
Terrestrische und drohnenbasierte Aufnahmen als Grundlage zur Ab- schätzung der Waldstruktur und Evapotranspiration in rutschungs- exponierten Gebirgswäldern.

**Masterarbeit HS 2019
Umweltnaturwissenschaften**

Jens Furrer

furrerje@student.ethz.ch, 15-922-875

Referent:

Dr. Peter Bebi, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF

Koreferente:

Dr. Alexander Bast, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF

Dr. Frank Graf, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF

14.05.2020

Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) Davos

Zusammenfassung

Die Zunahme an Starkniederschlägen, verursacht durch den Klimawandel [1], resultiert in einem erhöhten Risiko ausgehend von geomorphologischen Gefahren [2], wie flachgründige Rutschungen [3]. Rund 42% des Schweizer Waldes schützen vor Naturgefahren, davon 24% direkt vor Hangmuren und Rutschungen [4]. Die Schutzleistung des Waldes ist jedoch von dessen Bestandsstruktur abhängig [5]. Bis heute ist die Verbindung zwischen dem Wasserregime und der Bestandsstruktur des Schutzwaldes nur unzureichend erforscht. Ziel der vorliegenden Masterarbeit war es, neue Technologien zur (i) Erfassung der Waldstruktur sowie (ii) zur flächendeckenden Aufnahme von Oberflächentemperatur am Waldboden und Kronendach einzusetzen. Basierend auf den Temperaturdaten wurde (iii) die Evapotranspiration anhand eines TSEB-Modells (two-source energy budget model) modelliert. Im Fokus der Arbeit steht dabei der neuartige Vergleich von Anwendungsmöglichkeiten, Oberflächentemperatur und Evapotranspiration in unterschiedlichen Waldstrukturen. In den drei Untersuchungsgebieten Lücher-, Teufi- und Zugwald wurden in insgesamt 18 etwa 100m² grossen Untersuchungsflächen zur Bestandescharakterisierung, neben den klassischen Feldaufnahmen, boden- und drohnengestützte Normalfarbenaufnahmen (RGB) gemacht, um mit Structure from Motion (SfM) Baumposition, Brusthöhendurchmesser, Baumhöhe und Kronendeckungsgrad automatisiert zu bestimmen. Um die Verbindung zum Wasserhaushalt zu machen, wurden anhand von thermischen Aufnahmen am Boden und mit der Drohne die Evapotranspiration anhand eines Zwei-Layers-Modell (TSEB) berechnet. Die Baumposition und der Brusthöhendurchmesser konnten in Untersuchungsflächen mit wenigen, gleichaltrigen Bäumen bestimmt werden, die Baumhöhe und der Kronendeckungsgrad in allen Untersuchungsflächen. Die Temperaturen konnten sowohl mit der Drohne als auch mit einer terrestrischen Thermalkamera bestimmt und darauf basierend die Evapotranspiration berechnet werden. Die Thermalaufnahmen zeigen in mehrschichtigen Beständen tendenziell tiefere Temperaturen als in einschichtigen Beständen. Eine klare Beziehung zwischen Evapotranspiration und Bestandescharakterisierung konnte nicht festgestellt werden. Für zukünftige Arbeiten muss der Versuchsaufbau, bzw. die Aufnahmezeitpunkte modifiziert werden. Zusätzlich ist eine Verbesserung des terrestrischen Aufnahme- und Verarbeitungsprozesses der Normalfarbenaufnahmen nötig, so dass auch mehrschichtige, steil geneigte Waldbestände charakterisiert werden können.

Inhalt

1. Einführung	1
1.1. Forschungsfragen	5
2. Material und Methoden	7
2.1. Untersuchungsgebiete	7
2.2. Bestandescharakterisierung	11
2.2.1. Bestandescode	11
2.2.2. Feldaufnahmen	11
2.2.3. Bestandescharakterisierung durch UAV und terrestrische Aufnahmen	12
2.2.3.1. Terrestrische Normalfarbenaufnahmen zur Bestandescharakterisierung	14
2.2.3.2. Normalfarbenaufnahmen mit der Drohne für das Vegetationshöhenmodell und Orthofoto	16
2.2.3.3. Erstellung der 3D-Modelle	17
2.2.3.4. Bestimmung von Bruthöhendurchmesser und Baumposition auf Basis der terrestrischen Aufnahmen	18
2.2.3.5. Orthofoto, Baumhöhe und Kronendeckungsgrad	23
2.3. Evapotranspiration	25
2.3.1. Thermalfotografie	25
2.3.1.1. Terrestrische Thermalfotografie	26
2.3.1.2. Drohne-basierte Thermalfotografie	27
2.3.2. Temperatur und Feuchtigkeit von Boden und Luft	29
2.3.3. Vegetations- und Blattflächenindex	29
2.3.4. Evapotranspirationsmodell	30
2.3.5. Witterung	33
2.4. Statistik	33

3.	Resultate	35
3.1.	Bestandescharakterisierung	35
3.1.1.	Auf Feldaufnahmen basierte Bestandescharakterisierung	35
3.1.2.	Bestandescharakterisierung durch UAV und terrestrische Aufnahmen	37
3.1.2.1.	Terrestrische Normalfarbenaufnahmen zur Bestandescharakterisierung	37
3.1.2.2.	Normalfarbenaufnahmen mit der Drohne zur Generierung von Oberflächenmodell, Orthophoto und Vegetationshöhenmodell	44
3.1.2.3.	Bestandescharakterisierung mit dem Bestandescode nach Rickli et al. (2005)	48
3.2.	Temperaturdaten und weitere meteorologische Daten	49
3.2.1.	Wetter am 17. Oktober 2019	49
3.2.1.1.	Temperatur	49
3.2.1.2.	Wind	49
3.2.2.	Lufttemperatur und -feuchtigkeit in den Untersuchungsflächen	50
3.2.3.	Bodentemperatur in den Untersuchungsflächen	52
3.2.4.	Terrestrische Thermalfotografie	53
3.2.5.	Drohnen-gestützte Thermalfotografie	54
3.2.6.	Vegetations- und Blattflächenindex	56
3.3.	Evapotranspirationsmodell	58
4.	Diskussion	67
4.1.	Bestandescharakterisierung	67
4.1.1.	Terrestrische Normalfarbenaufnahmen	67
4.1.1.1.	Aufnahmeprozess	67
4.1.1.2.	Verarbeitung in Agisoft Metashape	68
4.1.1.3.	Bestimmung der Baumposition und des Brusthöhen-durchmessers	69
4.1.2.	Normalfarbenaufnahmen mit der Drohne	70
4.1.2.1.	Aufnahmeprozess	70
4.1.2.2.	Vegetationshöhenmodell	71
4.1.3.	Bestandescode	72
4.1.3.1.	Schichtung	72
4.1.3.2.	Entwicklungsstufe	72
4.1.3.3.	Kronendeckungsgrad	73

4.2. Evapotranspiration	74
4.2.1. Thermalaufnahmen	75
4.2.1.1. Terrestrische Thermalfotografie	75
4.2.1.2. Drohnenbasierte Thermalfotografie	75
4.2.1.3. Temperaturverläufe	76
4.2.2. Resultate	77
4.2.3. Annahmen	78
5. Schlussfolgerung und Ausblick	80
6. Danksagung	84
6.1. Zusammenarbeit	84
A. Daten und Werte	A-1
A.1. Einmessung Versuchsflächen	A-1
A.2. Exposition, Feuchteindex und Hangneigung	A-4
A.2.1. Feldaufnahmen	A-7
A.3. Bodenkontrollpunkte	A-9
A.3.1. RGB-UAV	A-9
A.3.2. Thermal-UAV	A-11
A.4. Baumhöhen	A-13
A.4.1. Deckungsgrad	A-16
A.5. Thermalaufnahmen	A-18
A.5.1. UAV	A-18
B. Workflow Agisoft	B-24
B.1. Allgemeiner Workflow	B-24
B.2. Oberflächenmodell und Normalfarben-Orthofoto	B-34
B.3. Thermisches Orthomosaik	B-35
C. Evapotranspirationsmodell	C-36
C.1. Variablen	C-36
C.2. Evapotranspirationsmodell	C-39

Abbildungen

2.1. Übersichtskarte	8
2.2. Untersuchungsflächen	9
2.3. Hangneigung und Exposition	11
2.4. Bestandescharakterisierung durch neue Technologien	13
2.5. Aufbau terrestrische Aufnahmen	15
2.6. Ablauf terrestrische Aufnahmen	16
2.7. Bodenkontrollpunkte UAV	17
2.8. Verteilte Bodenkontrollpunkte und generiertes Orthophoto	18
2.9. Prozessierung Aufnahme	19
2.10. BHD Bestimmung	21
2.11. Arbeitsablauf zur Bestimmung des BHD und der Baumposition	22
2.12. Vorgehen zur Bestimmung der Baumhöhe und dem Kronendeckungsgrad	23
2.13. Generierung VHM	24
2.14. Terrestrische Aufnahmen	26
2.15. Thermalaufnahme am Boden	27
2.16. NDVI und LAI	30
2.17. ET-Modell	32
2.18. Deskriptive Statistik	34
3.1. Feldaufnahme BHD	36
3.2. Verdichtete Punktwolke	38
3.3. LAS Tools Bodenklassifikation	41
3.4. Dendrocloud	41
3.5. RStudio Baumidentifikation	42
3.6. Geschnittenen Punktwolke Untersuchungsfläche <i>gut3</i> im Zugwald	43
3.7. Orthophoto Lücherwald <i>gut1</i> und <i>schlecht1</i>	45
3.8. Vegetationshöhenmodell Boxplot	46
3.9. VHM Differenz	47
3.10. Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur	50
3.11. Handgemessene Temperaturen (2m)	51

3.12. Handgemessene relative Luftfeuchtigkeit	52
3.13. Bodentemperatur (10cm)	53
3.14. Oberflächentemperaturen des Bodens (BOT) durch die Thermalkamera.	54
3.15. Ausschnitt Orthomosaik Thermaldrohne	55
3.16. Oberflächentemperatur der drohnengestützten Thermalkamera	56
3.17. Berechnete NDVI-Werte	57
3.18. Bodenwärmeflüsse	59
3.19. Summen der fühlbaren Wärmeflüsse	60
3.20. Bodenkomponente der fühlbaren Wärmeflüsse	61
3.21. Bodenkomponente der fühlbaren Wärmeflüsse	62
3.22. Summen der latenten Wärmeflüsse	63
3.23. Bodenkomponente der latenten Wärmeflüsse	64
3.24. Vegetationskomponente der latenten Wärmeflüsse	66
A.1. Protokollblatt Messungen von Hand	A-8
A.2. VHM Teufiwald	A-13
A.3. VHM Lücherwald	A-14
A.4. VHM Zugwald	A-15
A.5. Thermal-UAV Teufiwald	A-18
A.6. Thermal-UAV Lücherwald	A-19
A.7. Thermal-UAV Zugwald	A-20
B.1. Bildimport	B-25
B.2. Bilderauswahl	B-25
B.3. Kameraeinstellungen	B-26
B.4. Start Alignment	B-27
B.5. Einstellungen Alignment	B-27
B.6. Alignment ink. Tie-Points	B-28
B.7. Setzung Marker	B-28
B.8. Einfügen von Distanzen	B-29
B.9. Marker	B-29
B.10. Georeferenzierung Bodenkontrollpunkte	B-30
B.11. Sukzessive Auswahl	B-31
B.12. Manuelle Selektion	B-31
B.13. Neu-Laden-Kreis	B-31
B.14. Kameraoptimierung	B-32
B.15. Generierung Punktwolke	B-32
B.16. Einstellungen verdichtete Punktwolke	B-32

B.17. Verdichtete Punktwolke B-33

B.18. Export Punktwolke B-33

B.19. DSM und Orthofoto B-34

B.20. DSM und Orthofoto B-35

Tabellen

2.1. Hangneigung, TWI und VHM zur Selektion der Untersuchungsflächen . . .	10
2.2. Bestandescode	12
2.3. Reihenfolge von Bodenmessungen und Thermalfotografie vom 17.10.2019 . . .	25
2.4. Flugpläne Thermaldrohne	28
2.5. Durchgeführte Bodenmessungen und die dafür verwendeten Messinstru- mente	29
3.1. Bestandescode der Untersuchungsflächen basierend auf Feldbegehungen . . .	37
3.2. Auswertung Punktwolken	39
3.3. Überblick Bestandescharakterisierung durch terrestrische Aufnahmen . . .	40
3.4. Auswertung Normalfarben-Drohnenaufnahmen	44
3.5. Genauigkeiten Drohnenaufnahmen	45
3.6. Bestandescode der Untersuchungsflächen basierend auf SfM	49
3.7. Auswertung Thermaldrohne	55
A.1. Einmessung der Versuchsflächen Teufwald	A-1
A.2. Einmessung der Versuchsflächen im Lücherwald	A-2
A.3. Einmessung der Versuchsflächen im Zugwald	A-3
A.4. Bestandescharakterisierung Teufwald basierend auf einer GIS-Analyse . . .	A-4
A.5. Bestandescharakterisierung Lücherwald basierend auf einer GIS-Analyse . . .	A-4
A.6. Bestandescharakterisierung Zugwald basierend auf einer GIS-Analyse . . .	A-5
A.7. Topographischen Feuchteindex (TWI) für das Untersuchungsgebiet Teu- fiwald.	A-5
A.8. Hangneigung im Untersuchungsgebiet Teufwald.	A-5
A.9. TWI (topographischen Feuchteindex) für das Untersuchungsgebiet Lü- cherwald.	A-6
A.10. Hangneigung im Untersuchungsgebiet Lücherwald.	A-6
A.11. TWI (topographischen Feuchteindex) für das Untersuchungsgebiet Zug- wald.	A-6
A.12. Hangneigung im Untersuchungsgebiet Zugwald.	A-6

A.13. Anzahl Bäume pro Entwicklungsstufe im Untersuchungsgebiet Teufiwald.	A-7
A.14. Anzahl Bäume pro Entwicklungsstufe im Untersuchungsgebiet Lücherwald.	A-7
A.15. Anzahl Bäume pro Entwicklungsstufe im Untersuchungsgebiet Zugwald.	A-7
A.16. Einmessung Bodenkontrollpunkte UAV Lücherwald	A-9
A.17. Einmessung Bodenkontrollpunkte UAV Teufiwald	A-10
A.18. Einmessung Bodenkontrollpunkte UAV Zugwald	A-10
A.19. Einmessung Bodenkontrollpunkte Thermal-UAV Teufiwald	A-11
A.20. Einmessung Bodenkontrollpunkte Thermal-UAV Lücherwald	A-12
A.21. Einmessung Bodenkontrollpunkte Thermal-UAV Zugwald	A-12
A.22. Fehler in den verdichteten Punktwolken	A-12
A.23. Deckungsgrad nach Baumhöhen im Teufiwald.	A-16
A.24. Deckungsgrad nach Baumhöhen im Lücherwald.	A-16
A.25. Deckungsgrad nach Baumhöhen im Zugwald.	A-17
A.26. Input Evapotranspirationsmodell Lücherwald	A-21
A.27. Input Evapotranspirationsmodell Teufiwald	A-22
A.28. Input Evapotranspirationsmodell Zugwald	A-23

1. Einführung

Aufgrund des Klimawandels wird es in Zukunft vermehrt zu Starkniederschlägen kommen [1]. Dies resultiert in einem erhöhten Risiko ausgehend von geomorphologischen Gefahren [2]. Dazu gehören flachgründige Rutschungen [3], auch als oberflächennah bezeichnet. Dies sind Rutschungen mit einer Gleitfläche von maximal 2m Tiefe [6]. Ausgelöst werden diese im Falle eines kritischen Verhältnisses zwischen den treibenden Kräften und der Scherfestigkeit [7]. Am Beginn der meisten flachgründigen Rutschungen steht eine Wasserinfiltration im Boden, welche die rückhaltenden Kräfte im Boden verringert [8]. Diese werden durch eine Wassersättigung und der damit einhergehenden Erhöhung des Porenwasserdruckes verringert [5].

Vegetation und insbesondere der Wald können stabilisierend wirken und gewissen destabilisierenden Prozessen, welche zu instabilen Hängen führen, entgegenwirken [6]. Rund 42% des Schweizer Waldes schützen vor Naturgefahren, davon 24% direkt vor Hangmuren und Rutschungen [4]. Die Vegetation nimmt durch verschiedene Prozesse Einfluss auf den Boden. Zum einen wird durch das Wurzelwerk der Boden (mechanisch) armiert und so mechanisch stabilisiert [9]. Zum anderen bewirkt der Wald hydrologische und chemische Veränderungen im Boden [10] und beeinflusst so den (Boden-)Wasserhaushalt durch verschiedene Prozesse. Dazu gehört unter anderem die Interzeption durch das Kronendach [5]. Diese kann dafür verantwortlich sein, dass bis zu 40% des Regens den Boden nicht erreichen [11]. Die hydraulische Konduktivität und das Wasserspeichervermögen werden durch das Wurzelsystem beeinflusst und verbessert [5]. So reduziert beispielsweise ein erhöhtes Wasserspeichervermögen das Risiko, dass die Wassersättigung einen kritischen Wert erreicht [5]. Die Evapotranspiration, bei der sowohl die Wurzeln als auch das Kronendach beteiligt sind, ermöglicht einen Wassertransport vom Boden in die Blätter und über diese in die Atmosphäre [5].

Im NFP 68 Projekt SOSTANAH [5] wurde festgestellt, dass die Waldstruktur die Anfälligkeit auf flachgründige Rutschungen beeinflusst. Im Laufe des Projektes wurde ein 3-Stufen-Filter entwickelt. In dieser dreistufigen retrospektiven Analyse werden Standorte, an welchen Rutschungen stattgefunden haben, bezüglich ihrer Bodenmechanik

und Hangneigung, ihrer Waldstruktur sowie Geländemorphologie überprüft. [Graf et al. \(2017\)](#) zeigten, dass in Abhängigkeit der Ausprägung der Waldstruktur eine erhöhte Anfälligkeit bezüglich flachgründigen Rutschungen besteht. Als unvorteilhaft erwiesen sich unter anderem:

- unbestockte und einschichtige Bestände
- lückige und aufgelöste Bestände
- unbestockte Flächen oder Jungwuchs/Dickung
- ungenügende Mischung

Damit ein optimaler Schutz gewährleistet werden kann, muss die ober- und unterirdische Vielfalt möglichst hoch sein (Alter, Schichtung, Arten, Durchwurzelungstiefe etc.) respektive gefördert werden [5]. Unter Schichtung wird die vertikale Struktur des Waldes [12] verstanden. Einerseits fehlt in Lücken die stabilisierende Wirkung der Wurzeln, die auch bei spärlichem Bewuchs nur gering [13] ist. Andererseits können sehr dichte Wälder jedoch ebenfalls zu einer beträchtlichen Abnahme der Hangstabilität führen [10].

Relative gute Waldstandorte, das heisst Wälder, welche in Hinsicht auf flachgründige Rutschungen einen annähernd *optimalen* Schutz gewährleisten, sind Bestände, welche einen geringen Anteil an Lücken ($< 20\%$) aufweisen und bereits die Entwicklungsstufe *Jungwuchs/Dickung* hinter sich haben [5]. Waldstandorte, welche im Hinblick auf flachgründige Rutschungen einen verminderten Schutz bieten, zeichnen sich dadurch aus, dass sie einen grösseren Anteil an Freiflächen ($\geq 20\%$) aufweisen oder im Bestandeschluss aufgelöst sind [5]. Eine noch stärker geschälerte Schutzfunktion weisen *Jungwuchs* und *Dickungen* auf oder Bestände mit einem sehr grossen Anteil an Freiflächen ($\geq 70\%$) [5].

Schutzwälder müssen also differenzierter betrachtet werden. Ihre Einteilung in bessere oder schlechtere Schutzleistung bedarf einer möglichst akkuraten Bestandescharakterisierung. Diese differenziertere Betrachtung erfolgt vielfach über den Bestandescode [14], welcher vier Eigenschaften des Waldes umfasst: Schichtung, Mischung, Entwicklungsstufe und Deckungsgrad. Für eine genaue Bestandescharakterisierung nach dieser Methode mittels Ansprache im Feld sind momentan noch sehr arbeitsintensive und zeitaufwändige Arbeiten notwendig. So muss jeder Baum einzeln vermessen werden. Dabei wird die Position per Laser oder Messband ermittelt, der Brusthöhendurchmesser (BHD) mit der Kluppe oder dem BHD-Messband aufgenommen und mit Hilfe des Vertex die Höhe des Baumes bestimmt. Insbesondere die Bestimmung der Position kann

sehr ungenau und in dichten Beständen das Erfassen der Baumhöhe beinahe unmöglich sein. Somit sind diese Methoden zur grossflächigen Aufnahme von Bestandesmerkmalen nicht uneingeschränkt geeignet. Trotz dieser Problematik und Unzulänglichkeiten stellt die Bestandescharakterisierung mit Hilfe neuer Techniken wie Drohnen und terrestrischen Aufnahmen nach wie vor eine Nische dar [15, 16].

Drohnen-Aufnahmen (UAV - unmanned aerial vehicle) im Normalfarbennbereich (RGB) können unter anderem verwendet werden, um Baumkrankheiten zu analysieren [17], Biodiversitätsfaktoren aufzunehmen [18] und Baumhöhen zu bestimmen [19]. RGB beschreibt die drei Grundfarben rot, grün und blau, woraus alle durch den Menschen wahrnehmbaren Farben gemischt werden können. UAV werden gegenüber Satelliten bevorzugt, da die Aufnahmen eine höhere Auflösung aufweisen [20, 21] und auch bei Bewölkung Aufnahmen möglich sind [21]. Die Bestimmung der Baumhöhen über UAV-Aufnahmen hat sich in den vergangenen drei Jahren stark verbessert [19, 22, 23, 24] und ermöglicht Genauigkeiten von unter einem Meter [24] (quantifiziert durch die Wurzel aus dem gemittelten Fehlerquadrat (RMSE) [25]). Das Gleiche gilt für die Bestimmung des BHD basierend auf Structure-from-Motion (SfM - Struktur aus Bewegung). SfM ist ein Vorgehen, um aus einfachen Einzelbildern hochaufgelöste dreidimensionale Modelle zu erstellen [26]. Diese Resultate zeigen bezüglich der Genauigkeit noch grössere Fortschritte [22, 23, 25, 27, 28]. Die besten Genauigkeiten erreichten Liu et al. (2018) mit einem RMSE unter einem Meter auf flachem Gelände. Es sind jedoch je nach Bestandesstruktur (Schichtung, Mischung, Entwicklungsstufe und Deckungsgrad) starke Unterschiede in der Genauigkeit zu beobachten [19, 28]. Piermattei et al. (2019) wendete SfM in steileren (5°-17°), teilweise nadelbaumdominierten Beständen an. Die Genauigkeiten in der automatisierten BHD-Bestimmung variieren dabei, je nach Versuchsfläche, im Bereich von 1-5cm (RMSE) [28].

Die Schutzleistung des Waldes im Zusammenhang mit dem Bodenwasserhaushalt ist sehr heterogen. Punktuelle Messungen von Aspekten des Bodenwasserhaushaltes wie beispielsweise die Evapotranspiration (ET) liefern entsprechend ein ungenügendes Bild. Damit der Wasserhaushalt des Waldes besser untersucht und in einem weiträumigen Zusammenhang verstanden werden kann, muss eine Vergrösserung auf die lokale oder sogar regionale Ebene erreicht werden. Dies kann mit Satellitendaten erreicht werden [20]. Die Auflösung ist jedoch zu gross um eine Verbindung zwischen der kleinflächig variierenden Bestandesstruktur und dem aus Satellitendaten berechneten Aspekt des Bodenwasserhaushaltes zu ermöglichen.

Die Evapotranspiration (ET) ist ein wichtiger Aspekt des Wasserhaushaltes eines Waldes [29] und wird durch abiotische Faktoren (Strahlung, Feuchtigkeit, Temperatur und

Wind) sowie durch die Bestandesstruktur beeinflusst [5]. Als wichtiger Indikator bezüglich der Wassernutzungseffizienz [30] schafft die ET eine Verbindung zwischen Ökosystemdienstleistungen und Klima [31]. Die Transpiration kann dazu genutzt werden, um den Gesundheitszustand des Waldes zu erklären [32]. Die ET hat zwischen 1977 und 2014 zugenommen [33]. Zusätzlich zeigt eine aktuelle Studie, dass in Gebirgswäldern der Alpen während wärmeren Sommern erhöhte ET-Werte beobachtet werden können [34]. Ähnliche Resultate sind auch im Gebirge in Sierra Nevada, USA, zu sehen [35]. Somit wird die Bedeutung der ET für den Wasserhaushalt im Gebirge noch wichtiger.

Mit Hilfe von Temperaturdaten kann die ET modelliert werden [36, 37]. Dabei werden zwischen Ein- (SEB) und Zwei-Quellen (TSEB) Modellen unterschieden [37]. Der Unterschied liegt in der Komplexität der Modelle. SEB berechnen die Flüsse als gesamtes, während TSEB die Flüsse in Vegetation und Boden aufteilen [38]. TSEB-Modelle wurden für Temperaturerhebungen mit Satelliten entwickelt und angewendet [20, 39]. Die Verwendung von Satellitenbildern führt jedoch zu starken Einschränkungen. Einerseits ist die räumliche (60m) und zeitliche Auflösung (6-Tages-Rhythmus) für die Untersuchung der verschiedenen Waldstrukturen und deren Einfluss auf den Wasserhaushalt ungenügend [40]. Andererseits sind nur Aufnahmen bei klaren Wetterbedingungen möglich [37]. Aufgrund dieser Unzulänglichkeiten wurde die thermische Aufnahme mit einem UAV erprobt [21]. Dieses Verfahren ermöglicht eine höhere zeitliche und räumliche Auflösung, sowie Aufnahmen bei Bewölkung [41].

Als thermodynamischer Prozess ist die ET unter anderem stark von der Temperatur beeinflusst. Folglich sind diesbezügliche Informationen für den Wald von grosser Bedeutung und wurden entsprechend in verschiedenen Arbeiten untersucht [42, 43, 44, 45]. Zum einen zeigt sich, dass die Oberflächentemperatur, gemessen mit einer Thermalkamera angebracht an einem Flugzeug, negativ mit dem Logarithmus von Stammvolumen und Grundfläche sowie der Baumhöhe korreliert [42]. Zusätzlich herrschen im Wald tieferen Maximaltemperaturen [43]. Ehbrecht et al. (2019) zeigten explizit auf, dass der Kronendeckungsgrad (DG) einen grossen Einfluss auf die täglichen Extrema hat. Je offener das Kronendach, desto grösser war der gemessene Unterschied zwischen dem täglichen Temperaturmaximum und -minimum auf 2m Höhe [44]. Es besteht zudem ein starker Zusammenhang zwischen dem Blattflächenindex (LAI, Leaf area Index) und der gemessenen Lufttemperatur [45]. Je höher der LAI, desto weniger Licht erreicht den Boden und desto tiefer ist die tägliche Maximaltemperatur [45]. Dies ist teilweise auf den reduzierten vertikalen Fluss von Luft innerhalb der Baumkronen zurückzuführen [46].

Das Ziel dieser Arbeit ist es, Techniken zur Bestandescharakterisierung durch SfM und Modellierung der ET durch thermische Aufnahmen, welche bereits vorhanden und

in Wäldern sowie anderen Bereichen angewendet werden, auf rutschungsexponierte Gebirgswälder zu übertragen. Der Fokus liegt in steil geneigten (34°-40°) Fichtenwäldern, in welchen flachgründige Rutschungen auftreten können. Dadurch wird ein wichtiger Beitrag zur differenzierten Charakterisierung von Schutzwäldern durch neue Techniken geleistet. Zudem wird durch die Untersuchung der Temperaturen und der daraus modellierten ET eine Wissenslücke im Einfluss der Bestandescharakterisierung auf den Bodenwasserhaushalt geschlossen.

1.1. Forschungsfragen

Mit UAV und terrestrischen Aufnahmen von Thermal- und RGB-Bildern wird die Struktur des Waldes, die Temperatur am Boden, im und oberhalb des Bestandes sowie die ET der Untersuchungsflächen bestimmt. Die Temperatur und die ET der verschiedenen Waldzustände wird verglichen und untersucht sowie abgeklärt, ob eine rutschungsanfälligere Waldstruktur auch einen negativen Effekt auf dessen Wasserhaushalt, insbesondere die ET, hat.

Diese Masterarbeit befasst sich deshalb mit drei zentralen Hypothesen, welche in einem weiteren Schritt in Forschungsfragen unterteilt wurden.

A Moderne Techniken, wie UAV-gestützte Photogrammetrie oder SfM erlauben eine vereinfachte Charakterisierung von Waldstandorten (Erfassung Bestandescode) in rutschungsexponierten Gebirgswäldern.

A.1 Ist die Erstellung von akkuraten 3D-Modellen durch SfM aus terrestrischen und UAV RGB-Aufnahmen in Gebirgswäldern möglich?

A.2 Können die BHD der Bäume aufgrund der auf den terrestrischen RGB-Aufnahmen basierten 3D-Modelle extrahiert werden?

A.3 Kann basierend auf den UAV-Aufnahmen ein digitales Oberflächenmodell (DSM) generiert werden und in einem weiteren Schritt daraus ein Vegetationshöhenmodell (VHM) berechnet werden?

A.4 Können terrestrische und UAV Fotogrammetrie zur Anwendung des Bestandescodes nach [Rickli et al. \(2005\)](#) verwendet werden?

B Auf Basis von luft- und bodengestützten thermischen Fotografien kann die Temperaturverteilung unterschiedlicher Waldstrukturen in rutschungsexponierten Gebirgswäldern erfasst werden.

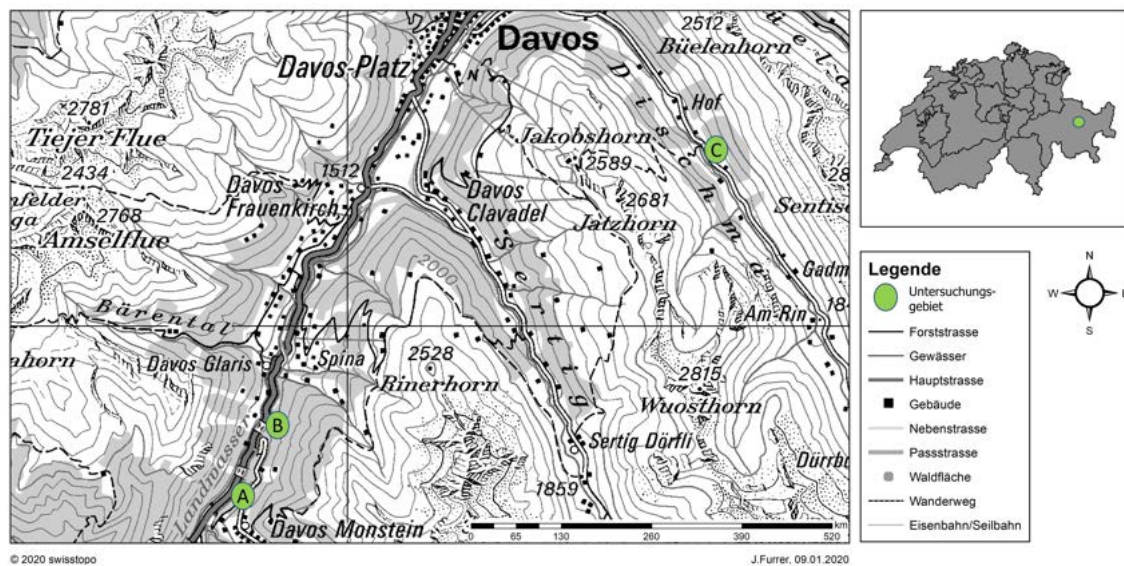
- B.1 Können Kronendachtemperaturen basierend auf thermischen UAV-Aufnahmen bestimmt werden?
 - B.2 Ist es möglich Bodenoberflächentemperaturen in Gebirgswäldern mit Hilfe einer Thermalkamera zu messen?
 - B.3 Sind Temperaturunterschiede in für die Schutzwirkung vor flachgründigen Rutschungen vorteilhaft und ungenügend strukturierten Gebirgswäldern zu beobachten?
- C Die Temperaturverteilung erlaubt die Modellierung der Evapotranspiration in rutschungsexponierten Gebirgswäldern und ermöglicht eine erste flächenhaft differenzierte Darstellung der Schutzwirkung des Waldes gegenüber flachgründigen Rutschungen.
- C.1 Können mit Hilfe von UAV- und terrestrisch basierten Thermalaufnahmen realitätsnahe ET-Werte berechnet werden?
 - C.2 Sind Unterschiede in der ET-Rate zwischen den für die Schutzwirkung vor flachgründigen Rutschungen vorteilhaft und ungenügend strukturierten Gebirgswäldern zu beobachten?

2. Material und Methoden

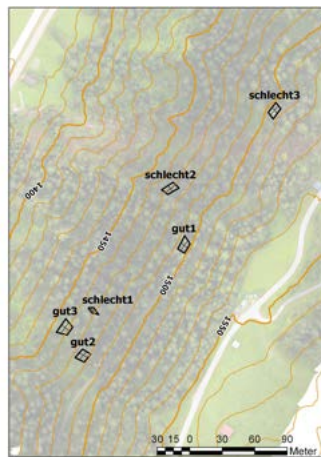
Die Bestandescharakterisierung wurde auf zwei unterschiedlichen Wegen erarbeitet. Zum einen wurde die Bestandescharakterisierung basierend auf klassischen Feldaufnahmen gemacht, zum anderen mit photogrammetrischen Aufnahmen. Zudem wurde ein Modell verwendet, um die ET der Untersuchungsflächen zu berechnen. Sowohl für das Modell wie auch für die Bestandescharakterisierung durch neue Technologien wurden Aufnahmen am Boden sowie aus der Luft (UAV) gemacht. Zur Bestandescharakterisierung wurden RGB-Bilder verwendet, während für das ET-Modell thermische Aufnahmen gemacht wurden. Zusätzlich wurden die thermischen Aufnahmen zur Interpretation der Temperaturverteilung in den verschiedenen Untersuchungsflächen verwendet. Für das ET-Modell wurden zudem die Lufttemperatur und relative Feuchtigkeit auf 2m Höhe von Hand gemessen. Sowohl die Messungen von Hand wie auch die thermischen Aufnahmen wurden für jede Untersuchungsfläche am gleichen Tag gemacht.

2.1. Untersuchungsgebiete

In der Landschaft Davos (GR) wurden drei Untersuchungsgebiete definiert: Lücherwald, Teufiwald und Zugwald ([2.1a](#)). Die Gebiete wurden in Übereinstimmung mit anderen am WSL-Institut für Schnee-und Lawinenforschung (SLF) laufende Projekten ausgeschieden. Im Teufiwald ist seit Herbst 2018 ein Pilotversuch zu Bodenfeuchtigkeit und Waldstruktur im Gange. Im Lücherwald und im Zugwald sind Untersuchungen im Rahmen des Projekts ”Waldstruktur, Wasserhaushalt und flachgründige Rutschungen” (WaWaRu) geplant. In jedem dieser drei Untersuchungsgebiete wurden sechs Untersuchungsflächen, drei *gut* und drei *schlecht* strukturierte, definiert. Jede dieser Flächen hat eine Grundfläche von 10x10m. Die einzelnen Untersuchungsflächen wurden weiter in vier Quadranten gegliedert ([Abb. 2.1b - 2.1d](#)). Die vier Quadranten erstrecken sich jeweils von der Mitte zwischen zwei Eckpunkten zum Mittelpunkt hin, sodass ein Raster mit einer Auflösung von ca. 5m x 5m entsteht. Diese Aufteilung werden für die Aufnahmen beschrieben in [Kap. 2.2.2](#), [Kap. 2.2.3.5](#), [2.3.1.1](#) und [Kap. 2.3.2](#) verwendet.



(a) Übersichtskarte



(b) Untersuchungsgebiet Lücherwald



(c) Untersuchungsgebiet Zugwald



(d) Untersuchungsgebiet Teufiwald

Abb. 2.1. Übersichtskarte (a) mit den drei Untersuchungsgebieten Lücherwald (A), Zugwald (B) und Teufiwald (C). In den Abbildungen b), c) und d) sind die Untersuchungsflächen (schlecht1 bis 3, gut1 bis 3) der einzelnen Untersuchungsgebiete zu sehen. Die gestrichelten Linien innerhalb der Untersuchungsflächen stellen die Aufteilung der Untersuchungsflächen in die jeweils vier Quadranten dar.

Die in der vorliegenden Arbeit als *gut* und *schlecht* bezeichneten Standorte sind nicht per se gute oder schlechte Standorte im forstwirtschaftlichen oder ökologischen Sinne, sondern bezeichnen vielmehr die Waldstruktur im Sinne ihrer Anfälligkeit auf flachgründige Rutschungen. Als *schlecht* strukturiert wurden Untersuchungsflächen definiert, welche eine einschichtige Struktur aufwiesen (Abb. 2.2a). Das heisst, alle Bäume sind in etwa gleich hoch und die Kronen berühren sich [47]. Zudem wurde darauf geachtet, dass die Bäume alle einen ähnlichen Brusthöhendurchmesser (BHD) vorwiesen. *Gut* struktu-

rierte Untersuchungsflächen zeichnen sich durch eine mehrschichtige Struktur aus, Bäume mit unterschiedlichem Alter und verschiedenen Höhen (Abb. 2.2b). Zusätzlich wurde die Mischung betrachtet. Für die *schlecht* strukturierten Untersuchungsflächen wurden reine Fichtenwälder gewählt, während für die *gut* strukturierten Untersuchungsflächen Bestände mit verschiedenen Baumarten ausgeschieden wurden.



(a) als *schlecht* strukturiert eingestufte Untersuchungsfläche



(b) als *gut* strukturiert eingestufte Untersuchungsfläche

Abb. 2.2. Aufnahme einer als *schlecht* a) und *gut* b) strukturiert eingestuften Untersuchungsfläche. Als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen wurden reine Fichtenwälder mit einer einschichtigen Struktur ausgeschieden (a). Als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen zeichnen sich durch eine mehrschichtige Struktur aus (b). Abbildung a) zeigt die Untersuchungsfläche *schlecht3* im Untersuchungsgebiet Zugwald, aufgenommen am 26.11.2019. Abbildung b) zeigt die Untersuchungsfläche *gut2* im Untersuchungsgebiet Lücherwald, aufgenommen am 01.10.2019.

Die Untersuchungsflächen wurden auf Basis einer Analyse der gesamten Gebiete mit ArcGIS PRO 2.3.2 [48] und SAGA-Gis 7 [49] vorselektioniert. Diese Analyse basiert auf der Hangneigung (SLOPE), Vegetationshöhenmodell (VHM) [50], die Waldmischungskarte [51] sowie den topographischen Feuchteindex (TWI, topographic wetness index). Die Hangneigung wurde vom digitalen Höhenmodell swissALTI3D (5m Auflösung) berechnet [52]. Der TWI sagt aus, wie stark eine Zelle dazu neigt, Wasser zu akkumulieren [53]. Je höher der TWI desto höher die Tendenz Wasser zu akkumulieren [54]. Die Berechnung des TWI wurde in SAGA-Gis 7 [49] durchgeführt und benötigt das Höhenmodell und die Fliessakkumulation. Zur Berechnung der Fliessakkumulation wurde der MFD-md Algorithmus verwendet [55].

Die Streuung der drei Faktoren wurde minimiert um einerseits möglichst einheitliche Grundeigenschaften der Untersuchungsflächen zu garantieren und andererseits um die Vergleichbarkeit der Resultate zu wahren. Zusätzlich wurde darauf geachtet nur Untersuchungsflächen zu bestimmen, in welchen basierend auf den drei oben genannten Variablen, eine Rutschung möglich wäre. Es wurden somit potentielle Rutschungsgebiete

selektioniert. Die Kriterien sind in [Tab. 2.1](#) aufgelistet. Es wurden Flächen mit Hangneigungen von 34-40° bestimmt. In diesem Neigungsbereich wurden bei Unwettern die meisten flachgründigen Rutschungen beobachtet, sowohl im Freiland (34-36°) als auch im Wald (38-40°) [\[10\]](#). In den *schlecht* strukturierten Untersuchungsflächen wurde durch das VHM sichergestellt, dass alle Bäume mindestens eine Höhe von 30m erreichten. In den *gut* strukturierten Untersuchungsflächen wurden Flächen ausgewählt, welche im VHM starke Unterschiede aufweisen. Diese wurden als Indiz für eine variable vertikale Strukturierung betrachtet. Für den TWI wurden wie bei der Hangneigung die Daten aus der Rutschungsdatenbank der WSL analysiert. Die Analyse ergab einen TWI von 4.5 beim 25%-Quantil [\[56\]](#), welcher als Untergrenze festgelegt wurde.

Tab. 2.1. Verwendete Kriterien der GIS-Analyse zur Auswahl der je sechs Untersuchungsflächen in Lücherwald, Teufiwald und Zugwald. SLOPE beschreibt die Hangneigung, TWI den topographischen Feuchteindex und VHM das Vegetationshöhenmodell [\[50\]](#).

SLOPE [°]		TWI	VHM [m]	
min.	max.	min.	min.	max.
34	40	4.5	0	30

In einer Feldbegehung wurden die im GIS vorselektionierten Untersuchungsflächen evaluiert. Mögliche Untersuchungsflächen wurden per GNSS (Globales Navigationssatellitensystem)-Gerät Stonex S800 [\[57\]](#) eingemessen, in einer zweiten GIS-Analyse validiert, die finalen Untersuchungsflächen ausgeschieden und anschliessend im Feld mit einem Leica DISTO X310 [\[58\]](#) vermessen. Für jede Fläche wurden die vier Eckpunkte und der Mittelpunkt mit dem GNSS-Gerät eingemessen (Tabellen [A.1](#) - [A.3](#)).

Die Flächen im Teufiwald sind tendenziell flacher (Tabellen [A.4](#) - [A.6](#)). Während der Teufiwald eine Süd bis West Exposition aufzeigt, sind die Flächen im Lücherwald und Zugwald West bis Nord-West ausgerichtet ([Abb. 2.3](#)). Detaillierte Werte können in den Tabellen im Anhang [Kap. A.2](#) entnommen werden.

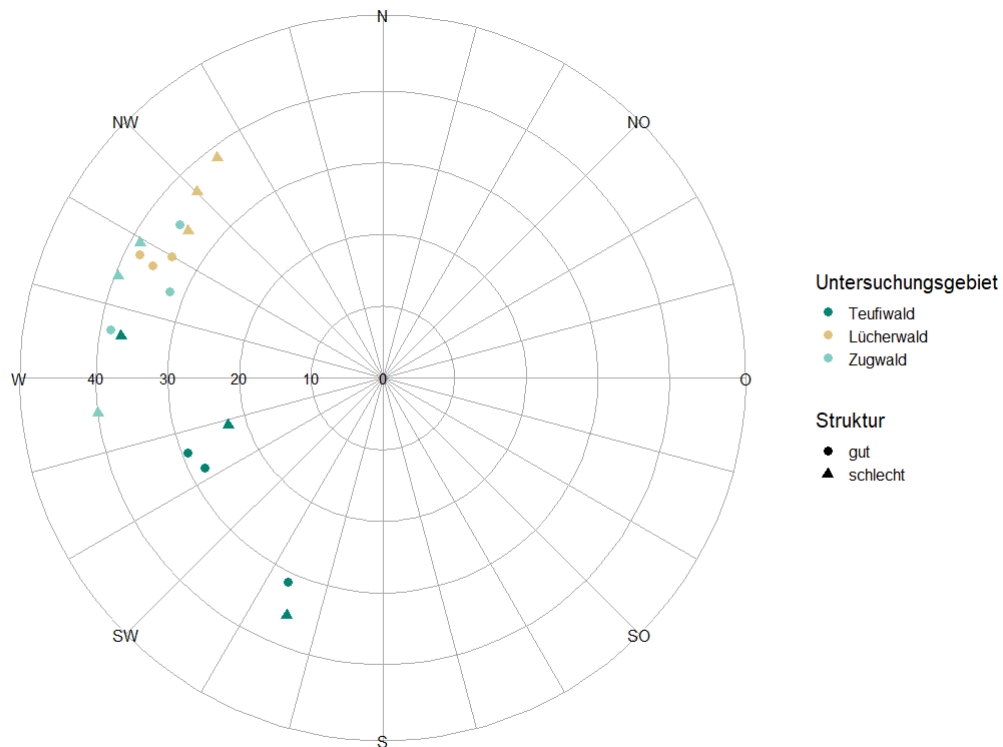


Abb. 2.3. Hangneigung und Exposition der insgesamt 18 Untersuchungsflächen.

2.2. Bestandescharakterisierung

2.2.1. Bestandescode

Um die Untersuchungsflächen genauer zu klassifizieren wurde der Bestandescode nach [Rickli et al. \(2005\)](#) verwendet ([Tab. 2.2](#)). Dabei wurden die vertikale Schichtung, die Entwicklungsstufe, der Mischungs- sowie der Kronendeckungsgrad beurteilt. Basierend auf der Beurteilung entstand pro Untersuchungsfläche ein vierstelliger Code ([Tab. 2.2](#)).

2.2.2. Feldaufnahmen

Baumposition, BHD, Baumhöhe und Kronendeckungsgrad wurden per Hand aufgenommen. Die Bäume wurden auf einem Protokollblatt eingezeichnet [Abb. A.1](#). Die Baumposition wurde geschätzt, wobei bei Untersuchungsflächen mit viel Verjüngung die Baumposition gruppenweise eingetragen wurden. Berücksichtigt wurden alle Baumarten ab

Tab. 2.2. Bestandescode nach [Rickli et al. \(2005\)](#). Bäume mit einer Höhe zwischen 40cm und 130cm gehören zur Entwicklungsstufe *Jungwuchs*. Solche mit einer Höhe > 130cm und einem Brusthöhendurchmesser < 10cm zur *Dickung*. Die Schichtung wurde vor Ort klassifiziert. Zur Bestimmung der Entwicklungsstufe wurden die Brusthöhendurchmesser (BHD) sowie die Höhen der aufgenommenen Bäume verwendet. Um die Mischung zu beurteilen wurden die Baumarten zusätzlich zu den gemessenen Baumeigenschaften (BHD & Höhe) notiert. Der Kronendeckungsgrad wurde ebenfalls vor Ort bestimmt.

Schichtung		Entwicklungsstufe	
unbestockt	0xxx	unbestockt	x0xx
einschichtig	1xxx	Jungwuchs / Dickung	x1xx
mehrschichtig	2xxx	Stangenholz (BHD 10-20)	x2xx
gut strukturiert	3xxx	Baumholz I (BHD 20-35)	x3xx
		Baumholz II (BHD 35-50)	x4xx
		Baumholz III (BHD > 50)	x5xx
		gut strukturierter Bestand	x6xx
Mischung		Deckungsgrad	
unbestockt	xx0x	unbestockt	xxx0
>80% Nadelholz	xx1x	gedrängt (90%)	xxx1
Mischbestand	xx2x	normal (80%)	xxx2
>80% Laubholz	xx3x	locker (60%)	xxx3
		lückig (40%)	xxx4
		aufgelöst (20%)	xxx5

einer Höhe von 40cm [6]. Der Anwuchs wurde nicht aufgenommen. Der BHD wurde ab 6cm aufgenommen, da eine automatische BHD-Erfassung von einem BHD < 6cm nicht funktioniert [28] und im Bestandescode nach [Rickli et al. \(2005\)](#) erst eine BHD-Information > 12cm berücksichtigt wird. Der Kronendeckungsgrad wurde im Feld abgeschätzt. Diese Aufnahmen wurden zur Validierung der Bestimmung der Baumposition, der BHD-Erfassung und des Kronendeckungsgrades (DG) durch Structure-from-Motion (SfM) verwendet ([Kap. 2.2.3.4](#) [Kap. 2.2.3.5](#)).

2.2.3. Bestandescharakterisierung durch UAV und terrestrische Aufnahmen

Ziel der Bestandescharakterisierung mittels SfM war es, die Baumhöhen basierend auf Drohnenaufnahmen (UAV) sowie BHD und Position des Baumes basierend auf den terrestrischen Aufnahmen zu bestimmen. Die Prozessierung kann in vier Phasen aufgeteilt werden ([Abb. 2.4](#)):

Phase 1: Aufnahmeprozess (Kap. 2.2.3.1 & Kap. 2.2.3.2)

Phase 2: Erstellung der 3D-Punktwolke (Kap. 2.2.3.3)

Phase 3: Weiterverarbeitung der 3D-Punktwolke (Kap. 2.2.3.4 & Kap. 2.2.3.5)

Phase 4: Resultate (Kap. 2.2.3.4 & Kap. 2.2.3.5)

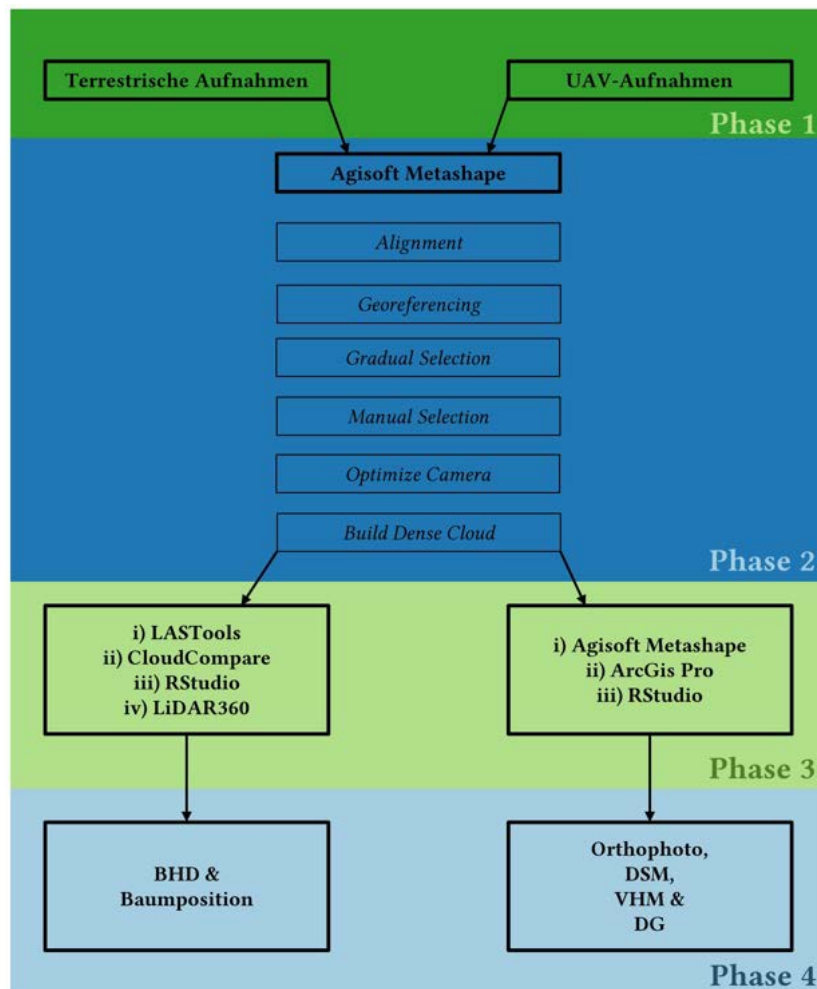


Abb. 2.4. Schema des Vorgehens zur Bestandescharakterisierung durch vereinfachte Technologien. Phase 1 entspricht der Normalfarbenaufnahme (RGB) durch die Drohne (UAV) und terrestrische Kamera. Die Erstellung von verdichteten Punktwolken folgt für die terrestrischen und die UAV Aufnahmen dem gleichen Schema (Phase 2). Die Weiterverarbeitung der verdichteten Punktwolken unterscheidet sich je nach Aufnahmeart (Phase 3). Während für die terrestrischen Aufnahmen andere Softwares verwendet wurden, um den Bruthöhendurchmesser (BHD) und die Baumposition zu bestimmen (Phase 4), wurden für die UAV basierten Punktwolken in Agisoft Metashape das Orthofoto und das Oberflächenmodell (DSM) erstellt. Die prozessierten Punktwolken wurden weiterverarbeitet, woraus anschliessend das Vegetationshöhenmodell (VHM) und der Kronendeckungsgrad (DG) berechnet wurde (Phase 4).

2.2.3.1. Terrestrische Normalfarbenaufnahmen zur Bestandescharakterisierung

Das Vorgehen basiert auf den Arbeiten von [Piermattei et al. \(2019\)](#), [Liang et al. \(2015\)](#) und [Mokroš et al. \(2018\)](#). Zur Einrichtung der Untersuchungsflächen wurden zwei Schnüre sowie ein Massband ausgelegt und Kontrollpunkte an den einzelnen Bäumen angebracht [Abb. 2.5](#). Die rosaroten Schnüre wurden verwendet, damit eine verbesserte Orientierung während den Aufnahmen möglich war. Die Kontrollpunkte (KP) wurden zur Distanzmessung verwendet um später die Genauigkeit des 3D-Modells zu überprüfen. Es wurden Testbilder zur Einstellung der Kamera aufgenommen. Das Einrichten und die Testaufnahmen nahmen in der Regel rund 30 Minuten in Anspruch.

Die terrestrischen RGB-Aufnahmen (Fotos) wurden mit einer Canon EOS 6D mit dem Objektiv EF 25-105mm f/4 L IS II USM aufgenommen. Die Auflösung beträgt 5472x2648 Pixel. Der Fokus wurde auf unendlich, die Brennweite auf 24mm eingestellt und die Verschlusszeit auf 1/100 fixiert. Somit konnte garantiert werden, dass die Aufnahmen ohne Stativ scharf werden. Der ISO-Wert wurde an die Lichtverhältnisse angepasst. Um das Rauschen in den Bildern zu minimieren, wurde der ISO so klein wie mögliche gehalten und auf 1500 limitiert. Die Belichtungskorrektur wurde so eingestellt, dass der Mindestwert der Blende trotz dem tiefen ISO-Wert und der gegebenen Verschlusszeit erreicht werden konnte.

Aufgrund der schlechten Lichtverhältnisse im Zugwald wurden diese Kameraeinstellungen für einen zweiten Versuch überarbeitet. Für die Untersuchungsfläche *schlecht1* wurden die Blende auf f/6.3 und der ISO-Wert auf 1600 fixiert, für *schlecht3* auf f/7.1 und 1600, wobei der Fokus stets auf 6m eingestellt war. Die Verschlusszeit wurde basierend auf diesen Einstellungen für jedes Bild automatisch angepasst. Diese Einstellungen waren aufgrund der Verwendung eines Stativs möglich.



Abb. 2.5. Schema des Versuchsaufbaus für die terrestrischen Normalfarbenaufnahmen (RGB) in den Untersuchungsflächen. Die rosarote Eckfahne stellt einen Bodenkontrollpunkt (BKP) dar, welcher mit einem globalen Navigationssatellitensystem-Gerät (GNSS) eingemessen und zur Georeferenzierung der Aufnahmen verwendet wurde. Jede Untersuchungsfläche hat fünf BKP (4 Eckpunkte, 1 Mittelpunkt). Die Blätter an den Bäumen mit den unterschiedlichen Muster wurden als Kontrollpunkte verwendet. Die mit verschiedenen Mustern bedruckten Markierungen an den Bäumen sind die Kontrollpunkte (KP), welche zur späteren Validierung der Punktwolke vom Boden aus eingemessen wurden.

Es wurden entlang, diagonal und um den Mittelpunkt der Untersuchungsfläche Fotos aufgenommen ([Abb. 2.6](#)). Damit man sich auf der Fläche besser orientieren konnte, wurde sowohl eine Schnur rund um die Untersuchungsfläche gelegt, wie auch diagonal durch die Fläche ([Abb. 2.5](#)). Entlang der Untersuchungsfläche wurden die Bilder im Winkel von 90° zur Seitenlinie in Richtung Mittelpunkt aufgenommen. Der Abstand zur seitlichen Flächenbeschränkung wurde je nach Situation angepasst. Grundsätzlich wurde darauf geachtet, dass die Schnur am unteren Bildrand erkennbar war. Der Start für die Aufnahmen entlang der beiden im Abstand von drei Metern parallel angelegten Diagonalen erfolgte am Start- und Endpunkt der Aufnahmen entlang der Seiten ([Abb. 2.6](#)). Auf dem Hinweg zum gegenüberliegenden Endpunkt wurde in die eine, auf dem Rückweg in die andere Richtung fotografiert. Dabei wurden die Aufnahmen mit einem Winkel von 90° zur Diagonalen in Richtung der weiter entfernten Ecke aufgenommen. Die Bilder im Zentrum wurden in Richtung Aussenlinien der Untersuchungsfläche im 90° Winkel zum Kreis erstellt. Es wurde alle 0.5m bis 1m ein Bild aufgenommen. Bei den als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen oder bei schwierigen Aufnahmebedingungen,

wenn beispielsweise ein Baum direkt auf der Seitenlinie stand, wurden mehrere Bilder pro Meter aufgenommen.

Dieser Aufnahmeprozess führte zwar zu einem grösseren Aufwand, garantiert aber, dass jeder Baum von jeder Seite ausreichend oft fotografiert wurde. Die Dauer der eigentlichen Aufnahmen war abhängig vom Gelände sowie der Anzahl der angefertigten Bilder und bewegte sich zwischen 15 und 30 Minuten.

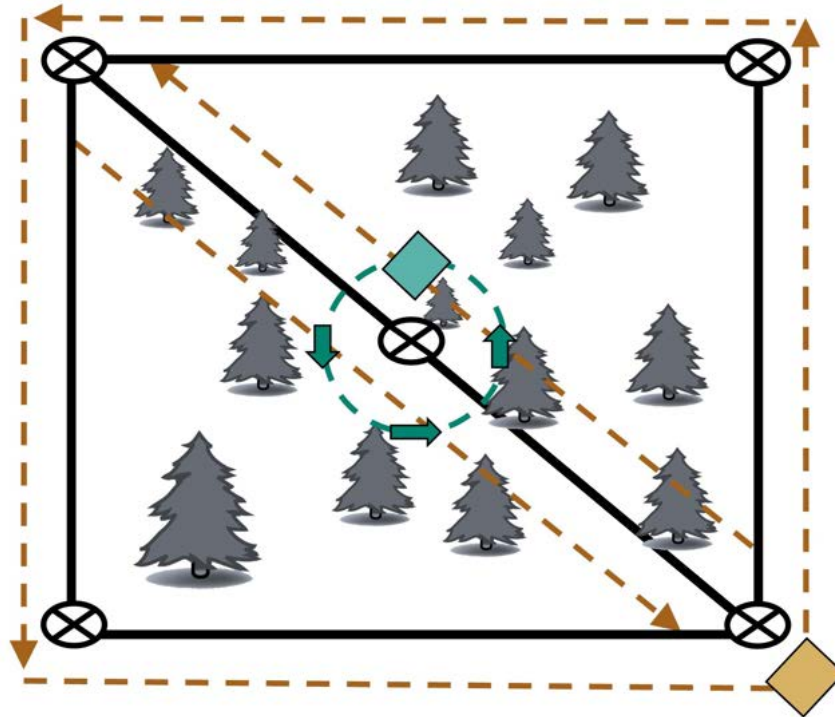


Abb. 2.6. Aufnahmeprozess der terrestrischen Normalfarbenfotos (RGB). Der Ablauf ermöglicht eine detaillierte und umfangreiche Abbildung der Untersuchungsflächen. Die Schüre zur Orientierung wurden entlang der seitlichen Beschränkung sowie in der Diagonale ausgelegt (schwarze Linien). Die gestrichelten Linien mit den Pfeilen repräsentieren den Aufnahmeablauf. Die Kreuze stellen die Bodenkontrollpunkte (BKP) dar. Das braune Quadrat stellt den Start- und Endpunkt der Aufnahmen entlang und diagonal durch die Untersuchungsfläche dar. Das grüne Quadrat stellt den Start- und Endpunkt der Aufnahmen um den Mittelpunkt dar.

2.2.3.2. Normalfarbenaufnahmen mit der Drohne für das Vegetationshöhenmodell und Orthofoto

Zur RGB-Aufnahme aus der Luft wurden die Bodenkontrollpunkte (BKP) ([Abb. 2.7a](#)) zur Georeferenzierung basierend auf den Flugplänen verteilt und mit einem GNSS-Gerät eingemessen (Tabellen [A.17](#) - [A.18](#)). Die BKP wurden in den Randregionen sowie im

Zentrum des späteren Orthofotos verteilt (Abb. 2.8). Dies gewährleistet eine exakte Entzerrung der Bilder und erhöht die Genauigkeit im Randbereich. Grundsätzlich sollte ein BKP so gelegt werden, damit dieser auf drei Bildern sichtbar ist [59]. Basierend auf der Flächengrösse wurde die Anzahl BKP angepasst.

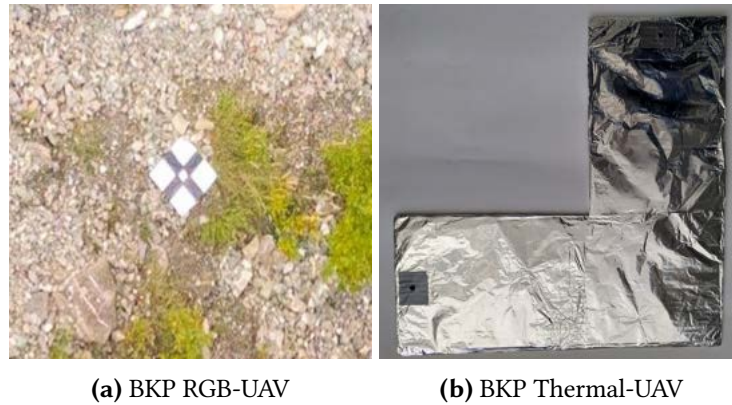


Abb. 2.7. Abbildung der Bodenkontrollpunkte (BKP) für die Drohnen(UAV)-Aufnahmen. Für die RGB UAV-Aufnahmen wurde ein vorgefertigtes Standard BKP (a) und für die thermischen ein mit Alufolie überzogener Karton (b) verwendet.

Für die Aufnahmen wurde ein UAV des Typs DJI Mavic Pro 2 [60] mit einer Hasselblad-kamera [61] (35mm, f/2.8-f/11) verwendet (Bildauflösung 5372x3648 Pixel). Die Flugpläne wurden mit der Software UgCS 3.5.133 für die verschiedenen Untersuchungsgebiete erstellt [62]. Am Flugtag wurde die Drohne zum Testen von Kamera und Bildqualität erst ohne Flugplan gestartet.

2.2.3.3. Erstellung der 3D-Modelle

Die Verarbeitung der Bilder wurde in Agisoft Metashape 1.6.1 [63] gemäss [Piermattei et al. \(2019\)](#) und [LLC \(2019\)](#) durchgeführt (Abb. 2.4). Die Bilder (Abb. 2.9a) wurden orientiert und ausgerichtet (Abb. 2.9b). Daraus entstand eine erste Punktwolke mit Verknüpfungspunkten. In einem zweiten Schritt wurde die Punktwolke mit Hilfe der BKP georeferenziert und die Distanzen zwischen den KP eingefügt (Abb. 2.9c). In einem dritten Schritt wurden Punkte gelöscht, welche nicht auf genügend Bildern zu finden waren und eine zu grosse Unsicherheit vorwiesen. Ebenso wurde mit Ausreissern und Punkten, welche nicht gebraucht wurden, verfahren. Basierend auf diesen Änderungen der Verknüpfungspunkte wurden verschiedene Bildparameter automatisch optimiert, so beispielsweise die gemessene Brennweite in den Pixeln oder verschiedene Koeffizienten der radialen Verzerrung. Anschliessend wurde die verdichtete Punktwolke berechnet (Abb. 2.9d). Diese stellt einerseits das Endprodukt von Agisoft Metashape für die ter-

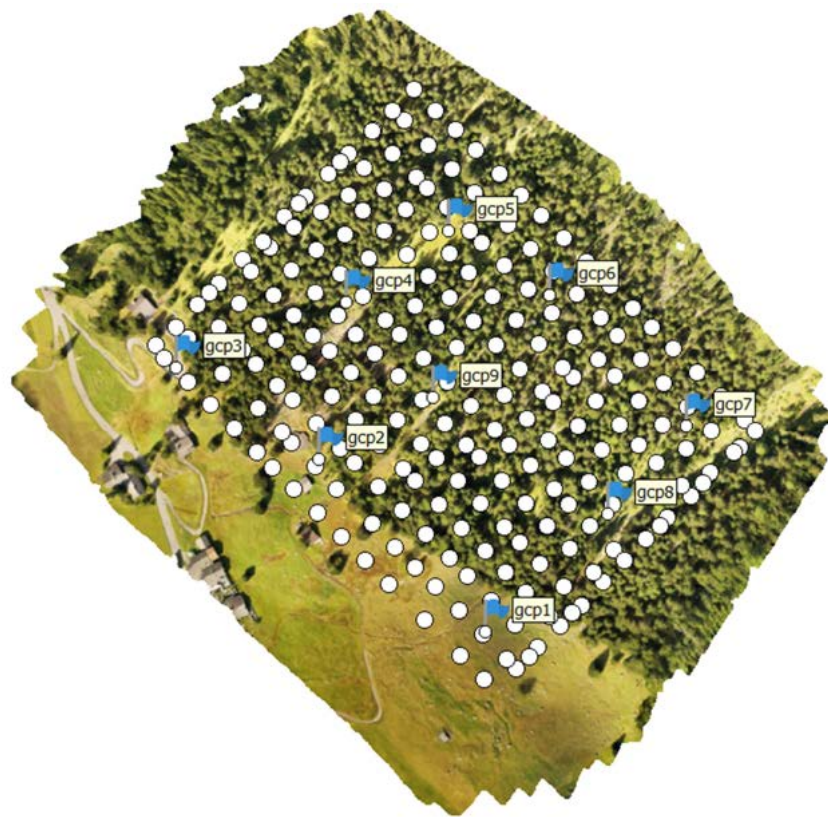


Abb. 2.8. Ein mit Agisoft Metashape erstelltes Orthofoto am Beispiel des Untersuchungsgebietes Teufiwald. Die blauen Fahnen (gcpX) markieren die Bodenkontrollpunkte (BKP), die weissen Punkte die Drohnen(UAV)-Normalfarben(RGB) Fotos.

restrischen Aufnahmen dar und ist andererseits Ausgangspunkt für die Verwendung mit spezifischen Software. Genauere Angaben zu diesem Arbeitsablauf sind im [Anhang B](#) zu finden.

Das Vorgehen zur Verarbeitung der UAV- und terrestrischen Fotos unterscheidet sich nur wenig. Einzig die ausgewählten Einstellungen für die Orientierung und zur Erstellung der verdichteten Punktwolken wurden angepasst. Die BKP entsprechen in den terrestrischen Aufnahmen den fünf eingemessenen Punkten in [Kap. 2.1](#). Für die UAV-Aufnahmen wurden neue Punkte als BKP eingemessen ([Kap. 2.2.3.2](#)).

2.2.3.4. Bestimmung von Brusthöhendurchmesser und Baumposition auf Basis der terrestrischen Aufnahmen

Die Punktwolken der terrestrischen Aufnahmen wurden zur Bestimmung der Baumposition und BHD weiterverarbeitet. Diese Analyse wurde nur im Untersuchungsgebiet Zugwald durchgeführt, da lediglich dort das Erstellen der verdichteten Punktwolke für



(a) RGB-Aufnahme



(b) First Alignment



(c) markierte Kontrollpunkte



(d) verdichtete Punktwolke

Abb. 2.9. Visualisierung des Vorgangs, wie mit Structure from Motion (SfM) aus Aufnahmen verdichtete Punktwolken erstellt werden. Abbildung a) zeigt eine RGB-Aufnahme, wie diese mehrfach pro Untersuchungsfläche gemacht wurde. Abbildung b) zeigt das First Alignment. Die blauen Kacheln stellen die einzelnen Fotos dar, die blauen Fahnen die verschiedenen Bodenkontrollpunkte (BKP) und Kontrollpunkte (KP). In Abbildung c) sind markierte KP (grünen Fahnen) und BKP (graue Fahnen) zu sehen. Abbildung d) zeigt die verdichtete Punktwolke, welche aus Normalfarben-Aufnahmen entwickelt wurde.

alle Untersuchungsflächen möglich war. Es wurden LASTools [65], RStudio 3.5.1 [66], CloudCompare 2.10.2 [67], Dendrocloud 1.50 [68] und LiDAR360 v4.0 [69] getestet. Diese Programme wurden für die Verarbeitung von LiDAR-Daten entwickelt. Verdichtete Punktwolken entstehen sowohl für Laserscanning als auch für Photogrammetrie und es hat sich gezeigt, dass diese Programme auch für die Verarbeitung von Punktwolken, welche mit SfM erzeugt wurden, verwendet werden können [25]. Das Vorgehen war für alle Programme ähnlich (Abb. 2.11). Zuerst wurden die Punktwolken gefiltert und in Bodenpunkte und Nicht-Bodenpunkte kategorisiert. Basierend auf dieser Kategorisierung wurde die normierte Höhe berechnet und die Punktwolke zur Bestimmung des BHD zwischen 1.29m und 1.31m geschnitten, was der Höhe der im Feld durchgeführten BHD-Aufnahmen entspricht. Dieser Wert wurde bei ungenügender Punktedichte angepasst.

Die Ergebnisse der SfM basierten BHD-Bestimmung wurden anhand der Feldaufnahmen validiert.

i) LASTools

Die verdichtete Punktwolke wurden mit Hilfe der LASTools [65] verarbeitet. Um die Punktwolke in kleinere Bereiche, sogenannte Tiles, für die Analyse aufzutrennen, wurde der *Huge File Ground Classify* in ArcGIS PRO 2.3.2 [48] verwendet. Eine Aufteilung wurde gemacht, damit grosse Punktwolken besser verarbeitet und jede Rasterzelle separat klassifiziert werden konnte. Die daraus entstandenen Kategorisierung von Bodenpunkten und Nicht-Bodenpunkten wurden in einem letzten Schritt wieder zu einer die ganze Fläche umfassenden Datei zusammengeführt. Zudem wurden die Werkzeuge *lasfilter*, *lasground* und *lasheight* mit verschiedenen Einstellungen verwendet. *Lasfilter* wurde zur Filterung der Punktwolken verwendet, *lasground* zur Kategorisierung der Punktwolke in Bodenpunkte und Nicht-Bodenpunkte und *lasheight* zum Schnitt auf der normierten Höhe zwischen 1.29m und 1.31m.

ii) CloudCompare und DendroCloud

Mit CloudCompare wurde die Punktwolke gefiltert und in einem zweiten Schritt mit der Software Dendrocloud weiterverarbeitet. Die Filterung wurde über *SOR* (Statistical Outlier Removal – statistische Ausreisserentfernung) durchgeführt. Hierfür wurden verschiedene Anzahlen an nächsten Nachbarn pro Punkt überprüft und bei einer Standardabweichung von ≥ 1 entfernt [70]. Der beschriebene Arbeitsablauf zur Weiterverarbeitung der gefilterten Punktwolken in Dendrocloud entspricht jenem des Onlinetutorials [71].

Zuerst wurde mit *2D grid from point cloud* ein leeres Raster erstellt. Danach konnten durch *Vertical projection* die Bodenpunkte bestimmt werden (Option: Minimum). Basierend auf diesem Ergebnis wurde *Surface cross-section* ausgeführt. Dafür wurden die normierten Höhenwerte verwendet und alle Punkte mit einer relativen Höhe von 0.5-999m ausgewählt. So konnten die Punkte oberhalb des Bodens als Vegetation klassifiziert werden. Anschliessend wurden, wiederum mit *Surface cross-section*, alle Punkte mit einer relativen Höhe von -1m bis 0.5m zusätzlich als Bodenpunkte klassifiziert.

Somit konnten mit *Surface cross-section* die Bäume identifiziert und ausgemessen werden. Dabei filterte man die relative Höhe zwischen 1.29m und 1.31m. Die generierte Punktwolke wurde mit *Group by distance* weiterverarbeitet. Dabei definierte man die maximale Distanz als 0.1m und die minimale Punkteanzahl als 100 definiert. Mit Hilfe dieser Funktion wurden die einzelnen Bäume bestimmt und die Punkte erhielten pro Baum eine andere Identifikationsnummer. Der *Cross-sections analyst* bildete alle defi-

nierten Bäume ab und kalkulierte die BHD. Zusätzlich konnten bei fehlerhaften Punkten jene manuell selektiert werden, welche tatsächlich zu den einzelnen Bäumen gehörten.

iii) RStudio und LiDAR360

In dieser Arbeit kam das R-Paket `lidR` 2.2.3 [72] zur Anwendung. Zuerst wurde mit Hilfe von `readLAS` die Punktwolke eingelesen. In einem nächsten Schritt konnten diese mit `lasfilterduplicates` auf Punkte mit gleichen x, y und z Koordinaten überprüft werden. Etwaige Duplikate wurden gelöscht, sodass jeder Koordinatenpunkt nur einmal abgebildet wurde. Zusätzlich wurde die Punktwolke mit `lasfilterdecimate` erneut gefiltert, was die Anzahl Punkte auf eine Grösse reduzierte, welche die Weiterverarbeitung in RStudio ermöglichte. Anschliessend wurden die Bodenpunkte mit `lasground` bestimmt (Abb. 2.10a). Hierfür wurde eine Auflösung von 0.1m gewählt. Basierend auf der Bodenklassifikation wurden die normalisierten Höhen mit `lasnormalize` berechnet (Abb. 2.10b). Danach wurden die Punktwolken mit `lasfilter` auf einer Höhe von 1.29m bis 1.31m gefiltert. Mit Hilfe der Funktionen `tree_trees` und `tree_hulls` wurden die einzelnen Bäume automatisch erkannt und deren BHD berechnet. Mit der Funktion `tree_detection` konnte die Baumposition zudem manuell bestimmt werden.

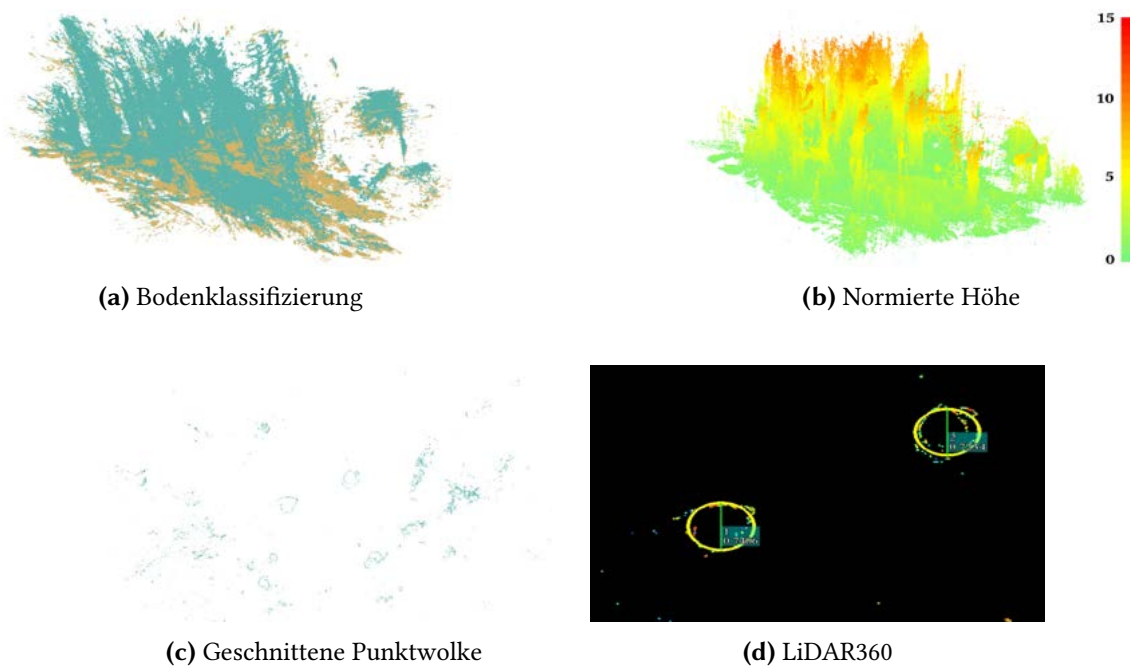


Abb. 2.10. Zwischenschritte zur Bestimmung des Brusthöhendurchmessers (BHD) mit LiDAR360. In Abbildung a) ist die Klassifizierung der Punktwolke für Boden (braun) und Vegetation (grün) dargestellt. Basierend auf dieser Zuordnung wird für jeden Punkt die normierte Höhe berechnet (b). Diese wird zum Zuschneiden der Punktwolke auf der Höhe der manuellen BHD-Messung, zwischen 1.29m und 1.31, benötigt (c). Diese zugeschnittene Punktwolke wird zur BHD-Berechnung und Baumpositionsbestimmung in LiDAR360 verwendet (d).

Die Software LiDAR360 wurde verwendet, um mit Hilfe des Plugin TLS Editor mit dem Werkzeug *Batch Extraction DBH* die BHD zu vermessen (Abb. 2.10d). Dafür wurden die in RStudio zugeschnittenen Punktwolken verwendet (Abb. 2.10c).

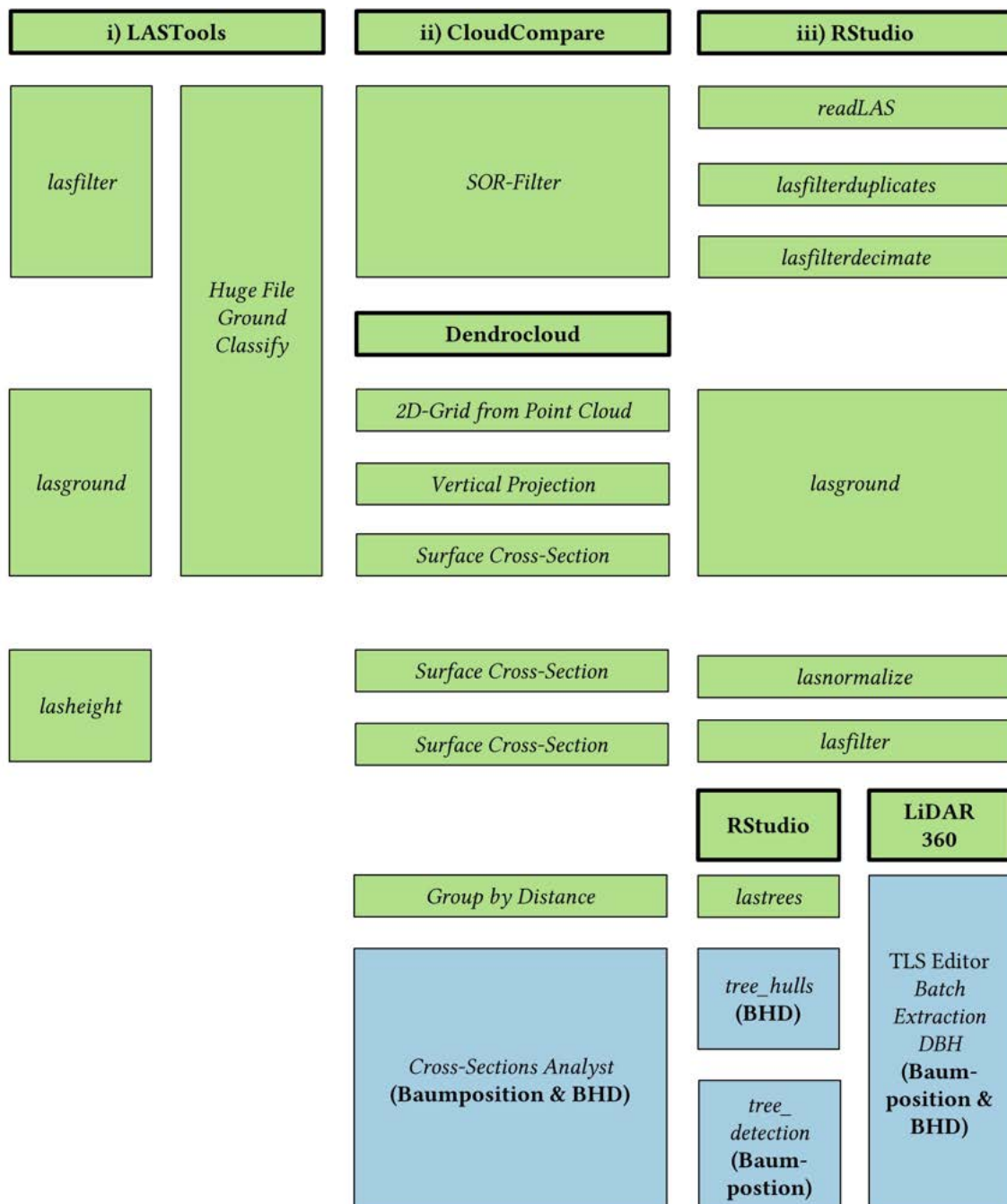


Abb. 2.11. Schema der verschiedenen Arbeitsabläufe zur Weiterverarbeitung der auf terrestrischen Aufnahmen basierten, verdichteten Punktwolken zur Bestimmung von Baumposition und Brusthöhendurchmesser (BHD). Dieses Schema stellt die Phasen 3 (grün dargestellt), die Verarbeitung der verdichteten Punktwolken, und die Phase 4 (blau dargestellt), Resultate, der Abb. 2.4 für die terrestrischen Aufnahmen dar.

2.2.3.5. Orthofoto, Baumhöhe und Kronendeckungsgrad

Das Orthofoto in [Abb. 2.8](#) wurde aus RGB-Drohnenaufnahmen erstellt ([Abb. 2.12](#)). Die Generierung des georeferenzierten Orthofotos basiert auf der Erstellung der verdichteten Punktwolke und derer Georeferenzierung ([Abb. 2.4](#), Phase 2).

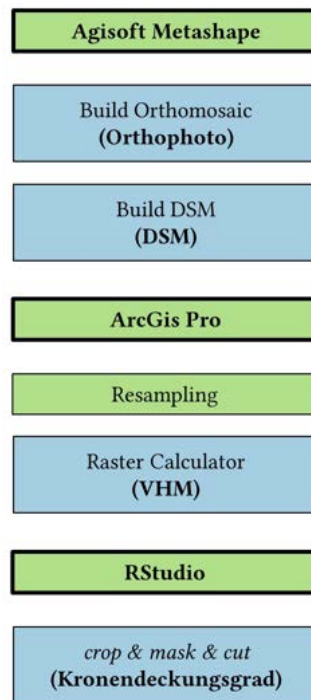


Abb. 2.12. Schema des Vorgehens zur Erstellung des Orthofotos, des Oberflächenmodells (DSM), der Berechnung des Vegetationshöhenmodells (VHM) und des Kronendeckungsgrads. Das Orthofoto und das DSM wurde in Agisoft Metashape erstellt. Das VHM wurde in ArcGis Pro und der Kronendeckungsgrad in RStudio berechnet. Dieses Schema stellt die Phasen 3 (grün dargestellt), Verarbeitung der verdichteten Punktwolken, und Phase 4 (blau dargestellt), Resultate, der [Abb. 2.4](#) für die Drohnenaufnahmen dar.

Die Baumhöhe wurde basierend auf dem generierten digitalen Oberflächenmodell (DSM) ([Abb. 2.13c](#)) bestimmt ([Abb. 2.12](#)). Die 2m Auflösung des DEM [52] wurde mit *Resampling* in ArcGIS PRO 2.3.2 [48] auf eine Auflösung von 0.05m erhöht ([Abb. 2.13b](#)). Zur Berechnung des VHM ([Abb. 2.13d](#)) wurden die Höhen des DSM von den Höhen des DEM subtrahiert. Alle Höhen < 0m erhielten die Höhe Null. Basierend auf der Baumposition, deren Bestimmung im [Kap. 2.2.3.4](#) beschrieben wurde, konnte anhand des VHM die Baumhöhe eindeutig bestimmt werden. Das generierte VHM wurde durch das schweizweite VHM von [Ginzler \(2018\)](#) validiert.

Die einzelnen Kronendeckungsgrade konnten in RStudio 3.5.1 [66] mit den Funktionen *crop*, *mask* und *cut* basierend auf dem berechneten VHM bestimmt werden ([Abb. 2.12](#)).

Für die als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen wurde der prozentuale Anteil der Fläche mit Vegetationshöhe > 20m bestimmt. In den als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen wurde der prozentuale Anteil der Fläche mit Vegetation zwischen 0.4m und 10m bestimmt. Dieser Ansatz kam zur Anwendung, da bei den als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen grössere Bäume und bei den als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen der Kronendeckungsgrad jüngerer und somit kleinerer Bäume untersucht werden sollten.

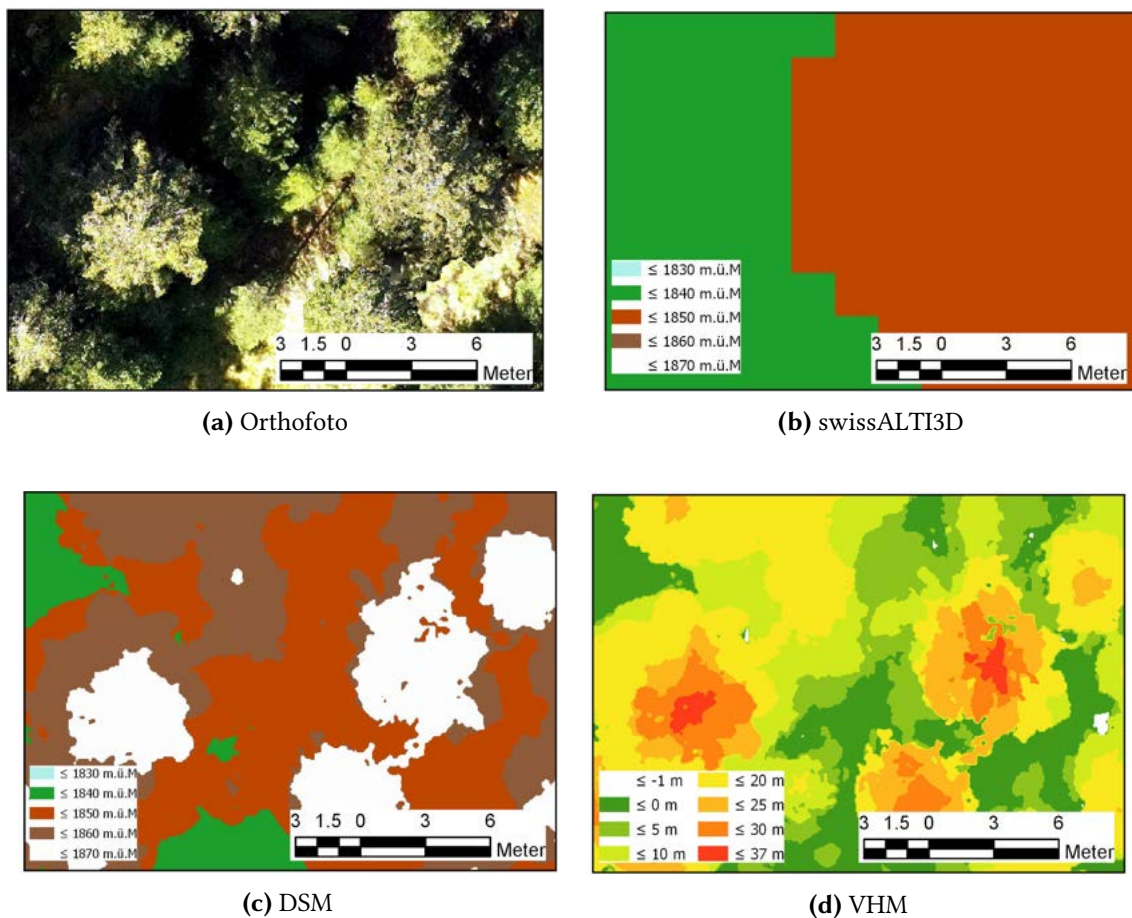


Abb. 2.13. Visualisierung der Erstellung des Vegetationshöhenmodells (VHM), welches basierend auf den Normalfarbenaufnahmen durch die Drohne (UAV) generiert wurde. Abbildung a) zeigt einen Ausschnitt des Orthofotos, welches aus den UAV-Aufnahmen erzeugt wurde. Das digitale Geländemodell (DEM) basiert auf dem swissALTI3D [52] (b), welches vom digitalen Oberflächenmodell (DSM) (c) subtrahiert wurde. Dadurch entstand das VHM (d).

2.3. Evapotranspiration

Für die Evapotranspiration (ET) wurde ein zwei Quellen/Layer Modell (Two-source energy budget - TSEB) angewendet [37]. Neben anderen Variablen stehen insbesondere die Temperaturen im Fokus. Diese wurden aus der Luft mit einer Thermaldrohne und am Boden mit einer Thermalkamera aufgenommen. Zusätzlich konnte die relative Luftfeuchtigkeit, die Lufttemperatur auf 2m, die Bodentemperatur in 10cm Tiefe und die Bodenfeuchte aufgenommen werden.

2.3.1. Thermalfotografie

Die Temperaturaufnahmen fanden am 17. Oktober 2019 ganztägig statt (Tab. 2.3).

Tab. 2.3. Reihenfolge von Bodenmessungen und Thermalfotografie vom 17.10.2019. Die ersten Aufnahmen wurden im Lücherwald gemacht. Danach fanden Aufnahmen im Zugwald statt und schliesslich im Teufiwald. Die UAV-Aufnahmen im Lücherwald starteten um ca. 10 Uhr. Jene im Zugwald begannen gleichzeitig wie die Bodenaufnahmen um ca. 12:30 Uhr, diejenigen im Teufiwald eine halbe Stunde vor den Bodenaufnahmen um ca. 14:45 Uhr.

Untersuchungs- gebiet	Untersuchungs- fläche	Reihenfolge	Uhrzeit Boden
Lücherwald	schlecht1	3	10:40-10:57
	schlecht2	5	11:21-11:26
	schlecht3	6	11:33-11:43
	gut1	4	11:02-11:17
	gut2	1	09:50-10:15
	gut3	2	10:20-10:35
Zugwald	schlecht1	2	12:38-12:52
	schlecht2	1	12:20-12:31
	schlecht3	5	13:37-13:36
	gut1	6	14:09-14:21
	gut2	3	12:55-13:04
	gut3	4	13:12-13:27
Teufiwald	schlecht1	5	16:35-16:45
	schlecht2	2	15:40-15:48
	schlecht3	1	15:15-15:29
	gut1	6	16:50-17:00
	gut2	3	15:55-16:04
	gut3	4	16:15-16:23

2.3.1.1. Terrestrische Thermalfotografie

Die thermischen Bilder am Boden wurden mit der VarioCAM ® HD mit einer Brennweite von 15mm und einer Auflösung 1024 x 768 IR-Pixel aufgenommen. Die Kamera verwendet einen ungekühlten *Mikrobolometer Focal Plane Array Detektor* [73]. Da statische Objekte mit einer konstanten Temperatur während der Aufnahmezeit des Bildes unter Verwendung eines Stativs fotografiert wurden, konnte dank der integrierten Auflösungserhöhungsfunktion die Auflösung verdoppelt werden, auf 2048 x 1538 IR-Pixel. Diese tastet das thermische Bild mehrfach ab und verschiebt die Pixelordnung um jeweils eine halbe Pixelbreite [73]. Nebst dem thermischen Bild wurde auch eine RGB-Aufnahmen gemacht.

Die Untersuchungsflächen wurden viermal fotografiert, jeder Quadrant einmal (Abb. 2.14). Die Aufnahmen wurden vom äusseren Eck hin zum Mittelpunkt gemacht. Verlangte es die Situation vor Ort, wurde die Kameraposition so angepasst, dass möglichst viel der Bodenoberfläche abgebildet wurde.

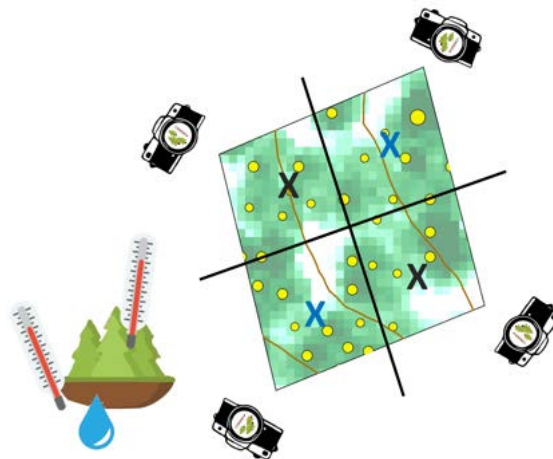


Abb. 2.14. Zusammenfassung der aufgenommenen Variablen pro Untersuchungsfläche. Die schwarzen Kreuze stellen die Messungen von Bodentemperatur, relativer Feuchtigkeit und Lufttemperatur dar. Bei den blauen Kreuzen wurden zusätzlich Messungen der Bodenfeuchtigkeit durchgeführt. Ergänzend wurde für jeden Quadranten wurde ein Bild mit der Thermalkamera aufgenommen. Die gelben Kreise stellen Bäume dar.

Zur Verarbeitung der Bilder (Abb. 2.15) wurden diese mit Hilfe der Software IRBIS 3 [74] in das ASCII-Format umgewandelt, damit das Thermalbild mit den absoluten Werten als Raster in RStudio 3.5.1 [66] weiterverarbeitet werden konnte. Temperaturwerte $< -10^{\circ}\text{C}$ wurden in NA umgewandelt, da diese Fehler der Kamera oder Ablichtungen des blauen Himmels darstellten (Abb. 2.15b Abb. 2.15c). Danach wurden die Thermalbilder

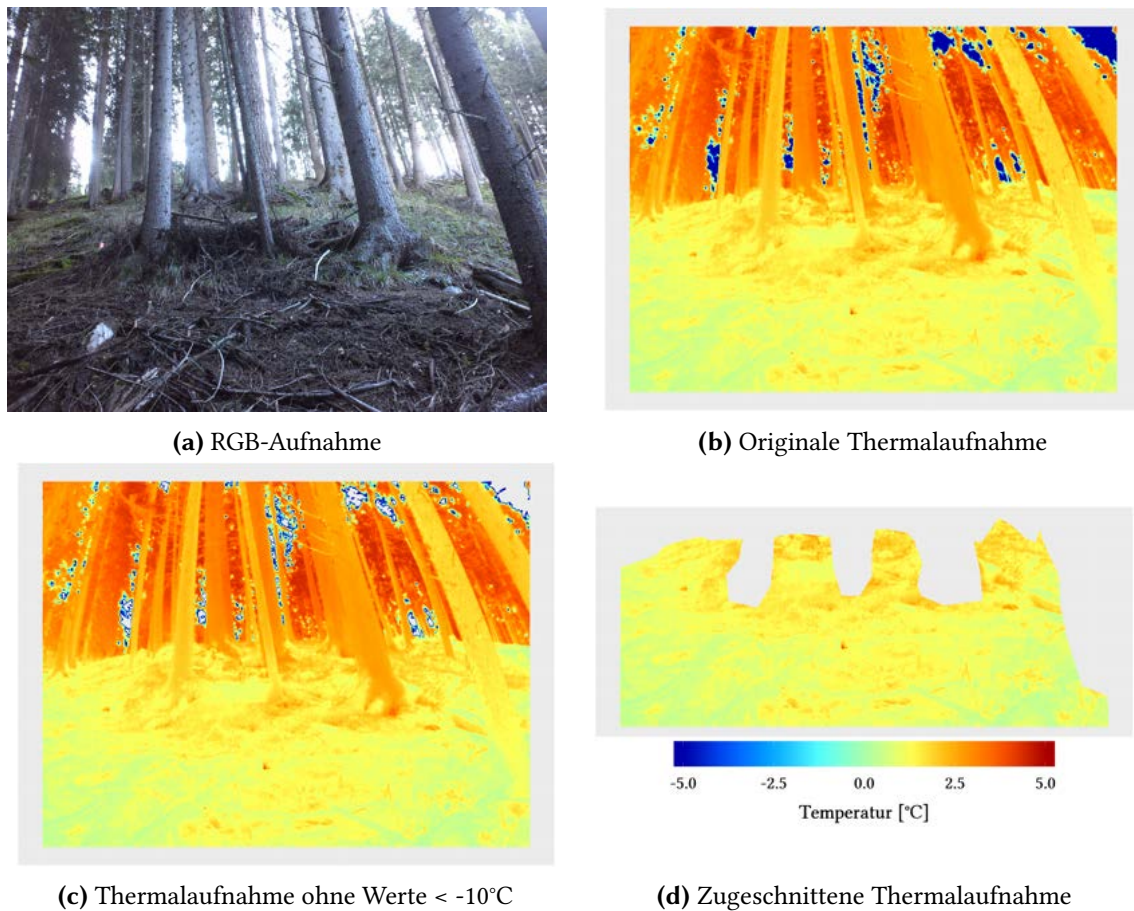


Abb. 2.15. Vorgehensweise der Bearbeitung und Weiterverarbeitung der terrestrischen Thermalaufnahmen. Abbildung a) zeigt das Normalfarben(RGB)-Äquivalent zur Thermalaufnahme der Bodenoberfläche in Abbildung b). In Abbildung c) sind die Werte $< -10^{\circ}\text{C}$ als NA definiert (grau). Abbildung d) zeigt das zugeschnittene Thermalbild. Die Temperaturskala in den Abbildungen b) und c) entspricht jener in Abbildung d).

in RStudio, anhand von manuell gezeichneten Polygonen zugeschnitten, (Abb. 2.15d). Für das Zuschneiden der thermischen Bilder wurden die RGB-Aufnahmen zu Hilfe genommen. So konnten die tatsächlichen Werte exportiert und Bäume sowie sonstige Objekte wie Totholz und Steine ausgeschnitten werden. Zusätzlich wurde der Median für jeden Quadrant basierend auf der zugeschnittenen thermischen Aufnahme berechnet.

2.3.1.2. Drohne-basierte Thermalfotografie

Die Thermalbilder aus der Luft wurden mit einem UAV des Typs eBee [75] und dem Sensor FLIR Tau 2 [76] aufgenommen. Die Brennweite betrug 19mm und die Auflösung der Bilder betrug 640 x 512 Pixel. Je nach Untersuchungsgebiet wurden die flächendeckenden

Aufnahmen in verschiedene Flugetappen aufgeteilt (Tab. 2.4). Der Flächengrösse entsprechend wurden BKP (Abb. 2.7) verteilt (Tab. A.19-Tab. A.21). Die BKP konnten nach dem gleichen Verfahren wie für die RGB-UAV-Aufnahmen verteilt werden (Kap. 2.2.3.2). Im Vorfeld wurden verschiedene BKP-Varianten getestet. Es zeigt sich jedoch, dass eine L-Form die besten Resultate generiert [77]. Die Erstellung der Flugpläne und das Fliegen der Thermaldrohne übernahm Dr. Ruedi Bösch, tätig in der Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL in der Gruppe Fernerkundung, Teil der Forschungseinheit Landschaftsdynamik [77]. Die Verarbeitung der Bilder entspricht dem Vorgehen für die UAV-RGB-Aufnahmen (Kap. 2.2.3.3), wobei die Parameter-einstellung zur Berechnung der verdichteten Punktwolken (Abb. 2.4, Phase 2) in Agisoft Metashape angepasst wurden. Die Aufnahmen wurden dabei als Rohdateien in Agisoft Metashape verarbeitet. Diese Rohdateien enthielten in jedem Pixel einen Temperaturwert.

Zusätzlich wurde ein georeferenziertes thermisches Orthomosaik berechnet. Dafür wurde zuerst ein Netz (polygonales Modell) erstellt. Daraus entstand das Orthomosaik, in welchem in jeder Rasterzelle ein absoluten Temperaturwert gespeichert war. Diese weisen eine Auflösung von 0.15cm auf. Mit RStudio 3.5.1 [66] wurde, basierend auf dem Orthomosaik, der Median für jedes Quadrat der einzelnen Untersuchungsflächen berechnet. Diese Werte wurden in einem weiteren Schritt für das ET-Modell verwendet (Anhang C).

Tab. 2.4. Flugpläne der Thermaldrohne für die drei Untersuchungsgebiete Teufi-(1-3), Lücher- und Zugwald. Pro Untersuchungsgebiet wurden je drei als *gut* und *schlecht* strukturiert eingestufteten Untersuchungsflächen (UF) beflogen. Im Teufiwald musste die Befliegung aufgrund der Verteilung der Untersuchungsflächen auf drei Teilbefliegungen unterteilt werden. Die Bodenkontrollpunkte (BKP) wurden zur Georeferenzierung der Aufnahmen verwendet.

Flugplan	beflogene Fläche [m ²]	Anzahl BKP ¹	abgedeckte UF ²
Teufiwald1	13'385	9	schlecht 2/3, gut 2/3
Teufiwald2	1'158	4	schlecht 1
Teufiwald3	NA	6	gut1
Lücherwald	20'519	8	schlecht 1/2/3, gut 1/2/3
Zugwald	20'861	12	schlecht 1/2/3, gut 1/2/3

2.3.2. Temperatur und Feuchtigkeit von Boden und Luft

Im Zentrum der vier Quadranten (Abb. 2.14) wurden die Temperaturen des Bodens und der Luft sowie die relative Luftfeuchtigkeit gemessen (Tab. 2.5). An zwei Zentren wurde zusätzlich die Bodenfeuchte (volumetrischer Wassergehalt VWC) gemessen (Abb. 2.14). Alle Messungen wurden direkt abgelesen. Lufttemperatur und relative Feuchtigkeit wurden direkt für das ET-Modell benötigt, Bodenfeuchtigkeit und -temperatur zur Interpretation der Resultate. Die verwendeten Messinstrumente sind in Tab. 2.5 zu finden.

Tab. 2.5. Durchgeführte Bodenmessungen und die dafür verwendeten Messinstrumente

Messung	Mess- gerät	Mess- genauigkeit	Mess- auflösung	Mess- höhe/tiefe [cm]
Bodenfeuchte	ECH20 EC-5 [78]	$\pm 0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$	$0.001 \text{ m}^3/\text{m}^3$	-10
Bodentemperatur	MW-TH310 [79]	$\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$	$0.1 \text{ }^\circ\text{C}$	-10
Lufttemperatur	Testo 625 [80]	$\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$	$0.1 \text{ }^\circ\text{C}$	+200
relative Feuchte	Testo 625 [80]	$\pm 2.5 \text{ } \%$	$0.1 \text{ } \%$	+200

2.3.3. Vegetations- und Blattflächenindex

Der normalisierte differenzierte Vegetationsindex (NDVI) und der Blattflächenindex (LAI) sind wichtige Eingangsvariablen im verwendeten ET-Modell [20]. Zur Berechnung des NDVI wurde ein Satellitenbild des Sentinel 2a verwendet. Dazu wurden die verfügbaren Bilder, welche die Untersuchungsgebiete abdeckten, hinsichtlich des Bewölkungsgrades (max. 20%) und des Datums (August bis Oktober) selektioniert. Zusätzlich wurden diese Bilder auf Wolken in der Nähe der Untersuchungsgebiete untersucht. Es wurde eine Aufnahme vom 14.10.2019 gewählt, da diese alle Kriterien erfüllte und am zeitnahesten zum Versuchstag aufgenommen wurde (Abb. 2.16), wobei auch keine Wolken in der Nähe der Untersuchungsgebiete zu finden waren. Die Berechnung des NDVI basiert auf Gl. 2.1 und konnte mit Hilfe von SNAP [81] berechnet werden.

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS} \quad (\text{Gl. 2.1})$$

NIR steht für das Band, welches die Wellenlängen des Nah-Infrarots abdeckt und VIS für jenes, welches die Wellenlängen des sichtbaren Rot umfasst. Im Sentinel 2 entspricht das NIR-Band dem Band 8 [82], jenes des VIS dem Band 4 [82].

In einem zweiten Schritt wurde aus den berechneten NDVI-Werten der LAI abgeleitet (Gl. 2.2) [83].

$$LAI = 0.57e^{2.33NDVI} \quad (\text{Gl. 2.2})$$

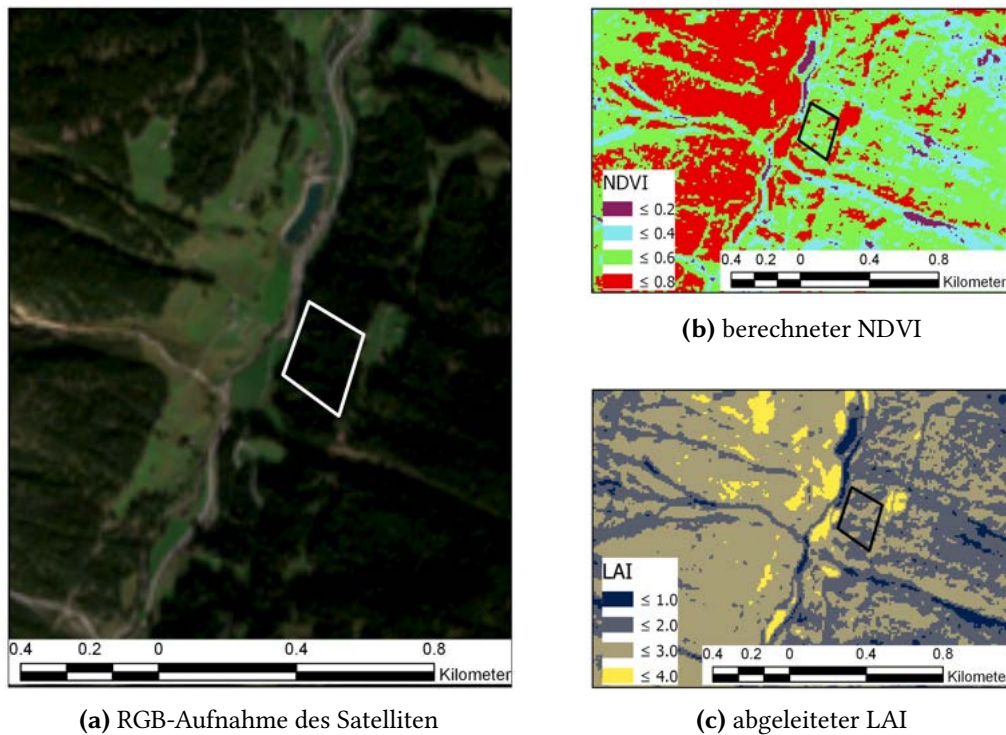


Abb. 2.16. Ausschnitt des berechneten normalisierten differenzierten Vegetationsindex (NDVI) und Blattflächenindex (LAI) für die Region Zugwald. Abbildung a) zeigt die Normalfarbenaufnahme (RGB) des Satelliten Sentinel 2. Abbildung b) stellt die NDVI-Werte dar. Dieser wird aus den aufgenommenen Strahlungen im Bereich der Wellenlängen des Nah-Infrarots und des sichtbaren Rots berechnet (Gl. 2.1). In Abbildung c) sind die aus dem NDVI abgeleiteten LAI-Werte abgebildet (Gl. 2.2).

2.3.4. Evapotranspirationsmodell

Die Evapotranspiration (ET) setzt sich aus der Transpiration und Evaporation zusammen. Die Transpiration beschreibt die Verdunstung von Wasser, verursacht durch Tiere und Pflanzen. Pflanzen nutzen hauptsächlich sogenannte Stomata (Spaltöffnungen) zur Wasserverdunstung. Die Evaporation beinhaltet die Verdunstung von Wasser über die Erdoberfläche. Die Evapotranspiration wurde mit Hilfe eines TSEB-Modells (Two-source energy budget [Zwei-Quellen-Energiehaushalt]) berechnet (Abb. 2.17). Das hier verwendete TSEB-Modell entwickelte Norman et al. (1995). Es nimmt an, dass die Wasserflüsse

des Bodens und der Vegetation miteinander interagieren. Der Unterschied zu einfacheren Ein-Quellen-Ansätzen (SEB) ist die separate Berechnung von Boden- und Vegetationsflüssen [38]. Das TSEB wurde einem SEB vorgezogen, da jenes akkuratere Resultate für heterogene Flächen wie Wälder ermöglicht [38]. Das TSEB mit Verwendung des Priestley-Taylor-Parameters wurde anderen TSEB vorgezogen, da dieses Modell Vereinfachungen beinhaltet, jedoch nicht in dem Masse wie beispielsweise die T_S -VI-Methode [37]. Zudem zeigte es mit der Verwendung von UAV-Aufnahmen gute Resultate [21]. Mit Hilfe des Priestley-Taylor-Parameters kann die aufgenommene Oberflächentemperatur in die Boden- und Baumkronentemperatur umgerechnet werden [84]. Die verwendeten Gleichungen und Annahmen sind im Anhang C zu finden. Die Berechnungen des ET-Modells wurden mittels RStudio 3.5.1 [66] durchgeführt. Hierfür wurde ein eigens entwickelter Code verwendet.

Zur Modellierung der Evapotranspiration wird nach [Guzinski et al. \(2014\)](#) vorgegangen. Anders als im Ansatz von [Hoffmann et al. \(2016\)](#) wird die Bodentemperatur T_S nicht aus thermischen UAV-Aufnahmen, sondern aus jenen der terrestrischen Thermalkamera berechnet. Zur Berechnung der Energiebilanz an der Bodenoberfläche, werden sowohl die Boden- (s) , wie auch die Vegetationskomponente (c) separat berechnet [85]:

$$R_{nC} = LE_C + H_C \quad (\text{Gl. 2.3})$$

$$R_{nS} = LE_S + H_S + G \quad (\text{Gl. 2.4})$$

wobei R_n die Nettostrahlungen, H die fühlbaren und LE die latenten Wärmefflüsse sowie G den Bodenwärmefluss beschreiben. H ist dabei die Summe aus H_C und H_S [37]:

$$H_C = \rho * c_p \frac{T_C - T_{AC}}{R_X} \quad (\text{Gl. 2.5})$$

$$H_S = \rho * c_p \frac{T_S - T_{AC}}{R_S} \quad (\text{Gl. 2.6})$$

wobei T_C für die Baumkronentemperatur, T_{AC} für die Temperatur in den Baumkronen, T_S für die Bodentemperatur, R_X für den Widerstand des Kronendachs, R_S den Widerstand des Wärmetransportes von der Erdoberfläche, ρ für die Luftdichte und c_p für die spezifische Wärme bei konstantem Druck stehen.

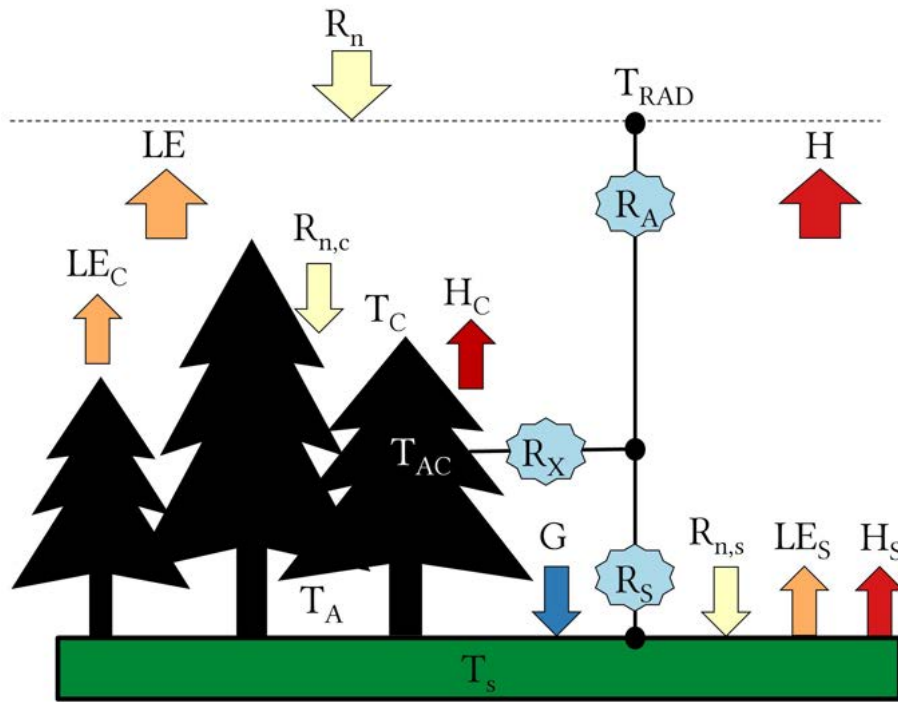


Abb. 2.17. Darstellung der Variablen, Widerstände und Wärmeflüsse des verwendeten zwei Quellen (TSEB)-Modells. Diese Grafik entspricht teilweise jener in [Norman et al. \(1995\)](#). Die orangen Pfeile entsprechen den latenten, die roten Pfeile den fühlbaren Wärmeflüsse. Pfeile mit s stellen die Boden-, jene mit c die Vegetationskomponente dar. Die Pfeile LE und H repräsentieren die Summen aus den beiden Komponenten. Die gelben Pfeile stellen die Sonneneinstrahlung dar. Der Bodenwärmefluss (G) wird durch den blauen Pfeil dargestellt. Die hellblauen Wolken entsprechen den verschiedenen Widerständen. R_s stellt den Widerstand des Wärmetransportes der Erdoberfläche dar, R_A den aerodynamischen Widerstand des Wärmetransportes zur Erdoberfläche und R_X den Widerstand des Kronendachs dar. Die Temperaturen sind mit T bezeichnet, wobei T_{RAD} der von oben aufgenommenen Temperatur entspricht, T_C der Temperatur über dem Kronendach, T_{AC} jener innerhalb der Baumkronen, T_A jener auf 2m und T_s jener der Bodenoberfläche entspricht. Die Richtung der Flüsse in dieser Grafik kommen positiven Werten gleich. Werden negative Werte beobachtet, wendet sich die Richtung der Pfeile.

Während im ursprünglichen Modell die Wind-Friktion-Geschwindigkeit, u_* , basierend auf der Monin-Obukhov Stabilitätskorrekturfunktion berechnet wird, wurde in dieser Arbeit diese Gleichung in vereinfachter Form verwendet. Die entsprechende Anpassung wurde aufgrund einer Expertenempfehlung [86] vorgenommen:

$$u_* = \frac{ku}{\ln \frac{h_u}{z_{OH}}} \quad (\text{Gl. 2.7})$$

wobei k die Karman-Konstante, u die Windgeschwindigkeit, h_u die Höhe der Windmessung und z_{OH} die Rauigkeit beschreiben.

Das ET-Modell wurde mit den Winddaten von Davos berechnet. Zur Beurteilung des Lufttemperaturverlaufs während des Aufnahmetages der Temperaturdaten wurde zusätzlich eine Meteostation im Teufiwald verwendet. Die Daten für Davos stammen von einer freistehenden Meteostation, welche im Haupttal installiert ist. Sie wird von MeteSchweiz betreiben und liegt auf 1594 m. ü. M.. Jene im Teufiwald ist eine privat eingerichtete Meteostation in einer Waldlücke und liegt auf 1830 m. ü. M..

2.3.5. Witterung

Zur Beurteilung der Witterung wurden die Klimabulletins des Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie zum Sommer, sowie zu den Monaten September und Oktober des Jahres 2019 analysiert [87, 88, 89]. Es zeigte sich, dass der Sommer sehr warme Temperaturen brachte. Sowohl Ende Juni wie auch Ende Juli herrschte jeweils eine Hitze-welle, welche zu Temperaturen über der Norm 1981-2010 führten. Die Sommermitteltemperatur lag ca. 2°C über der Norm 1981-2010 und die Sonnenscheindauer betrug ca. 120%. Die Niederschlagssumme zeigte keine signifikanten Abweichungen. Im September entsprach der Niederschlag ebenfalls der Norm 1981-2010, während die Temperatur mit $+1^{\circ}\text{C}$ über der Norm 1981-2010 lag. Im Oktober überstiegen die Regenfälle die Norm 1981-2010 (150%). Die Temperatur war wiederum mit ca. $+2^{\circ}\text{C}$ gegenüber der Norm 1981-2010 erhöht.

2.4. Statistik

Die statistische Auswertung wurde deskriptiv vorgenommen, vorwiegend basierend auf Boxplots, auch Kistendiagramme genannt. Die Spezifizierung der Boxplots folgt den Empfehlungen von [Stahel \(2002\)](#) ([Abb. 2.18](#)). Das obere Quantil liegt bei 75%, das untere bei 25% und der Median bei 50%. Der Interquartilabstand (IQR) ist definiert als die Länge zwischen dem unteren und oberen Quantil. Die grösste “normale” Beobachtung ist dabei maximal um das 1.5-fache IQR vom 75% Quartil entfernt, die kleinste “normale” Beobachtung maximal um das 1.5-fache IQR vom 25% Quartil. Extreme Beobachtungen sind jene Beobachtungen, welche ausserhalb dieses Bereiches liegen. Die Kerben, Einschnitte in den Boxplots, werden verwendet, um zu bestimmen, ob der Unterschied zwischen den Medianen verschiedener Gruppen signifikant ist [91].

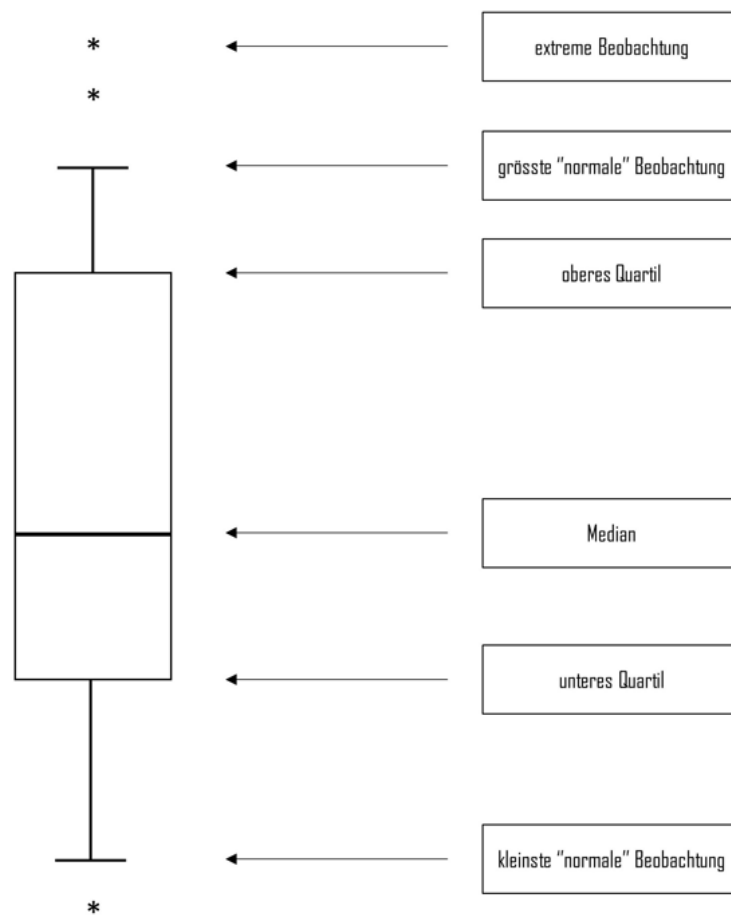


Abb. 2.18. Die Beschreibung des abgebildeten Boxplot entspricht jener von [Stahel \(2002\)](#) (S.20). Diese Art der Darstellung ermöglicht einen schnellen und aussagekräftigen Überblick über die Verteilung der entsprechenden Werte.

3. Resultate

3.1. Bestandescharakterisierung

3.1.1. Auf Feldaufnahmen basierte Bestandescharakterisierung

Die Feldansprache für den Bestandscode lässt deutliche Unterschiede zwischen den als *schlecht* strukturiert und *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen erkennen (Tab. 3.1). Die Schichtung (vertikale Struktur) ist in allen Untersuchungsgebieten für die als *gut* (mehrschichtig), respektive *schlecht* (einschichtig) strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen vergleichbar.

In den als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen sind weniger Bäume zu finden als in den als *gut* strukturiert eingestuften (Tabellen A.13 - A.15). Sind in den als *gut* strukturiert definierten Untersuchungsflächen Baumzahlen zwischen 23 und 120 zu beobachten, zeigen die als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen Baumzahlen zwischen neun und 27. Die Untersuchungsflächen *schlecht1* und *schlecht3* des Untersuchungsgebiet Teufiwald weisen mit 27 bzw. 25 eine hohe Baumanzahl für die als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen auf. Bei allen anderen bewegt sich die Anzahl zwischen 9 und 15. Die Streuung ist in den als *gut* strukturiert definierten Untersuchungsflächen weitaus höher. Im Lücherwald sind sowohl jene mit der grössten, *gut2* (107), als auch jene mit der kleinsten Anzahl Bäume, *gut1* (9), zu finden. Im Teufiwald sind die Baumzahlen zwischen 23, *gut3*, und 54, *gut1*, zu beobachten.

Bezüglich der Entwicklungsstufe zeigen sich in den verschiedenen Untersuchungsgebieten weitere Unterschiede (Tab. 3.1). So sind im Teufiwald in den als *gut* eingestuften Untersuchungsflächen immer mehr Bäume der Entwicklungsstufe *Dickung* als Bäume in der Entwicklungsstufe *Jungwuchs* vorhanden (Abb. 3.1b). Dies ist in den anderen beiden Untersuchungsgebieten gerade umgekehrt (Abb. 3.1a, Abb. 3.1c). Eine Ausnahme bildet die Untersuchungsfläche *gut2* im Lücherwald, wo wie im Teufiwald mehr Bäume in der Entwicklungsstufe *Dickung* als in der Entwicklungsstufe *Jungwuchs* zu finden sind. Bei

den als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen sind ebenfalls Muster zu erkennen. Im Teufi- und Zugwald sind Bäume der Klasse *Baumholz I* am stärksten vertreten. Im Lücherwald sind in der Untersuchungsfläche *schlecht1* Bäume der Entwicklungsstufe *Baumholz III* am meisten vertreten, in *schlecht 2* der Entwicklungsstufe *Stangenholz* und in *schlecht3* der Entwicklungsstufe *Baumholz I*.

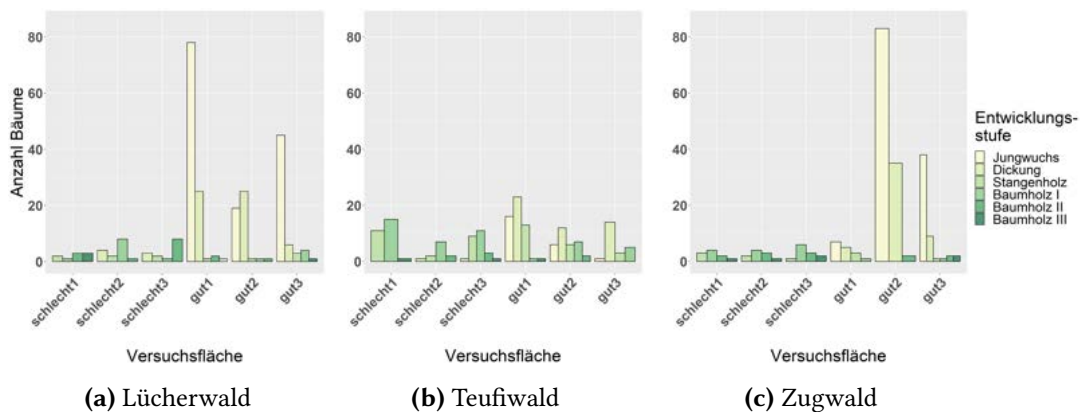


Abb. 3.1. Anzahl Bäume und Entwicklungsstufen (Brusthöhendurchmesser (BHD)) der jeweils 6 Untersuchungsflächen in den drei Untersuchungsgebieten Lücher-, Teufi und Zugwald. Die Entwicklungsstufen wurden anhand von [Rickli et al. \(2005\)](#) definiert. Bäume mit einer Höhe zwischen 40cm und 130cm gehören zur Entwicklungsstufe *Jungwuchs*. Solche mit einer Höhe > 130cm und einem BHD < 10cm zur *Dickung*. Bäume der Entwicklungsstufe *Stangenholz* haben einen BHD von ≥ 10 cm und ≤ 20 cm, jene der Entwicklungsstufen *Baumholz I* > 20cm und ≤ 35 cm, *Baumholz II* > 35cm und ≤ 50 cm und *Baumholz III* > 50cm.

Die Untersuchungsflächen zeichnen sich alle durch eine Mischung mit >80% Nadelholz aus, mit Ausnahme der Untersuchungsfläche *gut1* im Zugwald ([Tab. 3.1](#)). Hier handelt es sich um einen Mischbestand, da rund neun der 16 Bäume Laubbäume sind. In den Untersuchungsflächen *gut2* und *gut3* des Untersuchungsgebietes Teufiwald sowie in *gut2* des Zugwaldes sind mehrere Lärchen vorhanden. Da es sich aber auch bei Lärchen um Nadelbäume handelt, hat dies keinen Einfluss auf den Bestandescode. In den sonstigen Untersuchungsflächen handelt es sich um reine Fichtenbestände.

Der Kronendeckungsgrad (DG) ist für alle als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen “gedrängt” (DG 90%), mit Ausnahme von *schlecht2* (“normal“, 80%) im Teufiwald ([Tab. 3.1](#)). In den als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen findet man deutlichere Unterschiede. Im Teufiwald haben die zwei Untersuchungsflächen *gut1* und *gut2* einen DG “lückig” (40%), im Lücherwald *gut1* und *gut3* einen DG “gedrängt” (90%) und im Zugwald *gut2* und *gut3* einen DG “locker” (60%).

Tab. 3.1. Bestandescode der Untersuchungsflächen basierend auf Feldbegehungen. Der vierstellige Zahlencode bezieht sich auf die Stufen der Parameter des Bestandescode mit S (Schichtung), E (Entwicklungsstufe), M (Mischung) und D (Kronendeckungsgrad).

Untersuchungs- fläche	Teufiwald SEMD	Lücherwald SEMD	Zugwald SEMD
schlecht1	1311	1511	1311
schlecht2	1312	1311	1411
schlecht3	1311	1411	1311
gut1	2114	2111	2625
gut2	3614	2113	2113
gut3	2112	3611	2113

3.1.2. Bestandescharakterisierung durch UAV und terrestrische Aufnahmen

3.1.2.1. Terrestrische Normalfarbenaufnahmen zur Bestandescharakterisierung

Die Orientierung (“Alignment“) der terrestrischen Aufnahmen konnte nicht für alle Flächen durchgeführt werden. Während es im Zugwald für alle Untersuchungsflächen möglich war, gelang die Orientierung im Teufi- und Lücherwald jeweils nur bei den drei als *schlecht* strukturiert eingestuften Flächen sowie in letzterem auch für die Fläche *gut3* (Tab. 3.2). Im Lücherwald konnten in den als *schlecht* strukturiert definierten Untersuchungsflächen alle Aufnahmen ausgerichtet werden. Dasselbe gilt für den Zugwald, mit Ausnahme eines Fotos in der Untersuchungsfläche *schlecht3*. Im Teufiwald war in den als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen die Erfolgsquoten für die Ausrichtung tiefer. Über alle Untersuchungsgebiete gesehen, lag für die als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen die Erfolgsquote zwischen 69% und 94%. In den als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen wurden teilweise Erfolgsquoten von nur 10% oder weniger erreicht (*gut2* & *gut3* Teufiwald). Die Erfolgsquote war in allen als *gut* eingestuften Untersuchungsflächen des Gebietes Teufiwald zu tief, um eine verdichtete Punktwolke zu generieren. Im Lücherwald wurden in den als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen zwar höhere Erfolgsquoten erreicht, jedoch wurden diese in den Untersuchungsflächen *gut1* und *gut2* falsch angeordnet, wodurch die Erstellung der verdichteten Punktwolke nicht möglich war. Falsch angeordnet bedeutete in diesem Fall, dass die Bilder zwar für die einzelnen Seiten und Diagonalen korrekt orien-

tiert wurden, jedoch diese einzelnen Gruppen nicht zu einem Ganzen zusammengefügt werden konnten. Die Erfolgsquote im Zugwald lag für die als *gut* definierten Untersuchungsflächen zwischen 77% und 91%. Da diese Bilder zusätzlich korrekt ausgerichtet wurden, konnten für alle eine verdichtete Punktwolke erstellt werden (Abb. 3.2).



(a) verdichtete Punktwolke der Untersuchungsfläche *gut3* im Zugwald



(b) verdichtete Punktwolke der Untersuchungsfläche *schlecht3* im Zugwald

Abb. 3.2. Abbildung zwei verdichteter Punktwolken. Abbildung a) zeigt die verdichtete Punktwolke der Untersuchungsfläche *gut3*, Abbildung b) der Untersuchungsfläche *schlecht3* im Untersuchungsgebiet Zugwald. Die Markierungen an den Bäumen in Abbildung b) wurden zur Überprüfung der Genauigkeit verwendet.

Tab. 3.2. Auswertung der Punktwolken der Untersuchungsflächen in den verschiedenen Untersuchungsgebiete. Die Spalte *Anzahl Bilder* beschreibt die Anzahl aufgenommenen Bilder. Die Spalte *“Anzahl orientierte Bilder“* charakterisiert die erste Orientierung (*“Alignment“*) der Aufnahmen in Agisoft Metashape. Die Kontrollpunkte (KP) wurden zur Distanzmessung verwendet. Zusätzlich wurde jede Untersuchungsfläche anhand von fünf Bodenkontrollpunkten (BKP) georeferenziert, welche durch ein GNSS eingemessen wurden ([Kap. 2.1 & Kap. 2.2.3.4](#)). Für jede Untersuchungsfläche wurde eine verdichtete Punktwolke erstellt. Die Spalte *“Anzahl Punkte“* gibt die Anzahl Punkte jeder verdichteten Punktwolke an. Ob eine Orientierung erfolgreich war, hängt davon ab, ob die Bilder richtig angeordnet wurden und diese für die weitere Prozessierung verwendet werden konnten.

Untersuchungs- gebiet	Untersuchungs- fläche	Anzahl Bilder	Anzahl orientierte Bilder	Erfolg [%]	Anzahl KP	Anzahl Punkte	erfolgreiche Orientierung
Lücherwald	schlecht1	403	403	100	3	204'714'194	Ja
	schlecht2	347	347	100	5	205'025'035	Ja
	schlecht3	427	427	100	3	224'853'733	Ja
	gut1	195	62	32	3	NA	Nein
	gut2	281	251	89	4	NA	Nein
	gut3	379	373	98	3	200'164'062	Ja
Teufiwald	schlecht1	120	83	69	6	69'188'764	Ja
	schlecht2	135	100	74	3	55'373'287	Ja
	schlecht3	150	141	94	7	118'916'816	Ja
	gut1	142	69	49	6	NA	Nein
	gut2	135	10	7	6	NA	Nein
	gut3	139	6	4	6	NA	Nein
Zugwald	schlecht1	227	226	100	10	154'591'320	Ja
	schlecht2	262	262	100	5	150'806'489	Ja
	schlecht3	140	139	99	10	92'768'264	Ja
	gut1	334	297	89	3	210'318'933	Ja
	gut2	330	299	91	3	153'276'114	Ja
	gut3	399	309	77	3	311'378'852	Ja

Mit der automatisierten BHD-Berechnung und Bestimmung der Baumposition basierend auf den generierten Punktwolken wurde in Abhängigkeit der verwendeten Programme unterschiedliche Resultate erzielt (Tab. 3.3). In den Untersuchungsflächen, für welche die Klassifizierung in Boden und Vegetation nicht erfolgreich war, konnte die Bestimmung der Baumposition und des BHD nicht durchgeführt werden.

Tab. 3.3. Analyse der Bestandescharakterisierung durch terrestrische Aufnahme im Untersuchungsgebiet Zugwald. Aufgelistet sind alle getesteten Programme. Die Spalte "BK" beschreibt die Klassifizierung der Punkte in Boden und Vegetation, "BP" die Bestimmung der Baumposition und "BHD" die automatisierte Bestimmung des Brusthöhendurchmesser. CC steht für das verwendete Programm CloudCompare und DC für das Programm Dendrocloud. ✓ markiert die erfolgreichen Schritte, × jene welche nicht funktioniert haben. Für LASTool wurde das ✓ in Klammern gesetzt, da die BK nicht flächig funktioniert hat.

UF ¹	LASTools			CC ² & DC ³			RStudio & LiDAR360		
	BK	BP ⁴	BHD ⁵	BK	BP ⁴	BHD ⁵	BK	BP ⁴	BHD ⁵
schlecht1	(✓)	×	×	✓	×	×	✓	✓	✓
schlecht2	(✓)	×	×	✓	×	×	✓	✓	✓
schlecht3	(✓)	×	×	✓	×	×	✓	✓	✓
gut1	(✓)	×	×	✓	×	×	✓	×	×
gut2	(✓)	×	×	✓	×	×	✓	×	×
gut3	(✓)	×	×	✓	×	×	✓	×	×

i) LASTools

Wurde die ganze Punktwolke in einem prozessiert, führte dies zwar teilweise zu dichten Resultaten, jedoch blieb ein Grossteil der Fläche ohne Bodenpunkte (Abb. 3.3a). Das Aufteilen der Punktwolke in einzelne Bestandteile mit *Huge File Ground Classify* in ArcGIS PRO ermöglichte zwar eine grossflächigere Erkennung des Bodens. Jedoch funktionierte auch dies nicht für jeden Rasterzelle, was zu einer lückenhaften Darstellung führte (Abb. 3.3b). Die Ergebnisse der Versuche, die Punktwolke mit *lasheight* auf 1.30m zu schneiden, konnten für die weitere Verarbeitung, Bestimmung von Baumposition und BHD in RStudio, nicht verwendet werden (Tab. 3.3).

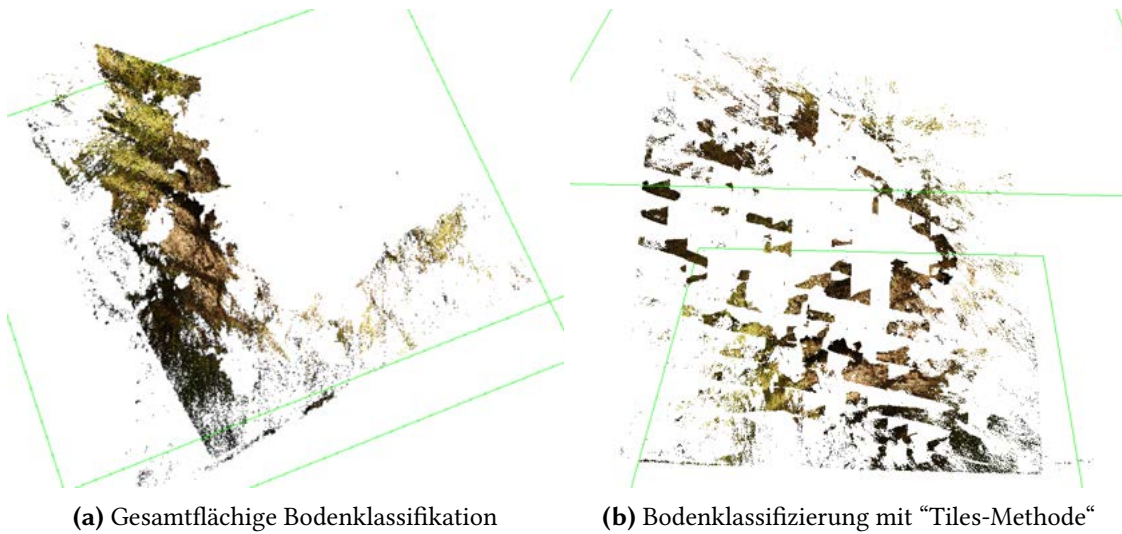


Abb. 3.3. Darstellung der Bodenklassifikation mit LASTools. Abbildung a) zeigt Resultate der hochauflösten Bodenklassifizierung, welche nur für ca. $\frac{1}{4}$ der Fläche erfolgreich war. Mit der "Tiles-Methode" konnten nur lückenhafte Resultate erreicht werden (b).

ii) CloudCompare und Dendrocloud

Mit der Kombination der beiden Programme Dendrocloud und CloudCompare konnte eine Klassifikation von Boden- Vegetationspunkte vorgenommen werden (Tab. 3.3). Trotz zusätzlicher Filterung konnte die Punktwolke nicht präzise dargestellt werden (Abb. 3.4). Mit Hilfe der automatischen Baumbestimmungen konnte zwar eine Vielzahl von Bäumen, beispielsweise 1200 in der Untersuchungsfläche *schlecht3*, identifiziert werden. Diese Methode ist allerdings sehr fehlerbehaftet. Es wurden einzelne und nicht eine Gruppe von Punkte als Bäume identifiziert, was dazu führte, dass die eingebaute Korrekturfunktion nicht verwendet werden konnte.

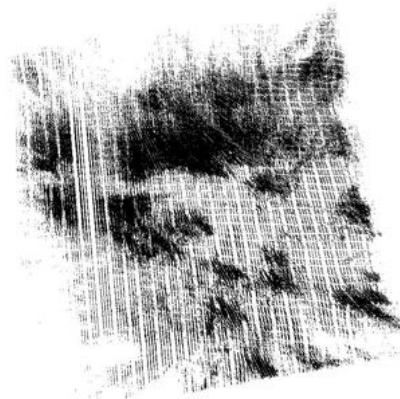


Abb. 3.4. Mit Programm Dendrocloud prozessierte verdichtete Punktwolke der Untersuchungsfläche *schlecht3* des Untersuchungsgebietes Zugwald. Die Punktwolke konnte nicht hochauflöst dargestellt werden.

iii) RStudio und LiDAR360

Die Bodenklassifikation führte sowohl in den als *gut*, wie auch in den als *schlecht* strukturiert eingestuften Flächen zu akkuraten Resultaten (Abb. 2.10). Die automatische Baumbestimmung führte auch mit RStudio zu keinen verwendbaren Resultaten (Tab. 3.3). Die Klassifizierung der Punkte in Bäume, welche zur BHD-Bestimmung verwendet wurde, entsprach nicht den einzelnen Bäumen, sondern eher einer zufälligen Auswahl an Punkten (Abb. 3.5a). Die manuelle Selektion ermöglichte die Bestimmung der Baumposition (Abb. 3.5b), jedoch nicht die des BHD's.

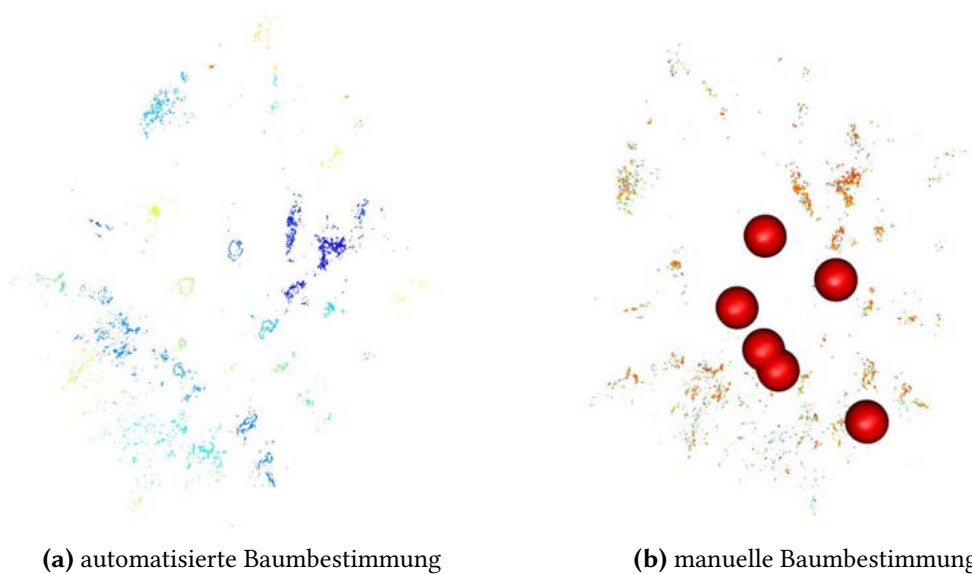


Abb. 3.5. Darstellung der Baumidentifikation mit RStudio. Die automatisierte Baumidentifikation ist in Abbildung a) dargestellt, wobei die verschiedenen Farben jeweils einen separaten Baum darstellen. Dies führte zu keinen akkuraten Resultaten. Die manuelle Baumbestimmung, dargestellt in Abbildung b), führte zwar zu akkuraten Resultaten, konnte jedoch nicht zur Brusthöhendurchmesser-Berechnung verwendet werden.

Die Analyse mit der Software LiDAR360 ermöglichte im Zugwald eine manuelle Bestimmung und darauf basierend die Bestimmung des entsprechenden BHD für die Untersuchungsflächen *schlecht1-3*. Die automatisierte BHD-Berechnung und die manuelle Bestimmung der Baumposition in den Untersuchungsflächen *gut1-3* war nicht möglich, da keine Bäume identifiziert werden konnten (Abb. 3.6).



Abb. 3.6. Abbildung der geschnittenen Punktwolke auf der Höhe der im Feld durchgeführten Brusthöhendurchmesser(BHD)-Messung. Diese wurde verwendet, um Bäume zu identifizieren und deren BHD zu bestimmen basierend auf den terrestrischen Normalfarbenfotografien. Diese Abbildung zeigt die Problematik bei den Untersuchungsflächen *gut1-3* im Untersuchungsgebiet Zugwald. Es konnten basierend auf den zugeschnittenen Punktwolken keine Bäume identifiziert und darum auch keine BHD bestimmt werden.

Die Baumposition konnte zwar bestimmt werden. Mit der Einzeichnung im Feld war jedoch ein Vergleich der Koordinaten nicht möglich, weshalb die exakte Überprüfung der per SfM bestimmten Baumposition nicht durchführbar war. Der Vergleich zwischen der eingezeichneten Position der Bäume aus der Feldaufnahme und der mit RStudio oder LiDAR360 bestimmten Baumposition zeigt zwar, dass die Bestimmung mit RStudio und LiDAR360 mit Abweichungen behaftet sind. Die Bäume befanden sich jedoch immer im richtigen Quadrant, wodurch klar war, welcher Baum betrachtet wurde. Nur so war ein Vergleich der verschiedenen Methoden der BHD-Bestimmung möglich. Daraus lässt sich schliessen, dass die Abweichungen der Baumposition $<5\text{m}$ sein müssen.

Mit Ausnahme eines Baumes weisen die im Feld bestimmten BHD im Vergleich zu den auf terrestrischen Aufnahmen basierten in allen Fällen einen tieferen Wert auf. Die absoluten Abweichungen lagen zwischen 2.6cm und 18.3cm. Von den vorhandenen Bäumen wurden in der manuellen Auswahl zwischen 50% und 80% der Bäume erkannt. In der Untersuchungsfläche *schlecht3* wurden nur sechs von zwölf Bäumen erkannt, mit einem RMSE (Wurzel aus dem gemittelten Fehlerquadrat [25]) von 7.26cm jedoch die höchste Genauigkeit erreicht. In der Untersuchungsfläche *schlecht2* konnten rund drei BHD mit einer Abweichung $<4\text{cm}$ automatisch bestimmt werden, mit einem RMSE von 9.43cm. Mit einem RMSE von 14.06cm zeigt die Untersuchungsfläche *schlecht3* zwar die tiefste Genauigkeit auf, jedoch wurden hier mit rund 80% erfassten Bäumen die höchste Erkennrate erreicht.

3.1.2.2. Normalfarbenaufnahmen mit der Drohne zur Generierung von Oberflächenmodell, Orthophoto und Vegetationshöhenmodell

Die Daten der ersten Befliegung zur Aufnahme der RGB Bilder waren für die Untersuchungsgebiete Teufi- und Zugwald von sehr hoher Qualität und ermöglichten ein perfektes Alignment (100% erfolgreich) (Tab. 3.4) zur Erstellung der digitalen Oberflächenmodelle (DSM) und der Orthofotos. Für das Untersuchungsgebiet Lücherwald war nur ein inkomplettes Alignment möglich (98% erfolgreich), wovon insbesondere die Versuchflächen *gut2* und *schlecht1* betroffen waren (Abb. 3.7). Die grosse Diskrepanz in der Bilderanzahl entstand aufgrund der unterschiedlichen Flächengrößen der Untersuchungsgebiete.

Tab. 3.4. Auswertung der Normalfarben-Drohnenaufnahmen. Die Spalte “Anzahl Bilder” beschreibt die Anzahl aufgenommener Bilder pro Untersuchungsgebiet (UG). Die “Anzahl orientierte Bilder” charakterisiert die erste Orientierung der Aufnahmen in Agisoft Metashape. Die Spalte “BKP” beschreibt die Anzahl verwendeter Bodenkontrollpunkten. Für jedes Untersuchungsgebiet wurde eine verdichtete Punktwolke erstellt. Die Spalte “Anzahl Punkte” gibt die Anzahl Punkte jeder verdichteten Punktwolke an. Ob eine Orientierung erfolgreich war, hängt davon ab, ob die Bilder richtig angeordnet wurden und dies für die weitere Prozessierung verwendet werden konnte.

UG ¹	Anzahl Bilder	Anzahl orientierte Bilder	Erfolg [%]	Anzahl BKP ²	Anzahl Punkte	erfolgreiche Orientierung
Lücherwald	381	373	98	13	309'405'793	Ja
Teufiwald	231	231	100	9	168'366'730	Ja
Zugwald	314	314	100	11	231'565'596	Ja

Die erstellten DSM und Orthofotos weisen sehr tiefe RMSE in der xy-Ebene (horizontal) sowie in der z-Achse (vertikal) auf (Tab. 3.5). Die verschiedenen DSM weisen zudem eine sehr hohe Auflösung auf (5cm), was die Erkennung einzelner Baumkronen ermöglicht. Ausnahme bilden die beiden Untersuchungsflächen *gut2* und *schlecht1* im Lücherwald (Abb. 3.7).

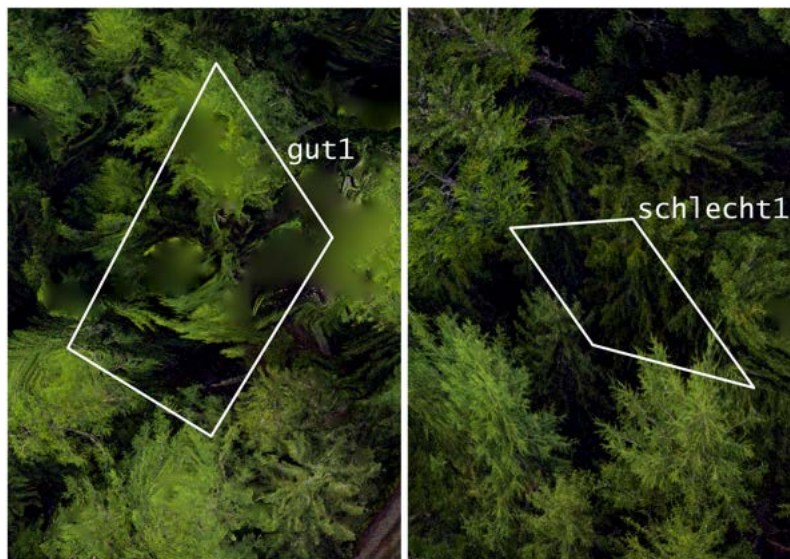


Abb. 3.7. Ausschnitte des Orthofotos “Lücherwald” basierend auf den Normalfarben(RGB)-Drohnenaufnahmen(UAV). Aufgrund der unvollständigen Orientierung der RGB-UAV-Aufnahmen resultierten verschwommene Abbildungen des Kronendachs für die Untersuchungsflächen *gut1* und *schlecht1* im Untersuchungsgebiet Lücherwald.

Tab. 3.5. Fehler der Normalfarben-Drohnenaufnahmen in der xy-Ebene (horizontal) und z-Achse (vertikal). Die Fehler werden als RMSE (Wurzel aus dem gemittelten Fehlerquadrat [25]) angegeben. Die berechneten Fehler basieren auf den eingemessenen Bodenkontrollpunkten.

Untersuchungs- gebiet	Fehler (RMSE)	
	xy [cm]	z [cm]
Lücherwald	5	5
Teufiwald	3	6
Zugwald	4	6

Die Analyse mit RStudio des erstellten Vegetationshöhenmodells (VHM) zeigt klare Tendenzen (Abb. 3.8). Die Mediane der als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen sind innerhalb der einzelnen Untersuchungsgebiete immer höher als jene der als *gut* strukturiert eingestuften. Im Lücherwald ist vor allem der Median in der Untersuchungsfläche *schlecht3* mit 33.41m sehr hoch (Abb. 3.8a), im Vergleich zu *schlecht1* (23.39m) und *schlecht2* (21.01m). Im Teufiwald sind die Mediane der Untersuchungsflächen *schlecht1* und *schlecht2* mit Werten unter 20m im Vergleich zu allen anderen als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen noch tiefer (Abb. 3.8b). Im Zug-

wald sind die Mediane für die als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen deutlich höher mit 27.34m (*schlecht1*), 34.39m (*schlecht2*) und 36.57m (*schlecht3*) (Abb. 3.8c). Der Vergleich der als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen über die verschiedenen Gebiete zeigt eine noch grössere Streuung. Sind im Teufiwald Mediane zwischen 2.78m (*gut3*) und 14.81m (*gut2*) zu beobachten, liegen sie im Zugwald noch weiter auseinander. Während für den Lücherwald in der Untersuchungsfläche *gut1* der Median 5.49m beträgt, ist sowohl der Median für die Untersuchungsfläche *gut3* (17.48m) und *gut2* (22.20m) sehr hoch. Diese beiden Werte sind die höchsten Werte aller Untersuchungsgebiete, welche in den als *gut* definierten Untersuchungsflächen beobachtet werden konnten.

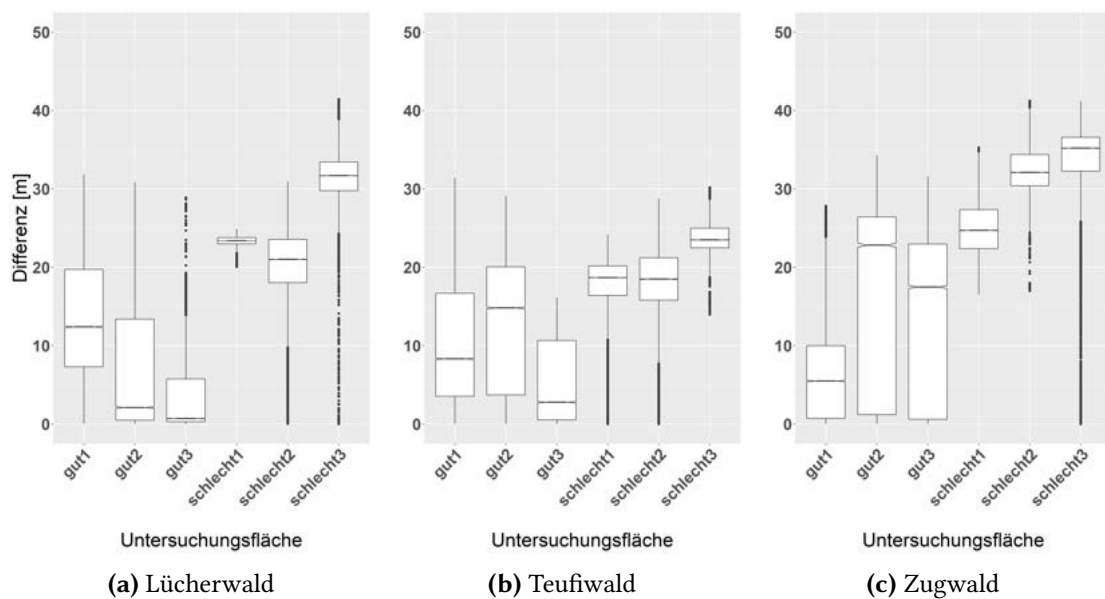


Abb. 3.8. Boxplots für das Vegetationshöhenmodell (VHM) für die je drei als *gut*, respektive *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen der drei Untersuchungsgebiete Lücher-, Teufi- und Zugwald.

Der Vergleich zwischen den eigens generierten VHM und dem schweizweiten VHM [50] aus dem Jahr 2016 zeigt bezüglich den absoluten Werten aller Differenzen teilweise grosse Unterschiede (Abb. 3.9). Mit Ausnahme der Untersuchungsfläche *gut2* im Zugwald (Abb. 3.9c) zeigen die als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen die grösseren Abweichungen mit einem Maximum für die Untersuchungsfläche *gut3* im Lücherwald (Abb. 3.9a). Die Mediane der als *gut* strukturiert definierten Untersuchungsflächen für die Untersuchungsgebiete Teufi- (Abb. 3.9b) und Zugwald liegen unter 10m. Die Untersuchungsfläche *gut2* im Zugwald weist mit einem Median von 1.53m den zweit kleinsten aller Untersuchungsflächen auf. Im Lücherwald liegen diese für die Untersuchungsfläche *gut1* und *gut2* bei 14.27m bzw. 15.27m, jener für *gut3* liegt mit 27.49m weit

über allen anderen Werten. Die Mediane der als *schlecht* strukturiert definierten Untersuchungsflächen für die Untersuchungsgebiete Teufi- und Zugwald zeigen ähnliche Werte und bewegen sich zwischen 1.37 (*schlecht3*, Teufiwald) und 3.48m (*schlecht1*, Zugwald). Im Lücherwald liegen die Mediane der Differenz zwischen den beiden VHM für die Untersuchungsflächen *schlecht1* und *schlecht3* mit 9.04m bzw. 7.47m deutlich höher, während *schlecht2* mit 2.79m im Bereich der Werte der anderen beiden Untersuchungsgebiete liegt.

Grundsätzlich kann in den als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen eine höhere Streuung beobachtet werden als in den als *schlecht* eingestuften (Abb. 3.9). Ausnahmen sind sowohl im Lücher- (Abb. 3.9a) wie auch im Zugwald (Abb. 3.9b) zu beobachten. Während im Lücherwald nebst der Untersuchungsfläche *gut3* mit einer sehr kleinen Streuung von dieser Tendenz abweicht, weist *schlecht3* umgekehrt eine sehr grosse Streuung auf. Im Zugwald weicht nur *gut2* von der Tendenz ab, zeigt jedoch innerhalb des Untersuchungsgebietes Zugwald die kleinste Streuung auf (Abb. 3.9c).

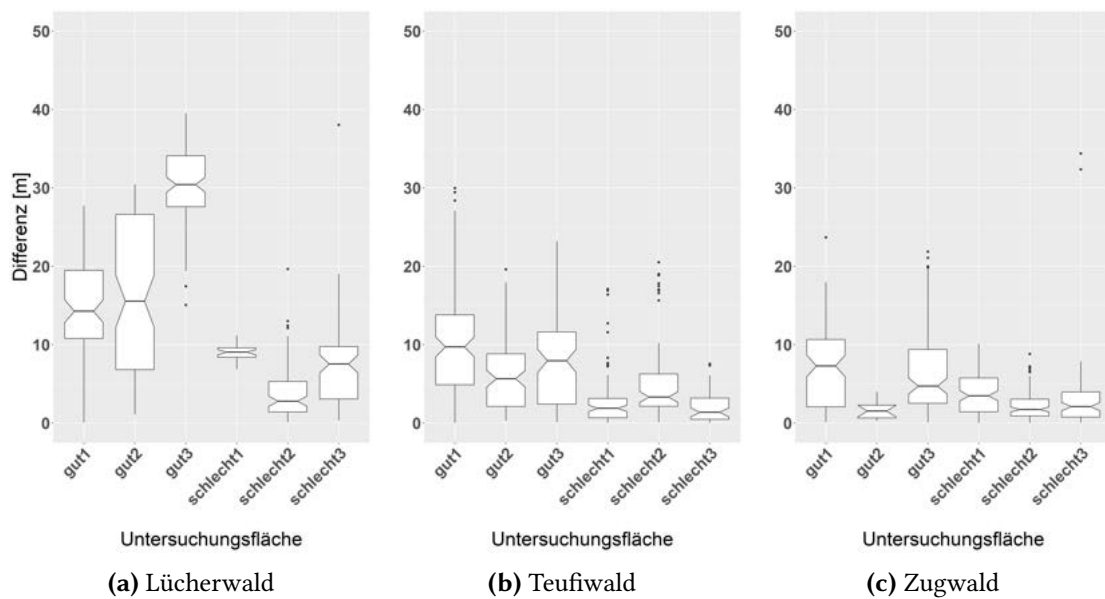


Abb. 3.9. Die absoluten Differenzen zwischen dem selbst erstellten VHM und dem schweizweiten VHM [50] aus dem Jahr 2016. Die Differenzen wurden für jede der drei in *gut*, respektive *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen der drei Untersuchungsgebiete Lücher-, Teufi- und Zugwald berechnet.

3.1.2.3. Bestandescharakterisierung mit dem Bestandescode nach Rickli et al. (2005)

Die Verarbeitung der terrestrischen Aufnahmen ermöglichte im Untersuchungsgebiet Zugwald die Berechnung von BHD-Werten, welche in einem weiteren Schritt für die Bestandescharakterisierung verwendet wurden. Hierfür wurden nur die tatsächlich erkannten Bäume verwendet. Aussagen über die vertikale Strukturierung sind dank den terrestrischen RGB-Bildern möglich. Jedoch wurde hier keine automatisierte Analyse der vertikalen Struktur durchgeführt. Mit Hilfe der UAV-Aufnahmen konnte zusätzlich der Kronendeckungsgrad (DG) bestimmt werden (Tabellen A.23 - A.25). Daraus resultiert ein Bestandescode, bei welchen, mit Ausnahme der als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen des Untersuchungsgebietes Zugwald, die mittleren zwei Ziffern fehlen (Tab. 3.6).

Die vertikale Struktur wird für alle Untersuchungsgebiete in den als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen als "einschichtig" und in den als *gut* strukturiert eingestuften als mehrschichtig kategorisiert, wobei *gut3* im Lücherwald und *gut2* im Teufiwald eine sogenannte gut strukturierte vertikale Struktur vorweisen.

In der Untersuchungsfläche *schlecht1* sind drei Bäume in der Entwicklungsstufe *Baumholz II* und drei Bäume in der Entwicklungsstufe *Baumholz III*. Die anderen zwei Bäume befinden sich in der Entwicklungsstufe *Baumholz I*. Für die Untersuchungsfläche *schlecht2* wurden drei Bäume der Entwicklungsstufe *Baumholz III* bestimmt, drei der Entwicklungsstufe *Baumholz I* sowie ein Baum der Entwicklungsstufe *Baumholz II*. In der Untersuchungsfläche *schlecht3* wurden vier Bäume der Entwicklungsstufe *Baumholz III* bestimmt, je ein Baum der Entwicklungsstufen *Baumholz II* sowie *Stangenholz*.

Die DG sind in den als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen tendenziell höher als in den *gut* strukturiert eingestuften. Den höchsten DG (100%) verzeichnet die Untersuchungsfläche *schlecht3* im Lücherwald. Wobei sowohl *schlecht3* des Lücherwaldes mit 97.9%, *schlecht3* im Teufiwald mit 94.6 % und alle als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen im Zugwald DG von über 90% vorweisen. In den als *gut* strukturiert definierten Untersuchungsflächen wurden Werte zwischen 14% (*gut2* im Teufiwald, *gut3* im Zugwald) und 56 % (*gut1* Zugwald) ermittelt. Drei Untersuchungsflächen weisen Deckungsgrade von ca. 40% auf (*gut1* im Teufiwald, sowie *gut2* und *gut3* im Lücherwald).

Tab. 3.6. Bestandescodes basierend auf den Auswertungen der Structure from Motion (SfM) Untersuchungen. Der vierstellige Zahlencode bezieht sich auf die Stufen der Parameter des Bestandescodes mit S (Schichtung), E (Entwicklungsstufe), M (Mischung) und D (Kronendeckungsgrad).

Untersuchungs- fläche	Teufiwald SEMD	Lücherwald SEMD	Zugwald SEMD
schlecht1	1xx5	1xx1	14x1
schlecht2	1xx4	1xx3	14x1
schlecht3	1xx1	1xx1	15x1
gut1	2xx4	2xx4	2xx3
gut2	3xx5	2xx4	2xx5
gut3	2xx5	3xx4	2xx5

3.2. Temperaturdaten und weitere meteorologische Daten

3.2.1. Wetter am 17. Oktober 2019

3.2.1.1. Temperatur

Die Tagesverläufe der Temperaturen der Station Davos und Teufiwald sind sehr unterschiedlich ([Abb. 3.10a](#)). Die gemessenen Werte im Teufiwald sind zu Beginn des Tages leicht erhöht und relativ konstant, steigen dann aber weniger an als jene in Davos. Zum Tagesende hin sinken sie weniger stark und langsamer ab. Schlussfolgernd sind in Davos grössere Temperaturschwankungen zu beobachten. Die Temperatur der Station Davos ist zwischen 7:30 Uhr und 16 Uhr höher als jene im Teufiwald.

3.2.1.2. Wind

Aus [Abb. 3.10b](#) geht deutlich hervor, dass die Windgeschwindigkeiten im Teufiwald tendenziell tiefer sind als jene in Davos. Der Verlauf der beiden Stationen ist am Morgen relativ ähnlich. Ab 11 Uhr nimmt die Differenz allmählich zu, erreicht um die Mittagszeit einen Peak und nimmt allmählich wieder ab bis um 16 Uhr wieder die selben Windgeschwindigkeiten herrschen.

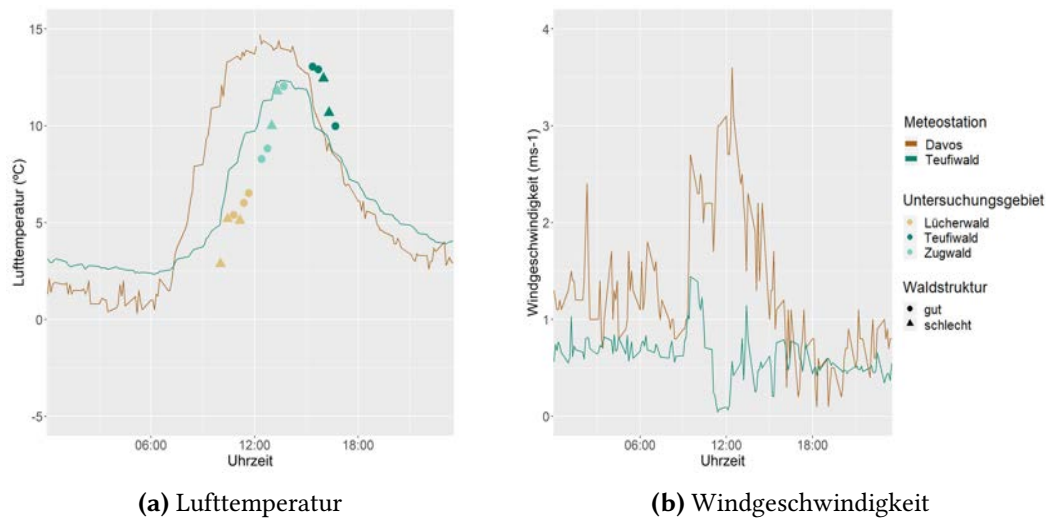


Abb. 3.10. Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur (2m) am 17.10.2019 der zwei Messtationen Davos und Teufiwald. In Abbildung a) sind 10-Minuten-Mittel der Temperaturen dargestellt. Die Punkte stellen die während den Feldaufnahmen von Hand gemessenen Lufttemperaturen in den einzelnen Untersuchungsflächen dar. In Abbildung b) sind 10-Minuten-Mittel der Windgeschwindigkeiten dargestellt.

3.2.2. Lufttemperatur und -feuchtigkeit in den Untersuchungsflächen

Für die verschiedenen Untersuchungsgebiete zeigen sich verschiedene Muster bezüglich der auf 2m gemessenen Lufttemperatur. Im Lücher- und im Teufiwald sind in den als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen tiefere Temperaturen (Median) zu verzeichnen, mit 4.9 °C gegenüber 5.9 °C im Lücherwald respektive 11.6 °C gegenüber 12.6 °C im Teufiwald. Im Zugwald verhält es sich umgekehrt, mit 10.9 °C gegenüber 8.8 °C (Abb. 3.11a). Die Lufttemperaturen sind über alle Untersuchungsgebiete betrachtet in den als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen im Median höher, 10.1 °C gegenüber 8.8 °C (Abb. 3.11b). Der Tagesverlauf der Lufttemperaturen in den drei Untersuchungsgebieten stimmt mit jenem der Messstation “Teufiwald“ gut überein (Abb. 3.10a).

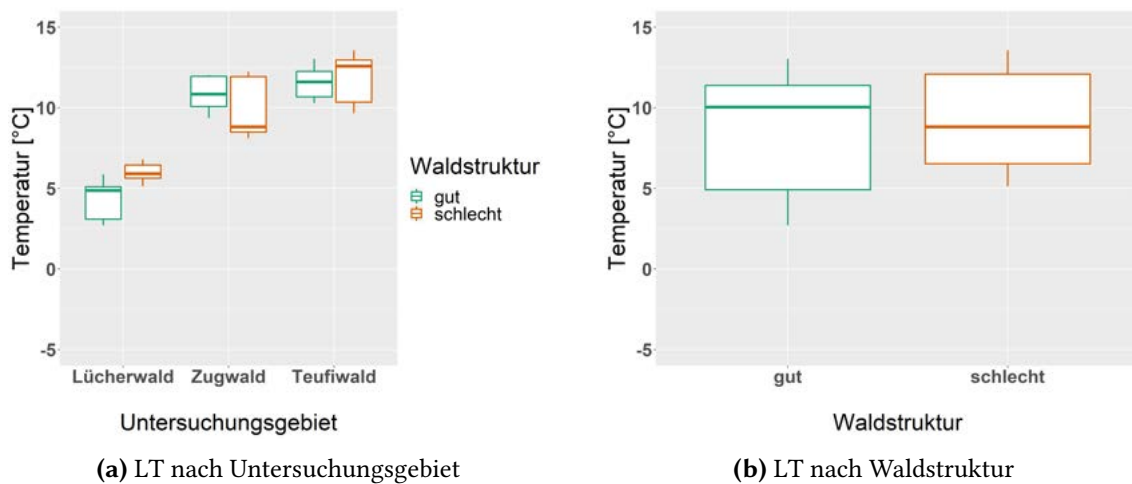


Abb. 3.11. Darstellung der von Hand gemessenen Lufttemperatur (LT) der Untersuchungsfläche (2m). Abbildung a) zeigt die Untersuchungsgebiete Lücher-, Zug- und Teufiwald aufgeteilt in *gut* und *schlecht* strukturiert. Pro Untersuchungsfläche wurden jeweils vier Werte, für jeden Quadrant einer, berechnet. Abbildung b) zeigt die Werte für alle als *gut* strukturiert sowie als *schlecht* strukturiert eingestuft Untersuchungsflächen aller Untersuchungsgebiete.

Die relative Luftfeuchtigkeit (2m) weist im Lücherwald in den als *schlecht* strukturiert eingestuft Untersuchungsflächen einen tieferen Median (0.68) auf als in den als *gut* strukturiert eingestuft (0.74) (Abb. 3.12a). Im Zugwald ist es mit 0.47, respektive 0.61 umgekehrt. Im Teufiwald sind die Mediane identisch mit einem Wert von 0.46. Der Vergleich über alle Untersuchungsgebiete zeigt, dass die als *gut* strukturiert eingestuft Untersuchungsflächen eine grössere IQR (0.24) sowie einen tieferen Median (0.54) gegenüber den als *schlecht* strukturiert eingestuft (0.2 respektive 0.61) aufweisen (Abb. 3.12b). Die relative Luftfeuchtigkeit unterliegt einem Tagesverlauf. Zu Beginn des Tages sind die höchsten Werte zu beobachten (Lücherwald: 09:30-11:30 Uhr), sinken bis um 14 Uhr ab (Zugwald: 12-14 Uhr) und steigen danach wieder an (Teufiwald: 15-17 Uhr) (Abb. 3.12c).

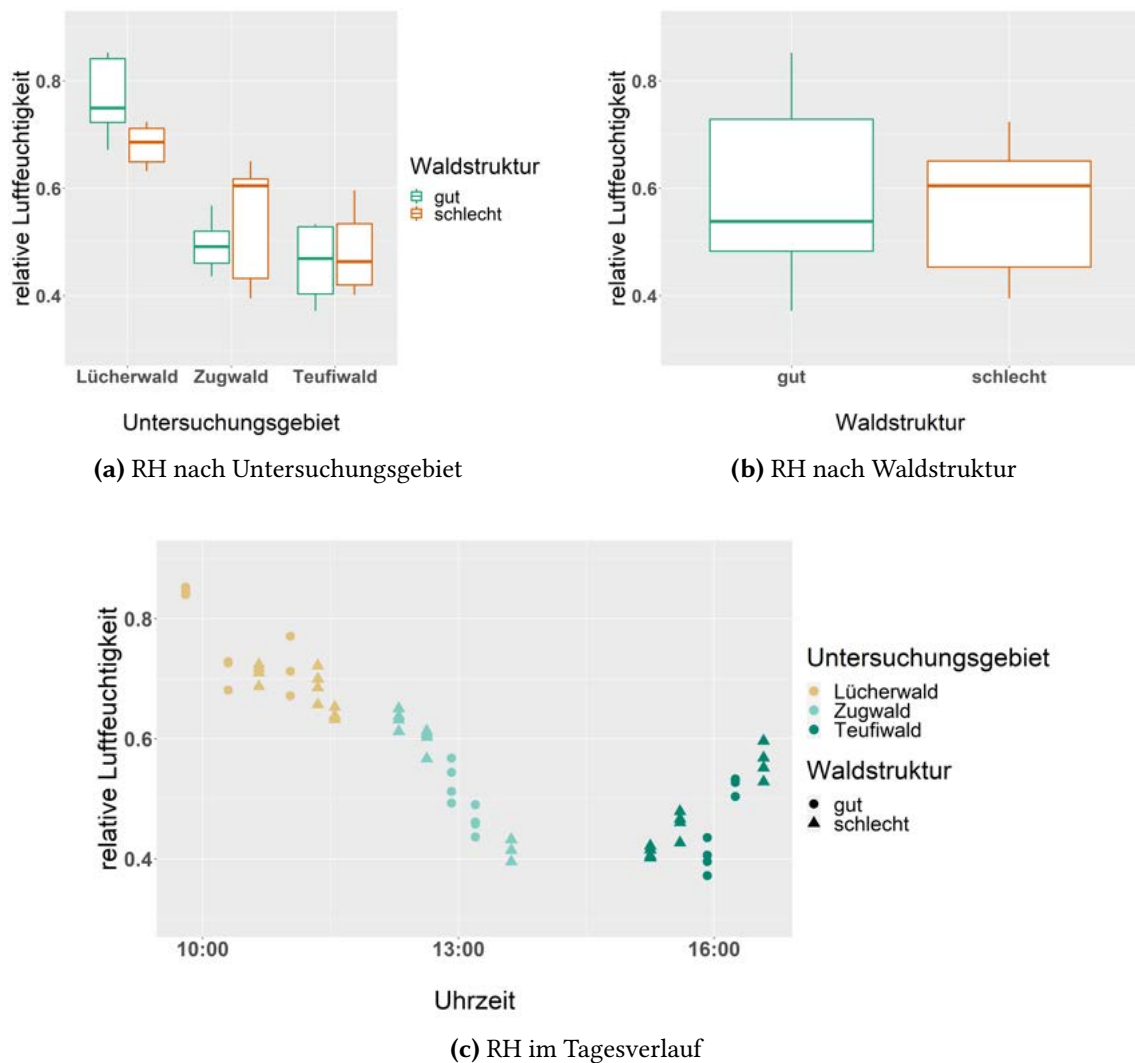


Abb. 3.12. Darstellung der relativen Luftfeuchtigkeit (RH). Abbildung a) zeigt die Untersuchungsgebiete Lücher-, Zug- und Teufiwald aufgeteilt in *gut* und *schlecht* strukturiert. Pro Untersuchungsfläche wurden jeweils vier Werte, für jeden Quadrant einer, berechnet. Abbildung b) zeigt die Werte für alle als *gut* strukturiert sowie als *schlecht* strukturiert eingestuft Untersuchungsflächen über alle Untersuchungsgebiete. Abbildung c) zeigt den Verlauf der RH über die Messreihe.

3.2.3. Bodentemperatur in den Untersuchungsflächen

Die Bodentemperatur in 10cm Tiefe weist in allen Untersuchungsgebieten in den als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen einen tieferen Median auf als in den als *gut* strukturiert eingestuften (Abb. 3.13a). Die Differenz ist im Lücherwald mit 0.4 °C am kleinsten (*gut* 6.5 °C, *schlecht* 6.1 °C), in den anderen Untersuchungsgebieten mit 0.9 °C identisch. Im Zugwald sind die Mediantemperaturen jedoch höher (*gut* 6.8 °C, *schlecht* 5.9 °C) als im Teufiwald (*gut* 6.5 °C, *schlecht* 5.6 °C). Der Vergleich über alle

Untersuchungsgebiete zeigt, dass die als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen einen höheren Median (6.6 °C) gegenüber den als *schlecht* strukturiert eingestuften (5.9 °C) aufweisen (Abb. 3.13b).

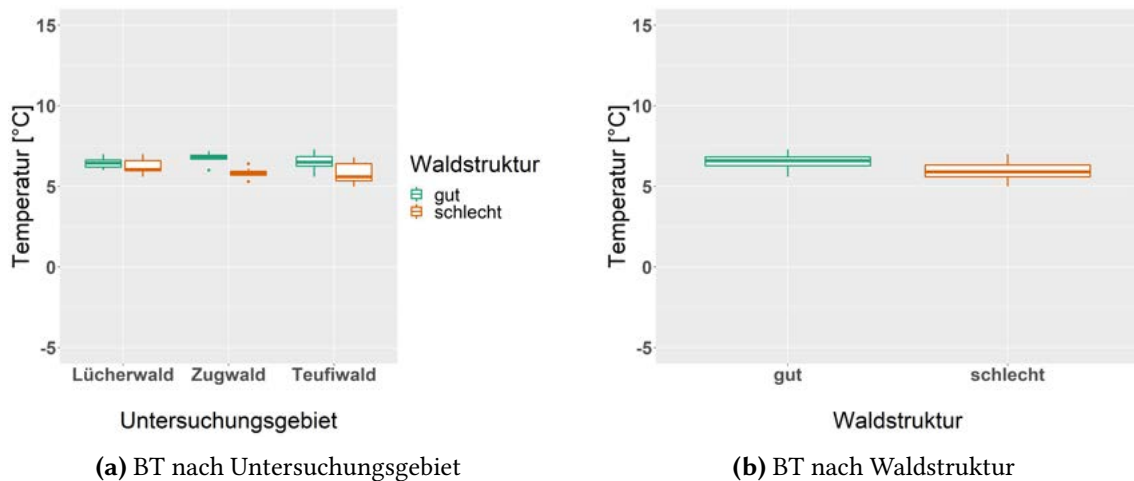


Abb. 3.13. Darstellung der von Hand gemessenen Bodentemperatur (BT) der Untersuchungsfläche (10cm). Abbildung a) zeigt die Untersuchungsgebiete Lücher-, Zug- und Teufiwald aufgeteilt in *gut* und *schlecht* strukturiert. Pro Untersuchungsfläche wurden jeweils vier Werte, für jeden Quadrant einer, berechnet. Abbildung b) zeigt die Werte für alle als *gut* strukturiert sowie als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen aller Untersuchungsgebiete.

3.2.4. Terrestrische Thermalfotografie

Der Median der Bodenoberflächentemperatur (BOT) steigt in den als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen von -0.24 °C im Lücherwald zu 5.8 °C im Zugwald, in den als *schlecht* strukturiert eingestuften von 0.97 °C zu 5.13 °C (Abb. 3.14a). Vergleicht man die Temperaturen im Zugwald und Teufiwald kann eine Erhöhung des Medians nur in den als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen beobachtet werden (von 5.14 °C zu 7.43 °C), während in den als *gut* eingestuften eine Senkung zu beobachten ist (von 5.80 °C im Zugwald zu 5.43 °C im Teufiwald). Betrachtet man die Mediane über alle Untersuchungsgebiete zeigt sich in den als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen ein erhöhter Wert, 4.58 °C, gegenüber den als *gut* strukturiert eingestuften, 4.28 °C (Abb. 3.14b). Die Streuung (IQR) ist bei den als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen mit 5.9 °C höher als bei den *schlecht* strukturiert eingestuften (4.3 °C). Grundsätzlich folgen die BOT dem Tagesverlauf der Lufttemperaturen (Abb. 3.14c, Abb. 3.10a).

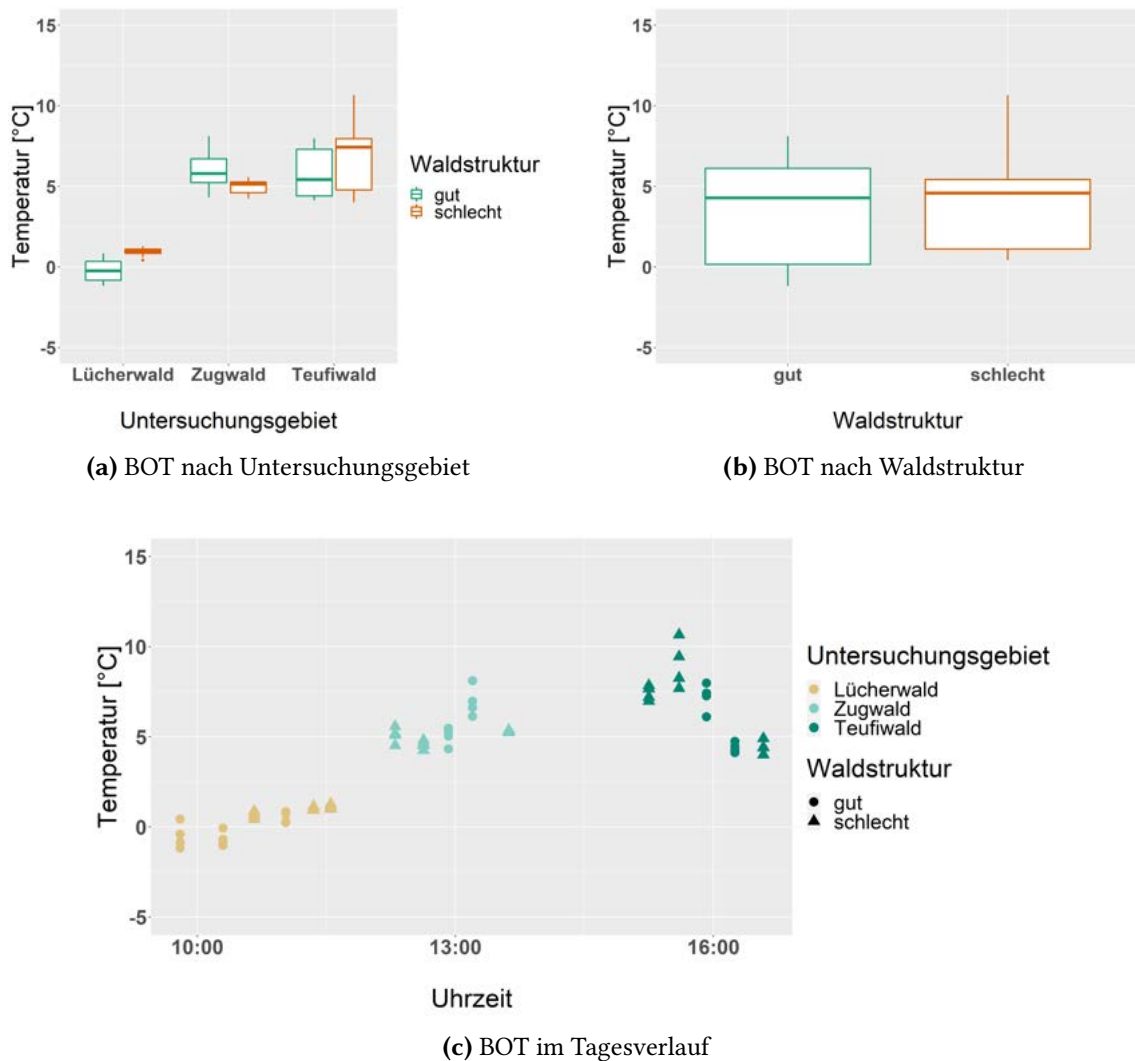


Abb. 3.14. Bodenoberflächentemperatur (BOT) der terrestrischen Thermalkamera. Abbildung a) zeigt die Untersuchungsgebiete Lücher-, Zug- und Teufiwald aufgeteilt in *gut* und *schlecht* strukturiert. Pro Untersuchungsfläche wurden jeweils vier Werte, für jeden Quadrant einer, berechnet. Abbildung b) zeigt die Werte für alle als *gut* strukturiert sowie als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen über alle Untersuchungsgebiete. Abbildung c) zeigt den Verlauf der BOT über die Messreihe.

3.2.5. Drohnen-gestützte Thermalfotografie

In allen Untersuchungsgebieten konnte die Orientierung für die thermischen UAV-Aufnahmen erfolgreich durchgeführt werden (Tab. 3.7). Beim Flugplan Teufiwald3 waren die BKP nicht genügend sichtbar und konnten nicht in ausreichender Anzahl gefunden werden. Dies resultierte in einem nicht verwendbaren Orthomosaik. Teufiwald 1 und 2 wurden zusammen verarbeitet. Die Untersuchungsfläche *gut1* im Zugwald und *gut1* im Teufiwald konnten nicht abgebildet werden, da die Flugpläne zu knapp berechnet wurden.

Tab. 3.7. Die Spalte “Anzahl Bilder” beschreibt die Anzahl aufgenommener Bilder pro Untersuchungsgebiet (UG). Die “Anzahl orientierte Bilder” charakterisiert die erste Orientierung der Aufnahmen in Agisoft Metashape. Die Spalte “BKP” beschreibt die Anzahl verwendeter Bodenkontrollpunkten. Für jedes Untersuchungsgebiet wurde eine verdichtete Punktwolke erstellt. Die Spalte “Anzahl Punkte” gibt die Anzahl Punkte jeder verdichteten Punktwolke an. Ob eine Orientierung erfolgreich war, hängt davon ab, ob die Bilder richtig angeordnet wurden und dies für die weitere Prozessierung verwendet werden konnte.

Flugplan	Anzahl Bilder	Anzahl orientierter Bilder	Erfolg [%]	Anzahl erkannte BKP	Anzahl Punkte	erfolgreiche Verarbeitung
Teufiwald1/2	312	312	100	9	3'459'924	Ja
Teufiwald3	20	20	100	3	445'646	Nein
Lücherwald	417	416	100	7	3'520'218	Ja
Zugwald	419	419	100	5	3'846'281	Ja

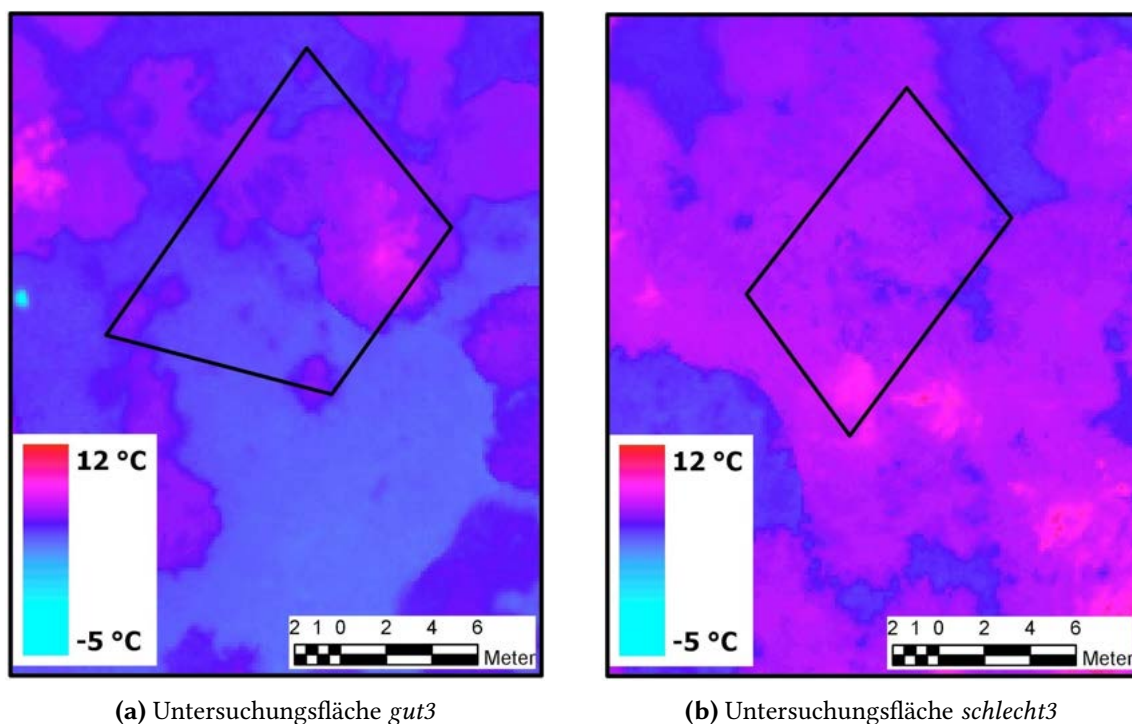


Abb. 3.15. Ausschnitte aus dem Orthomosaik des Untersuchungsgebiet Lücherwald basierend auf den Thermaldrohnen-Aufnahmen. Abbildung a) zeigt die aufgenommenen Temperaturwerte der Untersuchungsfläche *gut3*, in Abbildung b) ist jene der Untersuchungsfläche *schlecht3* dargestellt.

Die UAV-Aufnahmen zeigen ein klares Bild: Im Tagesverlauf erwärmt sich die Oberfläche (Abb. 3.16a). Die Mediantemperaturen pro Untersuchungsgebiet sind in den als *schlecht* im Vergleich zu den als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen hö-

her. Im Lücherwald liegen die entsprechenden Mediane bei 4.26 °C (textitgut strukturiert) und 4.70 °C (*schlecht* strukturiert) (Abb. 3.15), im Zugwald bei 6.36 °C respektive 6.92 °C und im Teufiwald bei 9.23 °C respektive 10.80 °C. Die Streuung an den einzelnen Untersuchungsgebieten ist verschieden. So zeigt sich im Zugwald eine grössere Streuung (IQR) in den als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen, 3 °C gegenüber 0.7 °C, während im Teufiwald dies mit 1.6 °C gegenüber 3.5 °C umgekehrt ist. Im Lücherwald ist der Unterschied mit 0.5 °C minimal. Die entsprechenden IQR betragen 1.5 °C, respektive 1 °C. Gebietsübergreifend ist der Median der als *gut* gegenüber der *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen kleiner (*gut* (5.56 °C), *schlecht* (6.92 °C)) (Abb. 3.16b).

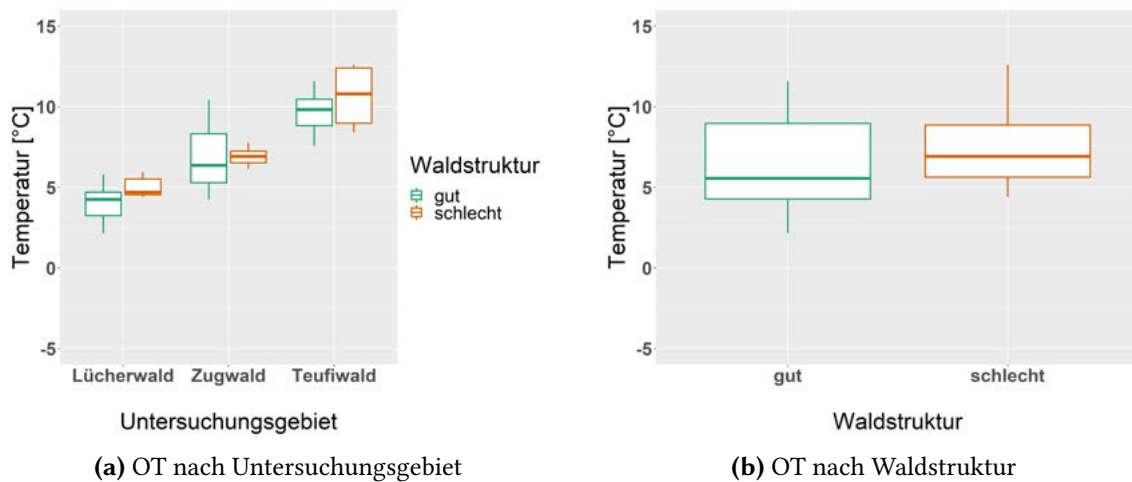


Abb. 3.16. Oberflächenemperatur (OT) der drohnengestützter Thermalkamera. Abbildung a) zeigt die Untersuchungsgebiete Lücher-, Zug- und Teufiwald aufgeteilt in *gut* und *schlecht* strukturiert. Pro Untersuchungsfläche wurden jeweils vier Werte, für jeden Quadrant einer, berechnet. Abbildung b) zeigt die Werte für alle als *gut* strukturiert sowie als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen über alle Untersuchungsgebiete.

3.2.6. Vegetations- und Blattflächenindex

Die Werte des normalisierten differenzierten Vegetationsindex (NDVI) sind im Teufiwald sehr konstant (Abb. 3.17a). Die Mediane unterscheiden sich innerhalb der Gebiete wenig bis gar nicht und betragen im Lücherwald ca. 0.52, im Teufiwald 0.63 und im Zugwald 0.52. Die Streuung (IQR) ist sowohl für die als *gut* strukturiert und die als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen ca. 0.06. In den beiden anderen Untersuchungsgebieten streuen die Werte stärker. Im Lücherwald betragen die entsprechenden IQR 0.05 (*gut* strukturiert) und 0.15 (*schlecht* strukturiert). Im Zugwald ist das Ver-

hältnis mit 0.16 (*gut* strukturiert) und 0.04 (*schlecht* strukturiert) umgekehrt. Vergleicht man die Untersuchungsflächen aller Untersuchungsgebiete ergibt sich mit einem Median von 0.55 für die als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen und 0.54 für die *schlecht* strukturiert eingestuften ebenfalls kein namhafter Unterschied (Abb. 3.17b). Da der Blattflächenindex (LAI) basierend auf dem NDVI berechnet wurde, zeigen sich gleiche Tendenzen. Die Werte für den LAI bewegen sich zwischen 1.5 und 2.78.

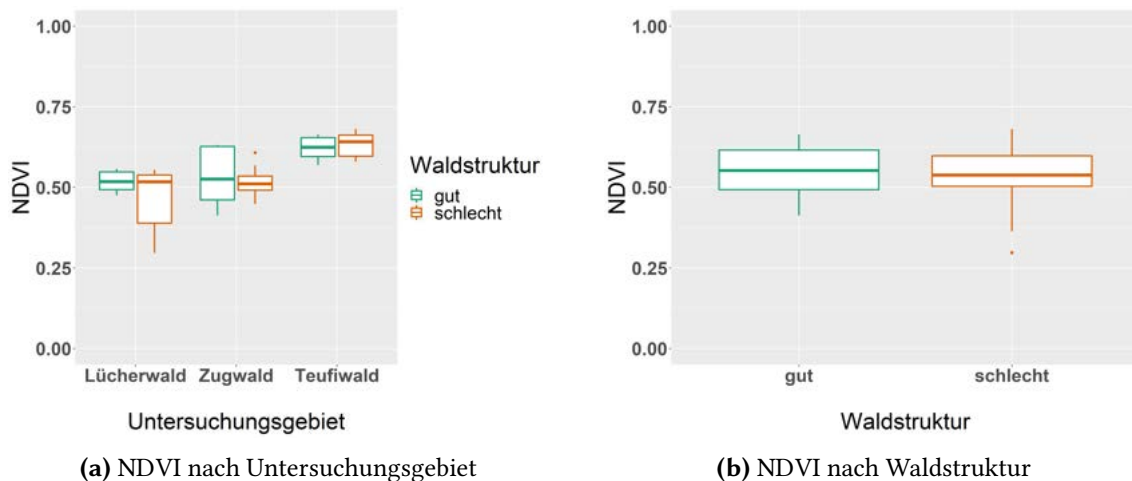


Abb. 3.17. Darstellung des berechneten normalisierter differenzierter Vegetationsindex (NDVI). Abbildung a) zeigt die Untersuchungsgebiete Lücher-, Zug- und Teufiwald aufgeteilt in *gut* und *schlecht* strukturiert. Pro Untersuchungsfläche wurden jeweils vier Werte, für jeden Quadrant einer, berechnet. Abbildung b) zeigt die Werte für alle als *gut* strukturiert sowie als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen über alle Untersuchungsgebiete.

3.3. Evapotranspirationsmodell

Für das Modell wurden die Bodenwärmeflüsse (G), die latente Wärme (LE) und die fühlbare Wärme (H) berechnet (Abb. 2.17). Zur Darstellung der Ergebnisse wurden die beiden letzteren weiter in den ausgehenden Wärmefluss von Boden und Vegetation unterteilt. Die verwendeten Inputdaten der einzelnen Untersuchungsflächen können in der Tab. A.28 eingesehen werden.

Während die G-Werte mit 20 W/m^2 gegenüber 18 W/m^2 im Lücherwald und 19 W/m^2 und 15 W/m^2 im Zugwald einen leicht tieferen Median für die als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen zeigen, ist dies im Teufiwald mit -26 W/m^2 gegenüber -21 W/m^2 gerade umgekehrt (Abb. 3.18a). Negative Werte entsprechen einer Abkühlung der Bodenoberfläche. Die Mediane von 15 W/m^2 für die als *gut*, respektive 13 W/m^2 für die als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen unterscheiden sich nur wenig (Abb. 3.18b). Die Streuung (IQR $[-24, 21]$) ist in den als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen deutlich grösser als in den als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen (IQR $[-14, 18]$). Bewegen sich die Werte der anderen Untersuchungsgebiete noch im positiven Bereich, sind im Teufiwald negative Werte zu beobachten. Betrachtet man den Tagesverlauf, sind in den ersten beiden Standorten keine Unterschiede zu sehen (Abb. 3.18c). Einzig die Streuung nimmt ab. Betrachtet man aber den Teufiwald, ist ein starker Rückgang über die Zeit zu beobachten.

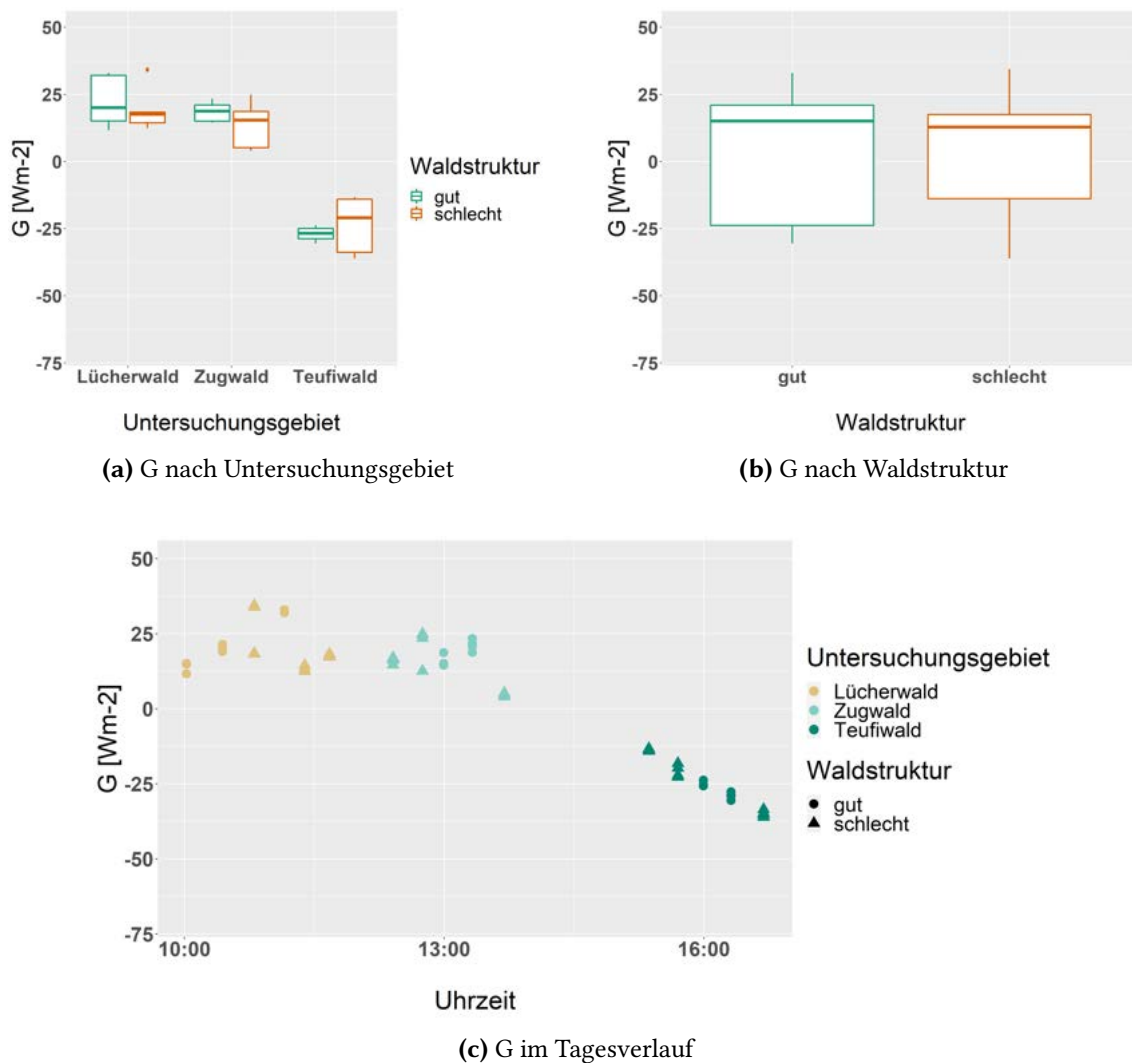


Abb. 3.18. Darstellung der Bodenwärmeflüsse (G). Abbildung a) zeigt die Untersuchungsgebiete Lücher-, Zug- und Teufiwald aufgeteilt in *gut* und *schlecht* strukturiert. Pro Untersuchungsfläche wurden jeweils vier Werte, für jeden Quadrant einer, berechnet. Abbildung b) zeigt die Werte für alle als *gut* strukturiert sowie als *schlecht* strukturiert eingestuft Untersuchungsflächen über alle Untersuchungsgebiete. Abbildung c) zeigt die G -Werte im Tagesverlauf der Messungen.

Die Summen der fühlbaren Wärmeflüsse (H) sind im Teufiwald für alle Untersuchungsflächen negativ (Abb. 3.19a). Unterschiede existieren zwischen den Medianen der als *schlecht* (-29 W/m^2), respektive *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen (-39 W/m^2). Im Zugwald ist der Median für die als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen (-22 W/m^2) ebenfalls tiefer als die als *schlecht* strukturiert eingestuften (-19 W/m^2). Im Lücherwald verhält es sich mit -17 W/m^2 , respektive -19 W/m^2 umgekehrt. Somit ist der Lücherwald das einzige Untersuchungsgebiet mit einer höheren Summe der fühlbaren Wärmeflüsse in den als *schlecht* strukturiert eingestuften Unter-

suchungsflächen. Betrachtet man alle Untersuchungsflächen aller Untersuchungsgebiete zusammen, weisen die als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen mit -21 W/m^2 gegenüber den als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen mit -25 W/m^2 einen höheren Median auf (Abb. 3.19b). Während sich die Werte für die einzelnen Untersuchungsflächen im Lücher- und Zugwald auf einem ähnlichen Niveau befinden, sind im Teufiwald tiefere Werte zu beobachten (Abb. 3.19c).

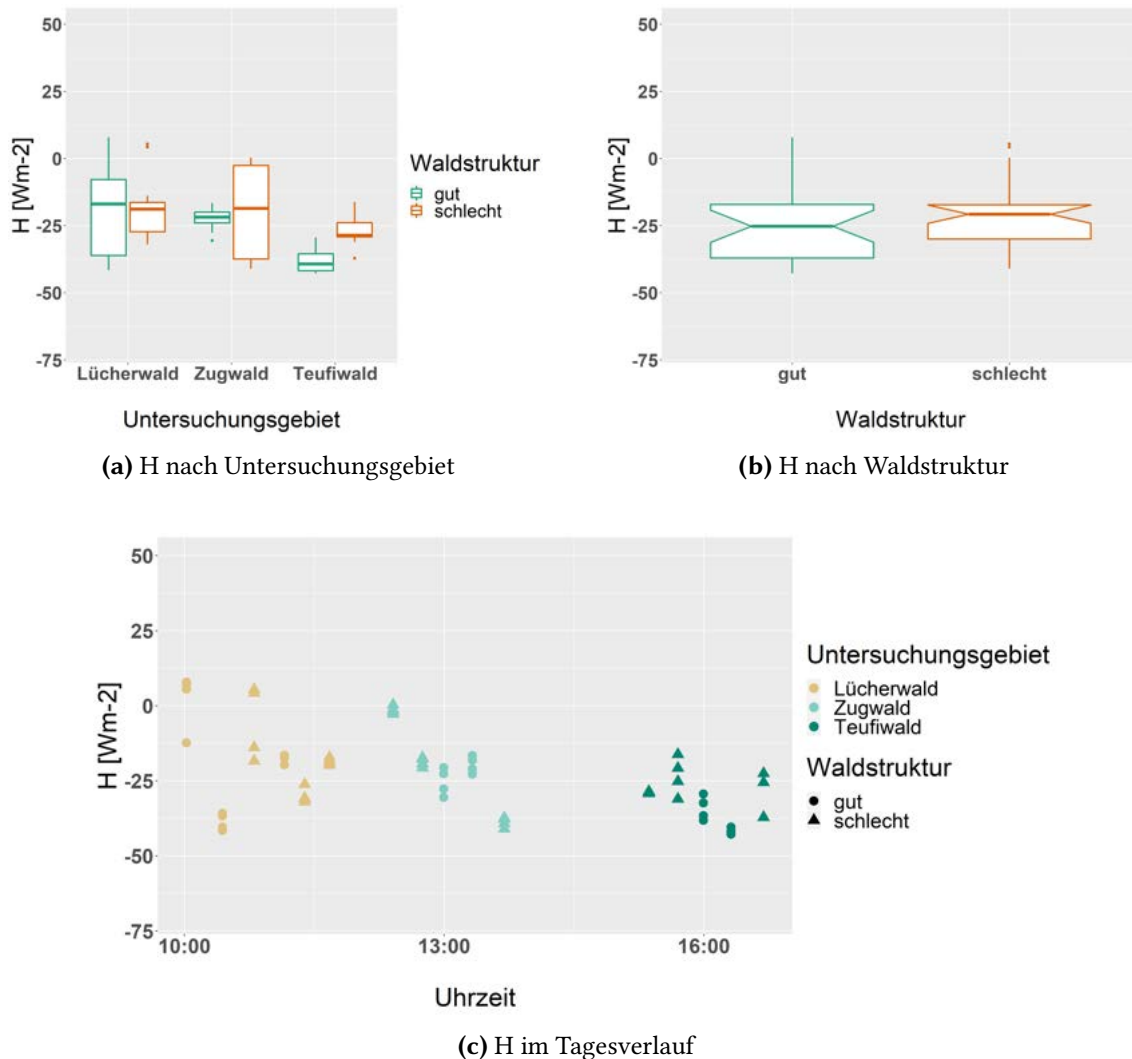


Abb. 3.19. Darstellung der Summen der fühlbaren Wärmeflüsse (H). Abbildung a) zeigt die Untersuchungsgebiete Lücher-, Zug- und Teufiwald aufgeteilt in *gut* und *schlecht* strukturiert. Pro Untersuchungsfläche wurden jeweils vier Werte, für jeden Quadranten einer, berechnet. Abbildung b) zeigt die Werte für alle als *gut* strukturiert sowie als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen über alle Untersuchungsgebiete. Abbildung c) zeigt die H-Werte im Tagesverlauf der Messungen.

Die fühlbaren Wärmeflüsse ausgehend vom Boden (Hs) zeigen durchlaufend negative Werte (Abb. 3.20a). Die Mediane im Teufi- und Zugwald sind für die als *gut* strukturiert

und *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen sehr ähnlich (-24 W/m^2 gegenüber -23 W/m^2 , respektive -30 W/m^2 gegenüber -26 W/m^2). Im Lücherwald weisen die als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen einen tieferen Median (-39 W/m^2) gegenüber den als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen (-32 W/m^2) auf. Die Differenz zwischen den als *schlecht* und *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen nimmt im Verlauf der Messreihe ab. Für alle Untersuchungsflächen aller Untersuchungsgebiete ist der Median der als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen auf einem mit -27 W/m^2 tiefer gegenüber -25 W/m^2 in den als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen (Abb. 3.20b).

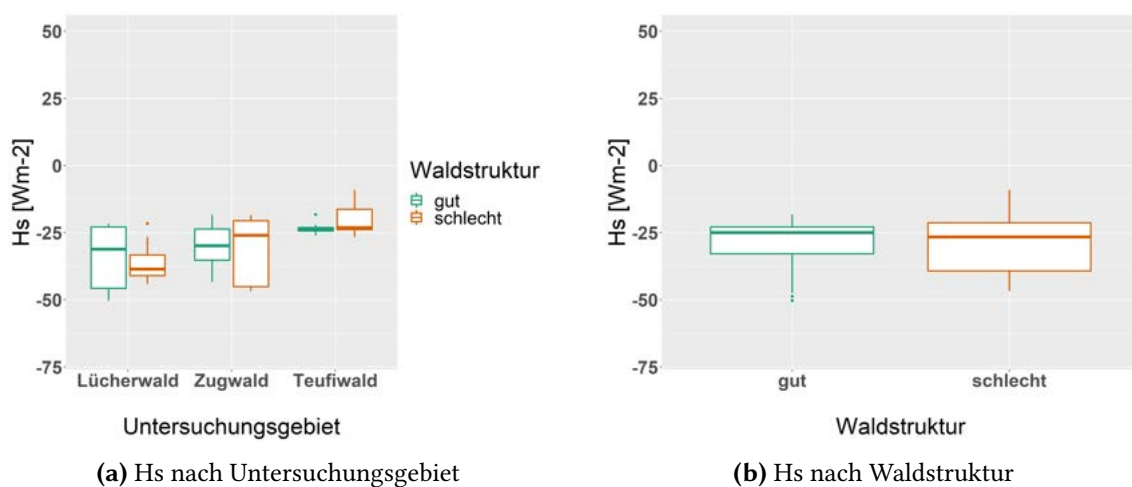


Abb. 3.20. Darstellung der Bodenkomponente der fühlbaren Wärmeflüsse (H_s). Abbildung a) zeigt die Untersuchungsgebiete Lücher-, Zug- und Teufiwald aufgeteilt in *gut* und *schlecht* strukturiert. Pro Untersuchungsfläche wurden jeweils vier Werte, für jeden Quadrant einer, berechnet. Abbildung b) zeigt die Werte für alle als *gut* strukturiert sowie als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen über alle Untersuchungsgebiete.

Im Lücherwald und Zugwald sind die fühlbaren Wärmeflüsse der Vegetation (H_c) durchwegs positiv, während im Teufiwald vor allem negative Werte berechnet wurden (Abb. 3.21a). Im Lücher- und Teufiwald unterscheiden sich die Mediane der als *gut* (9, -14 W/m^2), respektive *schlecht* (16, -7 W/m^2) strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen deutlich und in beiden weist erstere einen tieferen Wert auf. Im Zugwald ist dagegen kein Unterschied festzustellen (8 W/m^2). Die Werte aller als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen zeigen über alle Untersuchungsgebiete einen tieferen Median (5 W/m^2) als die der *schlecht* eingestuften Untersuchungsflächen (8 W/m^2) (Abb. 3.21b). Die Streuung (IQR) ist für beide Strukturen mit ca. 20 W/m^2 vergleichbar.

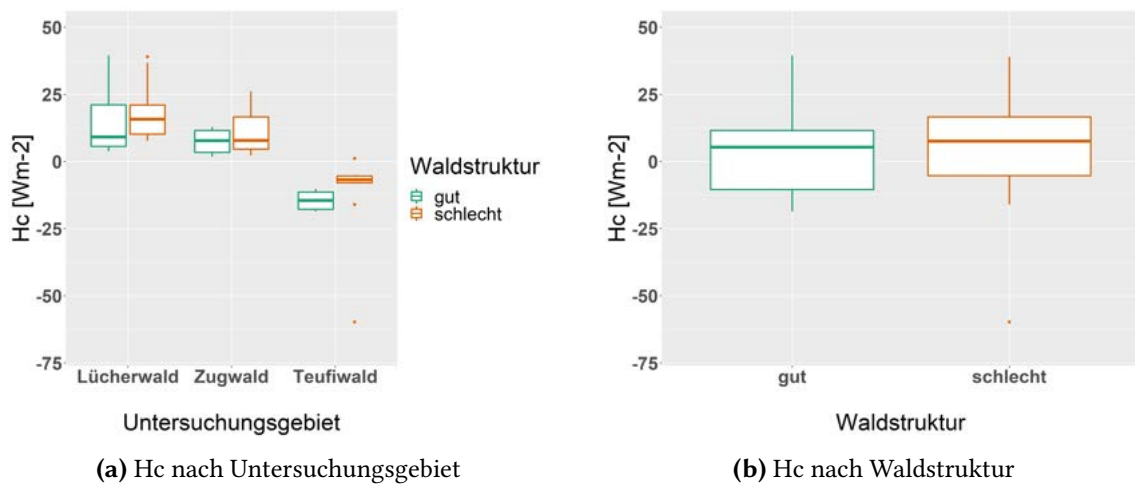


Abb. 3.21. Darstellung der Vegetationskomponente der fühlbaren Wärmeflüsse (H_c). Abbildung a) zeigt die Untersuchungsgebiete Lücher-, Zug- und Teufiwald aufgeteilt in *gut* und *schlecht* strukturiert. Pro Untersuchungsfläche wurden jeweils vier Werte, für jeden Quadrant einer, berechnet. Abbildung b) zeigt die Werte für alle als *gut* strukturiert sowie als *schlecht* strukturiert eingestuftene Untersuchungsflächen über alle Untersuchungsgebiete.

Die Summen der latenten Wärmeflüsse (LE) sind im Lücherwald und Zugwald höher als im Teufiwald (Abb. 3.22a). Die Mediane sind für die als *schlecht* strukturiert eingestuftene Untersuchungsflächen sowohl im Lücher- (216 W/m^2) wie auch im Teufiwald (56 W/m^2) höher als jene der als *gut* strukturiert eingestuftene (212 W/m^2 , 26 W/m^2). Im Zugwald ist dies umgekehrt mit 225 W/m^2 für die als *gut* gegenüber 209 W/m^2 für die als *schlecht* strukturiert eingestuftene Untersuchungsflächen. Zudem zeigen der Lücher- und Zugwald eine grössere Streuung für die als *gut* strukturiert eingestuftene Untersuchungsflächen. Beträgt der IQR im Lücherwald 42 W/m^2 für die als *gut* strukturiert und 21 W/m^2 für die als *schlecht* strukturiert eingestuftene Untersuchungsflächen, sind die IQR im Zugwald bei 36 W/m^2 respektive 16 W/m^2 . Im Teufiwald ist diese Beziehung umgekehrt mit einem IQR von 16 W/m^2 für die als *gut* und 27 W/m^2 für die als *schlecht* strukturiert eingestuftene Untersuchungsflächen. Die Mediane über alle Untersuchungsgebiete sind mit 209 W/m^2 für die als *gut* strukturiert und 202 W/m^2 für die als *schlecht* strukturiert eingestuftene Untersuchungsflächen ähnlich (Abb. 3.22b). Im Tagesverlauf ist ersichtlich, dass die Werte für den Lücher- und Zugwald ein ähnliches Niveau zeigen, zwischen 185 W/m^2 und 255 W/m^2 , und die Werte im Teufiwald deutlich abnehmen, zwischen -31 W/m^2 und 72 W/m^2 (Abb. 3.22c).

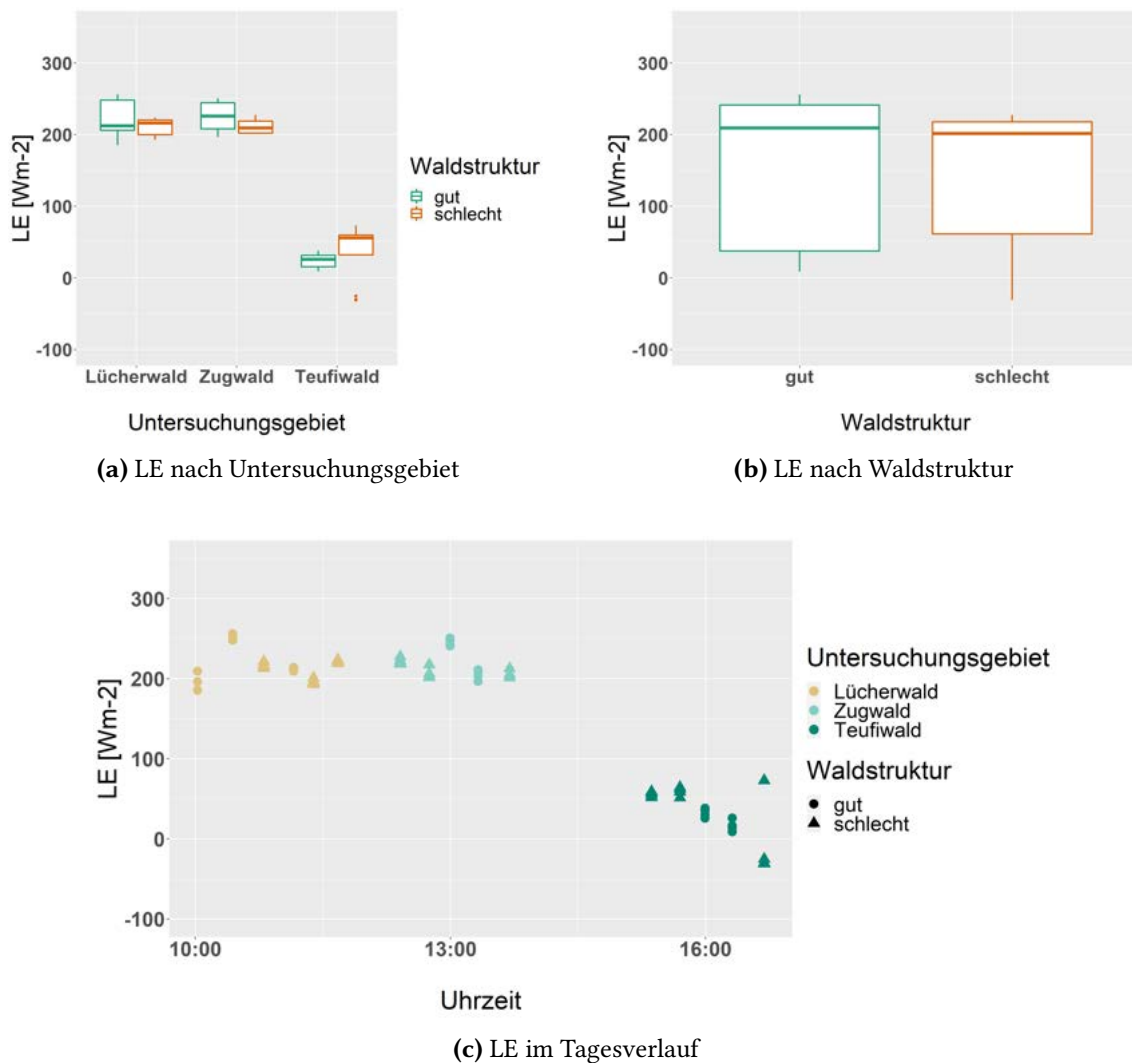


Abb. 3.22. Darstellung der Summen der latenten Wärme flüsse (LE). Abbildung a) zeigt die Untersuchungsgebiete Lücher-, Zug- und Teufiwald aufgeteilt in *gut* und *schlecht* strukturiert. Pro Untersuchungsfläche wurden jeweils vier Werte, für jeden Quadrant einer, berechnet. Abbildung b) zeigt die Werte für alle als *gut* strukturiert sowie als *schlecht* strukturiert eingestufteten Untersuchungsflächen über alle Untersuchungsgebiete. Abbildung c) zeigt die LE-Werte im Tagesverlauf der Messungen.

Die latenten Wärme flüsse des Bodens (LEs) sind im Teufiwald tiefer als in den beiden anderen Untersuchungsgebieten (Abb. 3.23a). Im Lücherwald und Zugwald zeigen die als *gut* gegenüber den als *schlecht* strukturiert eingestufteten Untersuchungsflächen einen höheren Median, mit 211 W/m^2 gegenüber 194 W/m^2 im Lücherwald, respektive 188 W/m^2 gegenüber 176 W/m^2 im Zugwald. Im Teufiwald ist dies mit einem Median von 75 W/m^2 für die als *gut* und 94 W/m^2 für die als *schlecht* strukturiert eingestufteten Untersuchungsflächen gerade umgekehrt. Der Median über alle Untersuchungsgebiete ist für die als *schlecht* strukturiert eingestufteten mit 176 W/m^2 tiefer als jener der als *gut*

strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen mit 184 W/m^2 (Abb. 3.23b). Im Lücher- und Zugwald bewegen sich alle Werte zwischen 150 W/m^2 und 250 W/m^2 (Abb. 3.23c). Im Teufiwald fallen die Werte ab und sind zwischen 50 W/m^2 und 125 W/m^2 .

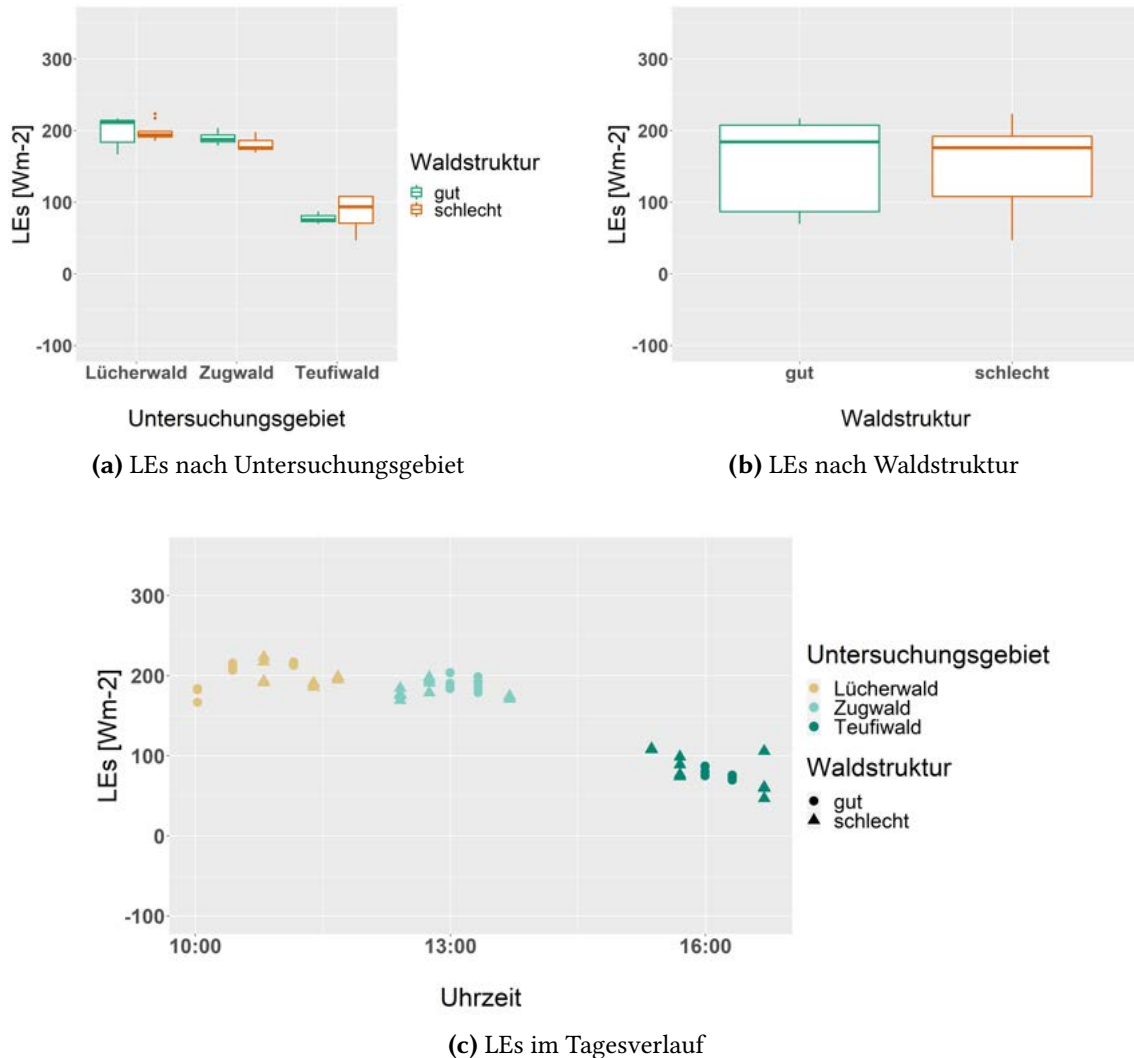


Abb. 3.23. Darstellung der Bodenkomponente der latenten Wärmefflüsse (LEs). Abbildung a) zeigt die Untersuchungsgebiete Lücher-, Zug- und Teufiwald aufgeteilt in *gut* und *schlecht* strukturiert. Pro Untersuchungsfläche wurden jeweils vier Werte, für jeden Quadrant einer, berechnet. Abbildung b) zeigt die Werte für alle als *gut* strukturiert sowie als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen über alle Untersuchungsgebiete. Abbildung c) zeigt die LEs-Werte im Tagesverlauf der Messungen.

Ausgehend von der Vegetation sind die latenten Wärmefflüsse (LEc) im Lücherwald und Zugwald mit wenigen Ausnahmen positiv. Im Teufiwald sind alle Werte negativ (Abb. 3.24a). Die Mediane der als *gut* und *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen innerhalb der einzelnen Untersuchungsgebiete unterscheiden sich wenig. Im Zugwald wurde das Maximum (37 W/m^2), im Teufiwald das Minimum (-53 W/m^2) be-

obachtet. Die Mediane des Zugwalds, sowohl der als *gut* als auch *schlecht* eingestuften strukturierten Untersuchungsflächen, sind mit $\approx 35 \text{ W/m}^2$ die Maxima, gefolgt vom Lücherwald mit $\approx 15 \text{ W/m}^2$ und Teufiwald -42 W/m^2 und -53 W/m^2 . Die Differenz zwischen den Medianen von den als *gut* und *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen ist im Lücherwald 0 W/m^2 ($15, 15 \text{ W/m}^2$), im Zugwald 3 W/m^2 ($37, 34 \text{ W/m}^2$) und im Teufiwald 10 W/m^2 ($-53, -43 \text{ W/m}^2$). Der Median aller Untersuchungsflächen ist bei den als *schlecht* strukturiert mit 9.24 W/m^2 gegenüber 2.19 W/m^2 in den als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen deutlich höher ([Abb. 3.24b](#)). Im Lücher- und Zugwald bewegen sich alle Werte zwischen 0 W/m^2 und 75 W/m^2 ([Abb. 3.24c](#)). Im Teufiwald fallen die Werte ab und sind zwischen 0 W/m^2 und -100 W/m^2 .

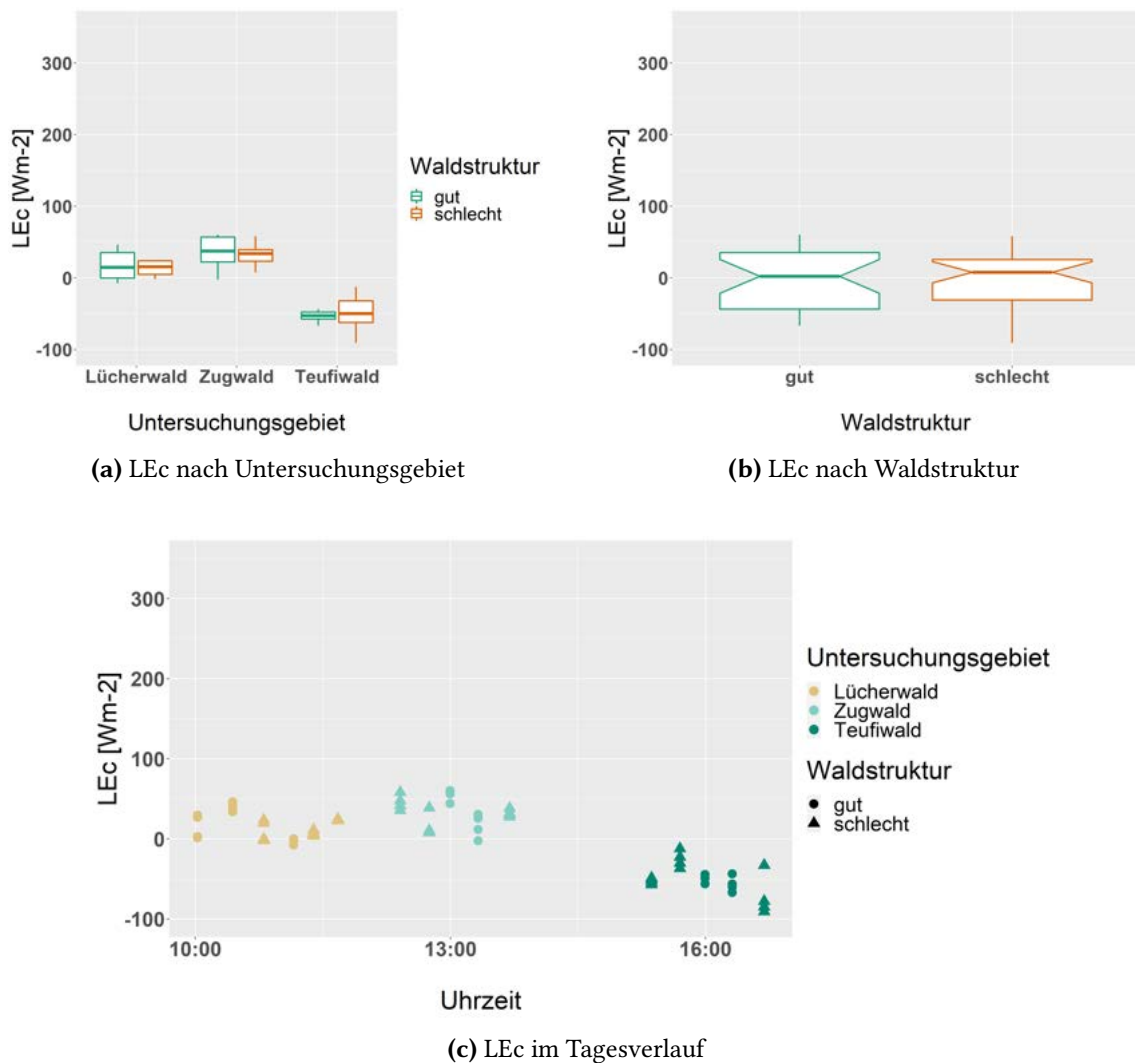


Abb. 3.24. Darstellung der Vegetationskomponente der latenten Wärmeflüsse (LEc). Abbildung a) zeigt die Untersuchungsgebiete Lücher-, Zug- und Teufiwald aufgeteilt in *gut* und *schlecht* strukturiert. Pro Untersuchungsfläche wurden jeweils vier Werte, für jeden Quadrant einer, berechnet. Abbildung b) zeigt die Werte für alle als *gut* strukturiert sowie als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen über alle Untersuchungsgebiete. Abbildung c) zeigt die LEc-Werte im Tagesverlauf der Messungen.

4. Diskussion

4.1. Bestandescharakterisierung

4.1.1. Terrestrische Normalfarbenaufnahmen

4.1.1.1. Aufnahmeprozess

Die terrestrischen Aufnahmen im Zugwald zeigten für den zweiten Durchgang eine bessere Qualität. Grund dafür ist einerseits die Verwendung eines Stativs, wodurch die Verschlusszeit verlängert werden konnte. Andererseits führte die Einstellung des Fokus auf ca. 6m dazu, dass die Details im Vordergrund schärfer abgebildet wurden. Gerade auf einer Fläche von 10mx10m ist es nicht nötig den Fokus auf unendlich einzustellen, um Schärfe im Hintergrund zu erreichen. Will man dagegen die Untersuchungsfläche vergrössern, wie zum Beispiel in der Arbeit von [Piermattei et al. \(2019\)](#) oder [Mokroš et al. \(2018\)](#), ist der Fokus auf unendlich einzustellen das passende Vorgehen, da sonst die Bäume in der Mitte der Untersuchungsfläche auf keinem Bild scharf abgebildet werden. In Zukunft muss daher der Fokus entsprechend der Grösse der Untersuchungsfläche angepasst werden.

Zusätzlich wurde im zweiten Durchgang die Distanz von 130cm zwischen Boden und Blattrand anders gemessen. Sie wurde nicht an einzelnen Bäumen ausgemessen, sondern anhand zweier Marker am Baum bestimmt. Die Marker in einer relativen Höhe von 130cm definieren den Schnitt zur automatisierten BHD-Messung. Die Identifizierung, wo der Boden beginnt und der Baumstamm aufhört, ist im steilen Gelände nicht immer eindeutig. Dies führte zu Ungenauigkeiten in der Markierung in Agisoft Metashape und somit zur fehlerhaften Genauigkeitsüberprüfung. Die gemachten Anpassungen mit den Distanzen zwischen zwei Markern ermöglichten eine genauere Identifizierung der Punkte und Distanzen. Teilweise wurden die Marker von Agisoft Metashape durch die Funktion *Detect Marker* automatisch erkannt. Zusätzlich wurde noch ein Zweime-

termassstab auf dem Boden ausgelegt, was auch in der xy-Achse eine Distanzmessung und daher eine Validierung der Genauigkeit in der Horizontalen ermöglicht.

4.1.1.2. Verarbeitung in Agisoft Metashape

Die Orientierung (“Alignment“) der Bilder in Agisoft Metashape hat nicht bei allen Untersuchungsflächen gleich gut funktioniert. Die Schwierigkeit liegt vor allem bei den als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen. Dies hängt damit zusammen, dass in den Abschnitten, wo hauptsächlich Verjüngung zu finden ist, die Orientierung der Bilder nicht akkurate Resultate liefert. Hier können zu wenig Verknüpfungspunkte bestimmt werden, respektive wurden Punkte fälschlicherweise als Verknüpfungspunkte identifiziert. Jedoch ist es denkbar, dass die Anzahl gemachter Aufnahmen einen entscheidenden Einfluss hat. Sind über 300 Aufnahmen für die entsprechende Untersuchungsfläche vorhanden, funktioniert das Alignment auch in den als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen, welche Verjüngung aufweisen. Diese Strategieanpassung während den Aufnahmen der einzelnen Untersuchungsgebiete hat sich bewährt. Somit ist der Abstand zwischen zwei Aufnahmen (20cm) aber weitaus tiefer als jener, welcher von [Piermattei et al. \(2019\)](#) angewendet wurde (100cm).

Nebst der Verjüngung spielt auch die Hangneigung eine entscheidende Rolle bei der Bildorientierung. Das wird am Beispiel des Untersuchungsgebiets Lücherwald deutlich. Hier funktionierte das Alignment für die Untersuchungsfläche *gut3*, während es für die Untersuchungsflächen *gut1* und *gut2* nicht funktionierte. Letztere beiden weisen eine höhere Neigung auf als erstere ([Tab. A.5](#)). Das bestätigt, dass steiles Gelände zusätzlich zu Schwierigkeiten in der Orientierung der Aufnahmen führen kann. Allerdings ist die Fotoanzahl von *gut1* und *gut2* im Vergleich zu *gut3* tiefer. Zudem funktionierte das Alignment im Teufiwald für alle drei als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen nicht. Diese weisen im Vergleich zu den als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen im Lücher- und Zugwald tiefere Hangneigungen auf ([Tab. A.4](#)), zusätzlich aber auch tiefere Aufnahmedichten ([Tab. 3.2](#)). Im Vergleich zu den von [Piermattei et al. \(2019\)](#) untersuchten Wälder weisen jedoch alle Untersuchungsflächen höhere Hangneigungen auf. Dies lässt vermuten, dass die Zahl der Aufnahmen in Gebirgswäldern mit Verjüngung und erhöhten Neigungen erhöht werden muss. Die bisher angewandten Fotoanzahl [\[28\]](#) sollten daher den Bedingungen vor Ort entsprechend angepasst werden.

Die Genauigkeiten in den aus terrestrischen Aufnahmen erstellten Punktwolken weisen eine grosse Variabilität auf ([Tab. A.22](#)). Eine genaue Baumposition ist jedoch nötig,

um dem jeweiligen Baum eine Höhe basierend auf RGB-UAV zuzuweisen. Eine höhere Genauigkeit kann über verschiedene Schritte erreicht werden:

- genauere Einzeichnung der Bodenkontrollpunkte (BKP) in Agisoft Metashape,
- BKP verwenden, welche genauer markiert werden können,
- BKP mit dem GNSS genauer einmessen.

Das Markieren der BKP in Agisoft Metashape ist für die Genauigkeit von zentraler Bedeutung. Jedoch ist es mit den hier verwendeten BKP nicht immer möglich, diese genau zu markieren. Grundsätzlich wäre die Verwendung von Planen, wie für die RGB-UAV-Aufnahmen verwendet wurden ([Abb. 2.7a](#)), vorstellbar. Allerdings sind diese flach auf dem Boden und je nach Aufnahmewinkel schwierig zu erkennen. Damit die BKP erkannt werden, sollten sie an gut ersichtlichen Stellen angebracht werden. Zusätzlich sollte die Krautschicht, welche die Sicht auf den BKP einschränken, entfernt werden.

Eine Möglichkeit wäre auch Bäume als BKP zu verwenden. Dabei könnte auf der Höhe des vermessenen Punktes ein Band um den Baum gezogen werden. Somit ist der Eckpunkt von allen Seiten erkennbar. Dafür muss der Baum aber an geeigneter Position stehen. Das Einmessen des Punktes mit dem GNSS kann aufgrund der Baumkrone, welche das Signal stört, eine weitere Schwierigkeit darstellen. Diese Störung verursacht im dichten Wald auch in den anderen BKP Ungenauigkeiten. Bei der Georeferenzierung der mit terrestrischen Aufnahmen erstellten Punktwolken zeigte sich, dass das GNSS nicht bei allen BKP akkurate Höhenwerte (z-Achse) eingemessen hatte. Die Fehler bei gewissen Einmessungen deuten darauf hin, dass die Genauigkeiten in den anderen BKP nicht jener entspricht, welche das GNSS angibt ([Tabellen A.1 - A.3](#)). Durch mehrfache Messungen kann dieses Problem gelöst werden.

4.1.1.3. Bestimmung der Baumposition und des Brusthöhendurchmessers

Die automatische Baumerkennung hat nicht funktioniert. Dies kann daran liegen, dass die verwendeten Tools hauptsächlich für LiDAR Daten entwickelt wurden. Dabei stellen lokale Maxima für UAV-LiDAR-Daten eine Baumspitze dar. Beim SfM aus terrestrischen Aufnahmen ist dies nicht der Fall. Hier muss die Baumerkennung über den Stammumfang erzielt werden. Dies erklärt jedoch nicht, warum die Verarbeitung über Dendrocloud, trotz Anpassungen der Softwareeinstellungen, nicht erfolgreich war. Die manuelle Baumerkennung in RStudio und LiDAR360 ermöglichte die Bestimmung der Baumposition und die Anzahl der Bäume. Die Bäume wurden hier nicht klar erkannt, da die Punktwolke trotz der Filterung zu viele Störungen ("noise") aufwies. Störungen sind

Punkte, welche fälschlicherweise generiert wurden. Diese liessen in den als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen die Bestimmung von einzelnen Bäumen nicht zu. Die in der Untersuchung von [Piermattei et al. \(2019\)](#) erarbeiteten und in dieser Arbeit angewendeten Filtereinstellungen wurden in flacheren Wäldern mit weniger Verjüngung erprobt. [Scher et al. \(2019\)](#) wendete strengere Filtereinstellungen an. So wurde der maximale Projektionsfehler auf 0.5 px gesetzt, während dieser in [Piermattei et al. \(2019\)](#) auf 1 px eingestellt wurde. Die Filterung der Verknüpfungspunkte und der verdichteten Punktwolke müssen für Gebirgswälder angepasst werden.

Die Bruthöhendurchmesser (BHD) - Bestimmung basierend auf der manuellen Baumauswahl führte zwar zu ungenaueren Resultaten als dies in anderen Arbeiten [[22](#), [23](#), [25](#), [27](#), [28](#)] der Fall war. Dies wurde jedoch erstmals in Gebirgswäldern durchgeführt. Diese stellen durch ihre Hangneigung und sehr unregelmässigen Topographien erschwerte Bedingungen dar, was zu einer geringeren Genauigkeit der per SfM bestimmten BHDs führt. In dieser Arbeit wurde mit Kreisformen gearbeitet. In der Arbeit von [Mikita et al. \(2016\)](#) stellte sich heraus, dass mit einem konvexen Hüllen-Algorithmus bessere Resultate erreicht werden können.

4.1.2. Normalfarbenaufnahmen mit der Drohne

4.1.2.1. Aufnahmeprozess

Damit in dichten Wäldern eine flächendeckende Orientierung der Drohnen (UAV)-basierten Normalfarbenaufnahmen (RGB) möglich ist, müssen verschiedene Aspekte beachtet werden:

- Sonnenlicht
- Windgeschwindigkeit
- Flughöhe
- Aufnahmedichte

Die Sonne kann hinderlich sein, in dem sie zu Blendenflecken in Bildern führt. Gerade im Wald ist das Sonnenlicht aber wichtig. Damit die Details der einzelnen Baumkronen in dichten Wäldern sichtbar sind, müssen gute Lichtverhältnisse herrschen. Gute Lichtverhältnisse heisst indes Sonnenschein, wobei die Sonne möglichst hoch am Himmel stehen sollte, sodass möglichst wenig Schattenwurf entsteht und kein Gegenlicht auf die Kamera trifft.

Wind führt zu Bewegungen in den Baumkronen. Dies verursacht, dass sich ein statisches Objekt, wie dies der Wald während der Aufnahme darstellt, in ein bewegendes Objekt verwandelt. Dies wiederum führt dazu, dass Verknüpfungspunkte nur ungenügend gefunden werden, respektive Baumkronen nicht exakt abgebildet werden. Daraus entsteht ein verschwommenes Orthophoto und Oberflächenmodell (DSM). Somit sollten UAV-Aufnahmen, egal ob von thermischer oder RGB-Art, bei möglichst wenig Wind gemacht werden

In Laubwäldern zeigte sich, dass die Flughöhe einen Einfluss auf das Resultat hat [94]. Hier wären Versuche in Nadelwäldern, was die meisten Gebrigswälder sind, aufschlussreich.

Für terrestrische Aufnahmen wird vorgeschlagen zuerst ein Bild der gesamten Untersuchungsfläche und zusätzlich mehrere Aufnahmen für die Detailabbildung zu machen [59]. Im Rahmen eines anderen Projektes konnten wir Aufnahmen auf verschiedenen Flughöhen in derselben Orientierung einfügen und miteinander anordnen. Man kann Aufnahmen der gesamten Fläche auf einer gewissen Höhe mit Aufnahmen der Problemfläche einer tieferen Flughöhe und einer grösseren Aufnahmedichte kombinieren. Dieses Vorgehen könnte in Problemzonen, wie beispielsweise dichte Wälder, zu akkurateren Resultaten führen.

4.1.2.2. Vegetationshöhenmodell

Die Unterschiede zwischen dem eigens generierten Vegetationshöhenmodell (VHM) und dem VHM nach Ginzler (2018) sind im Lücherwald bei den als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen höher als bei allen anderen. Diese Unterschiede sind die Folge von Eingriffen, welche zwischen der Aufnahme der Bilder für das schweizweite VHM und den UAV-Flügen, stattgefunden haben [56].

Zur Berechnung des VHM wurde das swissALTI3D (2m Auflösung) [52] verwendet. Da die Topographie im Wald aber kleinflächig stark variabel ist, führt dies zu Ungenauigkeiten. Damit ein akkurateres VHM berechnet werden kann, sollte ein digitales Höhenmodell (DEM), welches auf UAV, bzw. terrestrischen Aufnahmen basiert [95], verwendet werden (12cm Auflösung). Dies erhöht die Auflösung des DEM beträchtlich. Es zeigt sich jedoch, dass gerade in dichten Wäldern die Generierung eines DEM basierend auf UAV-Flügen sehr komplex sein kann [96].

4.1.3. Bestandescode

Der Bestandescode, welcher zur Charakterisierung der Untersuchungsflächen genutzt wurde, ist ein in Forstthesen übliches und einfach anwendbares Hilfsmittel. Zur Beurteilung der Hangstabilität im Sinne des sogenannten 3-Stufen-Filters [5] ist es zusammen mit bodenmechanischen und topographischen Aspekten ein notwendiger jedoch nicht hinreichender Bestandteil [10]. Für den Zusammenhang zwischen Waldstruktur, Wasserhaushalt und Hangstabilität erwies sich der Bestandescode als adäquates Werkzeug, um die Untersuchungsflächen detaillierter als nur bezüglich *gut* und *schlecht* strukturiert zu unterscheiden.

4.1.3.1. Schichtung

Was die Schichtung betrifft, wurde sowohl durch die Beurteilung im Feld als auch mit Hilfe der einzelnen terrestrisch aufgenommenen Fotos die gleiche Klassifizierung erlangt. Die Fotos vermitteln ein realitätsnahes Abbild der Verhältnisse, welche bei der Feldansprache vorgefunden wurden. Somit ist eine Beurteilung der Schichtung durch SfM möglich. Diese ist aber weder automatisiert noch objektiv. Li et al. (2020) führte die Bestimmung der Ober- und Unterschicht anhand von RGB-UAV-Aufnahmen durch. Sie entwickelten dafür eine Methode, in welcher zwischen Unterschicht und Waldboden unterschieden werden konnte.

4.1.3.2. Entwicklungsstufe

Die Beurteilung der Entwicklungsstufe der drei als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen im Untersuchungsgebiet Zugwald unterscheidet sich bezüglich Bestimmung durch Feldaufnahmen und SfM in zwei der drei Untersuchungsflächen. In den Untersuchungsflächen *schlecht1* und *schlecht3* ergibt sich durch SfM eine höhere Entwicklungsstufe. Diese Fehleinschätzung folgt aus der Tatsache, dass den durch SfM bestimmten Bäumen ein zu hoher BHD zugewiesen wurde. Zusätzlich wurden vermehrt jene Bäume mit einem grösseren BHD erkannt. Diejenige mit kleineren BHD und somit zu einer tieferen Entwicklungsstufe gehörend, konnten per SfM nicht erfasst werden. In der Arbeit von Larrinaga et al. (2019) wurden die Summen der BHD über UAV-Aufnahmen und darauf basierten Indizes berechnet, was eine grossflächige und schnelle Bestimmung der BHD ermöglicht. Iizuka et al. (2018) verwendete einen Ansatz, in welchem der BHD über die Kronenbreite berechnet wurde. Dieser Ansatz wurde in der Arbeit von Iizuka et al. (2018) gewählt, da die Beziehung zwischen BHD und Baumhöhe

schwach ist. Diese Beziehungen sind aber artenabhängig [100] und müssen daher für Gebirgswälder überprüft werden.

4.1.3.3. Kronendeckungsgrad

Unterschiede von im Feld zu per SfM bestimmten Kronendeckungsgrad (DG) sind generell im Teufiwald und in den als *gut* eingestuften Untersuchungsflächen zu finden. Auffällig ist die Unterschätzung des UAV-basierten DG in den Untersuchungsflächen *schlecht1* und *schlecht2* im Teufiwald. Dies liegt vor allem daran, dass die Baumhöhen im Vergleich zu den anderen als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen eher gering sind. Da der Median für beide Untersuchungsflächen unter 20m ist, wird ein grosser Teil der Vegetation nicht zum DG gezählt. Gleiches gilt für die Untersuchungsfläche *schlecht2* im Lücherwald. Hier sollte für zukünftige Anwendungen das verwendete Kriterium angepasst werden, um den tatsächlichen DG zu bestimmen. Gleichzeitig wird aufgezeigt, dass einheitliche Kriterien für an sich gleich strukturierte Bestände nicht einfach zu definieren sind. So können zwei Bestände als *schlecht* strukturiert eingestuft werden, aber trotzdem unterschiedliche Baumhöhen vorweisen.

Die abweichenden DG in den als *gut* eingestuften Untersuchungsflächen werden in den UAV-basierten Bestimmung unterschätzt, mit Ausnahme der Untersuchungsfläche *gut1* im Untersuchungsgebiet Zugwald. Diese starken Abweichungen sind einerseits auf eine Überschätzung im Feld zurückzuführen. Andererseits führt die teilweise Unterschätzung der Vegetationshöhen durch das VHM, aufgrund der ungenügenden Auflösung des DEM sowie der Ungenauigkeit des DSM, dazu, dass junge Bäume nicht als solche erkannt werden, beziehungsweise kleiner als 40cm eingestuft werden. Das DEM kann durch UAV-Aufnahmen erstellt werden und erreicht dadurch eine höhere Auflösung (Kap. 4.1.2.2), während das DSM über einen optimierten Aufnahmeprozess verbessert werden kann (Kap. 4.1.2.1).

Der DG wird im Feld über die prozentuale Fläche, welche durch die Baumkronen bedeckt sind, bestimmt. Die Bestimmung des DG über SfM wurde über den Anteil der Fläche mit einer bestimmten Höhe erreicht. Die Baumkronen erstrecken sich über unterschiedliche Breiten und Höhen, was dazu führt, dass die Äste auf Nadeln auf 10m Höhe immer noch zur gleichen Baumkrone gehören und somit auch zur Beurteilung des DG hinzugezählt werden muss. Hierfür müssen aber die Einzelbäume und deren Baumkronen identifiziert werden. Dies wurde in dieser Arbeit nicht gemacht. Das angewendete Vorgehen war zur schnellen, aber nicht hoch akkuraten Bestimmung des DG verwendbar. Vor allem in den strukturierten Beständen mit viel Verjüngung müssen die

Resultate mit Vorsicht betrachtet werden. Damit die DG besser bestimmt werden können, kann das Verfahren von [Li et al. \(2020\)](#) zur Bestimmung von Unter- und Oberschicht verwendet werden. Daraus wird der prozentuale Anteil der einzelnen Schichten an der ganzen Fläche bestimmt, was dem DG entspricht.

4.2. Evapotranspiration

Thermische Aufnahmen ermöglichen es die zentrale Frage, ob ein besser strukturierter Wald zu mehr ET führt, nur ungenügend zu beantworten. Hierfür muss der Versuchsaufbau geändert werden. Temperaturstürze und Verhaltensweisen der Temperatur je nach Struktur und Tageszeit sind zwar beobachtbar, können jedoch nicht eindeutig der Waldstruktur zugeschrieben werden. So können Tendenzen, welche in dieser Arbeit beobachtet wurden, aufgrund der unterschiedlichen Untersuchungsgebiete entstanden sein. Damit eine klare Beziehung von Waldstruktur - Temperatur - Evapotranspiration (ET) bestimmt werden kann, müssen Aufnahmen im gleichen Untersuchungsgebiet sowie im Tagesverlauf mehrmals (mind. drei Mal) gemacht werden. Zudem müssen die Aufnahmen am Boden und die Aufnahmen aus der Luft (UAV) möglichst zeitnah erfolgen.

Damit nebst einem Tagesverlauf auch der saisonale Verlauf aufgenommen werden kann, müssen solche Messungen über das Jahr verteilt mehrfach durchgeführt werden. Dabei wären Aufnahmen zu gleichen Tageszeiten, aber zu verschiedenen Jahreszeiten sehr interessant. Dies wurde in der Arbeit von [Svensson et al. \(2008\)](#) gemacht. Allerdings wurde dabei ein Wald in Schweden auf rund 350 m ü. M. untersucht, Untersuchungen in Gebirgswäldern sind nicht bekannt. Diese saisonale Varianz ist zusätzlich interessant für die Schutzwaldpflege. Hierfür wären aber Untersuchungen vor und vor allem nach einem Starkniederschlag sehr interessant. Das entscheidende für den Schutzwald vor flachgründigen Rutschungen ist der Bodenwasserhaushalt während und nach Starkniederschlägen, da durch diese solche Rutschungen ausgelöst werden [\[2\]](#).

Als Alternative zur terrestrischen Thermalfotografie wären fest installierte Sensoren möglich. Nebst der Bodenoberflächentemperatur sollten diese auch die Lufttemperatur und -feuchtigkeit auf 2m Höhe messen. Somit müssten nur noch Aufnahmen mit der Thermal-UAV gemacht werden. Die restlichen Parameter würden durch die Messstation zeitnah gemessen. Dies führt zwar zu einer Optimierung des Aufnahmeprozesses, benötigt jedoch eine grosse Anzahl an Messstationen, pro Untersuchungsfläche eine, und verursacht dadurch höhere Investitionskosten.

Die in dieser Arbeit beobachtete Tagesverläufe müssen also mit Vorsicht betrachtet werden. Diese werden von der Einstrahlung und der damit verursachten Erwärmung über den Tag verursacht. Wie diese wirklich aussehen, respektive wie gross zum Beispiel der Unterschied zwischen morgens und abends tatsächlich ist, hängt auch von lokalen Bedingungen ab. Die Talausrichtung spielt ebenso für den Wind wie auch die Anzahl Sonnenstunden eine wichtige Rolle, was wiederum die Temperatur beeinflusst [102]. Auch die Bodenbeschaffenheiten haben einen starken Einfluss auf die Temperaturen [103].

4.2.1. Thermalaufnahmen

4.2.1.1. Terrestrische Thermalfotografie

In dieser Arbeit konnte der Mehrwert der terrestrischen Thermalaufnahmen für das ET-Modell, hochaufgelöste Bodenoberflächentemperatur-Messungen, noch nicht ausgeschöpft werden. Dies liegt vor allem daran, dass eine Georeferenzierung der Aufnahmen nicht möglich war, weshalb die Bodenoberflächentemperatur als Median pro Quadrant berechnet werden musste. Ist eine Bestandescharakterisierung basierend auf terrestrischen RGB-Aufnahmen möglich, erlaubt dies auch eine Georeferenzierung der einzelnen Bäume, was wiederum die Georeferenzierung der terrestrischen Thermalaufnahmen ermöglicht. Somit kann die Auflösung des ET-Modell von 5m auf 0.15m erhöht werden.

Hoffmann et al. (2016) berechneten die Bodentemperatur basierend auf Modellvorstellungen. Sofern die berechneten Bodentemperaturen nach den Modellvorstellungen von Norman et al. (1995) und die tatsächlich gemessenen Bodentemperaturen mit Hilfe einer Thermalkamera am Boden ähnliche Werte ergeben, können die berechneten Temperaturwerte die terrestrische Thermalaufnahmen ersetzen. Dies wäre für eine grossflächige Aufnahme sehr hilfreich und würde eine Zeiteinsparung im Aufnahmeprozess ermöglichen.

4.2.1.2. Drohnenbasierte Thermalfotografie

Thermalaufnahmen mit der Drohne (UAV) waren nicht für alle Untersuchungsflächen möglich. Die Flugpläne waren aufgrund von fehlender Batteriekapazität relativ knapp bemessen. Dadurch mussten die BKP an ungünstigen Stellen gelegt werden, was dazu führte, dass die BKP nur auf vereinzelt Bildern oder generell nicht gefunden wurden. Damit eine hohe Genauigkeit des thermischen Orthomosaik erreicht werden kann, müs-

sen jedoch die BKP auf möglichst vielen Bildern markiert werden können (Kap. 2.3.1.2). Im Zugwald war das nicht der Fall, weshalb nur eine tiefe XY-Genauigkeit erreicht wurde (Tab. A.22). Erhöht man die Auflösung des ET-Modell (Kap. 4.2.1.1), muss die Genauigkeit des thermischen Orthomosaiks erhöht werden, wodurch die Position der Messung der Bodenoberflächen- und der Kronentemperatur besser übereinstimmen.

Die Berechnung eines thermischen Orthomosaiks war im Teufi- und Lücherwald nur teilweise möglich. Für die Untersuchungsfläche *gut1* im Teufiwald konnten zu wenig BKP erkannt und markiert werden, was dazu führte, dass die Punktwolke nicht georeferenziert werden konnte. In der Untersuchungsfläche *gut1* im Lücherwald lag das Problem darin, dass der Flugplan zu knapp berechnet wurde, wodurch zu wenige Aufnahmen gemacht wurden, um ein abdeckendes Orthomosaik zu erstellen.

4.2.1.3. Temperaturverläufe

Die gemessene Lufttemperatur (LT) auf 2m und die Bodenoberflächentemperatur (BOT) verhalten sich beinahe identisch. Die Zunahme der beiden Temperaturen vom Lücherwald zum Zugwald kann mit dem Tagesverlauf erklärt werden. Die Zunahme vom Zugwald zum Teufiwald, welche in den als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen zu beobachten ist, lässt darauf schliessen, dass die Temperaturerhöhung im dichten Bestand langsamer verläuft. Dieser Unterschied ist durch die UAV gemessene Oberflächentemperatur (OT) nicht zu sehen. Hier findet ein ganztägiger Temperaturanstieg statt, wobei die OT in den als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen in der Tendenz höher ist. Diese Differenz, welche im Verlauf des Tages zunimmt, könnte durch die Sonneneinstrahlung verursacht worden sein. Während in den als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen ein Grossteil des Kronendachs durch die Sonne erwärmt wird, wird die Verjüngung, welche einen grossen Anteil der Fläche der als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen einnimmt, durch die grösseren Bäume beschattet und darum weniger erwärmt.

In dieser Arbeit konnten die Ergebnisse von [Ehbrecht et al. \(2019\)](#) bestätigt werden. Die Streuung der LT in den als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen, welche tendenziell einen höheren DG aufweisen, ist kleiner als in den als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen mit tieferem DG.

4.2.2. Resultate

Tagesverläufe von latenten (LE) und sensiblen Wärmeflüssen (H) wurden schon in verschiedensten Arbeiten untersucht. [Sarrat et al. \(2009\)](#), [Norman et al. \(2000\)](#) und [Gatzsche et al. \(2018\)](#) verglichen die gemessenen mit simulierten Werten. In diesen Studien wurden die Messungen im späten Frühling[104], respektive im Sommer [105] durchgeführt. Dabei waren Tagesverläufe gut erkennbar, mit Maxima zur Mittagszeit. In dieser Arbeit konnten diese Verläufe nicht beobachtet werden. Dies liegt am späten Aufnahmezeitpunkt, Herbst. Im Verlauf des Jahres geht die ET-Rate stark zurück [106]. [Svensson et al. \(2008\)](#) zeigt diesen Rückgang sehr gut auf. Inwiefern ein typischer Tagesverlauf im Sommer in den Gebirgswäldern beobachtet werden kann, muss durch Messungen in der entsprechenden Jahreszeit untersucht werden.

Die gemessenen Temperaturen im Boden lagen in den meisten Fällen tiefer als die zugehörigen der Luft und somit ist der Wärmefluss (H) negativ. Diese Tatsache deutet darauf hin, dass die Ergebnisse der Summen der Wärmeflüsse die effektiven Verhältnisse vor Ort gut wiedergeben [107]. Die tieferen Mediane im Teufiwald zeigen die Abkühlung des Oberbodens auf [107]. Der höhere Median in den als *schlecht* strukturiert eingestuft Untersuchungsflächen ist ein Indiz dafür, dass diese weniger schnell abkühlen. Dies ist zwar in den Temperaturwerten ersichtlich, könnte jedoch auch teilweise an der Messreihenfolge liegen. So wurden im Teufiwald zuerst zwei als *schlecht* und danach zwei als *gut* strukturiert eingestufte Untersuchungsfläche aufgenommen und als letztes wieder eine als *schlecht* strukturiert eingestufte Untersuchungsfläche.

Die Summe der LE ist unter anderem von der Sonneneinstrahlung abhängig und dem damit verbundenen Energieinput ([Anhang C](#)). Die Standorte Lücherwald und Zugwald zeigen ähnliche Strahlungswerte, was die ähnlichen LE erklärt. Die Strahlungswerte im Teufiwald sind deutlich kleiner und lagen teilweise sogar bei Null. Die Nullwerte weisen darauf hin, dass die Sonne unterging, bevor die Messungen gemacht wurden, was tieferen Werte des LE im Teufiwald erklärt.

Die beobachteten Bodenwärmeflüsse (G) entsprechen dem Tagesverlauf, welcher von [Liebethal et al. \(2007\)](#) beobachtet wurde. Während die Werte um den Mittag, in dieser Arbeit die Untersuchungsgebiete Lücher- und Zugwald, das Maximum erreichen, sinken sie im Nachmittag, Teufiwald, wieder ab.

Es wurde in dieser Arbeit nicht überprüft, ob und inwiefern genauere Merkmale des Bestandes, wie zum Beispiel der Deckungsgrad, die Wärmeflüsse beeinflusst, was mit Hilfe des Bestandescodes möglich gewesen wäre. Eine Unterscheidung fand nur zwi-

schen den als *gut* strukturiert und *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen statt. Eine differenzierte Klassifizierung sowie adäquate statistische Analysen könnten genauere und fundierter gestützte Aussagen und Folgerungen ermöglichen.

Zu beachten ist, dass die Messungen über den ganzen Tag an verschiedenen Standorten zu Einflüssen auf die ET führen kann. Diese stehen nicht im Zusammenhang mit den Eigenschaften, welche durch den Bestandscode abgebildet werden und führen zu falschen Resultaten und Schlüssen. Die vorliegenden Ergebnisse deuten jedoch darauf hin, dass der Kronendeckungsgrad sowie Unterschiede in der Baumhöhenverteilung einen Einfluss auf die Temperatur haben [44]. Die Berücksichtigung der basalen Grundfläche, welche im Forst ein gebräuchliches Merkmal zur Charakterisierung der Waldstruktur ist, könnte zusätzlich zum besseren Verständnis für deren Einfluss auf die ET und dem entsprechenden Prozessverständnis beitragen.

4.2.3. Annahmen

Das Verhältnis zwischen Baumhöhe und Kronendurchmesser wurde in dieser Arbeit als konstant angenommen. Der Wert basiert dabei auf den Annahmen von [Guzinski et al. \(2014\)](#). Dieser Wert spiegelt das Verhältnis aber je nach Gebiet nur ungenügend wieder. Damit dieser Wert den lokalen Gegebenheiten entspricht, könnten in einem nächsten Schritt die Kronendurchmesser und Baumhöhen basierend auf UAV-Aufnahmen evaluiert werden ([95], [19]).

Die verwendete Nadelgrösse, Inputvariable des ET-Modells, wurde ebenfalls als konstant angenommen und vor Ort nicht überprüft [108]. Die dadurch in Kauf genommenen Verfälschungen sind aber gering, da es sich bei allen Untersuchungsgebieten um fichten-dominierte Bestände handelt. Die Untersuchungsfläche *gut1* im Zugwald bildet hier die Ausnahme. Jedoch konnte von diesem Standort aufgrund fehlender UAV-Thermaldaten keine ET berechnet werden.

Der Blattflächenindex (LAI) wurde basierend auf dem berechneten normalisierten differenzierten Vegetationsindex (NDVI) ermittelt [83]. Die erhaltenen Werte entsprechen der zu Grunde liegenden Modellvorstellung sehr gut. Der LAI kann auch mit Hilfe von anderen Bändern, welche Satelliten aufnehmen, berechnet werden [109]. Mittlerweile gibt es jedoch Ansätze, welche den LAI basierend auf der Baumhöhe [110] oder anderen Vegetationsindizes [111] berechnen, wodurch eine bessere Auflösung erreicht werden kann.

Die Albedo wurde als konstanter Wert betrachtet [112, 113]. Sie kann allerdings auch mit Hilfe von Satellitenbildern berechnet werden [114]. Dafür werden jedoch Bänder verwendet, welche nur in einer Auflösung von 30 Meter aufgenommen werden können[115]. Die Verwendung solcher Daten würde für kleinflächige Standorte mit grösseren Lücken, wie es im vorliegenden Projekt der Fall war, die tatsächlichen Werte verfälscht wiedergeben. Deshalb wurden Werte verwendet, welche über grössere Flächen berechnet wurden. Diese bilden einen immergrünen Nadelwald besser ab als gemessene Werte mit einer Auflösung von 30 Meter. Allerdings ist die Annahme, dass jede Untersuchungsfläche die gleiche Albedo aufweist, auch nicht sehr akkurat. So zeigte sich in den Untersuchungen von [Hovi et al. \(2019\)](#), dass die Albedo mit der Baumhöhe und dem Kronendeckungsgrad negativ korreliert. Zudem korreliert die Albedo positiv mit dem Anteil an Verjüngung und dem Anteil älteren Laubbäumen. Damit grossflächig eine höher aufgelöste und damit akkuratere Albedo-Bestimmung möglich wäre, müsste diese über UAV-Aufnahmen bestimmbar sein. Dafür müsste die UAV über einen Nahinfrarot-Sensor verfügen [117]. Solche Untersuchungen wurden in der Arbeit von [Levy et al. \(2018\)](#) mit einem Pyranometer, welcher die kurzwellige, vom Boden reflektierte Strahlung misst, durchgeführt.

Der Wind ist, nach der Temperatur, die insbesondere im Gebirge einen grösseren Einfluss hat [119], ein wichtiger Faktor bei der Evaporation [120] und Transpiration [121]. Es zeigte sich, dass sich der Wind nicht nur positiv auf die Transpirationsrate auswirkt, sondern auch einen abkühlenden Einfluss auf die Nadeln oder Blätter haben kann[119]. Für das ET-Modell wurden in dieser Arbeit Winddaten von Davos verwendet und somit angenommen, dass die Windgeschwindigkeiten für alle Untersuchungsgebiete in etwa gleich sind. Diese entsprechen somit nicht den exakten Werten für die einzelne Untersuchungsfläche, sondern stellen eine grobe Annahme dar. Die Windgeschwindigkeiten sind hoch aufgelöst, doch befinden sich gerade die Untersuchungsgebiete Lücherwald und Zugwald über 11km entfernt von der Messstation. Zudem ist die Talrichtung im Teufiwald (Südost zu Nordwest) anders, als jene für Davos und den Lücher- und Zugwald (Nordost zu Südwest).

5. Schlussfolgerung und Ausblick

Die Bestandescharakterisierung durch terrestrische und Drohnen- (UAV) Aufnahmen ist ein aktuelles Thema in der Wissenschaft und auch in der angewandten Forstwirtschaft. Schon einfache Bilder aus der Vogelperspektive können Informationen liefern, welche sonst nicht zur Verfügung stehen. Ansätze und Methoden, welche in bisherigen Studien insbesondere in Tiefland-Wäldern angewendet wurden, bedürfen für die detaillierte Beurteilung von Gebirgswäldern spezifischere Anpassungen. Sowohl die Baumdichte als auch das steile Gelände verursachen Schwierigkeiten und wurden in bisherigen Studien nicht oder kaum berücksichtigt. Ein verbesserter Aufnahmeprozess kann dazu beitragen Bestände effizienter und objektiver zu charakterisieren. Methoden der Fernerkundung sowie Structure from Motion (SfM) bergen beträchtliches Potential, um die zeitlich und finanziell oft aufwändigen traditionellen Vorgehensweisen teilweise oder gänzlich abzulösen, respektive in gewissen Bereichen zu ergänzen. Damit Bestandescharakterisierung durch terrestrische und UAV- Aufnahmen jedoch in der Praxis vermehrt angewendet werden können, sind weitere Untersuchungen und Abklärungen in Gebirgswäldern zu Themen wie Flughöhen, Anzahl Bilder und Fokuseinstellungen notwendig.

Die automatisierte Baumposition- und Bruthöhendurchmesser-Bestimmung hat in der vorliegenden Arbeit nur teilweise funktioniert. Das Anwenden der neuen Technik führte zu Schwierigkeiten, welche im Rahmen zukünftiger Arbeiten analysiert werden sollen, um Lösungsvorschläge zu erarbeiten. Der terrestrische Aufnahmeprozess hat sich im Verlauf dieser Arbeit stetig verbessert. Die Lösung für die Probleme bei den als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen liegt noch nicht eindeutig vor. Jedoch könnte eine grössere Überlappung der Aufnahmen ein möglicher Ansatz sein. Die Resultate im Zugwald bestätigen diese These. Auch scheint die Änderung der Fokuseinstellung, wie sie im zweiten Durchgang im Zugwald zur Anwendung kam, zu besseren Resultaten zu führen. Zusätzlich verbessert das Verwenden eines Tripod und der damit ermöglichten Verlängerung der Aufnahmezeit die Qualität der Aufnahmen.

Sowohl das Oberflächenmodell (DSM), als auch das Vegetationshöhenmodell (VHM) konnten basierend auf den UAV-Aufnahmen erstellt und berechnet werden. Die Berech-

nung des VHM beruht auf dem berechneten DSM und dem schweizweiten digitalen Oberflächenmodell (DEM). Da dieses mit einer Auflösung von 2m die sehr heterogenen Topographien des Waldbodens nur ungenügend widerspiegelt, muss zur Verbesserung des VHM hier angesetzt werden. Ansätze, mit welchen aus den UAV-Aufnahmen DEM generiert werden können, sind in verschiedenen Formen bereits vorhanden und müssen nun auf Gebirgswälder angewendet werden. Zusätzlich muss der Aufnahme- und Verarbeitungsprozess für die dichten Bestände überarbeitet werden, damit auch für diese Flächen akkurate DSM und VHM erstellt werden können.

Der Bestandescode wird in der Praxis auf (Feld-) Begehungen vielfach angewendet. Hier liegt die Problematik in der individuell unterschiedlichen Beurteilung. Anhand von SfM kann hier eine einheitliche Beurteilung erreicht werden. Damit dies möglich ist, müssen zum einen alle Variablen (Brusthöhendurchmesser (BHD), Mischung, Kronendeckungsgrad (DG), Schichtung) mit UAV oder terrestrischen Aufnahmen bestimmt werden. Zum anderen müssen Kriterien erarbeitet werden, welche spezifisch auf die Gebirgswälder angewendet werden können. In der vorliegenden Arbeit konnte der BHD und der DG objektiv bestimmt werden. Die Beurteilung der Schichtung von Auge basierend auf terrestrischen Aufnahmen ist weiterhin durch die individuelle Wahrnehmung geprägt. In Zukunft gilt es die Methoden weiter zu verbessern und spezifisch auf Gebirgswälder anzuwenden. Die neu vorhandenen Technologien werden durch eine saubere Aufnahme und akkurate Prozessierung der terrestrischen und UAV-Aufnahmen eine objektivere Beurteilung ermöglichen.

Die Forschung zur Bestandescharakterisierung mit UAV und terrestrischen Aufnahmen ist relativ neu und noch nicht ausreichend erprobt. Auch dank stetiger Verbesserung der Verarbeitungssoftware oder der UAV können in Zukunft noch präzisere Resultate erwartet werden. Waldbestände, respektive spezifische Standorte wie beispielsweise (Verjüngungs-) Schläge oder Marteloskope, könnten damit einfach ausgemessen und eingerichtet werden. So können zum Beispiel Waldwachstumsparameter und Walddynamiken noch detaillierter untersucht werden. Auch wird der Prozess zu guten Resultaten effizienter und kostengünstiger werden.

Sowohl die Oberflächentemperatur des Kronendachs durch thermische UAV-Aufnahmen als auch des Waldboden durch terrestrische Thermalaufnahmen wurden in dieser Arbeit flächig aufgenommen. Die Temperaturentnahmen durch die UAV zeigt klar die Tendenz, dass in den als *gut* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen tiefere Werte zu beobachten sind als in den als *schlecht* strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen. Diese Tendenz ist für die Bodenoberflächentemperatur zwar auch erkennbar, allerdings nur für zwei der drei Untersuchungsgebiete. Temperaturunterschiede sind in

den verschieden strukturiert eingestuften Untersuchungsflächen zu erkennen. In anderen Arbeiten konnte bereits evaluiert werden, dass unterschiedliche Strukturparameter wie Stammvolumen, DG oder Grundfläche die Temperaturen unterschiedlich prägen. Der Einfluss dieser Variablen auf die Temperaturen im Gebirgswald müssen überprüft werden.

In dieser Arbeit wurden die Berechnungen mit robusten Lageparametern (Median) durchgeführt. Diese wurden mit einer Auflösung von 5m bestimmt, obwohl für die thermischen und RGB UAV-Aufnahmen sowie für die thermischen Aufnahmen vom Boden eine höhere Auflösung erzielt werden kann. Das Problem lag an den terrestrischen Thermalaufnahmen, welche nicht georeferenziert werden konnten. Ist die Georeferenzierung erfolgreich, kann die Auflösung auf jene der thermischen UAV-Aufnahmen (0.15m) erhöht werden. Funktioniert dies nicht, gibt es die Möglichkeit die Bodentemperaturen aus den UAV-Aufnahmen zu berechnen. Ob diese Berechnungen akkurate Resultate liefern, müsste man mit den terrestrischen Aufnahmen überprüfen. Ist dies der Fall, kann man auf die terrestrischen Thermalaufnahmen verzichten, was zu einer weiteren Optimierung des Aufnahmeprozesses führt.

Thermische Aufnahmen, wie sie in dieser Arbeit gemacht wurden, beantworten die zentrale Frage, ob ein besser strukturierter Wald zu mehr Evapotranspiration (ET) führt, nur ungenügend. Damit diese Frage fundiert beantwortet werden kann, müssen die Versuchsflächen über einen ganzen Tag mehrfach fotografiert werden. Zudem sollten verschiedene Wettersituationen überprüft werden. Vor allem nach andauernden Niederschlägen wird dies die notwendigen Einblicke geben, um die Schutzleistung der Wälder vor flachgründigen Rutschungen insbesondere im Zusammenhang mit dem (Boden-)Wasserhaushalt besser zu verstehen.

Aussagen darüber, wie akkurat das ET-Modell in Gebirgswäldern ist, können nicht abschliessend gemacht werden. Hierfür fehlen tatsächlich gemessene Wärmeflussdaten, was nicht Bestandteil dieser Arbeit war. Grundsätzlich sollte untersucht werden, ob Unterschiede zwischen *gut* und *schlecht* strukturiert eingestuften Beständen bestehen. Dabei spielt es weniger eine Rolle, ob die modellierten Werte exakt den tatsächlichen Werten entsprechen, sondern viel mehr inwiefern sich die Werte zwischen den verschiedenen Untersuchungsflächen unterscheiden. Damit eine nachhaltige und optimale Schutzwaldpflege möglich ist, muss der Einfluss der verschiedenen Bestandesparameter auf die ET noch genauer analysiert werden. Die Techniken und das Wissen dafür wurden in dieser Arbeit getestet und erarbeitet. Mit den genannten Anpassungen im Aufnahmeprozess sowie in der Prozessierung der Aufnahmen kann einerseits der Link zwischen Wasserhaushalt und Bestandescharakterisierung vollzogen werden und

andererseits können wichtige Erkenntnisse für die Pflege von Schutzwäldern vor flachgründigen Rutschungen gewonnen werden.

6. Danksagung

Bedanken möchte ich mich bei Herbert Schnyder, Kevin Simmler und Julian Bleiker für ihre tatkräftige Unterstützung im Feld. Mein Dank geht auch an Till Joachim Groh für die RGB-Drohnenaufnahmen, derer Verarbeitung, sowie die Unterstützung bei programmiertechnischen Problemen. Bei Ruedi Bösch möchte ich mich für die Befliegung der Versuchsflächen mit der Thermaldrohne bedanken. Michael Lehning danke ich für die Hilfestellung bei der Problematik "Wind". Bei Livia Piermattei möchte ich für den zur Verfügung gestellten Workflow bedanken. Frank Graf und Alexander Bast möchte ich für die gute Betreuung und die detaillierten und hilfreichen Rückmeldungen danken. Mein Dank geht auch an Peter Bebi, dass ich für rund 7 Monate ein Teil seiner Gruppe sein durfte. Bedanken möchte ich mich zudem bei Meret und Senta Keller sowie Viviane Furrer für das fleissige Korrekturlesen dieser doch sehr umfangreichen Arbeit.

6.1. Zusammenarbeit

Diese Masterarbeit ist im WHFF-Projekt «Schützen gut strukturierte und gepflegte Wälder besser?» integriert. Dieses Projekt ist eine Zusammenarbeit der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, des WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, des Kantons Graubünden, Nid- und Obwalden sowie des Appenzell Ausserrhoden. Zusätzlich arbeiteten das Bundesamt für Umwelt BAFU sowie die Ingenieurbüros belop GmbH und oeko-b AG mit. Das Projekt startete 2018 und wird noch bis Mitte 2020 dauern. Nachfolgeprojekte werden die Erkenntnisse aus dem WHFF-Projekt weiter vertiefen.

Literatur

- [1] CH2018 Project Team. *CH2018 - Climate Scenarios for Switzerland*. 2018.
- [2] M. Beniston, M. Stoffel und M. Hill. *Impacts of climatic change on water and natural hazards in the Alps: Can current water governance cope with future challenges? Examples from the European "ACQWA" project*. In: *Environmental Science Policy* 14.7 (2011). Adapting to Climate Change: Reducing Water-related Risks in Europe, S. 734 –743.
- [3] R. A. Marston, W. D. Butler und N. L. Patch. „Geomorphic Hazards“. In: *International Encyclopedia of Geography*. American Cancer Society, 2017, S. 1–8.
- [4] Andreas Rigling und Hans Peter Schaffer. *Waldbericht 2015: Zustand und Nutzung des Schweizer Waldes*. BAFU, 2015.
- [5] F. Graf, P. Bebi, U. Braschler, G. De Cesare, M. Frei, P. Greminger, K. Grandier, N. Hählen, C. Rickli, A. Sandri, S. M. Springman, J. Thormann, N. von Albertini und A. Yildiz. *Pflanzenwirkungen zum Schutz vor flachgründigen Rutschungen*. Birmensdorf: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, 2017, S. 42.
- [6] M. Frehner, B. Wasser und R. Schwitter. *Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion, Vollzug Umwelt*. Birmensdorf: Bundesamtes für Umwelt BAFU, 2005, S. 564.
- [7] Bundesamt für Umwelt BAFU. *Rutschungen - Faktenblätter Gefahrenprozesse*. Abteilung Gefahrenprävention. Bern, Schweiz, Mai 2015.
- [8] M. Bründl. *Risikokonzept für Naturgefahren - Leitfaden*. Bern: Nationale Plattform für Naturgefahren PLANAT, 2009, S. 420.
- [9] M. Schwarz, D. Cohen und K. Louis. *Beurteilung der Wirkung biologischer Objektschutzmassnahmen: Anwendungsbeispiel des Modells SOSlope*. In: *FAN Agenda* 2 (2017), S. 9–12.
- [10] C. Rickli, F. Graf, P. Bebi, A. Bast und B. Loupt B.and McArdeall. *Schützt der Wald vor Rutschungen? Hinweise aus der WSL-Rutschungsdatenbank*. In: *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 170.6 (2019), S. 310–317.

- [11] G. Hörmann, A. Branding, T. Clemen, M. Herbst, A. Hinrichs und F. Thamm. *Calculation and simulation of wind controlled canopy interception of a beech forest in Northern Germany*. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 79.3 (1996), S. 131–148.
- [12] Landforstinventar. *LFI - Wörterbuch/Glossar*. https://www.lfi.ch/glossar/glossar.php?frmWordList=395_Gloss. Aufgerufen: 09.03.2020.
- [13] C. Moos, P. Bebi, F. Graf, J. Mattli, C. Rickli und M. Schwarz. *How does forest structure affect root reinforcement and susceptibility to shallow landslides?* In: *Earth Surface Processes and Landforms* 41.7 (2016), S. 951–960.
- [14] C. Rickli, S. Kamm und H. Bucher. *Ereignisanalyse Hochwasser 2005 - Teilprojekt Flachgründige Rutschungen*. Birmensdorf: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), 2005, S. 114.
- [15] J. Lisein, M. Pierrot-Deseilligny, S. Bonnet und P. Lejeune. *A Photogrammetric Workflow for the Creation of a Forest Canopy Height Model from Small Unmanned Aerial System Imagery*. In: *Forests* 4.4 (2013), S. 922–944.
- [16] X. Liang, A. Jaakkola, Y. Wang, J. Hyypä, E. Honkavaara, J. Liu und H. Kaartinen. *The Use of a Hand-Held Camera for Individual Tree 3D Mapping in Forest Sample Plots*. In: *Remote Sensing* 6.7 (2014), S. 6587–6603.
- [17] Adrián Cardil, Udayalakshmi Vepakomma und Lluís Brotons. *Assessing Pine Processionary Moth Defoliation Using Unmanned Aerial Systems*. In: *Forests* 8.10 (2017).
- [18] M. Alonzo, H. E. Andersen, D. C. Morton und B. D. Cook. *Quantifying Boreal Forest Structure and Composition Using UAV Structure from Motion*. In: *Forests* 9.3 (2018).
- [19] F. Brieger, U. Herzsuh, L. A. Pestryakova, B. Bookhagen, E. S. Zakharov und S. Kruse. *Advances in the Derivation of Northeast Siberian Forest Metrics Using High-Resolution UAV-Based Photogrammetric Point Clouds*. In: *Remote Sensing* 11.12 (2019).
- [20] R. Guzinski, H. Nieto, R. Jensen und G. Mendiguren. *Remotely sensed land-surface energy fluxes at sub-field scale in heterogeneous agricultural landscape and coniferous plantation*. In: *Biogeosciences* 11.18 (2014), S. 5021–5046.
- [21] H. Hoffmann, H. Nieto, R. Jensen, R. Guzinski, P. Zarco-Tejada und T. Friborg. *Estimating evaporation with thermal UAV data and two-source energy balance models*. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 20.2 (2016), S. 697–713.

-
- [22] P. Shin, T. Sankey, M. M. Moore und A. E. Thode. *Evaluating Unmanned Aerial Vehicle Images for Estimating Forest Canopy Fuels in a Ponderosa Pine Stand*. In: *Remote Sensing* 10.8 (2018).
- [23] J. Liu, Z. Feng, L. Yang, A. Mannan, T. U. Khan, Z. Zhao und Z. Cheng. *Extraction of Sample Plot Parameters from 3D Point Cloud Reconstruction Based on Combined RTK and CCD Continuous Photography*. In: *Remote Sensing* 10.8 (2018).
- [24] S. Ganz und P. Käber Ya. and Adler. *Measuring Tree Height with Remote Sensing—A Comparison of Photogrammetric and LiDAR Data with Different Field Measurements*. In: *Forests* 10.8 (2019).
- [25] X. Liang, Y. Wang, A. Jaakkola, A. Kukko, H. Kaartinen, J. Hyyppä, E. Honkavaara und J. Liu. *Forest Data Collection Using Terrestrial Image-Based Point Clouds From a Handheld Camera Compared to Terrestrial and Personal Laser Scanning*. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 53.9 (2015), S. 5117–5132.
- [26] Johannes L Schonberger und Jan-Michael Frahm. „Structure-from-motion revisited“. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2016, S. 4104–4113.
- [27] M. Mokroš, X. Liang, P. Surový, P. Valent, J. Čerňava, F. Chudý, D. Tunák, Š. Saloň und J. Merganič. *Evaluation of Close-Range Photogrammetry Image Collection Methods for Estimating Tree Diameters*. In: *ISPRS International Journal of Geo-Information* 7.3 (2018).
- [28] L. Piermattei, W. Karel, D. Wang, M. Wieser, M. Mokroš, P. Surový, M. Koreň, J. Tomašík, N. Pfeifer und M. Hollaus. *Terrestrial Structure from Motion Photogrammetry for Deriving Forest Inventory Data*. In: *Remote Sensing* 11.8 (Apr. 2019), S. 950.
- [29] W. H. Schlesinger und S. Jasechko. *Transpiration in the global water cycle*. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 189-190 (2014), S. 115 –117.
- [30] P. Wagle, P. H. Gowda, X. Xiao und A. KC. *Parameterizing ecosystem light use efficiency and water use efficiency to estimate maize gross primary production and evapotranspiration using MODIS EVI*. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 222 (2016), S. 87 –97.
- [31] J. B. Fisher, F. Melton, E. Middleton, C. Hain, M. Anderson, R. Allen, M. F. McCabe, S. Hook, D. Baldocchi, P. A. Townsend, A. Kilic, K. Tu, D. D. Miralles, J. Perret, J. Lagouarde, D. Waliser, A. J. Purdy, A. French, D. Schimel, J. S. Famiglietti, G. Stephens und E. F. Wood. *The future of evapotranspiration: Global requirements*

- for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources.* In: *Water Resources Research* 53.4 (2017), S. 2618–2626.
- [32] A. Vidal und C. Devaux-Ros. *Evaluating forest fire hazard with a Landsat TM derived water stress index.* In: *Agricultural and Forest Meteorology* 77.3 (1995). Thermal Remote Sensing of the Energy and Water Balance over Vegetation, S. 207 –224.
- [33] D. Duethmann und G. Blöschl. *Why has catchment evaporation increased in the past 40 years? A data-based study in Austria.* In: *Hydrology and Earth System Sciences* 22.10 (2018), S. 5143–5158.
- [34] T. Mastrotheodoros, C.s Pappas, P. Molnar, P. Burlando, G. Manoli, J. Parajka, R. Rigon, B. Szeles, M. Bottazzi, P. Hadjidoukas und S. Fatichi. *More green and less blue water in the Alps during warmer summers.* In: *Nature Climate Change* 10 (Feb. 2020).
- [35] James M Gilbert und Reed M Maxwell. *Contrasting warming and drought in snowmelt-dominated agricultural basins: revealing the role of elevation gradients in regional response to temperature change.* In: *Environmental Research Letters* 13.7 (2018), S. 074023.
- [36] H Nieto, I. Sandholt, M. O. Rasmussen, R. Guzinski, J. Bellvert, L. B. Hansen, J.B. Solvsteen, T. Bondo und B. Koetz. *Review of Remote Sensing Evapotranspiration Models.* Paris, Frankreich: Europäischen Weltraumorganisation ESA, 2018, S. 55.
- [37] K. Zhang, J. S. Kimball und S. W. Running. *A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation.* In: *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 3.6 (2016), S. 834–853.
- [38] W. J. Timmermans, W. P. Kustas, M. C. Anderson und A. N. French. *An inter-comparison of the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) and the Two-Source Energy Balance (TSEB) modeling schemes.* In: *Remote Sensing of Environment* 108.4 (2007), S. 369 –384.
- [39] J. M. Norman, W. P. Kustas und K. S. Humes. *Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature.* In: *Agricultural and Forest Meteorology* 77.3-4 (1995), S. 263–293.
- [40] M. C. Anderson, W. P. Kustas, J. M. Norman, C. R. Hain, J. R. Mecikalski, L. Schultz, M. P. González-Dugo, C. Cammalleri, G. d’Urso, A. Pimstein und F. Gao. *Mapping daily evapotranspiration at field to continental scales using geostationary and polar orbiting satellite imagery.* In: *Hydrology and Earth System Sciences* 15.1 (2011), S. 223–239.

-
- [41] E. Hunt, Michel Cavigelli, Craig Daughtry, James McMurtrey und Charlie Walthall. *Evaluation of Digital Photography from Model Aircraft for Remote Sensing of Crop Biomass and Nitrogen Status*. In: *Precision Agriculture* 6 (Aug. 2005), S. 359–378.
- [42] S. Junttila, M. Vastaranta, J. Hämäläinen, P. Latva-käyrä, M. Holopainen, R. C. Clemente, H. Hyypä und R. M. Navarro-Cerrillo. *Effect of forest structure and health on the relative surface temperature captured by airborne thermal imagery – Case study in Norway Spruce-dominated stands in Southern Finland*. In: *Scandinavian Journal of Forest Research* 32.2 (2017), S. 154–165.
- [43] Georg von Arx, Matthias Dobbertin und Martine Rebetez. *Spatio-temporal effects of forest canopy on understory microclimate in a long-term experiment in Switzerland*. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 166-167 (2012), S. 144 –155.
- [44] M. Ehbrecht, P. Schall, C. Ammer, M. Fischer und D. Seidel. *Effects of structural heterogeneity on the diurnal temperature range in temperate forest ecosystems*. In: *Forest Ecology and Management* 432 (2019), S. 860 –867.
- [45] S. Hardwick, R. Toumi, M. Pfeifer, E. Turner, R. Nilus und R. Ewers. *The relationship between leaf area index and microclimate in tropical forest and oil palm plantation: Forest disturbance drives change in microclimate*. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 201 (Feb. 2015), S. 187–195.
- [46] M. R. Raupach, J. J. Finnigan und Y. Brunei. *Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: The mixing-layer analogy*. In: *Boundary-Layer Meteorology* 78.3 (1996), S. 351–382.
- [47] C. Düggelein. *Schweizerisches Landesforstinventar - Felddaufnahme-Anleitung 2019*. Birmensdorf: Bundesamtes für Umwelt BAFU und Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, 2019, S. 257.
- [48] ESRI. *ArcGIS Pro 2.3.2*. Environmental Systems Research Institute. Redlands CA, USA, 2019.
- [49] O. Conrad, B. Bechtel, M. Bock, H. Dietrich, E. Fischer, L. Gerlitz, J. Wehberg, V. Wichmann und J. Böhner. *System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4*. In: *Geoscientific Model Development* 8.7 (2015), S. 1991–2007.
- [50] Christian Ginzler. *Vegetation Height Model NFI*. 2018.
- [51] Lars Waser und Christian Ginzler. *Forest Type NFI*. 2018.
- [52] DTM-AV DOM-AV © 1994 swisstopo (5704 000 000).

- [53] P. Mattivi, F. Franci, A. Lambertini und G. Bitelli. *TWI computation: a comparison of different open source GISs*. In: *Open Geospatial Data, Software and Standards* 4.1 (2019), S. 6.
- [54] A. M. Ågren, W. Lidberg, M. Strömgren, J. Ogilvie und P. A. Arp. *Evaluating digital terrain indices for soil wetness mapping – a Swedish case study*. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 18.9 (2014), S. 3623–3634.
- [55] C. Qin, A. Zhu, P. Tao, B. Li, T. Scholten, T. Behrens und C. Zhou. *An approach to computing topographic wetness index based on maximum downslope gradient*. In: *Precision Agriculture* 12 (Feb. 2011), S. 32–43.
- [56] Dr. Alexander Bast. *WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Climate Change Impacts*.
- [57] STONEX. Nienburg, Deutschland. <https://www.stonex.de/produkte/gnss/>. Aufgerufen: 10.04.2020.
- [58] Leica Geosystems. Glattbrugg, Zürich. <https://leica-geosystems.com/de-ch>. Aufgerufen: 10.04.2020.
- [59] N. Micheletti, J. H. Chandler und S. N. Lane. *Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible structure-from-motion photogrammetry using a smartphone*. In: *Earth Surface Processes and Landforms* 40.4 (2015), S. 473–486.
- [60] DJI. Shenzhen, China. <https://www.dji.com/ch>. Aufgerufen: 10.04.2020.
- [61] Hasselblad. Göteborg, Schweden. <https://www.stonex.de/produkte/gnss/>. Aufgerufen: 10.04.2020.
- [62] SPH Engineering. Riga, Lettland. <https://www.ugcs.com/>. Aufgerufen: 10.04.2020.
- [63] Agisoft LLC. *Agisoft Metashape 1.6.1*. AgiSoft PhotoScan Professional. St. Petersburg, Russia, 2020.
- [64] Agisoft LLC. *Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.5*. St. Petersburg, Russia, 2019.
- [65] Martin Isenbrug. *LASTools*. rapidlasso GmbH. Gliching, Deutschland, 2020.
- [66] R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. Wien, Österreich, 2020.
- [67] Électricité de France SA (EDF). *CloudCompare*. Paris, Frankreich, 2020.
- [68] Milan Koreň. *DendroCloud - point cloud processing software for forestry*. Technical University. Zvolen, Slowakei, 2020.

-
- [69] GreenValley International. *LiDAR360 v4.0*. Berkeley CA, USA, 2020.
- [70] CloudCompare. *SOR filter*. https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=SOR_filter. Aufgerufen: 09.03.2020.
- [71] Milan Koreň. *DendroCloud Tutorial*. http://gis.tuzvo.sk/dendrocloud_tutorial/. Aufgerufen: 09.03.2020.
- [72] Jean-Romain Roussel. *Airborne LiDAR Data Manipulation and Visualization for Forestry Applications*. Université Laval. Québec, Kanada, 2020.
- [73] InfraTec GmbH. *VarioCAM® HD - Benutzerhandbuch*. Infrarotsensorik und Messtechnik. Dresden, Deutschland, 2013.
- [74] InfraTec GmbH. *IRBIS® 3 Analysesoftware*. Infrarotsensorik und Messtechnik. Dresden, Deutschland, 2019.
- [75] senseFly. *Lausanne, Schweiz*. <https://www.sensefly.com/>. Aufgerufen: 10.04.2020.
- [76] FLIR. *Oregon, USA*. <https://www.flir.de/products/tau-2/>. Aufgerufen: 10.04.2020.
- [77] Dr. Ruedi Bösch. *Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Forschungseinheit Landschaftsdynamik, Gruppe Fernerkundung*. 2019.
- [78] METER Enviornment. *Washington, USA*. <https://www.metergroup.com/environment/>. Aufgerufen: 10.04.2020.
- [79] Milwaukee Instruments. *Szeged, Ungarn*. <https://www.milwaukeeinst.com/web/>. Aufgerufen: 10.04.2020.
- [80] Testo AG. *Mönchaltorf, Schweiz*. <https://www.testo.com/de-CH/>. Aufgerufen: 10.04.2020.
- [81] esa. *Sentinel Application Platform (SNAP)*. Paris, Frankreich, 2020.
- [82] *Level-2A Algorithm Overview*. <https://earth.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-2a/algorithm>. Aufgerufen: 02.03.2020.
- [83] K. Saito, S. Ogawa, M. Aihara und K. Otowa. „Estimates of LAI for forest management in Okutama“. In: Bd. 22nd. Singapore: Asian Conference on Remote Sensing, 2001.
- [84] J. M. Norman, W. P. Kustas, J. H. Prueger und G. R. Diak. *Surface flux estimation using radiometric temperature: A dual-temperatare-difference method to minimize measurement errors*. In: *Water Resources Research* 36.8 (2000), S. 2263–2274.

- [85] A. Andreu, W. P. Kustas, M. J. Polo, A. Carrara und M. P. González-Dugo. *Modeling Surface Energy Fluxes over a Dehesa (Oak Savanna) Ecosystem Using a Thermal Based Two-Source Energy Balance Model (TSEB) I*. In: *Remote Sensing* 10.4 (2018).
- [86] Prof. Dr. Michael Lehning. WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, *Schnee Permafrost, Schneeprozesse, mündliche Mitteilung*. März 2020.
- [87] MeteoSchweiz. *Klimabulletin Sommer 2019*. Zürich: Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie, 2019, S. 7.
- [88] MeteoSchweiz. *Klimabulletin September 2019*. Zürich: Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie, 2019, S. 11.
- [89] MeteoSchweiz. *Klimabulletin Oktober 2019*. Zürich: Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie, 2019, S. 13.
- [90] Stahel. *Statistische Datenanalyse: eine Einführung für Naturwissenschaftler*. 4. Aufl. Braunschweig: Vieweg+Teubner Verlag, 2002.
- [91] J. M. Chambers. *Graphical methods for data analysis*. The Wadsworth statistics/-probability series. Belmont, Calif: Wadsworth, 1983.
- [92] C. L. Scher, E. Griffoul und C. H. Cannon. *Drone-based photogrammetry for the construction of high-resolution models of individual trees*. In: *Trees* 33.5 (2019), S. 1385–1397.
- [93] T. Mikita, P. Janata und P. Surový. *Forest Stand Inventory Based on Combined Aerial and Terrestrial Close-Range Photogrammetry*. In: *Forests* 7.8 (2016).
- [94] S. Sadeghi und H. Sohrabi. „The effect of UAV flight Altitude on the accuracy of individual tree height extraction in a broad-leaved forest“. In: Bd. XLII-4. Karaj, Iran: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing und Spatial Information Sciences, 2019.
- [95] N. Sadhasivam, C. . Dineshkumar, S. A. Rahaman und A. Bhardwaj. „Estimation of Forest Tree Heights and Crown Diameter Using High Resolution Images from UAV: A Case Study of Kalesar, Haryana“. In: Feb. 2020, S. 253–263.
- [96] A. Graham, N. C. Coops, M. Wilcox und A. Plowright. *Evaluation of Ground Surface Models Derived from Unmanned Aerial Systems with Digital Aerial Photogrammetry in a Disturbed Conifer Forest*. In: *Remote Sensing* 11.1 (2019).
- [97] L. Li, J. Chen, X. Mu, W. Li, G. Yan, D. Xie und W. Zhang. *Quantifying Understory and Overstory Vegetation Cover Using UAV-Based RGB Imagery in Forest Plantation*. In: *Remote Sensing* 12.2 (2020).

-
- [98] A. R. Larrinaga und L. Brotons. *Greenness Indices from a Low-Cost UAV Imagery as Tools for Monitoring Post-Fire Forest Recovery*. In: *Drones* 3.1 (2019).
- [99] K. Iizuka, T. Yonehara, M. Itoh und Y. Kosugi. *Estimating Tree Height and Diameter at Breast Height (DBH) from Digital Surface Models and Orthophotos Obtained with an Unmanned Aerial System for a Japanese Cypress (*Chamaecyparis obtusa*) Forest*. In: *Remote Sensing* 10.1 (2018).
- [100] J Zhang, J. Hu, J. Lian, Z. Fan, X Ouyang und W. Ye. *Seeing the forest from drones: Testing the potential of lightweight drones as a tool for long-term forest monitoring*. In: *Biological Conservation* 198 (2016), S. 60 –69.
- [101] M. Svensson, P. Jansson, D. Gustafsson, D. B. Kleja, O. Langvall und A. Lindroth. *Bayesian calibration of a model describing carbon, water and heat fluxes for a Swedish boreal forest stand*. In: *Ecological Modelling* 213.3 (2008), S. 331 –344.
- [102] M.D Morecroft, M.E Taylor und H.R Oliver. *Air and soil microclimates of deciduous woodland compared to an open site*. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 90.1 (1998), S. 141 –156.
- [103] Mahdi M. Al-Kaisi, Rattan Lal, Kenneth R. Olson und Birl Lowery. „Chapter 1 - Fundamentals and Functions of Soil Environment“. In: *Soil Health and Intensification of Agroecosystems*. Hrsg. von Mahdi M. Al-Kaisi und Birl Lowery. Academic Press, 2017, S. 1 –23.
- [104] C. Sarrat, J. Noilhan, P. Lacarrère, V. Masson, E. Ceschia, P. Ciais, A. Dolman, J. Elbers, C. Gerbig und N. Jarosz. *CO₂ budgeting at the regional scale using a Lagrangian experimental strategy and meso-scale modeling*. In: *Biogeosciences* 6.1 (2009), S. 113–127.
- [105] K. Gatzsche, W. Babel, E. Falge, R. D. Pyles, K. T. Paw U, A. Raabe und T. Foken. *Footprint-weighted tile approach for a spruce forest and a nearby patchy clearing using the ACASA model*. In: *Biogeosciences* 15.9 (2018), S. 2945–2960.
- [106] E. Cienciala, J. Kučera und A. Lindroth. *Long-term measurements of stand water uptake in Swedish boreal forest*. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 98-99 (Dez. 1999), S. 547–554.
- [107] C. Liebethal und Thomas Foken. *Evaluation of Six Parameterization Approaches for the Ground Heat Flux*. In: *Theoretical and Applied Climatology* 88 (Jan. 2007), S. 43–56.
- [108] ETH Zürich. *Mitteleuropäische Waldbaumarten - Artbeschreibung und Ökologie unter besonderer Berücksichtigung der Schweiz*. Zürich: Professur für Waldbau und Professur für Forstschutz und Dendrologie, 2002, S. 125.

- [109] B.R. Gardner, B.L. Blad, D.R. Thompson und K.E. Henderson. *Evaluation and interpretation of thematic mapper ratios in equations for estimating corn growth parameters*. In: *Remote Sensing of Environment* 18 (Jan. 1986), S. 225–234.
- [110] D. Zhang, J. Liu, W. Ni, G. Sun, Z. Zhang, Q. Liu und Q. Wang. *Estimation of Forest Leaf Area Index Using Height and Canopy Cover Information Extracted From Unmanned Aerial Vehicle Stereo Imagery*. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 12.2 (2019), S. 471–481.
- [111] J. Yu Y. and Wang, G. Liu und F. Cheng. *Forest Leaf Area Index Inversion Based on Landsat OLI Data in the Shangri-La City*. In: *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 47.6 (2019), S. 967–976.
- [112] G. Myhre, M. Kvalevåg und C. Schaaf. *Radiative forcing due to anthropogenic vegetation change based on MODIS surface albedo data*. In: *Geophysical Research Letters - GEOPHYS RES LETT* 32 (Nov. 2005), S. L21410.
- [113] D. A. Lutz und R. B. Howarth. *Valuing albedo as an ecosystem service: implications for forest management*. In: *Climatic Change* 124.1 (2014), S. 53–63.
- [114] S. Liang. *Narrowband to Broadband Conversions of Land Surface Albedo I Algorithms*. In: *Remote Sensing of Environment* 76 (Mai 2001), S. 213–238.
- [115] USGS. *Landsat 7*. https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-7?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con.
- [116] A. Hovi, E. Lindberg, M. Lang, T. Arumäe, J. Peuhkurinen, S. Sirparanta, S. Pyankov und M. Rautiainen. *Seasonal dynamics of albedo across European boreal forests: Analysis of MODIS albedo and structural metrics from airborne LiDAR*. In: *Remote Sensing of Environment* 224 (2019), S. 365 –381.
- [117] C. Cao, X. Lee, J. Muhlhausen, L. Bonneau und J. Xu. *Measuring Landscape Albedo Using Unmanned Aerial Vehicles*. In: *Remote Sensing* 10.11 (2018).
- [118] C. R. Levy, E. Burakowski und A. D. Richardson. *Novel Measurements of Fine-Scale Albedo: Using a Commercial Quadcopter to Measure Radiation Fluxes*. In: *Remote Sensing* 10.8 (2018).
- [119] W. Baig M. N. and Tranquillini. *The effects of wind and temperature on cuticular transpiration of Picea abies and Pinus cembra and their significance in dessication damage at the alpine treeline*. In: *Oecologia* 47.2 (1980), S. 252–256.

-
- [120] H. Davarzani, K. Smits, R. M. Tolene und T. Illangasekare. *Study of the effect of wind speed on evaporation from soil through integrated modeling of the atmospheric boundary layer and shallow subsurface*. In: *Water Resources Research* 50.1 (2014), S. 661–680. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/2013WR013952>.
- [121] S. Schymanski und D. Or. *Wind effects on leaf transpiration challenge the concept of "potential evaporation"*. In: *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences* 371 (Juni 2015), S. 99–107.
- [122] Thomas Foken. *Micrometeorology*. eng. Second edition. Berlin: Springer, 2017.
- [123] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes und M. Smith. *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56*. Rome: FAO - Food und Agriculture Organization of the United Nations, 1998, S. 1–15.
- [124] S. Stisen, I. Sandholt, A. Nørgaard, R. Fensholt und L. Eklundh. *Estimation of diurnal air temperature using MSG SEVIRI data in west Africa*. In: *Remote Sensing of Environment* 110 (Sep. 2007), S. 262–274.
- [125] L. Morillas, L. Villagarcía, F. Domingo, H. Nieto, O. Uclés und M. García. *Environmental factors affecting the accuracy of surface fluxes from a two-source model in Mediterranean drylands: Upscaling instantaneous to daytime estimates*. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 189-190 (2014), S. 140 –158.

A. Daten und Werte

A.1. Einmessung Versuchsflächen

Tab. A.1. Einmessung der Versuchsflächen Teufwald. Die Fehler werden als RMSE (Wurzel aus dem gemittelten Fehlerquadrat [25]) angegeben. HRMS steht für den RMSE in der horizontalen Ebene, VRMS für jenen in der vertikalen Achse.

Name	y	x	h	HRMS	VRMS
gut1p2	1183274.339	2786789.353	1842.858	0.124	0.132
gut1p3	1183282.379	2786787.888	1845.11	0.203	0.278
gut1p4	1183281.769	2786776.006	1839.561	0.183	0.253
gut1p1	1183271.375	2786777.889	1839.33	0.095	0.132
gut1p5	1183276.521	2786782.55	1841.443	0.016	0.025
gut2p4	1183132.829	2786728.069	1779.354	0.015	0.03
gut2p1	1183127.741	2786734.192	1781.484	0.196	0.363
gut2p2	1183135.854	2786744.077	1782.092	0.034	0.063
gut2p3	1183140.844	2786735.49	1783.289	0.023	0.048
gut2p5	1183132.707	2786734.656	1782.883	0.18	0.268
gut3p1	1183061.461	2786778.067	1785.554	0.181	0.262
gut3p2	1183067.664	2786787.527	1786.878	0.012	0.023
gut3p3	1183076.121	2786782.458	1787.384	0.012	0.024
gut3p4	1183071.97	2786775.526	1782.212	0.201	0.426
gut3p5	1183067.759	2786781.201	1787.884	0.184	0.335
schlecht1p1	1183221.383	2786700.04	1811.398	0.172	0.215
schlecht1p2	1183226.143	2786711.535	1819.024	0.013	0.023
schlecht1p3	1183234.212	2786707.361	1818.453	0.217	0.317
schlecht1p4	1183231.055	2786699.447	1812.039	0.264	0.374
schlecht1p5	1183226.51	2786704.661	1814.805	0.014	0.026
schlecht2p4	1183170.849	2786709.98	1792.376	0.175	0.252
schlecht2p1	1183166.479	2786718.832	1789.234	0.018	0.025
schlecht2p2	1183172.643	2786722.66	1797.145	0.126	0.191
schlecht2p3	1183180.084	2786714.268	1798.33	0.017	0.024
schlecht2p5	1183172.375	2786716.346	1792.528	0.016	0.019
schlecht3p2	1183198.572	2786628.128	1773.782	0.242	0.396
schlecht3p3	1183210.554	2786627.241	1764.581	0.27	0.406
schlecht3p4	1183209.82	2786620.647	1757.779	0.083	0.122
schlecht3p1	1183202.155	2786622.826	1758.987	0.079	0.097
schlecht3p5	1183205.755	2786624.101	1765.329	0.267	0.302

Tab. A.2. Einmessung der Versuchsflächen im Lücherwald. Die Fehler werden als RMSE (Wurzel aus dem gemittelten Fehlerquadrat [25]) angegeben. HRMS steht für den RMSE in der horizontalen Ebene, VRMS für jenen in der vertikalen Achse.

Name	y	x	h	HRMS	VRMS
gut1p1	1176955.052	2778154.852	1494.787	0.195	0.301
gut1p2	1176942.761	2778148.434	1498.81	0.243	0.414
gut1p3	1176938.951	2778154.637	1504.631	0.294	0.495
gut1p4	1176947.53	2778159.882	1505.586	0.281	0.461
gut1p5	1176948.258	2778155.864	1500.689	0.296	0.485
gut2p1	1176842.226	2778053.623	1471.935	0.016	0.027
gut2p2	1176838.183	2778062.074	1478.612	0.013	0.022
gut2p3	1176845.512	2778068.118	1479.76	0.125	0.165
gut2p4	1176850.152	2778060.476	1473.725	0.013	0.024
gut2p5	1176844.352	2778060.891	1475.452	0.015	0.027
gut3p1	1176865.785	2778036.303	1459.736	0.198	0.342
gut3p2	1176863.193	2778046.166	1461.218	0.013	0.022
gut3p3	1176870.494	2778051.402	1466.656	0.013	0.022
gut3p4	1176878.339	2778045.073	1459.124	0.049	0.068
gut3p5	1176872.99	2778046.68	1461.774	0.122	0.155
schlecht1p1	1176888.306	2778065.879	1473.655	0.236	0.407
schlecht1p2	1176883.737	2778069.106	1472.362	0.267	0.469
schlecht1p3	1176882.067	2778075.421	1485.97	0.203	0.339
schlecht1p4	1176888.662	2778070.678	1482.254	0.231	0.374
schlecht1p5	1176887.074	2778070.413	1477.12	0.198	0.344
schlecht2p5	1176997.429	2778141.533	1476.404	0.286	0.466
schlecht2p1	1176997.526	2778133.538	1470.881	0.021	0.042
schlecht2p2	1176993.203	2778139.148	1474.48	0.191	0.376
schlecht2p3	1176999.165	2778149.662	1477.116	0.232	0.397
schlecht2p4	1177004.511	2778144.118	1469.595	0.254	0.46
schlecht3p1	1177069.213	2778232.022	1505.499	0.188	0.333
schlecht3p2	1177063.013	2778236.534	1511.258	0.184	0.337
schlecht3p4	1177078.238	2778239.023	1501.41	0.011	0.021
schlecht3p5	1177072.101	2778238.366	1504.989	0.082	0.14
schlecht3p3	1177072.546	2778243.603	1507.325	0.117	0.199

Tab. A.3. Einmessung der Versuchsflächen im Zugwald. Die Fehler werden als RMSE (Wurzel aus dem gemittelten Fehlerquadrat [25]) angegeben. HRMS steht für den RMSE in der horizontalen Ebene, VRMS für jenen in der vertikalen Achse.

Name	y	x	h	HRMS	VRMS
gut1p1	1178181.3	2778553.848	1444.462	0.017	0.036
gut1p2	1178178.908	2778563.21	1446.003	0.017	0.033
gut1p3	1178187.897	2778566.771	1441.916	0.147	0.218
gut1p4	1178191.508	2778559.053	1438.385	0.014	0.028
gut1p5	1178184.503	2778563.309	1446.312	0.19	0.341
gut2p1	1178134.51	2778647.166	1501.655	0.201	0.278
gut2p2	1178133.51	2778655.547	1509.615	0.072	0.109
gut2p3	1178142.428	2778657.861	1507.694	0.217	0.303
gut2p4	1178146.466	2778652.164	1498.144	0.053	0.082
gut2p5	1178138.351	2778651.132	1506.514	0.186	0.235
gut3p1	1178217.714	2778714.291	1537.308	0.219	0.308
gut3p2	1178214.548	2778723.322	1541.228	0.233	0.319
gut3p3	1178223.337	2778728.915	1538.136	0.126	0.2
gut3p4	1178229.554	2778721.985	1531.115	0.13	0.185
gut3p5	1178224.429	2778722.051	1536.972	0.274	0.349
schlecht1p1	1178172.62	2778652.683	1506.158	0.032	0.049
schlecht1p2	1178170.809	2778664.196	1511.788	0.219	0.399
schlecht1p3	1178176.451	2778671.43	1509.184	0.068	0.088
schlecht1p4	1178182.531	2778665.571	1500.196	0.258	0.326
schlecht1p5	1178176.508	2778662.641	1501.693	0.304	0.291
schlecht2p1	1178057.622	2778650.781	1519.071	0.183	0.27
schlecht2p2	1178059.474	2778660.715	1525.889	0.259	0.382
schlecht2p3	1178069.705	2778660.494	1524.383	0.013	0.023
schlecht2p4	1178069.265	2778651.084	1519.255	0.038	0.06
schlecht2p5	1178064.552	2778657.699	1522.826	0.278	0.361
schlecht3p1	1178276.508	2778664.21	1493.827	0.254	0.423
schlecht3p2	1178274.956	2778673.026	1500.583	0.28	0.485
schlecht3p3	1178284.641	2778676.028	1497.259	0.024	0.038
schlecht3p4	1178286.118	2778666.495	1500.39	0.203	0.409
schlecht3p5	1178280.142	2778670.636	1501.85	0.21	0.446

A.2. Exposition, Feuchteindex und Hangneigung

Tab. A.4. Bestandescharakterisierung Teufiwald basierend auf einer GIS-Analyse. TWI beschreibt den topographischen Feuchteindex (topographic wetness index).

Versuchsfläche	Hangneigung	Exposition	TWI
schlecht1	22.55	W	4.31
schlecht2	35.79	SW	3.44
schlecht3	36.98	W	4.19
gut1	29.15	SW-W	3.88
gut2	31.39	S-SW	3.44
gut3	27.78	SW-W	6.34

Tab. A.5. Bestandescharakterisierung Lücherwald basierend auf einer GIS-Analyse. TWI beschreibt den topographischen Feuchteindex (topographic wetness index).

Versuchsfläche	Hangneigung	Exposition	TWI
schlecht1	33.98	NW	6.92
schlecht2	38.36	NW	4.95
schlecht3	36.62	W-NW	5.46
gut1	37.97	W-NW	6.38
gut2	35.72	NW	7.67
gut3	33.94	NW	6.57

Tab. A.6. Bestandescharakterisierung Zugwald basierend auf einer GIS-Analyse. TWI beschreibt den topographischen Feuchteindex (topographic wetness index).

Versuchsfläche	Hangneigung	Exposition	TWI
schlecht1	38.69	NW	4.86
schlecht2	40.03	W	4.88
schlecht3	39.54	W-NW	4.43
gut1	35.46	W-NW	4.53
gut2	38.59	W	5.50
gut3	32.06	W-NW	5.83

Tab. A.7. Topographischen Feuchteindex (TWI) für das Untersuchungsgebiet Teufiwald.

Versuchsfläche	min. TWI	max. TWI	sd TWI
schlecht1	3.97	4.66	0.22
schlecht2	2.31	5.05	0.60
schlecht3	3.56	4.62	0.42
gut1	2.47	5.05	0.72
gut2	3.77	6.06	0.69
gut3	5.77	6.99	0.42

Tab. A.8. Hangneigung im Untersuchungsgebiet Teufiwald.

Versuchsfläche	min. Hangneigung [°]	max. Hangneigung [°]	sd Hangneigung [°]
schlecht1	20.28	25.83	2.17
schlecht2	32.70	39.11	2.10
schlecht3	35.08	42.35	1.82
gut1	22.01	35.75	3.76
gut2	25.92	35.62	2.45
gut3	25.32	30.14	1.25

Tab. A.9. TWI (topographischen Feuchteindex) für das Untersuchungsgebiet Lücherwald.

Versuchsfläche	min. TWI	max. TWI	sd TWI
schlecht1	6.57	7.26	0.27
schlecht2	4.13	5.61	0.49
schlecht3	5.11	5.80	0.23
gut1	5.48	7.15	0.62
gut2	4.88	10.91	2.74
gut3	5.68	7.39	0.47

Tab. A.10. Hangneigung im Untersuchungsgebiet Lücherwald.

Versuchsfläche	min. Hangneigung [°]	max. Hangneigung [°]	sd Hangneigung [°]
schlecht1	32.57	35.64	1.20
schlecht2	29.80	40.61	2.36
schlecht3	35.65	39.10	0.95
gut1	35.15	40.15	1.66
gut2	32.71	42.48	2.51
gut3	33.36	34.58	0.36

Tab. A.11. TWI (topographischen Feuchteindex) für das Untersuchungsgebiet Zugwald.

Versuchsfläche	min. TWI	max. TWI	sd TWI
schlecht1	4.63	5.26	0.21
schlecht2	4.00	11.27	1.85
schlecht3	4.12	4.90	0.23
gut1	3.88	4.89	0.19
gut2	5.09	6.59	0.34
gut3	4.84	8.34	0.76

Tab. A.12. Hangneigung im Untersuchungsgebiet Zugwald.

Versuchsfläche	min. Hangneigung [°]	max. Hangneigung [°]	sd Hangneigung [°]
schlecht1	34.56	40.79	1.30
schlecht2	34.65	42.62	1.96
schlecht3	33.91	41.67	1.55
gut1	29.56	37.34	1.57
gut2	31.41	43.49	3.5
gut3	29.33	35.25	1.73

A.2.1. Feldaufnahmen

Tab. A.13. Anzahl Bäume pro Entwicklungsstufe im Untersuchungsgebiet Teufiwald.

Plot	Jungwuchs	Dickung	Stangenholz	Baumholz I	Baumholz II	Baumholz III
schlecht1	0	0	11	15	0	1
schlecht2	0	1	2	7	2	0
schlecht3	0	1	9	11	3	1
gut1	16	23	13	1	0	1
gut2	6	12	6	7	2	0
gut3	1	14	3	5	0	0

Tab. A.14. Anzahl Bäume pro Entwicklungsstufe im Untersuchungsgebiet Lücherwald.

Plot	Jungwuchs	Dickung	Stangenholz	Baumholz I	Baumholz II	Baumholz III
schlecht1	0	0	2	1	3	3
schlecht2	0	4	2	8	1	0
schlecht3	0	3	2	1	8	0
gut1	78	25	1	0	2	1
gut2	19	25	1	1	1	0
gut3	45	6	3	4	0	1

Tab. A.15. Anzahl Bäume pro Entwicklungsstufe im Untersuchungsgebiet Zugwald.

Plot	Jungwuchs	Dickung	Stangenholz	Baumholz I	Baumholz II	Baumholz III
schlecht1	0	0	3	4	2	1
schlecht2	0	0	2	4	3	1
schlecht3	0	0	1	6	3	2
gut1	7	5	3	1	0	0
gut2	83	35	0	0	2	0
gut3	38	9	1	1	2	2

Standort: Lüdenwolden

Versuchsfläche: Parc 3

Oben rechts

01, 41,6cm 02, 37,6cm 03, 44cm	04, 33cm 05, 40,8cm 06, 36cm
14, 31,1cm 13, 14,5cm 12, 8cm 11, 16,1cm 10, 8cm	07, 38,8cm 08, 3,1cm 09, 44,5cm

unten links

Abb. A.1. Das Protokollblatt wurde für alle Versuchsflächen ausgefüllt. Dabei wurden die Baumposition grob eingezeichnet und der BHD von Bäumen ab 6cm bestimmt. Konnten die Baumhöhen mit einem Meter sinnvoll bestimmt werden, wurde dies gemacht.

A.3. Bodenkontrollpunkte

A.3.1. RGB-UAV

Tab. A.16. Einmessung Bodenkontrollpunkte UAV Lücherwald. Die Fehler werden als RMSE (Wurzel aus dem gemittelten Fehlerquadrat [25]) angegeben. HRMS steht für den RMSE in der horizontalen Ebene, VRMS für jenen in der vertikalen Achse.

Name	y	x	h	HRMS	VRMS
BKP01	2778317.5755	1177109.3619	1529.3030	0.014	0.030
BKP02	2778236.5995	1177038.0056	1517.9095	0.226	0.420
BKP03	2778121.4669	1176891.3706	1498.1923	0.152	0.120
BKP04	2778056.8872	1176811.3399	1487.5134	0.014	0.020
BKP05	2778389.4890	1177273.7097	1508.1470	0.014	0.030
BKP06	2778257.3126	1176948.4276	1543.0525	0.014	0.030
BKP07	2778149.3751	1176768.0974	1557.9725	0.014	0.030
BKP08	2777887.9787	1176909.0780	1363.9214	0.014	0.020
BKP09	2777934.4628	1176979.9448	1366.8742	0.022	0.040
BKP10	2777996.8262	1177089.3432	1371.4531	0.022	0.040
BKP11	2778043.8161	1177199.6881	1380.6492	0.014	0.020
BKP12	2778091.3560	1177292.7162	1385.8314	0.014	0.030
BKP13	2778087.9132	1177366.2045	1382.2236	0.014	0.020

Tab. A.17. Einmessung Bodenkontrollpunkte UAV Teufiwald. Die Fehler werden als RMSE (Wurzel aus dem gemittelten Fehlerquadrat [25]) angegeben. HRMS steht für den RMSE in der horizontalen Ebene, VRMS für jenen in der vertikalen Achse.

Name	y	x	h	HRMS	VRMS
BKP1	1182995.344	2786777.794	1757.425	0.012	0.02
BKP2	1183117.968	2786658.533	1750.264	0.027	0.04
BKP3	1183183.847	2786557.097	1721.516	0.013	0.019
BKP4	1183230.326	2786678.73	1797.778	0.012	0.019
BKP5	1183281.187	2786751.169	1833.254	0.013	0.018
BKP6	1183234.908	2786823.107	1850.592	0.012	0.017
BKP7	1183141.456	2786921.261	1862.859	0.015	0.022
BKP8	1183079.266	2786865.226	1817.918	0.036	0.052
BKP9	1183162.387	2786740.419	1795.468	0.014	0.021

Tab. A.18. Einmessung Bodenkontrollpunkte UAV Zugwald. Die Fehler werden als RMSE (Wurzel aus dem gemittelten Fehlerquadrat [25]) angegeben. HRMS steht für den RMSE in der horizontalen Ebene, VRMS für jenen in der vertikalen Achse.

Name	y	x	h	HRMS	VRMS
BKP1	1178260.082	2778527.32	1410.153	0.012	0.028
BKP2	1178381.798	2778556.843	1414.372	0.019	0.047
BKP3	1178183.407	2778498.744	1414.453	0.014	0.033
BKP4	1178094.811	2778484.974	1424.422	0.015	0.03
BKP5	1178085.029	2778590.667	1473.665	0.014	0.026
BKP6	1178150.117	2778648.343	1494.704	0.016	0.03
BKP7	1178111.561	2778748.913	1550.444	0.012	0.021
BKP8	1178016.881	2778710.737	1552.068	0.013	0.024
BKP9	1178207.498	2778748.118	1546.25	0.011	0.017
BKP10	1178303.415	2778780.358	1558.522	0.022	0.036
BKP11	1178303.647	2778675.517	1490.925	0.132	0.193

A.3.2. Thermal-UAV

Tab. A.19. Einmessung Bodenkontrollpunkte Thermal-UAV Teufiwald. Die Fehler werden als RMSE (Wurzel aus dem gemittelten Fehlerquadrat [25]) angegeben. HRMS steht für den RMSE in der horizontalen Ebene, VRMS für jenen in der vertikalen Achse.

Name	y	x	h	HRMS	VRMS
BKP01	1183269.452	2786782.716	1841.451	0.014	0.029
BKP02	1183275.793	2786792.124	1845.65	0.016	0.028
BKP03	1183286.308	2786790.849	1850.763	0.097	0.101
BKP04	1183282.699	2786770.236	1841.068	0.018	0.031
BKP05	1183282.345	2786761.608	1836.468	0.015	0.028
BKP06	1183263.775	2786773.822	1835.774	0.014	0.026
BKP07	1183238.816	2786712.532	1815.941	0.012	0.022
BKP08	1183220.926	2786703.44	1812.245	0.013	0.025
BKP09	1183223.013	2786691.917	1806.507	0.012	0.02
BKP10	1183214.385	2786716.606	1813.803	0.014	0.021
BKP11	1183186.142	2786697.913	1798.667	0.013	0.026
BKP12	1183145.392	2786728.324	1784.443	0.014	0.029
BKP13	1183104.987	2786783.256	1796.273	0.014	0.029
BKP14	1183061.264	2786782.013	1786.486	0.014	0.031
BKP15	1183113.144	2786719.702	1769.399	0.014	0.028
BKP16	1183168.943	2786663.23	1777.37	0.013	0.025
BKP17	1183192.029	2786655.023	1780.957	0.012	0.023
BKP18	1183230.207	2786638.5	1777.51	0.033	0.062
BKP19	1183196.319	2786607.842	1751.197	0.016	0.029

Tab. A.20. Einmessung Bodenkontrollpunkte Thermal-UAV Lücherwald. Die Fehler werden als RMSE (Wurzel aus dem gemittelten Fehlerquadrat [25]) angegeben. HRMS steht für den RMSE in der horizontalen Ebene, VRMS für jenen in der vertikalen Achse.

Name	y	x	h	HRMS	VRMS
BKP01	1176838.304	2778059.587	1476.691	0.015	0.028
BKP02	1176867.46	2778032.535	1451.722	0.017	0.032
BKP03	1176942.665	2778092.661	1466.096	0.211	0.355
BKP04	1176943.079	2778152.802	1495.21	0.02	0.031
BKP05	1176994.81	2778196.836	1502.452	0.085	0.158
BKP06	1177034.644	2778184.221	1481.759	0.015	0.023
BKP07	1177035.653	2778220.768	1505.022	0.014	0.029
BKP08	1177063.216	2778215.609	1493.409	0.012	0.026

Tab. A.21. Einmessung Bodenkontrollpunkte Thermal-UAV Zugwald. Die Fehler werden als RMSE (Wurzel aus dem gemittelten Fehlerquadrat [25]) angegeben. HRMS steht für den RMSE in der horizontalen Ebene, VRMS für jenen in der vertikalen Achse.

Name	y	x	h	HRMS	VRMS
BKP01	1178082.006	2778636.807	1503.849	0.016	0.027
BKP02	1178044.345	2778677.236	1531.057	0.013	0.024
BKP03	1178113.598	2778709.146	1530.943	0.013	0.023
BKP04	1178211.861	2778717.406	1532.211	0.012	0.02
BKP05	1178211.254	2778666.846	1502.419	0.015	0.022
BKP06	1178152.535	2778656.886	1510.45	0.016	0.027
BKP07	1178198.49	2778557.99	1435.64	0.028	0.06
BKP08	1178189.45	2778575.49	1450.4	0.166	0.23
BKP09	1178176.72	2778562.12	1446.36	0.014	0.03
BKP10	1178177.05	2778554.01	1441.35	0.014	0.03
BKP11	1178253.49	2778710.45	1523.93	0.014	0.02
BKP12	1178287.7	2778660.84	1488.81	0.103	0.18

Tab. A.22. Fehler in den verdichteten Punktwolken. Die Fehler werden als RMSE (Wurzel aus dem gemittelten Fehlerquadrat [25]) angegeben.

Untersuchungsfläche	RGB-UAV		Thermal-UAV		terrestrische RGB		
	xy	z	xy	z	xy	z	Massstab
Teufwald	0.05	0.05	0.12-0.29	0.16-0.32	1.04-3.65	0.95-2.76	0.12-0.64
Lücherwald	0.03	0.06	0.62	1.86	1.63-9.1	0.63-5.18	0.01-0.41
Zugwald	0.04	0.06	1.19	1.04	0.73-2.56	0.53-2.29	0.01-0.31

A.4. Baumhöhen

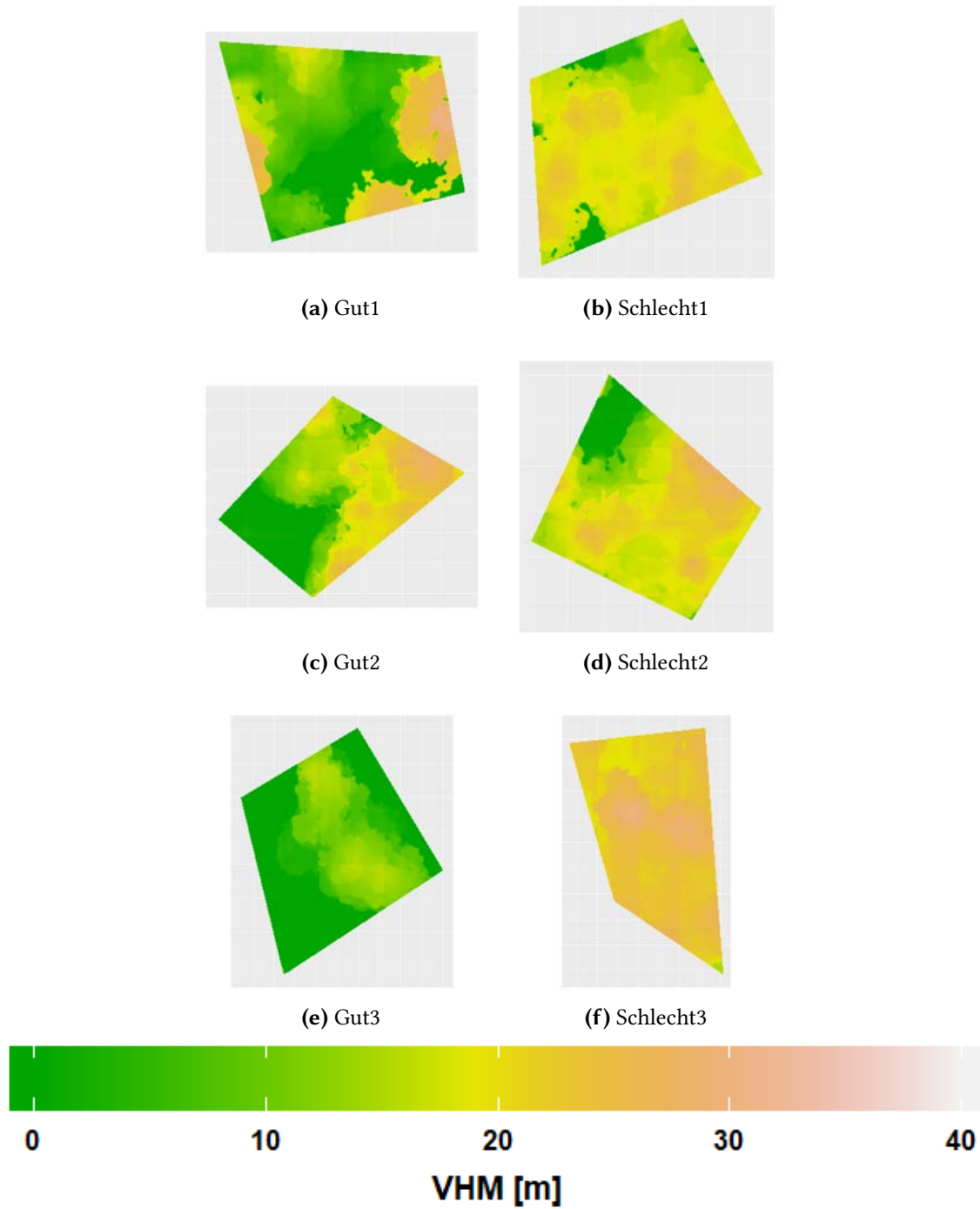


Abb. A.2. Abgebildet sind die berechneten VHM des Untersuchungsgebiet Teufiwald aus dem DSM, basierend auf den RGB-UAV-Aufnahmen, und dem 2m DEM [52].

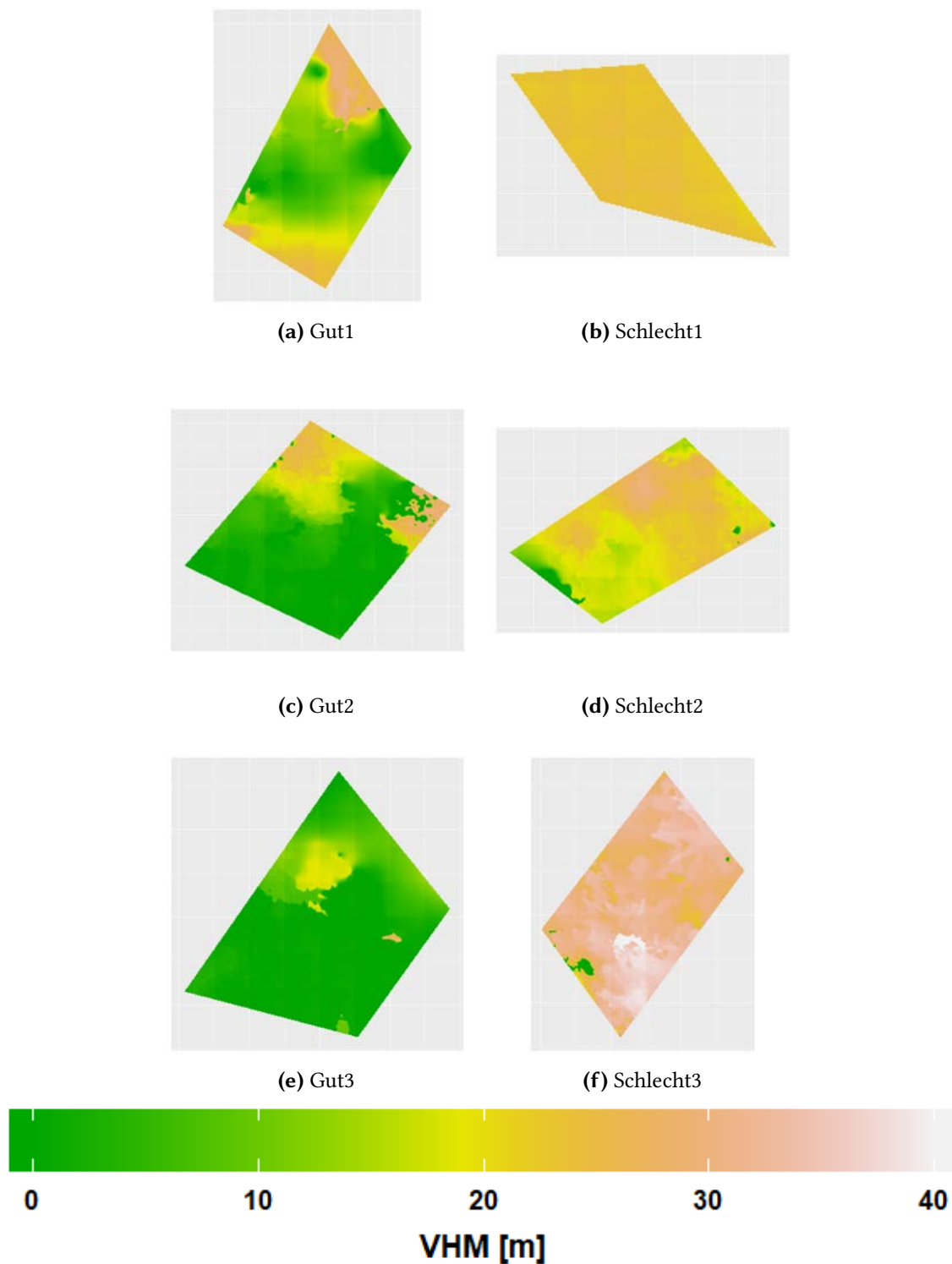


Abb. A.3. Abgebildet sind die berechneten VHM des Untersuchungsgebiet Lücherwald aus dem DSM, basierend auf den RGB-UAV-Aufnahmen, und dem 2m DEM [52].

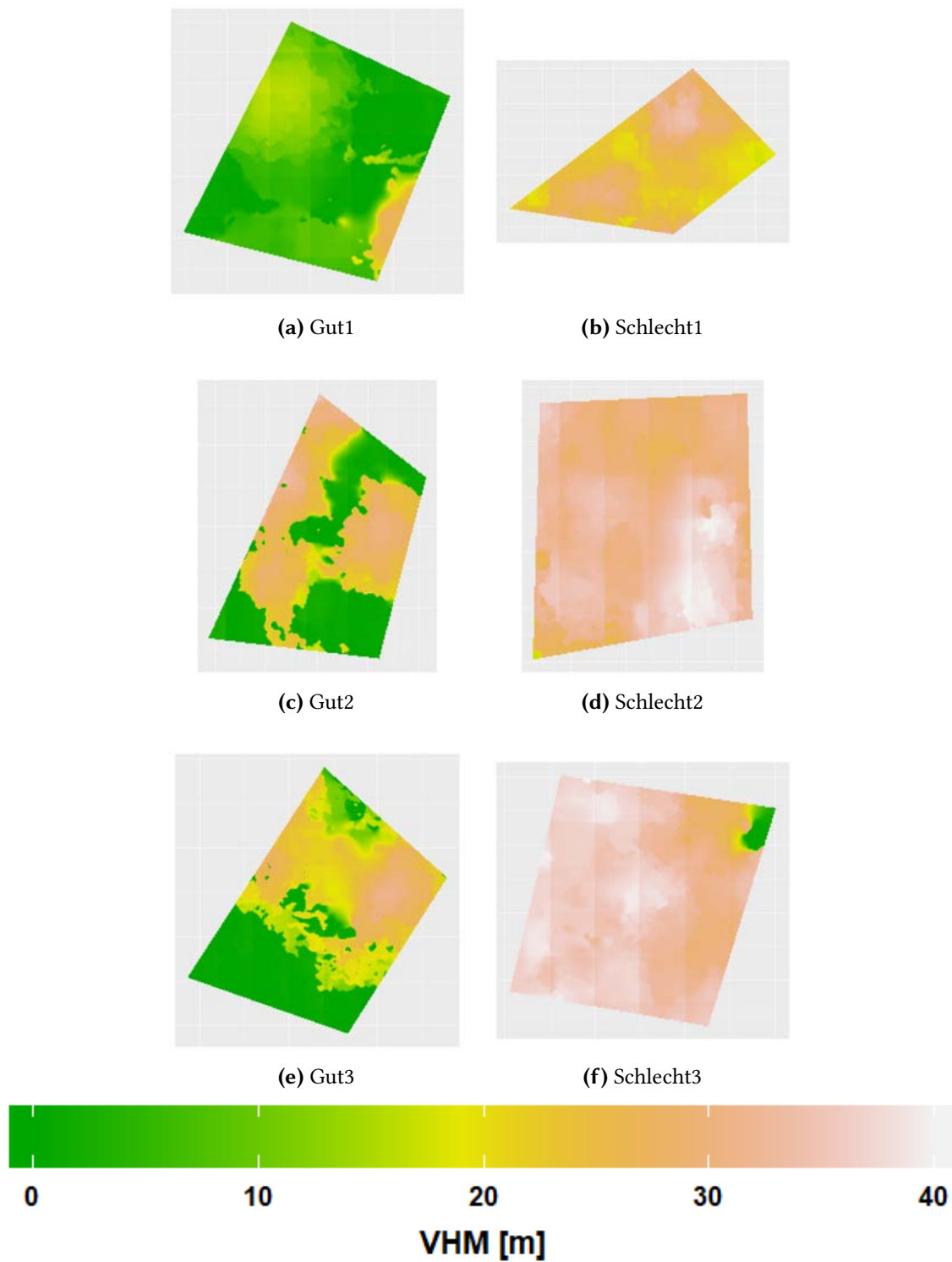


Abb. A.4. Abgebildet sind die berechneten VHM des Untersuchungsgebiet Zugwald aus dem DSM, basierend auf den RGB-UAV-Aufnahmen, und dem 2m DEM [52].

A.4.1. Deckungsgrad

Tab. A.23. Deckungsgrad nach Baumhöhen im Teufiwald.

Baumhöhen	schlecht1	schlecht2	schlecht3	gut1	gut2	gut3
[0,0.4]	3	7.82	0	16.56	20.02	45.1
(0.4,1.3]	0.21	1.44	0	2.61	2.62	0.88
(1.3,5]	1.82	0.76	0	12.72	3.29	10.02
(5,10]	1.35	2.45	0	27.34	8.09	15.19
(10,15]	8.82	9.99	0.12	11.76	17.21	26.78
(15,20]	57.4	42.02	5.29	9.7	23.35	2.02
(20,25]	27.39	30.91	69.92	12.64	20.13	0
(25,30]	0	4.62	24.56	5.92	5.29	0
(30,35]	0	0	0.12	0.75	0	0
(35,40]	0	0	0	0	0	0

Tab. A.24. Deckungsgrad nach Baumhöhen im Lücherwald.

Baumhöhen	schlecht1	schlecht2	schlecht3	gut1	gut2	gut3
[0,0.4]	0	1.83	0.71	3.24	29.39	46.4
(0.4,1.3]	0	0.06	0.09	2.12	13.35	14.25
(1.3,5]	0	0.42	0.06	10.22	20.74	12.62
(5,10]	0	1	0.09	22.48	7.62	15.15
(10,15]	0	2.87	0.09	22.3	5.69	6.04
(15,20]	0	35.05	0.18	15.34	9.49	5.31
(20,25]	100	45.99	2.18	11.82	8.86	0.03
(25,30]	0	12.19	23.85	11.4	4.8	0.2
(30,35]	0	0.6	59.78	1.07	0.05	0
(35,40]	0	0	12.09	0	0	0

Tab. A.25. Deckungsgrad nach Baumhöhen im Zugwald.

Baumhöhen	schlecht1	schlecht2	schlecht3	gut1	gut2	gut3
[0,0.4]	0	0	0.73	18.72	13.23	21.91
(0.4,1.3]	0	0	0.3	12.47	16.66	10.13
(1.3,5]	0	0	0.49	14.86	7.95	1.98
(5,10]	0	0	0.25	29.03	2.36	1.93
(10,15]	0	0	0.23	15.59	2.19	7.03
(15,20]	6.09	0.11	0.34	5.3	3.85	15.66
(20,25]	46.08	0.15	0.86	1.99	20.27	25.12
(25,30]	37.61	20.21	8.78	2.05	28.5	14.18
(30,35]	10.21	59.77	35.85	0	4.98	2.05
(35,40]	0.01	19.2	52.05	0	0	0

A.5. Thermalaufnahmen

A.5.1. UAV

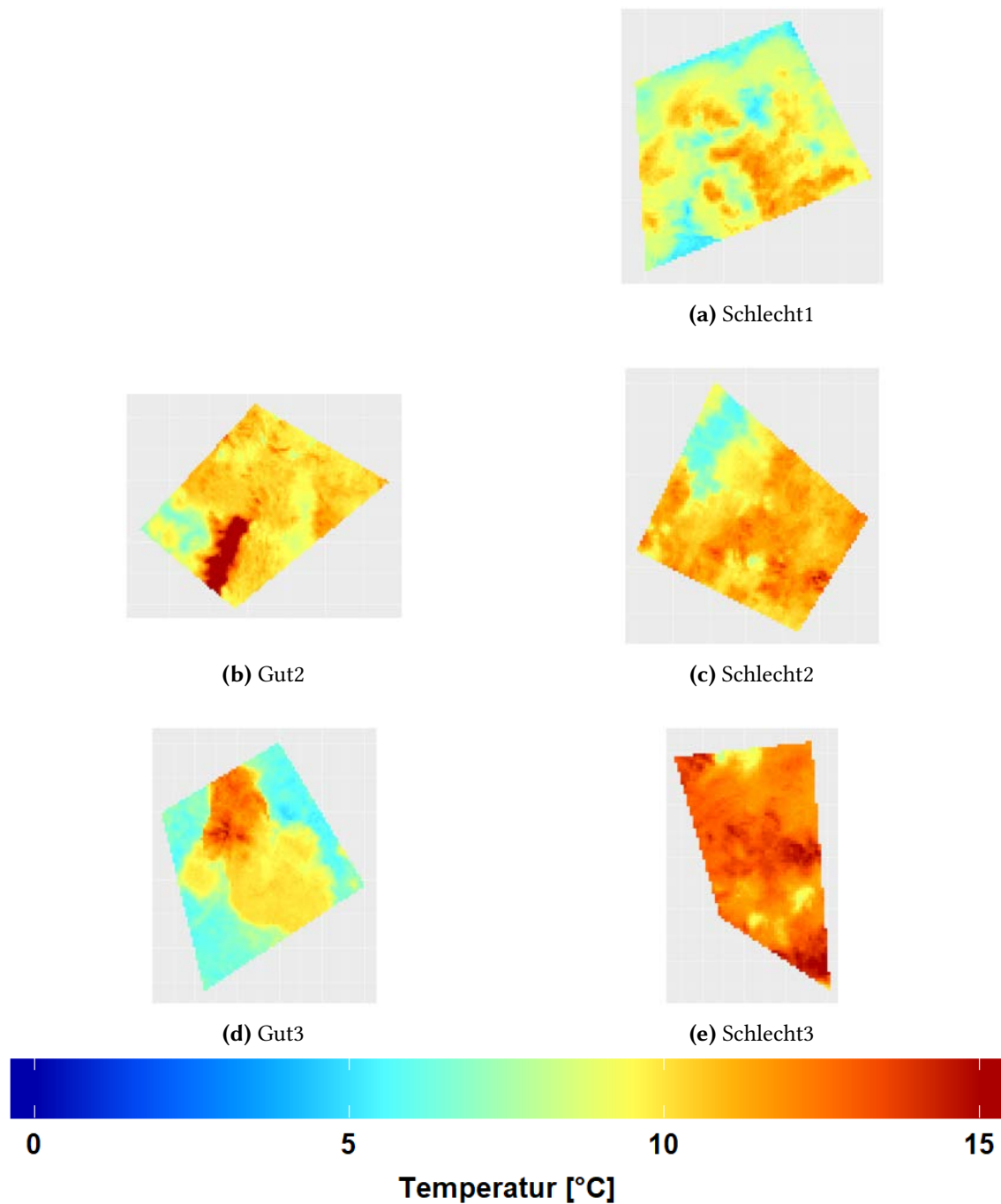


Abb. A.5. Abgebildet sind die generierten thermischen Orthomosaik pro Versuchsfläche des Untersuchungsgebietes Teufiwald. Diese sind aus den Thermal-UAV-Aufnahmen berechnet worden.

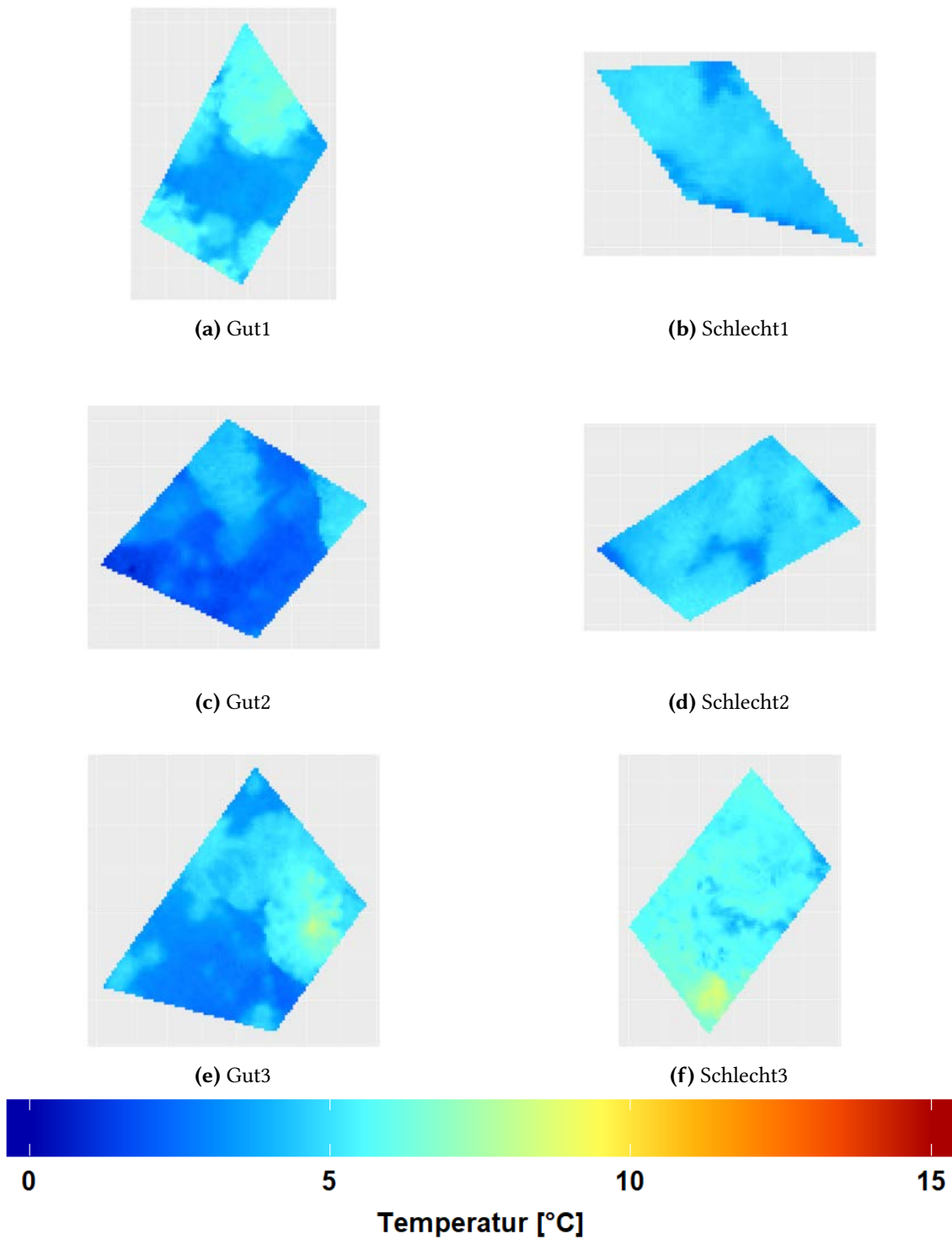


Abb. A.6. Abgebildet sind die generierten thermischen Orthomosaik pro Versuchsfläche des Untersuchungsgebietes Lücherwald. Diese sind aus den Thermal-UAV-Aufnahmen berechnet worden.

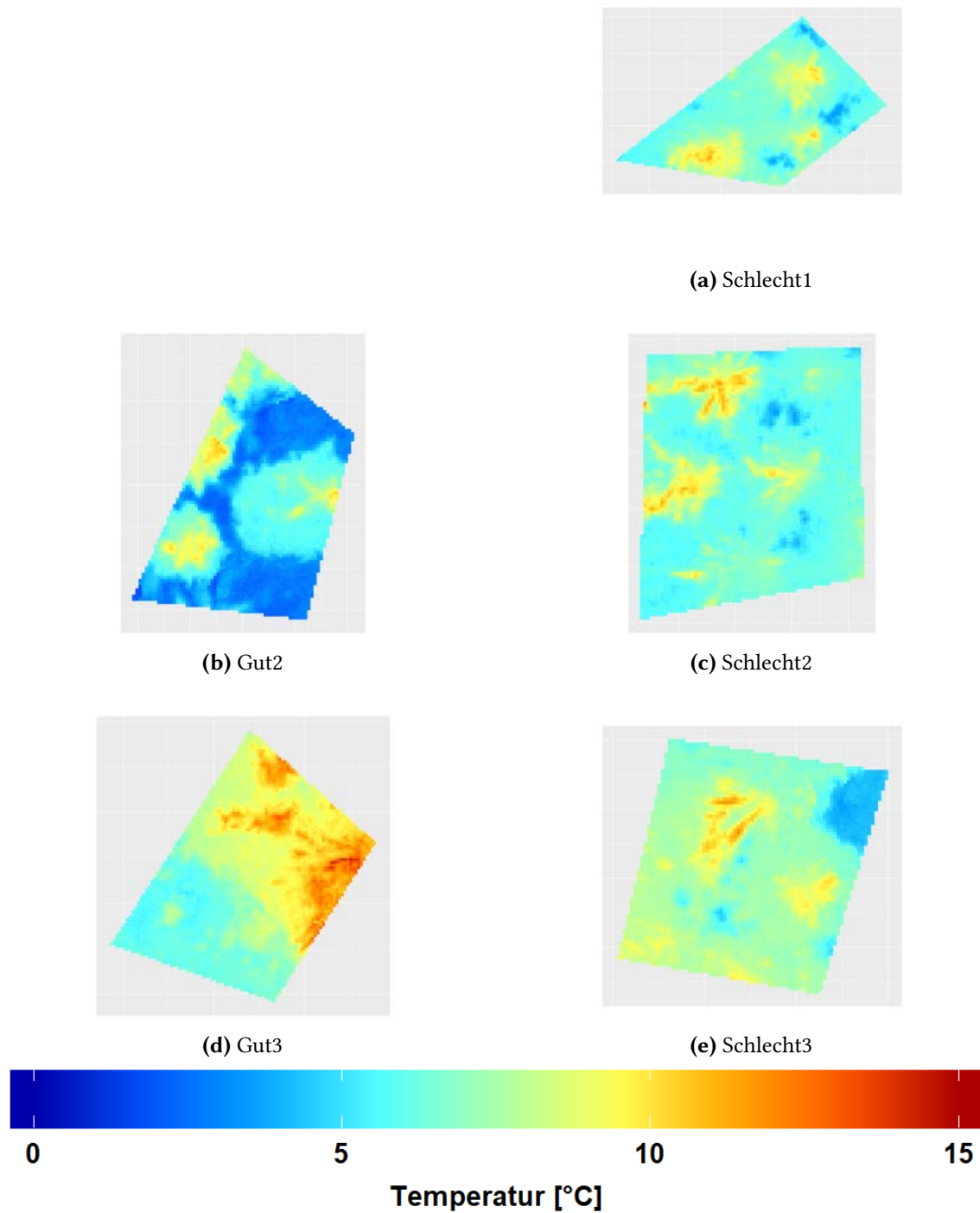


Abb. A.7. Abgebildet sind die generierten thermischen Orthomosaik pro Versuchsfläche des Untersuchungsgebietes Zugwald. Diese sind aus den Thermal-UAV-Aufnahmen berechnet worden.

Tab. A.26. Verwendete Inputdaten für das Evapotranspirationsmodell im Untersuchungsgebiet Lücherwald. Jede Untersuchungsfläche wurden in vier Quadrante aufgeteilt. Der verschiedene Spalten beschreiben den normalisierter differenzierter Vegetationsindex (NDVI), den Blattflächenindex (LAI), den Kronendeckungsgrad (DG) und die Windgeschwindigkeit gemessen an der Meteostation Davos.

UF	Quadrant	NDVI	LAI	Sonnenschein- [h]	DG	Treeheight [m]	WindDA [m/s]
gut1	1	0.546791771	2.037871555	4.730844691	0.9	13.65069802	1.9
gut1	2	0.554066937	2.07271024	4.730844691	0.9	13.65069802	1.9
gut1	3	0.55138793	2.059812501	4.730844691	0.9	13.65069802	1.9
gut1	4	0.557296152	2.088364277	4.730844691	0.9	13.65069802	1.9
gut2	1	0.524991481	1.936943536	4.88146324	0.6	6.902966702	2.3
gut2	2	0.475246689	1.724963459	4.88146324	0.6	6.902966702	2.3
gut2	3	0.478845837	1.739489851	4.88146324	0.6	6.902966702	2.3
gut2	4	0.484427991	1.762262156	4.88146324	0.6	6.902966702	2.3
gut3	1	0.510224158	1.871430985	5.241564813	0.9	3.350120501	2.4
gut3	2	0.496972424	1.814530633	5.241564813	0.9	3.350120501	2.4
gut3	3	0.495887639	1.809950107	5.241564813	0.9	3.350120501	2.4
gut3	4	0.528010083	1.95061474	5.241564813	0.9	3.350120501	2.4
schlecht1	1	0.554069641	2.072723299	5.123386377	0.9	23.34275124	2.2
schlecht1	2	0.538867953	2.000592552	5.123386377	0.9	23.34275124	2.2
schlecht1	3	0.538339913	1.998132669	5.123386377	0.9	23.34275124	2.2
schlecht1	4	0.538339913	1.998132669	5.123386377	0.9	23.34275124	2.2
schlecht2	1	0.39750967	1.43918735	3.044315666	0.9	20.52083523	2.6
schlecht2	2	0.363664969	1.330055219	3.044315666	0.9	20.52083523	2.6
schlecht2	3	0.296295598	1.136836978	3.044315666	0.9	20.52083523	2.6
schlecht2	4	0.297577926	1.140238727	3.044315666	0.9	20.52083523	2.6
schlecht3	1	0.53019017	1.960548297	4.538804395	0.9	31.37255785	3
schlecht3	2	0.529911222	1.959274456	4.538804395	0.9	31.37255785	3
schlecht3	3	0.496774444	1.813693795	4.538804395	0.9	31.37255785	3
schlecht3	4	0.505171491	1.84952834	4.538804395	0.9	31.37255785	3

Tab. A.27. Verwendete Inputdaten für das Evapotranspirationsmodell im Untersuchungsgebiet Teufiwald. Jede Untersuchungsfläche wurden in vier Quadrante aufgeteilt. Der verschiedene Spalten beschreiben den normalisierter differenzierter Vegetationsindex (NDVI), den Blattflächenindex (LAI), den Kronendeckungsgrad (DG) und die Windgeschwindigkeit gemessen an der Meteostation Davos.

UF	Quadrant	NDVI	LAI	Sonnenschein- [h]	DG	Treeheight [m]	WindDA [m/s]
gut2	1	0.600217509	2.308015069	6.242328851	0.4	12.98704933	1.2
gut2	2	0.611591515	2.369998477	6.242328851	0.4	12.98704933	1.2
gut2	3	0.568732652	2.14476108	6.242328851	0.4	12.98704933	1.2
gut2	4	0.58139175	2.208964513	6.242328851	0.4	12.98704933	1.2
gut3	1	0.651749057	2.602458001	6.005882623	0.2	5.199029774	0.9
gut3	2	0.636990249	2.514485883	6.005882623	0.2	5.199029774	0.9
gut3	3	0.663512768	2.674776515	6.005882623	0.2	5.199029774	0.9
gut3	4	0.659968101	2.652776314	6.005882623	0.2	5.199029774	0.9
schlecht1	1	0.62970618	2.472170428	6.379502169	0.9	17.59112951	0.2
schlecht1	2	0.600900112	2.311688807	6.379502169	0.9	17.59112951	0.2
schlecht1	3	0.579928672	2.201447036	6.379502169	0.9	17.59112951	0.2
schlecht1	4	0.581024299	2.207074094	6.379502169	0.9	17.59112951	0.2
schlecht2	1	0.679274497	2.77483326	6.314904339	0.8	17.05361669	1.3
schlecht2	2	0.681324026	2.788115897	6.314904339	0.8	17.05361669	1.3
schlecht2	3	0.653492765	2.613052881	6.314904339	0.8	17.05361669	1.3
schlecht2	4	0.669589677	2.712918597	6.314904339	0.8	17.05361669	1.3
schlecht3	1	0.653495487	2.613069452	4.332485918	0.9	23.70076636	1.3
schlecht3	2	0.659857408	2.652092214	4.332485918	0.9	23.70076636	1.3
schlecht3	3	0.595401545	2.282261143	4.332485918	0.9	23.70076636	1.3
schlecht3	4	0.597062198	2.291109054	4.332485918	0.9	23.70076636	1.3

Tab. A.28. Verwendete Inputdaten für das Evapotranspirationsmodell im Untersuchungsgebiet Zugwald. Jede Untersuchungsfläche wurden in vier Quadrante aufgeteilt. Der verschiedene Spalten beschreiben den normalisierter differenzierter Vegetationsindex (NDVI), den Blattflächenindex (LAI), den Kronendeckungsgrad (DG) und die Windgeschwindigkeit gemessen an der Meteostation Davos.

UF	Quadrant	NDVI	LAI	Sonnenschein- [h]	DG	Treeheight [m]	WindDA [m/s]
gut2	1	0.413151439	1.49260652	5.650519931	0.6	15.5034705	2.4
gut2	2	0.453575186	1.640024637	5.650519931	0.6	15.5034705	2.4
gut2	3	0.463507086	1.678419526	5.650519931	0.6	15.5034705	2.4
gut2	4	0.469127953	1.70054572	5.650519931	0.6	15.5034705	2.4
gut3	1	0.582786337	2.21615397	5.673815334	0.6	14.04957855	2.2
gut3	2	0.626160101	2.451828608	5.673815334	0.6	14.04957855	2.2
gut3	3	0.629301146	2.469838469	5.673815334	0.6	14.04957855	2.2
gut3	4	0.631110817	2.480274615	5.673815334	0.6	14.04957855	2.2
schlecht1	1	0.510332246	1.871902353	4.800954137	0.9	25.08300735	3.3
schlecht1	2	0.607382962	2.346872012	4.800954137	0.9	25.08300735	3.3
schlecht1	3	0.567550796	2.138863124	4.800954137	0.9	25.08300735	3.3
schlecht1	4	0.546623766	2.037073986	4.800954137	0.9	25.08300735	3.3
schlecht2	1	0.510201373	1.871331634	5.317666583	0.9	32.44380058	2.9
schlecht2	2	0.511805734	1.878340063	5.317666583	0.9	32.44380058	2.9
schlecht2	3	0.530664512	1.962716326	5.317666583	0.9	32.44380058	2.9
schlecht2	4	0.5208866	1.918506195	5.317666583	0.9	32.44380058	2.9
schlecht3	1	0.492170311	1.794341148	4.910778595	0.9	33.72443962	2.0
schlecht3	2	0.488598543	1.779470215	4.910778595	0.9	33.72443962	2.0
schlecht3	3	0.448205143	1.619632166	4.910778595	0.9	33.72443962	2.0
schlecht3	4	0.466173973	1.688881437	4.910778595	0.9	33.72443962	2.0

B. Workflow Agisoft

Dieser Workflow soll dazu dienen mit Hilfe von Agisoft Metashape 1.6.1 [63] 3D-Modell des Bestandes durch terrestrische Aufnahme zu erstellen. Grundsätzlich orientiert sich dieser Workflow an der Vorgaben von [Piermattei et al. \(2019\)](#). Technische Daten und Informationen zu Parametern werden aus der Anleitung, welche von Agisoft zur Verfügung gestellt wird, entnommen [64].

Im Idealfall werden Dateien des Typ *TIFF* verwendet, da diese im Gegensatz zu Dateien des Typs *JPEG* unkomprimiert sind wodurch mehr Informationen gespeichert sind. Diese Unterschiede sind für das Auge schwer fassbar, können aber bei der Anwendung in Agisoft zu schlechteren beziehungsweise besseren Resultaten führen. Alle Untermenüs, welche im Laufe dieses Workflows zusehen sind, können per rechtem Mausklick geöffnet werden.

Aufgebaut ist das Programm so, dass alle Bilder der gleichen Versuchsfläche in sogenannte Chunks geladen werden. Diese stellen eine Art Unterordner dar, in welchem alle Zwischenresultate zwischengespeichert und angezeigt werden. Mit einem Rechtsklick auf den entsprechenden Chunk können alle Prozesse gestartet werden.

Grundsätzlich unterscheiden sich die Abläufe für die verschiedenen Aufnahmeprozesse nicht. Einzig die verwendeten Einstellungen ändern sich. Diese verändern sich aber so oder so, auch für den gleichen Aufnahmeprozess, um ein optimales Ergebnis zu ermöglichen. Für die UAV sind weitere Schritte nötig, um weiterverwendbare Ergebnisse zu erhalten. Diese Schritte werden nach der Erklärung, wie die verdichteten Punktwolken generiert werden, aufgelistet und erklärt.

B.1. Allgemeiner Workflow

Wie in den Abbildungen [B.1](#) und [B.2](#) dargestellt, geht es im ersten Schritt darum die Bilder zu importieren. Alle Bilder der Versuchsfläche werden markiert und importiert ([Abb. B.2](#)). Falls sich in einem Ordner gleich mehrere Unterordner von verschiedenen

Versuchsflächen befinden, kann dieser über *Add Folder* hinzugefügt werden. Die Bilder der unterschiedlichen Flächen können dann in separaten Chunks abgelegt werden.

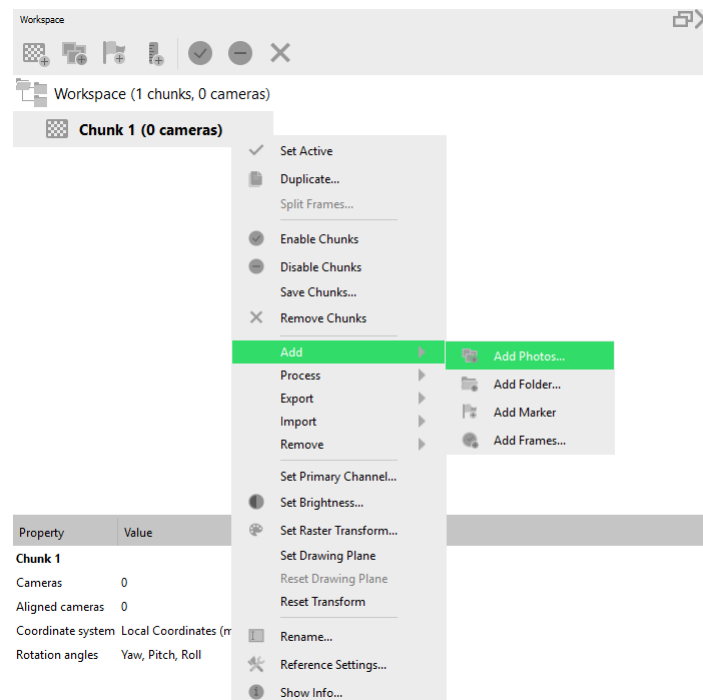


Abb. B.1. Hinzufügen der Bilder.

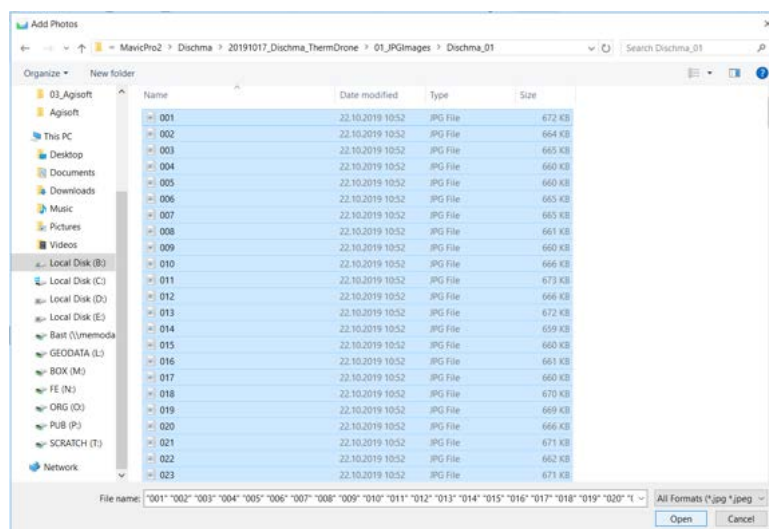


Abb. B.2. Gewünschte Bilder auswählen.

Sind die Bilder eingefügt, empfiehlt es sich alle Bilder noch einmal durchzuschauen und die Schlechten wieder zu löschen. Unter schlechten Bilder sind verschwommene, reine Bodenaufnahmen oder Aufnahmen auf welchen ein Stamm direkt vor der Linse steht

gemeint. Zudem muss überprüft werden, ob die Kameraspezifikation von der Software direkt eingetragen werden. Ist dies nicht der Fall, müssen diese von Hand eingetragen werden. Diese Einstellungen findet man über die Menüleiste unter *Tools* (Abb. B.3).

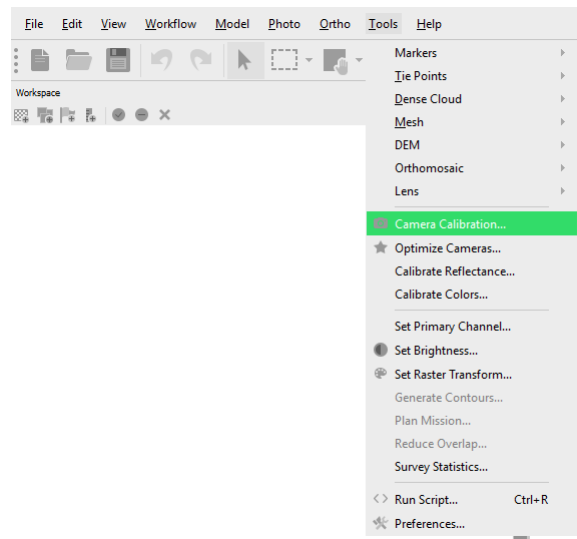


Abb. B.3. Die Kameraeinstellungen können so geöffnet werden. Es sollten die Felder *Focal Length* und *Pixelsize* ausgefüllt sein. Grundsätzlich erkennt das Programm alle gängigen Kameras. Ist dies nicht der Fall, können die Werte hier eingetragen werden.

werden diese Schritte durchgeführt, kann der erste Prozess gestartet werden: Die Orientierung („Alignment“) der Bilder (Abb. B.4). Diese werden basierend auf gleichen Punkten, sog. *Tie-Points*, aneinandergereiht. Man kann definieren, wie akkurat das Alignment sein soll (Abb. B.5). Zusätzlich können die Limits für die Anzahl *Key-Points* und *Tie-Points* definiert werden. *Key-Points* sind die Anzahl Punkte, welche pro Bild zur Überprüfung von gemeinsamen Punkten, sog. *Tie-Points*, mit anderen Bildern genutzt werden. Wählt man die Anzahl 0, werden dem Programm keine Limiten gesetzt und es sucht so viele Punkte wie möglich. Die verschiedenen Vorselektionen werden im Falle der terrestrischen Aufnahmen nicht verwendet. Die *Reference Preselection* selektiert basierend auf der Kameraposition vor, sofern diese vorhanden sind. Die *Generic Preselection* selektiert aufgrund der Bildreihenfolge vor.

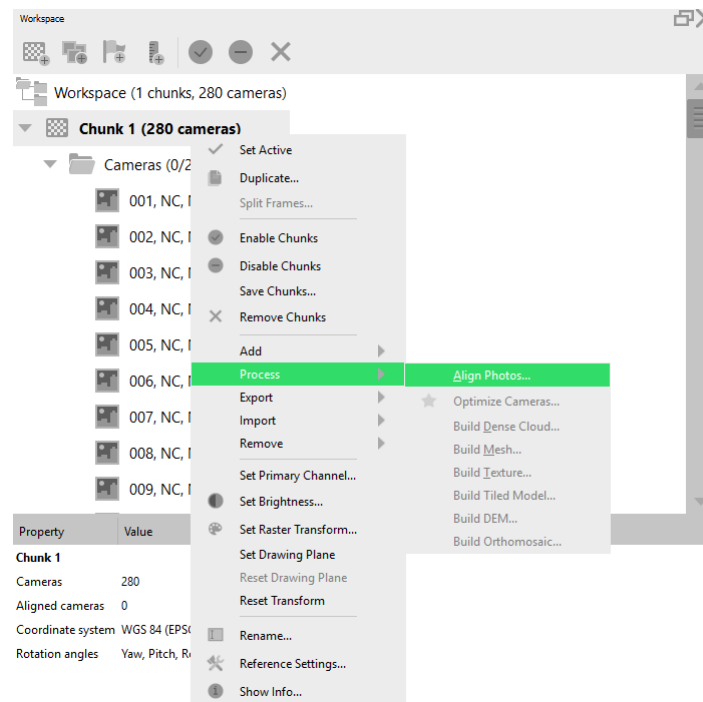


Abb. B.4. Das Alginment starten.

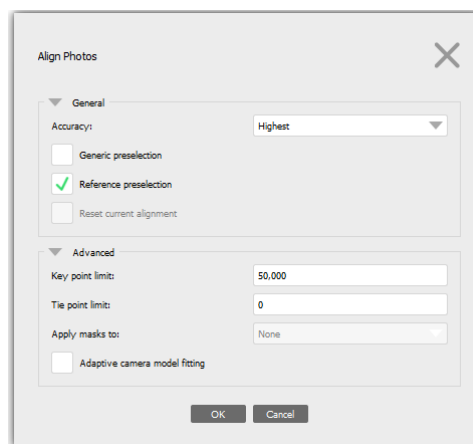


Abb. B.5. Einstellungen für das Alginment.

Im Optimalfall sind alle Bilder richtig angeordnet (Abb. B.6). Dies muss jedoch überprüft werden. Vielfach sind vereinzelt Bilder oder gar ganze Bildergruppen nicht korrekt aneinander gereiht. Diese müssen gelöscht oder in einen separaten Chunk geladen werden. Werden ganze Bildgruppen falsch angeordnet kann so unter Umständen ein erfolgreiches Alginment erreicht werden, da diese einzelnen Chunks wieder miteinander verbunden werden können.



Abb. B.6. Das abgeschlossene Alignment mit den berechneten Verknüpfungspunkten (*Tie-Points*).

Steht das Alignment, muss dieses georeferenziert werden. Damit die Georeferenzierung möglich ist, muss das richtige Koordinatensystem ausgewählt werden. Dies ist durch den gekreuzten Hammer und Schraubenschlüssel möglich. Um in dieses Menü zu gelangen, muss unten Links auf *Reference* gewechselt werden. Die Georeferenzierung erfolgt über sogenannte *Marker*. Diese werden in jeder Aufnahme separat definiert und positioniert (Abb. B.9). Die Fahnen können dabei drei verschiedene Farben annehmen: grün, blau und grau. Grüne Fahnen bedeuten, dass diese manuell gesetzt werden. Blaue werden automatisch gesetzt, werden aber zur Berechnung des Koordinatensystem verwendet. Graue Fahnen werden automatisch gesetzt, werden aber für die Berechnung nicht verwendet. Zusätzlich können Distanzen zwischen zwei verschiedenen *Marker* eingetragen werden. Hierfür müssen zwei *Marker* markiert und über den Lineal im Kopfménü die Distanz hinzugefügt werden (Abb. B.8).

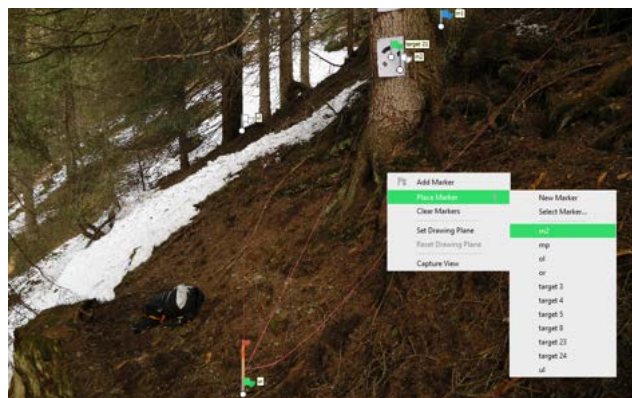


Abb. B.7. Das Vorgehen, um Marker zu setzen. Dieses Untermenü kann mit einem rechten Mausklick geöffnet werden.

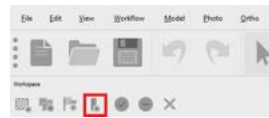


Abb. B.8. Durch den Lineal können Distanzen eingefügt werden. Diese dienen unter anderem zur Überprüfung der Genauigkeit des Modells.

Für die nicht georeferenzierten Marker, welche der Distanzeinmessung dienen, werden die von Agisoft zur Verfügung gestellten Marker verwendet (Abb. B.9). Diese konnten automatisch erkannt werden (Abb. B.9). Damit erfolgte eine effiziente und genaue Markierung aller vorhandenen KP. Es werden damit zwar nicht alle direkt und einwandfrei erkannt, jedoch erleichtert dies wesentlich die Markierung aller KP.

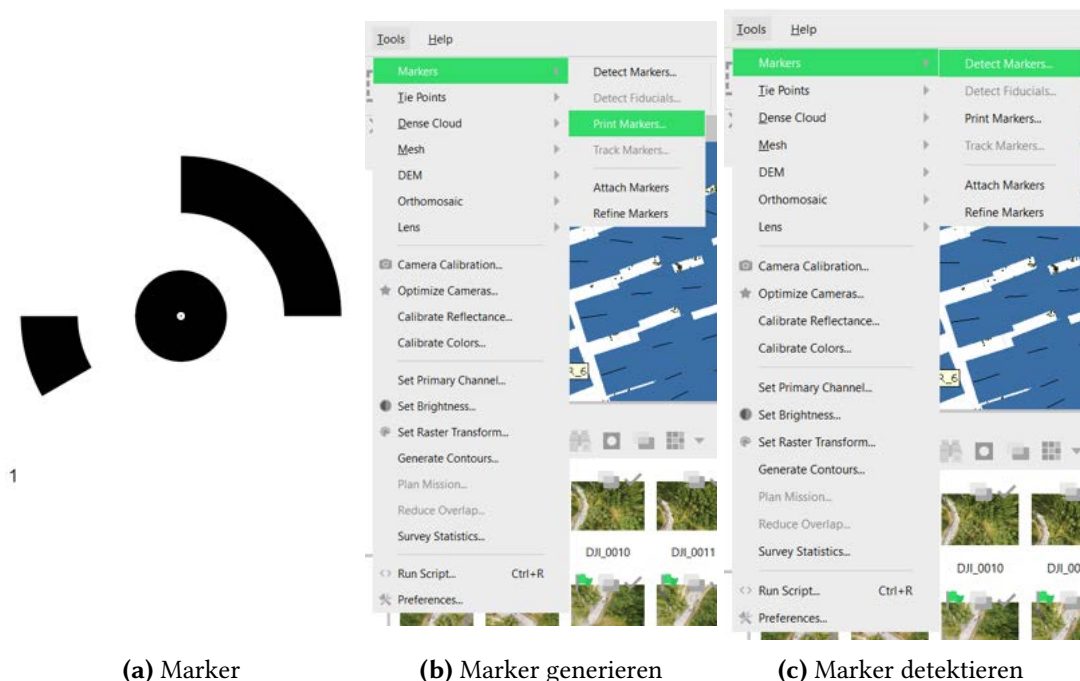


Abb. B.9. Im Bild a) ist ein Marker zusehen. Je nach Nummern unterscheiden sich diese und werden von Agisoft automatisch als unterschiedliche Marker erkannt. Dargestellt in Abbildung b) ist das Untermenü, über welches die Marker als *pdf* exportiert werden können. Bild c) zeigt wie man den Prozess der automatischen Detektierung der Marker starten kann.

Die Abbildung B.10 zeigt das Eintragen von Koordinaten und Distanzen. Bevor die Aufnahmen weiterverarbeitet werden können, muss sichergestellt werden, dass nur die mit dem GNSS vermessenen Punkte und die Distanzen mit einem grünen Haken markiert sind.

The screenshot shows a software window titled 'Reference' with three main sections: Cameras, Markers, and Scale Bars. Each section has a table with columns for Easting (m), Northing (m), Altitude (m), Accuracy (m), and Error (m).

Cameras	Easting (m)	Northing (m)	Altitude (m)	Accuracy (m)	Error (m)
_MG_27...					
_MG_27...					
_MG_27...					
_MG_27...					
_MG_27...					
_MG_27...					
_MG_27...					
_MG_27...					
_MG_27...					
_MG_27...					

Markers	Easting (m)	Northing (m)	Altitude (m)	Accuracy (m)	Error (m)
m1					
m2					
imp	2778662.641000	1178176.508000	1500.680000	0.304000	2.6072
ol	2778671.430000	1178176.451000	1505.540000	0.068000	0.2156
or	2778664.196000	1178170.809000	1504.430000	0.219000	4.1594
point 1					
target 3					
target 4					
target 5					
target 6					

Scale Bars	Distance (m)	Accuracy (m)	Error (m)
m1_m2	2.000000	0.001000	0.620916
target 3..	0.500000	0.001000	0.176537
target 3..	0.500000	0.001000	0.197029
target 3..	0.500000	0.001000	0.125307
target 3..	0.500000	0.001000	0.156723

Total Error
Control scale ...
Check scale b... 0.314892

Abb. B.10. Hier werden die Bodenkontrollpunkte georeferenziert. Diese wurden zuvor im Feld mit einem GNSS eingemessen. Zusätzlich können Distanzen zwischen *Marker* angegeben werden.

Im nächsten Schritt geht es darum alle ungenügenden Punkte zu löschen. Dabei werden Mindestwerte definiert, welche jeder Pixel erreichen muss. Ist der Pixel qualitativ zu schlecht, wird dieser gelöscht. Dabei werden drei Kriterien überprüft:

- mindestens auf zwei Bildern vorhanden [*Image Count: min 2*]
- Rekonstruktionsfehler max. 50 [*Reconstruction Error: max 50*]
- Reprojektionsfehler max 1px [*Reprojection Error: max 1px*]

Die gewählten Werten sind aus dem Paper von [Piermattei et al. \(2019\)](#) entnommen. Diese Prozesse können über das Untermenü, dargestellt auf der Abbildung [B.11](#), gestartet werden. Wird eine Selektion durchgeführt, können die Punkte über die Taste *Delete* gelöscht werden. In einem weiteren Schritt können die noch übrig gebliebenen fehlerhaften Punkte entfernt werden. Dies ist über die *Free-Form-Selection* möglich ([Abb. B.12](#)).

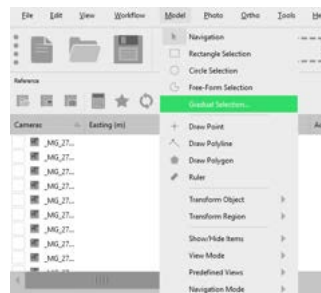


Abb. B.11. Über dieses Untermenü kann eine Auswahl durchgeführt werden. So wird erreicht, dass alle Pixel gewissen Minimalkriterien genügen.

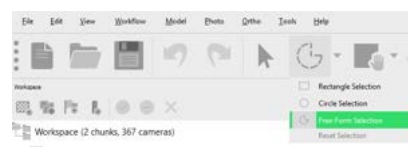


Abb. B.12. Durch die manuelle Selektion können Pixel gelöscht werden, welche nicht gebraucht werden. Zudem können so fehlerhafte Pixel gelöscht werden, welche trotz der automatisierten Auswahl noch nicht eliminiert werden.

Da nun alle fehlerhaften Punkte eliminiert sein sollten, kann man das Alignment der Aufnahmen noch einmal optimieren. Zuerst ist es aber wichtig, dass das Ganze noch einmal aktualisiert wird. Dies ist über den Neu-Laden-Kreis möglich (fig:laden). Danach kann man über den Stern das Alignment optimieren. Die Auswahl an Parameter, welche angepasst werden, stammen von [Piermattei et al. \(2019\)](#) (Abb. B.14).

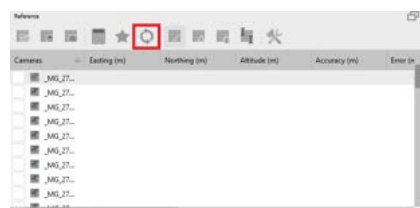


Abb. B.13. Hier werden die Genauigkeiten der *Marker* aktualisiert. Dies kann immer wieder gemacht werden und hilft zu beobachten, wie sich die Genauigkeiten mit dem Hinzufügen von eingemessenen Distanzen und Bodenkontrollpunkten entwickelt.

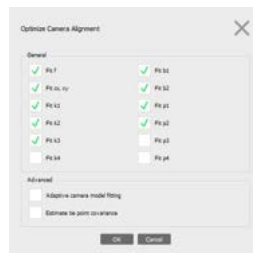


Abb. B.14. Durch die Kameraoptimierung wird das Alignment angepasst. Dies führt dazu, dass die Fehler der Pixel reduziert werden.

Hiermit ist das Alignment abgeschlossen. Sind die Fehler bei den *Marker* oder Distanzen zu gross, müssen die gesetzten *Marker* noch einmal überprüft werden. Ist man mit dem Ergebnis zufrieden, folgt der letzte Schritt: Das Berechnen der dichten Punkt-Wolke. Diese kann über das Menü, abgebildet in Abbildung B.15, gestartet werden. Auch hier sind die Einstellungen frei anpassbar. Man stellt nebst der Qualität auch die Stärke des Filters ein. Wie in B.16 gezeigt, werden für die Qualität *High* gewählt und für den Filter *Mild*.

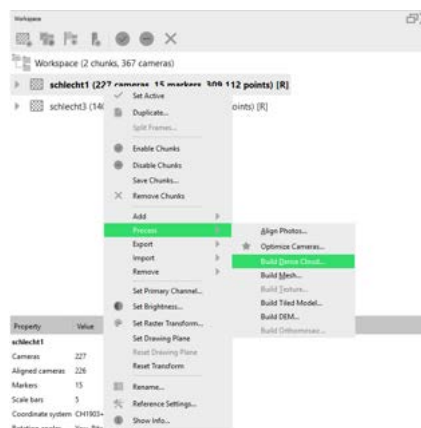


Abb. B.15. Durch dieses Untermenü kann die Generierung der Punktwolke gestartet werden.



Abb. B.16. Je höher die Qualität, desto länger sind die Berechnungszeiten. Der Filter wird auf mild eingestellt, da sonst wichtige Details verloren gehen. Die Erstellung der verdichteten Punktwolke ist der zeitintensivste Schritt.

Als Ergebnis erhält man eine verdichtete Punktwolke (Abb. B.17). Diese Punktwolke kann exportiert und weiterverwendet werden. Das Exportieren wird über das Untermenü gestartet (B.18).



Abb. B.17. So sieht die fertige verdichtete Punktwolke aus.

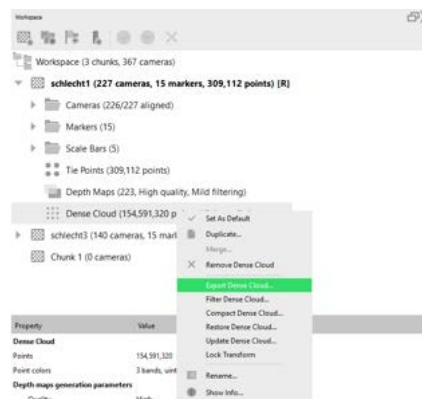


Abb. B.18. Über dieses Untermenü kann die Punktwolke exportiert werden. Dafür sollte der Dateityp *LAZ* gewählt werden. Dieser komprimiert die Datei und erreicht so kleinere Dateigrößen

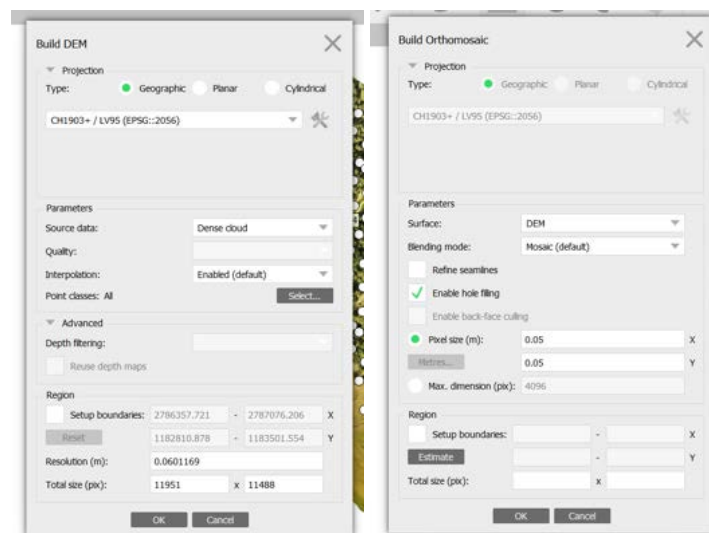
Abschliessend muss angemerkt werden, dass die Verwendung von Agisoft nicht frei von Tücken ist. So können genau gleiche Inputs zu völlig unterschiedlichen Resultaten führen. Auch führen nicht immer die gleichen Parametereinstellungen zu den besten Resultaten. Hier muss, falls zum Beispiel das Alignment nicht klappen sollte, mit den Werten experimentiert werden. Zusätzlich ist es wichtig, immer die neuste Version zu verwenden. Dies kann zu stark verbesserten Resultaten führen. Schlussendlich bleiben der Workflow und die Berechnungen eine grosse Blackbox. Dies vereinfacht die Anwendung zwar, führt aber bei intensiver Anwendung immer wieder zu nicht erklärbaren Resultaten.

B.2. Oberflächenmodell und Normalfarben-Orthofoto

Damit aus den Drohnen (UAV) basierten Normalfarben(RGB)-Aufnahmen und den daraus entstandenen verdichteten Punktwolken in einem weiteren Schritt ein Orthofoto und digitale Oberflächenmodell (DSM) berechnet werden konnten, mussten weitere Verarbeitungsschritte gemacht werden. Das Erstellen der verdichteten Punktwolken lief gleich ab, einzig die verwendeten Einstellungen werden teilweise geändert. Diese sind in den Reports auf dem externen Datenträger nachzulesen.

Zur Berechnung des DSM wird die verdichtete Punktwolke verwendet (Abb. B.19). Basierend auf den BKP wird für jeden Punkt die x,y, und z-Koordinate bestimmt. Diese werden verwendet, um das DSM zu generieren. In einem weiteren Schritt kann dieses als *tif* exportiert werden.

Zur Erstellung eines Orthomosaiks wird das DSM als Oberflächenlayer verwendet (Abb. B.19). Die Auflösung kann den Bedürfnissen entsprechend angepasst werden. Resultat ist eine 2D-Darstellung der Oberfläche in Normalfarben. Diese Abbildung ist georeferenziert und kann exportiert und verwendet werden. Die Auflösung ist dabei sehr hoch (0.05cm)



(a) Berechnung DSM

(b) Orthofoto

Abb. B.19. Im Bild a) sind die verwendeten Einstellung zur Berechnung des DSM abgebildet. Bild b) stellt die Einstellung zur Generierung des Orthophoto als Raster dar.

B.3. Thermisches Orthomosaik

Das Vorgehen für die Thermal-UAV-Aufnahmen unterscheidet sich von demjenigen für die RGB-UAV-Aufnahmen nicht sonderlich. Es werden die Rohaufnahmen mit den absoluten Temperaturwerten in Agisoft geladen. Zusätzlich wird nur ein georeferenziertes thermisches Orthomosaik erstellt. Dies enthält die absoluten Temperaturwerte in jeder Rasterzelle. Anstelle eines DSM ist die Berechnung eines Mesh, polygonales Modell, nötig (Abb. B.20). Beim Export dieser Rasterdatei musste darauf geachtet werden, dass die absoluten Werte exportiert werden (Abb. B.20).

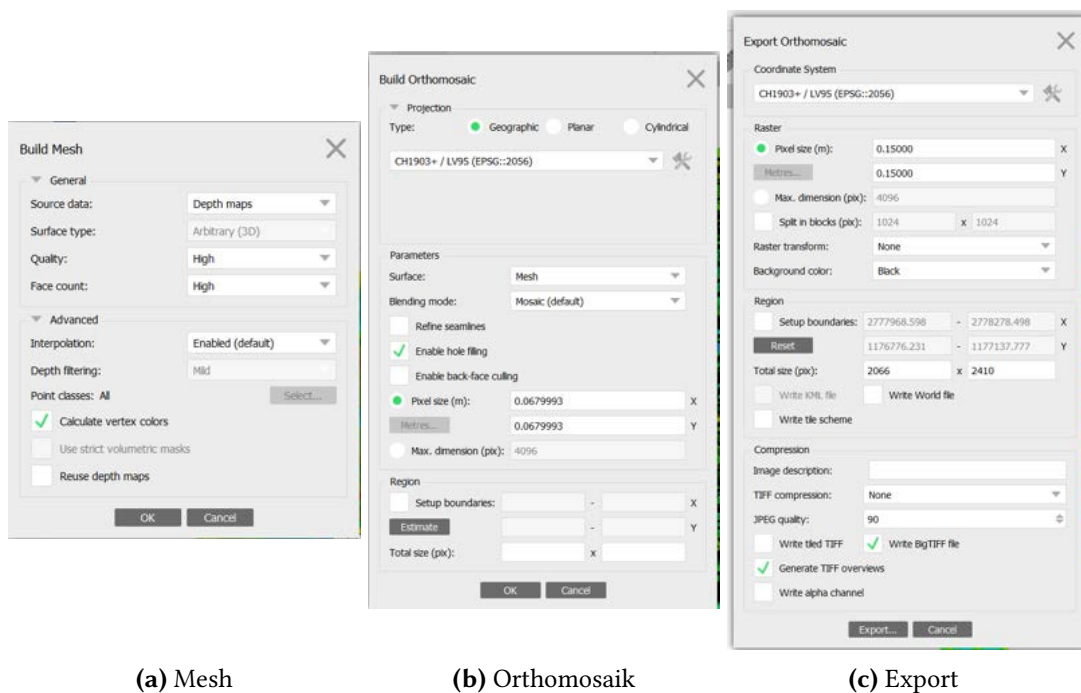


Abb. B.20. Im Bild a) sind die verwendeten Einstellung zur Berechnung des Mesh, im Bild b) jene zur Berechnung des Orthomosaik, abgebildet. Bild c) zeigt die Exporteinstellungen. Damit ist es möglich, die absoluten Werte zu exportieren.

C. Evapotranspirationsmodell

C.1. Variablen

Ω_0 : Nadir-Sicht-Verklumpungsfaktor [=0.5]

θ : Sicht-Zenith-Winkel [0 rad]

f_θ : Anteil der Bildfeldes, welches mit Vegetation bedeckt ist[rad]

Ω_θ : Verklumpungsfaktor bei Radiometerbetrachtungswinkel

ϵ_{atmo} : Emissionsgrad der Atmosphäre [-]

ϵ_{ober} : Emissionsgrad des Bodens und der Vegetation [-]

τ : Transmissivität der Vegetation

d_0 : Verschiebungshöhe [m]

z_{0M} : Rauigkeitslänge für Implusübertragung [m]

z_{0H} : Rauigkeitslänge für fühlbare Wärmetübertragung[m]

h_C : Vegetationshöhe [m]

D: Verhältnis Vegetationshöhe zu Kronenbreite [3.5]

F: Blattflächenindex

f_g : Anteil grüner Vegetation [1]

s: Blattgrösse [0.15 m] [[108](#)]

α : Albedo [0.1]

RH: relative Luftfeuchtigkeit [%;-]

sp: Steigung der Sättigungsdruckkurve

e_a : effektiver Wasserdampfdruck [Pa]

ρ : Luftdichte [$\frac{kg}{m^3}$]

z: Meter über Meer [m]

R_{tL} : Gaskonstante der trockenen Luft [$287.0586 \frac{J}{kgK}$] [[122](#)]

C_p : spezifische Wärme bei konstantem Druck [$1004.834 \frac{J}{kgK}$] [[122](#)]

R_{MW} : Verhältnis zwischen molekularen Gewicht von Wasserdampf und trockener Luft [0.622]

T_C : Kronendachtemperatur [K; °C]
 T_{RAD} : von Drohne gemessene Temperatur [K; °C]
 T_S : Bodenoberflächentemperatur [K; °C]
 T_A : Temperatur auf 2m Höhe [K; °C]
 z_T : Höhe Messung Lufttemperatur [2m]
 T_{AC} : Temperatur innerhalb des Kronendachs [K; °C]
 h_M : Messhöhe für T_A und RH [m]

$H_{C,1}$: fühlbarer Wärmefluss der Vegetation berechnet unter Verwendung des Priestley-Taylor Parameter [$\frac{W}{m^2}$]
 $H_{C,2}$: fühlbarer Wärmefluss der Vegetation berechnet unter Verwendung von Temperaturwerten [$\frac{W}{m^2}$]
 H_S : fühlbarer Wärmefluss des Bodens [$\frac{W}{m^2}$]
 LE_C : Latenter Wärmefluss der Vegetation [$\frac{W}{m^2}$]
 LE_S : Latenter Wärmefluss des Bodens [$\frac{W}{m^2}$]

R_n : Netto-Strahlungsfluss [$\frac{W}{m^2}$]
 R_s : kurzwelliger Nettostrahlungsfluss [$\frac{W}{m^2}$]
 $R_{s,in}$: eingehende kurzwellige Strahlung [$\frac{W}{m^2}$]
 $R_{s,aus}$: ausgehende kurzwellige Strahlung [$\frac{W}{m^2}$]
 R_l : kurzwelliger Nettostrahlungsfluss [$\frac{W}{m^2}$]
 $R_{l,in}$: eingehende langwellige Strahlung [$\frac{W}{m^2}$]
 $R_{l,aus}$: ausgehende langwellige Strahlung [$\frac{W}{m^2}$]
 R_{ext} : extraterrestrische Strahlung [$\frac{W}{m^2}$]
 $R_{n,s}$: Netto-Strahlung, welche den Boden erreicht [$\frac{W}{m^2}$]
 $R_{l,B}$: langwellige Strahlung ausgehend vom Boden [$\frac{W}{m^2}$]
 $R_{l,K}$: langwellige Strahlung ausgehend von Baumkronen [$\frac{W}{m^2}$]
 δR_n : Differenz zwischen lang- und kurzwelliger Strahlung [$\frac{W}{m^2}$]
 κ : Auslöschungskoeffizient [-] ω_1 : Sonnenwinkel zu Beginn der Messperiode [rad]
 ω_2 : Sonnenwinkel zum Ende der Messperiode [rad]
 ω_m : Sonnenwinkel zur Mitte der Messperiode [rad]
 ω_S : Sonnenwinkel bei Sonnenuntergang [rad]
 θ_a : Sonnenzenitwinkel [rad]
 t : Zeitpunkt des Messung [Stunde]
 t_1 : Dauer der Messperiode [1h]
 d_r : inverse relative Distanz zwischen Erde und Sonne

G_{Sk} : Solarkonstante [$0.0820 \frac{MJ}{m^2 min}$]

J: Tagesnummer des Messtages [290]

S_K : Jahreszeitenkorrektur der Sonnenzeit

b: Variable der Jahreszeitenkorrekturberechnung

N: maximal Tagesdauer [h]

n: tatsächliche Sonnenscheindauer [h]

a_s : Anteil der extraterrestrischen Strahlung, welche die Erde an einem bedeckten Tag erreicht (n=0) [0.25]

b_s : ergibt addiert mit a_s der Anteil an extraterrestrischer Strahlung, welche den Boden an klaren Tagen erreicht (n=N) [0.5]

δ : solare Dezimierung [rad]

L_Z : Längengrad des Zentrums der lokalen Zeitzone (Westgrade von Greenwich) [355.6481°]

L_m : Längengrad der Versuchsfläche (Westgrade von Greenwich) [$^\circ$]

ϕ : Breitengrad der Versuchsfläche [rad; $^\circ$]

u: Windgeschwindigkeit [$\frac{m}{s}$]

u_* : Windreibungsgeschwindigkeit [$\frac{m}{s}$]

h_u : Höhe Windmessung [2m]

u_s : Windgeschwindigkeit in Bodennähe (auf 0.05-0.2m Höhe) [$\frac{m}{s}$]

u_c : Windgeschwindigkeit oberhalb des Kronendachs [$\frac{m}{s}$]

k: Karman-Konstante [0.4]

$\Psi_M(\zeta_{1/2})$: Monin-Obukhov Stabilitätskorrekturfunktion für den Impuls

$\Psi_H(\zeta_{1/2})$: Monin-Obukhov Stabilitätskorrekturfunktion für die Wärme

R_A : aerodynamischer Widerstand des Wärmetransports zu der Erdoberfläche [$\frac{s}{m}$]

R_S : Widerstand des Wärmetransports von der Erdoberfläche [$\frac{s}{m}$]

R_X : Widerstand des Kronendachs [$\frac{s}{m}$]

σ : Stefan-Boltzmann-Konstante [$5.670374 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$]

α_{PT} : Priestley-Taylor Parameter [1.26]

γ : psychometrische Konstante

g: Gravitationskonstante [$9.81 \frac{m}{s^2}$]

C' : Konstante, welche zur Berechnung von R_X benötigt wird [$=90 \frac{s^{\frac{1}{2}}}{m}$]

C.2. Evapotranspirationsmodell

Zur Modellierung der Evapotranspiration wurde das Vorgehen nach [Guzinski et al. \(2014\)](#) verwendet. Anders als im Vorgang von [Hoffmann et al. \(2016\)](#) wurde die Bodentemperatur T_S nicht aus den Thermaldrohnenaufnahmen berechnet, sondern aus den Messwerten der Thermalkamera bezogen. Die Berechnungen wurden so lange wiederholt bis sich die Monin-Obukhov-Länge stabilisiert. Der erste Teil des Modells, die Berechnung der lang- und kurzwelligen Strahlung, wurde einmal berechnet und blieb während allen Wiederholungen gleich. Das gleiche galt für den normalisierter differenzierter Vegetationsindex (NDVI), Blattflächenindex (LAI) und f_θ sowie für die Rauigkeitslängen und die Verschiebungshöhe. Der NDVI wurde mit Sentinel 2-Aufnahmen berechnet ([Kap. 2.3.3](#)). LAI (F) wurde nach [Saito et al. \(2001\)](#) basierend auf dem NDVI berechnet berechnet.

$$F = 0.57 \exp(2.33NDVI) \quad (\text{Gl. 3.1})$$

$$\Omega_\theta = \frac{\Omega_0}{\Omega_0 + (1 - \Omega_0) \exp(-2.2\theta^{3.8-0.46D})} \quad (\text{Gl. 3.2})$$

$$f_\theta = 1 - \exp\left(\frac{-0.5\Omega_\theta F}{\cos(\theta)}\right) (\max.f_\theta a \leq b0.95) \quad (\text{Gl. 3.3})$$

Aus [Norman et al. \(2000\)](#):

$$d_0 = 0.65h_C \quad (\text{Gl. 3.4})$$

$$z_{0M} = 0.13h_C \quad (\text{Gl. 3.5})$$

$$z_{0H} = \frac{z_{0M}}{\exp(2)} \quad (\text{Gl. 3.6})$$

Danach wurde die Strahlung berechnet. Dabei wurde zwischen langwelliger und kurzwelliger Strahlung unterschieden.

$$R_n = (R_{s,in} - R_{s,aus}) + (R_{l,in} - R_{l,aus}) \quad (\text{Gl. 3.7})$$

$$R_s = R_{s,in} - R_{s,aus} = R_{s,in}(1 - \alpha) \quad (\text{Gl. 3.8})$$

$$R_l = R_{l,in} - R_{l,aus} \quad (\text{Gl. 3.9})$$

$$R_{l,in} = \epsilon_{atmo} \sigma T_A^4 \quad (\text{Gl. 3.10})$$

$$R_{l,aus} = \epsilon_{surf} \sigma T_{RAD}^4 + R_{l,in}(1 - \epsilon_{surf}) \quad (\text{Gl. 3.11})$$

$$R_l = \epsilon_{ober} \epsilon_{atmo} \sigma T_A^4 - \epsilon_{ober} \sigma T_{RAD}^4 \quad (\text{Gl. 3.12})$$

Für die Berechnung von $R_{s,in}$ und ϵ_{atmo} wurden die Formeln nach [Allen et al. \(1998\)](#) verwendet. Die Start- und Endzeiten wurden für die jeweiligen Versuchsflächen angepasst. Die tatsächliche Sonnenscheindauer wurde basierend auf Messungen auf dem Weissfluhjoch berechnet. Dafür wurde das Verhältnis zwischen tatsächlicher und maximaler Sonnenscheindauer verwendet. Die maximale Sonnenscheindauer wurde mit ArcGIS PRO berechnet.

$$R_{s,in} = (a_s + b_s * \frac{n}{N}) * R_{ext} \quad (\text{Gl. 3.13})$$

$$N = \frac{24}{\pi} * \omega_s \quad (\text{Gl. 3.14})$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\phi)\tan(\delta)] \quad (\text{Gl. 3.15})$$

$$R_{ext} = \frac{12 * 60}{\pi} * G_{Sk} * d_r * [(\omega_2 - \omega_1) * \sin(\phi) * \sin(\delta) + \cos(\phi) * \cos(\delta) * (\sin(\omega_2) - \sin(\omega_1))] \quad (\text{Gl. 3.16})$$

$$d_r = 1 + 0.033 * \cos(\frac{2\pi}{365} * J) \quad (\text{Gl. 3.17})$$

$$\delta = 0.409 * \sin(\frac{2\pi}{365} * J - 1.39) \quad (\text{Gl. 3.18})$$

$$\omega_m = \frac{\pi}{12} [(t + 0.06667(L_z - L_m) + S_K) - 12] \quad (\text{Gl. 3.19})$$

$$\omega_1 = \omega - \frac{\pi * t_1}{24} \quad (\text{Gl. 3.20})$$

$$\omega_2 = \omega + \frac{\pi * t_1}{24} \quad (\text{Gl. 3.21})$$

$$S_K = 0.1645 * \sin(2b) - 0.1225 * \cos(b) - 0.025 * \sin(b) \quad (\text{Gl. 3.22})$$

$$b = \frac{2 * \pi * (J - 81)}{364} \quad (\text{Gl. 3.23})$$

War $\omega < -\omega_s$ oder $\omega > \omega_s$ wurde R_s als null angenommen. Dies bedeutet nämlich, dass sich die Sonne unter dem Horizont befindet [123]. ϵ_{ober} wurde basierend auf der Formel von Stisen et al. (2007) berechnet.

$$\epsilon_{atmo} = 1.24 \left(\frac{e_a}{T_A} \right)^{0.14286} \quad (\text{Gl. 3.24})$$

$$e_a = 0.6108 \exp \left(\frac{17.27 * T_{Tau}}{T_{Tau} + 237.3} \right) \quad (\text{Gl. 3.25})$$

$$T_{Tau} = \frac{237.3 * \ln \frac{RH}{100} + \frac{17.27 * T_A}{237.3 + T_A}}{17.27 - \ln \frac{RH}{100} + \frac{17.27 * T_A}{237.3 + T_A}} \quad (\text{Gl. 3.26})$$

$$\epsilon_{ober} = 0.08182 * NDVI + 0.93773 \quad (\text{Gl. 3.27})$$

Ab hier beginnt der iterative Teil des Modells. Für diesen wurde immer mit der im vorherigen Durchgang berechneten Monin-Obukhov-Länge gerechnet. Im ersten Durchgang wurde die Atmosphäre als stabil betrachtet und L somit als $\pm\infty$ definiert [20]. Die Formel für u_* wurde angepasst [86]. Wenn $\zeta < 0$, wurde anstelle von ζ y verwendet. y war jedoch auf ein Minimum von b^{-3} limitiert. Wenn L gegen unendlich tendiert, wurde die Stabilitätskorrekturfunktion auf 0 gesetzt. Dies war im ersten Durchgang der Fall.

Für R_A wurde bei stabilen Bedingungen dieselbe Gleichung für die Berechnung von Ψ_M wie für u_* verwendet. War die Atmosphäre instabil, wurde die Gleichung angepasst. Die Berechnung von R_A stammt von Norman et al. (2000).

$$R_A = \frac{[\ln(\frac{h_u - d_0}{z_{OM}}) - \Psi_M(\frac{h_u - d_0}{L})][\ln(\frac{h_M - d_0}{z_{OH}}) - \Psi_H(\frac{h_M - d_0}{L})]}{uk^2} \quad (\text{Gl. 3.28})$$

$$(\text{Gl. 3.29})$$

$$\Psi_M(\zeta) = -6.1 \ln(\zeta + (1 + \zeta^{2.5})^{\frac{1}{2.5}}), \zeta \geq 0 \quad (\text{Gl. 3.30})$$

$$\Psi_M(y) = \ln(a + y) - 3by^{\frac{1}{3}} + \frac{ba^{\frac{1}{3}}}{2} \ln\left[\frac{(1+x)^2}{1-x+x^2}\right] + 3^{\frac{1}{2}} ba^{\frac{1}{3}} \tan^{-1}\left[\frac{2x-1}{3^{0.5}}\right] + \Psi_0, \zeta < 0 \quad (\text{Gl. 3.31})$$

$$\zeta = \frac{h_u - d_0}{L} \quad (\text{Gl. 3.32})$$

$$y = -\zeta \quad (\text{Gl. 3.33})$$

$$x = \left(\frac{y}{a}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Gl. 3.34})$$

$$\Psi_0 = -\ln(a) + 3^{0.5} ba^{\frac{1}{3}} \frac{\pi}{6} \quad (\text{Gl. 3.35})$$

$$(\text{Gl. 3.36})$$

$$\Psi_H(y) = \frac{1-d}{n} \ln\left(\frac{c+y^n}{c}\right), \zeta < 0 \quad (\text{Gl. 3.37})$$

$$\zeta = \frac{h_M - d_0}{z_{OH}} \quad (\text{Gl. 3.38})$$

$$y = -\zeta \quad (\text{Gl. 3.39})$$

$$(\text{Gl. 3.40})$$

wobei $a = 0.33$

$$b = 0.41$$

$$c = 0.33 \quad (\text{Gl. 3.41})$$

$$d = 0.057$$

$$n = 0.78$$

Der Widerstand des Wärmetransports der Erdoberfläche R_s wurde basierend auf [Norman et al. \(2000\)](#) berechnet. Dabei wurde die Windgeschwindigkeit direkt oberhalb des Boden berechnet. Dafür wurde h_s auf 0.05m gesetzt. R_s wurde im ersten Durchgang anders berechnet als in den darauf folgenden.

$$R_S = \frac{1}{c_T + b * u_s} \quad (\text{Gl. 3.42})$$

$$R_S = \frac{1}{c_T * (T_S - T_C)^{\frac{1}{3}} + b u_s} \quad (\text{ab 2.Durchgang, wenn } T_S - T_C > 0) \quad (\text{Gl. 3.43})$$

$$R_S = \frac{1}{c_T * (1)^{\frac{1}{3}} + b u_s} \quad (\text{ab 2.Durchgang, wenn } T_S - T_C < 0) \quad (\text{Gl. 3.44})$$

$$u_s = u_c \exp(-a_u(1 - \frac{h_S}{h_C})) \quad (\text{Gl. 3.45})$$

$$u_c = \ln(\frac{h_C - d_0}{z_{0M}}) \frac{u_*}{k} \quad (\text{Gl. 3.46})$$

$$u_* = \frac{k u}{\ln \frac{h_u}{z_{OH}}} \quad (\text{Gl. 3.47})$$

$$a_u = 0.28(F * \Omega_0)^{\frac{2}{3}} * h_C^{\frac{1}{3}} * s^{-\frac{1}{3}} \quad (\text{Gl. 3.48})$$

$$LAI > 2 \Rightarrow c_T = 0.004 \quad (\text{Gl. 3.49})$$

$$LAI < 2 \Rightarrow c_T = 0.006 \quad (\text{Gl. 3.50})$$

$$\text{wobei } b = 0.012$$

$$c = 0.0025$$

R_X wurde basierend auf der Windgeschwindigkeit auf der Höhe von $d_0 + z_{0M}$ berechnet. Dafür wurden dieselben Gleichungen wie für R_S verwendet. Wobei h_S durch $d_0 + z_{0M}$ ersetzt wurde. Die Gleichung für R_X basiert auf [Norman et al. \(1995\)](#).

$$R_X = \frac{C'}{F} \left(\frac{s}{u_d} \right)^{0.5} \quad (\text{Gl. 3.51})$$

$$\text{wobei } C' = 90 \frac{s^{1/2}}{m}$$

Da im ersten Durchgang die Temperaturen T_C und T_{AC} noch nicht bekannt waren, wurde H_C anhand von ΔR_n berechnet. Wobei ΔR_n beim ersten Durchgang anders berechnet wurde als in den darauf folgenden.

$$H_{C,1} = \Delta R_n (1 - \alpha_{PT} f_g \frac{sp}{sp + \gamma}) \quad (\text{Gl. 3.52})$$

$$\Delta R_n = R_n [1 - \exp(\frac{-\kappa F \Omega_0}{\sqrt{2 \cos(\theta_s)}})] \quad (1. \text{Durchgang}) \quad (\text{Gl. 3.53})$$

$$\theta_s = (\omega_1 + \omega_2)/2 \quad (\text{Gl. 3.54})$$

$$LAI < 2 \Rightarrow \kappa = 0.8 \quad (\text{Gl. 3.55})$$

$$LAI > 2 \Rightarrow \kappa = 0.45 \quad (\text{Gl. 3.56})$$

$$\gamma = \frac{cp * p}{R_{MW} \lambda} \quad (\text{Gl. 3.57})$$

$$sp = \frac{4098 [0.6108 \exp(\frac{17.27 T_A}{T + 273.3})]}{(T_A + 273.3)^2} \quad (\text{Gl. 3.58})$$

$$\Delta R_n = \Delta R_s + \Delta R_l \quad (\text{ab 2. Durchgang}) \quad (\text{Gl. 3.59})$$

$$\Delta R_s = R_s [1 - \exp(\frac{-\kappa F \Omega_0}{\sqrt{2 \cos(\theta_s)}})] \quad (\text{Gl. 3.60})$$

$$\Delta R_l = \tau (R_{l,in} + R_{l,B} - 2R_{l,k}) \quad (\text{Gl. 3.61})$$

$$R_{l,B} = \sigma T_S^4 \quad (\text{Gl. 3.62})$$

$$R_{l,k} = \sigma T_{RAD}^4 \quad (\text{Gl. 3.63})$$

$$\tau = 1 - \exp(-\kappa_L F) \quad (\text{Gl. 3.64})$$

$$LAI < 1 \Rightarrow \kappa_L = 0.95 \quad (\text{Gl. 3.65})$$

$$LAI > 1 \Rightarrow \kappa_L = 0.7 \quad (\text{Gl. 3.66})$$

$$(\text{Gl. 3.67})$$

Danach wurde H_C durch Verwendung der Temperaturen berechnet. Zur Berechnung der von T_C wurde $H_{C,1}$ verwendet.

$$T_C = T_{C,lin} + \Delta T_C \quad (\text{Gl. 3.68})$$

$$T_{C,lin} = \frac{\frac{T_A}{R_A} + \frac{T_R}{R_S(1-f_\theta)} + \frac{H_{C,1} R_X}{\rho c_p} (\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_S} + \frac{1}{R_X})}{\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_S} + \frac{f_\theta}{R_S(1-f_\theta)}} \quad (\text{Gl. 3.69})$$

$$\Delta T_C = \frac{T_R^4 - f_\theta T_{C,lin}^4 - (1 - f_\theta) T_D^4}{4(1 - f_\theta) T_D^3 (1 + \frac{R_S}{R_A}) + 4f_\theta T_{C,lin}^3} \quad (\text{Gl. 3.70})$$

$$T_D = T_{C,lin} (1 + \frac{R_S}{R_A}) - \frac{H_{C,1} R_X}{\rho c_p} (1 + \frac{R_S}{R_X} + \frac{R_S}{R_A}) - T_A \frac{R_S}{R_A} \quad (\text{Gl. 3.71})$$

Basierend auf den Temperaturen und Widerständen wurde die Temperatur innerhalb der Baumkronen (T_{AC}) berechnet.

$$T_{AC} = \frac{\frac{T_A}{R_A} + \frac{T_S}{R_S} + \frac{T_C}{R_X}}{\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_S} + \frac{1}{R_X}} \quad (\text{Gl. 3.72})$$

Aus den berechneten Widerständen und Temperaturen wurden die jeweiligen sensiblen Wärmeflüsse berechnet.

$$H_{C,2} = \rho * c_p \frac{T_C - T_{AC}}{R_X} \quad (\text{Gl. 3.73})$$

$$\rho = \frac{p}{R_{tL} * T_A} \quad (\text{Gl. 3.74})$$

$$p = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad (\text{Gl. 3.75})$$

$$H_S = \rho * c_p \frac{T_S - T_{AC}}{R_S} \quad (\text{Gl. 3.76})$$

Daraus wurden in einem weiteren Schritt die latenten Wärmeflüsse berechnet.

$$LE_S = R_{n,s} - G - H_S \quad (\text{Gl. 3.77})$$

$$G = 0.3R_{n,s} - 35 \quad (\text{Gl. 3.78})$$

$$R_{n,s} = R_n - \Delta R_n \quad (\text{Gl. 3.79})$$

$$LE_C = \Delta R_n - H_C \quad (\text{Gl. 3.80})$$

Schlussendlich wurden die Gesamtsummen beider Wärmeflüsse aus dem Boden und der Vegetation berechnet.

$$LE = LE_C + LE_S \quad (\text{Gl. 3.81})$$

$$H = H_{C,2} + H_S \quad (\text{Gl. 3.82})$$

Aus den berechneten Werten wurde in einem letzten Schritt die Monin-Obukhov-Länge berechnet.

$$L = - \frac{u_*^3 \rho c_p T_A}{kgH} \quad (\text{Gl. 3.83})$$

Wird LE_S negativ, würde dies einer Kondensierung im Boden entsprechen [125], was jedoch eher unwahrscheinlich ist. Damit diesem Problem Abhilfe geschaffen werden konnte, wurde der Priestley-Taylor Parameter α_{PT} bei negativen LE_S solange schrittwei-

se verkleinert, bis dieser positiv wurde. Erreicht α_{pT} den Wert null, wurde angenommen, dass keine Evaporation oder Transpiration stattfand [39]. Für diesen Fall wurde $LE=0$, H_c mit ΔR_n gleichgesetzt und H wurde limitiert auf $H \leq R_n - G$ [39].



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Eigenständigkeitserklärung

Die unterzeichnete Eigenständigkeitserklärung ist Bestandteil jeder während des Studiums verfassten Semester-, Bachelor- und Master-Arbeit oder anderen Abschlussarbeit (auch der jeweils elektronischen Version).

Die Dozentinnen und Dozenten können auch für andere bei ihnen verfasste schriftliche Arbeiten eine Eigenständigkeitserklärung verlangen.

Ich bestätige, die vorliegende Arbeit selbständig und in eigenen Worten verfasst zu haben. Davon ausgenommen sind sprachliche und inhaltliche Korrekturvorschläge durch die Betreuer und Betreuerinnen der Arbeit.

Titel der Arbeit (in Druckschrift):

Terrestrische und drohnenbasierte Aufnahmen als Grundlage zur Abschätzung der Waldstruktur und Evapotranspiration in rutschungsexponierten Gebirgswäldern.

Verfasst von (in Druckschrift):

Bei Gruppenarbeiten sind die Namen aller Verfasserinnen und Verfasser erforderlich.

Name(n):

Furrer

Vorname(n):

Jens

Ich bestätige mit meiner Unterschrift:

- Ich habe keine im Merkblatt „[Zitier-Knigge](#)“ beschriebene Form des Plagiats begangen.
- Ich habe alle Methoden, Daten und Arbeitsabläufe wahrheitsgetreu dokumentiert.
- Ich habe keine Daten manipuliert.
- Ich habe alle Personen erwähnt, welche die Arbeit wesentlich unterstützt haben.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die Arbeit mit elektronischen Hilfsmitteln auf Plagiate überprüft werden kann.

Ort, Datum

Giswil, 14.05.2020

Unterschrift(en)

Bei Gruppenarbeiten sind die Namen aller Verfasserinnen und Verfasser erforderlich. Durch die Unterschriften bürgen sie gemeinsam für den gesamten Inhalt dieser schriftlichen Arbeit.