutzten Wiesen- bzw. Ackerflächen im Südosten. Da die vorkommende Vegetation typisch für das Alpenland ist, sind die Analysen, die in dieser Region durchgeführt werden, auch für weite Teile der österreichischen Alpen repräsentativ. Das bedeutet, dass die später gewonnenen Ergebnisse nahezu im gesamten alpinen Bereich gültig und deshalb durchaus aussagekräftig sind.

Bei Analysen bezüglich des Effekts der Topographie auf die Reflexion ist die Wahl des Untersuchungsgebiets von großer Wichtigkeit. Vom Relief hervorgerufene Effekte treten erst bei einer gewissen Rauigkeit des Geländes auf, weshalb ein sehr flaches Testgebiet nicht zielführend wäre. Außerdem sollten unterschiedliche Waldtypen mit verschiedener Beschirmung vorkommen, um aus den erhaltenen Ergebnissen später eine möglichst hohe Bandbreite an Variation abdecken zu können. Dies wurde bei der Auswahl der Untersuchungsgebietes berücksichtigt.

## 6 Beschreibung und Aufbereitung der Basisdaten

Die Basis für die Untersuchungen bilden vier Landsat7 TM-Szenen und sechs IRS-Szenen. Es wird ein digitales Höhenmodell benutzt, das die Topographie in der Umgebung beschreibt und für Illuminationsberechnungen und die Durchführung von topographischen Normalisierungen herangezogen wird. Hochauflösende Farb-Infrarot-Luftbilder werden für das Auffinden und Einzeichnen von Referenzgebieten für die späteren Analysen der Satellitenbilder verwendet. Außerdem sind normalisierte, digitale Oberflächenmodelle (NDSMs) aus LIDAR (Light Detecting And Ranging) -Daten für Teile des Untersuchungsgebiets vorhanden, anhand derer der Beschirmungsgrad von Waldbeständen bestimmt wird. Vom restlichen Bereich existiert ein ebenfalls aus den LIDAR-Daten abgeleitetes DSM, auf das die später folgenden Schattensimulationen basieren. Die erwähnten Daten und ihre Aufbereitung werden in diesem Kapitel im Detail erläutert. Informationen bezüglich des verwendeten Datenmaterials stützen sich auf elektronische Ressourcen der GIS-Steiermark ([www.gis.steiermark.at](http://www.gis.steiermark.at), Stand: Juni 2013) und des Bundesamts für Eich- und Vermessungswesen ([www.bev.gv.at](http://www.bev.gv.at), Stand: Juni 2013).

Für die Vorverarbeitung der Daten wird das Softwarepaket Esri ArcMap10 verwendet. Es bietet die Möglichkeit, alle Daten in einem einheitlichen Koordinatensystem in Form von Layern zu organisieren und zu präsentieren. Das verwendete Koordinatensystem ist WGS84, mit Projektion UTM 33 N, in welches alle Ausgangsdaten transformiert werden.

## 6.1 Luftbilder<sup>8</sup>

Die CIR (Color Infra Red) -Luftbilder, welche im Koordinatensystem MGI Austria GK M34 vorliegen, wurden im Auftrag der Steiermärkischen Landesregierung im Jahr 2011 befliegen und vom GIS-Steiermark zur Verfügung gestellt. Sie werden in ERDAS Imagine mit Hilfe des Tools MosaicPro mosaikiert, sodass eine einzige Luftbildszene des Untersuchungsgebiets entsteht. Dieser Ausschnitt wird anschließend in ArcMap in das bereits erwähnte Koordinatensystem WGS84 UTM 33N projiziert. Die 16-Bit-Luftbilder haben laut GIS-Steiermark eine geometrische Auflösung von 0.2 Meter. Auch die Lagegenauigkeit liegt bei +/- 0.2 Meter. Abbildung 9 zeigt ein verwendetes CIR-Luftbild.

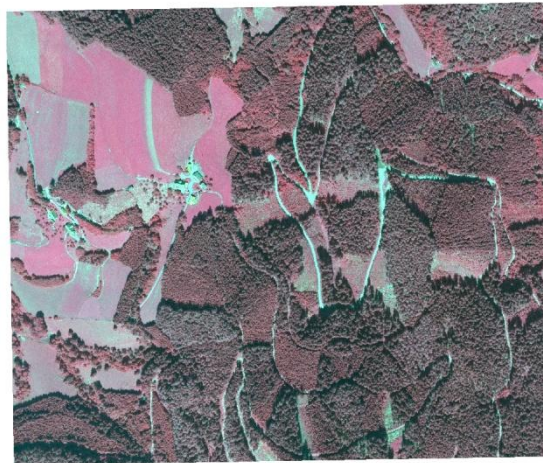


Abbildung 9: Ausschnitt eines CIR-Luftbildes

## 6.2 Digitales Geländemodell<sup>9</sup>

Das digitale Geländemodell (DGM) liegt mit einer Rasterweite von zehn Metern für das gesamte Landesgebiet Steiermark im Koordinatensystem MGI - Lambert vor, stammt vom BEV und wird ebenfalls vom GIS-Steiermark zur Verfügung gestellt. Um ein übersichtliches Arbeiten zu ermöglichen, wird das DGM in ArcMap auf die Größe des Untersuchungsgebiets geclippt und anschließend wiederum ins WGS84 UTM transformiert.

Für die spätere topographische Normalisierung der Satellitenbilder werden Geländemodelle mit 20 bzw. 30 Metern Rasterweite aus dem vorhandenen DGM\_10m bilinear resampled, um

---

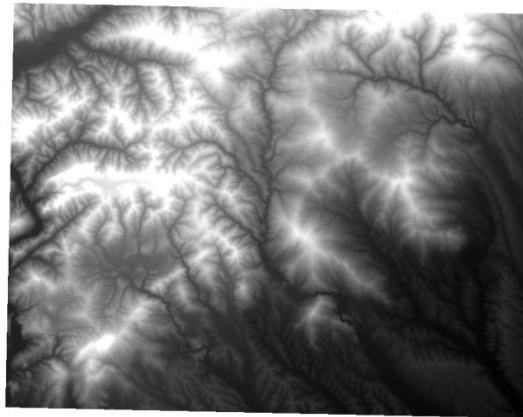
<sup>8</sup> Vgl. hierzu und in Folge: [www.gis.steiermark.at](http://www.gis.steiermark.at), Stand: Juni 2013

<sup>9</sup> Vgl. hierzu und in Folge: [www.bev.gv.at](http://www.bev.gv.at), Stand: Juni 2013



den Rasterweiten der jeweiligen Satellitenbilder von IRS und Landsat zu entsprechen. Eine künstliche Erhöhung der Auflösung der Satellitenbilder auf zehn Meter wäre nicht sinnvoll, da dies aufgrund der zu geringen Lagegenauigkeit der Satellitenszenen (ca. 25 Meter) zu keiner Verbesserung der Ergebnisse führen sondern viel mehr eine Genauigkeit vortäuschen würde, die nicht erreicht werden kann.

Bei dem folgenden Bild (Abbildung 10) handelt es sich um das digitale Geländemodell im Untersuchungsgebiet. Gebirgsregionen sind in Weiß dargestellt und tiefe Täler bzw. Flachland, wie zum Beispiel die Gegend um Hartberg im Südosten, sehr dunkel.



**Abbildung 10: Digitales Geländemodells**

In weiterer Folge wird das DGM zur Berechnung der Illumination verwendet. Eine nähere Beschreibung des Ablaufes dieser Berechnung ist Kapitel 7.1 zu entnehmen.

Außerdem wird ausgehend vom DGM ein Aspect-Bild in ArcMap generiert. Dieses beschreibt die Exposition von Berghängen, ordnet den Berghängen im Gelände Himmelsrichtungen zu. Die Unterscheidung von Nord- und Südhängen ist später bei den Schattenanalysen wichtig, da damit reliefbedingte Beleuchtungsinkonsistenzen erklärt werden können. Außerdem ist dieses Wissen auch beim Einzeichnen von Referenzgebieten nützlich, um Samples in allen vier Himmelsrichtungen zur Verfügung stellen zu können.

### 6.3 LIDAR-Daten<sup>10</sup>

Für das gesamte Untersuchungsgebiet werden vom GIS-Steiermark LIDAR-Daten bereitgestellt. Für die Großräume Hartberg und Frohnleiten liegen bereits normalisierte, digitale Oberflächenmodelle (NDSMs) vor. Im spärlich besiedelten Bereich zwischen den beiden Gemeinden wird ein digitales Oberflächenmodell (DSM) verwendet, da hier zum Zeitpunkt der Datenverarbeitung noch kein NDSM vorlag. Dieses beschreibt die Erdoberfläche mit allen sich darauf befindlichen Objekten.

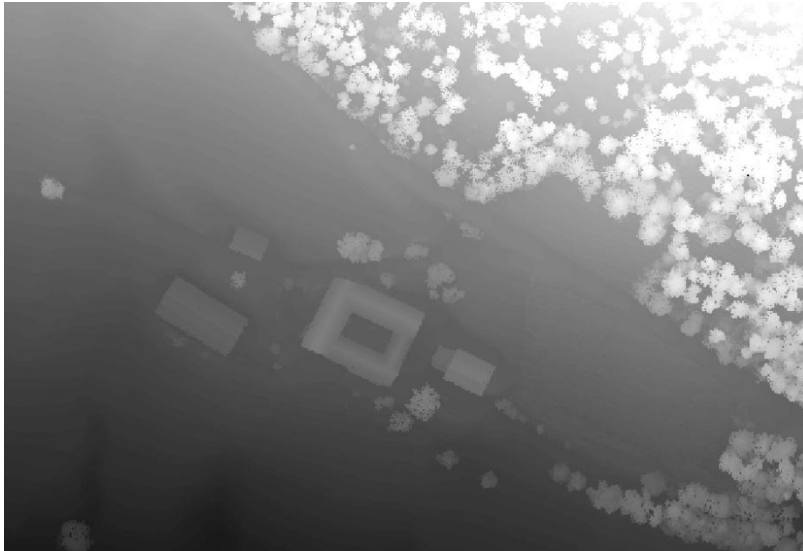
NDSMs sind, wie der Name schon sagt, normalisierte DSMs. Das bedeutet, dass die Topographie, welche durch ein DGM beschrieben wird, bereits vom zu Grunde liegenden Oberflächenmodell (DSM) abgezogen ist. (NDSM = DSM - DGM)

Somit besitzt die Topographie den Wert Null, und die Höhe von Objekten auf der Erdoberfläche kann direkt abgelesen werden.

Das DSM\_Weiz ist ein 32-Bit-Graustufen-Bild mit 0.5 Meter Rasterweite und stammt aus dem Jahre 2010. Die dargestellten Höhenwerte sind in Zentimeter gegeben. Abbildung 11 zeigt einen Ausschnitt des verwendeten DSMs. Dabei sind dunkle Stellen innerhalb des Bildausschnitts tiefer gelegen als helle. Das Gelände fällt also in Richtung linker, unterer Bildrand ab. Bei den weißen bzw. hellgrauen Objekten, die empor ragen, handelt es sich um Bäume im nordöstlichen Bereich bzw. Häuser in der Mitte der Szene. Durch Subtraktion des daneben liegenden Bodenwerts vom Wert einer Baumkrone kann beispielsweise die Höhe der Pflanze ermittelt werden.

---

<sup>10</sup> Vgl. hierzu und in Folge: [www.gis.steiermark.at](http://www.gis.steiermark.at), Stand: Juni 2013



**Abbildung 11: Ausschnitt aus dem verwendeten DSM\_Weiz**

Bei den NDSMs wird als Einheit für die Höhendarstellung Dezimeter verwendet. Sie kommen mit 16-Bit Graustufen aus und besitzen wie das DSM eine Rasterweite von 0.5 Meter. Die Lagegenauigkeit liegt bei +/- 0.3 Meter, die Höhengenaugigkeit bei +/- 0.15 Meter. Die LIDAR-Daten für Hartberg und Frohnleiten wurden bereits 2009 aufgenommen und sind somit ein Jahr älter. (Vgl. [www.gis.steiermark.at](http://www.gis.steiermark.at), Stand: Juni 2013)

In Abbildung 12 ist ein Ausschnitt des NDSMs Hartberg dargestellt. Schwarze Bereiche sind Teile der Erdoberfläche, die frei von Objekten sind, beispielsweise Wiesen, Äcker oder Wege, und haben deshalb die Höhe Null. Je heller Bildabschnitte sind, desto höher liegen sie über der Erdoberfläche. In Abbildung 12 sind das hauptsächlich Waldgebiete. Die farbigen Anteile im Bild, wie zum Beispiel die große Wasserfläche in der Mitte, sind durchscheinende Teile des hinterlegten Luftbildes. Hier hat das NDSM also Datenlücken.

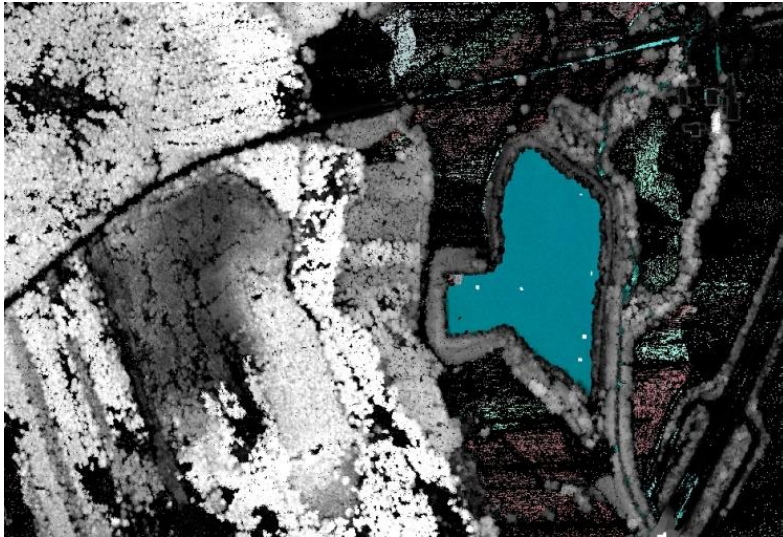


Abbildung 12: Ausschnitt aus dem verwendeten NDSM\_Hartberg

Wie bereits erwähnt, wird das DSM für Schattensimulationen und zur Berechnung von Beschirmungsgraden innerhalb von Waldbeständen verwendet.

#### **6.4 Satellitenbilder**

Die in vier unterschiedlichen Epochen aufgenommenen Landsat-5 TM – Szenen befinden sich bereits im gewünschten System WGS84 UTM. Die sechs verwendeten IRS-P6 – Satellitenbilder, die im Zielgebiet liegen, decken den Path/Row 31/35 und 32/35 zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten ab und müssen noch vom Lambert-System ins WGS84 projiziert werden. Die Lagegenauigkeit der Satellitenbilder liegt bei ca. 25 Metern.

Folgende Satellitenbilder wurden für das Projekt verwendet, wobei der jeweilige Aufnahmezeitpunkt im Dateinamen enthalten ist (siehe Tabelle 7):

**Tabelle 7: Die zehn verwendeten Satellitenbilder**

Name	Typ	Sonnenazimuth	Sonnenelevation
i_31_35_060717.tif	IRS	150,10°	61,05°
i_31_35_070314.tif	IRS	160,10°	38,09°
i_31_35_080706.tif	IRS	150,04°	62,59°
i_32_35_050422.tif	IRS	159,61°	53,34°
i_32_35_060722.tif	IRS	150,65°	60,16°
i_32_35_080711.tif	IRS	150,24°	61,98°
l20070720.tif	Landsat	140,16°	58,27°
l20070805.tif	Landsat	143,19°	54,99°
l20100712.tif	Landsat	138,06°	59,11°
l20110629.tif	Landsat	137,18°	60,32°

Acht Satellitenbilder wurden im Sommer aufgenommen. Bei diesen Szenen fällt das Vergleichen der Reflexionseigenschaften leichter, da die phänologischen Voraussetzungen die gleichen sind.

Die Szenen i\_31\_35\_070314 und i\_32\_35\_050422 entstanden im März bzw. April. Aus diesem Grund besitzen sie auch die geringsten Sonnenelevationen zum Aufnahmezeitpunkt. Außerdem ist die Vegetation zu dieser Zeit noch nicht so stark ausgeprägt. Laubwälder beispielsweise haben hier noch keine Blätter, was das Aussehen im Satellitenbild natürlich vollkommen verändert, und sind somit nicht mit den Laubwäldern aus den anderen Satellitenbildern vergleichbar.

In Abbildung 13 ist ein IRS-Bild und in Abbildung 14 eine Landsat-Szene des Untersuchungsgebiets in der Kanalkombination nahes Infrarot, rot und grün dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Landsat-Szenen einen größeren Bereich der Erdoberfläche abdecken als die IRS-Szenen.

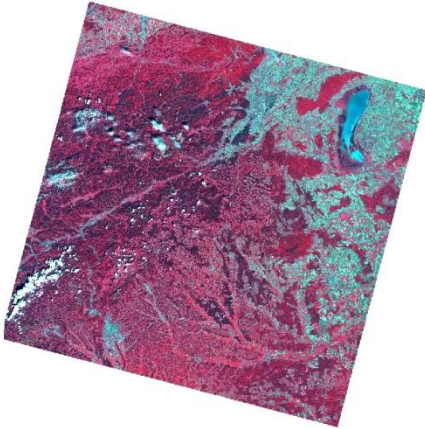


Abbildung 13: IRS-Szene i\_32\_35\_080711

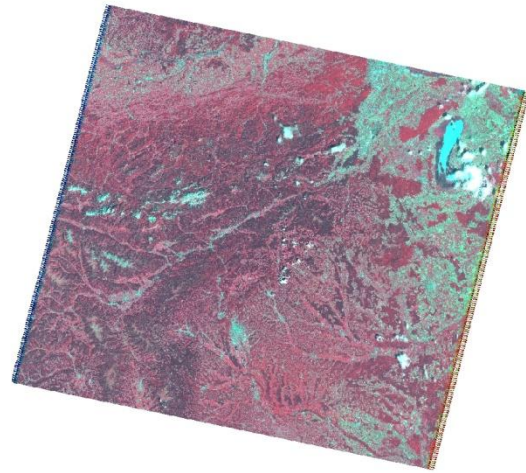


Abbildung 14: Landsat-Szene l20110629

Ferner wird pro Satellitenbild eine Wolkenmaske erzeugt. Dies ist notwendig, da dieselben Referenzgebiete für alle Satellitenbilder verwendet werden, gewisse Referenzgebiete aber nicht in jedem Satellitenbild für die Untersuchungen herangezogen werden können und deshalb maskiert werden müssen. Regionen, die von Wolken, Wolkenschatten, Dunstflecken sowie Schneefelder in höheren Lagen bedeckt sind, werden in Form von Polygonen auf einem Shape-File in ArcMap manuell eingezeichnet. Innerhalb dieser gekennzeichneten Bereiche wird die Reflexionscharakteristik der Pflanzenbestände durch die herrschenden atmosphärischen Bedingungen bei der Aufnahme verfälscht. Die betroffenen Pixel im betrachteten Bild besitzen also Grauwerte, die die Ergebnisse der folgenden Berechnungen bzw. Analysen verzerren würden. Es werden in jeder Szene per Lageselektion die Referenzgebiete eruiert, die innerhalb der Wolken-Polygone liegen. Diese werden anschließend für die Untersuchungen im jeweiligen Satellitenbild nicht verwendet.

## 7 Datenverarbeitung

Nach der Vorverarbeitung der Daten folgt der eigentliche operationelle Teil der Masterarbeit. Die bereitgestellten Satellitenbilder werden nach einigen in Kapitel 3 beschriebenen Methoden topographisch normalisiert, um Vorher-Nachher-Analysen auf der Basis von Referenzgebieten bezüglich des Einflusses der Topographie auf die Reflexion durchführen zu können. Die Kosinus-Korrekturen sowie die einfachen Minnaert-Korrekturen werden mit dem Softwarepaket ERDAS Imagine 2010 und die Self Calibrating Topographic Normalization mit dem vom Joanneum Research entwickelten Programm Impact vorgenommen und die Eingangsparameter ausführlich beschrieben. Zuvor wird die Erzeugung von Inzidenzwinkel-Bildern für die späteren Illuminationsanalysen erklärt. Ein weiteres Unterkapitel widmet sich der Berechnung von Schattenflächen aus dem DSM in ArcMap 10.

Um eine adäquate Anzahl an Vergleichsobjekten bei den Untersuchungen zu gewährleisten, werden **Referenzgebiete** definiert. Diese bleiben bei jeder Untersuchung die Gleichen, und dienen der Identifikation von spektralen bzw. statistischen Unterschieden zwischen den Ausgangsszenen und den topographisch normalisierten Bildern bzw. zwischen verschiedenen topographisch normalisierten Satellitenbildern. Auch bei den Analysen, die sich auf die Schattensimulationen oder die Illuminationswerte beziehen, finden sie Anwendung. Details in Bezug auf das Einzeichnen der Testgebiete in ArcMap und Eigenschaften der Referenzgebiete werden in diesem Kapitel behandelt.

### 7.1 Inzidenzwinkel-Berechnung

Um den Zusammenhang des Grauwerts und der Neigung des Geländes zur Sonne vor und nach der topographischen Normalisierung untersuchen zu können, wird für jedes Satellitenbild ein **Inzidenzwinkel-Bild** benötigt. Dieses Produkt wird mit dem vom BEV stammenden, digitalen Geländemodell und den Parametern Sonnenazimuth und - elevation des jeweiligen Satellitenbildes in Impact berechnet. Die Formel für die Illumination wurde bereits erwähnt und ist Kapitel 3.3 zu entnehmen.

Die folgende Abbildung (Abbildung 15) ist ein Ausschnitt einer Inzidenzwinkel-Szene. Dunkle Stellen markieren Hänge mit hohem Inzidenzwinkel, also mit geringer Illumination.

Bei den hellen Bereichen ist das Gelände der Sonne zugewandt und diese scheint relativ senkrecht auf die Erdoberfläche. Hier ist die Illumination also hoch.



**Abbildung 15: Ausschnitt eines Inzidenzwinkel-Bildes**

Satellitenbilder, die zum Beispiel im Winter aufgenommen werden, haben geringere Sonnenelevationen und sind deshalb generell dunkler als Szenen, die aus den Sommermonaten mit hoch stehender Sonne stammen. Die Sonnenelevationen zum Aufnahmezeitpunkt der Satellitenbilder, die in dieser Arbeit verwendet werden, liegen bis auf eine Ausnahmen zwischen  $53^\circ$  und  $62^\circ$  und sind somit relativ ähnlich (siehe Tabelle 7 auf Seite 43).

Die Auflösungen der Inzidenzwinkel-Bilder entsprechen den Satellitenbildern, auf denen sie basieren. (20 m bei IRS und 30 m bei Landsat)

## **7.2 Schattenflächen-Berechnung**

Aus dem DSM der LIDAR-Aufnahmen und den Parametern Sonnenazimut und -elevation zum Aufnahmezeitpunkt des Satellitenbildes wird im Programm ArcMap pro Szene ein Hillshade-Bild erzeugt. Bei der 8-Bit-Bilddatei steht der Grauwert 0 für Schatten und die anderen 255 Grauwerte bieten eine Differenzierung von mehr oder weniger besonnten Bereichen (Illumination). Dies ermöglicht eine prozentuelle Berechnung des Schattenanteils innerhalb eines Referenzgebiets.

Neben der Sonnenelevation zum Aufnahmezeitpunkt des Satellitenbildes entscheiden hauptsächlich die Oberflächenrauigkeit (die vertikale Struktur in Waldgebieten) sowie die Exposition und Inklination über die Länge der Schlagschatten. Die letzteren beiden Faktoren werden für den Bildausschnitt berechnet (Aspect- und Slope-Berechnung).



Die bereits erwähnten Zusammenhänge zwischen Schattenflächen, Illumination im Gelände und Reflexion von Pflanzenbeständen werden in weiterer Folge mit Hilfe der Hillshade-Szenen untersucht bzw. verifiziert. Abbildung 16 zeigt einen Ausschnitt einer Schattensimulation, wobei die Schattenflächen (GW = 0) rot markiert wurden.

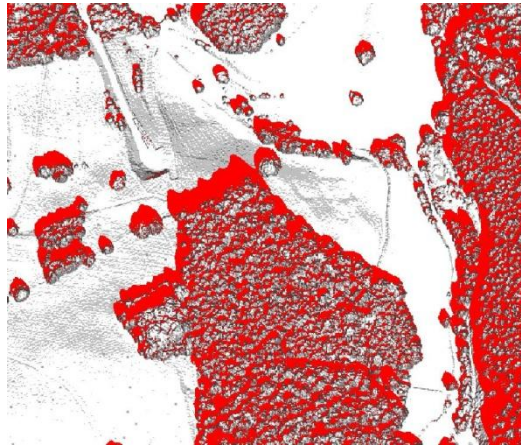


Abbildung 16: Ausschnitt eines Hillshade-Bildes

Die Formel für die Hillshade-Berechnung in ArcMap lautet (vgl. <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=How%20Hillshade%20works>, Stand: Juni 2013):

$$\text{Hillshade} = 255 * \{[\cos(\Theta_S) * \cos(\Theta_N)] + [\sin(\Theta_S) * \sin(\Theta_N) * \cos(\Phi_S - \Phi_N)]\} \quad (21)$$

mit

$\Theta_N$ ... Inklination des Geländes (Slope-Winkel)

$\Phi_N$ ... Exposition des Geländeausschnitts (Aspect-Winkel)

$\Theta_S$ ... Zenitwinkel der Sonneneinstrahlung

$\Phi_S$ ... Azimut der Sonneneinstrahlung

Negative Werte bei der Hillshade-Berechnung werden Null gesetzt. Des Weiteren ist zu erwähnen, dass ein Skalierungsfaktor von 0.01 (in ArcMap Z-Factor genannt) für eine korrekte Kalkulation benötigt wird, um die Höhen aus dem DSM, die in Zentimeter gegeben sind, an die Längeneinheiten des Koordinatensystems (Meter) anzupassen.

### 7.3 Topographische Normalisierung der Satellitenbilder

Es werden drei Arten von topographischer Normalisierung durchgeführt, um anhand der Reflexion von Waldbeständen vor und nach der Beleuchtungskorrektur die Performance der unterschiedlichen Methoden zu vergleichen. Bei der ersten Variante wird im Institutsprogramm **Impact** vom Joanneum Research das Tool **Self Calibrating Topographic Normalization** verwendet, wobei der theoretische Ablauf dieser Art von Normalisierung bereits im Kapitel 3.7 auf Seite 17 erklärt wurde.

Die Satellitenszenen werden erst mit den Default-Werten des Programmes (siehe Tabelle 8) beleuchtungskorrigiert und das zu verwendende DGM sowie die Auflösung des Ergebnisbildes von der Ausgangszene abhängig gemacht (30m bei Landsat-Szenen und 20m bei IRS-Szenen).

**Tabelle 8: Default-Werte der Topo. Normalisierung des Programms Impact vom Joanneum Research (Auszug)**

Parameters	Default-Values	Descriptions
Calculation-step-size	1	Specifies the step size when preparing the input for the minnaert k-value calculation. Increasing this value will result in shorter runtime but may reduce accuracy. (1...every Pixel in the picture is used for the unsupervised classification step 2...every second Pixel is used for the classification)
Clusters	11	Specifies the number of clusters (group of pixels with the same radiometric characteristics) used in the segmentation step
Constant-scale	1	Specifies the scaling factor to reduce the amount of correction. Allowed values are between 0.1 and 1.0 and cause a undercorrection which is in most cases more suitable for further processing than an exact or over calibration
Dem-nodata-value	-99999	Specifies the value indicating nodata pixels in the DEM file
Dest-type	Same	Specifies the pixeltype for the output file ("same" for same as input file) (other data types: float, double, unit8, ...)
Horizontal	256	Specifies the number of horizontal bins of the scattergram (Defines the radiometric resolution of the output file) 256: 1 bin for 1 grey-value, if input-data has 8 bit (IRS) 1 bin for ~420 grey-values, if input-data has 16 bit (IKONOS)
Incidence-limit	70	Specifies the maximum incidence angle below which a normalization will be performed
Input-nodata-value	-99999	Specifies the value indicating nodata pixels in the input file
Mask	Nomask	Specifies the filename of an optional mask band which is used to define areas where the input data or the DEM should not be used to do further calculations. (e.g. forests only) Using a mask will usually result in shorter runtime.
Max-iterations	10	Specifies the maximum number of iterations performed in the unsupervised clustering step. (each unsupervised clustering is followed by the calculation of class-specific Minnaert-constants; see page 19 Abbildung 6)
Output-format	Auto	Used to specify which file format should be used for the output file. ("auto" – use the file format deduced from the filename extension)(others: jpg, img, png, tiff,...)
Output-nodata-value	0	If specified the given value will be marked as no-data value when

		writing the output file
Slope-limit	2	Specifies the minimum slope necessary to allow a normalization (slope < 2° means no correction)

Anschließend wird die topographische Normalisierung mit den Skalierungsfaktoren 0.8 bzw. 0.9 durchgeführt. Mit Hilfe des Skalierungsfaktors kann Einfluss auf den Grad der Korrektur genommen werden und somit beabsichtigte Unterkorrekturen bewerkstelligt werden, welche in manchen Fällen besser passen als die Ergebnisse bei Skalierungsfaktor 1 (Überkorrektur). Nach dem Vergleich der in Kapitel 4.3 vorgestellten statistischen Werte der Regressionsanalysen, die für die Bewertung der Qualität herangezogen werden, wird ersichtlich, dass die topographischen Korrekturen mit Skalierungsfaktor 0.9 die besten Ergebnisse für die verwendeten Satellitenbilder liefern. Diese werden in weiterer Folge für die Untersuchungen herangezogen.

Das Inzidenzlimit beschreibt den maximalen Inzidenzwinkel, für den ein Multiplikationsfaktor bei der topographischen Normalisierung berechnet wird. Alle Bereiche, die höhere Inzidenzwinkel aufweisen, werden mit demselben Multiplikationsfaktor, der für das angegebene Limit bestimmt wurde, ausgestattet. Bei Szene i\_31\_35\_070314 wird das Inzidenzlimit von 70 auf 80 heraufgesetzt. Das ist notwendig, da aufgrund des Aufnahmedatums März die Sonnenelevation sehr gering ist, weshalb in vielen Gegenden höhere Inzidenzwinkel im Bild vorkommen und diese Bereiche auch explizit korrigiert werden sollen.

Außerdem wird untersucht, ob bei ungünstigen atmosphärischen Bedingungen Wolken das Ergebnis der Normalisierung beeinflussen und Grauwertbereiche außerhalb der Wolkenfelder verfälschen. So werden selbst erzeugte Wolkenmasken in Form von Shape-Files bei der topographischen Normalisierung verwendet. Dadurch werden nur Pixel, die außerhalb der Wolkenpolygone liegen, topographisch korrigiert. Es wurde allerdings festgestellt, dass nicht einmal sehr starke Bewölkung Einfluss auf die Beleuchtungskorrektur hat. Da damit auch keine merkliche Verkürzung der Rechenzeit erreicht wurde, werden die Ergebnisse dieser Normalisierung nicht mehr für weitere Analysen verwendet.

Die zweiten und dritten Beleuchtungskorrekturen entsprechen der **Kosinus-Methode** und dem **modifizierten Minnaert-Modell**, und nicht wie die vorherige Methode der stratifizierten Variante (vgl. Kapitel 3), und werden im Softwaretool **ERDAS Imagine 2010** realisiert. Auch hier werden neben einem DGM die Parameter Sonnenazimut, und –elevation benötigt.

Die topographische Normalisierung wird zuerst mit den Default-Werten für die Minnaert-Konstanten ( $k=1$ ) durchgeführt, was wie bereits erwähnt der Kosinus-Methode entspricht. Anschließend werden die Minnaert-Konstanten im Model-Maker manuell editiert, und die Satellitenbilder damit normalisiert. Die Methoden zwei und drei unterscheiden sich also nur aufgrund unterschiedlicher Parameter bei der Berechnung.

Die verwendeten Werte für die Konstanten der dritten Methode stammen aus Untersuchungen des finnischen Wissenschaftlers Kari Mikkola. Diese wurden für Landsat-Satellitenbilder aus dem Norden Finnlands angegeben, werden für die vorliegende Arbeit getestet und für das Untersuchungsgebiet aufgrund der ähnlichen Landbedeckung und Oberflächenbeschaffenheit als passend befunden. Somit werden die Satellitenszenen mit folgenden Werten normalisiert (siehe Tabelle 9).

**Tabelle 9: Minnaert-Konstanten für die 2. Normalisierung in ERDAS (vgl.**

**[http://www.erdas.com/service/support/SpatialModels/Spatial\\_Models.aspx](http://www.erdas.com/service/support/SpatialModels/Spatial_Models.aspx), Zip-Download vom 12.06.2012)**

Frequenzbänder	Minnaert-Konstanten	
	Landsat (Mikkola)	IRS
1	0.10	0.15
2	0.15	0.15
3	0.15	0.40
4	0.40	0.55
5	0.55	
7	0.55	

## **7.4 Referenzgebiete**

Einen sehr wichtigen Teil der Arbeit nimmt das Aufsuchen und Einzeichnen geeigneter Referenzgebiete ein. Diese werden für den Vergleich und die Evaluierung der verschiedenen topographischen Normalisierungsansätze sowie für die Schatten- und Illuminationsanalysen verwendet. Um bei den nachfolgenden Untersuchungen alle charakteristischen Eigenschaften einer Vegetationsklasse abdecken zu können, Einflüsse wie Schatten oder unterschiedliche Beschirmungsgrade berücksichtigen zu können und auch um eine entsprechend der Komplexität der Untersuchungen angemessene Vielzahl an Samples zur Verfügung zu haben, wird für diesen Arbeitsschritt viel Zeit aufgewendet.

### **7.4.1 Aufnahme der Referenzgebiete**

Referenzgebiete einer jeden Klasse werden so ausgesucht, dass sie quer über das gesamte Testgebiet verteilt sind. Sie werden, sofern dies möglich ist, sowohl in tiefgelegenen, flachen Bereichen wie auch in steilen Gebirgsgebenden eingezeichnet, und es wird außerdem darauf geachtet, dass Gebiete auf Gebirgshängen in allen vier Himmelsrichtungen vorkommen (Schatten).

Es wird darüber hinaus darauf Wert gelegt, dass Testgebiete beim Einzeichnen in den Luftbildern ein möglichst einfaches, rechteckiges Aussehen besitzen, um sich der Form der Pixel in den Satellitenbildern einigermaßen anzupassen. Somit wird die Wahrscheinlichkeit verringert, dass Pixel, welche nicht mehr der gewünschten Klasse entsprechen, irrtümlich dem Referenzgebiet zugewiesen werden. Das passiert, wenn der Mittelpunkt des Pixels noch innerhalb der Grenzen des Testgebiets liegt.

Das Problem der falschen Zuweisung von Satellitenbild-Pixel zu Referenzgebieten ist vor allem bei der Verwendung von unterschiedlichen Fernerkundungssensoren groß. Da Bildpunkte aufgrund der verschiedenen, räumlichen Auflösungen der Fernerkundungssysteme (0,5m im Luftbild, 20m bei IRS und 30m bei Landsat) unterschiedlich groß und bezüglich ihrer genauen Lage im Koordinatensystem auch kleinere Verschiebungen erkennbar sind, müssen die Referenzgebiete so eingezeichnet werden, dass zur angrenzenden Vegetationsklasse ausreichend Platz besteht und damit der geometrische „Edge-Effect“ verringert wird. Dennoch sollten sie, um alle spektralen Merkmale einer Klasse repräsentieren zu können, einer geforderten Mindestgröße von etwa 0,5 Hektar entsprechen.

Ein weiterer zu erwähnender Aspekt bei der Auswahl der Referenzgebiete ist die unterschiedliche Aufnahmezeit der Daten. Da die Satellitenbilder, Luftbilder und LIDAR-Daten verschieden alt sind, ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass bei einigen Testgebieten Diskrepanzen bezüglich des Bewuchses auftreten. Windwürfe, Kahlschläge, Durchforstung oder neu errichtete Wege können das Aussehen von Referenzgebieten im Wald innerhalb von kurzer Zeit ändern und so dafür sorgen, dass zwei Datensätze nicht mehr zusammenpassen.

Teilt beispielsweise ein Weg, der im Satellitenbild noch nicht existiert, innerhalb eines Referenzgebietes im NDSM ein Waldstück, sinkt dadurch der Beschirmungsgrad. Dieser ist somit kleiner als erwartet und passt mit der Reflexion des Bestandes im Satellitenbild nicht mehr überein.

Bei den verwendeten Daten wird bezüglich des Aufnahmezeitpunktes eine Zeitspanne von bis zu sechs Jahren abgedeckt (siehe Tabelle 10). Ob die Referenzgebiete in Satellitenbildern aufgrund der zuvor erwähnten Problematik mit den korrespondierenden Bereichen im Vergleichsdatensatz zusammenpassen, wird in ArcMap visuell überprüft. Bei Unstimmigkeiten werden die betroffenen Testgebiete im jeweiligen Bild maskiert und nicht für die durchgeführte Untersuchung verwendet.

**Tabelle 10: Aufnahmezeitpunkte der Datengrundlagen**

<b>Datensätze</b>	<b>Aufnahmejahr</b>
Luftbilder	2011
DSM	2010
NDSM	2009
Satellitenbilder	2005-2011

Aber auch die Artenzusammenstellung innerhalb der Mischwälder und das Baumalter sind zeitlichen Veränderungen unterworfen. Solche Einflüsse sind zwar aufgrund der dafür eher kurzen Zeitspanne gering, können aber deshalb nur sehr schwer erkannt bzw. korrigiert werden.

## 7.4.2 Beschreibung der Referenzgebiete

Bei der Auswahl der Vegetationsklassen wurde großen Wert darauf gelegt, dass die vorkommende Vegetation durch eine Vielzahl von Referenzgebieten repräsentativ abgebildet wird. Da das Untersuchungsgebiet in den gebirgigen Bereichen vorwiegend bewaldet ist, werden für die Topographieanalyse ausschließlich Waldklassen verwendet. Prinzipiell wird zwischen Laubwald, Mischwald und Nadelwald unterschieden. Mischwald wird zusätzlich in Laub-Mischwald und Nadel-Mischwald unterteilt, um das Erscheinungsbild der Klasse klarer definieren und stärker auf die je nach Zusammensetzung individuellen Reflexionscharakteristika eingehen zu können. Weil speziell in der Klasse Nadelwald auch vielfach junge Kulturen im Testgebiet vorkommen, und sich deren Reflexionseigenschaften deutlich von jenen älterer Bestände unterscheiden, erfolgt hier eine Differenzierung in Altersklassen. Somit entstehen die Klassen junger und alter Nadelwald.

Insgesamt wurden 366 Referenzgebiete definiert, die die Waldklassen beschreiben.

**Tabelle 11: Referenzgebiete und ihre Verteilung auf unterschiedliche Illuminationen (Sonnenelevation 60°)**

Vegetationsklassen	Anzahl	0 – 0.4	0.4 - 0.6	0.6 – 0.8	0.8 – 0.9	0.9 – 1
LAUB	82	0	8	11	13	50
MISCH_Laub	63	0	7	11	17	28
MISCH_Nadel	60	0	6	13	23	18
NADEL_Jung	61	0	14	15	16	16
NADEL_Alt	100	1	27	37	11	24
<b>Summe:</b>	<b>366</b>	<b>1</b>	<b>62</b>	<b>87</b>	<b>80</b>	<b>136</b>

In Tabelle 11 sind die verwendete Klasseneinteilung, die Anzahl der Testgebiete pro Waldklasse und ihre Verteilung auf die unterschiedlichen Illuminationen bei einer Sonnenelevation von 60° dargestellt. Bei der Illuminationsklasse 0.9 – 1 ist der Inzidenzwinkel also hoch, und die Sonnenstrahlen fallen in etwa orthogonal auf die Erdoberfläche. Dabei handelt es sich um Hänge, die der Sonne zugewandt sind. In der Klasse von 0.8 – 0.9 befinden sich bei dem gewählten Sonnenstand diejenigen Trainingsgebiete, die in der Ebene liegen. Sonnenabgewandte Teile der Erdoberfläche verteilen sich je nach Geländeneigung auf die restlichen drei Illuminationsklassen.

In Tabelle 11 fällt auf, dass die meisten Laubwaldgebiete aus Regionen mit hoher Illumination stammen. Das ist der Fall, da Laubwälder in unseren Breiten vor allem in höheren Lagen

eher auf Südosthängen auftreten, wo die Sonneneinstrahlung hoch ist. Nadelwälder sind im Gegensatz dazu auch häufig schattseitig zu finden, was erklärt, warum die Klasse Nadel-Alt vermehrt in den niederen Illuminationsklassen auftaucht.

Mischwälder werden in Misch-Laub und Misch-Nadel unterteilt, da sie ansonsten eine zu breite Streuung in den Grauwerten aufweisen würden. Die Einteilung wird anhand der Luftbilder visuell vorgenommen, wobei einfach das Verhältnis Nadelwald zu Laubwald innerhalb des Referenzgebiets als Unterscheidungskriterium herangezogen wird. Die Differenzierung von jungen und alten Nadelwäldern wird auch über die Luftbilder gesteuert. Da diese unterschiedliche Reflexionseigenschaften besitzen, werden eigene Referenzgebiete aus alten und jungen Nadelwaldkulturen gesucht und markiert.

Aufgrund von Wolken, Wolkenschatten, Schneefeldern oder Rodung können nicht alle Referenzgebiete in allen Satellitenbildszenen verwendet werden. Diese Störfaktoren beeinflussen die Reflexion und würden das Erscheinungsbild bzw. die Grauwerte der Referenzgebiete somit verfälschen. Sie werden in der jeweiligen Szene maskiert.

Jedes Referenzgebiet wird bei den späteren Analysen genau durch einen Zahlenwert repräsentiert. Im Falle eines Satellitenbildes beschreibt also ein Grauwert die Reflexion des dargestellten Waldbestandes. Dieser wird durch Mittelwertbildung über alle Grauwerte der innerhalb des Polygons liegenden Pixel berechnet. Der Mittelwert ist aber ein bezüglich Ausreißer sehr anfälliges, statistisches Maß und deshalb muss Vorsicht beim Einzeichnen der Gebiete gelten. So können beispielsweise schon wenige Laubbäume innerhalb eines als Nadelwald deklarierten Testgebiets dafür sorgen, dass die charakteristischen Reflexionseigenschaften der Klasse in diesem Referenzgebiet nicht erreicht werden können. Testsamples, deren Grauwerte aufgrund dieser Problematik zu stark streuen, werden weggelassen und nicht mehr für die späteren Analysen verwendet.

Auch bei den Inzidenzwinkel-Bildern wird der Mittelwert innerhalb der Polygongrenzen gebildet und der Kosinus davon für die weiteren Illuminations-Analysen herangezogen.

Beim Einzeichnen der Referenzgebiete wird auf verschiedenen Beschirmungsgrade Rücksicht genommen. Es werden also je Vegetationsklasse auch Referenzgebiete mit niedriger Beschirmung erzeugt, da diese wieder andere Reflexionscharakteristika aufweisen als dicht



bewachsene Kulturen. In den späteren Untersuchungen wird auf diesen Unterschied näher eingegangen.

Die Bestimmung des Parameters Beschirmungsgrad eines Waldbestandes innerhalb eines Testgebiets wird vorerst aus den LIDAR-Daten vorgenommen. Dabei wird der Anteil von Bäumen, also Pflanzen, die größer als ein definierter Schwellwert von zwei Meter sind, durch den Anteil der Gesamtfläche des Referenzgebiets dividiert. Die Zwei-Meter-Schwelle wird gewählt, um zu verhindern, dass Bodenvegetation wie Sträucher oder Farne das Ergebnis beeinflussen. Eine niedrigere Schranke hätte den Vorteil, dass der Beschirmungsgrad von noch jüngeren Waldbeständen berechnet werden könnte. Jedoch wird das Risiko, dass die zwischen den Bäumen liegende Bodenvegetation fälschlicherweise als Wald identifiziert wird, dann auch größer. Die Tests mit niedrigeren Schwellwerten führen zu schlechteren Ergebnissen.

Die automatische Berechnung des Beschirmungsgrades führt allerdings teilweise zu unrealistischen Ergebnissen, wobei die Beschirmung in vielen Fällen überschätzt wird. Dies ist auf eine vorausgehende Filterung des NDSMs zurückzuführen.

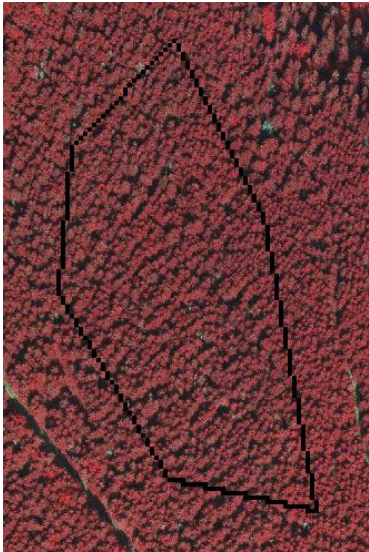
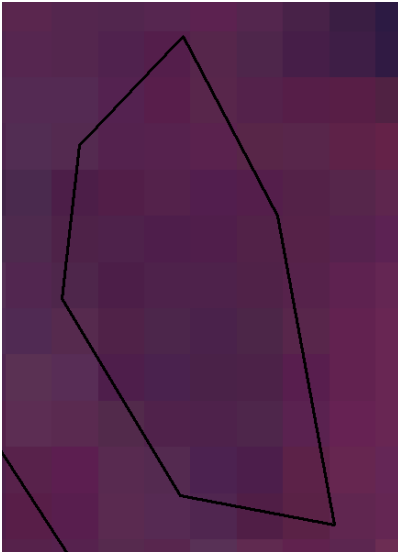
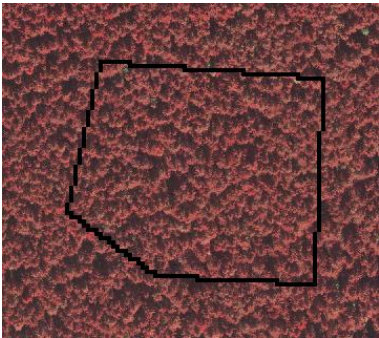
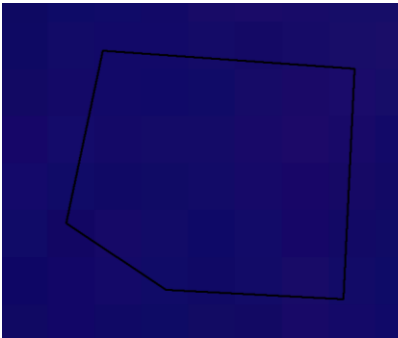
Deshalb werden die Beschirmungsgrade in weiterer Folge visuell bestimmt und aus den Luftbildern geschätzt. Die Ergebnisse dieser Schätzungen werden letztendlich für die weiteren Analysen verwendet.

### **7.4.3 Auszug aus dem Referenzgebiete-Katalog**


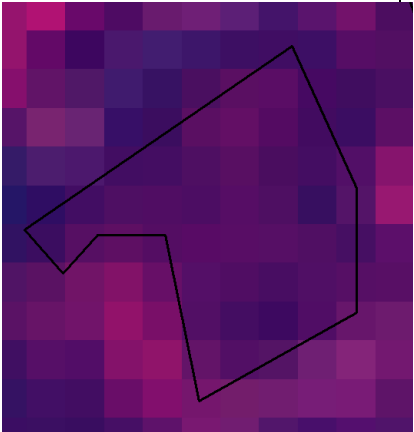

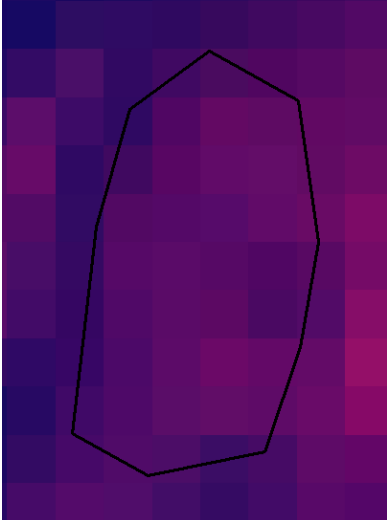
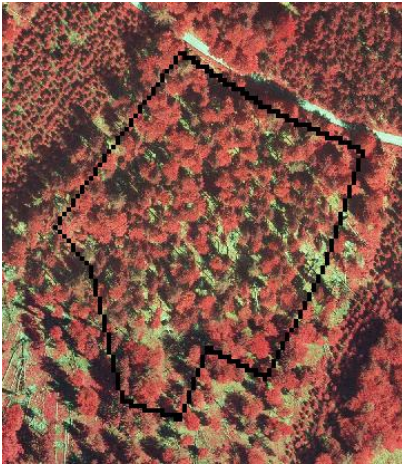
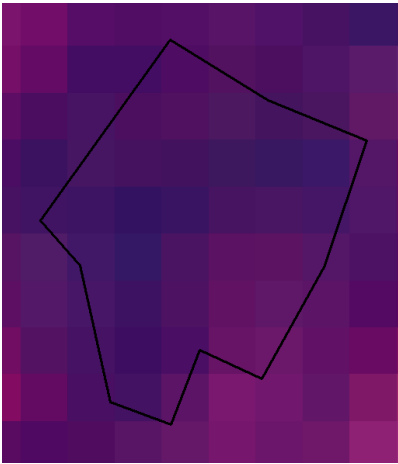
In diesem Kapitel werden für die jeweiligen Waldklassen selektiv Bilder von Referenzgebieten im Luftbild und Satellitenbild visualisiert. Damit soll das Aussehen von Waldbeständen einerseits im Luftbild und andererseits im Satellitenbild erklärt und Faktoren, die das Erscheinungsbild beeinflussen, aufgezeigt werden (Beschirmungsgrade, Schatten).


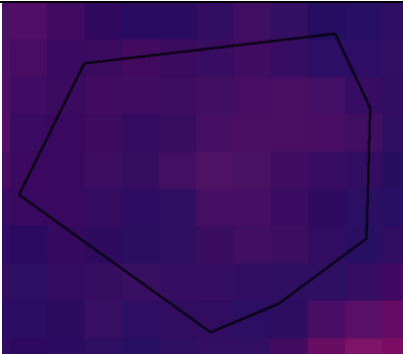
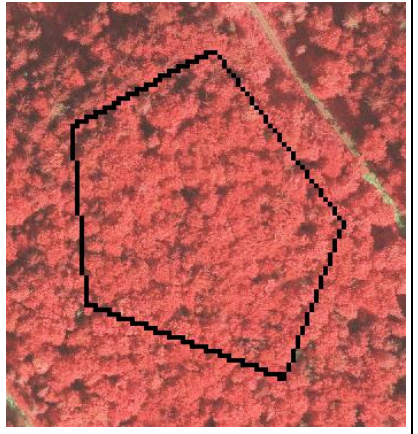
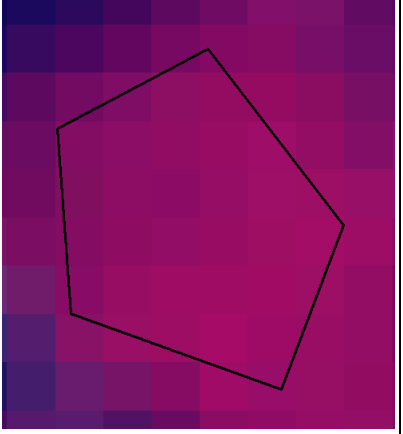
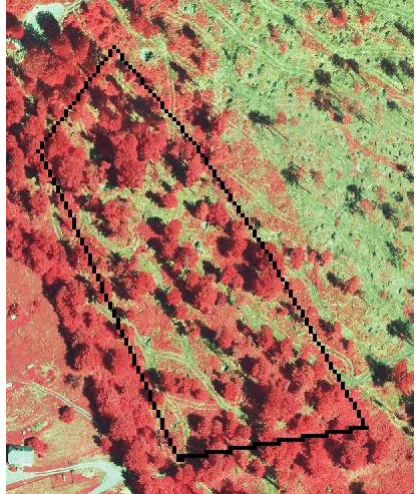
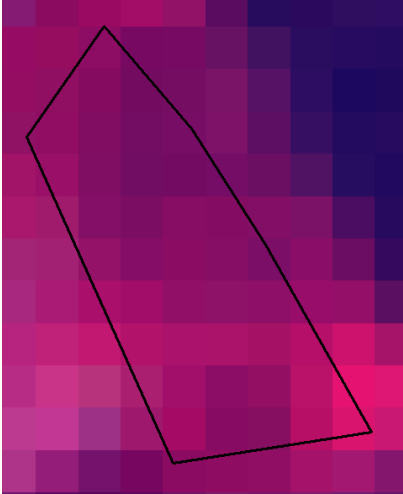
Tabelle 12 zeigt den Auszug aus dem Referenzgebiete-Katalog, wobei zur Darstellung wieder die Kanalkombination nahes Infrarot, rot und grün verwendet wird. Als Beispiel für ein Satellitenbild wird die Szene i\_32\_35\_060722 verwendet.

Tabelle 12: Beispiele für Testgebiete der Vegetationsklassen

<b><u>Referenzgebiet im Luftbild:</u></b>	<b><u>Referenzgebiet im Satellitenbild:</u></b>	<b><u>Beschreibung:</u></b>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• FID: 82</li> <li>• Klasse: junger Nadelwald</li> <li>• CC<sup>11</sup>_ndsm: 98 %</li> <li>• CC_geschätzt: 88 %</li> </ul> <p>Fichten sind im Luftbild durch ihre sternförmige Erscheinung leicht von Laubbäumen zu unterscheiden, die eher weichere, wolkenhafte Kronenformen besitzen. Junger Nadelwald ist sowohl im Luftbild als auch im Satellitenbild heller als alter Nadelwald. Auch der Größenunterschied der Bäume zwischen jung und alt ist im Luftbild zu erkennen. Das Identifizieren des Größenunterschieds wird vom höheren Schattenanteil bei alten Nadelwäldern im Luftbild visuell unterstützt (siehe rechte, obere Ecke).</p>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• FID: 126</li> <li>• Klasse: alter Nadelwald</li> <li>• CC_ndsm: 98 %</li> <li>• CC_geschätzt: 95 %</li> </ul> <p>Alter Nadelwald besitzt eine weniger homogene Signatur als junger Nadelwald. Der unregelmäßige Licht und Schattenwechsel bei den Baumkronen ist typisch für diese Klasse. Im Satellitenbild weist sie aufgrund des hohen Schattenanteils sehr niedrigere Grauwerte auf.</p>

<sup>11</sup> CrownCover

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• FID: 343</li> <li>• Klasse: alter Nadelwald</li> <li>• CC_ndsm: 49 %</li> <li>• CC_geschätzt: 50 %</li> </ul> <p>Bei altem, gering beschirmtem Nadelwald sind Mischpixel innerhalb eines Referenzgebiets im Satellitenbild typisch. Es entstehen helle Pixel durch die durchscheinende Bodenvegetation und dunkle Pixel aus Nadelbäumen und deren Schatten. Im Luftbild sind die Bestandslücken leicht zu erkennen, und das Bild ist von besonnten Kronen, Schlagschatten der Bäume und durchscheinender Bodenvegetation geprägt.</p>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• FID: 168</li> <li>• Klasse: Laub-Mischwald</li> <li>• CC_ndsm: 90 %</li> <li>• CC_geschätzt: 90 %</li> </ul> <p>Im Mischwald ist die unterschiedliche Färbung und Kronenstruktur von Laub- und Nadelbäumen gut zu erkennen. In diesem Fall sind etwas mehr hellrote Laubwaldbereich im Referenzgebiet zu erkennen. Deshalb wurde es der Klasse Laub-Mischwald zugeordnet.</p>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• FID: 392</li> <li>• Klasse: Laub-Mischwald</li> <li>• CC_ndsm: 61 %</li> <li>• CC_geschätzt: 40 %</li> </ul> <p>Ein Laub-Mischwald mit geringem Beschirmungsgrad ist in der nebenstehenden Graphik zu erkennen. Auffällig sind die durchscheinende Bodenvegetation und das Übergewicht an wolkenförmigen Laubbaumkronen.</p>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• FID: 155</li> <li>• Klasse: Nadel-Mischwald</li> <li>• CC_ndsm: 96 %</li> <li>• CC_geschätzt: 95 %</li> </ul> <p>Ein großes, dichtbewachsenes Nadel-Mischwaldgebiet ist links zu sehen.</p>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• FID: 114</li> <li>• Klasse: Laubwald</li> <li>• CC_ndsm: 99 %</li> <li>• CC_geschätzt: 85 %</li> </ul> <p>Dichte Laubwälder besitzen generell einen sehr niedrigen Schattenanteil, weil das geschlossene Kronendach sehr homogen ist. Sie sind im Satellitenbild deutlich heller als Nadel- oder Mischwälder.</p>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• FID: 387</li> <li>• Klasse: Laubwald</li> <li>• CC_ndsm: 56 %</li> <li>• CC_geschätzt: 30 %</li> </ul> <p>Links ist eine spärlich mit Laubbäumen bewachsene Wiese als Referenzgebiet für sehr gering beschirmten Laubwald zu sehen. Auffällig ist, dass hierbei der berechnete Beschirmungsgrad aus dem NDSM viel zu hoch ist.</p>

## 8 Durchführung der Analyse

Sämtliche Analysen werden mit Hilfe der Programmiersoftware Matlab 7.6.0 durchgeführt und basieren auf den Referenzgebieten, die die Waldklassen in den unterschiedlichen Bilddatensätzen repräsentieren.

### *8.1 Beschreibung der verwendeten Signaturen*

Um ein grundsätzliches Verständnis für die verwendeten Signaturen zu bekommen und auf die unterschiedlichen Reflexionscharakteristika der Referenzgebiete in den Satellitenbilddaten aufmerksam zu machen, werden Scatterplots erzeugt. Dabei wird das Hauptaugenmerk auf die visuelle Trennbarkeit der in Kapitel 7.4.2 beschriebenen Wald- bzw. Altersklassen (Laubwald, Laub-Mischwald, Nadel-Mischwald, junger Nadelwald und alter Nadelwald) gelenkt. Es werden die Grauwertmittelwerte der Testgebiete aus den Frequenzbändern Grün und Nahes Infrarot (NIR) gegenüber aufgetragen, da sich diese beiden Kanäle aufgrund der höheren Reflexionswerte am besten für die Unterscheidung von Waldklassen eignen.

### **Grauwerte vs. Beschirmung**

Wie bereits erwähnt, gibt es viele Faktoren, welche das Reflexionsverhalten von Waldbeständen beeinflussen. Durchscheinende Bodenvegetation etwa reflektiert sehr stark und hellt deshalb Bildpunkte in Nadelwaldgebieten auf. Der von Bäumen in Abhängigkeit des Sonnenstandes und des Reliefs erzeugte Schlagschatten verhindert eine Reflexion des Lichts zum Sensor und lässt somit Waldpixel wieder dunkler erscheinen. Wie intensiv die erwähnten Einflüsse auftreten, hängt vom Beschirmungsgrad des Waldbestandes ab. (Vgl. Schardt 1997: S. 77 – 110)

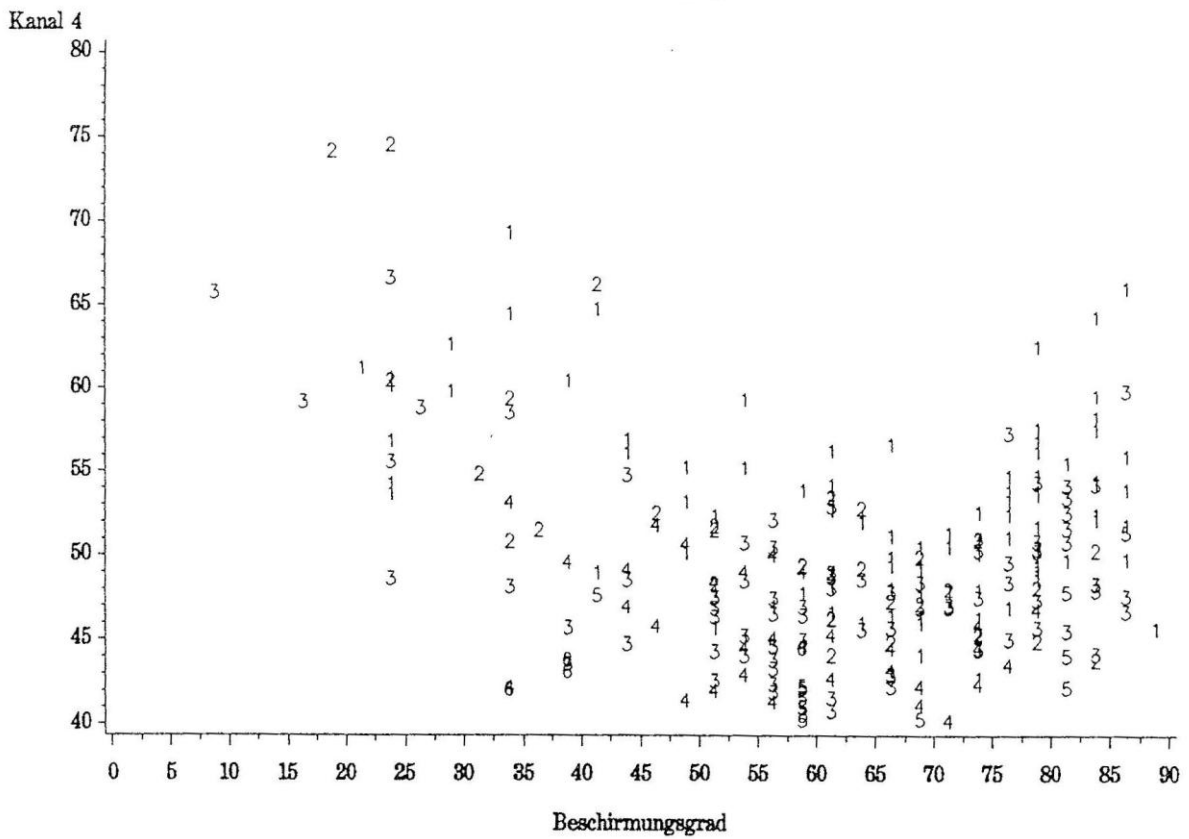


Abbildung 17: Abhängigkeit der mittleren Grauwerte im Kanal 4 (nahes Infrarot) vom Beschirmungsgrad bei Nadelbeständen in einem Thematic Mapper Satellitenbild (nach Schardt 1997: S. 88)

Abbildung 17 zeigt das Verhalten der mittleren Grauwerte von unterschiedlichen Waldbeständen bei ansteigendem Beschirmungsgrad in einer Thematic Mapper Szene im nahen Infrarotkanal. Die dargestellten Zahlen entsprechen sechs verschiedenen Straten, die jeweils bestimmte gemeinsame Eigenschaften besitzen und sich wie folgt zusammensetzen.

1. Stratum: starke Beleuchtung / Stangen- bis mittlere Baumhölzer
2. Stratum: starke Beleuchtung / Althölzer
3. Stratum: mittlere Beleuchtung / Stangen- bis mittlere Baumhölzer
4. Stratum: mittlere Beleuchtung / Althölzer
5. Stratum: geringe Beleuchtung / Stangen- bis mittlere Baumhölzer
6. Stratum: geringe Beleuchtung / Althölzer

Es wird ersichtlich, dass die Grauwerte bei allen Straten ausgehend von einem dichten Bestand bis zu einer Beschirmung von 60 % fallen und dann wieder zunehmen. Die Abnahme des Grauwerts kommt zustande, da in den entstehenden Lücken des Kronendachs Schatten

entsteht und dieser das Erscheinungsbild verdunkelt. Ab einem Beschirmungsgrad von 60 % werden die Bereich zwischen den Bäumen so groß, dass das Licht bis zum Waldboden bzw. der Bodenvegetation gelangt, dort reflektiert wird und die Grauwerte wieder aufhellt. (Vgl. Schardt 1997: S. 77 – 110)

In dieser Arbeit werden ebenfalls Untersuchungen durchgeführt, die die **Auswirkungen des Beschirmungsgrades auf die Reflexion** betreffen.

## ***8.2 Untersuchung des Einflusses der Topographie auf die Reflexion***

Der Hauptteil der Arbeit beschäftigt sich mit Untersuchungen von Zusammenhängen der Reflexion von Satellitenbilder mit ausgesuchten Geländeparametern. Es wird das Verhalten der Grauwerte bei unterschiedlichen Beleuchtungszuständen (Illumination), welche vom Relief hervorgerufen werden, und die Ursachen für die topographieabhängigen Reflexionsunterschiede untersucht und diskutiert. Die Zusammenhänge werden für die verschiedenen Waldklassen in allen Frequenzkanälen der Satellitenszenen anhand der Referenzgebiete analysiert.

Dafür werden ein Satellitenbild und das dazugehörige in Impact generierte Inzidenzwinkel-Bild benötigt. Es wird der Kosinus des Mittelwertes aller innerhalb eines Referenzgebiets vorkommenden Inzidenzwinkel (Inzidenzwinkel-Szene) dem jeweiligen Grauwertmittel eines bestimmten Spektralbandes (Satellitenbild) gegenübergestellt.

Die Untersuchungen sollen feststellen, ob innerhalb einer Vegetationsklasse ein linearer Zusammenhang zwischen Grauwertintensität und Illumination besteht. Deshalb wird eine lineare Regression durchgeführt und die angepassten Regressionsgeraden in den Scattergrammen abgebildet. Die Analyse stützt sich auf die Qualitätskenngrößen Bestimmtheitsmaß und Variationskoeffizient.

### **8.2.1 Beeinflussung durch niedrigere Beschirmungsgrade**

Bei den **Grauwert–Illuminations–Analysen** wird für die Klassen Laub- und alter Nadelwald zusätzlich eine **Differenzierung** bezüglich des **Beschirmungsgrades** gemacht. Damit soll untersucht werden, wie stark der Beschirmungsgrad die lineare Regression beeinflusst bzw.

verfälscht. Es werden wiederum die Grauwerte einer Vegetationsklasse mit der dazugehörigen Illumination in Verbindung gebracht und innerhalb der Abbildung zwischen drei Beschirmungsklassen unterschieden.

Die Beschirmungsklassen werden folgendermaßen definiert:

- < 60 %
- 60 – 75 %
- > 75 %

### **8.2.2 Ohne gering beschirmte Referenzgebiete**

Anschließend werden die Grauwert-Illuminations-Analysen nur mit Referenzgebieten durchgeführt, die einen Beschirmungsgrad von über 75 % aufweisen. Da somit keine von der Bodenvegetation verursachte Beeinflussung der Reflexionscharakteristika der Waldklassen mehr vorkommt, werden bessere Ergebnisse bei den Untersuchungen erwartet.

Diese Ergebnisse werden mit den vorherigen verglichen und Auffälligkeiten andiskutiert.

### **8.3 Analysen unter Zuhilfenahme der Schattensimulationen**

Mit Hilfe der aus den LIDAR-Daten abgeleiteten Schattenmasken, die die Schlagschatten der Bäume in Abhängigkeit des Sonnenstandes zum Aufnahmezeitpunkt des Satellitenbildes simulieren, werden Untersuchungen bezüglich Schattenanteile in Referenzgebieten durchgeführt. Diese Analysen sollen klären, wieso die unterschiedlichen Waldklassen bezüglich Reflexion verschieden stark auf den Einfluss der Topographie bzw. der Illumination reagieren.



### 8.3.1 Beschirmung vs. Schattenanteil

In diesem Kapitel wird der Zusammenhang zwischen der **Überschirmung** und dem **Schattenanteil** der Referenzgebiete beleuchtet und damit analysiert, wie die Reflexion vom Beschirmungsgrad abhängt. Der Schattenanteil variiert von Waldklasse zu Waldklasse und wird innerhalb dieser hauptsächlich von der Kronendachrauigkeit beeinflusst, die neben der vertikalen Struktur des Kronendachs von der Beschirmung abhängt. Bei den Untersuchungen werden die Referenzgebiete einmal wie gewohnt nach Waldklassen und einmal nach Hangrichtung bzw. Hangneigung unterteilt. Dies geschieht, da der Schatten, den die Bäume werfen, auf den Boden projiziert wird und gezeigt werden soll, dass die Länge des Schattens und somit auch der Schattenanteil neben dem Sonnenstand auch von der Exposition und Inklinati- on des Geländes beeinflusst wird.

### 8.3.2 Reflexion der Waldtypen vs. Schattenanteil

In diesem Kapitel wird eruiert, wie sich die Zu- bzw. Abnahme des **Schattenanteils** explizit auf die **Reflexion** der Waldbestände, sprich auf die Grauwerte des Satellitenbildes, auswirkt. Außerdem wird überprüft, wie stark die Grauwerte der verschiedenen Baumarten von den Schattenanteilen abhängen. Da Schattenflächen keine Reflexion zulassen, wird erwartet, dass diese bei häufigem Auftreten die Grauwertintensität von Pixeln erheblich herabsetzen.

### 8.3.3 Illumination vs. Schattenanteil

Der bereits erwähnte Zusammenhang zwischen Schattenanteilen in Waldgebieten, Sonnenstand und Geländelage ist Anreiz für eine weitere Analyse. Es wird untersucht, wie sehr der Schattenanteil von der Beleuchtung des Hanges abhängt. Die Beleuchtung geht bekanntlich mit dem Einfallswinkel der Sonnenstrahlung auf der Erdoberfläche einher. Ist ein Hang beispielsweise genau zur Sonne hin ausgerichtet, ist die Illumination eins, und der Schattenanteil müsste laut Annahme am geringsten sein, da nur die Fläche direkt unterhalb der besonnten Blätter beschattet ist. Demzufolge ist bei tiefstehender Sonneneinstrahlung mit mehr Schatten zu rechnen. In Abbildung 18 sind die zuvor erwähnten Zusammenhänge noch einmal graphisch dargestellt.

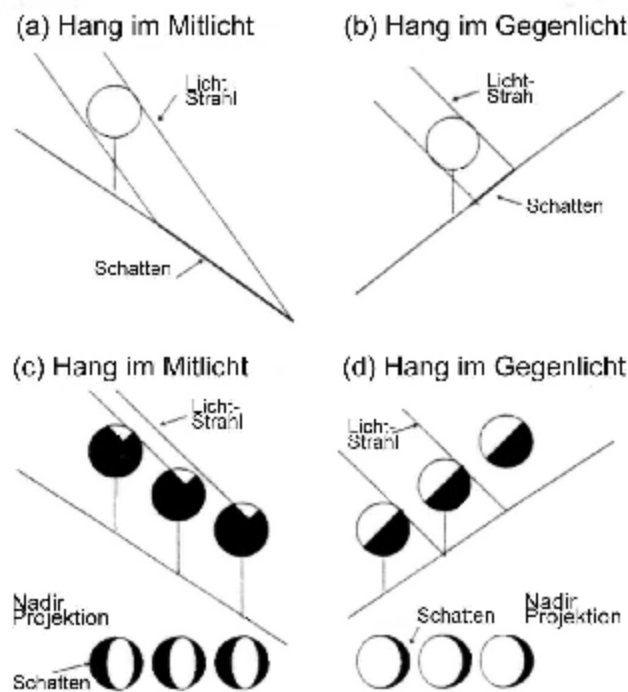


Abbildung 18: Einfluss von Inklination und Exposition eines Hanges auf den Schattenwurf (siehe Buhk 2000: S. 10)

Da Schattenflächen somit auch die Reflexion beeinflussen, wird versucht, diese Untersuchung mit der Grauwert-Illuminations-Untersuchung in Kapitel 8.2 in Verbindung zu bringen. Durch die Beobachtung der Entwicklung des Schattenanteils können also Rückschlüsse auf das Verhalten der Grauwerte bei steigender Illumination gezogen werden.

## **8.4 Evaluierung der verschiedenen topographischen Normalisierungen**

In diesem Abschnitt werden die drei in Kapitel 7.3 vorgestellten Arten der topographischen Normalisierungen mit Hilfe der Illuminations-Plots und den darauf basierenden Statistiken verglichen und bewertet. Es werden Auffälligkeiten erläutert und die Qualität der Normalisierungen visuell und statistisch evaluiert.

Den Analysen liegt die Tatsache zugrunde, dass die topographische Normalisierung eines Satellitenbildes in Geländelagen mit hohem Inzidenzwinkel stärkeren Einfluss auf die Reflexion hat als in Gegenden, wo der Inzidenzwinkel gering und somit die Illumination hoch ist. Das bedeutet, dass die Grauwerte der an sonnenzugewandten Hängen liegenden Referenzgebiete nach der topographischen Normalisierung annähernd gleich bleiben, die Grauwerte der steilen Referenzgebiete an schattseitigen Berghängen sich jedoch deutlich verändert haben.

Nach der topographischen Korrektur sollten idealerweise keine Illuminationsunterschiede im Satellitenbild mehr bestehen, die Grauwerte der Referenzgebiete einer Waldklasse folglich frei von Illuminationseffekten sein und sich somit annähernd auf einem Level befinden.

## 9 Ergebnisse und Analyse

Das Kapitel 9 widmet sich den Ergebnissen der durchgeführten Untersuchungen. Sie sollen diese beschreiben und ausführlich erklären. Es wird, sofern nicht explizit auf andere verwiesen wird, die IRS-Szene `i_32_35_060722` behandelt. Diese Szene wird aufgrund der guten atmosphärischen Bedingungen (nur wenige Wolken im Bild) und des Aufnahmedatums gewählt. Da die phänologischen Voraussetzungen im Juli ideal für die Beobachtung der Vegetation sind (v.a. bei Laubbäumen), ermöglicht dies die Gewinnung von repräsentativer Information über die Waldklassen. Da die meisten verwendeten Satellitenbilder etwa zur selben Jahreszeit (im Frühsommer) aufgenommen wurden, erleichtert dies den Vergleich untereinander. Die Ergebnisse der anderen IRS- und Landsat-Daten führen zu vergleichbaren Ergebnissen, lassen somit ähnliche Schlüsse zu und sind dem Anhang zu entnehmen.

### ***9.1 Beschreibung der verwendeten Signaturen***

Zum allgemeinen Verständnis der Signaturen erfolgt eine visuelle Trennbarkeitsanalyse der verwendeten Waldtypen anhand von Scatterplots.

Testgebiete einer Klasse bilden Grauwertcluster im spektralen Merkmalsraum, die sich in Abhängigkeit des Frequenzkanals mehr oder weniger mit Clustern anderer Klassen überlappen.

Bild i\_32\_35\_2: Scatterplot der Kanäle Grünen und NIR

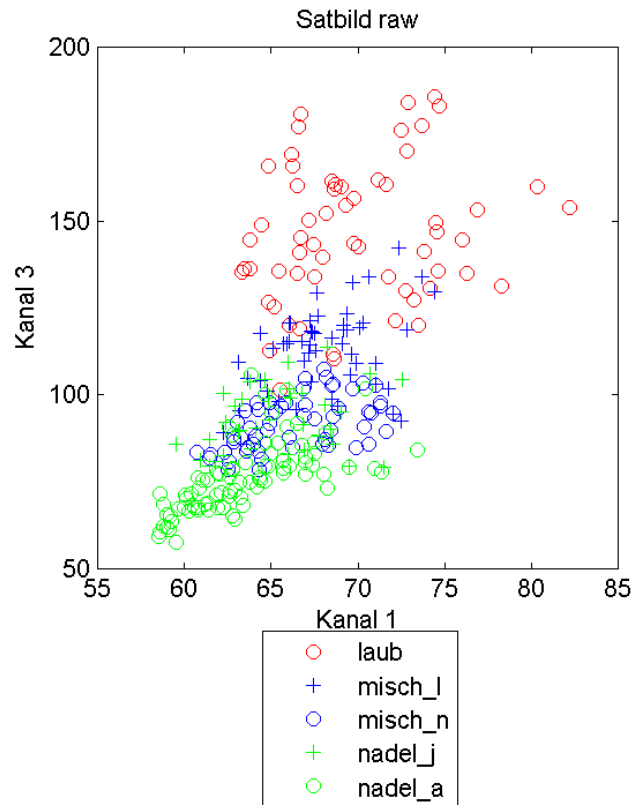


Abbildung 19: Bild i\_32\_35\_060722: Scatterplot - Grün vs. NIR

Abbildung 19 zeigt einen in Matlab erstellten Scatterplot für die Satellitenbildszene i\_32\_35\_060722. Die beiden Koordinatenachsen werden von den IRS-Kanälen eins (Grün) und drei (nahes Infrarot) gebildet, da diese Kanäle für die Untersuchung von Vegetationsklassen die besten Differenzierungsmöglichkeiten bieten. Es wird zwischen den Vegetationsklassen Laubwald, Laub-Mischwald, Nadel-Mischwald, junger Nadelwald und alter Nadelwald unterschieden, die durch die jeweiligen, in der Legende erklärten Symbole bzw. Farben, dargestellt werden. Dabei stellt jedes Symbol den mittleren Grauwert eines Referenzgebietes dar. In Tabelle 13 ist die Anzahl der Referenzgebiete, welche in der untersuchten Szene verwendet werden, und deren Verteilung auf die Vegetationsklassen ersichtlich.

**Tabelle 13: Referenzgebiete im Satellitenbild i\_32\_35\_060722**

Waldklassen	Anz. d. Referenzgebiete
MISCH_Laub	51
MISCH_Nadel	56
LAUB	60
NADEL_Jung	35
NADEL_Alt	83
Summe:	285

Eine visuelle Trennung der durch die Referenzgebiete repräsentierten Waldklassen ist vor allem in den Infrarotkanälen relativ einfach möglich. Nur die Waldklassen Misch-Nadel und junger Nadelwald besitzen annähernd die gleichen radiometrischen Eigenschaften in den dargestellten Frequenzbändern und überlagern sich deshalb in Abbildung 19.

Junge Nadelwaldkulturen besitzen zumeist eine hohe Kronendichte und reflektieren in allen Frequenzbändern stärker als alte. Bei Mischwäldern sinkt die Reflexion mit der Zunahme des Prozentsatzes an Nadelbäumen (vgl. Schardt 1997: S. 31 – 33). Bei einem bestimmten Mischungsverhältnis werden also beim Mischwald Grauwerte erreicht, die im Infrarotbereich auch charakteristisch für junge Nadelwälder sind.

Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Klasse Laubwald am meisten streut. Das ist der Fall, da Laubwald aufgrund der Vielfalt seiner Erscheinung ein breiteres Spektrum an Grauwerten abdeckt. Verantwortlich für die relativ breiten Grenzen der Grauwertcluster im zweidimensionalen Merkmalsraum und die teilweise hohe Streuung sind vor allem die Faktoren Beschirmungsgrad, Kronendachrauigkeit und Exposition der Waldgebiete, auf die später in der Arbeit noch näher eingegangen wird. Unterschiedliches Baumalter sorgt beim Laubwald nur für geringe Reflexionsunterschiede (vgl. Schardt 1997: S. 77 – 78).

### **Grauwert vs. Beschirmung**

Der Zusammenhang zwischen Grauwerten und Beschirmungsgraden von Referenzgebieten in einem Satellitenbild wird in diesem Kapitel analysiert. Dabei wird bei Zunahme der Überschirmung ein typisches Verhalten der Grauwerte beobachtet.

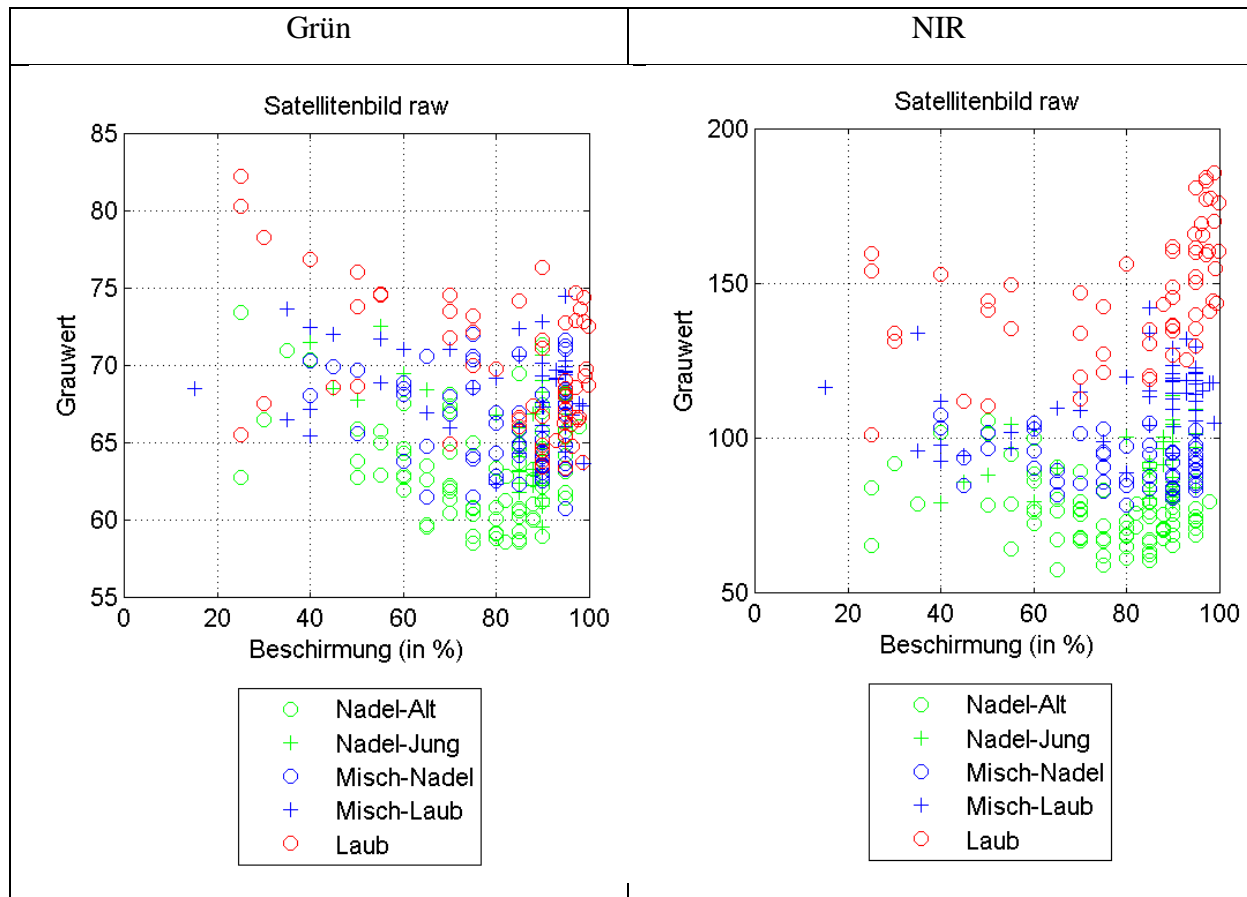


Abbildung 20: Bild i\_32\_35\_060722: Scatterplot - Beschirmung vs. Grauwert

In Abbildung 20 fällt auf, dass die Grauwerte von Nadelwaldklassen in den Kanälen Grün und NIR bis etwa zum Beschirmungsgrad 70 % fallen und dann von 75 bis 100 % wieder leicht ansteigen.

Bei geringer Überschirmung wird der Grauwert hauptsächlich von der beleuchteten Bodenvegetation und weniger von den spärlich vorkommenden Bäumen beeinflusst. Diese hellt vor allem Nadelwaldtestgebiete stark auf, wobei es allerdings auch auf die Art bzw. den Feuchtigkeitsgehalt der Bodenvegetation ankommt. Mit zunehmender Beschirmung scheint die Bodenvegetation immer weniger durch und wird von Schatten maskiert. Im Bereich von 75 % Beschirmung ist die Reflexion am kleinsten, da die Bodenvegetation nicht mehr sichtbar ist und die Lücken zwischen den Bäumen vollkommen beschattet sind. Dann nimmt der Anteil an beleuchteten Kronenflächen wieder zu, verdrängt die Schattenflächen und hellt das Gesamtbild auf. Das beschriebene Verhalten der Grauwerte bei zunehmender Beschirmung im Nadelwald ist in allen Frequenzkanälen sichtbar.

Die gewonnenen Erkenntnisse sind vergleichbar mit jenen von Schardt 1990 und Steinegger 2010, dessen Untersuchungen sich auch auf dieses Thema konzentrierten. Der Bereich der

minimalen Reflexion liegt bei den untersuchten Szenen in dieser Arbeit allerdings bei einem höheren Beschirmungsgrad, durchschnittlich im Bereich von 70 – 75 % Beschirmung. Bei Schardt und Steinegger lagen die tiefsten Grauwerte einer Waldklasse bei 60 – 65 % Beschirmung.

Bei Laubwäldern oder von Laub dominierten Klassen ist das zuvor beschriebene Verhalten ebenfalls ersichtlich, aber nicht so klar erkennbar, da die Reflexion von Laubwäldern der von Bodenvegetation ähnelt. Hier streuen die Grauwerte der Testgebiete vor allem bei niedrigen Beschirmungsgraden stärker.

## **9.2 *Grauwert vs. Illumination***

Die Untersuchung des Verhaltens der Grauwerte bei unterschiedlichen Illuminationen ist der eigentliche Hauptteil der Arbeit.

Zur Wiederholung: Es wird der Grauwertmittelwert gegenüber dem mittleren Illuminationswert des Referenzgebiets geplottet. Das heißt, Gebiete, die der Sonne zugewandt sind, liegen bei Eins und der Wert für steile Nordhänge ist nahe Null.



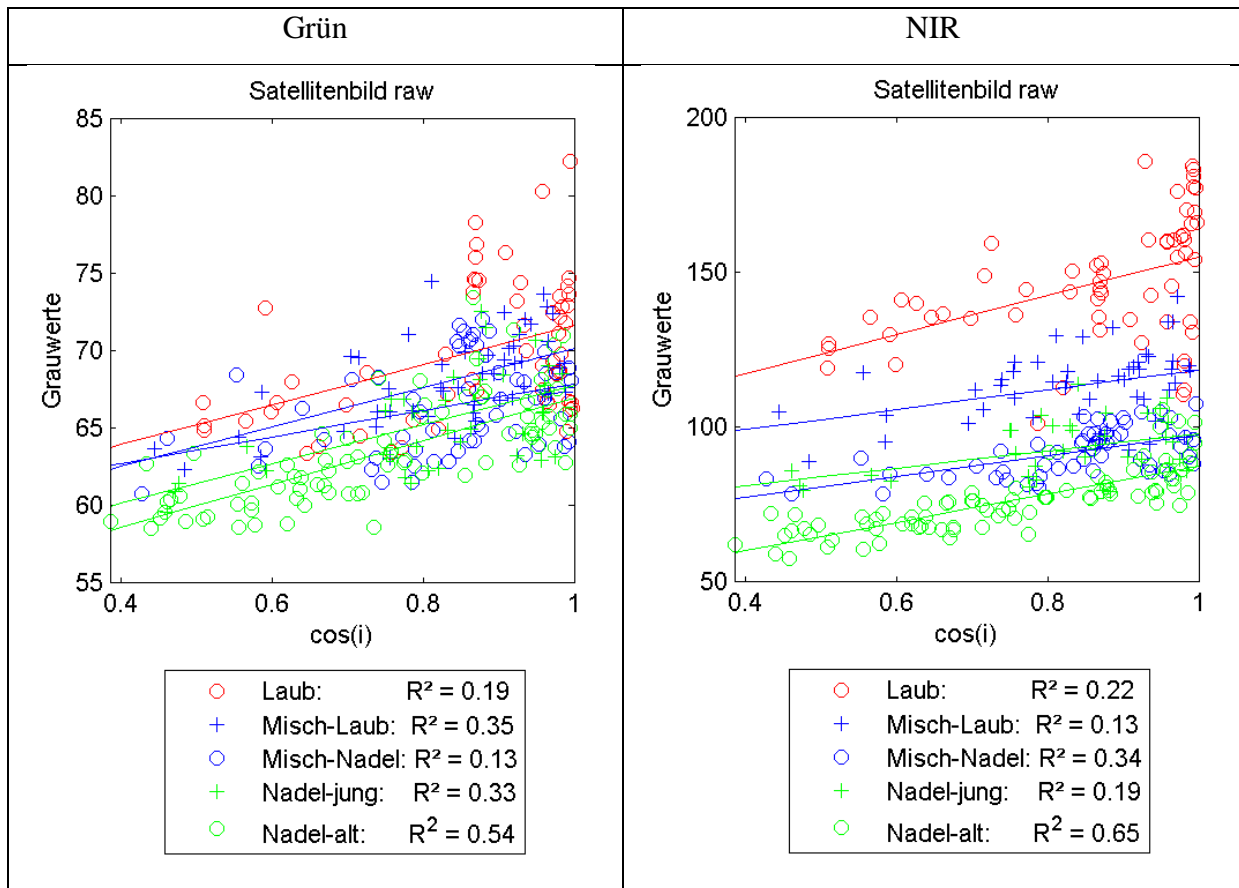


Abbildung 21: Bild i\_32\_35\_060722: Lineare Regression - Illumination vs. Grauwert

Wie in Abbildung 21 zu erkennen ist, besteht ein Zusammenhang zwischen den beiden dargestellten Größen. Referenzgebiete mit geringer Illumination erscheinen im Bild dunkler als ihre mit einer hohen Illumination behafteten Pendanten, sie haben also geringere Grauwerte. Da die Abbildung der Referenzgebiete einen linearen Verlauf erkennen lässt, wird eine lineare Regression durchgeführt. Die Geradenscharen im Bild entsprechen den linearen Regressionen, die an die jeweiligen Grauwerte der Vegetationsklassen angepasst werden. Wie zutreffend die lineare Regression ist, beschreibt das Bestimmtheitsmaß  $R^2$ . Mit dem Coefficient of Variation (Standardabweichung/Mittelwert) wird angegeben, wie stark die Klasse streut. Diese beiden Qualitätskenngrößen und die Steigungen der Regressionsgeraden werden in einem Log-File protokolliert und sind für diese Szene in Tabelle 14 dargestellt.

Die Infrarotkanäle eignen sich besonders für die Visualisierung der linearen Regressionen, da hier die Klassen leicht abgrenzbar sind und die Geradenscharen einen übersichtlichen Abstand zueinander aufweisen (siehe Abbildung 21 rechts). In den anderen Frequenzbändern fällt dies schwerer, was allerdings die guten Ergebnisse für die Regressionen nicht trübt. Einzig in den blauen Kanälen der Landsat-Szenen ist die Qualität der linearen Regressionen aufgrund des

maskierenden Einflusses der atmosphärischen Effekte zu hinterfragen. Die Plots und statistischen Werte zur linearen Regression aller untersuchten Satellitenszenen sind im Anhang A zu finden.

**Tabelle 14: Bild i\_32\_35\_060722 - Statistische Werte der linearen Regression**

Satellitenbild i_32_35_060722					
R <sup>2</sup>	Nadel_jung	Nadel_alt	Laub	Misch_Laub	Misch_Nadel
Band 1	0.331	0.545	0.187	0.350	0.129
Band 2	0.215	0.408	0.127	0.168	0.164
Band 3	0.190	0.650	0.220	0.131	0.337
Band 4	0.245	0.415	0.377	0.047	0.275
k	Nadel_jung	Nadel_alt	Laub	Misch_Laub	Misch_Nadel
Band 1	12.72	13.95	12.86	12.75	8.56
Band 2	8.60	8.59	6.43	7.08	6.75
Band 3	28.06	45.93	62.96	31.95	33.40
Band 4	17.75	26.73	32.45	12.43	24.24
CV	Nadel_jung	Nadel_alt	Laub	Misch_Laub	Misch_Nadel
Band 1	0.049	0.053	0.064	0.042	0.047
Band 2	0.097	0.087	0.092	0.079	0.076
Band 3	0.101	0.132	0.137	0.103	0.081
Band 4	0.133	0.182	0.102	0.125	0.122

Die größte Abhängigkeit der Grauwerte von der Illumination besteht im nahen Infrarotkanal, bei dem die Steigungen der Regressionsgeraden eindeutig am größten sind (siehe Tabelle 14). Im sichtbaren Frequenzbereich sind die Geraden eher flach. Es ist zu erkennen, dass die verschiedenen Vegetationsklassen unterschiedlich auf den Illuminationseffekt reagieren. Laubwälder sind stärker als die übrigen Waldklassen von Verdunkelungseffekten durch die Topographie beeinflussbar und weisen deshalb die höchste Steigung der Regressionsgeraden auf. Bei Mischwald scheint es, als würde die Steigung der Regressionsgeraden geringer werden, je größer der Nadelwaldanteil ist. Die Steigung der Regressionsgeraden ist bei der Klasse Nadel\_Alt verglichen zu den anderen Satellitenbildern auffällig hoch. Darauf wird anschließend noch näher eingegangen.

Die gewonnenen Erkenntnisse verdeutlichen, dass für eine ideale topographische Normalisierung der Gesamtszene eine je Vegetationsklasse spezifische Korrektur der Beleuchtungs-

konsistenz notwendig ist. Sie sind somit als Motivation für die Self-Calibrating-Topographic-Minnaert-Methode zu verstehen, die später in Kapitel 9.4 angewendet wird.

Die Variationskoeffizienten sind bei den Laubwäldern am höchsten, was eine größere Streuung der Testgebiete um die Regressionsgerade der jeweiligen Vegetationsklasse impliziert. Diese hohe Streuung ist vor allem bei Gebieten mit hoher Illumination zu erkennen und wird aufgrund von Unterschieden in Beschirmungsgrad oder Kronendachrauigkeit hervorgerufen. Ein weiterer Grund dafür ist der generell höhere Dynamikbereich bei höheren Illuminationen. Im SW-IR – Kanal schneidet die Klasse Nadel\_Alt diesbezüglich am schlechtesten ab. Da diese Klasse die größte Anzahl an gering beschirmten Samples besitzt, kann das Ergebnis auch als folgerichtig bezeichnet werden.

### **9.2.1 Beeinflussung durch niedrigere Beschirmungsgrade**

Dass niedrigere Beschirmungsgrade die Streuung der Grauwerte im zweidimensionalen Merkmalsraum und somit die Regressionsanalysen beeinflussen, zeigt die linke Seite der Abbildung 22. Hier wird ausgehend von den Grauwert-Illuminationsplots innerhalb der Klasse Nadel\_Alt nach dem Beschirmungsgrad differenziert.

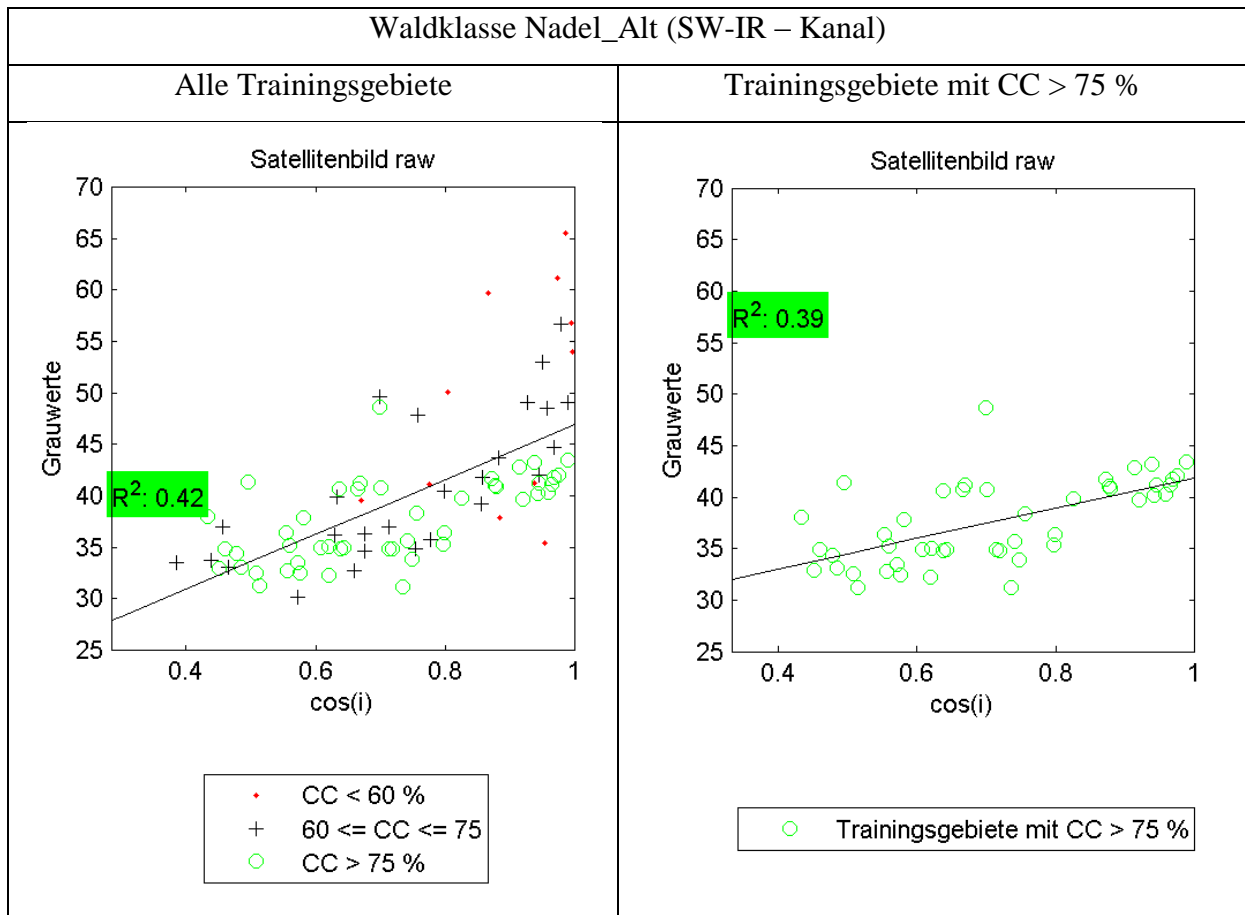


Abbildung 22: Bild i\_32\_35\_060722: Vergleich der linearen Regressionen in der Vegetationsklasse Nadel\_Alt im SW-IR Kanal – alle Referenzgebiete links und nur mit Referenzgebieten über 75 % CC rechts

Gebiete mit Kronenschlussgraden unter 60 % sind aufgrund der durchscheinenden Bodenvegetation spektral stark aufgehellt und besitzen höhere Grauwerte als ihre höher beschirmten Pendanten (vgl. Steinegger 2010: S. 58 – 63). Die Übershirmungsklasse von 60 – 75 % CC, in der laut Steinegger bei 60° Sonnenelevation keine beleuchteten Bodenflächen mehr sichtbar sein dürften, streut um die Regressionsgerade.

Wären die gering beschirmten Referenzgebiete gleichmäßig auf die verschiedenen Illuminationen verteilt, würden diese den Verlauf der Regressionsgeraden nicht beeinflussen. Wie in Abbildung 22 allerdings gut zu erkennen ist, befinden sich die angesprochenen Testgebiete bei der Klasse alter Nadelwald vermehrt in Gebieten mit hoher Illumination. Dies führt zu einer Anhebung der Regressionsgeraden in diesem Bereich, also zu einer Vergrößerung der Steigung.

Lässt man Testgebiete mit Beschirmungsgraden unter 75 % weg, ist nicht nur die Streuung um die Regressionsgerade, sondern auch die Steigung der Regressionsgeraden deutlich gerin-

ger (siehe Abbildung 22 rechts). Diese reduziert sich im SW-IR-Kanal konkret von 26.73 auf 14.79.

Bei Laubwald verhält es sich in den Infrarotkanälen genau umgekehrt. Hier besitzen die gering beschirmten Testgebiete niedrigere Grauwerte, und verringern, weil sie vermehrt bei hoher Illumination vorkommen, die Steigung der Regressionsgeraden.

### 9.2.2 Ohne gering beschirmte Referenzgebiete

Im vorherigen Kapitel wurde festgestellt, dass gering beschirmte Testgebiete nicht gleichmäßig auf den Illuminationsverlauf verteilt sind und somit die lineare Regression in den Endbereichen stark beeinflussen. Nachfolgende Untersuchungen sollen zeigen, dass sich die lineare Regression an die Referenzgebiete verbessert, wenn gering beschirmte Samples (CC  $\leq$  75 %) weggelassen und stattdessen nur dicht bestockte Kulturen verwendet werden. Dadurch werden die Grauwertcluster im zweidimensionalen Merkmalsraum kleiner, was bedeutet, dass sich die Referenzgebiete der jeweiligen Waldklassen spektral ähnlicher sind. Die Anzahl der Referenzgebiete verkleinert sich somit deutlich und ist Tabelle 15 zu entnehmen.

**Tabelle 15: reduzierte Anzahl der Referenzgebiete im Satellitenbild i\_32\_35\_060722**

Waldklassen	Referenzgebiete mit CC > 75%
MISCH_Laub	37
MISCH_Nadel	34
LAUB	41
NADEL_Jung	29
NADEL_Alt	46
Summe:	187

Die folgende Abbildung 23 behandelt dieselbe Satellitenszene in den selben Frequenzbändern wie Abbildung 21 auf Seite 71, nur dass Referenzgebiete mit unter 75 % Beschirmung aufgrund ihrer speziellen Reflexionscharakteristika und der deshalb resultierenden hohen Streuung weggelassen wurden.

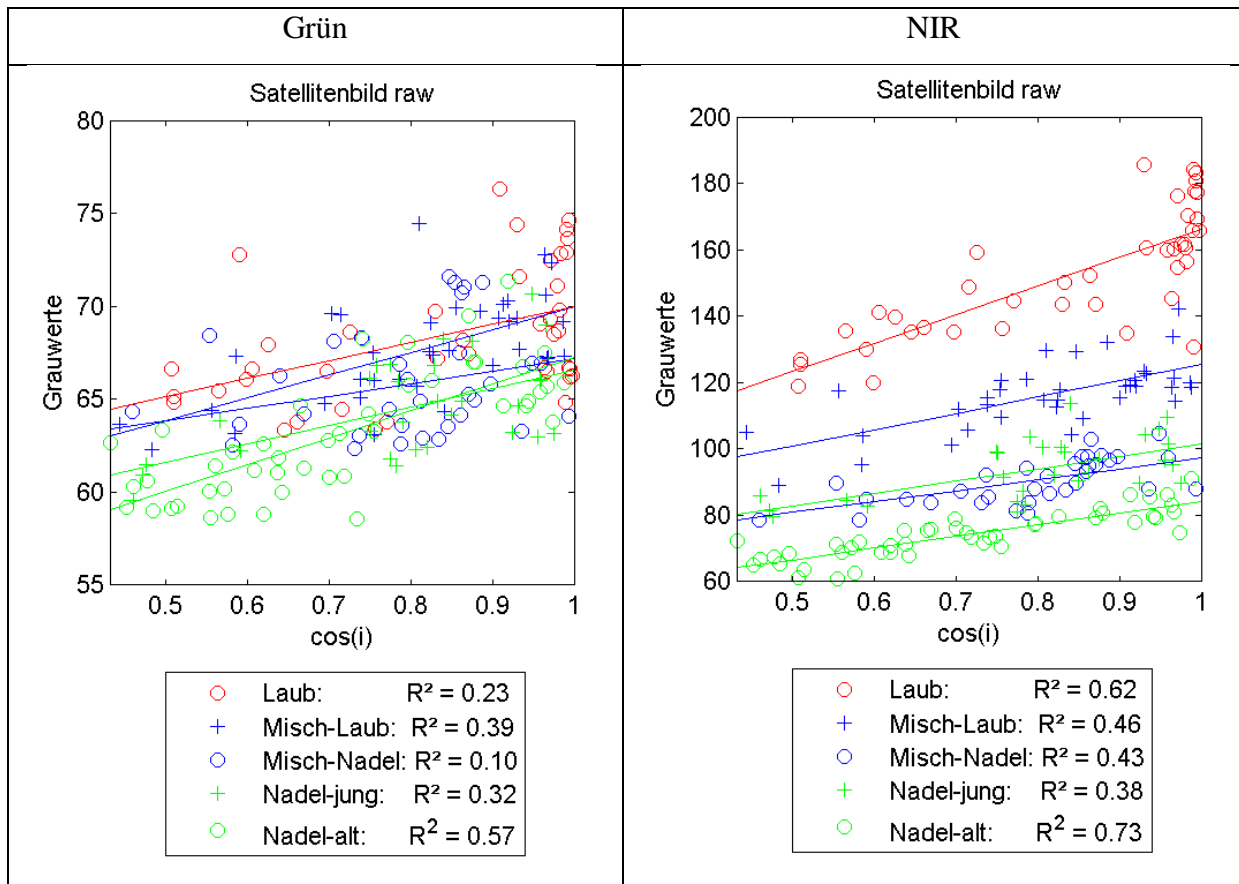


Abbildung 23: Bild i\_32\_35\_060722: Lineare Regression - Illumination vs. Grauwert mit CC > 75 %

In Abbildung 23 ist bereits optisch zu erkennen, dass die Referenzgebiete deutlich weniger um die Regressionsgeraden streuen. Das Bestimmtheitsmaß bei der linearen Regression ist im nahen Infrarotkanal in der Klasse Laub von  $R^2 = 0.22$  auf  $R^2 = 0.62$  angewachsen, was bedeutet, dass das lineare Modell die Daten jetzt besser beschreibt. Ein Anstieg des Bestimmtheitsmaßes ist dabei in fast allen Klassen zu beobachten.

Die statistischen Kenngrößen zu dieser linearen Regression können der Tabelle 16 entnommen werden. Die zwei Spalten ganz rechts wurden an die Tabelle angehängt, um den Vergleich zur vorherigen linearen Regression mit allen Referenzgebieten zu erleichtern.

Tabelle 16: Bild i\_32\_35\_060722 - Statistische Werte der linearen Regression bei Referenzgebieten mit CC > 75 %

	Ergebnis für Referenzgebiete mit CC > 75%					Alle Referenzgebiete	
R <sup>2</sup>	Nadel_jung	Nadel_alt	Laub	Misch_Laub	Misch_Nadel	Nadel_alt	Laub
Band 1	0.322	0.567	0.225	0.392	0.096	0.545	0.187
Band 2	0.206	0.619	0.205	0.202	0.107	0.408	0.127
Band 3	0.377	0.732	0.623	0.456	0.432	0.650	0.220
Band 4	0.275	0.387	0.625	0.037	0.124	0.415	0.377
k	Nadel_jung	Nadel_alt	Laub	Misch_Laub	Misch_Nadel	Nadel_alt	Laub
Band 1	10.03	14.46	9.74	12.23	6.73	13.95	12.86
Band 2	5.13	7.56	2.85	4.58	4.74	8.59	6.43
Band 3	37.41	35.21	86.33	49.19	32.78	45.93	62.96
Band 4	9.04	14.79	39.06	10.47	11.36	26.73	32.45
CV	Nadel_jung	Nadel_alt	Laub	Misch_Laub	Misch_Nadel	Nadel_alt	Laub
Band 1	0.041	0.052	0.051	0.041	0.045	0.053	0.064
Band 2	0.064	0.062	0.039	0.052	0.071	0.087	0.092
Band 3	0.098	0.095	0.123	0.090	0.076	0.132	0.137
Band 4	0.070	0.108	0.107	0.131	0.094	0.182	0.102

Verglichen mit den Werten der ersten Regressionsanalyse aus Tabelle 14 auf Seite 72 sind die Variationskoeffizienten bei der zweiten Untersuchung, wo ausschließlich Referenzgebiete mit Beschirmungsgraden über 75 % verwendet werden, kleiner. In der Klasse Nadel\_Alt kommt es dabei statistisch gesehen vor allem in den Infrarotkanälen zu den größten Veränderungen. Dies kommt aufgrund der großen Reflexionsunterschiede von dunklem Nadelwald und hell reflektierender Bodenvegetation zustande (vgl. Steinegger 2010: S. 58 – 63). Es ist erwähnenswert, dass bei dieser Vegetationsklasse fast 50 % weniger Referenzgebiete in die Kalkulationen eingehen (nur 46 statt 83, siehe Tabelle 15 auf Seite 75), und deshalb starke Änderungen hierbei auch zu erwarten sind.

Verglichen mit den anderen Waldklassen ändert sich die Steigung der Regressionsgeraden ebenfalls bei Nadelwäldern am meisten, wenn man die Referenzgebiete nach dem Beschirmungsgrad ausdünn. Da die gering beschirmten Testgebiete in dieser Arbeit hauptsächlich in Bereichen mit hoher Illumination angesiedelt sind, verringert sich, wie bereits in Kapitel 9.2.1 erwähnt, die Steigung der Geraden deutlich.

Laubwälder besitzen in den Infrarotkanälen höhere Steigungen, wobei sich die Steigungswerte auch merklich verändern, wenn die gering beschirmten Kulturen herausgenommen werden.

Die Regressionsanalysen, bei denen keine gering beschirmten Testgebiete verwendet werden, führen zu besseren und plausibleren Ergebnissen. Deshalb werden etwa beim Vergleich der verschiedenen topographischen Normalisierungsmethoden oder bei den nachfolgenden Schattenanalysen nur Referenzgebiete aus dicht bestockten Kulturen verwendet.

### ***9.3 Analysen unter Zuhilfenahme der Schattensimulationen***

Kapitel 9.3 beschäftigt sich mit der Analyse des Einflusses der Schattenanteile auf die Reflexion. Es werden diesbezüglich die Ergebnisse folgender Analysen präsentiert: Zusammenhang des Schattenanteils mit dem Beschirmungsgrad, der Reflexion von verschiedenen Waldtypen und in weiterer Folge mit der Illumination. Dabei wird abermals die Szene *i\_32\_35\_060722* für die Präsentation der Untersuchungen verwendet. Die Ergebnisse für die Schattenanteile hängen unter anderem von der Sonnenelevation zum Aufnahmezeitpunkt des Satellitenbildes ab, welche hier bei  $60,2^\circ$  liegt. Die Plots der restlichen Satellitenbilder sind Anhang B zu entnehmen.

#### **9.3.1 Beschirmung vs. Schattenanteil**

Die Abbildung 24 widmet sich der Gegenüberstellung von Schattenflächen und Beschirmungsgraden, wobei die Referenzgebiete wie gewohnt in Waldklassen gegliedert sind.

Aufgrund vorhergehender Analysen (vgl. Steinegger 2010: S. 58 – 63) wird erwartet, dass der Schattenanteil von Nadelwäldern bei einer Sonnenelevation von  $60^\circ$  bis zu einer Überschirmung von rund 50 % zunimmt, von 50 bis 60 % am höchsten ist und anschließend gegen Null geht. Dies hängt, wie bereits erwähnt, mit der Änderung der Verhältnisse von beschatteten und besonnten Kronen- bzw. Bodenflächen innerhalb der Waldgebiete zusammen. Grundsätzlich kann dieser Trend auch in Abbildung 24 festgestellt werden, wobei der Maximalbereich der Beschattung im Vergleich zu Steinegger etwas nach hinten verschoben ist und bei 60 – 70 % Beschirmung liegt. Bei geringer Beschirmung können aus Mangel an (repräsentativen) Referenzgebieten keine genauen Aussagen über das Verhalten der jeweiligen Waldklassen gemacht werden.



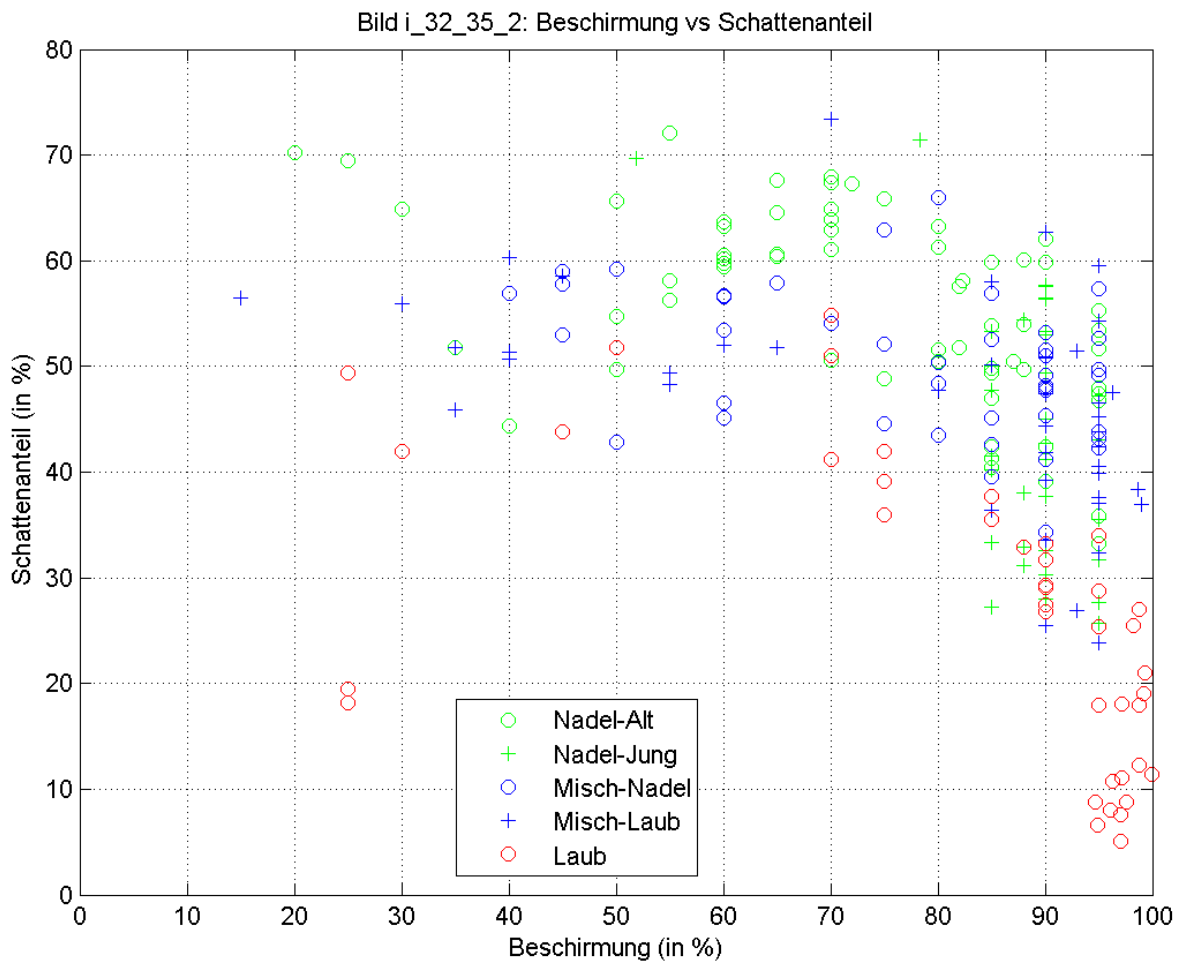


Abbildung 24: Bild i\_32\_35\_060722: Beschirmung vs. Schattenanteil nach Vegetationsklassen

Es wird ersichtlich, dass Nadelwälder unabhängig vom Beschirmungsgrad aufgrund der Rauigkeit ihres Kronendachs einen höheren Schattenanteil besitzen als Laubwälder.

Generell kann festgestellt werden, dass nur dicht bewaldete Laubgebiete mit lückenlosem Kronendach fast keine Schattenflächen besitzen (5 – 10 %). Bei 25 % Überschirmung befinden sich schon etwa 20 % Schatten innerhalb eines Laubwaldgebiets. Es ist allerdings anzumerken, dass für Beschirmungsgrade unter 50 % nur wenige Testgebiete existieren und somit die gewonnenen Erkenntnisse bezüglich des Verhaltens bei niedrigen Beschirmungsgraden nur eine geringe Aussagekraft besitzen. Der Schattenanteil steigt bei Laubwäldern auf bis zu 50 % an und fällt danach wieder stark ab.

Bei dichtem Bewuchs variieren die Schattenanteile von Laubwäldern stärker als die von Nadelwäldern. Sie können ein nahezu lückenloses Kronendach aufweisen, aber auch Schat-

tenanteile von 5 bis zu 35 % bei 95 % Beschirmung sind möglich. Solche hohen Werte werden bei Referenzgebieten mit sehr rauem Kronendach erreicht.

Bei Nadelwäldern befindet sich der Schattenanteil bei dichtem Bewuchs (~ 95 % CC) konkret zwischen 35 und 55 %. Die erreichten Maximalwerte liegen etwa bei 70 %, im Vergleich zu Steinegger also bei einer etwas höheren Beschirmung. Auf das Verhalten bei geringer Beschirmung kann beim Nadelwald aufgrund zu weniger Referenzgebiete nicht geschlossen werden. Es ist jedoch von einem Abfall des Schattenanteils auf null auszugehen.

Betrachtet man Abbildung 20 auf Seite 69, ist zu erkennen, dass der Verlauf des Schattenanteils nach Beschirmungsgrad den Verlauf der Grauwerte nach Beschirmungsgrad merklich beeinflusst. Schattenanteil und Grauwert verhalten sich in Abhängigkeit des Beschirmungsgrades in etwa umgekehrt proportional.

In Abbildung 25 werden die Referenzgebiete nach deren Lage in Bezug auf die Sonne klassifiziert. Die Referenzgebiete mit der Bezeichnung „Nord“ liegen auf Hängen, die der Sonne abgewandt sind, die „Süd“-Samples zeigen in Richtung Sonne, und „Ebenen“ sind Flächen mit geringer Inklination ( $< 10^\circ$ ).

Es kann gezeigt werden, dass Referenzgebiete auf sonnenzugewandten Hängen weniger Schatten aufweisen als auf West- oder Osthängen bzw. auf ebenen Flächen. Die „Nord“-Testgebiete weisen den höchsten Schattenanteil auf. Dies beweist, dass Inklination und Exposition einen großen Einfluss auf den Schattenanteil bei Wäldern in Satellitenbildern haben.

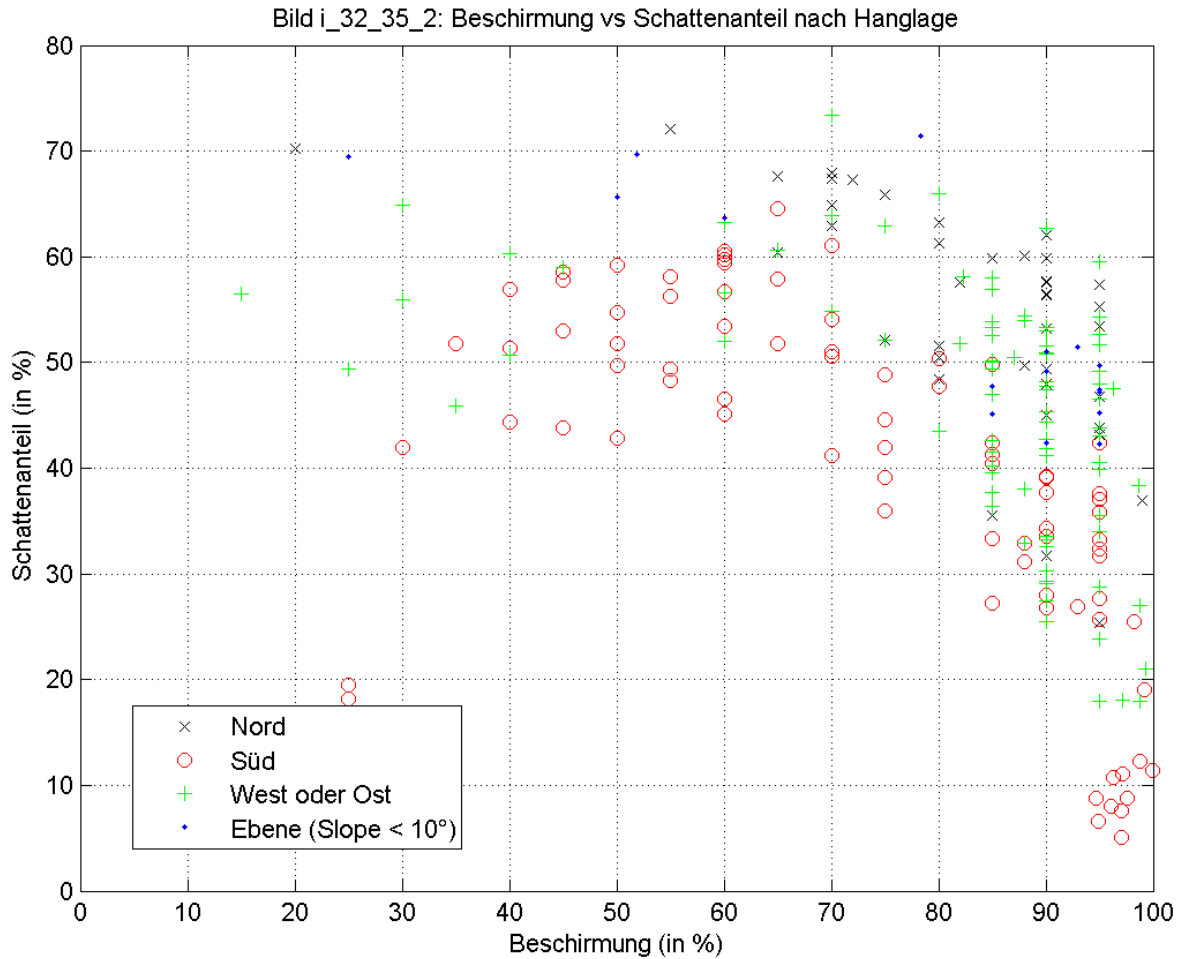


Abbildung 25: Bild i\_32\_35\_060722: Beschirmung vs. Schattenanteil nach Hanglage zur Sonne

Betrachtet man beide Plots gemeinsam, wird ersichtlich, dass bei nordexponierten Referenzgebieten vermehrt die Waldklasse Nadel\_Alt auftritt, und Laubwaldkulturen eher auf Südhängen eingezeichnet wurden.

Die Variation des Schattenanteils bei Referenzgebieten derselben Waldklasse und mit demselben Beschirmungsgrad hängt Großteils von der Exposition ab. Es können also Laubwaldgebiete auf Nordhängen einen höheren Schattenanteil als Nadelwälder besitzen, wenn diese südlich exponiert sind. Dies hängt mit der Sonneneinstrahlung, genauer gesagt mit der Illumination, zusammen. Der Einfluss der Illumination auf die Schattenanteile wird im Detail im folgenden Kapitel erläutert.

### 9.3.2 Reflexion der Waldtypen vs. Schattenanteil

In Bezug auf die Untersuchungen betreffend Grauwert und Schattenanteil sind Zusammenhänge in den sichtbaren Frequenzbändern nur schwer zu erkennen (siehe Abbildung 26 links). Im nahen Infrarotbereich ist jedoch klar ersichtlich, dass die Grauwertintensität der Waldklassen abnimmt, je höher der Schattenanteil im Testgebiet wird. Bei den Misch- und Nadelwäldern ist die Abnahme deutlich geringer als beim Laubwald. Das bedeutet, dass sich die generell hohe Lichtreflexion bei Laubwaldkulturen stärker von den vorhandenen Schattenflächen abschwächen lässt, als dies bei Nadelwald der Fall ist.

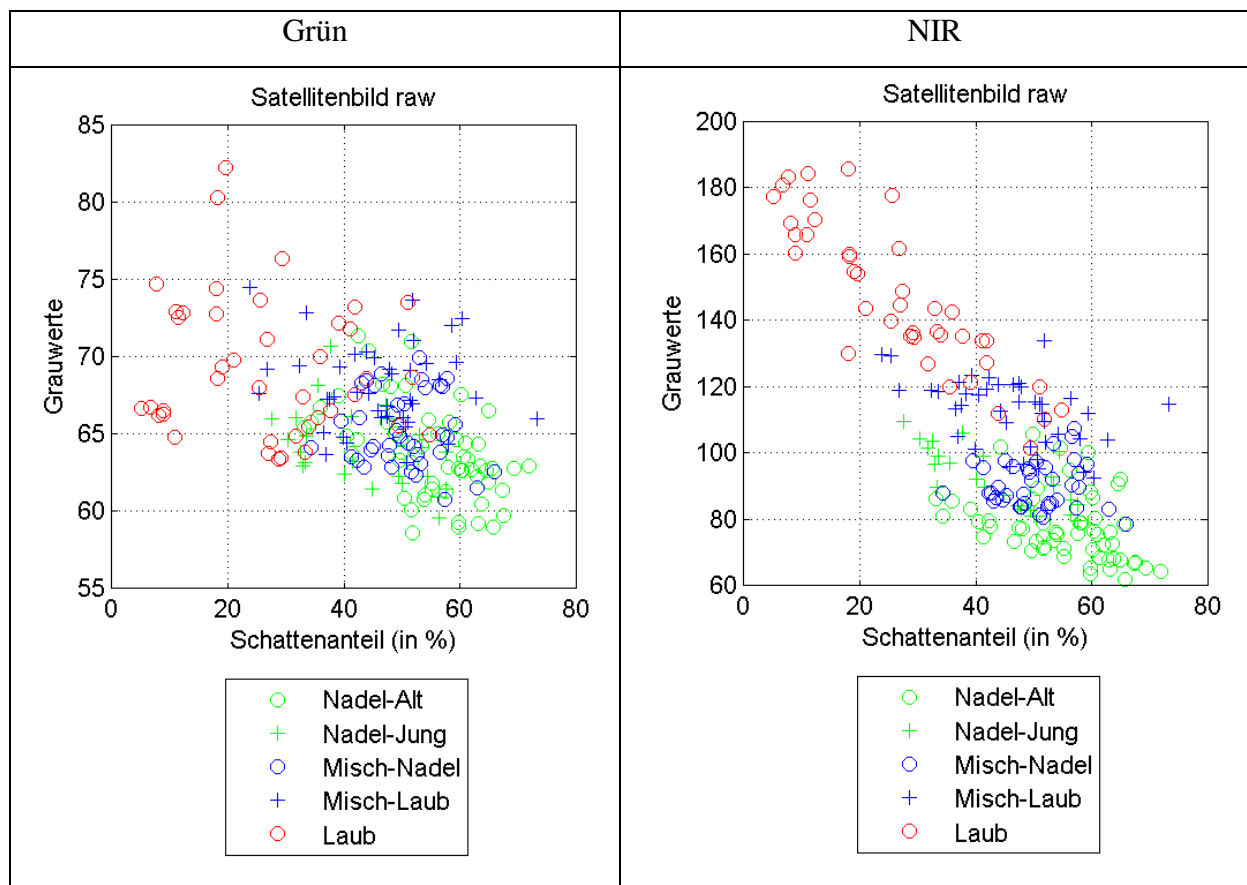


Abbildung 26: Bild i\_32\_35\_060722: Schattenanteil vs. Grauwert (NIR)

Da Schatten kaum Reflexion zulässt, ist der Grauwert einer reinen Schattenfläche in den verwendeten Satellitenbildern 0. Deshalb sind Schattenflächen Schwarz. Je mehr Schattenflächen innerhalb eines Referenzgebietes existieren, desto stärker ziehen diese die Reflexionseigenschaften nach unten und desto dunkler wird somit der Grauwert. Deshalb sind die gewonnen Erkenntnisse aus den dargestellten Analysen in Abbildung 26 plausibel.

Des Weiteren ist erkennbar, dass Nadelwälder generell einen höheren Schattenanteil als Laubwälder besitzen. Diese Tatsache ist neben den Unterschieden in der Blattreflexion ein Grund für die gute Trennbarkeit von Laub- und Nadelwald.

### **9.3.3 Illumination vs. Schattenanteil**

Durch die Analyse des Zusammenhangs zwischen Illumination und Schattenanteil wird versucht, Erkenntnisse zu gewinnen, die die vegetationsabhängig unterschiedlichen Steigungen der Regressionsgeraden erklären. Die Untersuchungen werden aufgrund der Erkenntnisse aus dem Kapitel 9.2 nur noch mit Referenzgebieten mit Beschirmungsgraden größer 75 % durchgeführt.

Betrachtet man Abbildung 27, erkennt man, dass in der Vegetationsklasse Nadel\_Alt der Schattenanteil bei Illumination 0.45 bei 65 % liegt. Ist der Sonneneinfallswinkel allerdings nahe 90° (hohe Illumination), wird von der Vegetation deutlich weniger Schatten erzeugt, und der Schattenanteil liegt bei unter 40 %. Beim Laubwald bewegt sich das erreichte Spektrum des Schattenanteils von 15 % bei sonnenzugewandten bis zu maximal 40 % Schatten bei sonnenabgewandt Berghängen. Beide Klassen besitzen dem zufolge dieselbe Dynamik.

Der allgemeine Effekt der Reduktion des Schattens mit Zunahme des Sonneneinfallswinkels wird in den anderen Waldklassen auch festgestellt.

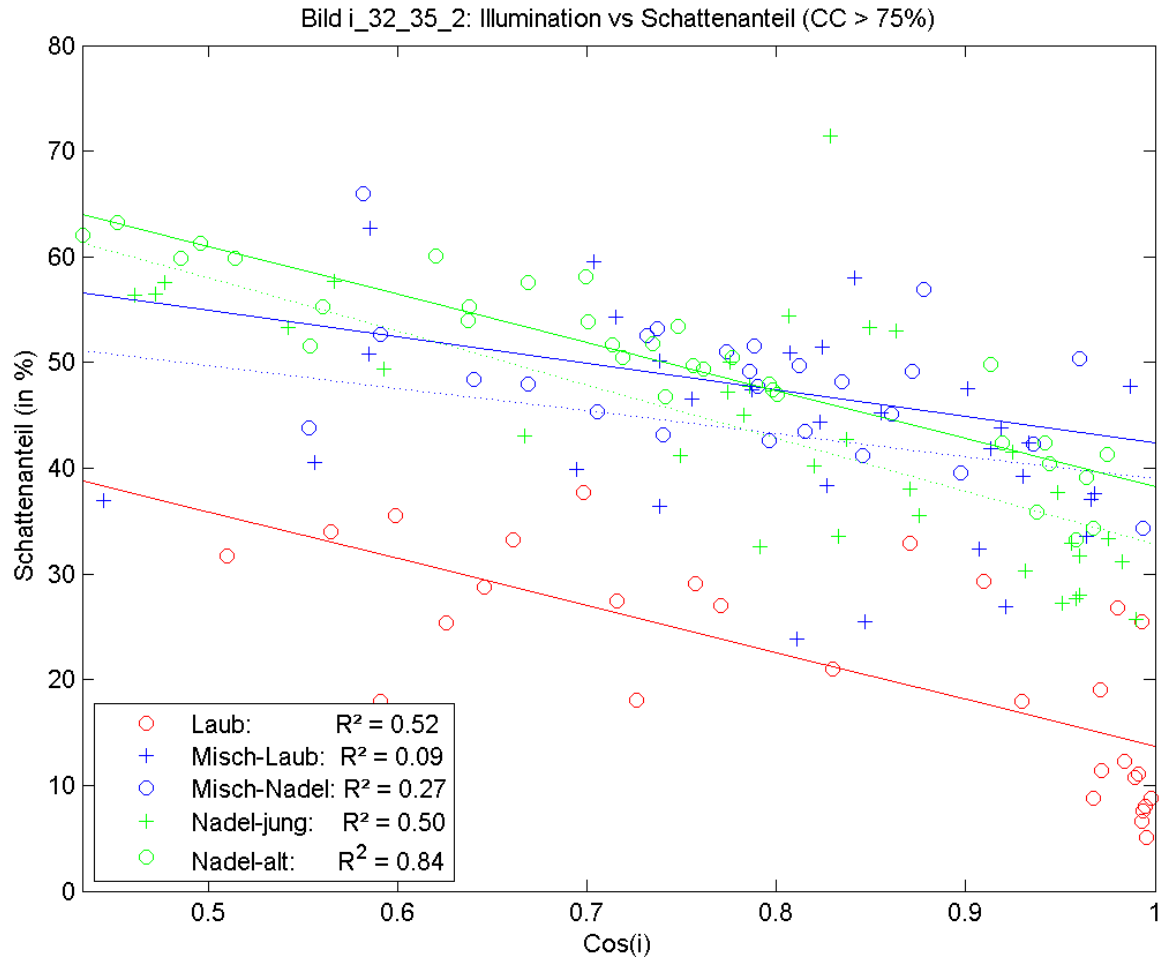


Abbildung 27: Bild i\_32\_35\_060722: Illumination vs. Schattenanteil bei 60° Sonnenelevation

Um den Trendverlauf besser ersichtlicher zu machen, werden lineare Regressionen an die Referenzgebiete der jeweiligen Waldklassen durchgeführt. Die Regressionsgeraden von Laub-Mischwald und junger Nadelwald sind, um nicht mit den gleichfärbigen Linien der anderen Klassen verwechselt zu werden, punktiert dargestellt. Die statistischen Werte dazu sind in Tabelle 17 zu finden.

Tabelle 17: Bild i\_32\_35\_060722: Statistische Wert zur linearen Regression bezüglich Schatten und Illumination

Klasse	Nadel_jung	Nadel_alt	Laub	Misch_Laub	Misch_Nadel
Steigung	-50.41	-45.47	-44.34	-21.49	-25.08
Variationskoeffizient	0.266	0.163	0.486	0.223	0.133

Entgegen den Erwartungen besitzen die Regressionsgeraden für Laub und altem Nadelwald nahezu dieselben Steigungen. Das bedeutet, dass die stärkere Abhängigkeit der Klasse Laub

von der Topographie, wie in Kapitel 9.2 veranschaulicht, nicht vom Verlauf des Schattens abhängt.

Auffällig ist allerdings der hohe Wert für den Variationskoeffizienten bei der Klasse Laub. Es ist bereits in Abbildung 27 zu erkennen, dass vor allem bei den Gebieten mit hoher Illumination eine starke Streuung aufgrund der großen Variabilität des Erscheinungsbildes von Laubwäldern auftritt. Die Referenzgebiete schwanken zwischen 5 und 25 % Schatten. Da diese im Randbereich des Illuminationsverlaufs liegt, wirken sich Ungenauigkeiten bei der Erfassung oder zeitliche Veränderungen innerhalb der Referenzgebiete, die den Schattenanteil beeinflussen, direkt auf die Steigung der Regressionsgeraden aus.

Deutlicher zeigt diese Auffälligkeit Abbildung 28 für die Szene i\_32\_35\_050422. Hier ist die Sonnenelevation mit  $53.3^\circ$  geringer als im vorigen Bild und die Streuung der Grauwerte von Laubwäldern mit hoher Illumination deshalb noch höher.

Ferner führt eine tiefer stehende Sonne dazu, dass der Illuminationsbereich größer wird. Das zeigt das Untersuchungsergebnis in Abbildung 28, wobei hier Illuminationsminima von fast 0.3 erreicht werden (X-Achse).

Die Schattenmittelwerte der jeweiligen Klassen sind im Vergleich zu Abbildung 27, wo eine Sonnenelevation von  $60.2^\circ$  vorliegt, höher. Der Bereich des Schattenanteils liegt beim alten Nadelwald bei 45 bis 75 %, nimmt also um 10 % zu. Die Laubwälder erzielen in Abbildung 28 Schattenmaxima von 55 %. Die gepunkteten Regressionsgeraden gehören zu den Waldklassen Laub-Mischwald und junger Nadelwald.

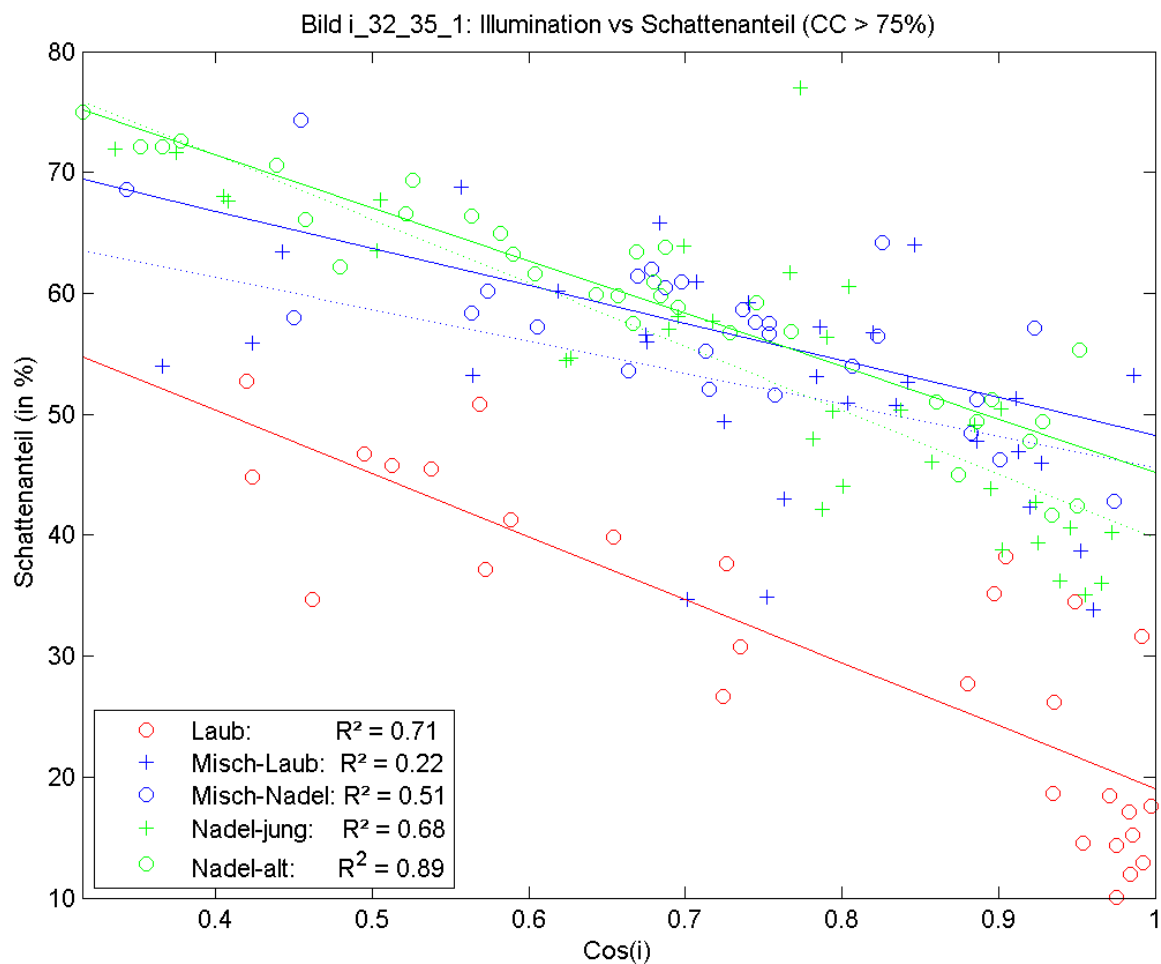


Abbildung 28: Bild i\_32\_35\_050422: Illumination vs. Schattenanteil bei  $53^\circ$  Sonnenelevation

Die gewonnenen Erkenntnisse erklären allerdings nicht wie erwartet, warum die Regressionsgeraden der Waldklassen aus Kapitel 9.2 verschiedene Steigungen aufweisen. Da die Abnahme des Schattenanteils bei zunehmender Illumination beim Laubwald ähnlich wie beim Nadelwald verläuft, sind diese Analysen keine Begründung für die steileren Regressionsgeraden bei Waldklassen mit höherem Laubholzanteil in Abbildung 23 auf Seite 76.



## 9.4 Evaluierung der verschiedenen, topographischen Normalisierungen

In Kapitel 9.4 werden die Ergebnisse der zuvor beschriebenen, unterschiedlichen Normalisierungsmethoden visualisiert und diskutiert. Die Abbildung 29 bis Abbildung 32 zeigen das Satellitenbild i\_32\_35\_060722 und die erhaltenen Ergebnisszenen nach der jeweiligen Reliefkorrektur in Impact und ERDAS in der Kanalkombination NIR, Rot und Grün (3, 2, 1).

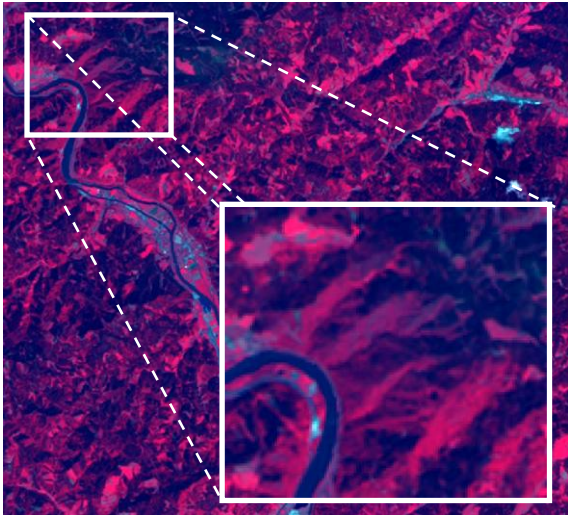


Abbildung 29: Satellitenbild i\_32\_35\_060722

Im vergrößerten Bildausschnitt in Abbildung 29 ist die Topographie des Geländes aufgrund des Licht-Schatten-Wechsels gut zu erkennen. Die nordwestlichen Gebirgsflanken liegen zum Teil völlig im Schatten und sind deshalb schwarz.

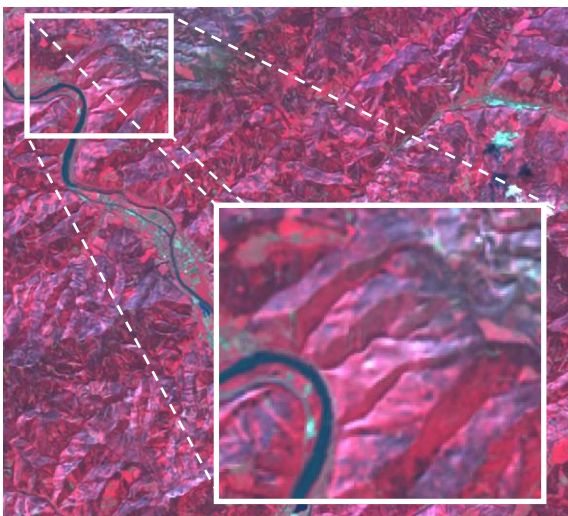
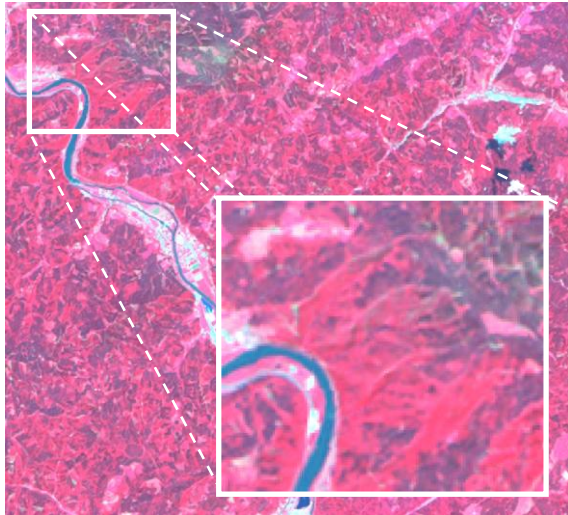


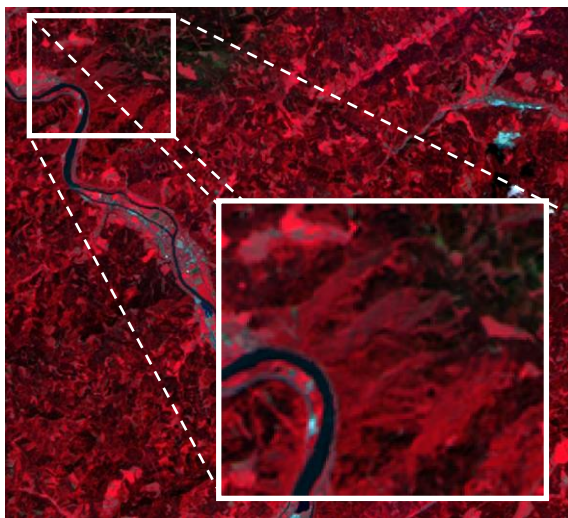
Abbildung 30: Topographische Normalisierung mit Default-Werten für die Minnaert-Konstanten in Erdas (Kosinus-Methode)

Nach der topographischen Normalisierung des Satellitenbildes mit Hilfe der Kosinus-Methode, also mit den Defaultwert 1 für die Minnaert-Konstanten der vier Frequenzkanäle in ERDAS, sieht die Satellitenszene aus wie in Abbildung 30. Die durchgeführte Korrektur führt zu keiner Verebnung des Geländes. Das starke Relief ist weiterhin sichtbar. Die dunklen Schattenbereiche aus dem Ausgangsbild werden überkorrigiert und sind deshalb stark aufgehellt. Dies vermittelt den Eindruck, als würde die Sonne im Nordwesten liegen und die Erdoberfläche von dort beleuchten.



**Abbildung 31: Topographische Normalisierung mit editierten Werten für die Minnaert-Konstanten in Erdas (Mikkola)**

Werden bei der topographischen Normalisierung in ERDAS allerdings die zuvor erwähnten Werte von Mikkola für die Minnaert-Konstanten verwendet, dämpfen diese die Kosinus-Korrektur, sodass ein ansprechendes Ergebnis zustande kommt. In Abbildung 31 erkennt man, dass der durch das Relief erzeugte Licht-Schatten-Wechsel erfolgreich eliminiert werden konnte.



**Abbildung 32: Topographische Normalisierung in Impact**

In Abbildung 32 ist das Ergebnis der topographischen Normalisierung mit dem vom Joanneum Research entwickelten Programm Impact und Skalierungsfaktor 0.9 zu sehen. Auch hier ist die Korrektur der topographischen Effekte zufriedenstellend, und es ist praktisch kein Relief mehr im Bild zu erkennen.

Um die Qualität der Korrekturen zu testen, werden die topographisch normalisierten Satellitenbildszenen mit Hilfe der Diagramme betreffend der linearen Regression von Grauwerten und Illuminationen miteinander verglichen (vgl. Kapitel 9.2). Nach der Reliefkorrektur sollten die Grauwerte keine Abhängigkeit mehr von der Illumination aufweisen, da diese nun überall im Bild gleich sein müssten. Erwartet werden also Regressionsgeraden mit möglichst geringen Steigungen und Bestimmtheitsmaßen um 0.

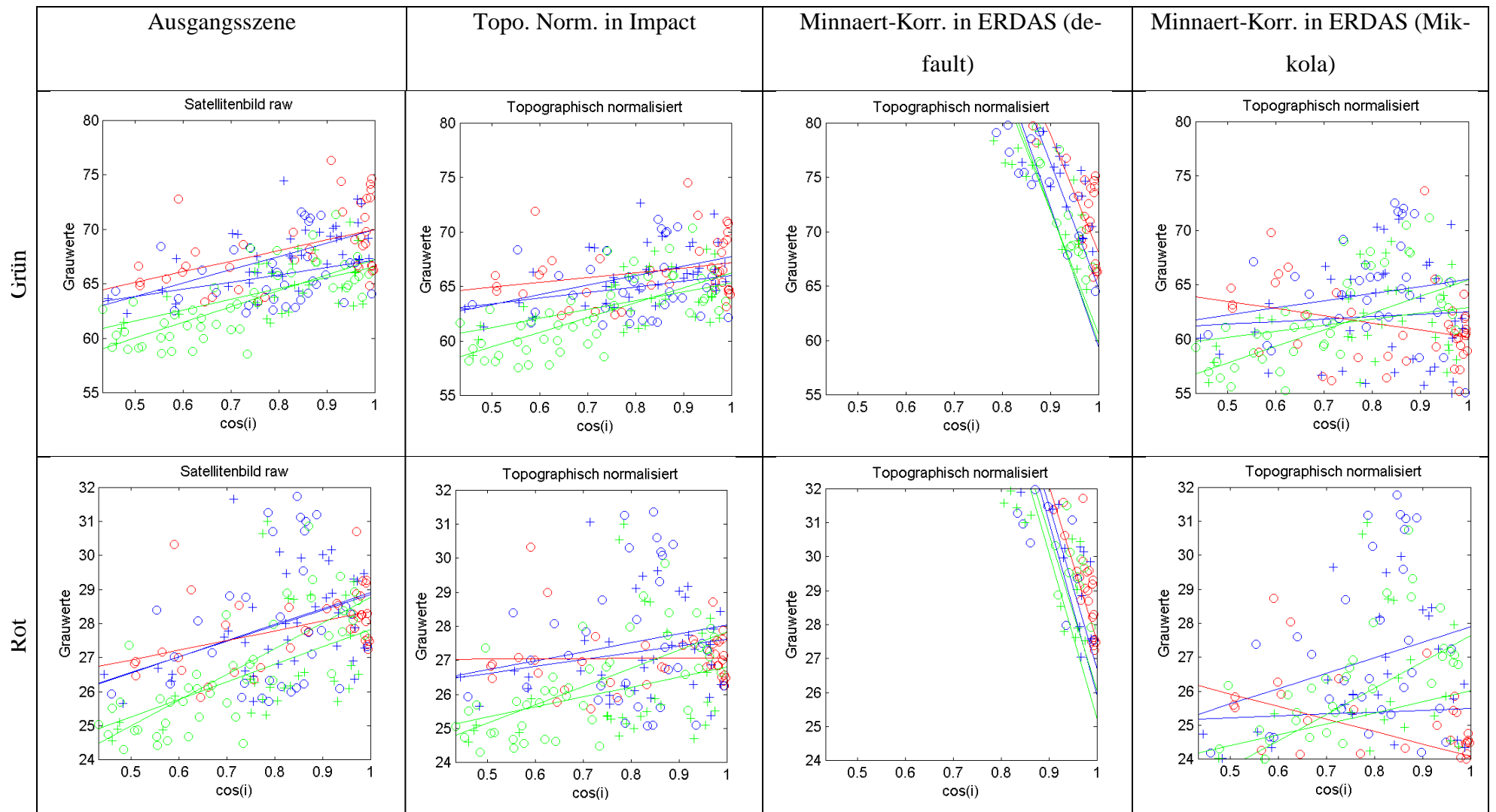


Abbildung 33: Bild i\_32\_35\_060722: Vergleich der topographischen Normalisierungen mit Impact, ERDAS mit Defaultwerten und ERDAS mit editierten Werten für die Minnaert-Konstanten (Frequenzbänder Grün(1) und Rot(2))

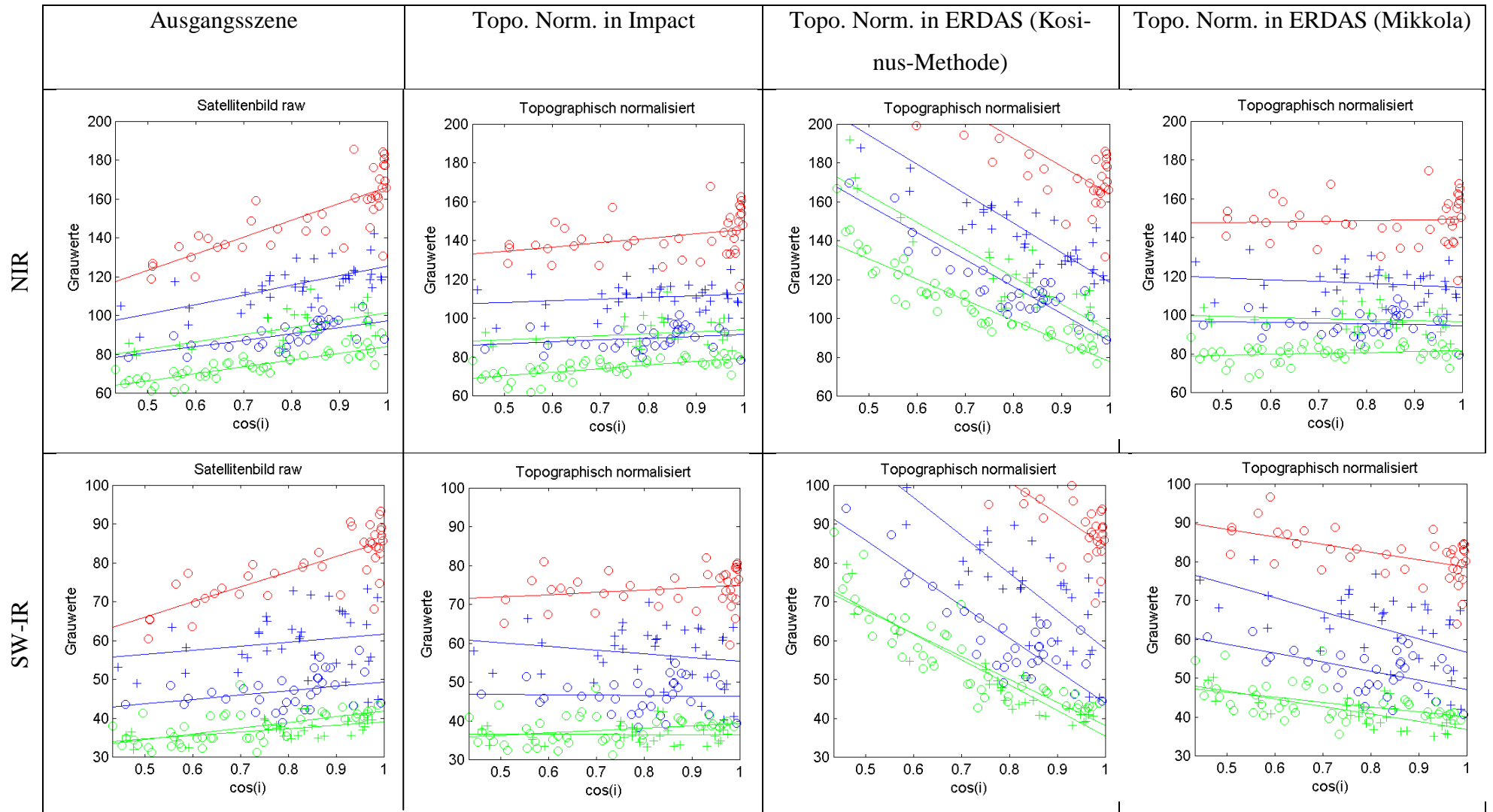


Abbildung 34: Bild i\_32\_35\_060722: Vergleich der topographischen Normalisierungen mit Impact, Erdas mit Defaultwerten und Erdas mit editierten Werten für die Minnaert-Konstanten ( Frequenzbänder NIR(3) und SWIR(4))

Bei der Minnaert-Methode in ERDAS mit dem Default-Wert 1 für die Minnaert-Konstanten der vier Frequenzkanäle (Kosinus-Methode) entstehen Regressionsgeraden mit sehr hoher negativer Steigung. Das weist auf eine enorme Überkorrektur der Topographie hin. Diese Methode führt folglich zu keinem guten Ergebnis. Das beweisen auch Studien von anderen Autoren (Smith et al. 1980, Meyer et al. 1993, Herold et al. 2000).

Das Ergebnis, welches mit den editierten Werten für die Minnaert-Konstanten in ERDAS erzielt werden konnte, kann als gelungen bezeichnet werden, was auch die statistischen Parameter für die linearen Regressionen beweisen (siehe Tabelle 18).

Lediglich im vierten Kanal kommt es zu einer Überkorrektur, da die Minnaert-Konstante von Mikkola hierfür offensichtlich zu hoch ist. Sie sollte im vierten Kanal also für künftige Reliefkorrekturen in dieser Region herabgesetzt werden, da dieser Effekt in allen untersuchten Satellitenbildern auftritt.

Vergleichbare Ergebnisse werden mit den Konstanten von Mikkola auch bei den anderen Satellitenbildern erzielt. Die Minnaert-Korrekturen sind stets gelungen, tendieren allerdings in den Infrarotkanälen zur Überkorrektur (siehe Anhang C).

Die generelle Überkorrektur ist zu erklären, da die Minnaert-Konstanten wie bereits erwähnt von der Landbedeckung abhängen, von Mikkola für ein anderes Untersuchungsgebiet optimiert wurden und somit nicht perfekt zu den in dieser Arbeit verwendeten Datensätzen passen.

**Tabelle 18: Vergleich der statistischen Qualitätswerte bei der linearen Regression für die zwei verschiedenen Arten der topo. Normalisierung**

R <sup>2</sup>	Impact			ERDAS (Mikkola)		
	Laub	Misch_Na	Nadel_alt	Laub	Misch_Na	Nadel_alt
Band 1	0.073	0.054	0.511	0.092	0.035	0.304
Band 2	0.000	0.034	0.458	0.210	0.055	0.399
Band 3	0.114	0.056	0.402	0.002	0.007	0.037
Band 4	0.043	0.001	0.091	0.305	0.292	0.225
k						
Band 1	4.50	5.16	13.62	-6.62	6.56	15.31
Band 2	0.07	2.65	5.35	-3.69	4.55	7.76
Band 3	22.22	9.78	18.18	3.21	-3.85	5.11
Band 4	5.85	-1.12	6.11	-19.69	-23.37	-12.51
CV						
Band 1	0.043	0.047	0.052	0.061	0.075	0.077
Band 2	0.032	0.072	0.051	0.056	0.099	0.082
Band 3	0.079	0.063	0.066	0.078	0.067	0.056
Band 4	0.065	0.091	0.092	0.074	0.113	0.103

Nach dem Vergleich der statistischen Werte für die topographischen Normalisierungen (siehe Tabelle 18, wobei die farbigen Werte im Vergleich besser abschneiden) wird ersichtlich, dass die Self-Calibrating-Topographic-Normalization von Impact am besten abschneidet. Bezüglich Steigung der Regressionsgeraden und Variationskoeffizient fällt das Ergebnis in den angeführten Waldklassen klar aus. Bei den Bestimmtheitsmaßen schneidet Impact vor allem bei den von Laub dominierten Klassen besser ab. Die zuvor erwähnte Überkorrektur im Band 4 bei der Minnaert-Methode mit den Konstanten von Mikkola in ERDAS wird in Tabelle 18 durch die deutlich erhöhten Zahlenwerte in den jeweiligen Zeilen belegt. Dennoch erzielt diese Beleuchtungskorrektur durchaus zufriedenstellende Ergebnisse. Es muss allerdings erwähnt werden, dass der Bearbeiter dabei gute Vorkenntnisse bei der Wahl der Minnaert-Konstanten benötigt. Erst nach einigen Versuchen mit veränderten Konstanten, manuellen Regressionsanalysen zur Berechnung dieser oder mit Hilfe von bereits bestehenden Referenzen können passende Parameter für das Untersuchungsgebiet gefunden und ein ansprechendes Ergebnis erzielt werden. Da bei dieser Methode nicht auf die unterschiedliche Landbedeckung im Satellitenbild Rücksicht genommen und quasi verallgemeinert nur von einer Landbedeckungsklasse ausgegangen wird, besteht die Gefahr, dass für gewisse Bereiche keine ideale Korrektur erreicht werden kann.

Im Gegensatz dazu arbeitet die Self-Calibrating-Topographic-Normalization von Impact vollautomatisch, landbedeckungsbezogen, und man erhält gleich beim ersten Versuch eine sehr gute Beleuchtungskorrektur. Dies wird von den gewählten Vergleichsparametern belegt. Probleme sind nur in der Klasse Nadel\_Alt und im NIR-Kanal ersichtlich, wo der Einfluss des Reliefs nicht ganz entfernt werden konnte.

## **10 Ansatz zur Weiterentwicklung des Self-Calibrating-Topographic-Normalization Tools**

Ausgehend von der zuvor überprüften Hypothese, dass der Verlauf der Grauwerte der Pixel in Abhängigkeit der Illumination in einem Satellitenbild je nach Vegetationsklasse durch Regressionsgeraden beschrieben werden kann, wird versucht, eine mögliche Weiterentwicklung bzw. Vereinfachung der vom Joanneum Research entwickelten, topographischen Normalisierungsmethode zu thematisieren. (vgl. Kapitel 3.7)

Diese berücksichtigt bei der Durchführung automatisch, also ohne den Vorverarbeitungsschritt der unüberwachten Klassifizierung, die verschiedenen im Bild vorkommenden Vegetationsklassen und ermittelt die dafür am besten geeigneten Minnaert-Konstanten.

Generell ist es das Ziel vor jeder topographischen Normalisierung, den linearen Zusammenhang zwischen der Reflexion von Vegetation und der Illumination zu eliminieren. Im Nachhinein sollten also, wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln erwähnt, keine Illuminationsunterschiede im Bild mehr enthalten sein und sich die Grauwerte der Vegetationsklasse auf einem einheitlichen Illuminations-Niveau (bei Illumination gleich 1 in der Ausgangsszene) befinden. Wären die Regressionsgeraden einmal bekannt, könnte ausgehend von diesen der reliefkorrigierte Grauwert eines jeden Pixels berechnet werden.

## 10.1 Ansatz

Es besteht die Annahme, dass es je nach Vegetationsklasse für eine bestimmte Illumination idealerweise einen korrespondierenden Grauwert geben muss. Dieser Grauwert kann nach erfolgter Regression, die je Waldtyp auf den zwei Extremwerten bei geringer und hoher Illumination beruht, automatisch aus dem Scattergramm interpoliert werden.

Bei den erwähnten Klassen handelt es sich um keine realen Vegetations- oder Altersklassen, sondern vielmehr um eine Menge an Bildpunkten mit demselben Verhalten bezüglich des Grauwertverlaufs bei steigender Illumination. Folglich ist keine Vorabinformation über eine Klassenzugehörigkeit der Pixel wie bei der Self-Calibrating-Topographic-Normalization Methode notwendig.

Aus der Differenz zum gewünschten Sollwert nach der topographischen Normalisierung kann ein Korrekturwert für den ursprünglichen Grauwert des Pixels eruiert werden. Dieser Sollwert entspricht dem Grauwert bei Illumination gleich eins, also bei orthogonalem Lichteinfall.

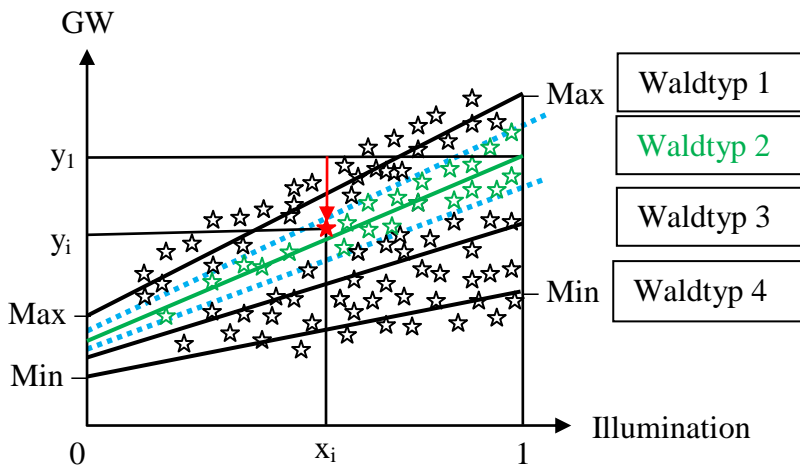


Abbildung 35: Lineare Regressionsfunktionen bei Vegetationspixeln in einem Satellitenbild

Abbildung 35 stellt das zuvor beschriebene Prozedere für ein Waldgebiet graphisch dar. Auf der x-Achse ist die Illumination und auf der y-Achse der Grauwert aufgetragen. Die Sterne stellen die Grauwerte der Bildpunkte eines Satellitenbildes in Abhängigkeit von der Illumination dar. Mit „Min“ und „Max“ sind die Extremwertbereiche jeweils bei geringer und hoher Illumination für die linearen Regressionen beschriftet.



Bei geringer Illumination sind die Wälder schwächer beleuchtet und die Pixel deshalb dunkler. Bei Illumination  $x_i$  besitzt der Bildpunkt im betrachteten Satellitenbild den Grauwert  $y_i$  und wird dem Waldtyp 2 zugeordnet. Die blau gestrichelten Linien sollen die Grenzen der fiktiven Waldklasse symbolisieren, innerhalb welcher Pixel als Waldtyp 2 identifiziert werden.

Da nach der Reliefkorrektur alle Bildpunkte einer Klasse denselben Grauwert wie bei Illumination gleich eins vor der topographischen Normalisierung haben sollen (Linie bei  $y_1$  ist Sollwert der Klasse Waldtyp 2), ergibt sich aus  $y_1 - y_i$  der Korrekturwert für einen Bildpunkt im Illuminationsbereich  $x_i$ , dargestellt durch den roten Pfeil.

## **10.2 Ablauf**

Beim geplanten Algorithmus für die Beleuchtungskorrektur wird in einem ersten Vorverarbeitungsschritt die Anzahl der linearen Regressionen im Grauwert-Illuminations-Scattergramm definiert. Diese werden auf das gesamte Grauwertspektrum verteilt und beschreiben somit die fiktiven Klassen, die innerhalb einer Satellitenszene die gesamte Vegetation abdecken.

Die vom Gelände verursachten, unterschiedlichen Beleuchtungsverhältnisse im Satellitenbild (Illumination) werden mit Hilfe eines digitalen Geländemodells und den Daten des Sonnenstandes zum Aufnahmezeitpunkt des Satellitenbildes berechnet. Anschließend werden die zuvor definierten Regressionsanalysen bezüglich Grauwert und Illumination anhand der Bildpunkte im Scattergramm durchgeführt. Die Regressionsgeraden, die den Einfluss der Topographie in den jeweiligen Objektklassen widerspiegeln, werden mit Hilfe ihrer Anfangs- und Endpunkte (gleichzusetzen mit den zuvor erwähnten Extremwerten) gespeichert. Danach werden die Bildpunkte den Regressionsgeraden zugeordnet, denen sie am nächsten sind.

Für die Beleuchtungskorrektur werden nun die entsprechend dem Illuminationsverlauf mehr oder weniger durch Schatten beeinflussten Grauwerte der Pixel einer fiktiven Klasse soweit angehoben, dass die Regressionsgerade nach der Korrektur eine waagrechte Position erreicht. Die Steigung der Regressionsgeraden wird also 0 und die Objektklasse somit auf ein einheitliches Grauwerteniveau angehoben.

Es wird für jede Klasse eine Nulllinie definiert, die parallel zur X-Achse und durch den Endpunkt der jeweiligen Regressionsgeraden (Grauwert bei Illumination gleich 1) verläuft. Diese gilt in weiterer Folge als Bezugslinie für die Anhebung der Grauwerte der Pixel, wobei der Abstand des Grauwerts zu dieser horizontalen Bezugslinie der gesuchte Korrekturwert ist.

Dem von reliefbedingten Verdunkelungseffekten beeinflussten Grauwert wird schlussendlich dieser Korrekturwerte addiert und der Bildpunkt somit aufgehellt.

### ***10.3 Gemeinsamer Schnittpunkt***

Die Ergebnisse der in Kapitel 9.2 durchgeführten Untersuchungen führen zur Hypothese, dass die Regressionsgeraden der verschiedenen Vegetationsklassen in einem Satellitenbild einen gemeinsamen Schnittpunkt besitzen. Dieser wäre somit der Anfangspunkt für alle klassenspezifischen Regressionsgeraden im Scattergramm. Im Falle der Existenz eines gemeinsamen Schnittpunkts sind auch neue Erkenntnisse in Bezug auf die zuvor beschriebene Weiterentwicklung des topographischen Normalisierungsansatzes anhand der Regressionsanalysen zu erwarten.

Um die Hypothese zu überprüfen, werden die Geraden in den negativen Wertebereich verlängert und in Abbildung 36 visualisiert. Es werden wiederum die Szene i\_32\_35\_060722 im nahen Infrarotkanal dargestellt und nur Referenzgebiete verwendet, die einen Beschirmungsgrad von mehr als 75 % aufweisen, da aufgrund von ungleicher Anzahl an gering beschirmten Referenzgebieten in den verschiedenen Waldklassen ab dieser Überschirmung die besten Ergebnisse erwartet werden.

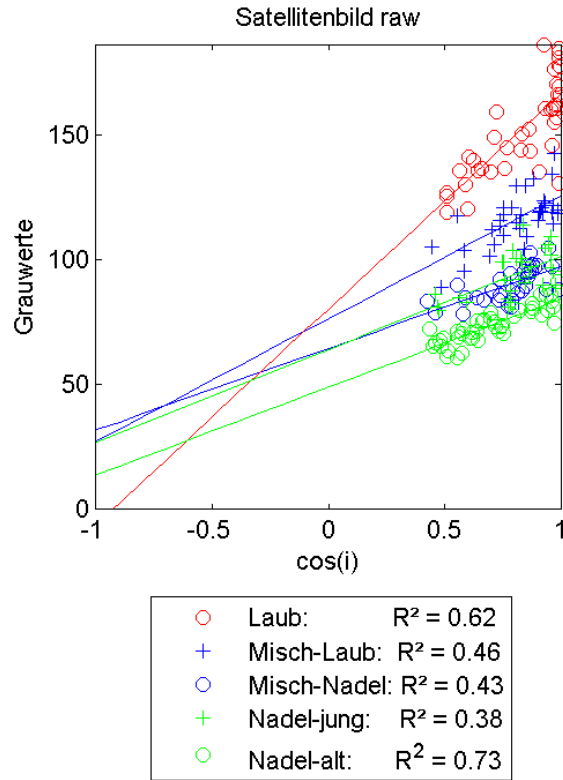


Abbildung 36: Bild i\_32\_35\_060722: Gemeinsamer Schnittpunkt bei linearer Regression (NIR)

In Abbildung 36 kann kein gemeinsamer Schnittpunkt festgesellt werden. Es ist teilweise der Fall, dass die Steigungen der Geraden in diesem Band zunehmen, je heller die Grauwerte der Vegetationsklassen sind, die die linearen Regressionen beschreiben.

Nach der Analyse aller Satellitenbildszenen in allen Grauwertkanälen wird ebenfalls kein allgemeines Auftreten eines gemeinsamen Schnittpunktes festgestellt. Die Orte, an denen sich die ansteigenden Geraden schneiden, sind verschieden, und in den meisten Frequenzbändern sind diese nahezu parallel oder gehen auseinander (sichtbarer Spektralbereich).

In den Infrarot-Kanälen besitzen die Regressionsgeraden der Laubwälder in allen dargestellten Satellitenbildern signifikant höhere Steigungen als die der anderen Vegetationsklassen, die wiederum eher parallel sind. Die Gerade der Klasse Laubwald verursacht somit mehrere Schnittpunkte, es entsteht jedoch kein, einheitlicher Schnittpunkt.

Nur im nahen Infrarot-Bereich kreuzen sich alle fünf Regressionslinien. Die Position der Schnittpunkte variiert, wobei die Regressionsgerade der Klasse Laub die übrigen Geraden stets deutlich früher (etwa im Bereich von Illumination 0) schneidet.

Abschließend muss erwähnt werden, dass die erhaltenen Ergebnisse der Untersuchung des gemeinsamen Schnittpunkts hauptsächlich von den Referenzgebieten abhängen und deshalb von hypothetischer Natur sind. Mit den Testgebieten wird eine vereinfachte Darstellung einer Vegetationsklasse erreicht. Würden bei der Auswahl der Referenzgebiete keine Fehler gemacht, und diese Referenzgebiete somit eine Vegetationsklasse perfekt beschreiben, wäre das Auftreten eines gemeinsamen Schnittpunkts denkbar. Dafür müssten für eine Vegetationsklasse jedoch alle Facetten ihres Auftretens gänzlich abgedeckt werden. Diese wären Baumalter, vertikale Struktur, Dichte der Benadelung, Beschirmungsgrad, Gesundheitszustand, Feuchtigkeitsgehalt der Blätter usw. Das ist jedoch anhand von Referenzgebieten nicht möglich, da bei Vereinfachungen stets Ungenauigkeiten auftreten.

Für den erwähnten neuen Ansatz für die Topographische Normalisierung (siehe Kapitel 10.1) ist die Existenz eines gemeinsamen Schnittpunkts bei waldklassenspezifischen Regressionsgeraden jedoch nicht unbedingt notwendig, da dieser nicht auf vorher definierten Vegetationsklassen beruht. Die Regressionsgeraden basieren nur auf der Lage der Pixel im Grauwert-Illuminations-Scattergramm. Ihre Anfangspunkte werden nicht anhand von Schnittpunkten sondern über die Grauwerte mit den geringsten Illuminationen definiert.

## 11 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Masterarbeit wird der Einfluss der Topographie auf die Reflexion von Waldbeständen in sechs IRS- und vier Landsat-Satellitenbildern untersucht. Sämtliche Analysen basieren auf fünf ausgewählte Waldklassen (Laubwald, Laub-Mischwald, Nadel-Mischwald, junger Nadelwald und alter Nadelwald), die anhand von selbstdefinierten Referenzgebieten beschrieben werden. Das Verhalten der Grauwerte der Satellitenbilder in Abhängigkeit von den lokalen Beleuchtungsverhältnissen, die durch die Illumination beschrieben werden, ist linear, wird für jeden Waldtyp anhand von Regressionsgeraden verdeutlicht und auf statistische Regressionsparameter wie Bestimmtheitsmaße und Variationskoeffizienten gestützt.

Es wird bewiesen, dass die Grauwerte der fünf Waldklassen verschieden stark auf den vom Relief hervorgerufenen unterschiedlichen Beleuchtungseinfluss reagieren. Die Reflexion von Laubwäldern wird stärker als Misch- und Nadelwälder von Verdunkelungseffekten durch die Topographie beeinflusst. Bei Mischwald ist festzustellen, dass je höher der Laubwaldanteil in den Baumbeständen ist, desto stärker wirken sich Beleuchtungsunterschiede auf die Grauwerte aus.

Des Weiteren hat der Beschirmungsgrad Einfluss auf die Reflexion von Waldbeständen. Hierfür verantwortlich sind die verschieden hohen Anteile an durchscheinender Bodenvegetation, nicht mit Vegetation bedeckten Boden, Schattenflächen (beschatteter Boden bzw. beschattete Baumkrone) und beleuchteten Baumkronen innerhalb des Bestandes. Aus den diesbezüglich durchgeführten Analysen geht hervor, dass der Einfluss des Beschirmungsgrades auf die Grauwerte in allen untersuchten Waldklassen den gleichen typischen Verlauf besitzt. Ausgehend von einem dichten Bestand (Schlussgrad 100 %) nimmt die Grauwertintensität bis zu einer Beschirmung von 70 – 75 % ab. Eine weitere Abnahme der Beschirmung bewirkt das Gegenteil, also ein Ansteigen der Grauwerte. Da Waldbestände erst ab einem Beschirmungsgrad von 75 % nicht mehr von der Bodenvegetation beeinflusst sind, werden die Grauwert-Illuminations-Analysen nur noch mit Referenzgebieten durchgeführt, deren Beschirmungsgrad über diesem Schwellwert liegt.

Anhand von Schattenmasken, die aus LIDAR-Daten generiert wurden, wird versucht, die erhaltenen Ergebnisse aus den angesprochenen Untersuchungen, die die Reflexion betreffen, zu interpretieren. Es kann gezeigt werden, dass das angesprochene Verhalten der Grauwerte bei sich ändernder Beschirmung Großteils mit den verschieden hohen Schattenanteilen bei

unterschiedlicher Beschirmung zusammenhängt. Der Verlauf der Grauwerte in Abhängigkeit des Beschirmungsgrades ist umgekehrt proportional zum Verlauf der Schattenanteile in Abhängigkeit der Beschirmung.

Allerdings kann nicht, wie zuvor angenommen, nachgewiesen werden, dass der Effekt der unterschiedlich starken Reaktion der Waldklassen auf die Beleuchtungsverhältnisse explizit durch unterschiedlich starke Beschattung her rührt. Stattdessen wird ersichtlich, dass die Zunahme des simulierten Schattenanteils in den Referenzgebieten bei abnehmender Illumination für Laub- und Nadelwald annähernd gleich verläuft. Bei Nadelwäldern ist der Schattenanteil jedoch generell höher als bei Laubbeständen.

Abschließend wird versucht, den Einfluss des Reliefs auf die Reflexion durch verschiedene Arten der topographischen Normalisierung zu eliminieren. Das Self-Calibrating-Topographic-Normalization-Tool, welches vom Joanneum Research entwickelt wurde, erzielt diesbezüglich die besten Ergebnisse, da der Topographieeinfluss in jeder Vegetationsklasse individuell korrigiert wird. Zufriedenstellend schneidet auch die in ERDAS Imagine implementierte Minnaert-Korrektur bei Verwendung von vegetationsspezifisch passenden Werten für die Minnaert-Konstanten ab. Die Kosinus-Methode führt im Gegensatz dazu zu einer sehr starken Überkorrektur der Topographie und ist deshalb nicht zielführend.

Generell ist anzumerken, dass sämtliche Analysen eine sehr starke Abhängigkeit von der Güte der Referenzgebiete aufweisen. Zwar wurde für das Einzeichnen der Testgebiete eine Menge Zeit aufgewendet, dennoch kann aufgrund der Abstimmungsprobleme bei der Zusammenführung der vielen unterschiedlichen Basisdaten trotzdem nicht zweifelsfrei davon ausgegangen werden, dass die generierten Samples für alle verwendeten Satellitenszenen ideal sind.

Ein großes Problem bezüglich der Referenzgebiete stellt auch die lange Zeitspanne von 6 Jahren dar, aus der das unterschiedliche Datenmaterial stammt. Bei den Analysen werden demnach Daten verknüpft, bei denen bezüglich ihres Aufnahmedatums mehrere Jahre liegen. Bei solchen Zeitsprüngen können sich Waldbestände bereits merklich verändert haben. Diese zahlreichen Störfaktoren (vgl. dazu Kapitel 7.4.1) trüben die Qualität der Untersuchungen.

Wie bereits erwähnt, führt das Self-Calibrating-Topographic-Normalization-Tool zu guten Ergebnissen in Sachen Beleuchtungskorrektur. Dennoch wäre eine Vereinfachung des Mo-

dells basierend auf Regressionsanalysen von Grauwerten und Illumination im Scattergramm des Satellitenbildes und ohne vorherige Klassifizierung der Vegetation oder iterativer Anpassung von Minnaert-Konstanten möglich. Die theoretischen Überlegungen dazu werden in der Masterarbeit in Kapitel 10 geliefert, die praktische Umsetzung dieser Weiterentwicklung könnte jedoch ein Anreiz für weitere Forschungstätigkeit auf diesem Gebiet sein.

## Literatur

- Buhk R (2000): Modellbasierte Schätzung von Kronendeckungsgrad und -transparenz aus Landsat TM5 Fernerkundungsdaten unter Berücksichtigung reliefbedingter Beleuchtungseffekte. Diss. Uni Freiburg
- Colby J D (1991): Topographic Normalization in Rugged Terrain. In: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 57, Nr. 5: S. 531 – 537
- Gallaun H, Schardt M, Linser S (2007): Remote Sensing Based Forest Map of Austria and Derived Environmental Indicators. In: Forestsat 2007 Montpellier, France
- Herold M, Müschen B, Müller A, Klenke M, Steinnocher K (2000): Zur radiometrischen Reliefkorrektur von Fernerkundungsdaten. In: Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation 5: S. 347 – 354
- Hildebrandt G (1996): Fernerkundung und Luftbildmessung für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie. 1st Widmann.
- Härdle W (2007): Regression. Springer
- Meyer P, Itten K I, Kellenberger T, Sandmeier S, Sandmeier R (1993): Radiometric corrections of topographically induced effects on Landsat TM data in an alpine environment. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 48, Nr. 4: S. 17 – 28
- Minnaert M (1941): The Reciprocity Principle in Lunar Photometry. In: Astrophysical Journal 93: S. 403 – 410
- Riano D, Chuvieco E, Salas F J, Aguado I (2003): Assessment of Different Topographic Correction in Landsat- TM Data for Mapping Vegetation Types. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 41, Nr. 5: S. 1056 – 1061



Schardt M (1990): Verwendbarkeit von Thematik Mapper-Daten zur Klassifizierung von Baumarten und natürlichen Altersklassen. DLR-Forschungsbericht

Schardt M (1997): Beobachtung von Waldschäden im niedersächsischen Harz mit Methoden der Fernerkundung und Aufbau eines Waldinformationssystems. Habil. TU Berlin

Schardt M (2008): Umweltmonitoring mittels Fernerkundung. Vorlesungsunterlagen TU Graz

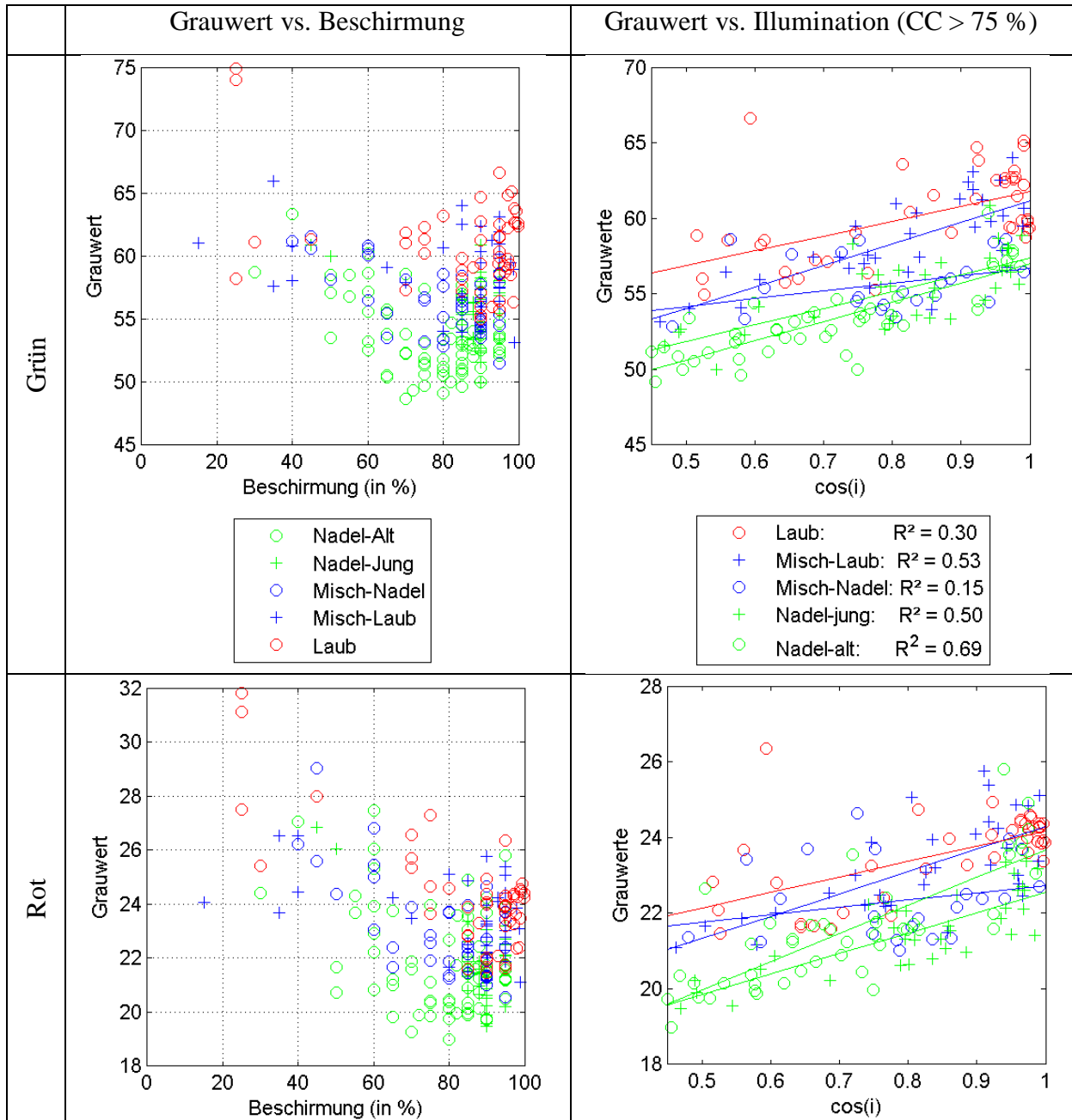
Smith J A, Lin T, Ranson K J (1980): The Lambertian Assumption and Landsat Data. In: Photogrammetrie Engineering and Remote Sensing 46, Nr. 9: S. 1183 – 1189

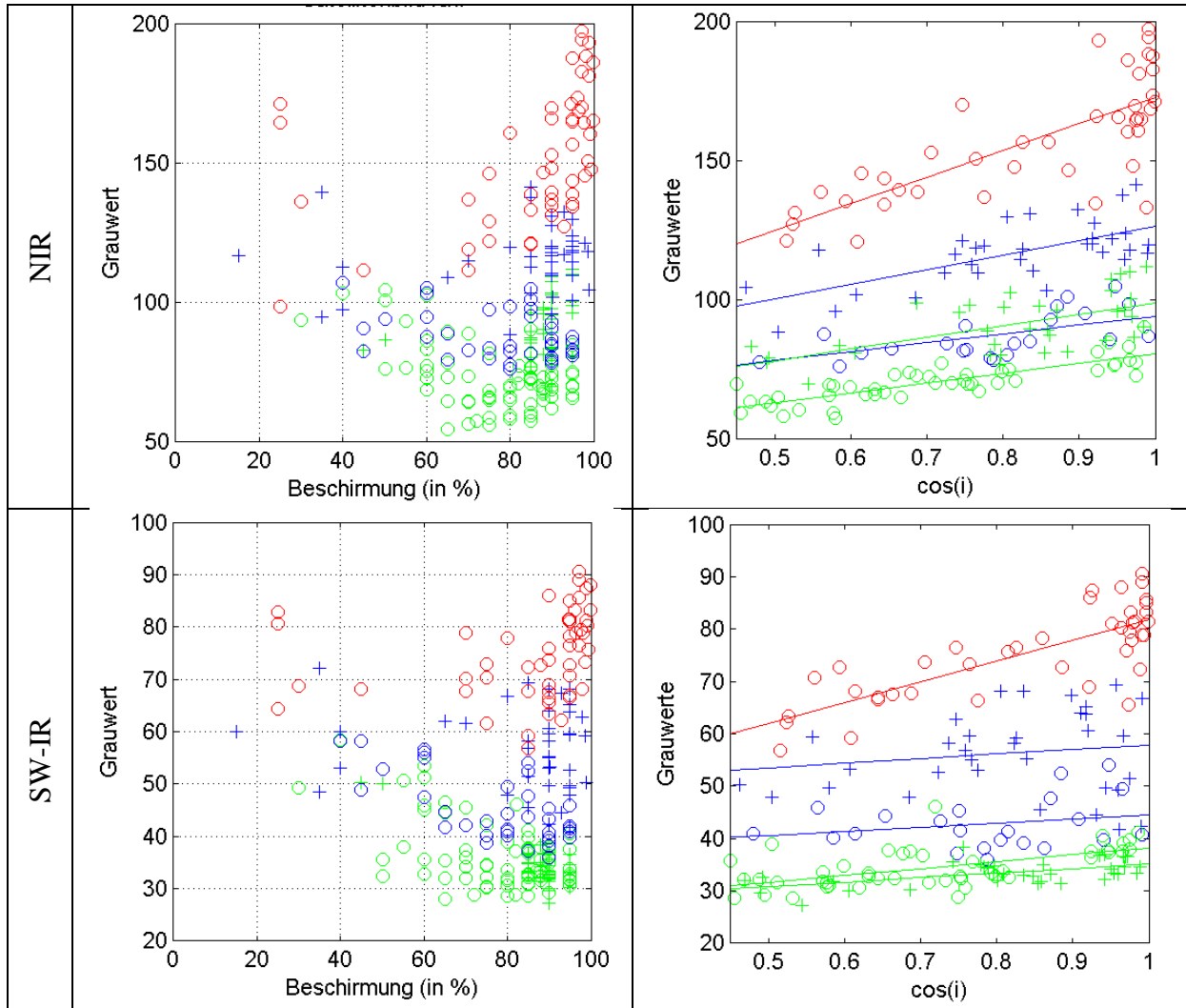
Steinegger M (2010): Ableitung der Beschirmung von Waldbeständen aus hochauflösenden Satellitenbildern. Masterarbeit TU Graz

Twele A, Erasmi S (2005): Optimierung der Topographischen Normalisierung optischer Satellitendaten durch Einbeziehung von Kohärenzinformation. In: Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, Nr. 3: S. 227 – 234

**Anhang A:** Untersuchung des Einflusses der Topographie auf die Reflexion

- IRS-Szene: i\_31\_35\_060717





- Regressionswerte:

=====  
i\_31\_35\_060717 Berechnungsprotokoll: 28-May-2013 14:14:16  
=====

Trainingsgebiete:

366

Trainingsgebiete, die im jeweiligen Bild enthalten sind (wolken abgezogen):

177

Anzahl der jeweiligen Klassen:

MISCH\_Laub: 33

MISCH\_Nadel: 23

LAUB: 41

NADEL\_Jung: 35

NADEL\_Alt 45

R <sup>2</sup>	Original				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.501	0.690	0.302	0.529	0.150
Band 2	0.640	0.633	0.368	0.465	0.071
Band 3	0.361	0.688	0.575	0.448	0.374
Band 4	0.322	0.316	0.618	0.026	0.062

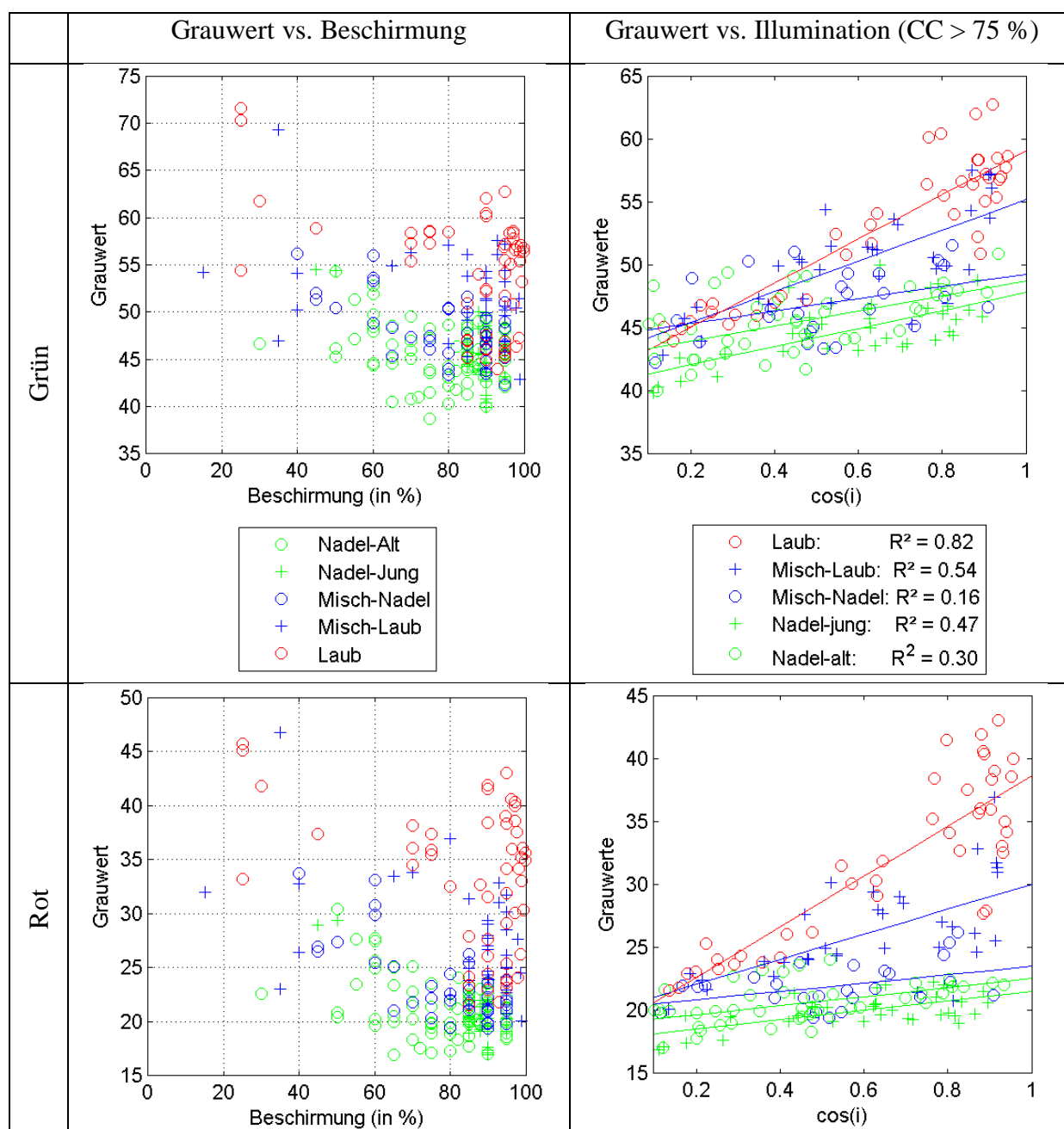
k	Original				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel

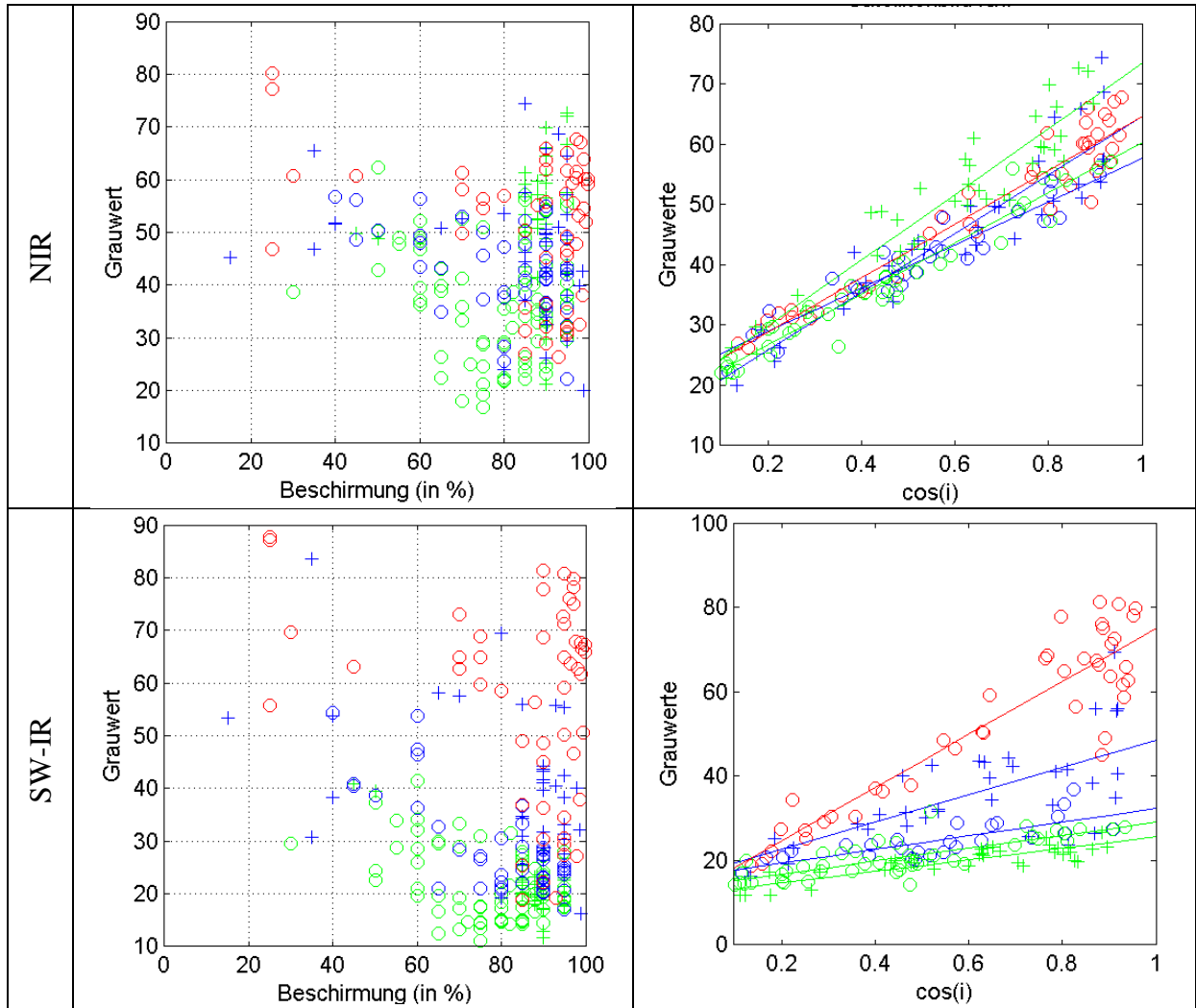
## Anhang A

Band	1	2	3	4
11.02	12.781	9.79	14.20	5.10
5.44	7.435	4.07	5.92	1.93
41.52	35.652	95.50	52.30	31.96
8.72	13.053	39.91	8.85	7.63

c_v	Original				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.043	0.047	0.050	0.049	0.036
Band 2	0.048	0.071	0.048	0.055	0.050
Band 3	0.116	0.100	0.134	0.098	0.092
Band 4	0.071	0.111	0.113	0.141	0.110

- IRS-Szene: i\_31\_35\_070314





- Regressionswerte:

=====  
i\_31\_35\_070314 Berechnungsprotokoll: 22-May-2013 13:10:31  
=====

Trainingsgebiete:

366

Trainingsgebiete, die im jeweiligen Bild enthalten sind (wolken abgezogen):

180

Anzahl der jeweiligen Klassen:

MISCH\_Laub: 33

MISCH\_Nadel: 26

LAUB: 41

NADEL\_Jung: 35

NADEL\_Alt 45

R <sup>2</sup>	original				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.467	0.300	0.821	0.542	0.161
Band 2	0.397	0.271	0.750	0.378	0.166
Band 3	0.898	0.946	0.932	0.836	0.892
Band 4	0.730	0.648	0.841	0.437	0.597

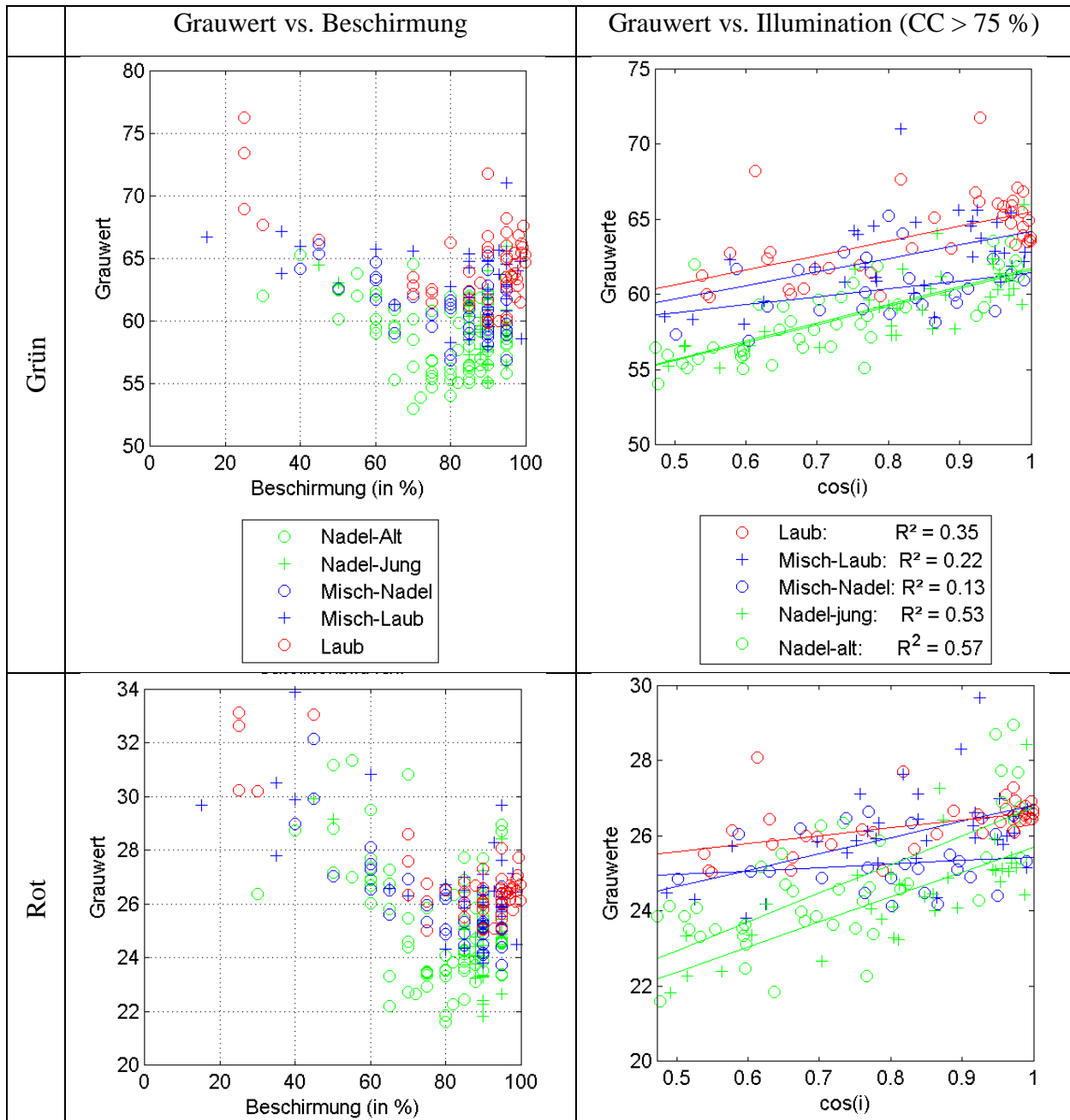
k	original				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel

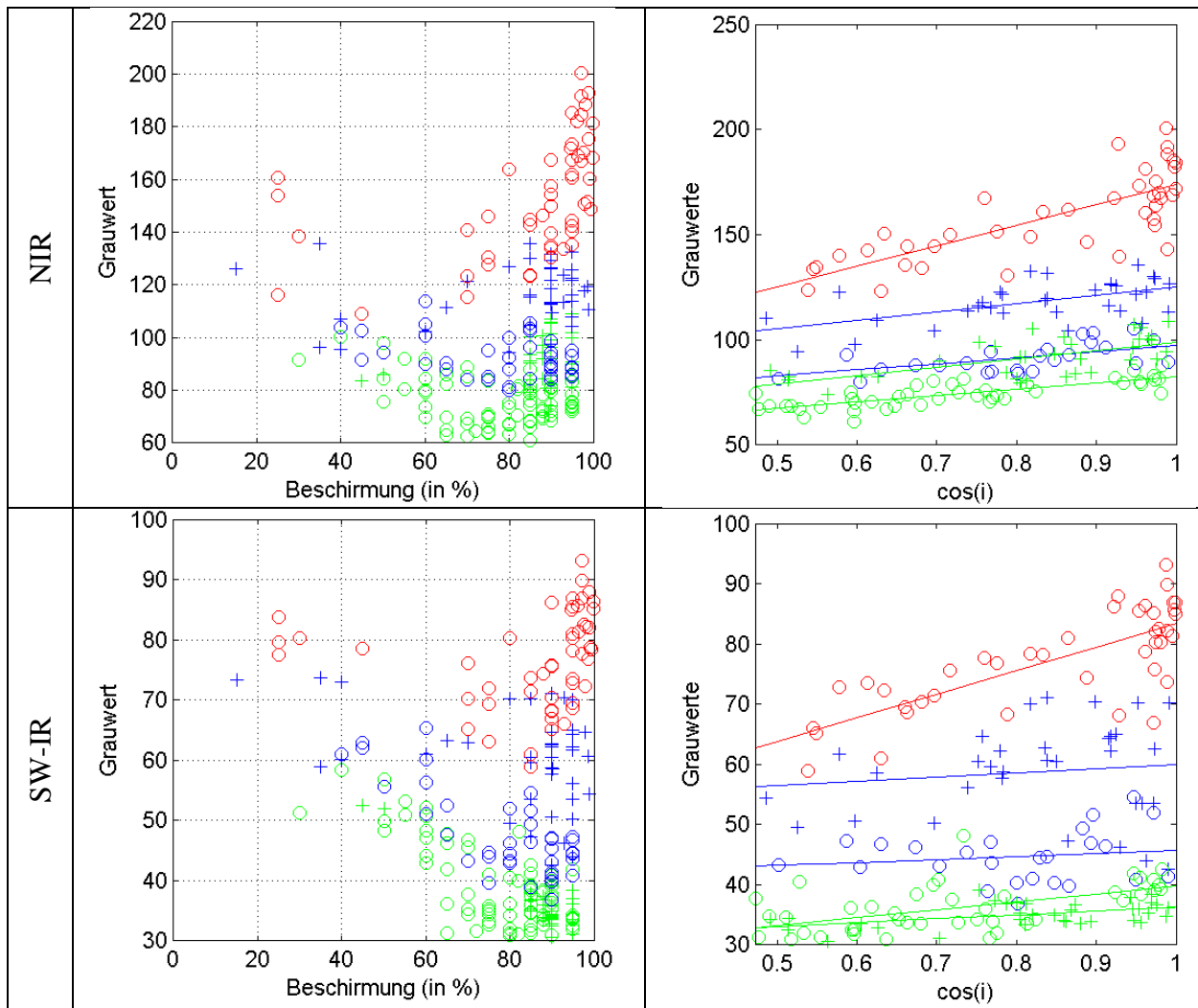
## Anhang A

Band 1	7.15	5.992	17.54	12.18	4.91
Band 2	3.73	3.577	20.00	9.93	3.34
Band 3	54.49	42.017	44.76	48.55	35.94
Band 4	13.55	15.378	62.97	32.30	16.13

c_v	original				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.054	0.058	0.104	0.078	0.056
Band 2	0.069	0.081	0.207	0.146	0.080
Band 3	0.259	0.285	0.268	0.273	0.200
Band 4	0.183	0.227	0.366	0.320	0.181

- IRS-Szene: i\_31\_35\_080706





- Regressionswerte:

=====  
i\_31\_35\_080706 Berechnungsprotokoll: 22-May-2013 13:11:00  
=====

Trainingsgebiete:

366

Trainingsgebiete, die im jeweiligen Bild enthalten sind (wolken abgezogen):

177

Anzahl der jeweiligen Klassen:

MISCH\_Laub: 33

MISCH\_Nadel: 26

LAUB: 41

NADEL\_Jung: 34

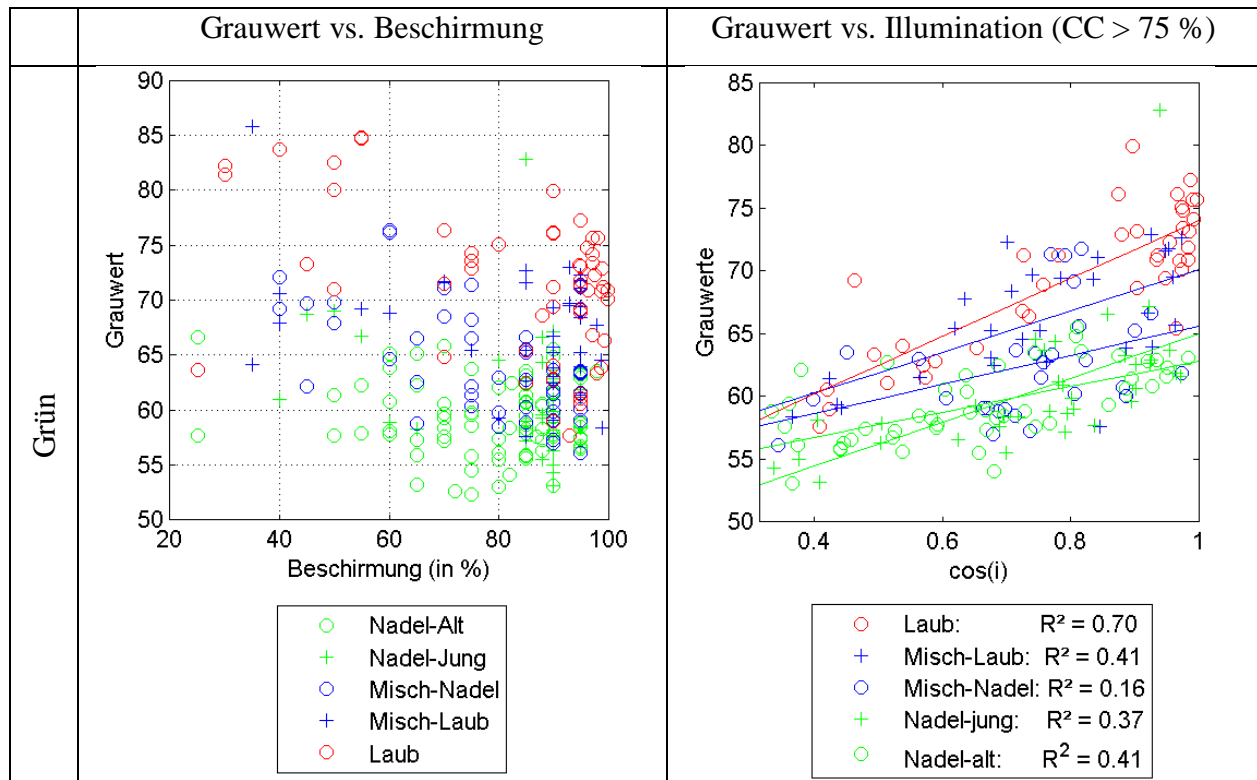
NADEL\_Alt 43

R <sup>2</sup>	Original				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.527	0.574	0.347	0.216	0.126
Band 2	0.529	0.517	0.252	0.262	0.027
Band 3	0.403	0.601	0.591	0.320	0.344
Band 4	0.228	0.281	0.572	0.016	0.025

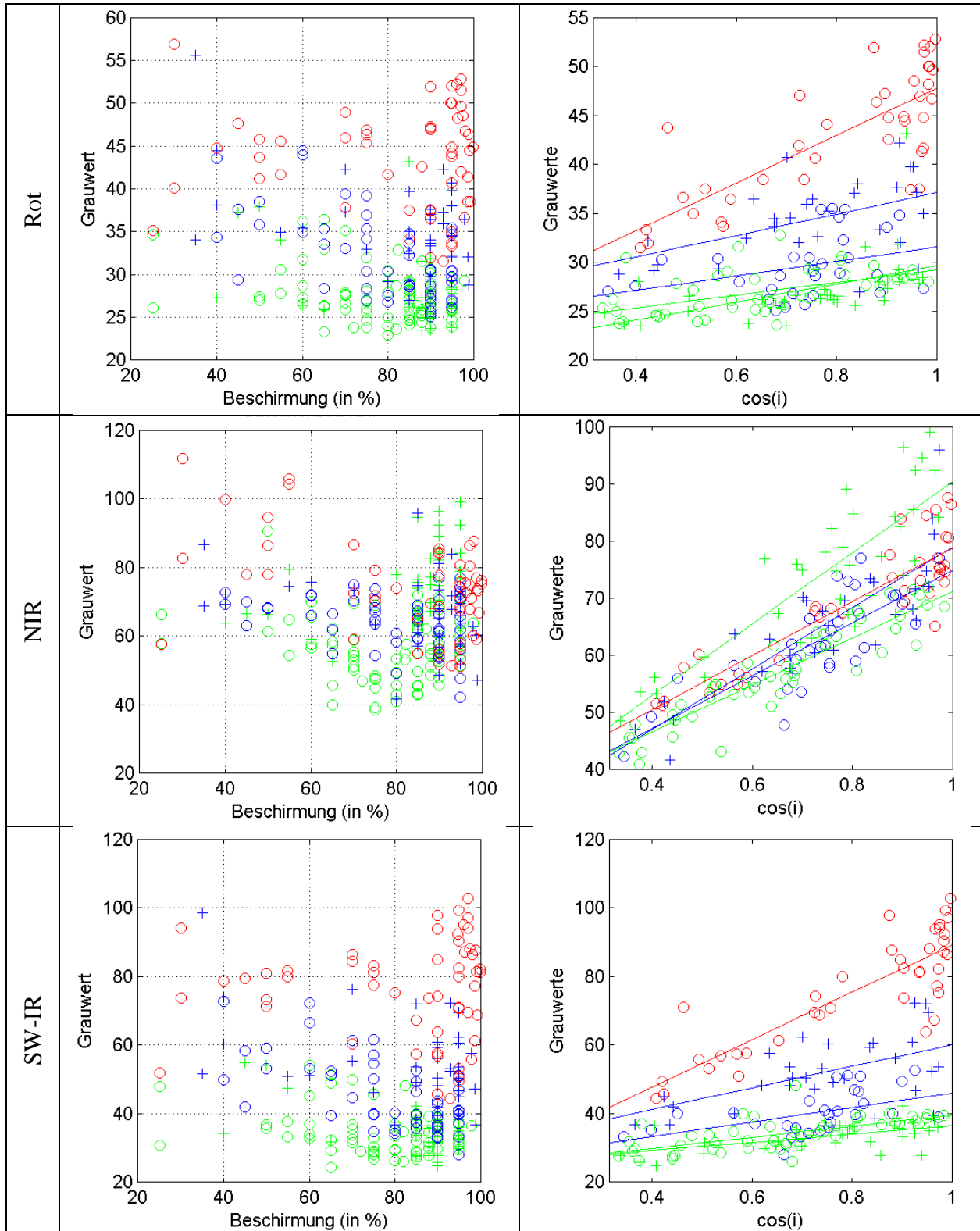
k	Original				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	12.05	12.139	9.77	9.07	5.25
Band 2	6.67	7.629	2.10	4.35	0.93
Band 3	40.39	29.488	97.51	39.91	28.62
Band 4	6.39	12.980	39.14	7.12	4.83

c_v	Original				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.041	0.044	0.041	0.043	0.034
Band 2	0.055	0.069	0.025	0.045	0.032
Band 3	0.102	0.083	0.127	0.083	0.076
Band 4	0.056	0.109	0.107	0.134	0.096

- IRS-Szene: i\_32\_35\_050422







- Regressionswerte:

=====  
i\_32\_35\_050422 berechnungsprotokoll: 28-May-2013 14:13:17  
=====

Trainingsgebiete:  
366

Trainingsgebiete, die im jeweiligen Bild enthalten sind (wolken abgezogen):

181

Anzahl der jeweiligen Klassen:

MISCH\_Laub: 29  
 MISCH\_Nadel: 30  
 LAUB: 39  
 NADEL\_Jung: 35  
 NADEL\_Alt 48

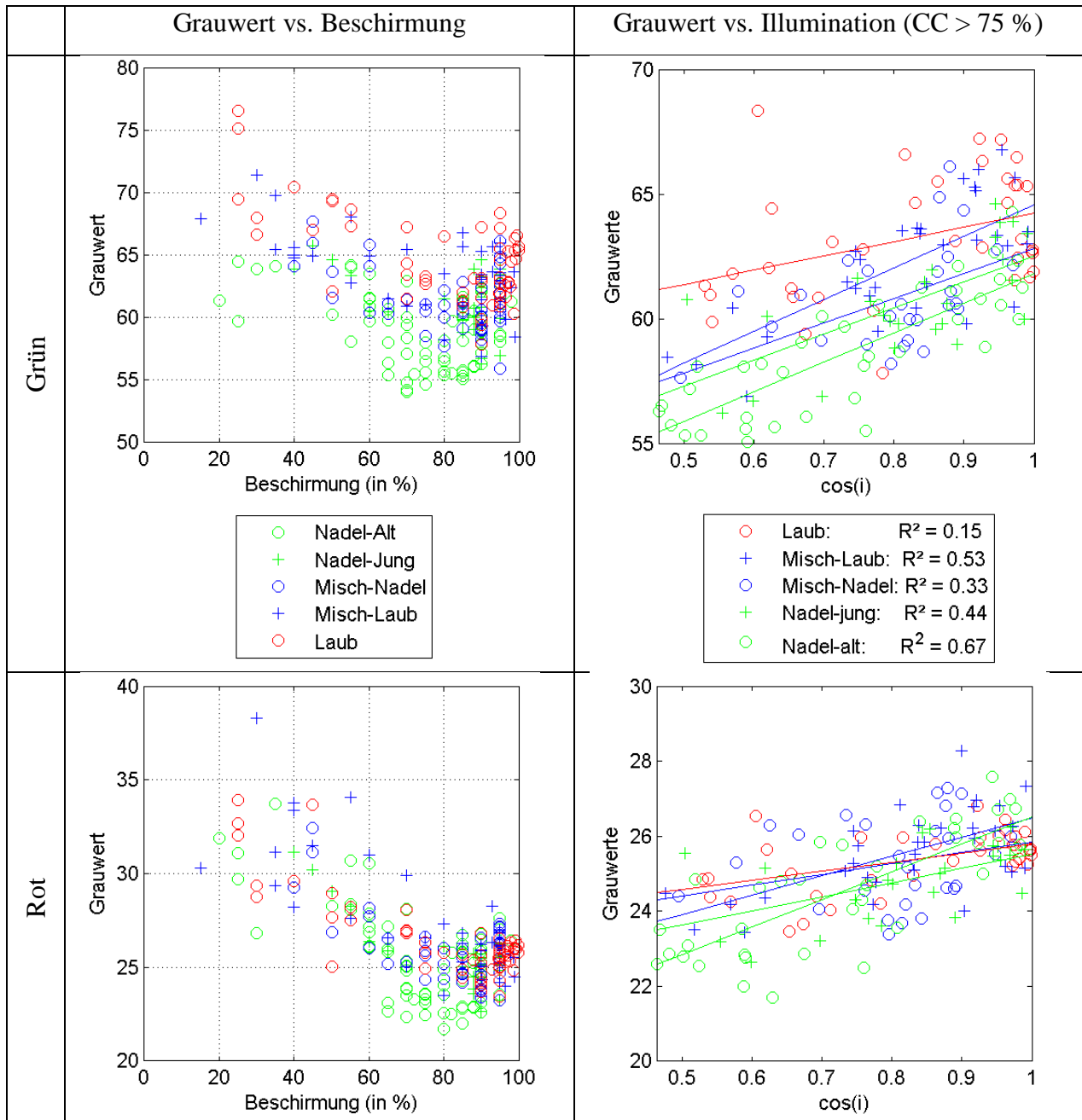
R <sup>2</sup>	Original				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.369	0.405	0.700	0.409	0.160
Band 2	0.238	0.292	0.608	0.253	0.112
Band 3	0.721	0.860	0.812	0.711	0.618
Band 4	0.320	0.433	0.736	0.321	0.237

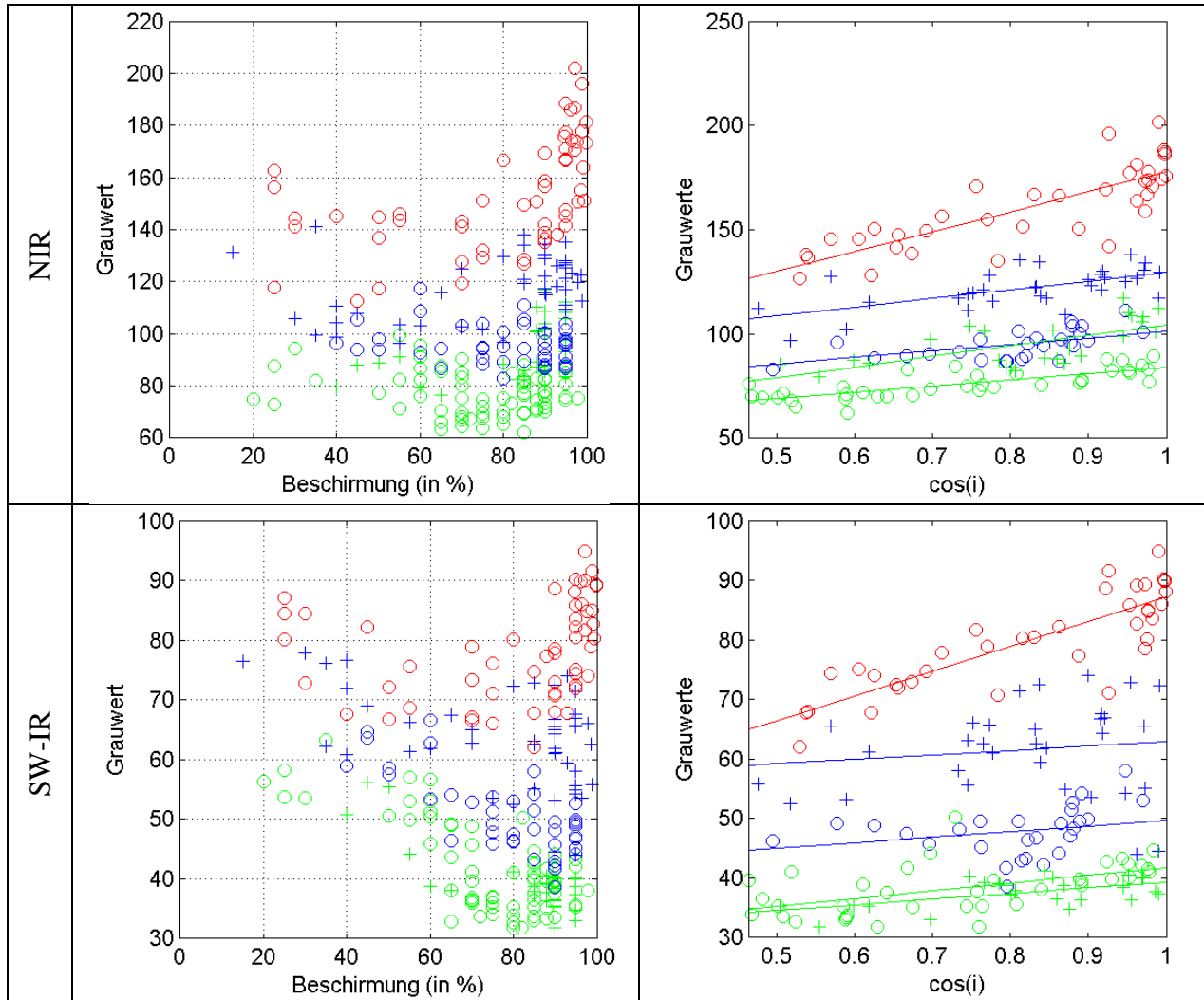
k	Original				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	17.49	10.145	23.09	16.44	11.64
Band 2	9.25	6.442	24.23	10.93	7.38
Band 3	62.59	41.169	47.28	53.29	46.24
Band 4	12.22	16.210	69.35	31.52	21.11

c_v	Original				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.085	0.052	0.081	0.070	0.068
Band 2	0.124	0.085	0.147	0.113	0.108
Band 3	0.176	0.151	0.153	0.172	0.137
Band 4	0.116	0.141	0.217	0.191	0.157

---

- IRS-Szene: i\_32\_35\_080711





- Regressionswerte:

=====  
i\_32\_35\_080711 Berechnungsprotokoll: 28-May-2013 14:10:04  
=====

Trainingsgebiete:

366

Trainingsgebiete, die im jeweiligen Bild enthalten sind (wolken abgezogen):

159

Anzahl der jeweiligen Klassen:

MISCH\_Laub: 32

MISCH\_Nadel: 28

LAUB: 37

NADEL\_Jung: 25

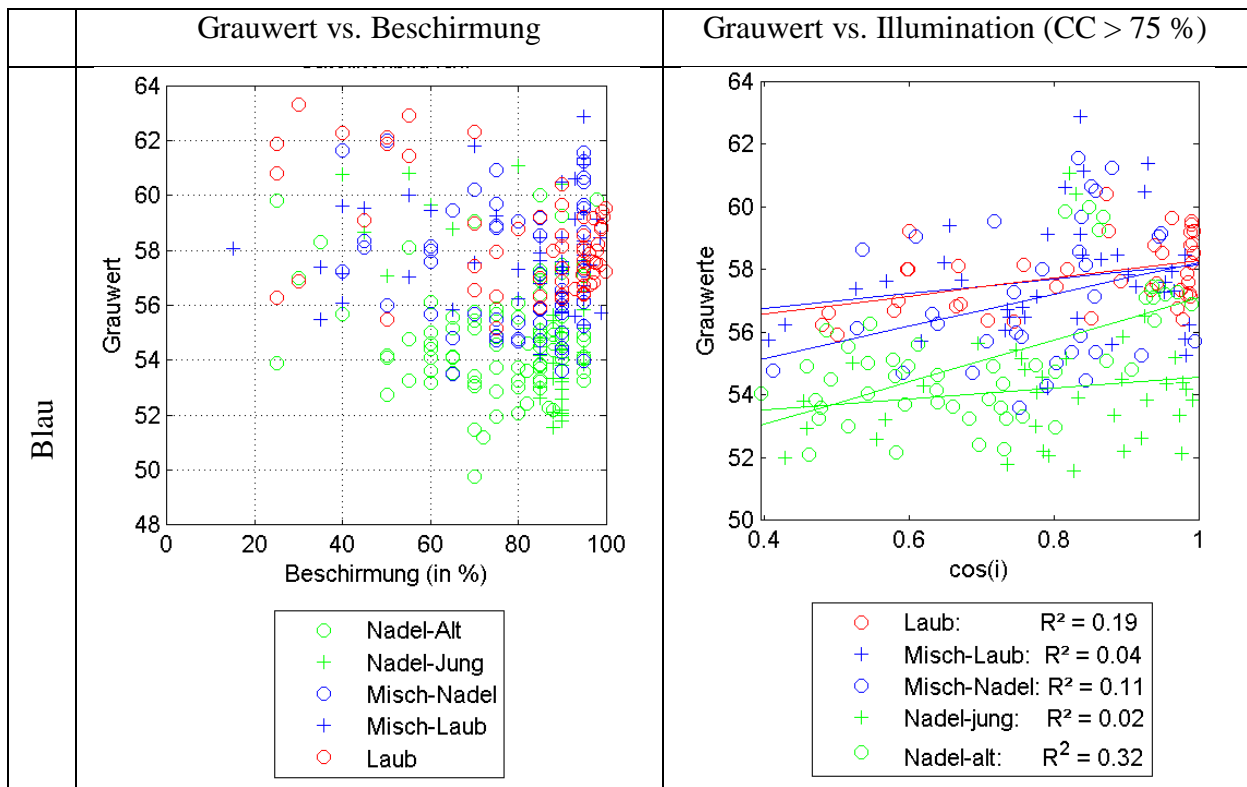
NADEL\_Alt 37

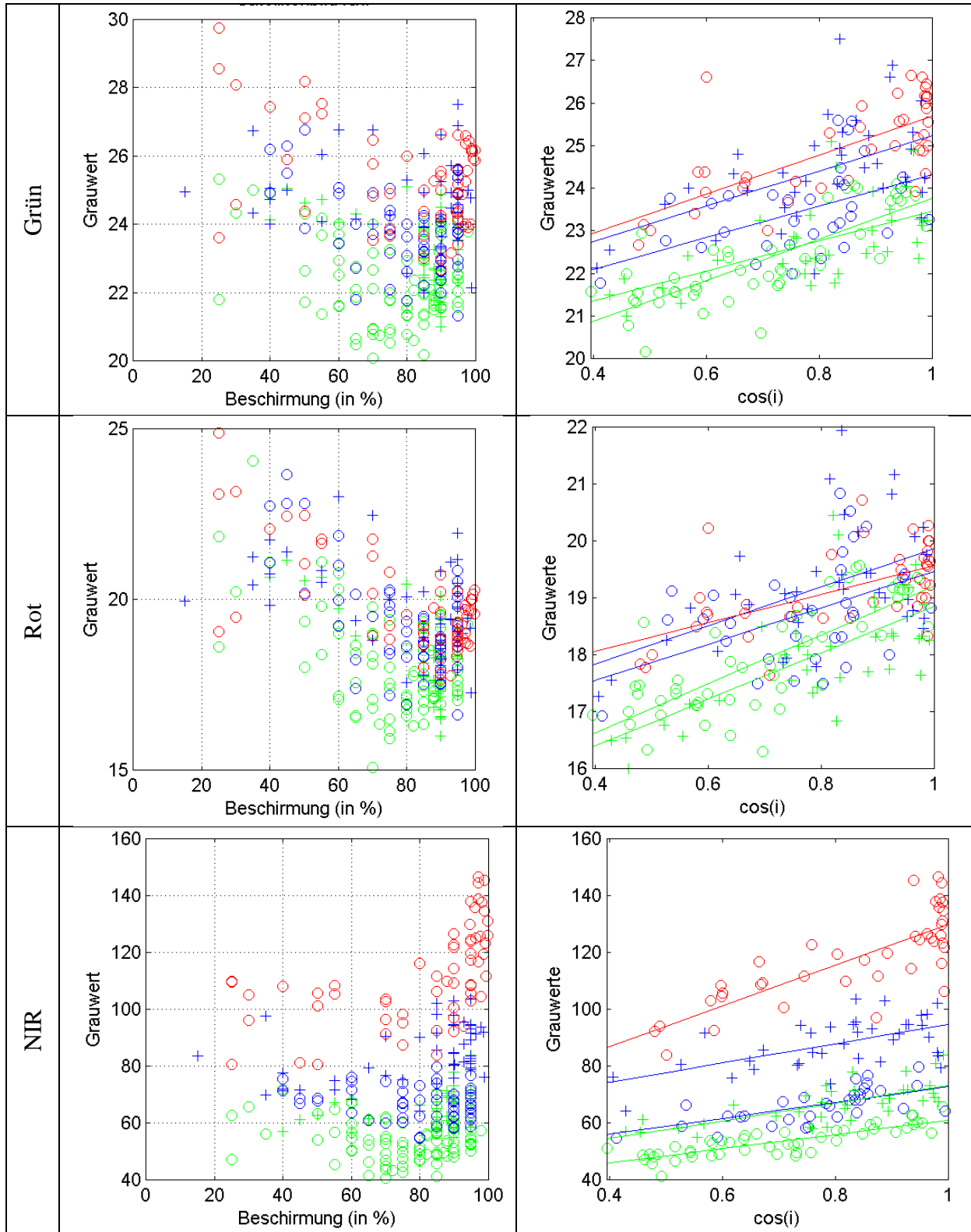
R <sup>2</sup>	original				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.437	0.674	0.146	0.534	0.328
Band 2	0.276	0.622	0.242	0.410	0.093
Band 3	0.418	0.603	0.657	0.396	0.338
Band 4	0.309	0.291	0.707	0.018	0.084

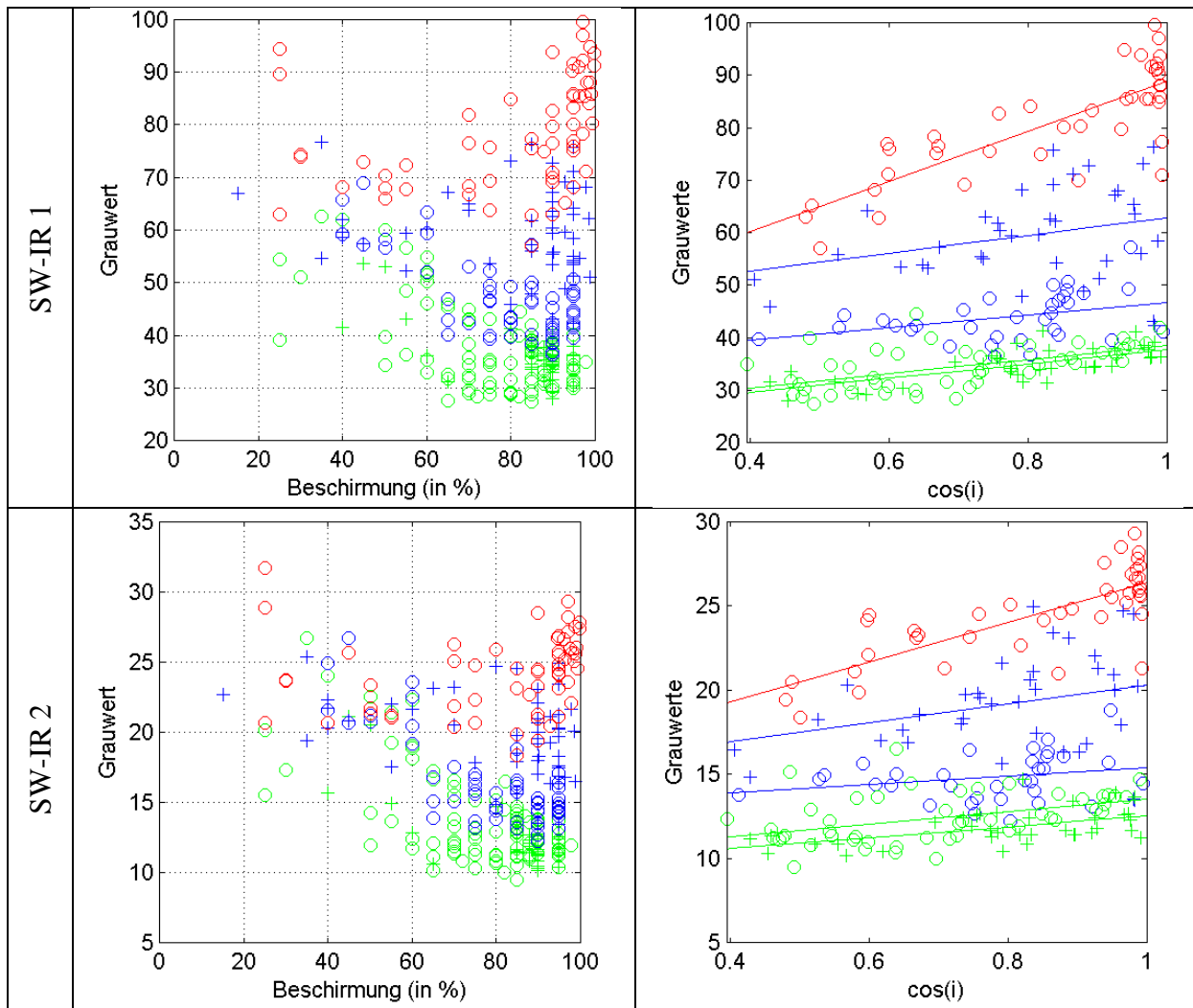
k	Original				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	10.51	11.847	5.74	12.69	9.94
Band 2	3.77	7.374	2.42	5.19	2.91
Band 3	50.73	29.822	95.57	41.94	31.23
Band 4	9.66	13.112	41.48	7.40	9.37

c_v	Original				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.037	0.042	0.039	0.039	0.036
Band 2	0.040	0.066	0.032	0.044	0.048
Band 3	0.115	0.087	0.120	0.077	0.072
Band 4	0.064	0.110	0.101	0.125	0.086

- Landsat-Szene: l20070720







- Regressionswerte:

=====  
 l\_20070720 Berechnungsprotokoll: 22-May-2013 13:13:14  
 =====

Trainingsgebiete:

366

Trainingsgebiete, die im jeweiligen Bild enthalten sind (wolken abgezogen):

197

Anzahl der jeweiligen Klassen:

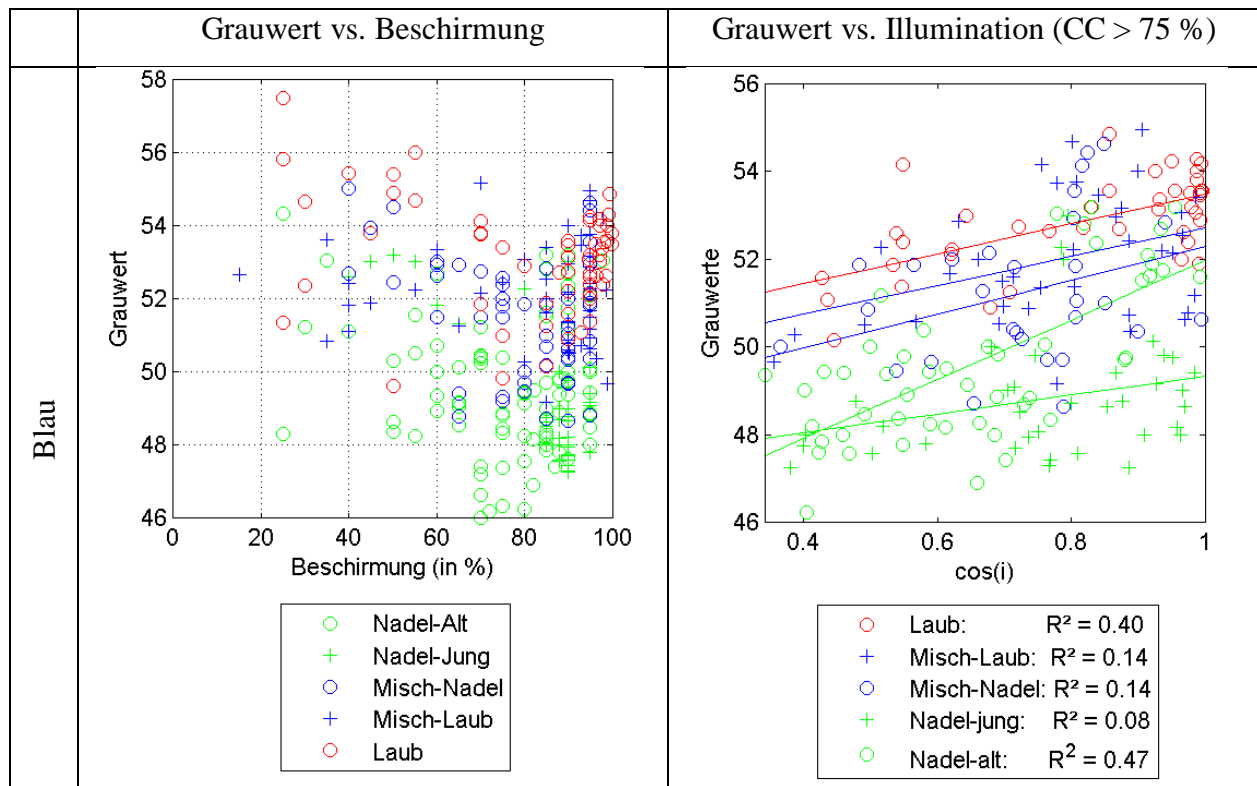
MISCH\_Laub: 37  
 MISCH\_Nadel: 34  
 LAUB: 41  
 NADEL\_Jung: 36  
 NADEL\_Alt: 49

R <sup>2</sup>	original				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.019	0.316	0.194	0.036	0.108
Band 2	0.356	0.624	0.497	0.268	0.275
Band 3	0.444	0.603	0.355	0.248	0.233
Band 4	0.507	0.697	0.634	0.341	0.439
Band 5	0.483	0.322	0.653	0.085	0.144
Band 6	0.257	0.187	0.610	0.088	0.068

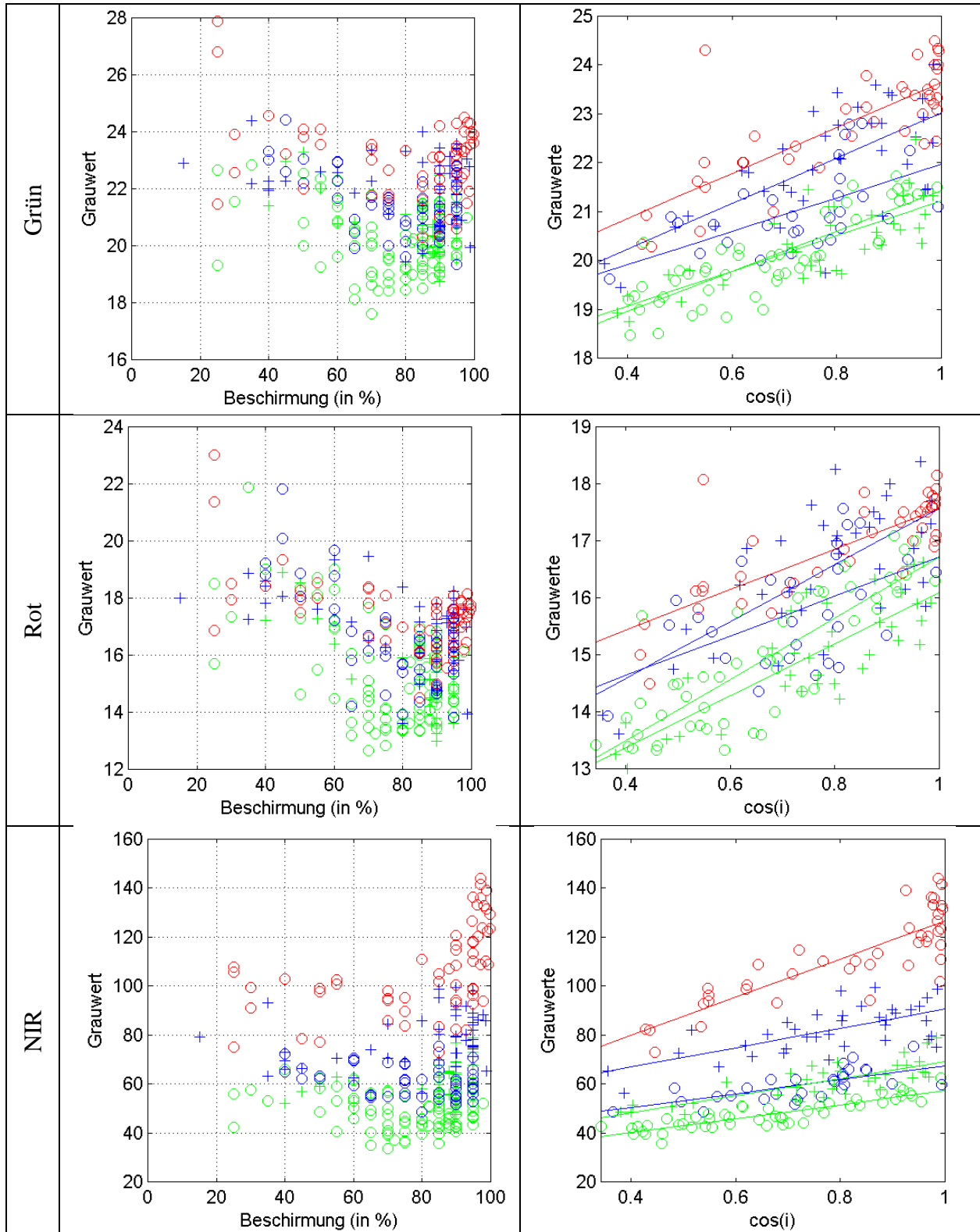
k	Original				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	1.74	6.696	2.85	2.32	5.11
Band 2	3.49	4.785	4.57	4.14	3.69
Band 3	4.08	4.304	2.53	3.37	3.19
Band 4	31.08	25.082	71.49	33.64	27.82
Band 5	13.76	13.609	47.66	16.82	11.79
Band 6	3.24	3.744	11.87	5.60	2.48

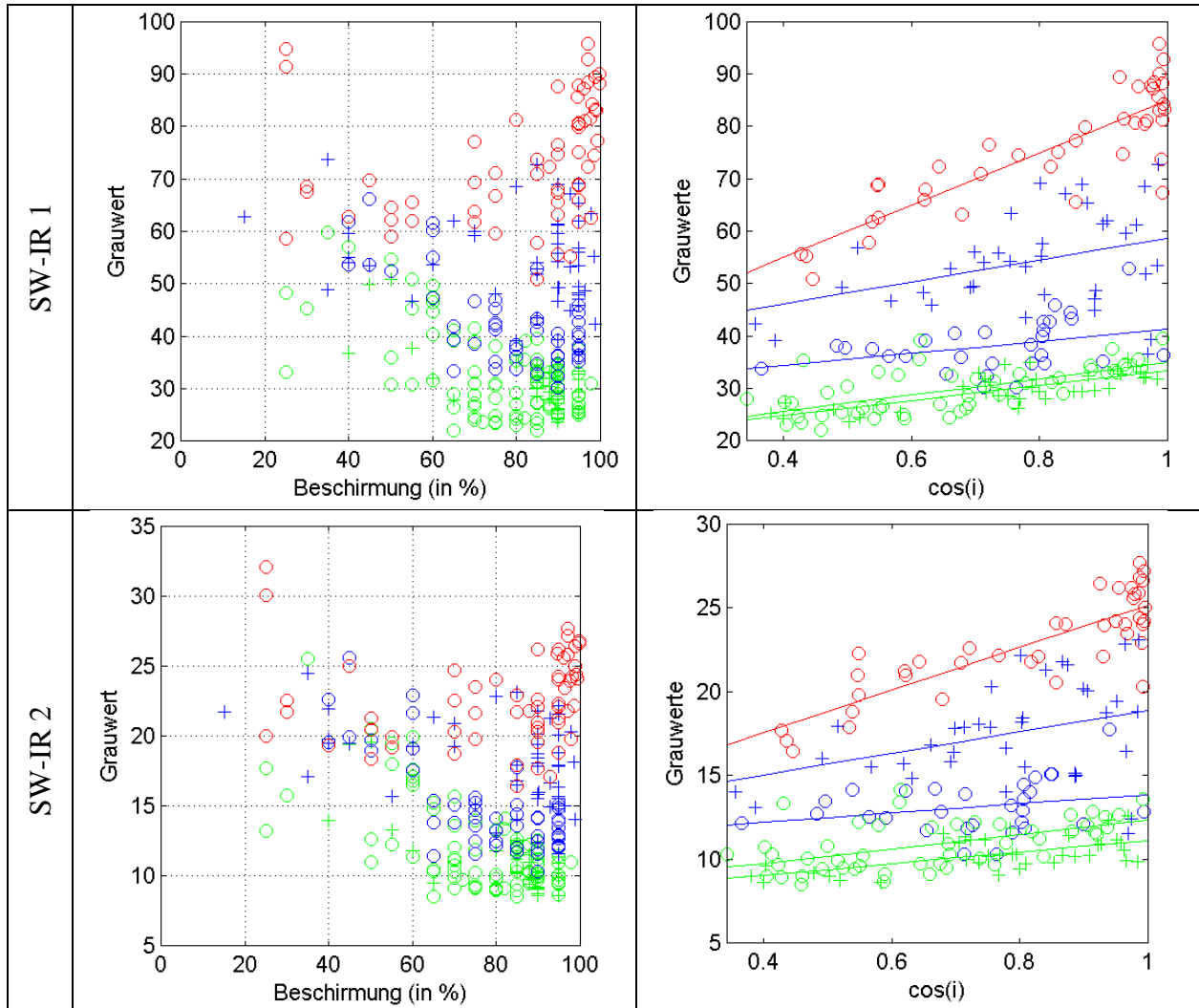
c_v	Original				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.038	0.037	0.019	0.032	0.040
Band 2	0.042	0.046	0.045	0.050	0.044
Band 3	0.055	0.052	0.038	0.054	0.052
Band 4	0.106	0.095	0.132	0.101	0.093
Band 5	0.092	0.118	0.126	0.149	0.103
Band 6	0.087	0.118	0.108	0.151	0.094

- Landsat-Szene: 120070805









• Regressionswerte:

=====

l\_20070805 Berechnungsprotokoll: 22-May-2013 13:13:56

=====

Trainingsgebiete:

366

Trainingsgebiete, die im jeweiligen Bild enthalten sind (wolken abgezogen):

193

Anzahl der jeweiligen Klassen:

MISCH\_Laub: 37

MISCH\_Nadel: 30

LAUB: 41

NADEL\_Jung: 36

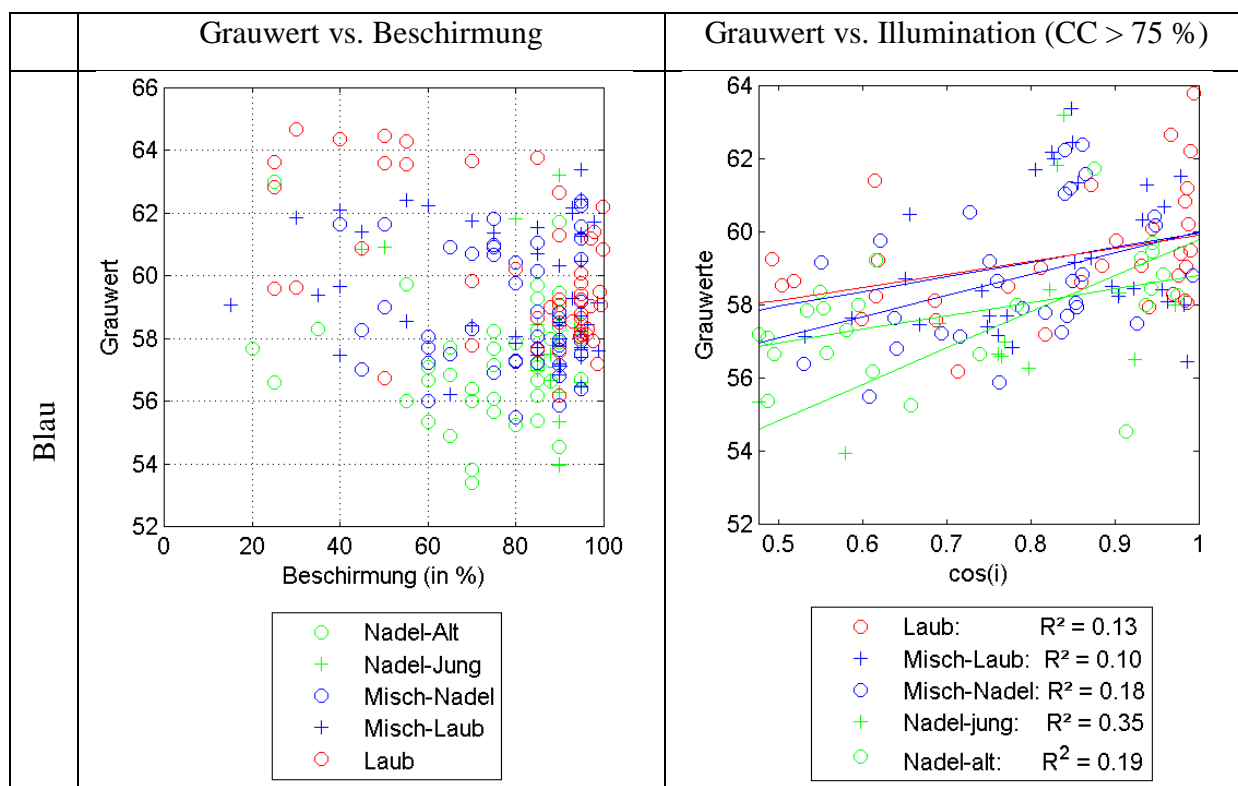
NADEL\_Alt 49

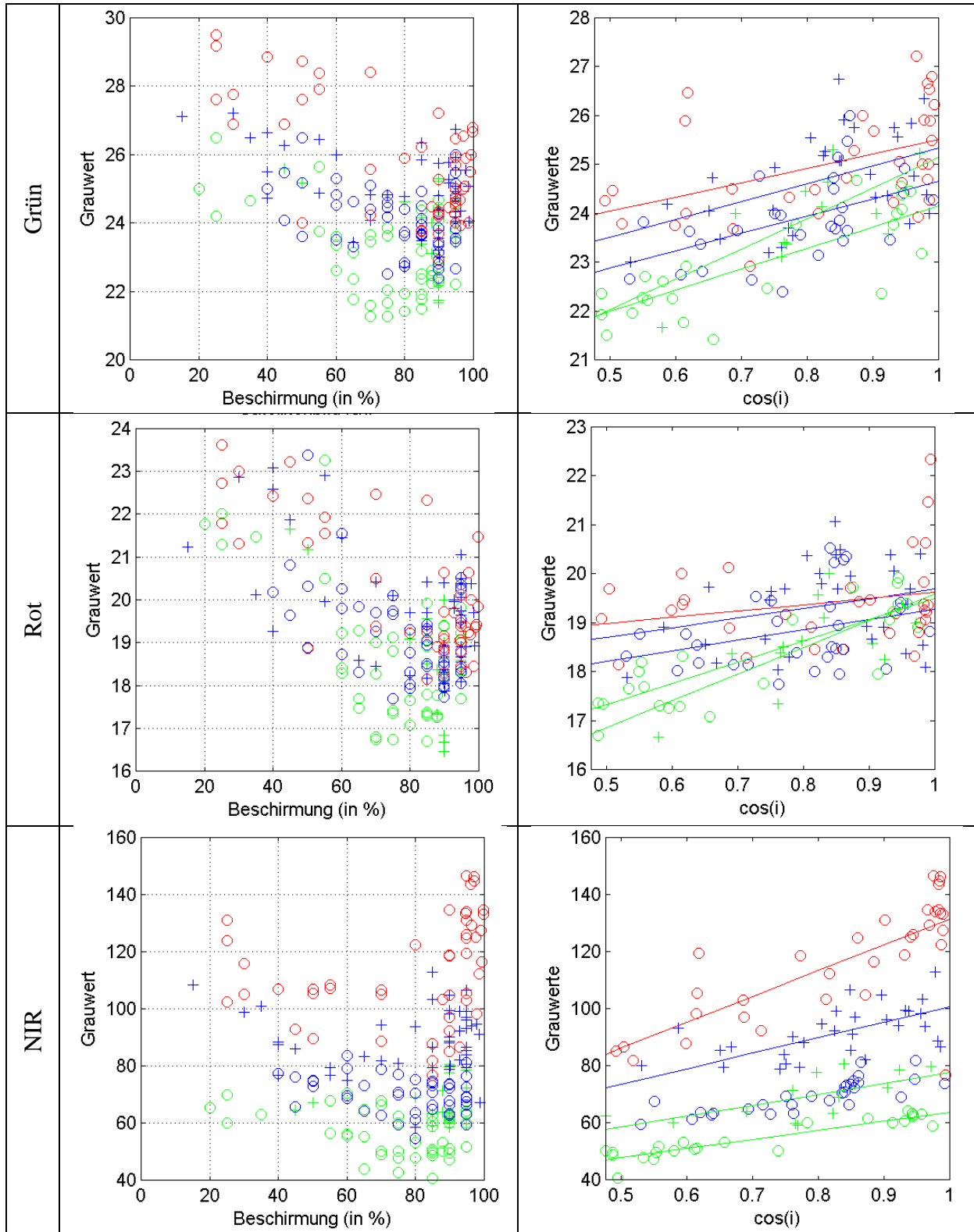
R <sup>2</sup>	original				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.075	0.465	0.401	0.142	0.137
Band 2	0.594	0.710	0.622	0.466	0.392
Band 3	0.674	0.696	0.629	0.511	0.303
Band 4	0.622	0.771	0.717	0.454	0.492
Band 5	0.577	0.401	0.744	0.140	0.143
Band 6	0.354	0.276	0.708	0.131	0.080

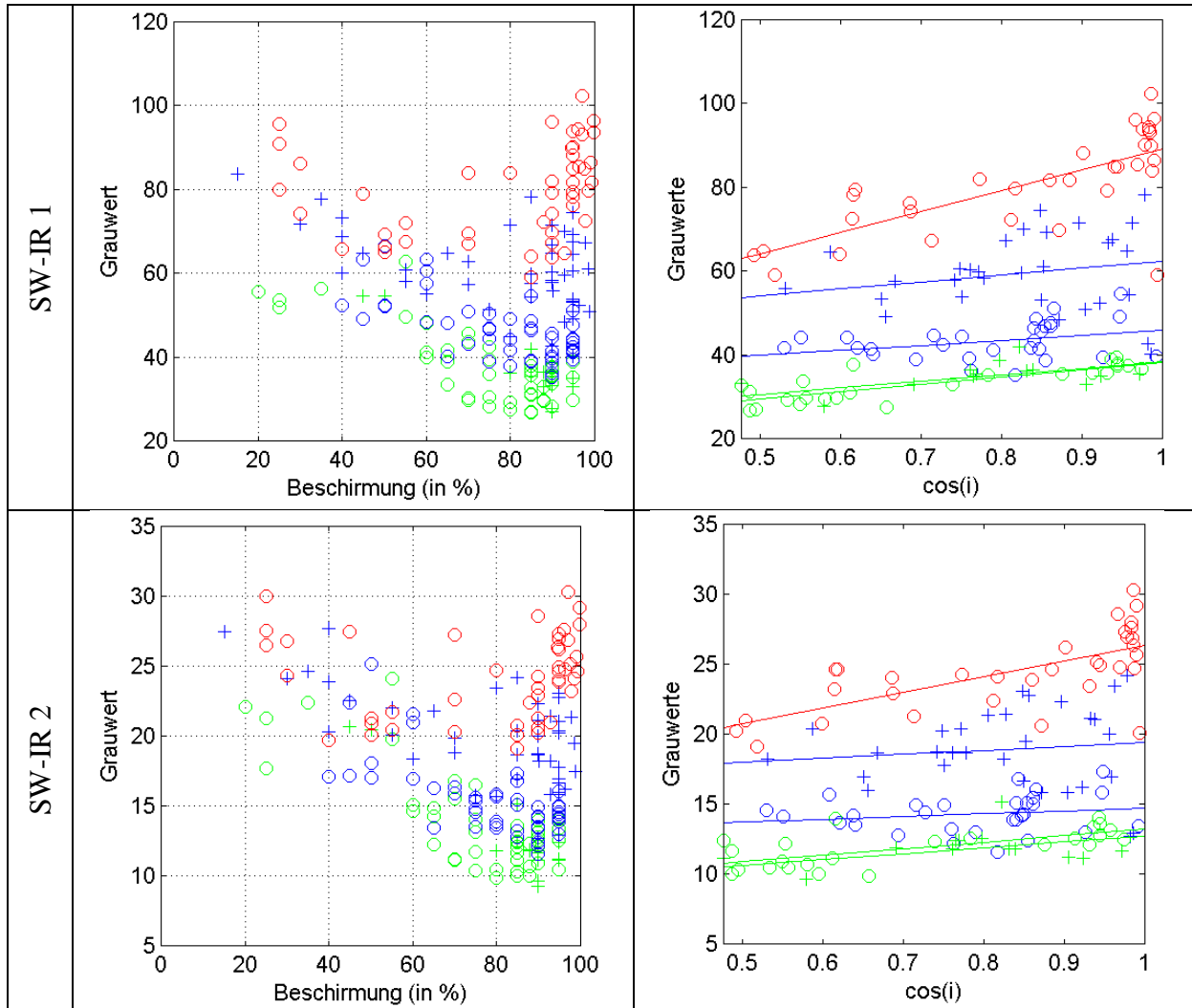
k	Original				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	2.16	6.752	3.42	3.27	3.86
Band 2	3.59	4.122	4.63	4.64	3.42
Band 3	4.55	5.356	3.57	4.98	3.46
Band 4	34.94	28.209	77.77	39.51	28.31
Band 5	14.29	15.606	50.08	20.77	11.66
Band 6	3.48	4.256	12.70	6.42	2.75

c_v	Original				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.028	0.036	0.020	0.028	0.032
Band 2	0.040	0.044	0.050	0.051	0.041
Band 3	0.065	0.078	0.051	0.070	0.063
Band 4	0.127	0.123	0.158	0.119	0.108
Band 5	0.110	0.151	0.148	0.171	0.129
Band 6	0.099	0.135	0.128	0.169	0.118

- Landsat-Szene: 120100712







• Regressionswerte:

=====  
 \\_20100712 Berechnungsprotokoll: 22-May-2013 13:14:42  
 =====

Trainingsgebiete:

366

Trainingsgebiete, die im jeweiligen Bild enthalten sind (wolken abgezogen):

133

Anzahl der jeweiligen Klassen:

MISCH\_Laub: 32

MISCH\_Nadel: 30

LAUB: 33

NADEL\_Jung: 14

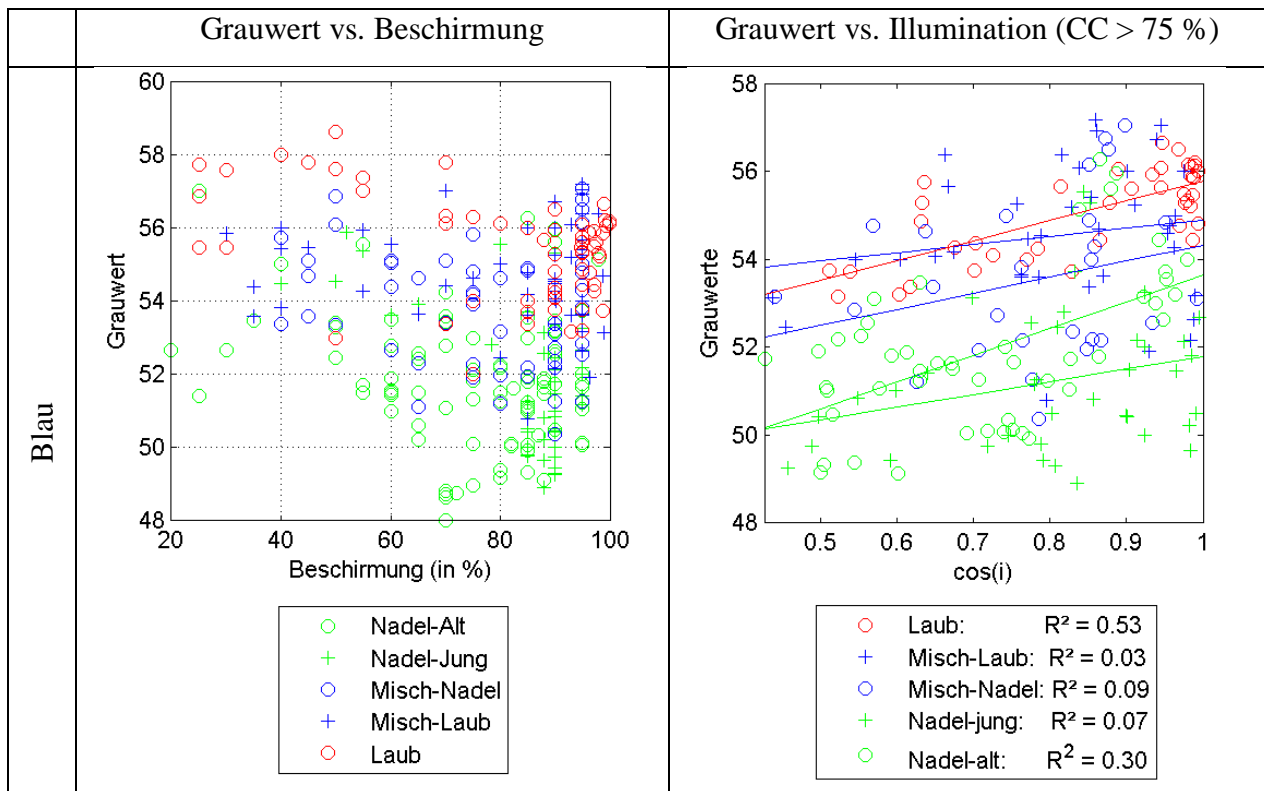
NADEL\_Alt 24

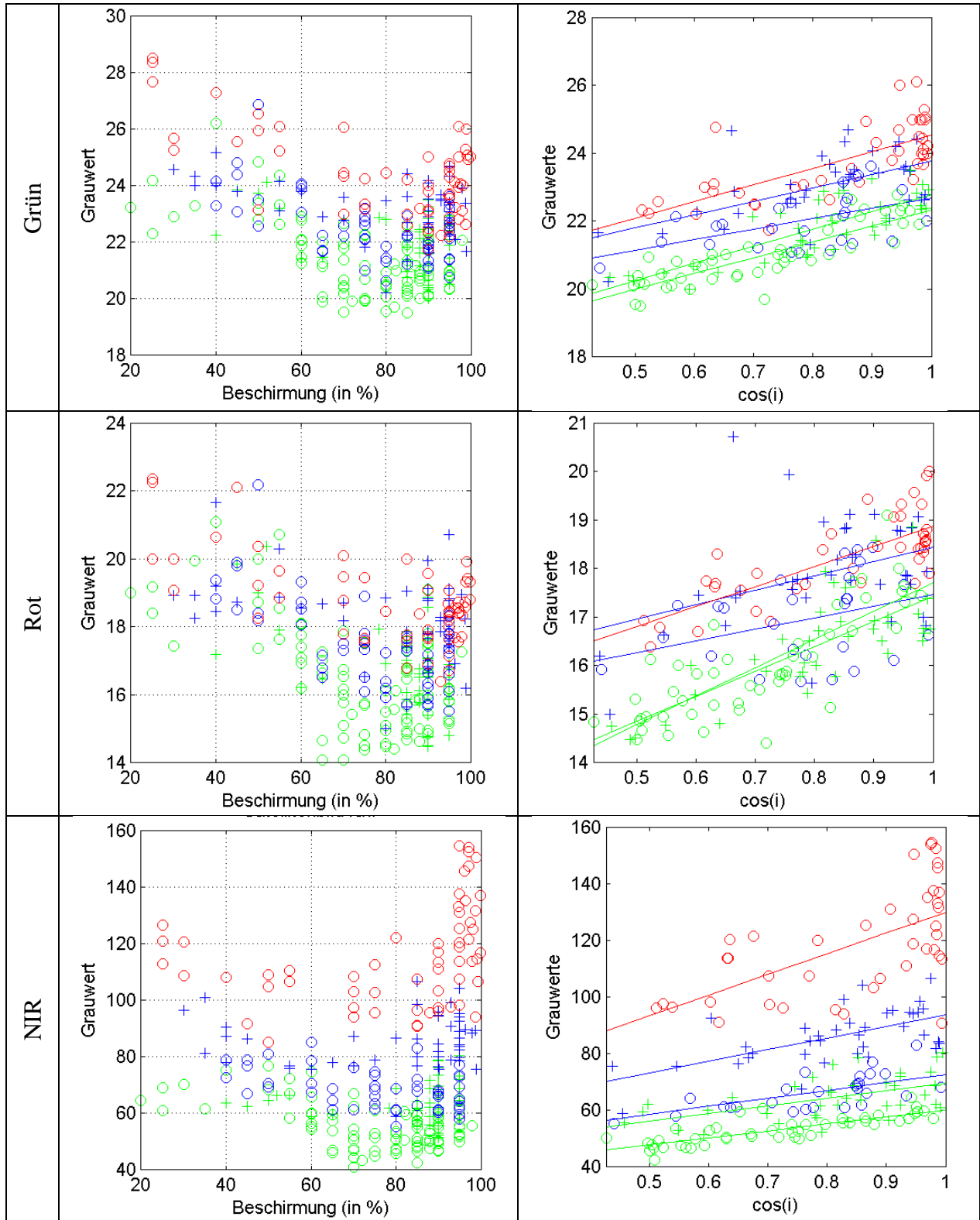
R <sup>2</sup>	original				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.355	0.193	0.134	0.103	0.184
Band 2	0.691	0.637	0.215	0.302	0.303
Band 3	0.622	0.700	0.060	0.120	0.133
Band 4	0.504	0.847	0.576	0.552	0.697
Band 5	0.384	0.679	0.536	0.073	0.135
Band 6	0.228	0.455	0.455	0.023	0.039

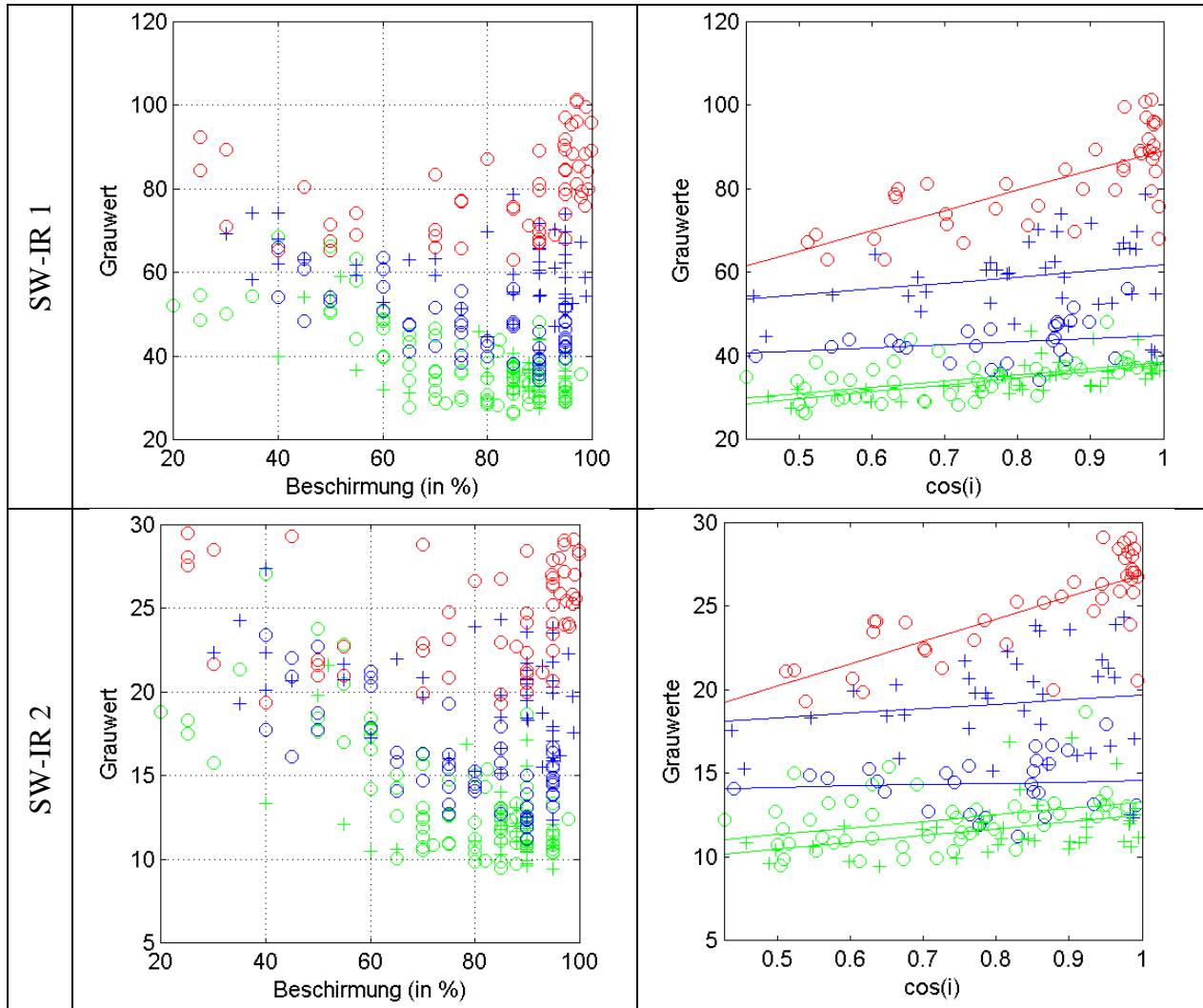
k	Original				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	9.93	3.698	3.54	4.04	5.82
Band 2	6.24	4.323	2.93	3.63	3.56
Band 3	5.46	4.333	1.27	1.97	2.14
Band 4	38.27	31.995	90.47	54.05	38.39
Band 5	15.50	17.777	49.81	16.56	12.04
Band 6	4.27	4.620	11.15	2.83	1.95

c_v	Original				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.045	0.028	0.028	0.033	0.031
Band 2	0.049	0.045	0.043	0.041	0.037
Band 3	0.059	0.054	0.045	0.045	0.042
Band 4	0.122	0.121	0.173	0.125	0.090
Band 5	0.112	0.123	0.143	0.159	0.103
Band 6	0.119	0.110	0.114	0.153	0.094

- Landsat-Szene: 120110629







• Regressionswerte:

=====  
 1\_20110629 Berechnungsprotokoll: 22-May-2013 14:51:36  
 =====

Trainingsgebiete:

366

Trainingsgebiete, die im jeweiligen Bild enthalten sind (wolken abgezogen):

192

Anzahl der jeweiligen Klassen:

MISCH\_Laub: 37

MISCH\_Nadel: 28

LAUB: 41

NADEL\_Jung: 38

NADEL\_Alt 48

R <sup>2</sup>	original				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.073	0.300	0.533	0.031	0.089
Band 2	0.648	0.730	0.521	0.334	0.303
Band 3	0.567	0.671	0.579	0.149	0.152
Band 4	0.286	0.659	0.385	0.387	0.422
Band 5	0.352	0.268	0.513	0.055	0.051
Band 6	0.125	0.128	0.565	0.016	0.006



k	Original				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	2.89	6.075	4.51	1.87	3.67
Band 2	5.06	4.654	4.92	3.93	3.09
Band 3	5.15	5.845	4.13	2.96	2.39
Band 4	27.07	24.653	73.19	41.42	27.78
Band 5	16.28	15.012	48.22	14.34	7.60
Band 6	4.08	3.876	13.36	2.67	0.80

c_v	Original				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.031	0.034	0.018	0.028	0.034
Band 2	0.043	0.041	0.046	0.043	0.038
Band 3	0.063	0.070	0.048	0.063	0.053
Band 4	0.118	0.091	0.159	0.113	0.095
Band 5	0.119	0.134	0.131	0.152	0.115
Band 6	0.148	0.141	0.114	0.160	0.110

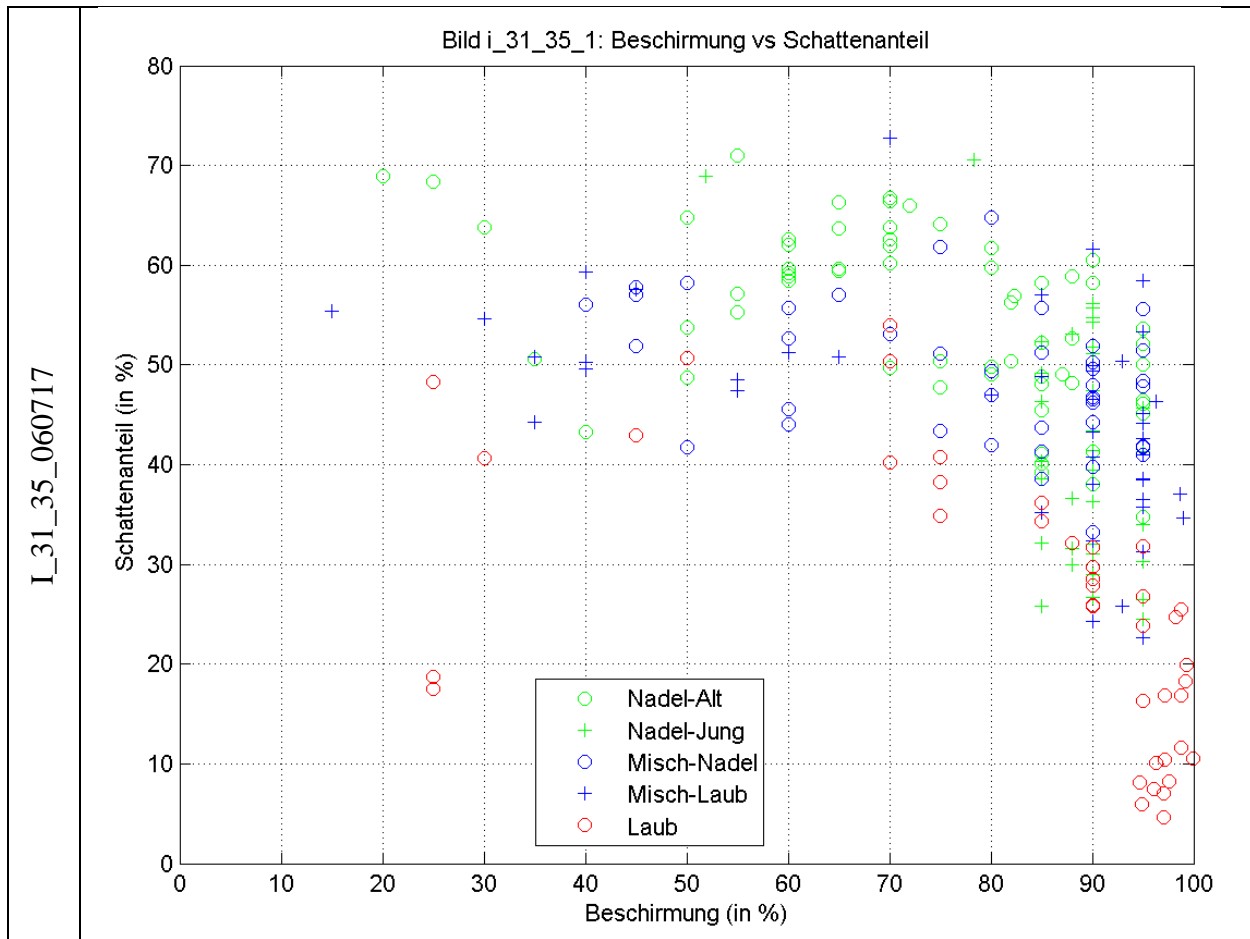
---

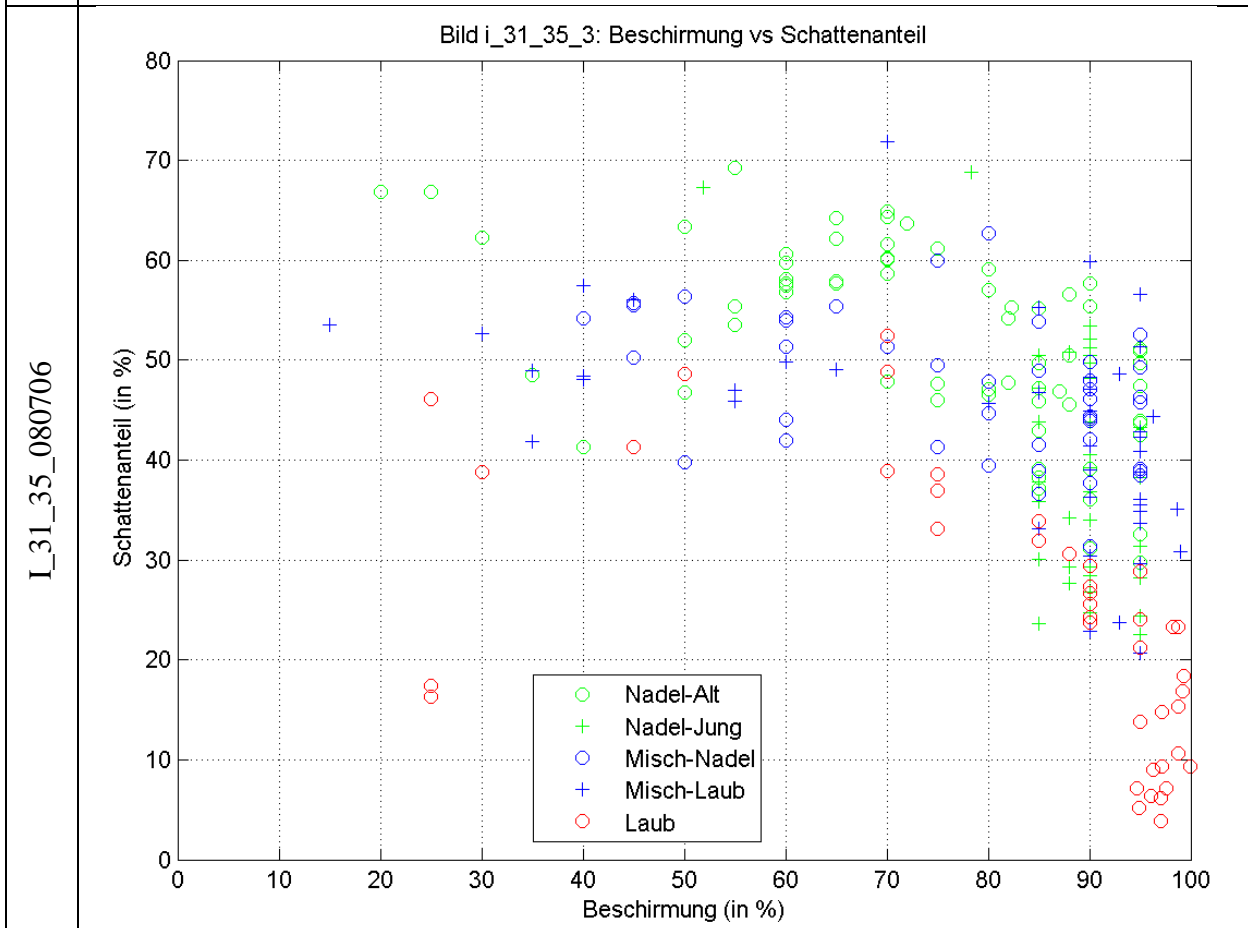
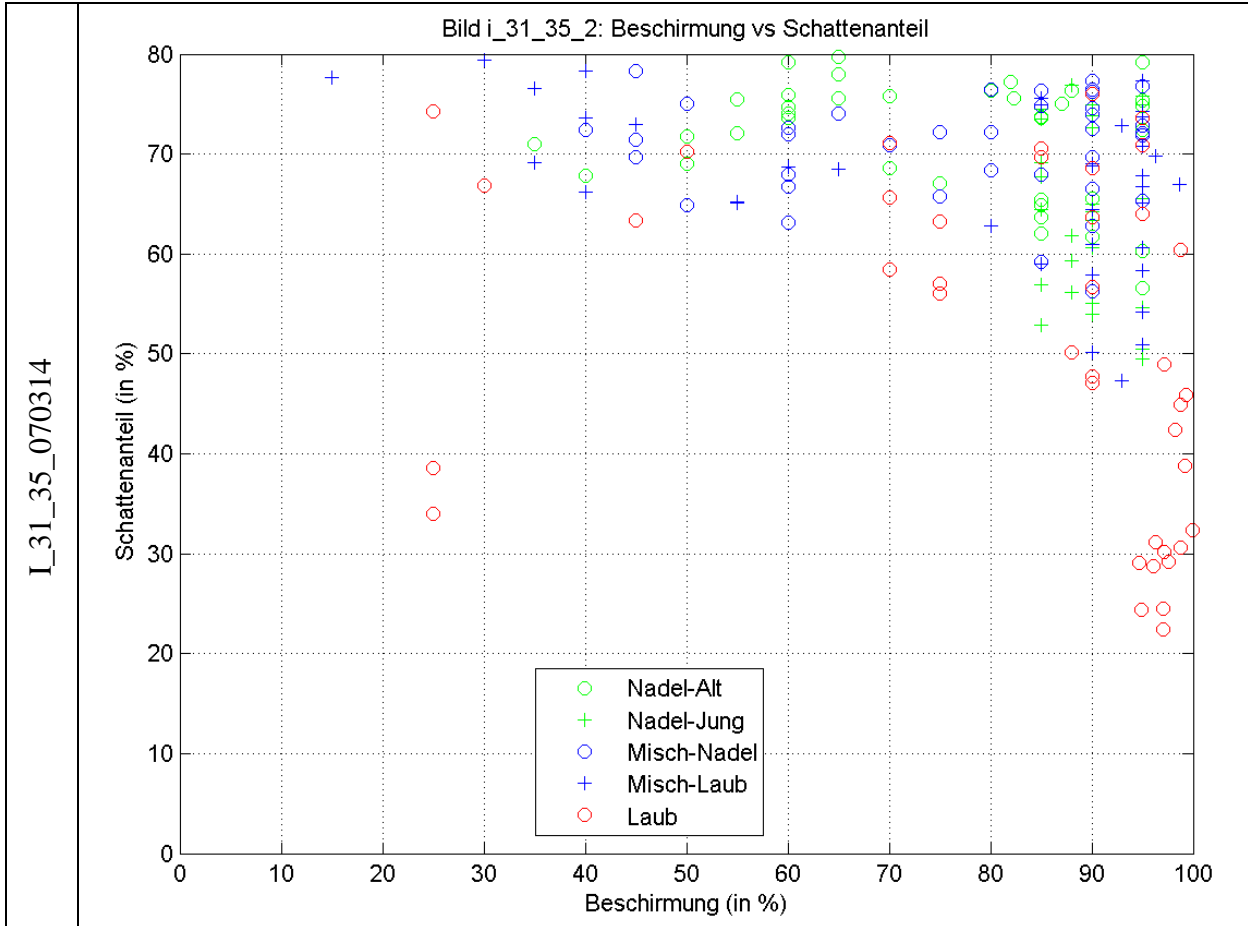


---

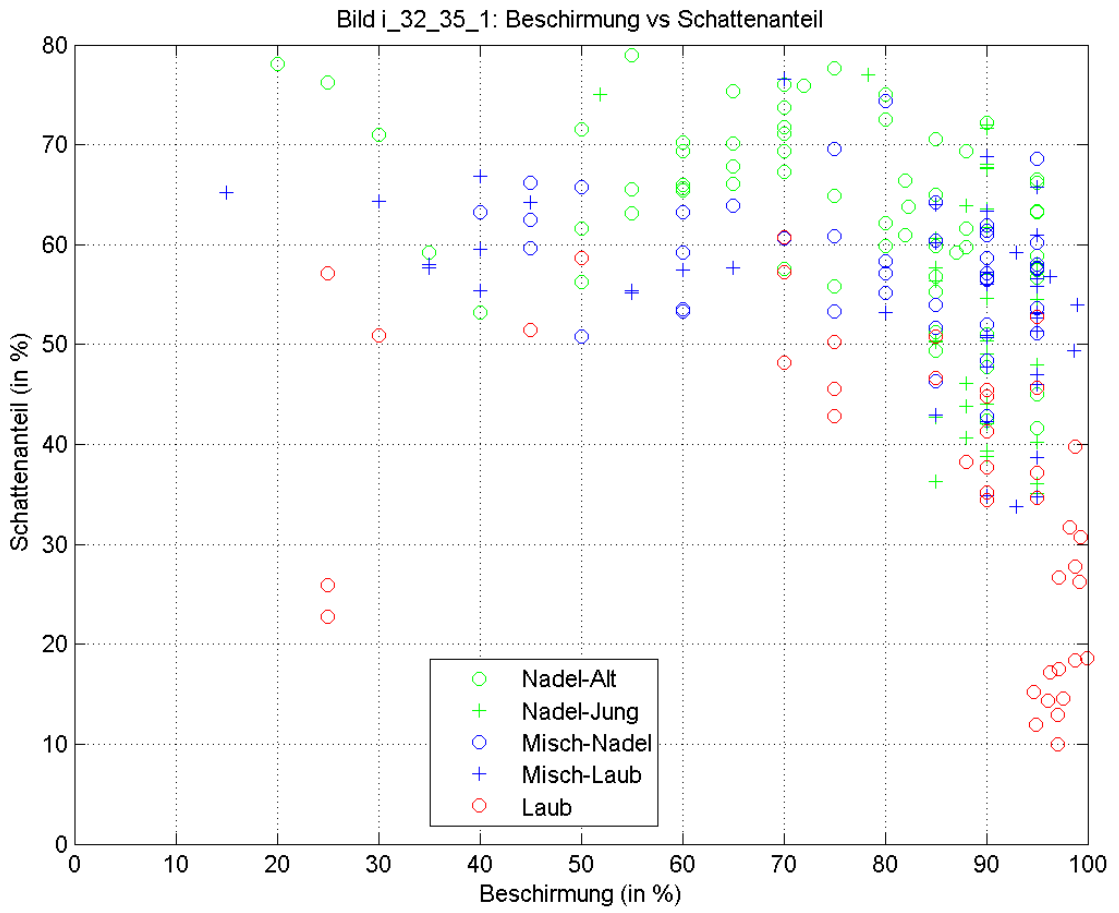
**Anhang B:** Analysen unter Zuhilfenahme der Schattensimulationen

- Schattenanteil vs. Beschirmungsgrad

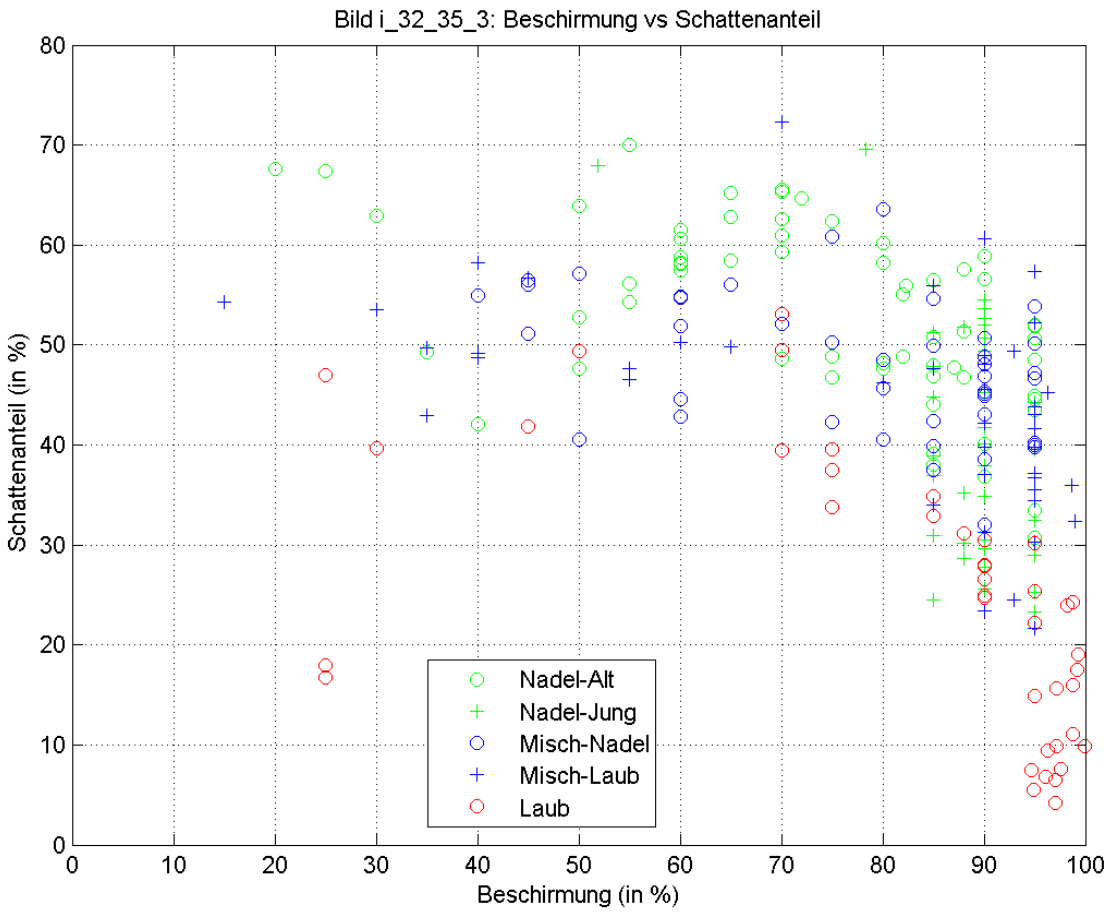


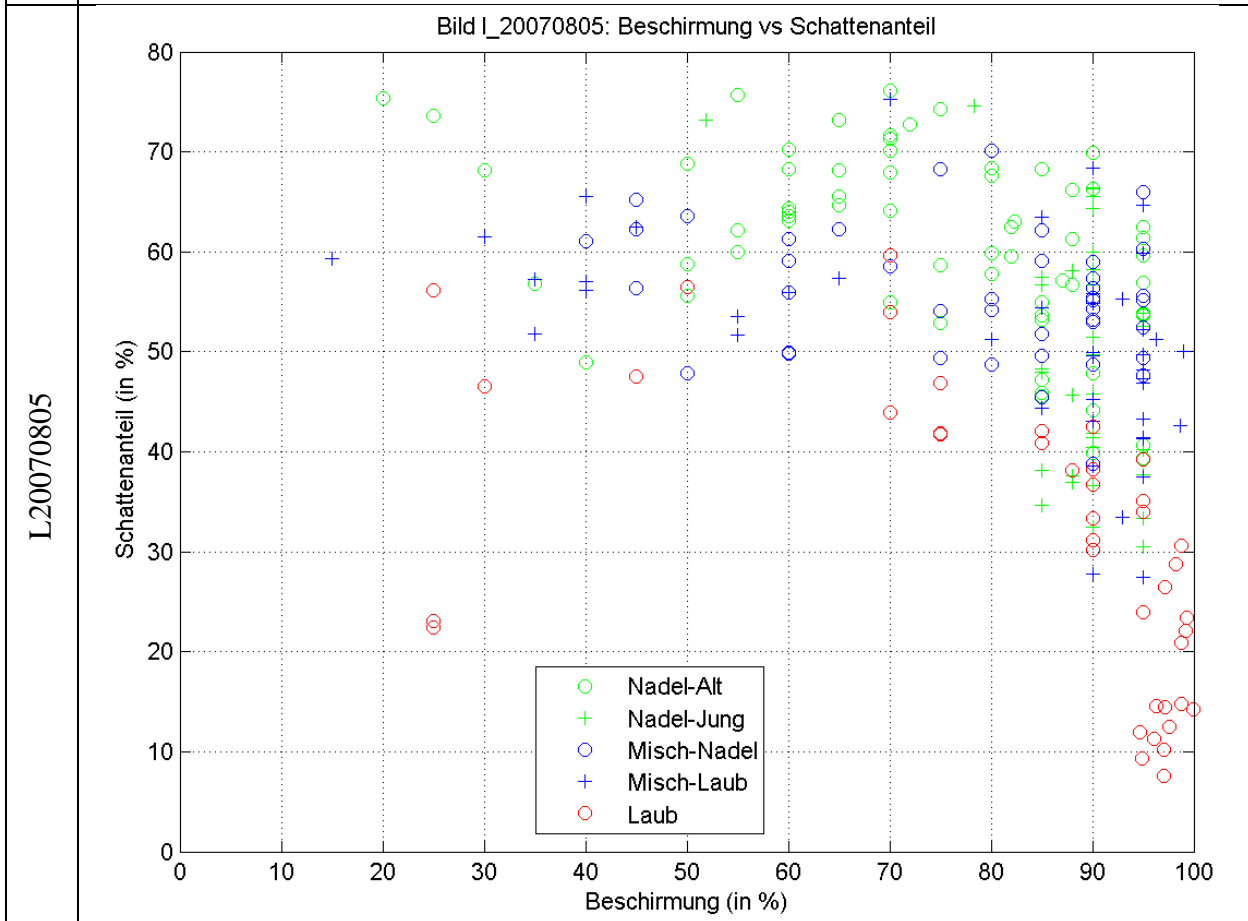
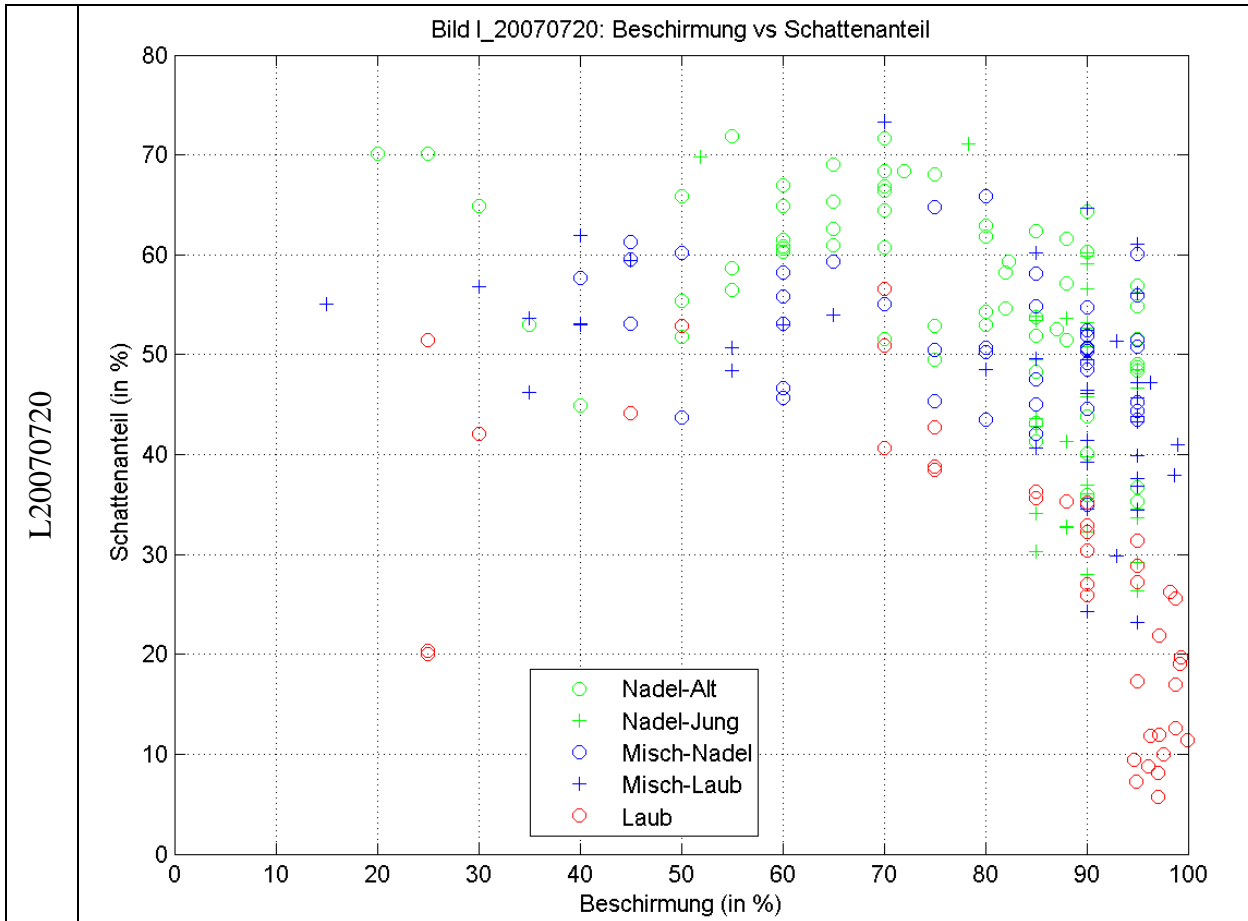


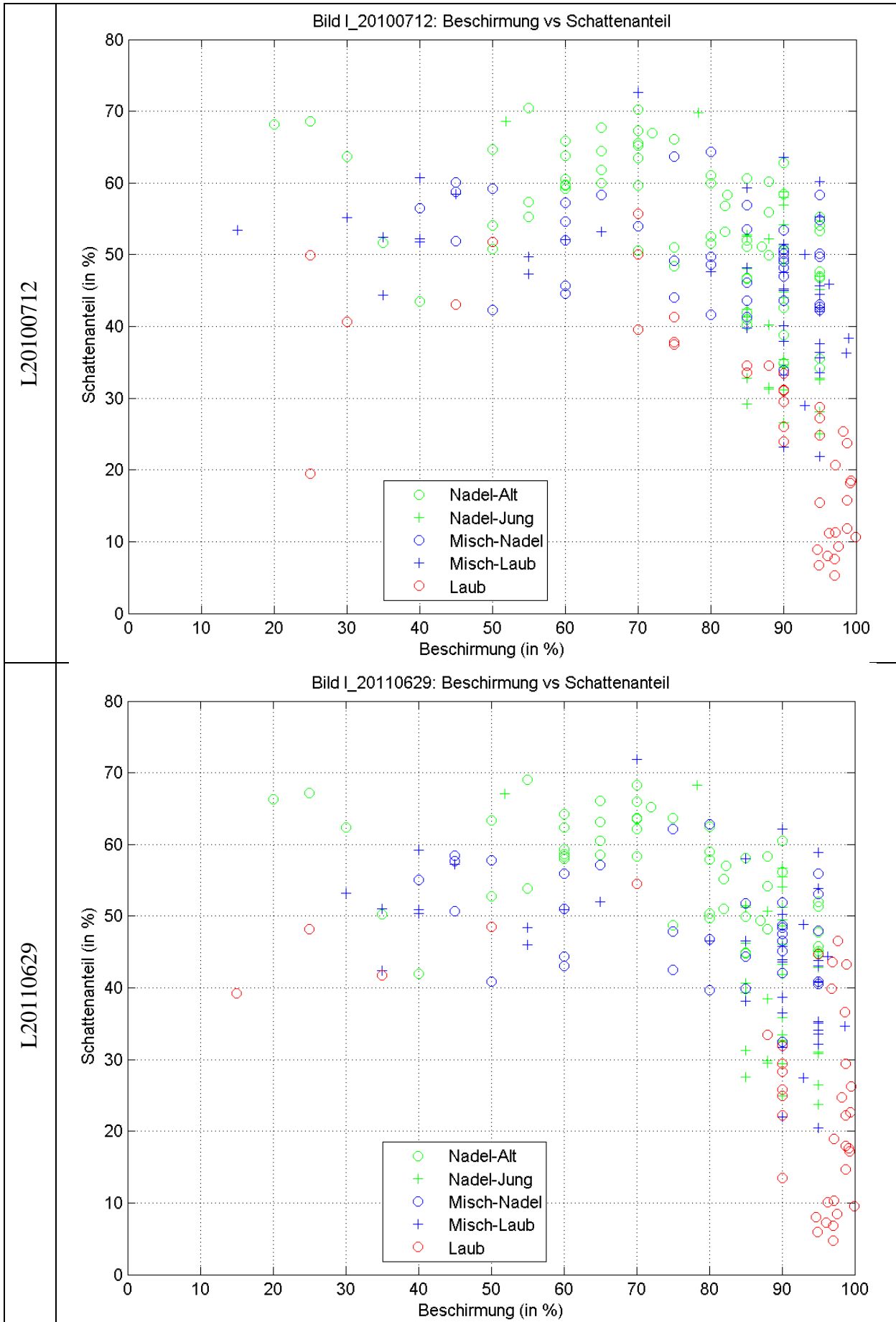
I\_32\_35\_050422



I\_32\_35\_080711

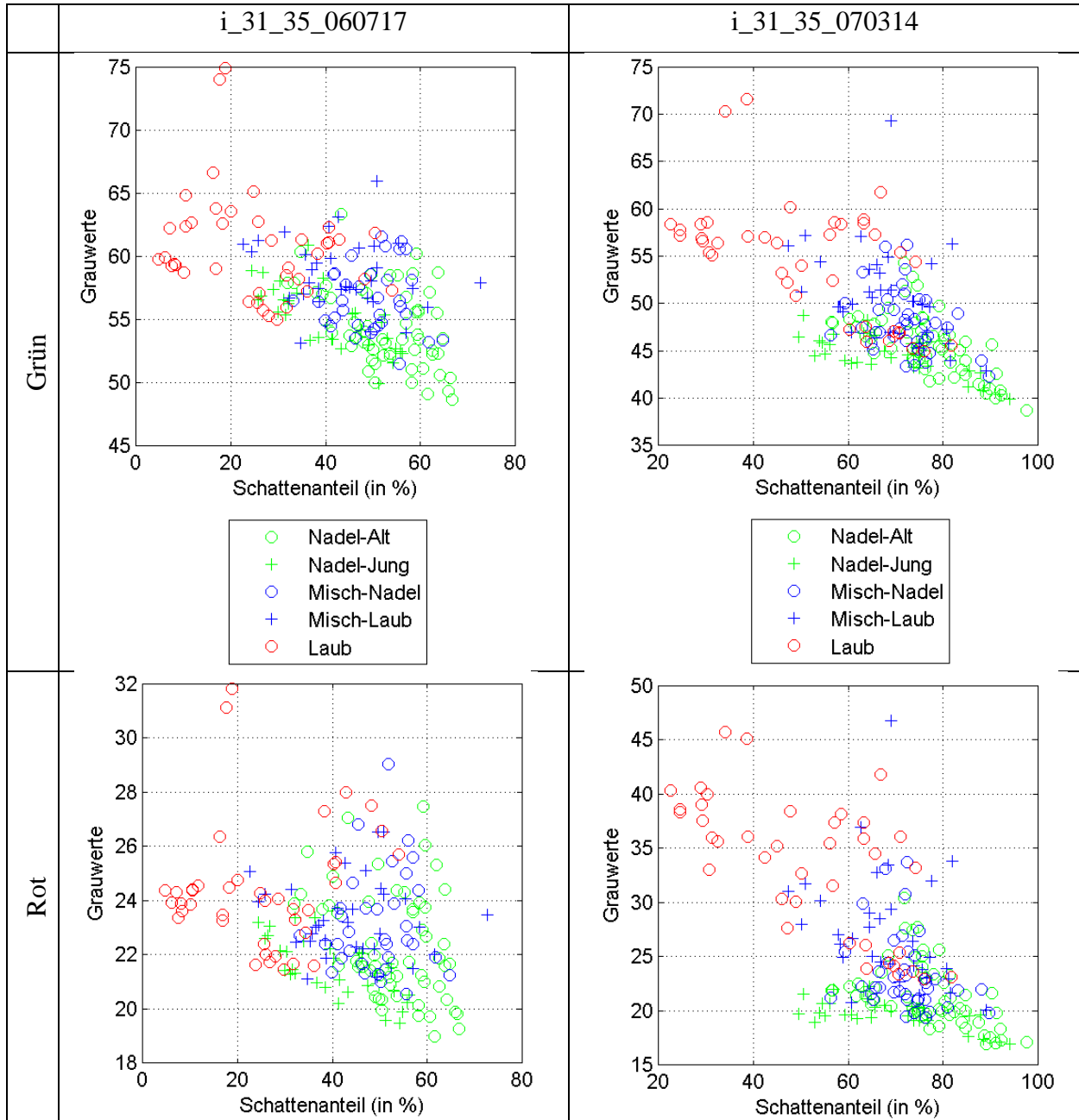


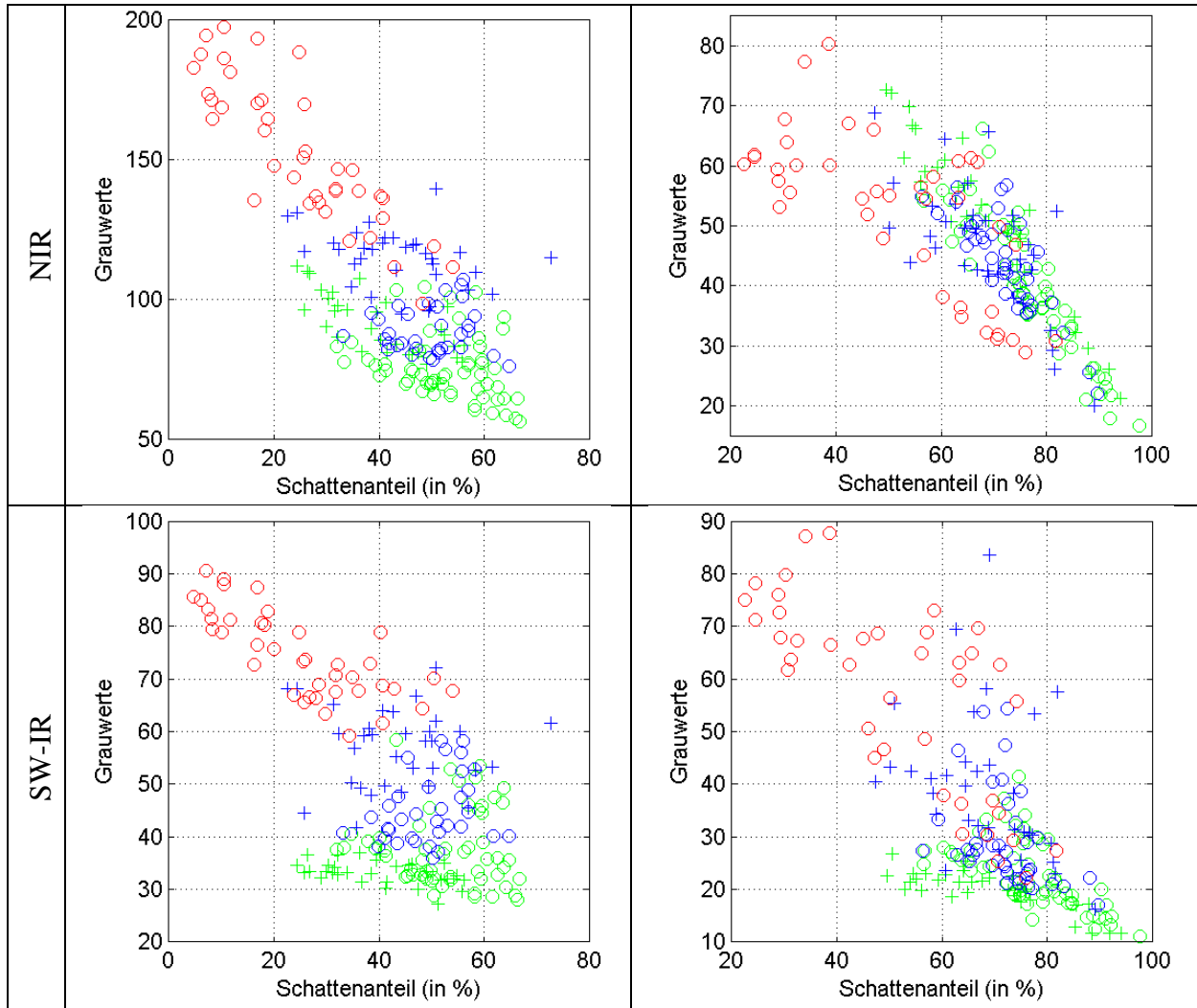




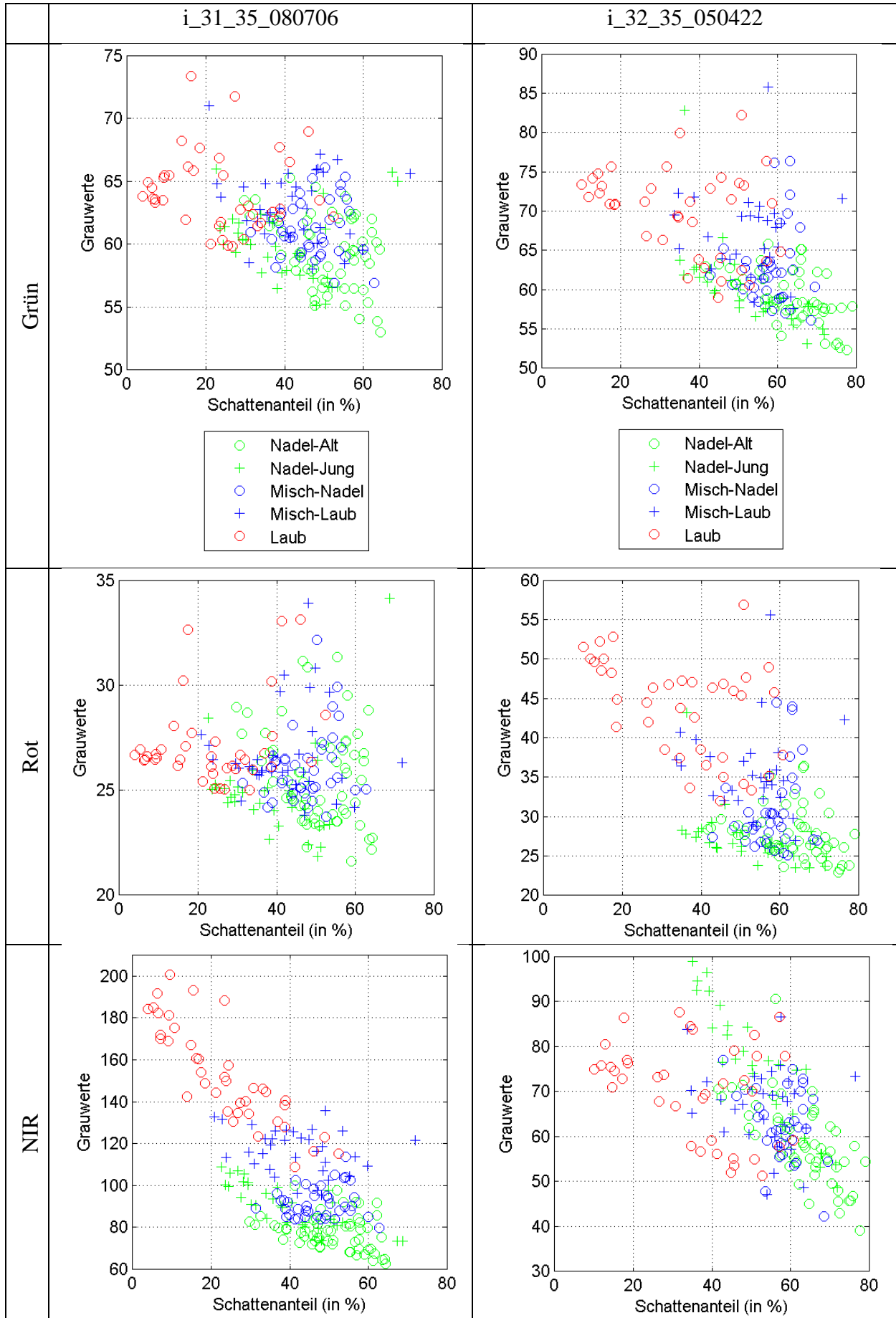
- Grauwert vs. Schattenanteil

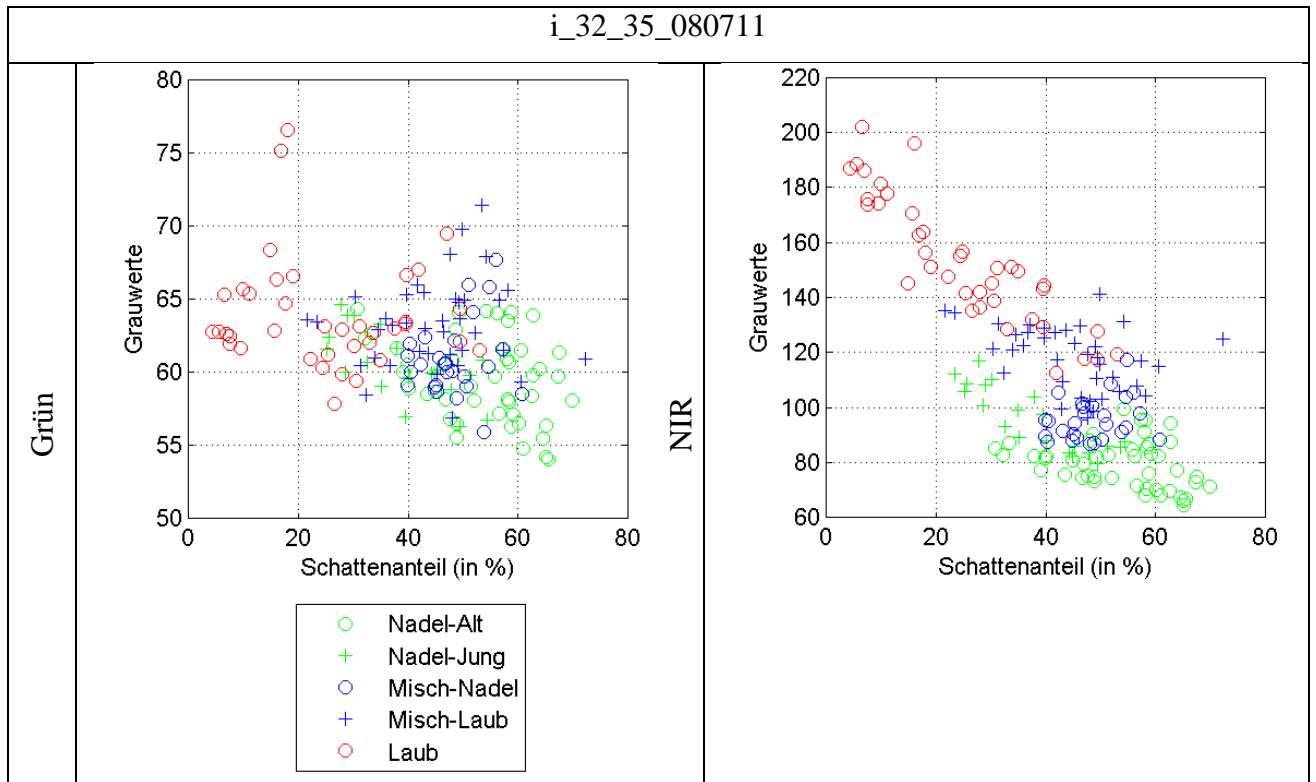
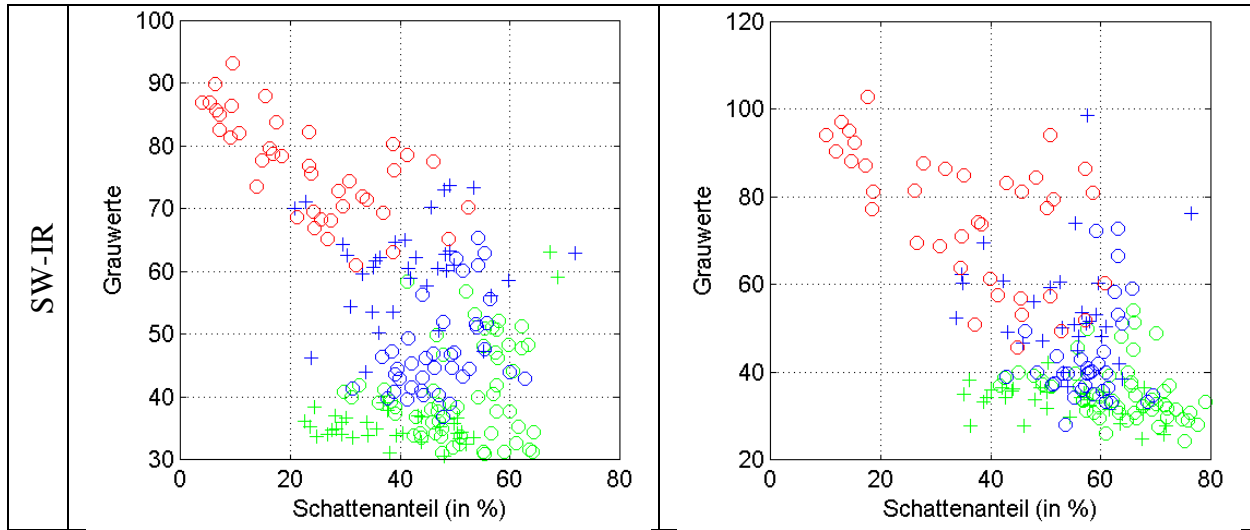
- IRS-Szenen

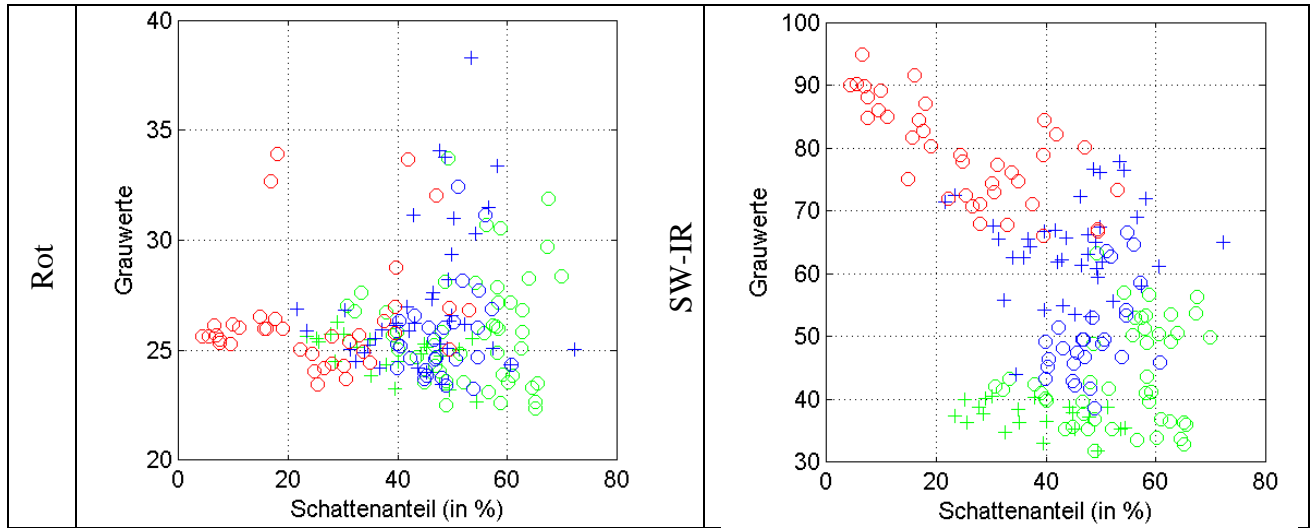




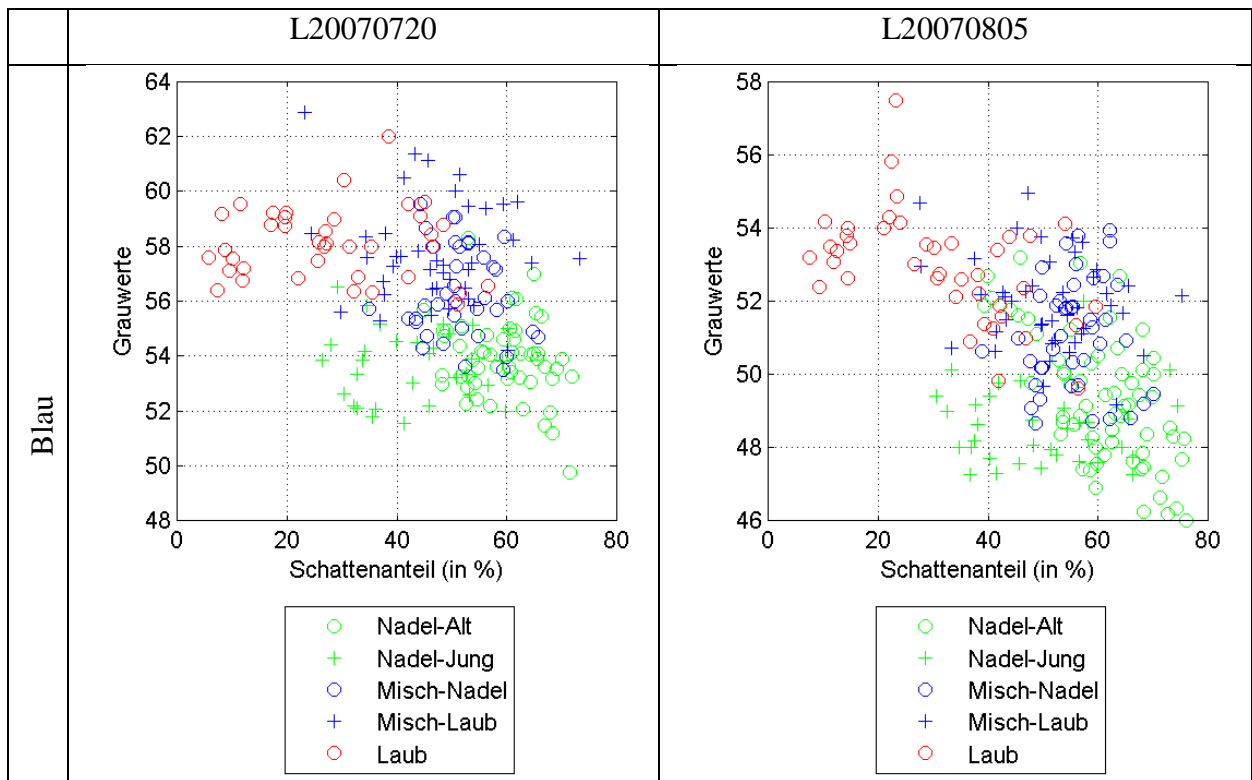


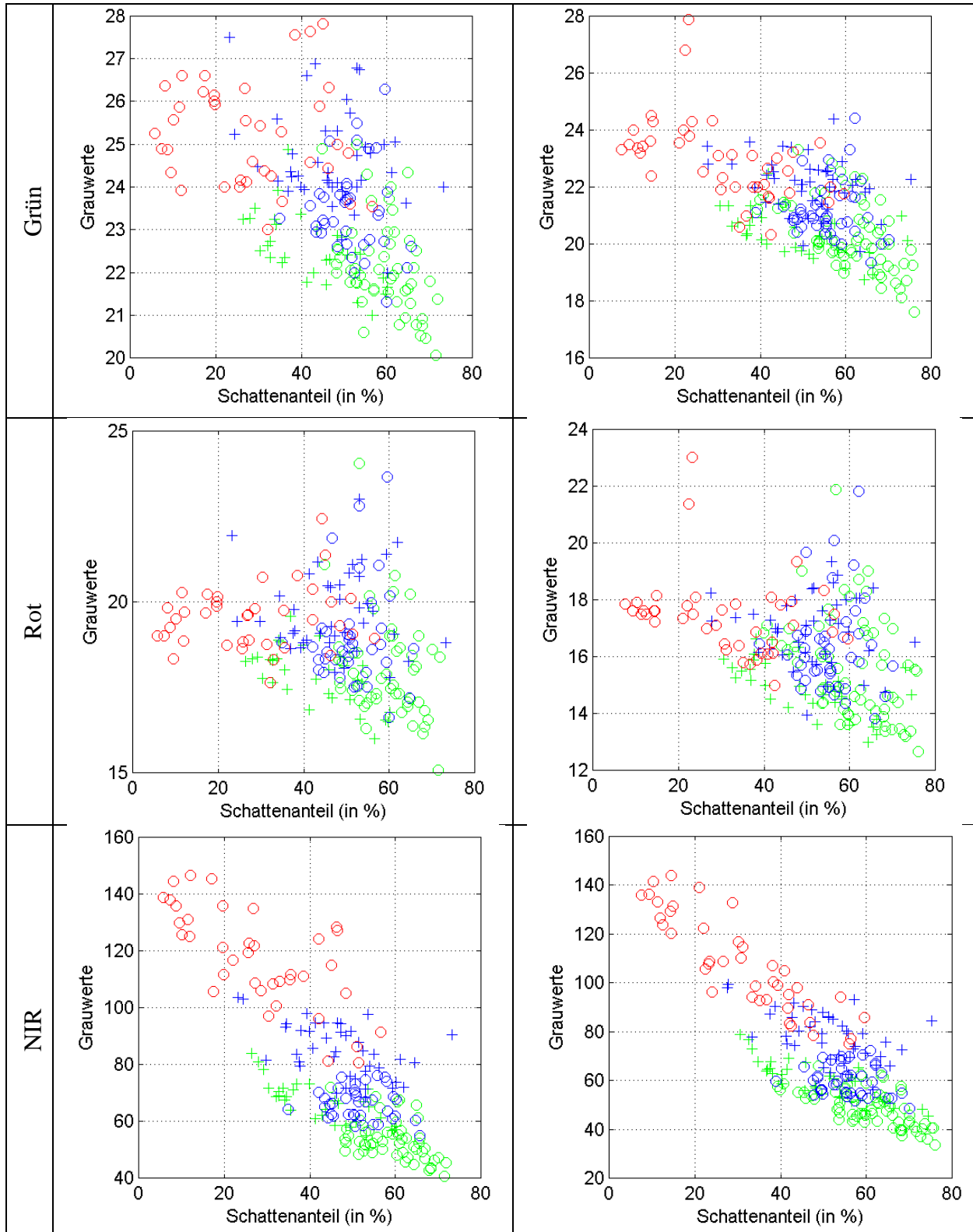


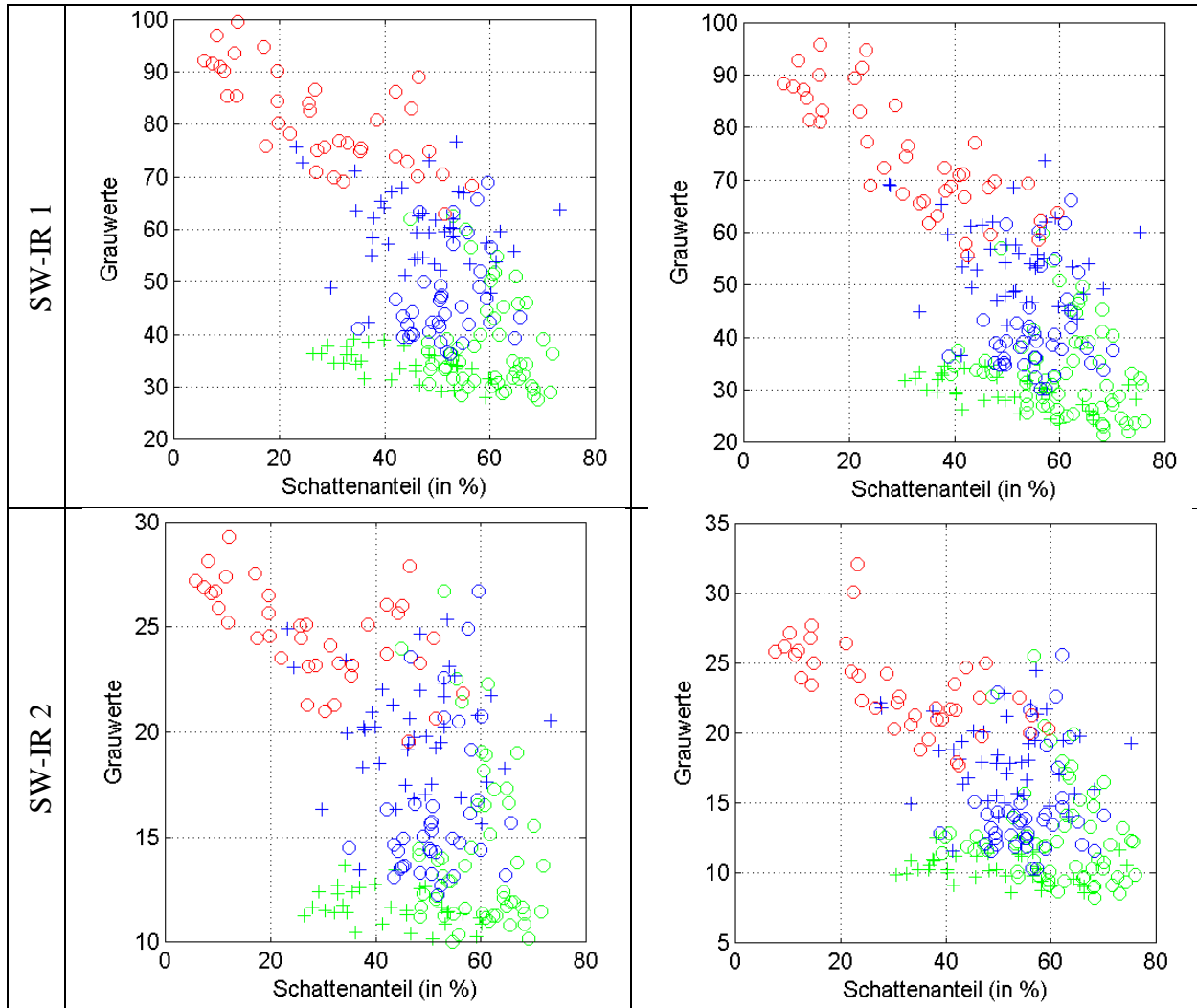


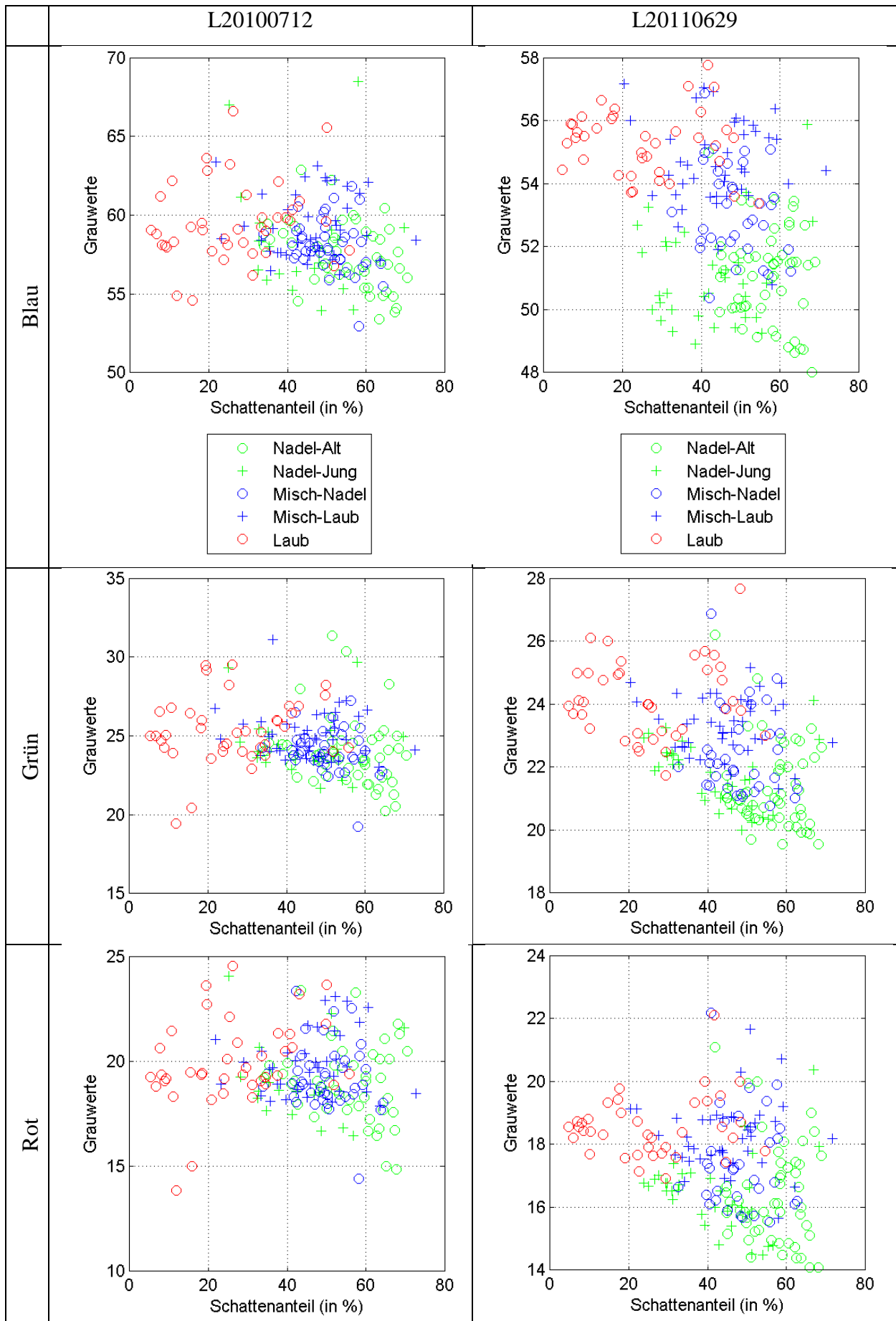


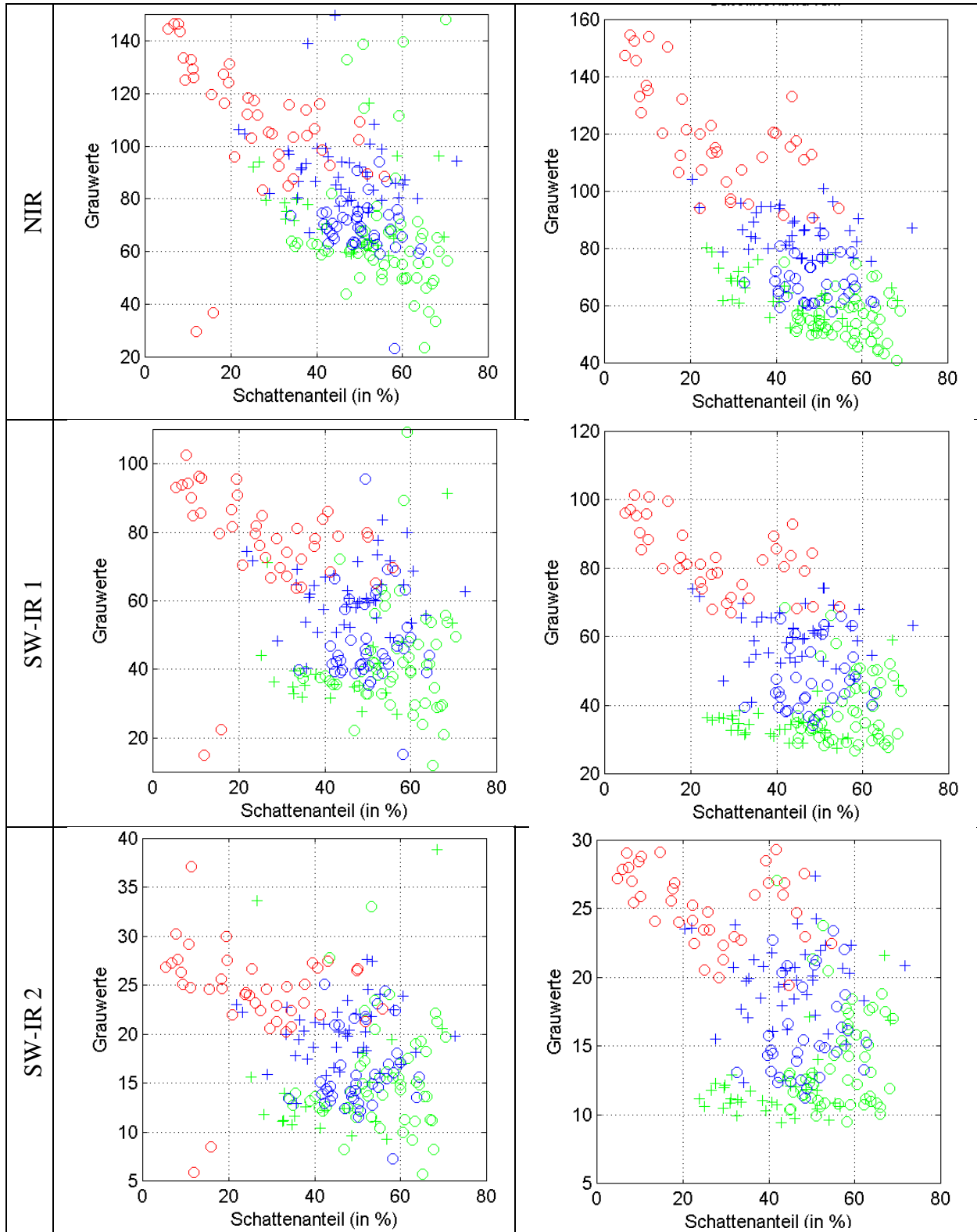
○ Landsat-Szenen:



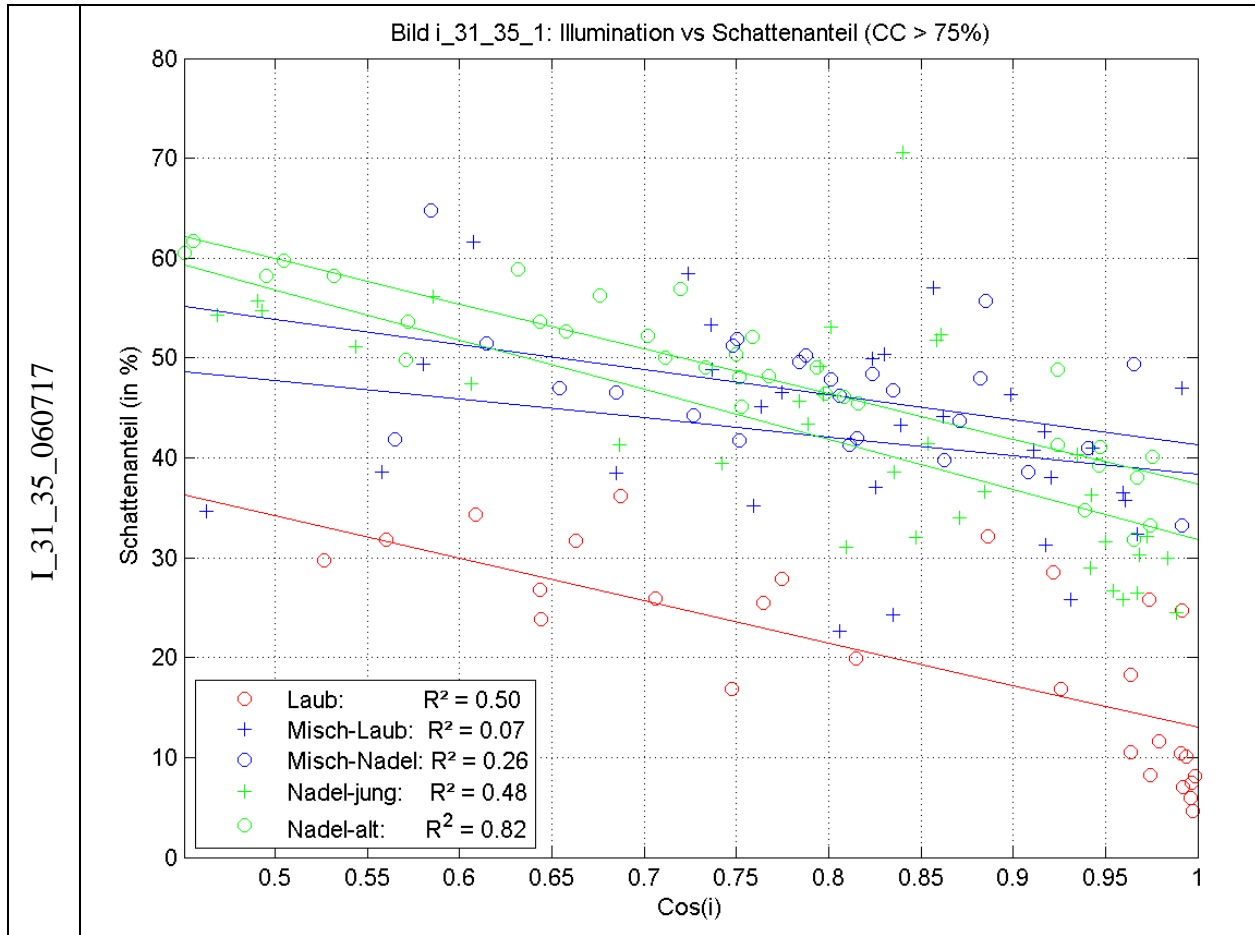




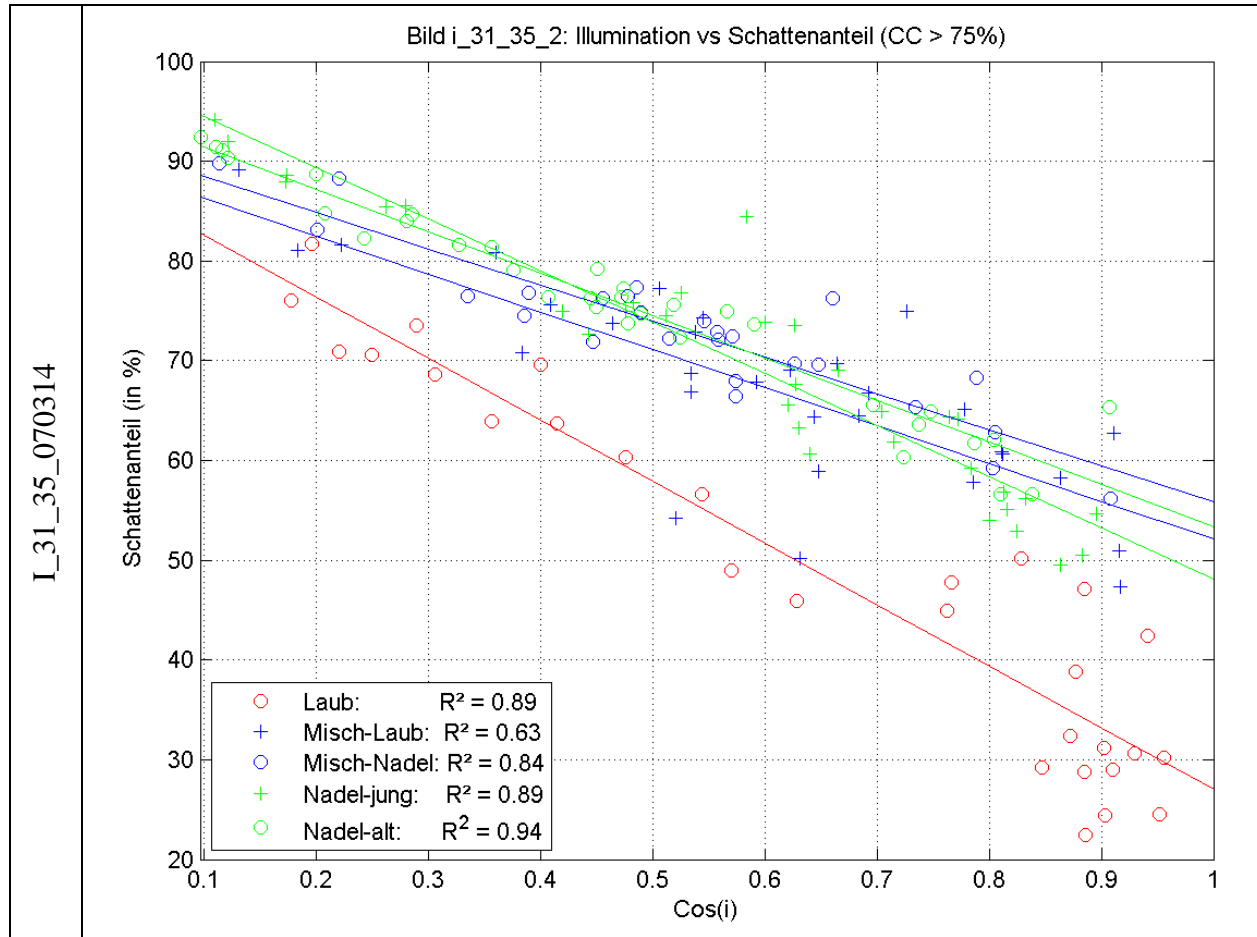


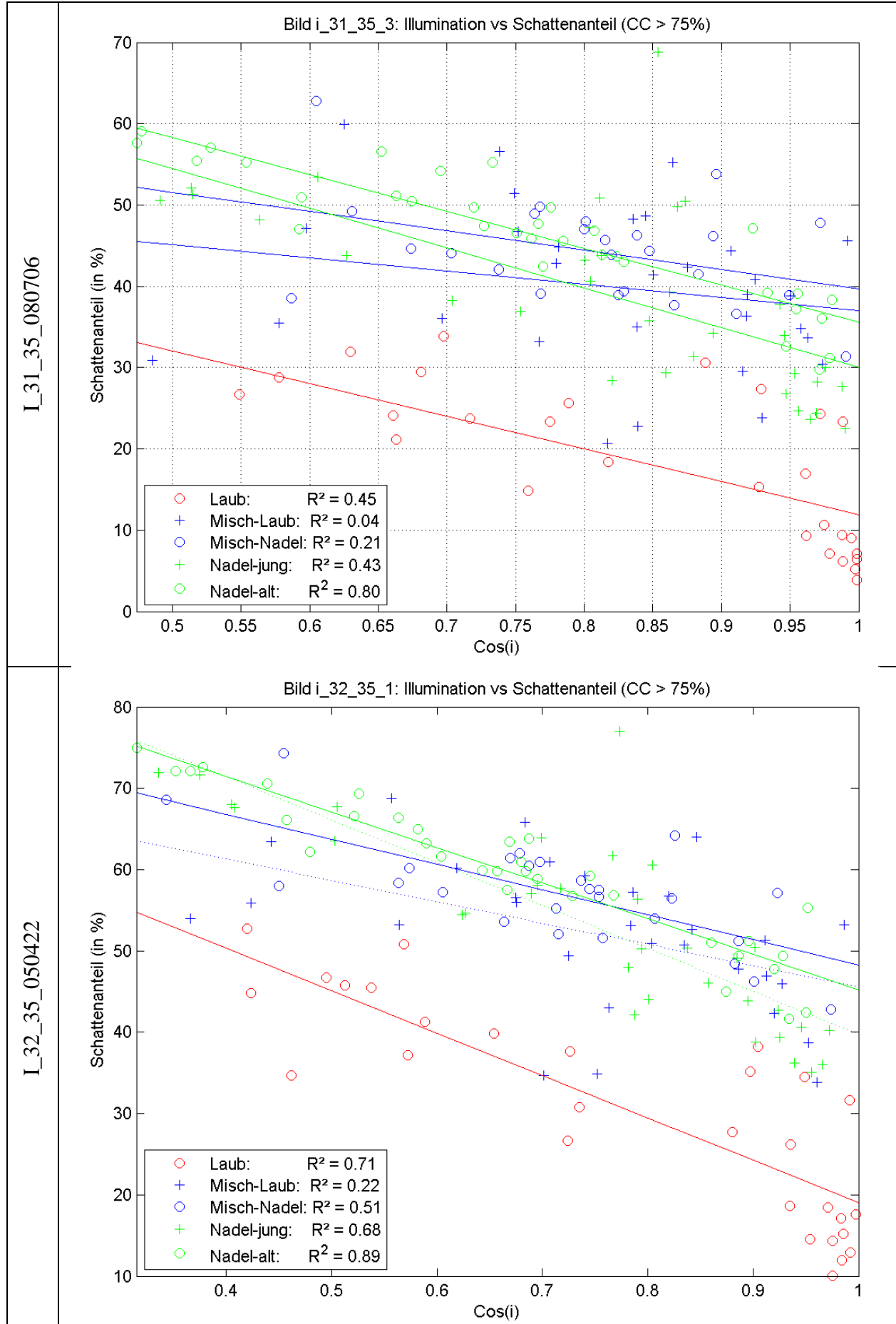


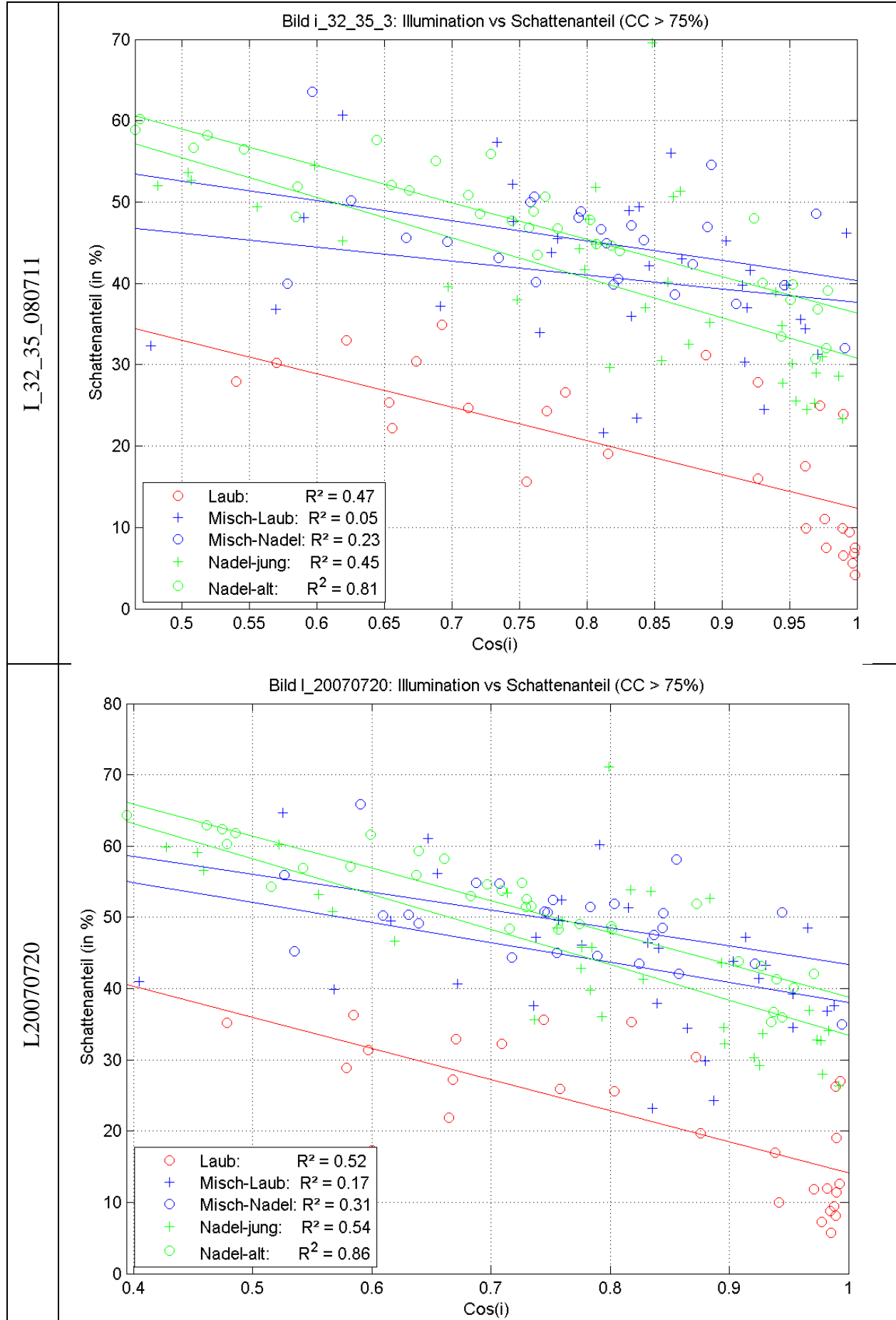
• Schattenanteil vs. Illumination

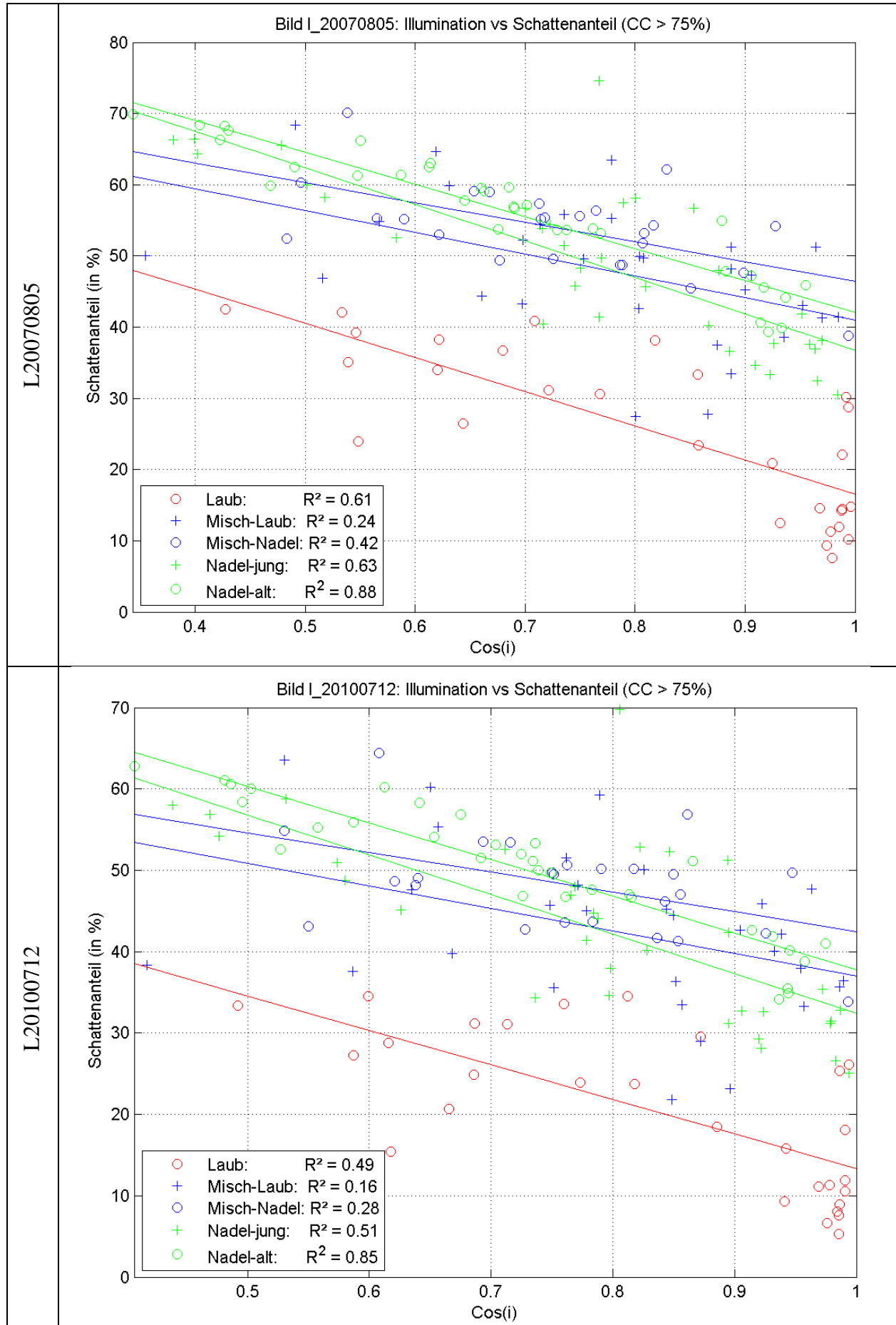


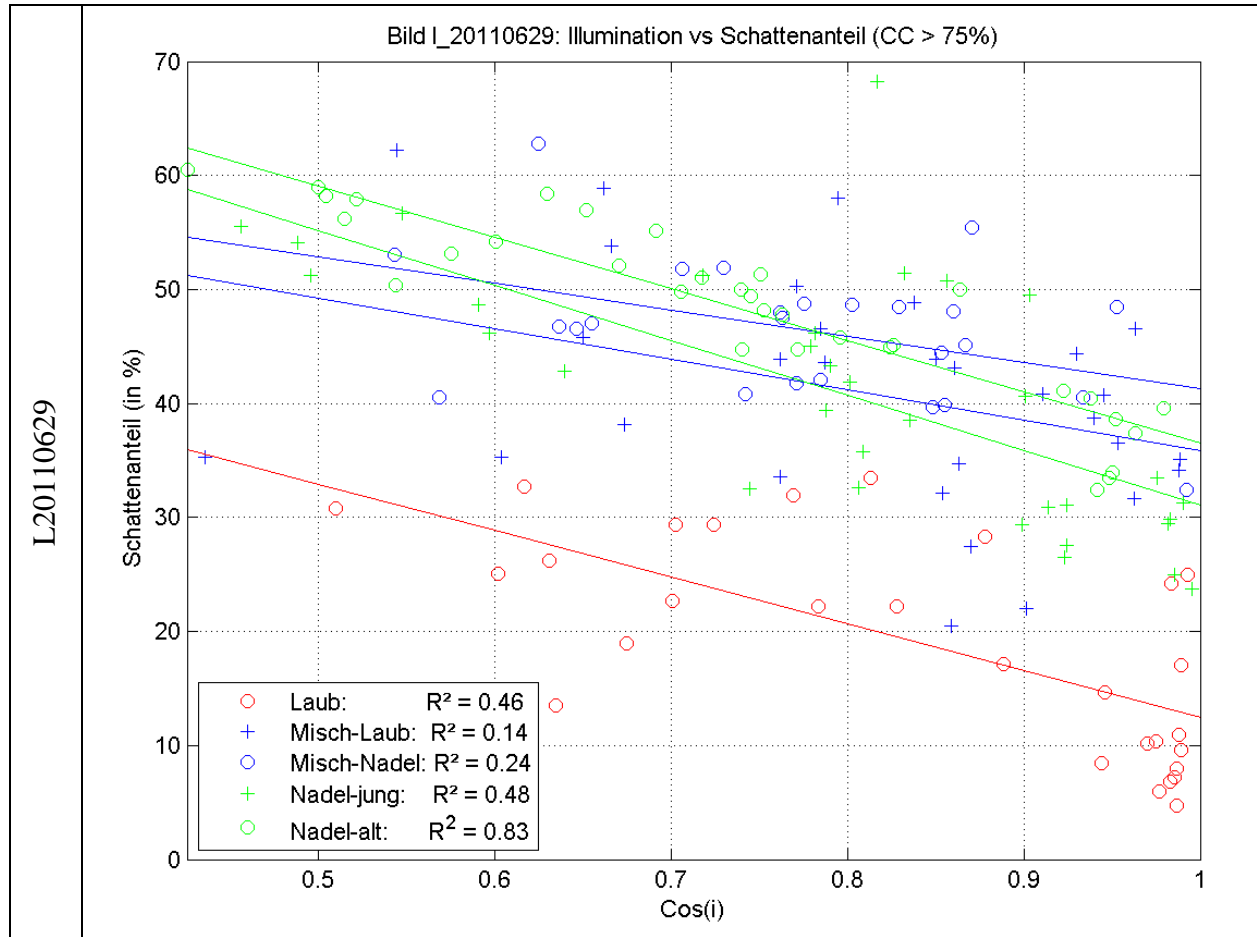






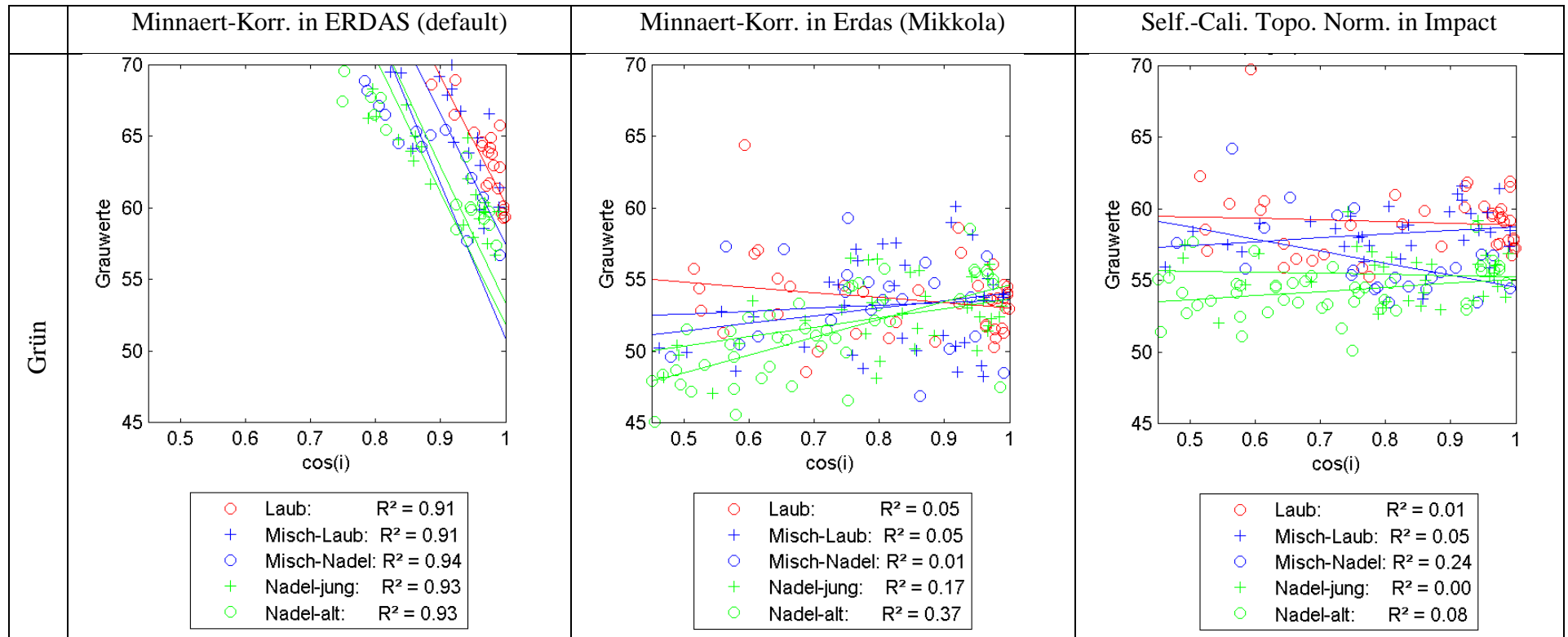


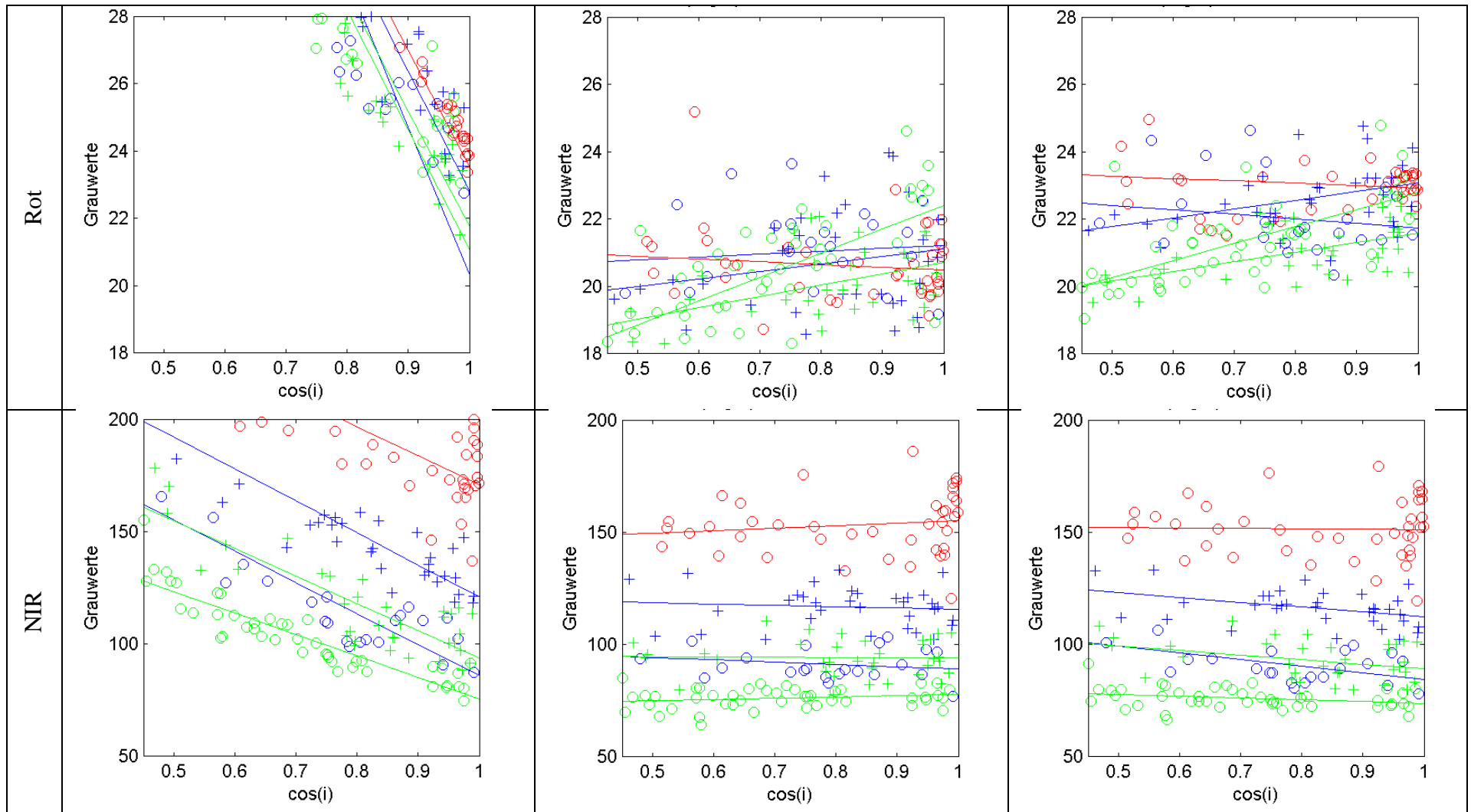


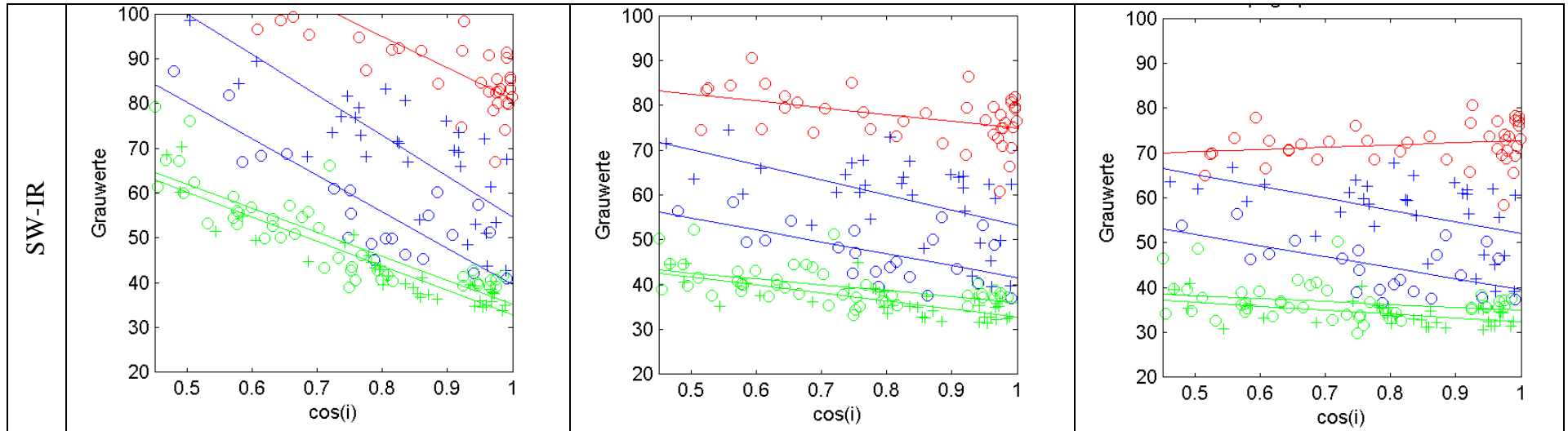


**Anhang C:** Evaluierung der verschiedenen topographischen Normalisierungen

- IRS-Szene: i\_31\_35\_060717







- Regressionswerte:

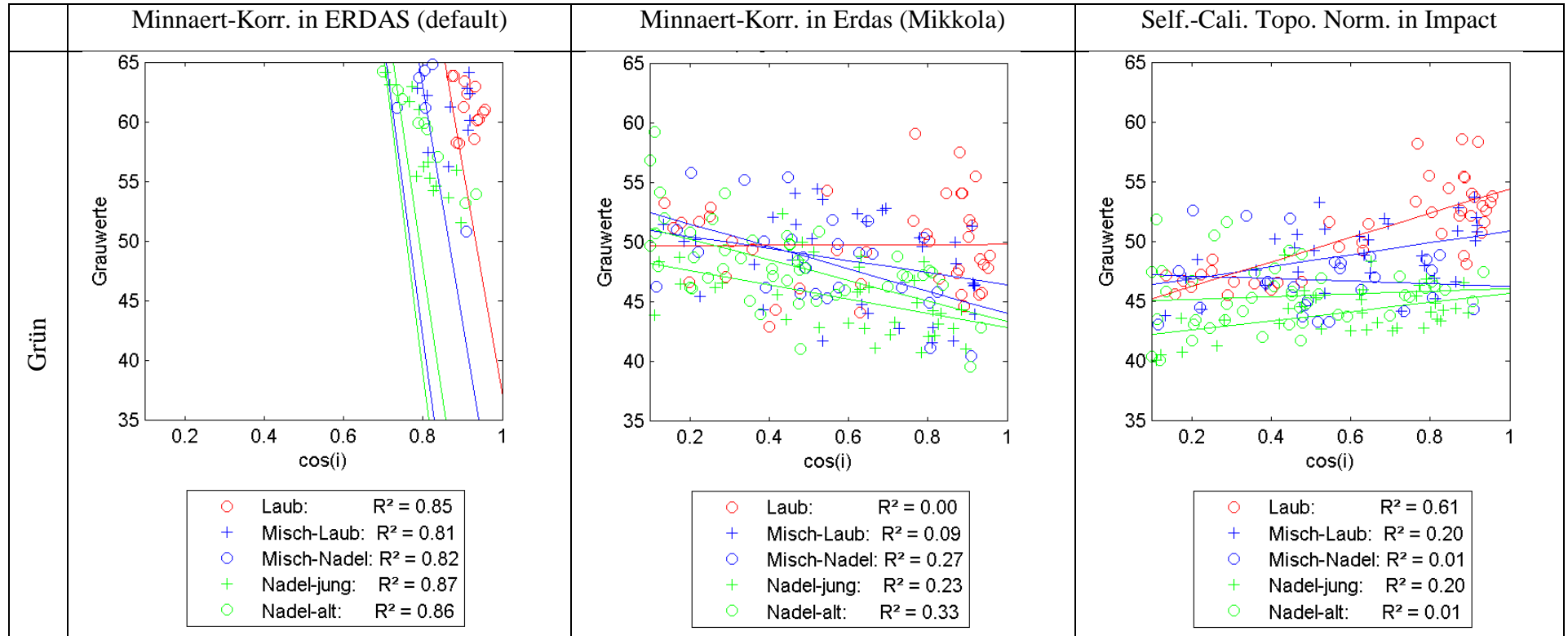
R <sup>2</sup>	Erdas (default)					Erdas (Mikkola)					Impact				
	Minnaert-Corr.					Minnaert-Corr.					Minnaert-Corr.				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.933	0.929	0.911	0.910	0.936	0.167	0.370	0.049	0.052	0.009	0.004	0.076	0.006	0.047	0.240
Band 2	0.936	0.895	0.905	0.891	0.913	0.231	0.443	0.013	0.047	0.008	0.306	0.428	0.012	0.154	0.032
Band 3	0.724	0.823	0.631	0.758	0.759	0.001	0.035	0.019	0.010	0.052	0.124	0.078	0.001	0.168	0.302
Band 4	0.861	0.713	0.766	0.704	0.753	0.533	0.261	0.194	0.291	0.379	0.253	0.066	0.037	0.240	0.364
k	Minnaert-Corr.					Minnaert-Corr.					Minnaert-Corr.				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	-96.45	-93.72	-89.29	-91.384	-109.41	6.53	12.29	-3.62	5.282	1.97	-0.73	2.83	-1.12	2.637	-8.43
Band 2	-35.71	-34.56	-34.76	-35.810	-44.21	3.38	7.14	-0.82	2.251	0.86	2.86	5.07	-0.70	2.597	-1.33
Band 3	-122.45	-95.51	-129.40	-142.203	-138.54	-1.48	5.12	10.95	-5.979	-10.36	-20.43	-7.89	-1.81	-21.928	-30.13
Band 4	-54.93	-53.74	-70.61	-90.628	-81.59	-17.64	-13.22	-15.04	-33.643	-26.62	-8.66	-6.42	5.04	-26.603	-24.65

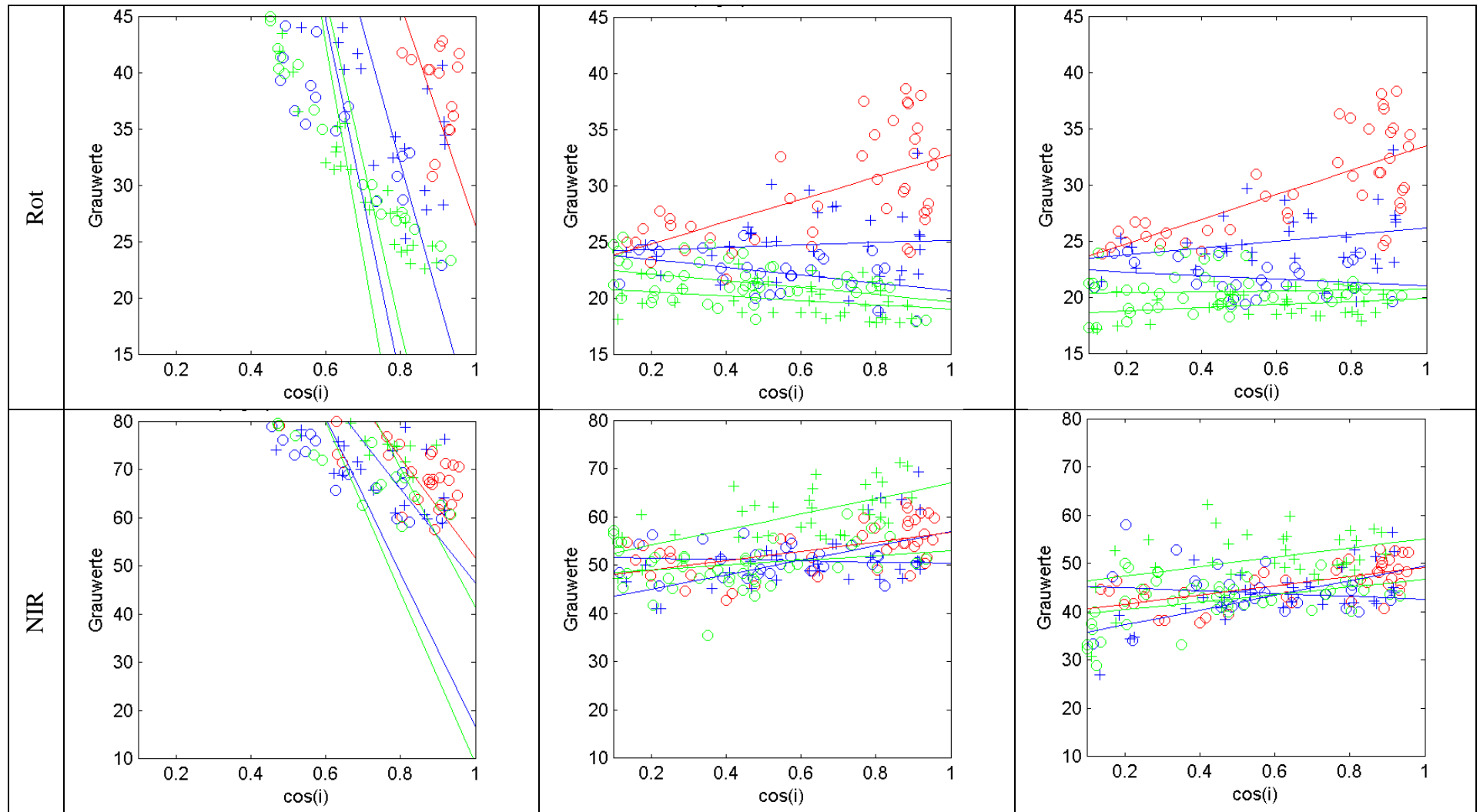


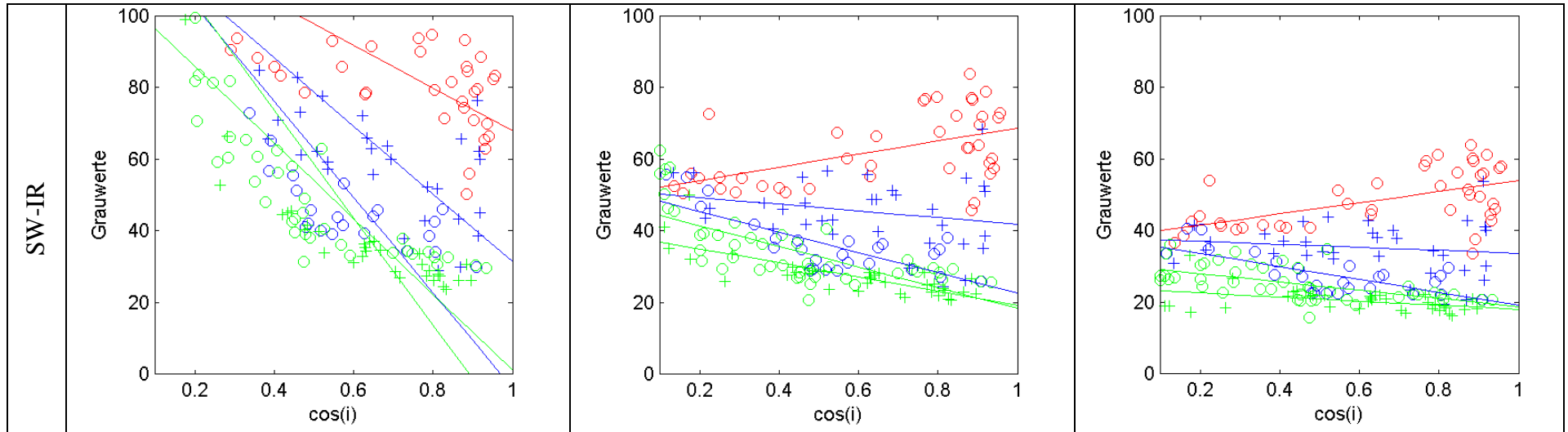
Anhang C

C_V	Minnaert-Corr.					Minnaert-Corr.					Minnaert-Corr.				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.215	0.202	0.210	0.188	0.228	0.047	0.065	0.051	0.064	0.061	0.033	0.031	0.042	0.031	0.047
Band 2	0.204	0.189	0.211	0.189	0.232	0.054	0.087	0.058	0.074	0.068	0.038	0.060	0.046	0.043	0.052
Band 3	0.190	0.168	0.143	0.162	0.207	0.087	0.059	0.087	0.076	0.076	0.096	0.061	0.085	0.067	0.092
Band 4	0.212	0.207	0.147	0.221	0.247	0.103	0.107	0.074	0.153	0.139	0.078	0.111	0.061	0.140	0.138

- IRS-Szene: i\_31\_35\_070314





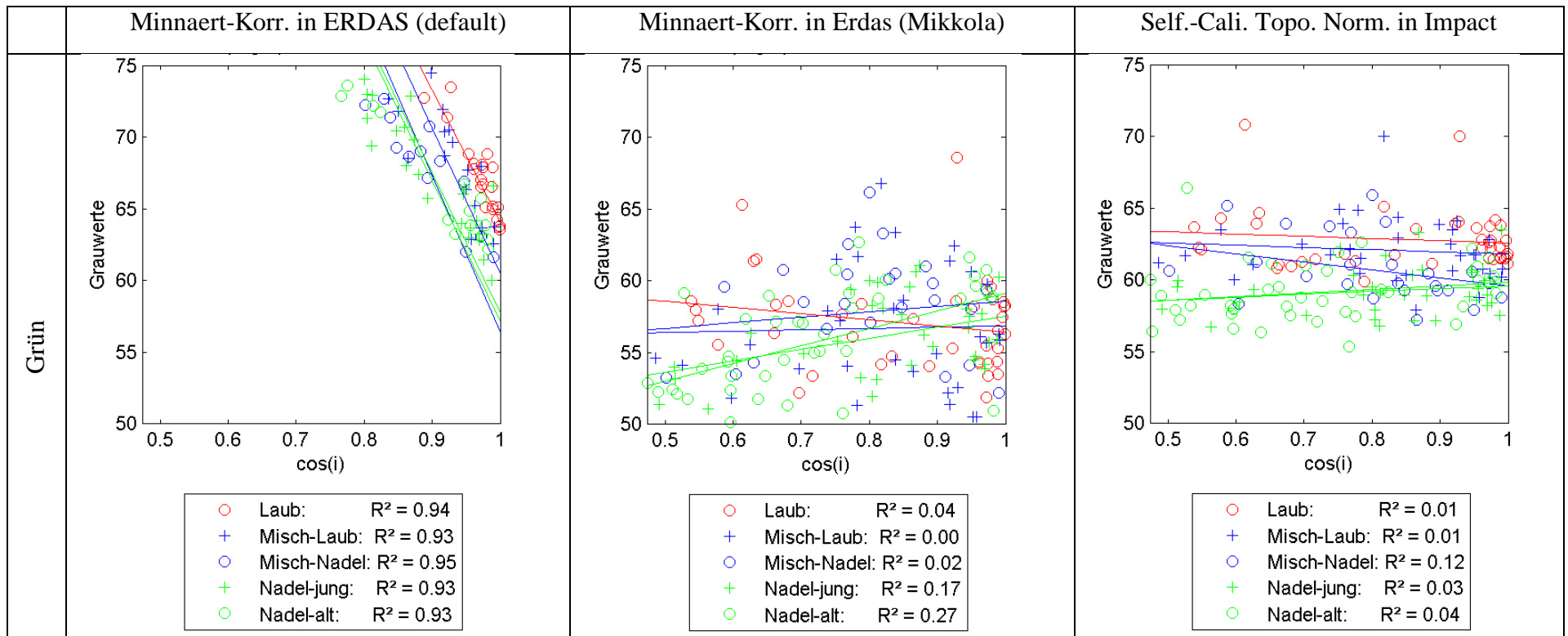


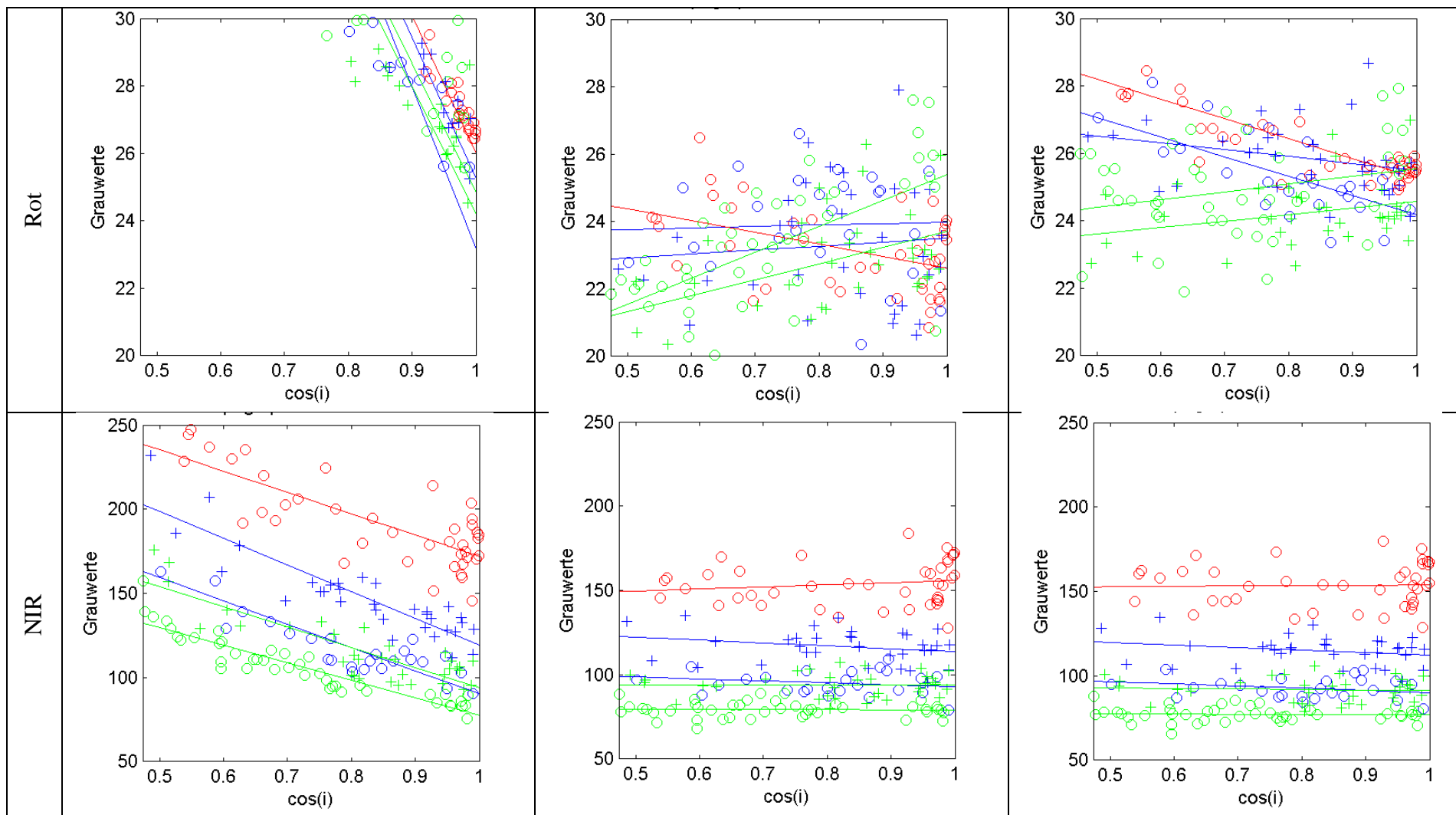
- Regressionswerte:

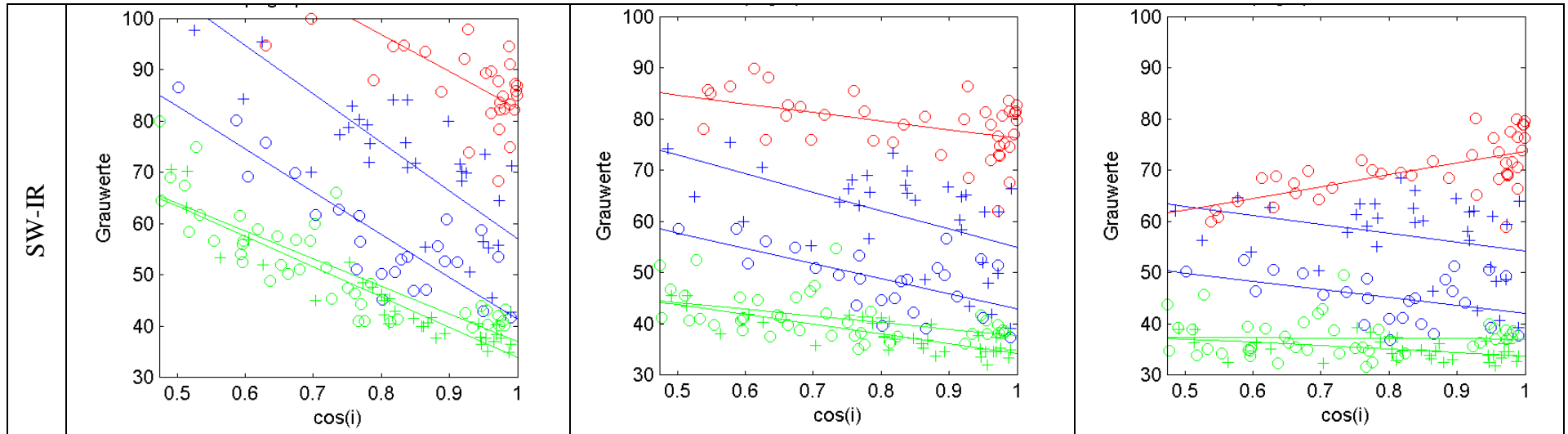
R <sup>2</sup>	Erdas (default)					Erdas (Mikkola)					Impact				
	Minnaert-Corr.					Minnaert-Corr.					Minnaert-Corr.				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.870	0.860	0.851	0.809	0.817	0.228	0.332	0.000	0.090	0.265	0.196	0.010	0.609	0.196	0.007
Band 2	0.766	0.657	0.736	0.656	0.693	0.082	0.164	0.353	0.007	0.166	0.083	0.003	0.485	0.064	0.043
Band 3	0.771	0.684	0.730	0.641	0.733	0.405	0.064	0.289	0.311	0.009	0.141	0.158	0.403	0.404	0.014
Band 4	0.715	0.613	0.589	0.602	0.662	0.608	0.501	0.258	0.056	0.567	0.175	0.341	0.300	0.020	0.499
k	Minnaert-Corr.					Minnaert-Corr.					Minnaert-Corr.				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	-227.09	-263.66	-192.10	-198.160	-247.90	-5.96	-8.66	0.12	-5.054	-9.35	3.87	1.11	10.20	5.020	-1.08
Band 2	-147.03	-190.34	-98.67	-119.195	-160.78	-1.90	-3.05	9.89	1.063	-3.51	1.48	0.38	10.90	2.942	-1.53
Band 3	-145.53	-177.59	-104.63	-97.699	-160.62	16.08	5.06	9.64	14.977	-1.37	9.65	7.86	9.61	15.328	-2.90
Band 4	-105.85	-149.78	-59.40	-94.779	-133.33	-19.71	-28.84	18.31	-9.404	-28.54	-5.69	-11.45	15.58	-4.232	-18.07

C_V	Minnaert-Korr.					Minnaert-Korr.					Minnaert-Korr.				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.591	0.505	0.575	0.528	0.535	0.064	0.075	0.075	0.082	0.080	0.046	0.058	0.073	0.055	0.058
Band 2	0.813	0.764	0.543	0.652	0.733	0.077	0.085	0.161	0.124	0.083	0.061	0.083	0.150	0.110	0.073
Band 3	0.380	0.473	0.399	0.346	0.435	0.096	0.096	0.095	0.124	0.061	0.116	0.113	0.094	0.131	0.117
Band 4	0.654	0.674	0.249	0.429	0.593	0.214	0.283	0.164	0.208	0.225	0.155	0.187	0.166	0.202	0.197

- IRS-Szene: i\_31\_35\_080706





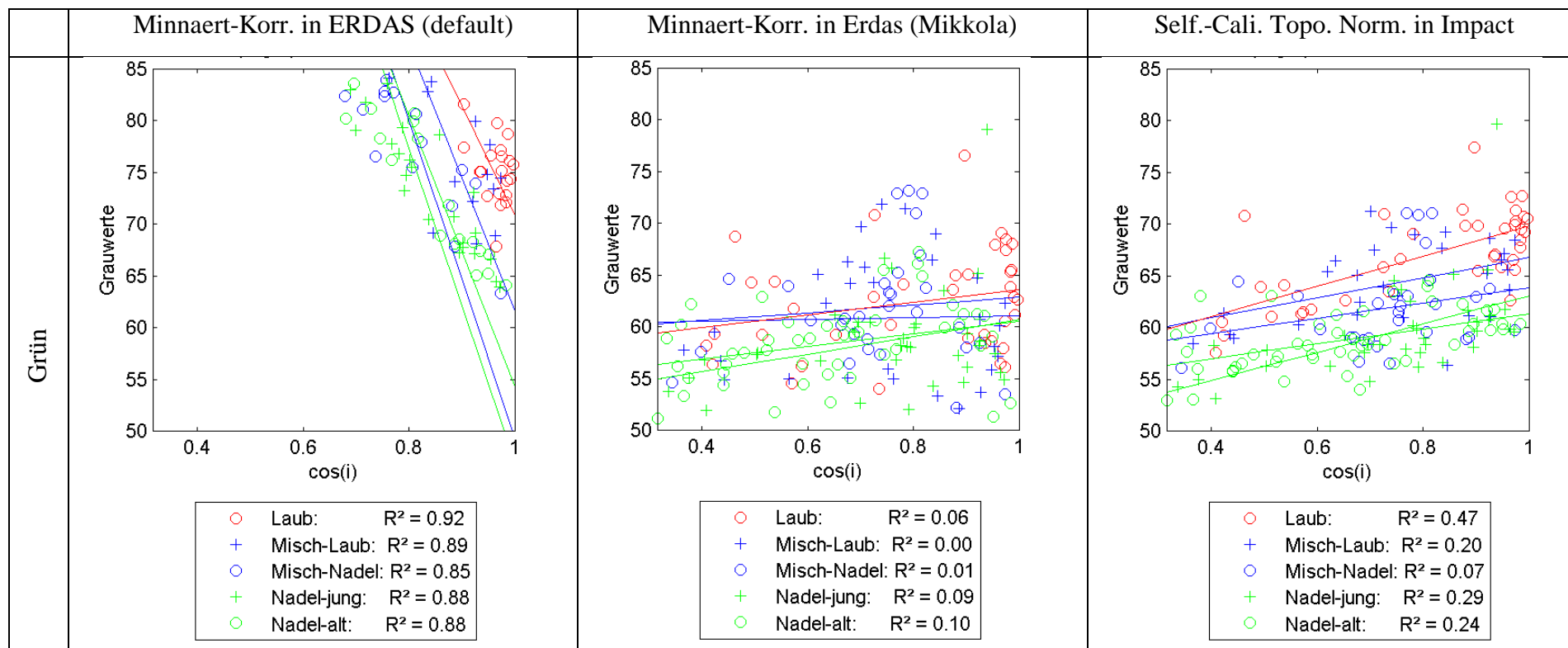


- Regressionswerte:

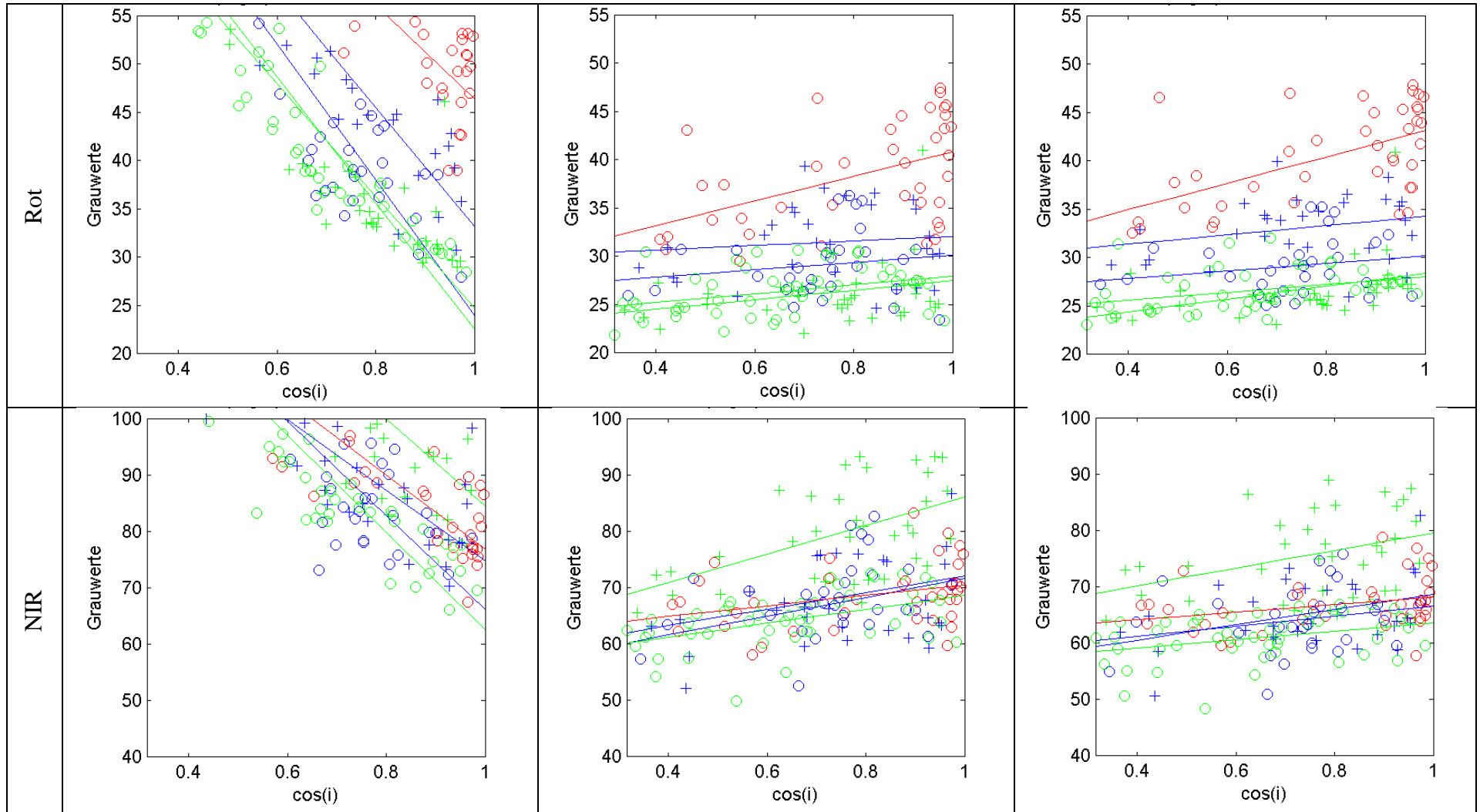
R <sup>2</sup>	Erdas (default)					Erdas (Mikkola)					Impact				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.935	0.928	0.942	0.934	0.945	0.174	0.273	0.044	0.001	0.019	0.030	0.037	0.013	0.009	0.124
Band 2	0.925	0.871	0.963	0.923	0.943	0.223	0.375	0.201	0.008	0.002	0.085	0.069	0.631	0.080	0.469
Band 3	0.733	0.860	0.615	0.790	0.781	0.000	0.001	0.025	0.063	0.052	0.005	0.003	0.001	0.058	0.082
Band 4	0.881	0.705	0.757	0.700	0.760	0.647	0.224	0.217	0.290	0.415	0.217	0.001	0.424	0.103	0.209
k	Minnaert-Corr.					Minnaert-Corr.					Minnaert-Corr.				
Band 1	-98.55	-98.54	-92.70	-102.391	-110.08	7.84	12.23	-4.34	0.944	3.83	2.01	2.47	-1.55	-1.495	-5.69
Band 2	-37.89	-38.58	-40.92	-41.967	-48.27	4.79	7.72	-3.51	1.171	0.44	1.94	2.32	-5.86	-2.018	-5.77
Band 3	-120.24	-104.76	-126.79	-158.966	-138.85	-0.07	-0.78	12.65	-17.699	-11.58	-3.29	-1.52	2.25	-14.802	-12.75
Band 4	-58.96	-53.80	-72.42	-94.777	-83.35	-19.19	-13.09	-16.85	-36.142	-29.73	-6.68	-0.65	22.97	-17.317	-15.80

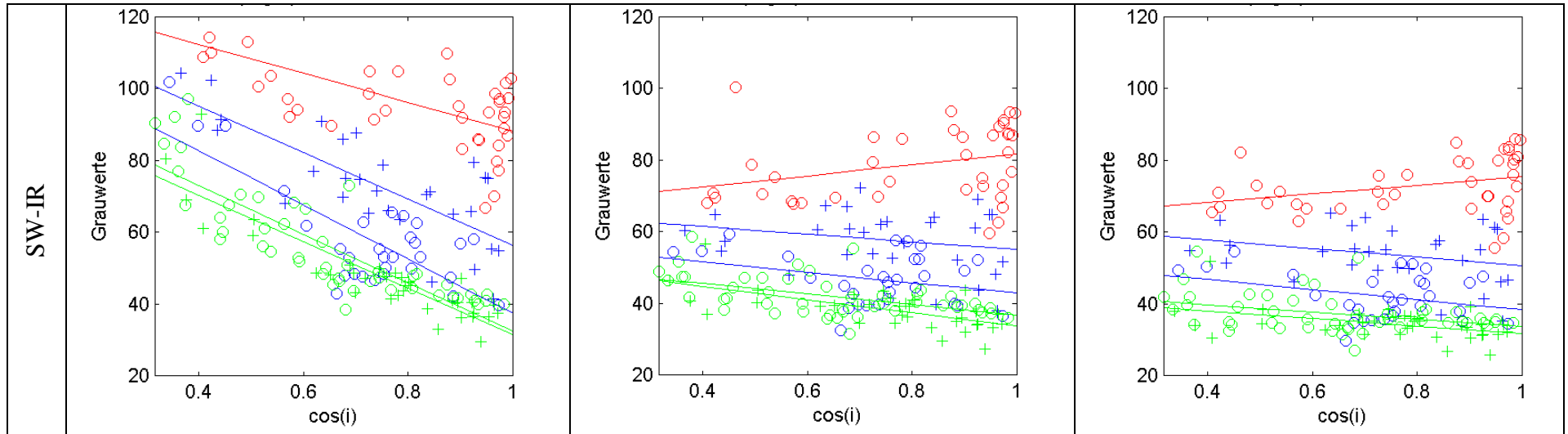
C_v	Minnaert-Korr.					Minnaert-Korr.					Minnaert-Korr.				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.199	0.194	0.194	0.188	0.200	0.049	0.067	0.058	0.075	0.068	0.029	0.035	0.034	0.036	0.037
Band 2	0.187	0.187	0.205	0.187	0.209	0.065	0.087	0.054	0.077	0.065	0.040	0.057	0.045	0.038	0.047
Band 3	0.179	0.171	0.134	0.169	0.185	0.076	0.058	0.083	0.084	0.075	0.078	0.055	0.083	0.075	0.068
Band 4	0.208	0.198	0.142	0.215	0.228	0.093	0.108	0.073	0.153	0.132	0.060	0.099	0.080	0.131	0.107

- IRS-Szene: i\_32\_35\_050422







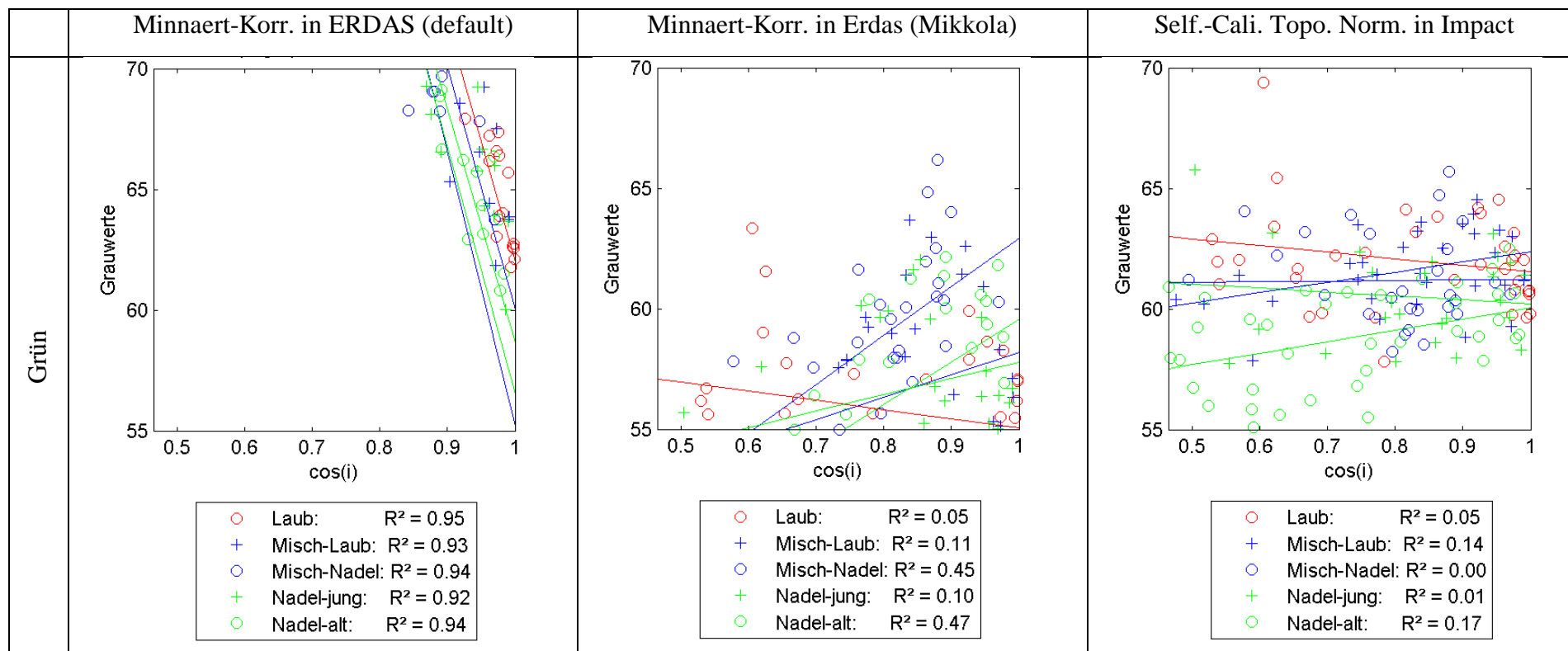


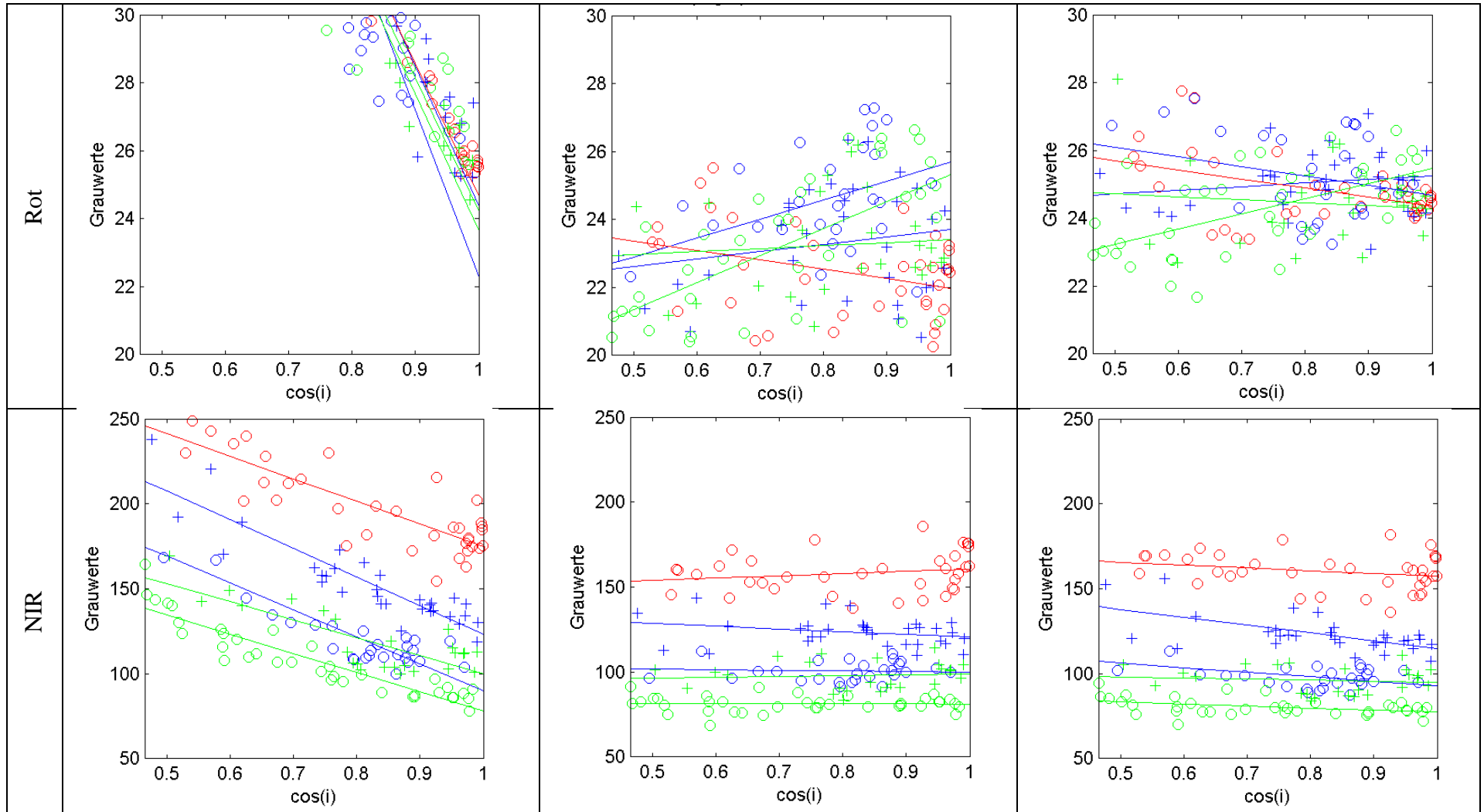
- Regressionswerte:

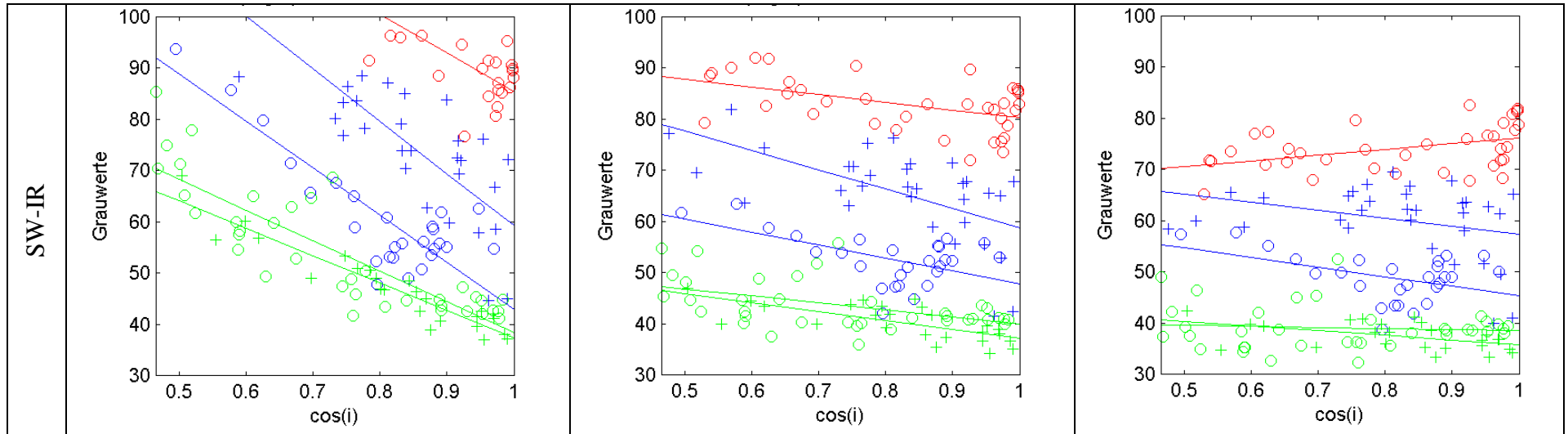
R <sup>2</sup>	Erdas (default)					Erdas (Mikkola)					Impact				
	Minnaert-Corr.					Minnaert-Corr.					Minnaert-Corr.				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.878	0.881	0.919	0.890	0.848	0.088	0.098	0.062	0.001	0.010	0.285	0.243	0.466	0.197	0.069
Band 2	0.794	0.844	0.752	0.832	0.756	0.071	0.133	0.228	0.011	0.025	0.151	0.135	0.324	0.068	0.035
Band 3	0.676	0.820	0.784	0.634	0.665	0.278	0.242	0.113	0.157	0.102	0.146	0.118	0.089	0.151	0.049
Band 4	0.796	0.721	0.353	0.575	0.588	0.398	0.267	0.091	0.050	0.094	0.197	0.130	0.097	0.073	0.102
k	Minnaert-Corr.					Minnaert-Corr.					Minnaert-Corr.				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	-131.14	-152.23	-106.24	-128.650	-153.08	8.37	6.10	6.11	0.942	3.77	13.70	7.22	14.64	9.701	7.43
Band 2	-58.13	-65.36	-49.07	-61.762	-70.38	4.94	4.61	12.76	2.337	3.82	6.67	4.05	13.66	4.780	3.86
Band 3	-77.80	-86.31	-66.07	-62.759	-83.59	25.18	12.41	9.38	16.680	14.79	15.65	7.29	6.78	13.649	8.75
Band 4	-64.74	-67.67	-40.40	-64.789	-75.45	-18.55	-14.61	15.14	-10.707	-14.86	-10.71	-9.93	11.86	-11.756	-13.99

C_V	Minnaert-Korr.					Minnaert-Korr.					Minnaert-Korr.				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.288	0.311	0.246	0.258	0.266	0.086	0.064	0.080	0.096	0.088	0.077	0.048	0.065	0.061	0.066
Band 2	0.298	0.301	0.205	0.248	0.274	0.126	0.093	0.142	0.124	0.120	0.115	0.080	0.121	0.099	0.103
Band 3	0.163	0.198	0.169	0.155	0.168	0.107	0.076	0.083	0.112	0.099	0.097	0.067	0.069	0.096	0.090
Band 4	0.273	0.274	0.144	0.210	0.248	0.138	0.130	0.130	0.148	0.150	0.126	0.143	0.106	0.145	0.151

- IRS-Szene: i\_32\_35\_080711







- Regressionswerte:

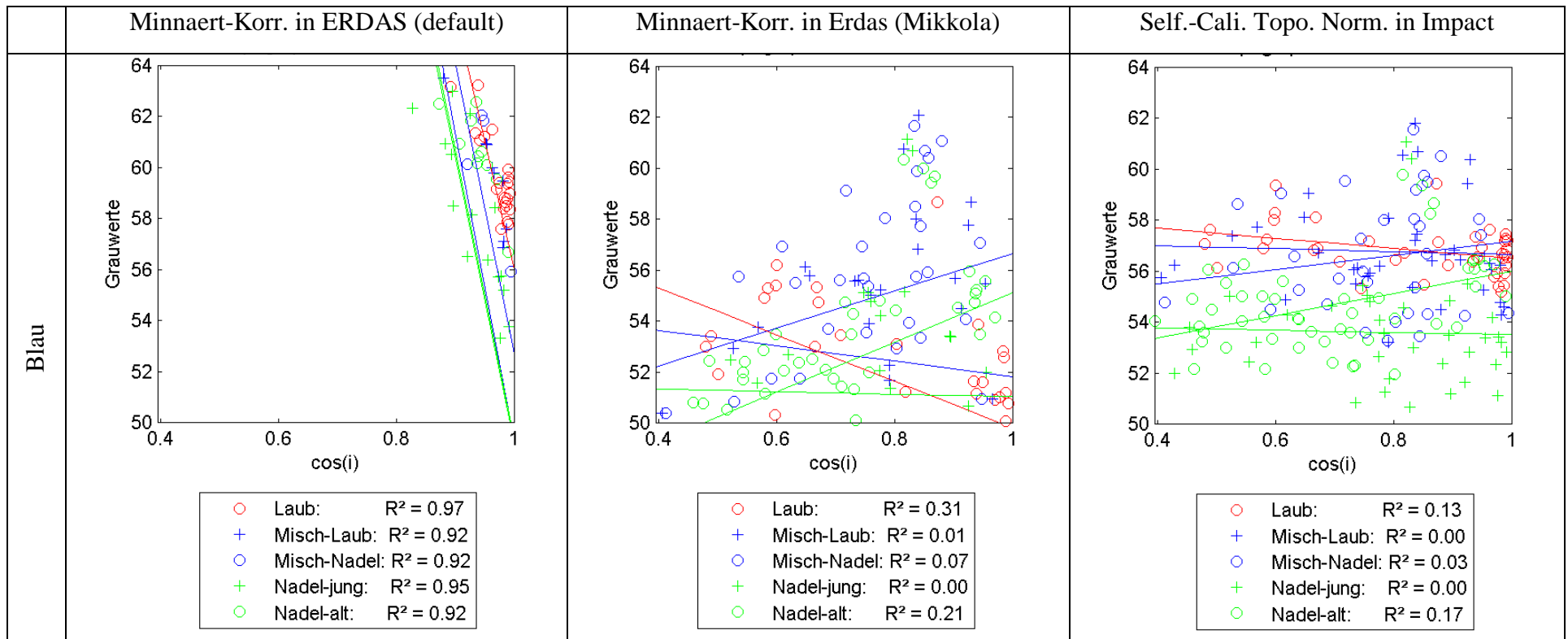
R <sup>2</sup>	Erdas (default)					Erdas (Mikkola)					Impact				
	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.921	0.945	0.946	0.928	0.937	0.104	0.471	0.052	0.108	0.448	0.013	0.172	0.046	0.139	0.000
Band 2	0.896	0.911	0.938	0.912	0.914	0.007	0.423	0.117	0.035	0.195	0.009	0.348	0.200	0.030	0.078
Band 3	0.632	0.850	0.703	0.820	0.802	0.005	0.000	0.033	0.071	0.006	0.013	0.175	0.066	0.379	0.241
Band 4	0.891	0.737	0.832	0.750	0.764	0.484	0.242	0.228	0.355	0.365	0.233	0.007	0.173	0.097	0.252

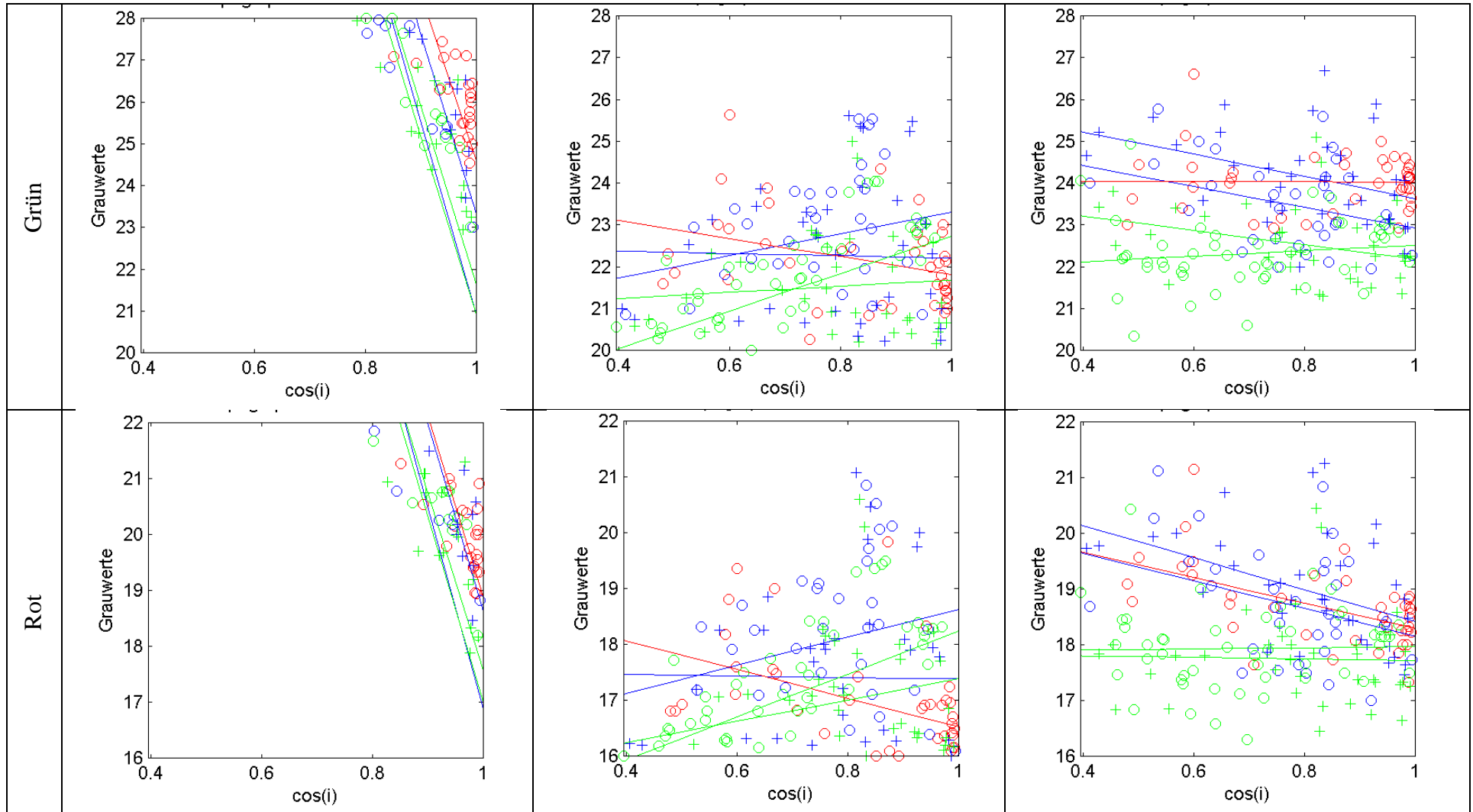
  

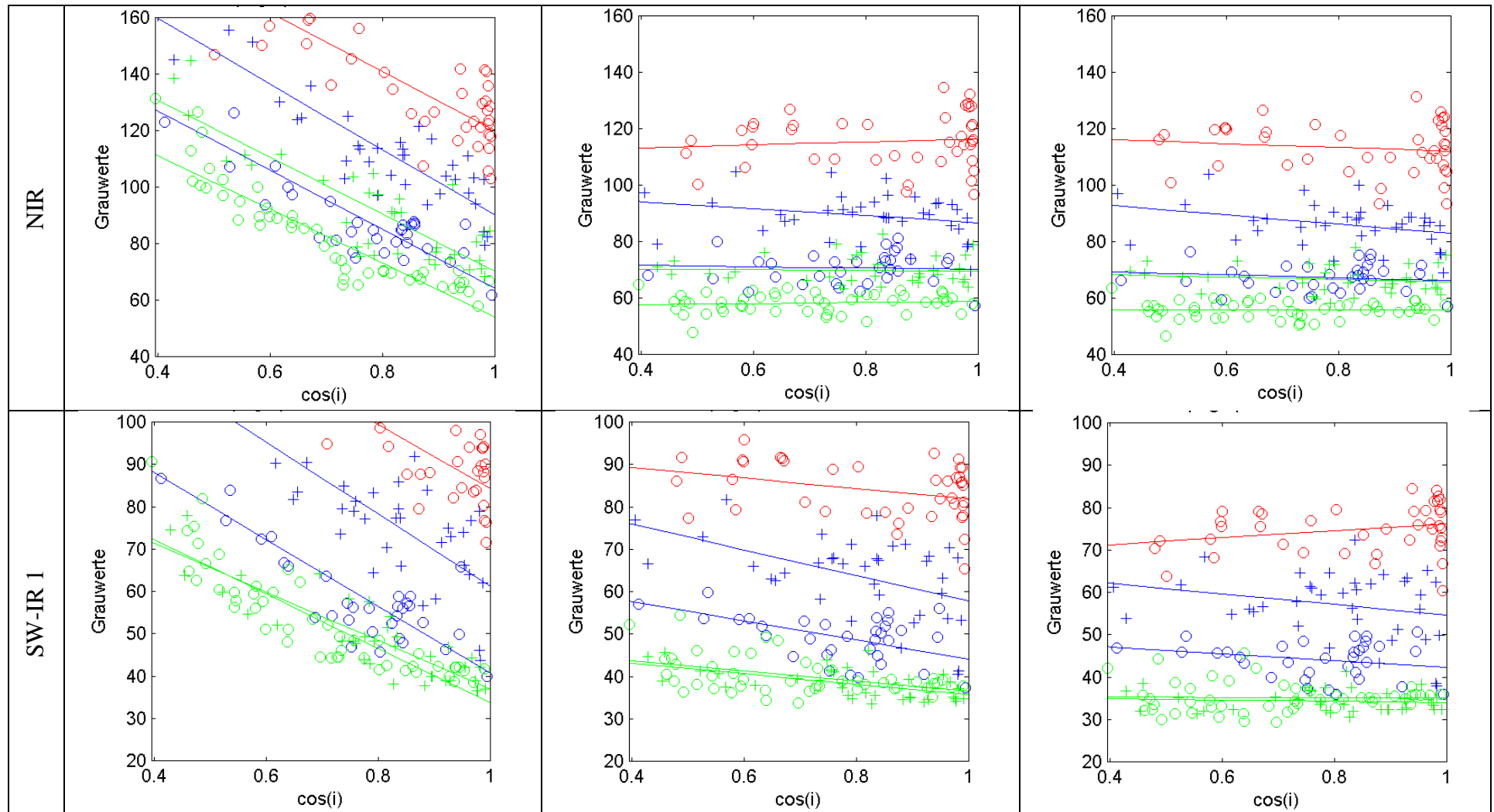
k	Erdas (default)					Erdas (Mikkola)					Impact				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	-97.47	-102.95	-98.66	-101.073	-114.75	6.82	17.72	-3.79	9.228	20.24	-1.61	4.72	-2.71	4.238	0.24
Band 2	-40.47	-39.57	-39.17	-41.600	-49.59	0.89	7.96	-2.78	2.150	5.58	-0.85	4.50	-2.71	1.071	-2.82
Band 3	-106.46	-112.86	-133.46	-168.938	-158.42	4.13	-0.32	13.15	-15.773	-3.64	-6.44	-12.17	-16.70	-46.254	-26.97
Band 4	-53.53	-59.76	-75.28	-102.291	-91.92	-17.40	-13.74	-14.91	-37.761	-25.33	-9.09	-2.07	11.34	-15.591	-18.75

C_V	Minnaert-Korr.					Minnaert-Korr.					Minnaert-Korr.				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.186	0.218	0.211	0.188	0.191	0.052	0.081	0.049	0.070	0.066	0.033	0.033	0.033	0.026	0.033
Band 2	0.193	0.207	0.211	0.192	0.202	0.062	0.091	0.059	0.070	0.066	0.051	0.054	0.040	0.035	0.051
Band 3	0.157	0.196	0.132	0.170	0.183	0.085	0.056	0.075	0.067	0.058	0.083	0.063	0.066	0.086	0.071
Band 4	0.169	0.222	0.138	0.213	0.215	0.087	0.111	0.062	0.135	0.101	0.070	0.109	0.060	0.117	0.097

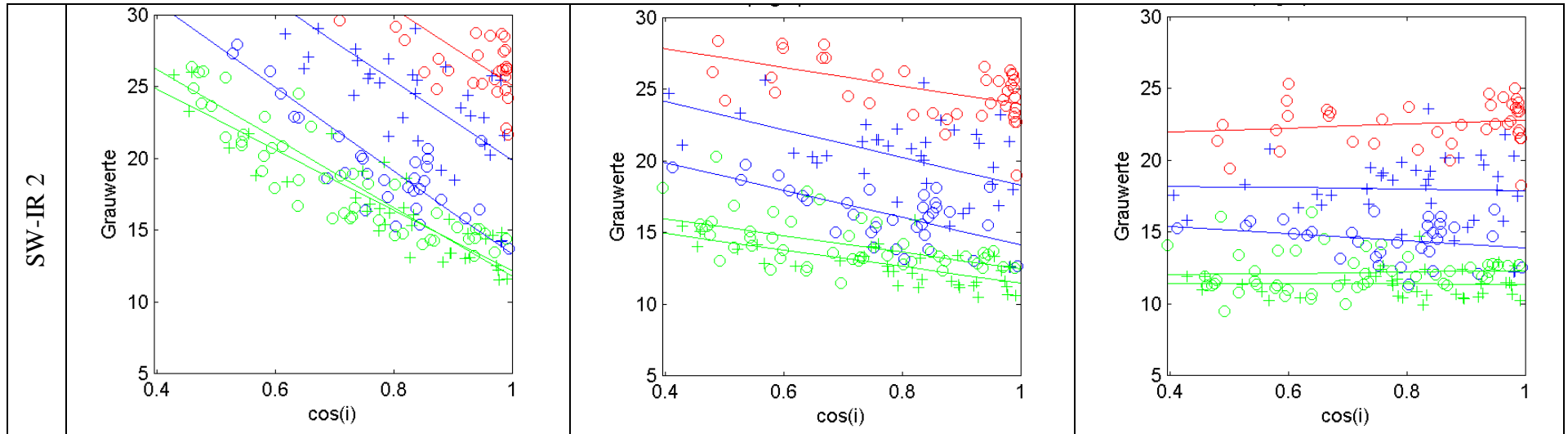
- Landsat-Szene: l20070720











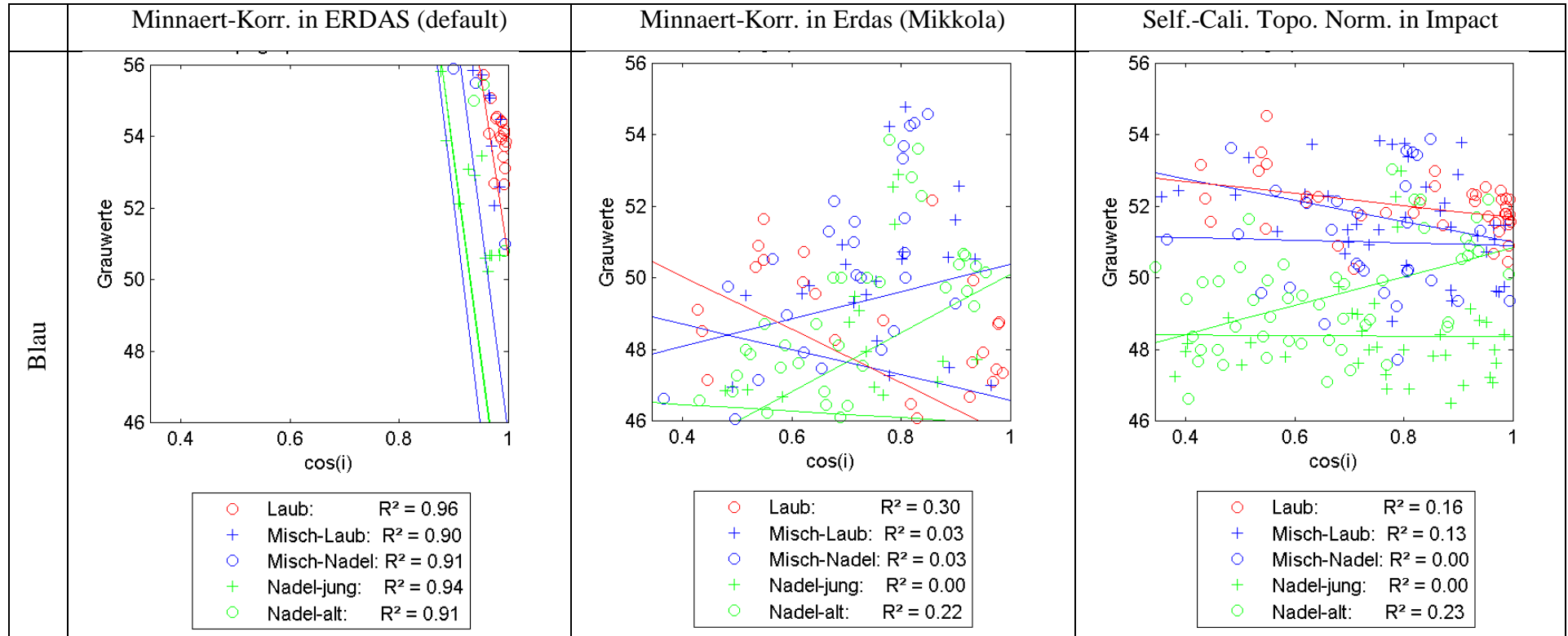
- Regressionswerte:

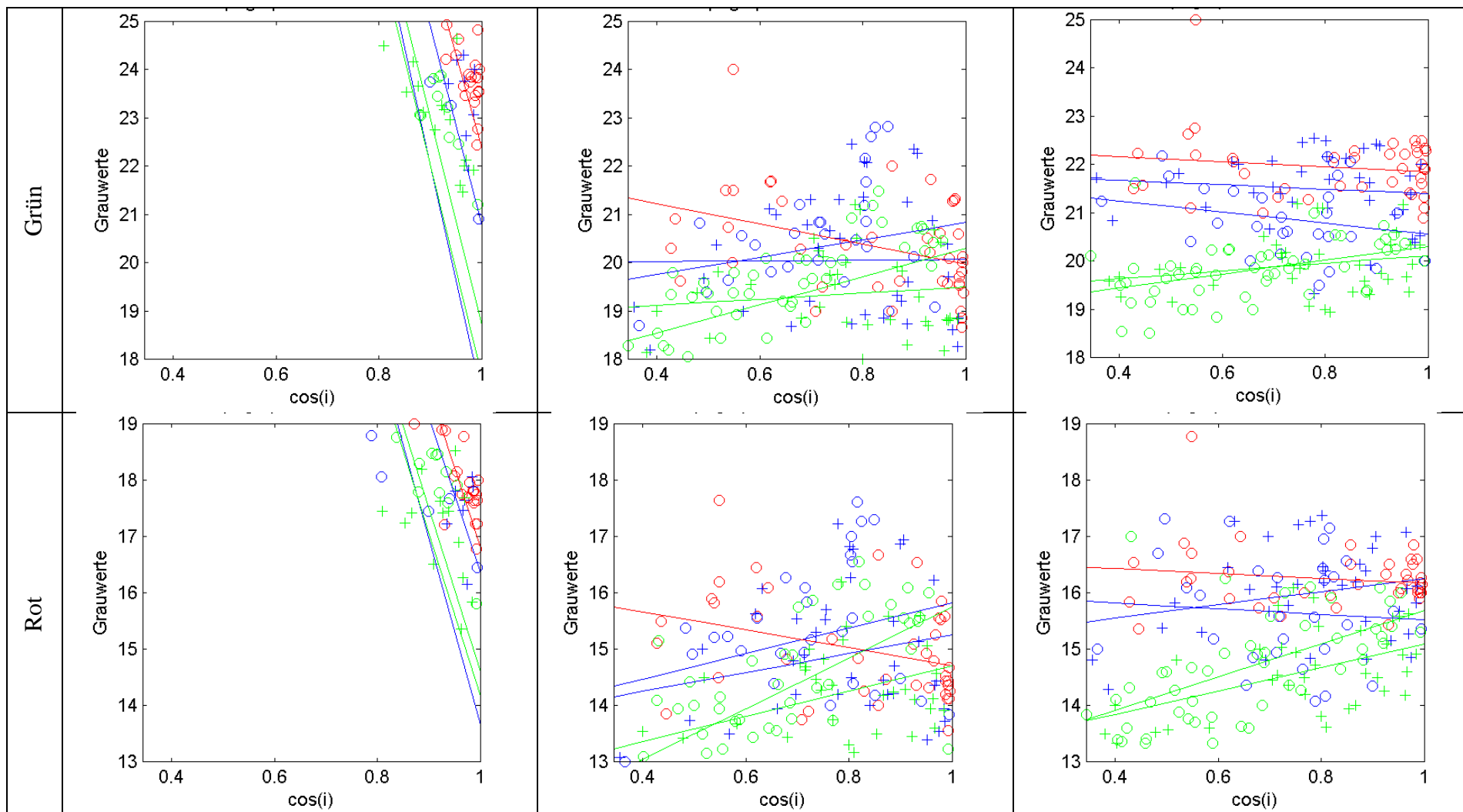
R <sup>2</sup>	Erdas (default)					Erdas (Mikkola)					Impact				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.950	0.922	0.970	0.923	0.922	0.001	0.208	0.309	0.011	0.072	0.001	0.166	0.128	0.002	0.031
Band 2	0.946	0.927	0.953	0.917	0.929	0.009	0.269	0.111	0.001	0.058	0.095	0.018	0.000	0.142	0.127
Band 3	0.950	0.922	0.949	0.907	0.922	0.069	0.272	0.198	0.000	0.065	0.001	0.000	0.305	0.195	0.124
Band 4	0.736	0.824	0.715	0.778	0.719	0.002	0.008	0.010	0.059	0.003	0.019	0.000	0.017	0.114	0.022
Band 5	0.773	0.777	0.726	0.658	0.709	0.327	0.216	0.103	0.243	0.307	0.010	0.000	0.067	0.062	0.075
Band 6	0.828	0.779	0.765	0.652	0.774	0.449	0.306	0.287	0.245	0.452	0.000	0.003	0.024	0.001	0.070
k	Minnaert-Corr.					Minnaert-Corr.					Minnaert-Corr.				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	-111.79	-112.69	-101.79	-115.573	-120.03	-0.49	9.74	-9.15	-3.019	7.36	-0.39	4.37	-1.99	-0.580	2.76
Band 2	-43.03	-42.78	-39.85	-43.252	-46.34	0.74	4.48	-2.14	-0.261	2.62	-1.71	0.66	-0.04	-2.641	-2.50
Band 3	-31.84	-33.40	-32.32	-33.672	-36.28	1.91	3.84	-2.55	-0.123	2.51	-0.14	0.09	-2.27	-2.845	-2.47
Band 4	-100.86	-94.98	-104.16	-115.803	-104.59	-1.23	1.78	5.52	-12.356	-2.16	-4.14	-0.14	-6.73	-16.442	-5.24
Band 5	-57.12	-64.16	-75.46	-85.068	-78.73	-12.36	-12.07	-12.18	-30.077	-22.63	-1.53	-0.36	8.27	-12.462	-8.26

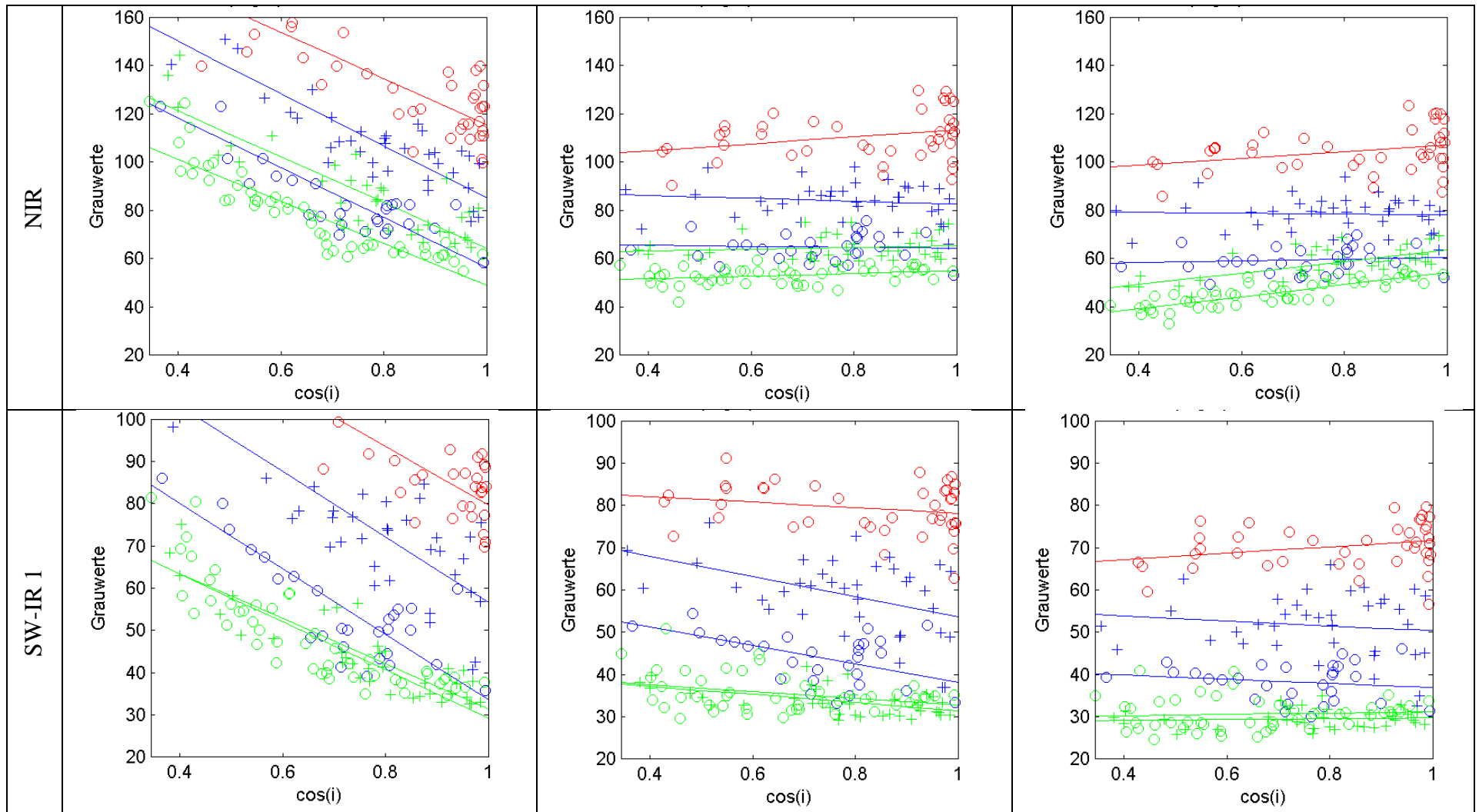
Anhang C

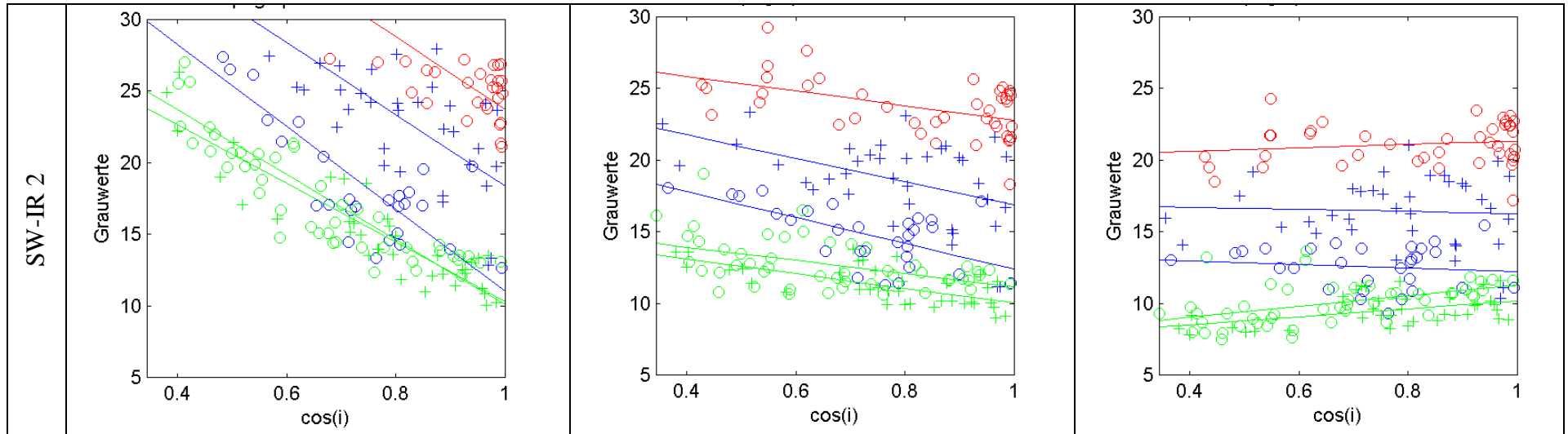
Band 6	-21.16	-24.03	-26.97	-27.542	-29.15	-5.76	-5.80	-6.46	-9.735	-9.52	-0.04	0.49	1.35	-0.519	-2.45
C_V	Minnaert-Corr.					Minnaert-Corr.					Minnaert-Corr.				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.256	0.238	0.246	0.245	0.232	0.066	0.069	0.056	0.084	0.073	0.041	0.033	0.017	0.034	0.041
Band 2	0.235	0.222	0.227	0.218	0.218	0.058	0.068	0.050	0.079	0.070	0.040	0.037	0.030	0.045	0.043
Band 3	0.219	0.217	0.238	0.215	0.215	0.069	0.073	0.059	0.086	0.080	0.048	0.041	0.038	0.052	0.055
Band 4	0.209	0.213	0.156	0.179	0.201	0.072	0.059	0.082	0.088	0.080	0.072	0.056	0.080	0.087	0.076
Band 5	0.216	0.232	0.159	0.206	0.228	0.092	0.110	0.078	0.147	0.120	0.073	0.100	0.074	0.135	0.099
Band 6	0.228	0.242	0.181	0.207	0.237	0.110	0.125	0.084	0.150	0.126	0.087	0.115	0.067	0.133	0.093

- Landsat-Szene: 120070805









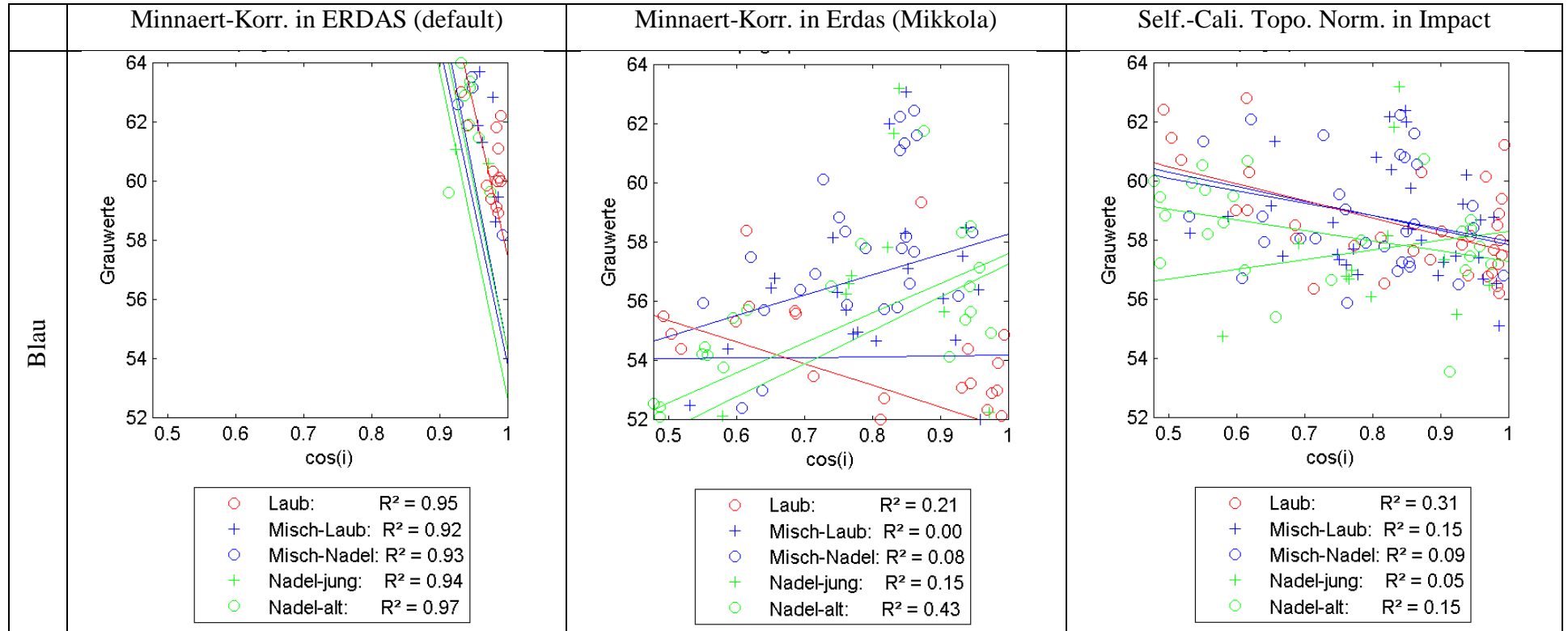
- Regressionswerte:

R <sup>2</sup>	Erdas (default)					Erdas (Mikkola)					Impact				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.941	0.913	0.960	0.903	0.912	0.004	0.218	0.296	0.026	0.032	0.000	0.234	0.157	0.129	0.001
Band 2	0.938	0.920	0.952	0.900	0.912	0.015	0.201	0.144	0.000	0.045	0.052	0.176	0.024	0.010	0.058
Band 3	0.931	0.887	0.935	0.905	0.896	0.193	0.434	0.111	0.054	0.074	0.236	0.342	0.022	0.058	0.007
Band 4	0.733	0.809	0.694	0.756	0.719	0.017	0.083	0.076	0.018	0.003	0.434	0.683	0.085	0.002	0.013
Band 5	0.777	0.731	0.745	0.640	0.693	0.272	0.113	0.048	0.198	0.300	0.007	0.005	0.075	0.017	0.033
Band 6	0.820	0.766	0.783	0.638	0.742	0.446	0.230	0.248	0.217	0.422	0.203	0.227	0.023	0.002	0.019
k	Minnaert-Corr.					Minnaert-Corr.					Minnaert-Corr.				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	-112.65	-114.70	-100.79	-115.615	-127.10	-0.93	8.23	-7.43	-3.534	3.82	-0.07	4.02	-1.69	-2.963	-0.39
Band 2	-43.20	-43.77	-38.80	-41.688	-47.96	0.63	2.93	-2.10	0.079	1.80	0.79	1.42	-0.54	-0.456	-1.15
Band 3	-29.14	-29.15	-28.38	-27.774	-33.27	2.24	4.50	-1.59	1.677	2.26	2.08	2.96	-0.42	1.182	-0.49
Band 4	-95.12	-87.31	-95.41	-108.300	-103.36	3.68	5.50	14.24	-5.955	-2.05	23.71	25.10	13.58	-1.801	3.81
Band 5	-53.57	-56.83	-69.77	-77.549	-77.81	-9.85	-8.15	-6.64	-23.963	-21.96	1.04	1.49	7.47	-5.876	-5.01

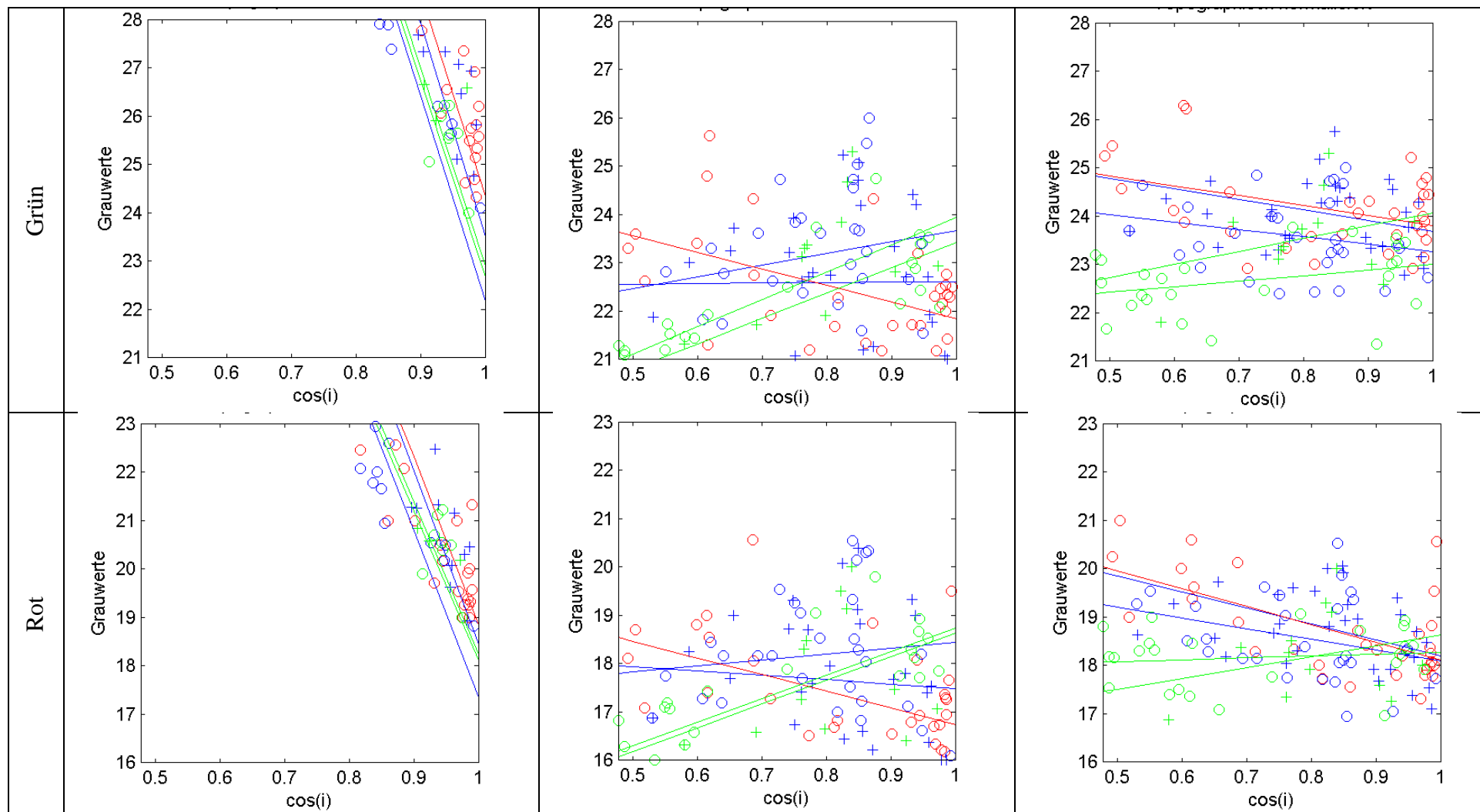
Anhang C

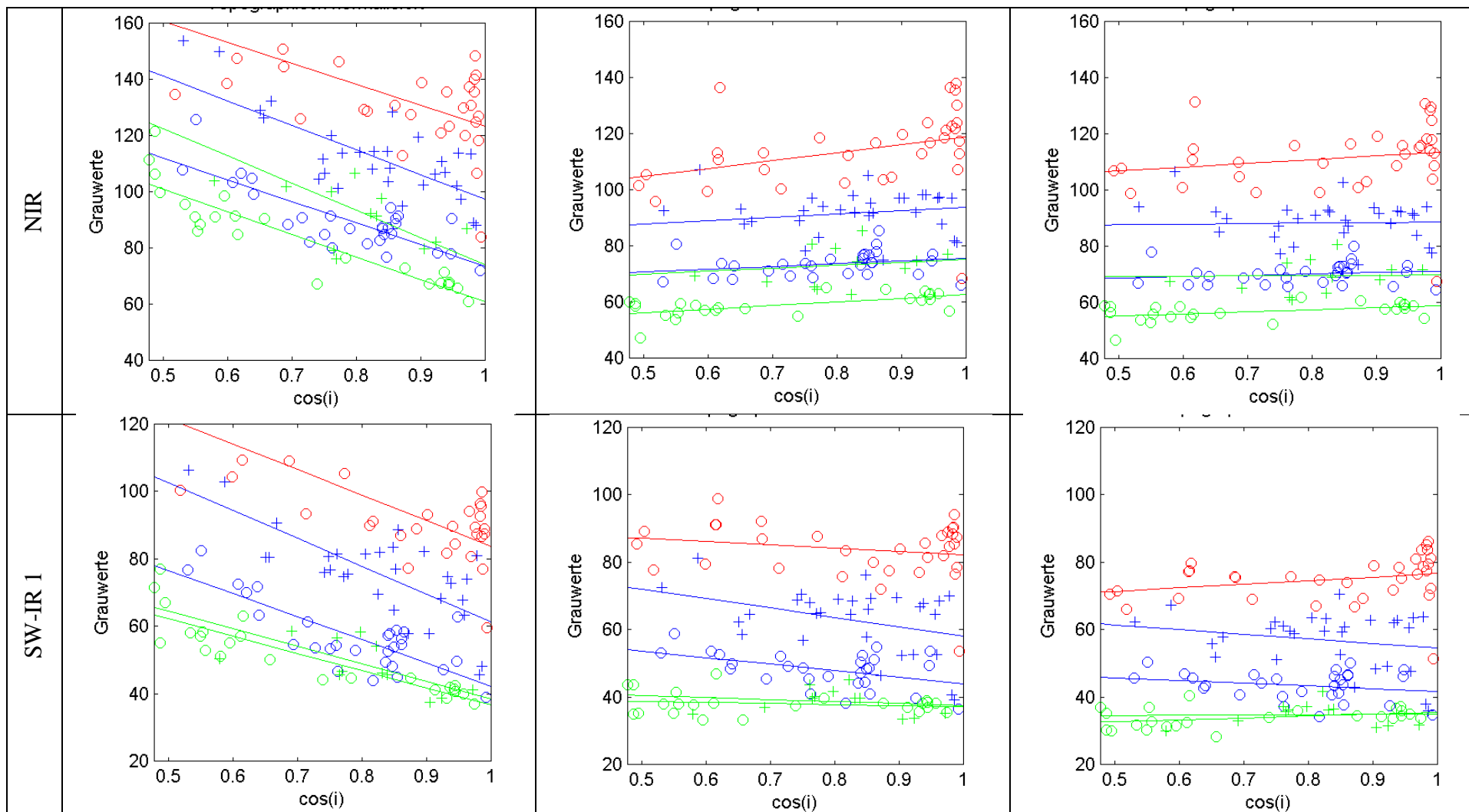
Band 6	-20.56	-22.70	-25.23	-25.052	-28.68	-5.08	-4.62	-5.13	-8.156	-9.00	2.80	3.79	1.14	-0.709	-1.28
C_V	Minnaert-Corr.					Minnaert-Corr.					Minnaert-Corr.				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.295	0.269	0.288	0.283	0.278	0.056	0.068	0.056	0.077	0.069	0.029	0.031	0.016	0.027	0.032
Band 2	0.270	0.255	0.261	0.244	0.257	0.046	0.061	0.053	0.066	0.066	0.031	0.031	0.031	0.035	0.036
Band 3	0.246	0.233	0.258	0.216	0.240	0.063	0.087	0.062	0.081	0.087	0.051	0.062	0.034	0.051	0.060
Band 4	0.224	0.224	0.166	0.190	0.225	0.077	0.065	0.090	0.089	0.085	0.109	0.121	0.086	0.088	0.091
Band 5	0.242	0.248	0.169	0.218	0.265	0.098	0.124	0.074	0.152	0.143	0.076	0.122	0.075	0.146	0.114
Band 6	0.262	0.265	0.194	0.218	0.274	0.119	0.138	0.084	0.156	0.147	0.115	0.145	0.069	0.147	0.117

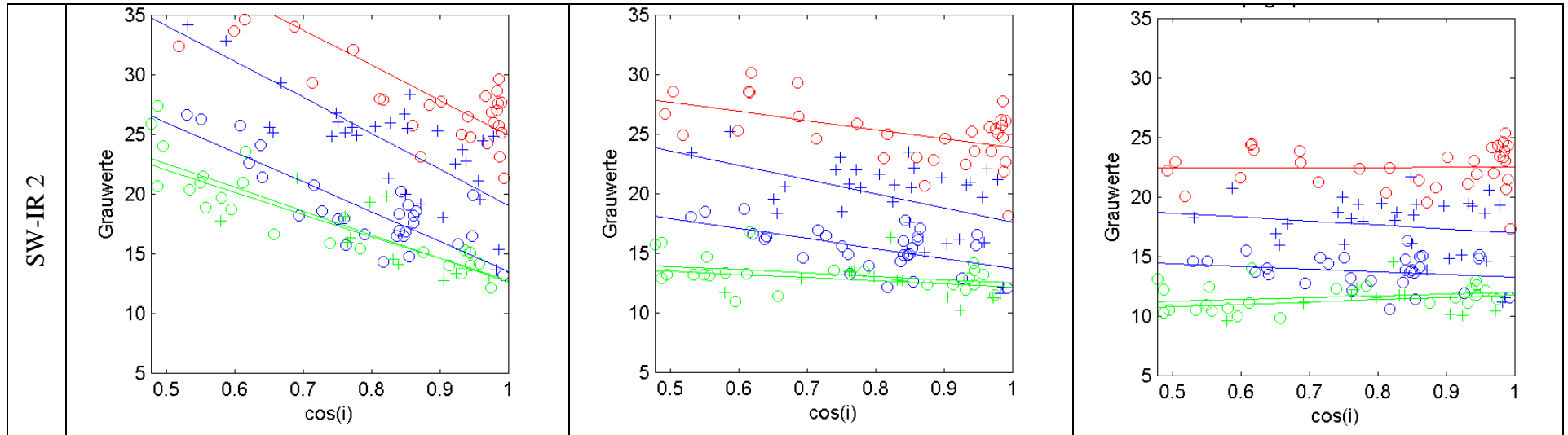
- Landsat-Szene: l20100712











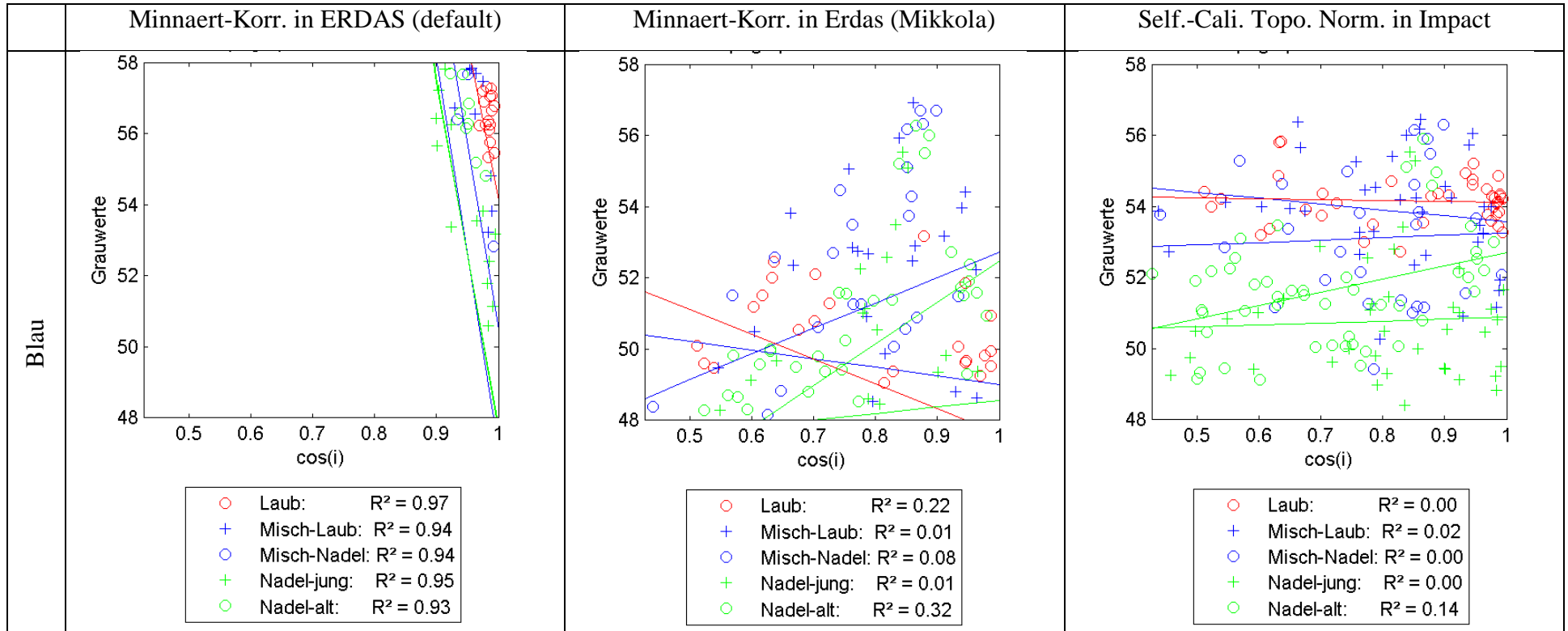
- Regressionswerte:

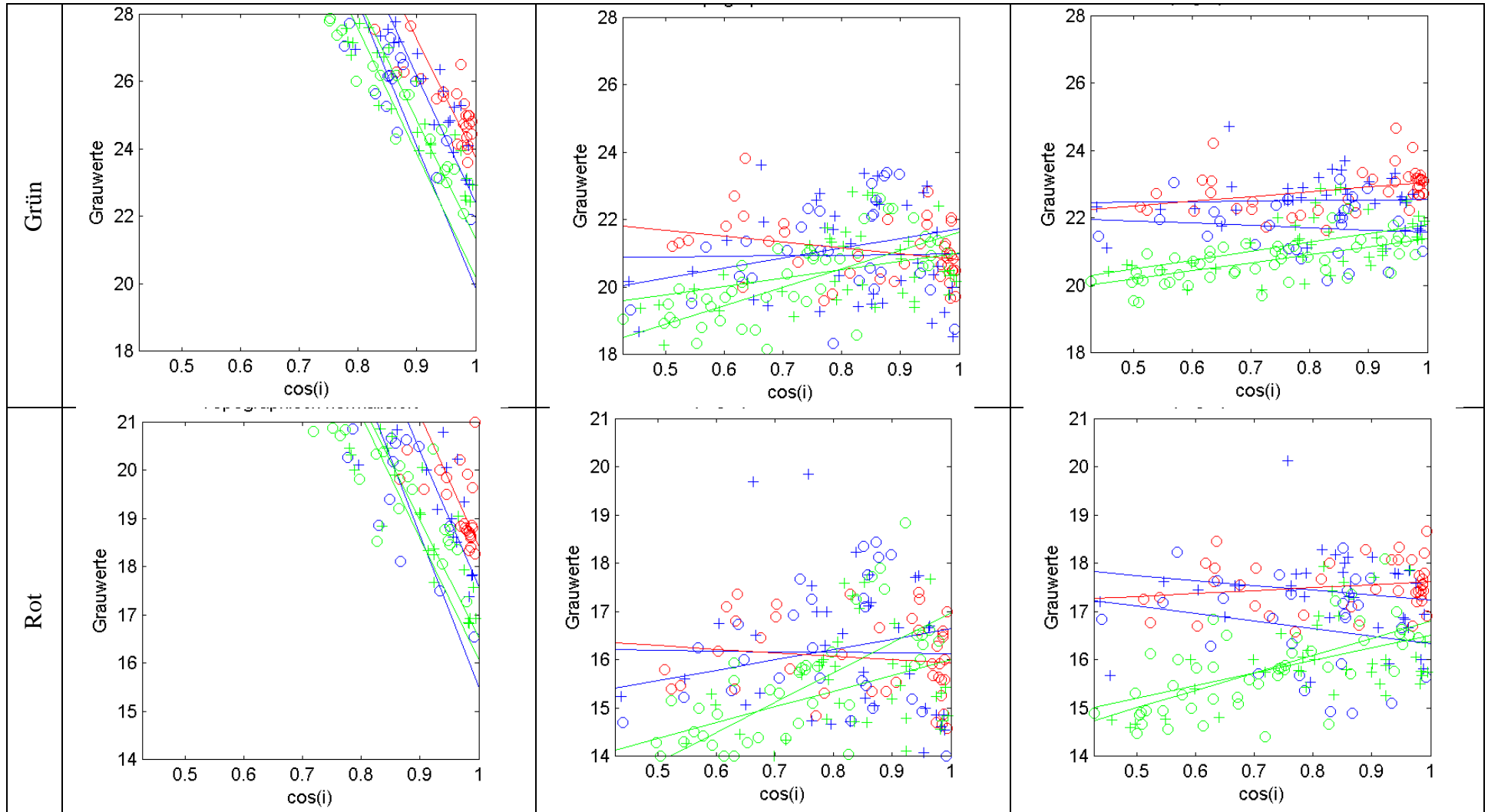
R <sup>2</sup>	Erdas (default)					Erdas (Mikkola)					Impact				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.938	0.966	0.946	0.918	0.934	0.153	0.430	0.213	0.000	0.077	0.047	0.153	0.309	0.146	0.092
Band 2	0.944	0.958	0.931	0.895	0.928	0.330	0.536	0.250	0.000	0.060	0.216	0.101	0.167	0.172	0.064
Band 3	0.944	0.951	0.887	0.898	0.928	0.284	0.597	0.232	0.011	0.019	0.148	0.014	0.406	0.310	0.124
Band 4	0.659	0.835	0.420	0.650	0.704	0.062	0.366	0.117	0.054	0.089	0.001	0.184	0.037	0.002	0.030
Band 5	0.621	0.789	0.607	0.657	0.679	0.056	0.033	0.043	0.196	0.247	0.002	0.118	0.067	0.069	0.068
Band 6	0.635	0.797	0.682	0.709	0.733	0.072	0.146	0.260	0.311	0.374	0.050	0.077	0.000	0.044	0.052
k	Erdas (default)					Erdas (Mikkola)					Impact				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	-111.08	-113.13	-103.00	-117.593	-108.73	11.22	10.12	-7.35	0.224	6.92	3.25	-3.55	-5.77	-4.936	-4.26
Band 2	-40.95	-40.58	-42.33	-44.270	-42.54	5.66	5.25	-3.44	0.096	2.41	2.68	1.15	-2.06	-2.185	-1.51
Band 3	-30.81	-31.58	-34.68	-35.896	-34.39	4.91	4.86	-3.45	-0.903	1.23	2.24	0.37	-3.70	-3.294	-2.23
Band 4	-96.91	-80.03	-74.64	-87.401	-76.69	10.52	12.80	28.31	12.028	9.86	1.23	7.47	13.64	2.124	4.78
Band 5	-52.22	-51.29	-75.62	-82.293	-68.60	-5.87	-3.12	-9.95	-27.794	-19.67	0.90	5.15	10.47	-13.833	-8.11

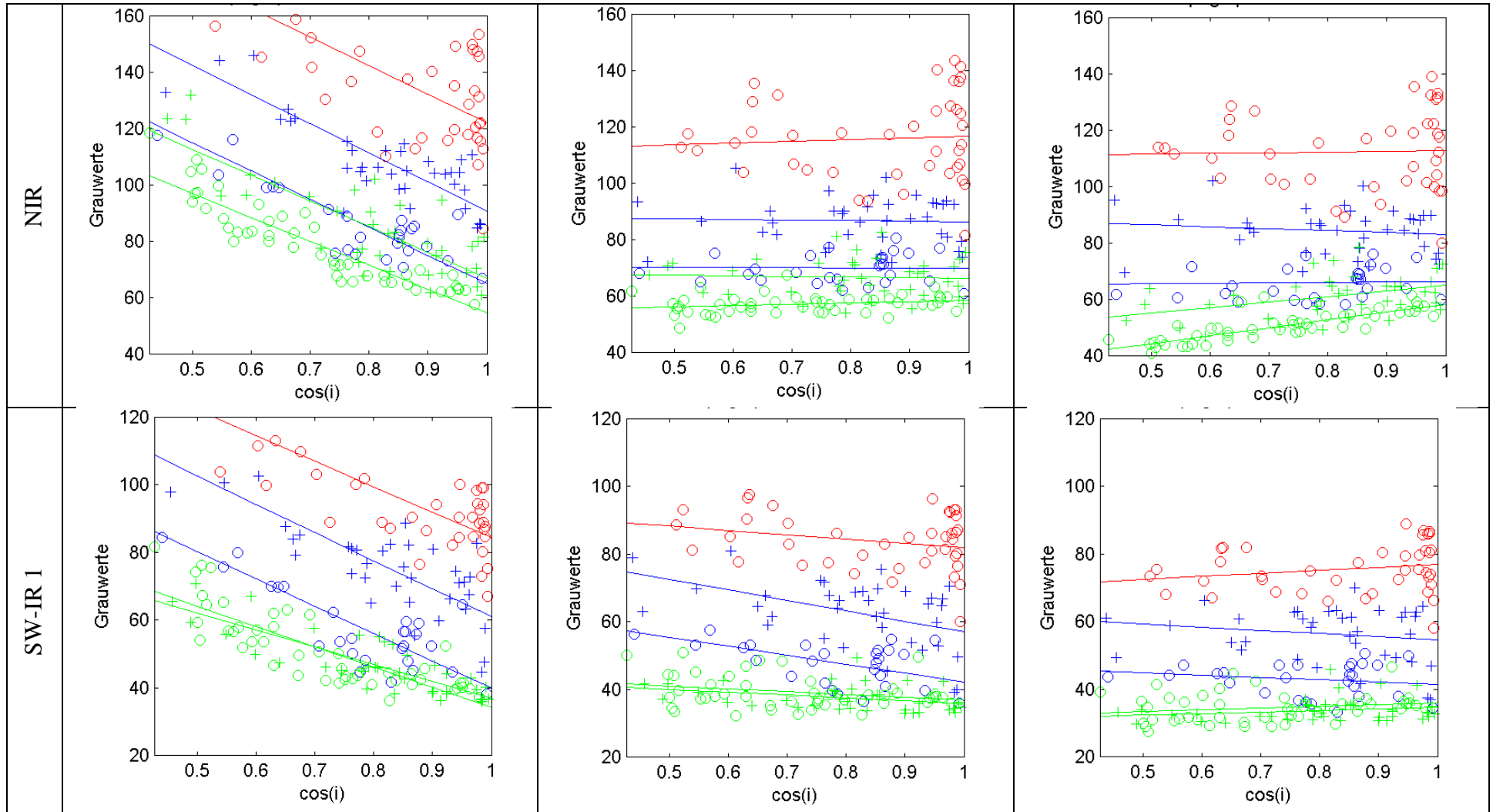
Anhang C

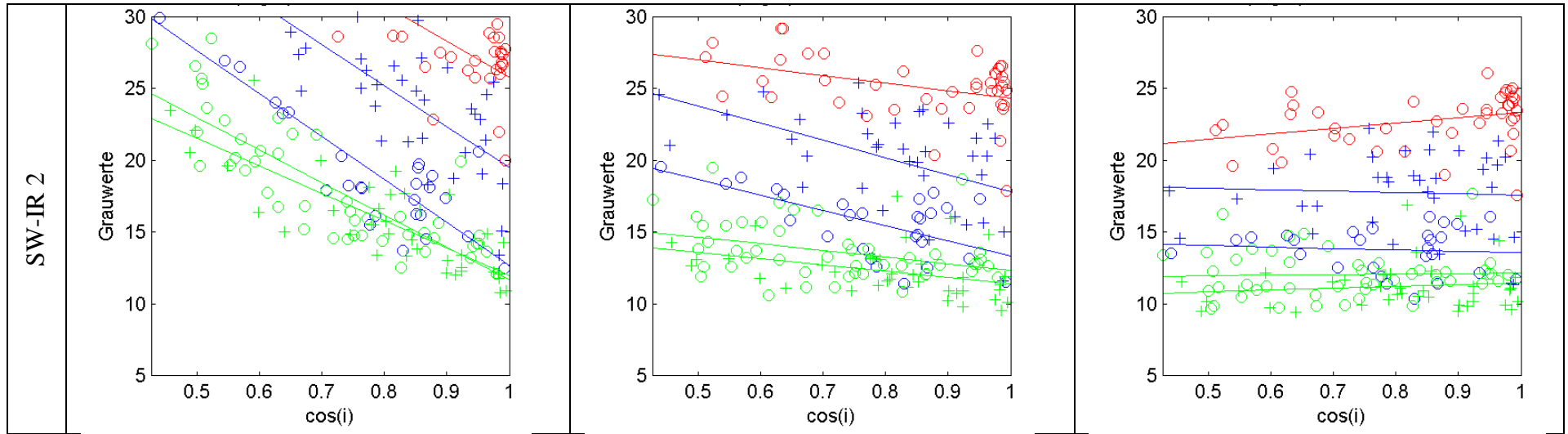
Band 6	-18.54	-19.84	-29.34	-30.169	-24.91	-2.58	-2.82	-7.64	-11.935	-8.44	1.96	1.59	0.11	-3.398	-2.24
C_V	Minnaert-Corr.					Minnaert-Corr.					Minnaert-Corr.				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.223	0.252	0.241	0.244	0.195	0.082	0.053	0.051	0.071	0.060	0.040	0.030	0.030	0.034	0.032
Band 2	0.199	0.230	0.237	0.223	0.188	0.068	0.062	0.052	0.060	0.057	0.038	0.030	0.035	0.034	0.034
Band 3	0.192	0.226	0.254	0.228	0.193	0.082	0.069	0.070	0.074	0.066	0.050	0.033	0.053	0.048	0.046
Band 4	0.190	0.199	0.144	0.145	0.136	0.090	0.068	0.123	0.087	0.061	0.080	0.058	0.109	0.085	0.053
Band 5	0.201	0.214	0.171	0.201	0.195	0.099	0.086	0.098	0.152	0.111	0.099	0.084	0.091	0.141	0.097
Band 6	0.209	0.230	0.202	0.220	0.206	0.117	0.105	0.101	0.165	0.120	0.120	0.094	0.078	0.141	0.097

- Landsat-Szene: l20110629









- Regressionswerte:

R <sup>2</sup>	Erdas (default)					Erdas (Mikkola)					Impact				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.951	0.934	0.972	0.938	0.938	0.009	0.322	0.216	0.008	0.079	0.002	0.144	0.004	0.024	0.003
Band 2	0.948	0.942	0.939	0.933	0.936	0.114	0.421	0.088	0.000	0.092	0.227	0.395	0.123	0.001	0.015
Band 3	0.935	0.906	0.920	0.921	0.923	0.188	0.522	0.020	0.000	0.053	0.204	0.458	0.034	0.020	0.055
Band 4	0.650	0.830	0.497	0.709	0.730	0.002	0.052	0.005	0.001	0.001	0.163	0.648	0.001	0.015	0.001
Band 5	0.700	0.684	0.611	0.647	0.699	0.111	0.073	0.060	0.221	0.323	0.045	0.036	0.042	0.032	0.040
Band 6	0.663	0.691	0.671	0.654	0.769	0.133	0.132	0.153	0.252	0.424	0.013	0.001	0.106	0.002	0.009
k	Erdas (default)					Erdas (Mikkola)					Impact				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	-96.36	-99.95	-89.48	-103.993	-109.60	1.79	11.70	-6.98	-2.421	7.21	0.52	3.73	-0.25	-1.632	0.69
Band 2	-35.55	-37.09	-35.53	-37.910	-42.47	2.47	5.46	-1.72	0.195	2.94	2.63	2.38	1.41	0.171	-0.68
Band 3	-24.52	-25.38	-27.28	-28.316	-31.84	3.26	6.20	-0.73	-0.136	2.15	2.63	3.61	0.60	-1.033	-1.56
Band 4	-91.25	-84.69	-101.37	-103.363	-100.20	-2.22	4.78	6.26	-2.027	-0.82	19.75	28.05	2.78	-6.807	1.51
Band 5	-50.30	-59.92	-75.45	-83.278	-80.49	-8.38	-8.24	-12.54	-31.089	-26.28	4.96	5.04	8.99	-9.675	-6.69



Anhang C

Band 6	-19.07	-22.65	-25.12	-28.560	-29.96	-4.28	-4.58	-5.30	-11.964	-10.67	1.29	0.40	3.72	-0.886	-0.99
C_V	Minnaert-Corr.					Minnaert-Corr.					Minnaert-Corr.				
	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel	n_jung	n_alt	LAUB	m_laub	m_nadel
Band 1	0.223	0.214	0.214	0.225	0.229	0.059	0.066	0.049	0.078	0.074	0.033	0.030	0.012	0.029	0.035
Band 2	0.194	0.196	0.201	0.195	0.217	0.053	0.066	0.044	0.072	0.068	0.039	0.029	0.028	0.033	0.037
Band 3	0.179	0.180	0.201	0.189	0.213	0.074	0.089	0.051	0.090	0.085	0.055	0.053	0.030	0.061	0.059
Band 4	0.201	0.186	0.167	0.163	0.195	0.104	0.058	0.128	0.096	0.076	0.120	0.109	0.123	0.095	0.092
Band 5	0.193	0.223	0.161	0.198	0.241	0.101	0.123	0.097	0.154	0.141	0.104	0.122	0.093	0.141	0.115
Band 6	0.224	0.237	0.165	0.208	0.256	0.144	0.146	0.086	0.174	0.153	0.149	0.138	0.080	0.160	0.111