

Machbarkeitsstudie zur fernerkundlichen Erfassung der Vegetationsstruktur für eine Quantifizierung von Ökosystemleistungen durch Marschpflanzen

STZ Geoinformatik Rostock 

Autoren: Dr.-Ing. Görres Grenzdörffer und Dipl. Geogr. Florian Beyer

Mitwirkung: Nils Koldrack, MSc.; Dipl.-Ing. (FH) Matthias Naumann; Ferdinand Vettermann, MSc. und Eva Witkorovski



Rostock, Juli 2018

Im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde:
U2/Z1/064.31-037/17/932

DOI:
10.5675/tibass2018_ErfassungPflanzeigenschaftenFernerkundung

Inhaltsverzeichnis

1	Hintergrund/Anlass	13
1.1	Fragestellungen	14
2	Datenerhebung	15
2.1	Probedesign in den Untersuchungsflächen.....	15
2.2	Erhebung der Ground truth-Daten.....	16
2.2.1	Geländehöhen	16
2.2.2	Pflanzeigenschaften	16
2.2.3	Zeitlicher Ablauf der Geländemessungen	17
2.3	UAS-Befliegung.....	18
2.3.1	Verwendete Technik.....	18
2.3.2	Übersicht der erfassten UAS-Bildflugdaten.....	20
2.3.3	Photogrammetrische Datenprozessierung zur Georeferenzierung	22
2.4	Terrestrisches Laserscanning	23
2.4.1	Stand der Forschung zur Erfassung von Vegetation.....	23
2.4.2	Verwendete Technik und Methodik.....	24
2.4.3	Zeitlicher Ablauf der TLS-Datenerfassung	26
3	Datenauswertung und Ergebnisse	26
3.1	Verteilung der Dominanzbestände	26
3.2	Zusammenhänge zwischen den terrestrisch erhobenen Daten	28
3.2.1	Balje	29
3.2.2	Hollerwettern	39
3.2.3	Krautsand	46
3.2.4	Statistischer Vergleich der Geländemesswerte aller Standorte.....	51
3.3	Produkte der UAS-Befliegungen.....	57
3.4	Übersicht der photogrammetrischen Produkte der UAS-Bildflüge.....	57
3.4.1	Orthomosaik und digitales Oberflächenmodell	58
3.4.2	Balje	59
3.4.3	Pan-Sharpening-Schärfen der multispektralen Daten.....	64
3.4.4	Vegetationsindices NDVI und VARI	66
3.5	Auswertung der TLS-Daten.....	67
3.5.1	Visuelle Erfassung von Pflanzenparametern.....	68
3.5.2	Visuelle Ermittlung und Zählung einzelner Pflanzen	72
3.5.3	Ableitung / Berechnung der Punktdichte	72
3.5.4	Erstellung und Bewertung digitaler Geländemodelle aus den TLS-Daten	73
3.5.5	Ableitung der Pflanzenhöhe aus TLS-Daten	74
3.5.6	Ableitung der Anzahl der Triebe / Stängel aus TLS-Daten.....	75

3.5.7	Vergleich zwischen den Oberflächenmodellen aus TLS-Daten und UAS	76
3.6	Erstellung und Genauigkeit digitaler Geländemodelle (Fragestellung 2b und 2c).....	77
3.7	Zusammenhänge zwischen den terrestrisch erhobenen und den UAS-Daten	81
3.7.1	Balje	82
3.7.2	Hollerwettern	100
3.7.3	Krautsand	106
3.8	Veränderung der Vegetationstruktur im Übergang Sommer-Herbst	109
3.8.1	Balje	109
3.8.2	Hollerwettern	113
4	Schlussfolgerungen und Empfehlungen für weitere Studien.....	115
4.1	Erfassung der saisonalen Veränderung der Pflanzenstruktur und deren Auswirkung auf die Topographie	115
4.2	UAS-Photogrammetrie zur Erfassung von morphologisch wichtigen Mikrostrukturen	116
4.3	Überflutungsdauer und Überflutungshöhe.....	117
4.4	Messung und Verwendung der Pflanzenhöhe und Stängeldichte	122
4.5	Potenzial und Grenzen des Thermalsensors	124
4.6	Potenzial und Grenzen des terrestrischen Laserscanners zur Erfassung von Röhrichtpflanzen	125
5	Literatur.....	127
	Anhang	130

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lage der drei Untersuchungsgebiete an der Unterelbe	14
Abbildung 2: Probedesign am Beispiel von Krautsand.....	16
Abbildung 2: Starrflügler UAS Ebee+ mit RTK-GPS und unterschiedlichen Sensoren.....	18
Abbildung 3: Definition der Multispektralkanäle des Sequoia Sensors	19
Abbildung 4: 4 m hohes Stativ am Standort Balje im Einsatz.....	25
Abbildung 5: Kombinierte Targets für TLS und UAS-Bildflüge auf einem Vermessungsstab oder einem Dreibein montiert.....	26
Abbildung 6: Zonierung der dominanten Pflanzenarten am Beispiel von Balje. Random forest Klassifikation (Genauigkeit = 96.3 %).	27
Abbildung 7: Zonierung der dominanten Pflanzenarten am Beispiel von Hollerwettern. Random forest Klassifikation (Genauigkeit = 99 %).	28
Abbildung 8: Überblick Standort Balje mit sichtbarer Vegetationskante zwischen Strandsimsen und Schilf	30
Abbildung 9: Schrägaufnahme Balje 12.09.2018 mit klar erkennbar lagernden Pflanzen an der MThw Linie und Querrillen in der Strandsimsenzone sowie die vorgelagerte Teichsimsenzone mit Algenbewuchs	30
Abbildung 10: lichte und niedrige Strandsimsen am Messpunkt B_26R (ca. 1 m hoch und etwa 5 m vom Ufer entfernt)	30
Abbildung 11: Dichte und hohe Strandsimsen am Messpunkt 9R, Höhe ca. 1,60 m, Entfernung zum Ufer etwa 30 m)	30
Abbildung 12: Teichsimsen am Messpunkt B_97 auf Algent Teppich, Pflanzenhöhe bis 55 cm	30
Abbildung 13: Schilf am Messpunkt B_99 mit Gras-Unterwuchs (Messpunkt an lichter Stelle, Schilf ca. 2m hoch).....	30
Abbildung 14: Boxplots ausgewählter Pflanzen-Parameter in Balje (Anzahl = Anzahl der Stängel auf 0,16 m ² ., Hoehe = Pflanzenhöhe gemessen im Gelände, D_H = Durchschnittliche Höhe gemessen im Labor (n = 10 pro Standort), D_DM = Durchschnittlicher Stängeldurchmesser am Boden, D_FM = Durchschnittliche Frischmasse, D_TM = Durchschnittliche Trockenmasse, WG = Wassergehalt in den Pflanzen, PAR-Pflanze = Photosynthetisch aktive Strahlung im Pflanzenbestand, PAR-Sonne = Photosynthetisch aktive Strahlung über Pflanzenbestand, PAR % = Relative photosynthetisch aktive Strahlung im Bestand)	32
Abbildung 15: Korrelationsmatrix für alle Parameter am Standort Balje. Der Korrelationskoeffizient zeigt den Zusammenhang bzw. die Abhängigkeit zweier Variablen von -1 bis 1 an, wobei 0 (weiß) keinen, 1 (rot) einen positiven und -1 (dunkelblau) einen negativen Zusammenhang angeben (Abkürzungen siehe Tabelle 4).	33
Abbildung 16: Scatter-Matrixplot der Parameter für Balje (Stb = Strandsimse, Sab = Teichsimse), Abkürzungen siehe Tabelle 4.	34
Abbildung 17: Gegenüberstellung der Messung der Pflanzenhöhe im Labor und im Gelände differenziert auf die dominante Pflanzenart ($y = 0.7122x + 16.7364$).	35
Abbildung 18: Regression der Pflanzenhöhe (Labor; $y = 72.7299x + 29.3352$), Wassergehalt ($y = -26.5491x + 88.9928$) und Stängeldurchmesser ($y = -2.1244x + 7.8002$) zur orthometrischen Höhe. ..	35
Abbildung 19: Möglicher Zusammenhang der PAR-Werte mit der Höhe des Pflanzenbestandes (links: $y = -1.2890x + 151.8153$; rechts: $y = 201.055 * e^{-0.0237x}$).....	36
Abbildung 20: Regression zwischen der Trockenmasse (D_TM, $y = 0.0368x - 1.8141$) und der Pflanzenhöhe (Hoehe, $y = 0.0495x - 2.4448$)	37
Abbildung 21: Korrelation aller Pflanzenparameter für die Zone der Strandsimse in Balje und Regressionen zwischen der orthometrischen Höhe und der Stängeldurchmesser ($y = -3.4180x + 9.2253$) und des Wassergehaltes ($y = -10.9696x + 73.6556$), Abkürzungen siehe Tabelle 4.	38
Abbildung 22: Höhenverlauf und Höhenzonierung der Dominanzarten am Standort Hollerwettern aufgetragen auf vier Vermessungsprofilen des WSA Hamburg	39

Abbildung 23: Marschkante in Hollerwettern mit dichtem Teichsimsenbewuchs	40
Abbildung 24: Schrägaufnahme Standort Hollerwettern mit deutlich sichtbarer Grenze zwischen Schilf und Strandsimse, als auch Rohr-Glanzgrasnesten	40
Abbildung 25: Übergang Teichbinse zu Strandsimse am Messpunkt H 25R	40
Abbildung 26: Dichte Strandsimsen mit beginnender Seneszenz am Messpunkt 34R	40
Abbildung 27: Rohr-Glanzgras am Messpunkt Hreed	41
Abbildung 28: Schilf am Messpunkt H_23	41
Abbildung 29: Boxplots ausgewählter Pflanzen-Parameter in Hollerwettern (Anzahl = Anzahl der Stängel auf 0,16 m ² ., Hoehe = Pflanzenhöhe gemessen im Gelände, D_H = Durchschnittliche Höhe gemessen im Labor (n = 10 pro Standort), D_DM = Durchschnittlicher Stängeldurchmesser am Boden, D_FM = Durchschnittliche Frischmasse, D_TM = Durchschnittliche Trockenmasse, WG = Wassergehalt in den Pflanzen, PAR-Pflanze = Photosynthetisch aktive Strahlung im Pflanzenbestand, PAR-Sonne = Photosynthetisch aktive Strahlung über Pflanzenbestand, PAR % = Relative photosynthetisch aktive Strahlung im Bestand)	42
Abbildung 30: Korrelationsmatrix für alle Parameter am Standort Hollerwettern, Abkürzungen siehe Tabelle 4.	43
Abbildung 31: Scatter-Matrixplot ausgewählter Parameter für Hollerwettern (Stb = Strandsimse, Sab = Teichsimse, Typ = Typha), Abkürzungen siehe Tabelle 4	44
Abbildung 32: Regressionen der Geländehöhe (Orth_Hoehe) mit verschiedenen Parametern in Hollerwettern (Hoehe: $y = 70.2139x + 112.5524$, D_H: $y = 37.2078x + 95.8080$, D_TM: $y = 2.4838x + 1.7890$, WG: $y = -15.2472x + 86.0658$, PAR %: $y = -21.9128x + 30.9866$, D_DM: $y = -2.8442x + 9.6580$), Abkürzungen siehe Tabelle 4.	45
Abbildung 33: Lineare ($y = -0.2581x + 56.6621$) und exponentielle ($y = 352.001 * e^{-0.02073x}$) Regression zwischen Pflanzenhöhe (Gelände) und photosynthetisch aktiver Strahlung (PAR %) in Hollerwettern	45
Abbildung 34: Regression ($y = 0.0569x - 3.3324$) zwischen Pflanzenhöhe (D_H, Gelände) und mittlerer Trockenmasse pro Pflanze (D_TM)	46
Abbildung 35: Höhenverlauf und Höhenzonierung der Dominanzarten am Standort Krautsand aufgetragen auf vier Vermessungsprofile des WSA Hamburg	46
Abbildung 36: Ufervegetation Strandsimse, Standort Krautsand	47
Abbildung 37: Standort Krautsand aus der Schrägperspektive, Vegetationszonierung des Standorts, inkl. Schilfgürtel	47
Abbildung 38: Abgestorbener Unterwuchs bzw. angespülte Pflanzenreste auf der Höhe des mittleren Hochwassers	47
Abbildung 39: Messpunkt 22R – lockere Strandsimsen mit beginnender Seneszenz	47
Abbildung 40: Boxplots ausgewählter Pflanzen-Parameter in Krautsand (Hoehe = Pflanzenhöhe gemessen im Gelände, D_H = Durchschnittliche Höhe gemessen im Labor (n = 10 pro Standort), PAR-Pflanze = Photosynthetisch aktive Strahlung im Pflanzenbestand, PAR-Sonne = Photosynthetisch aktive Strahlung über Pflanzenbestand, PAR % = Relative photosynthetisch aktive Strahlung im Bestand)	48
Abbildung 41: Korrelationsmatrix für alle Parameter am Standort Krautsand und Regressionen der Geländehöhe (Orth_Hoehe) mit der Höhe der Pflanzen im Gelände (Hoehe, $y = 79.0091x + 53.0344$) und im Labor (D_H, $y = 69.7750x + 35.8978$), sowie zwischen der Pflanzenhöhe (Labor) und photosynthetisch aktiver Strahlung (PAR %, $y = -0.2464x + 42.2475$).	51
Abbildung 42: Scatter-Matrixplot aller Parameter für Krautsand, Abkürzungen siehe Tabelle 4.	51
Abbildung 95: Pflanzenhöhen, gemessen im Gelände und im Labor, aller drei Standorte (in cm)	52
Abbildung 96: Stängeldurchmesser, gemessen im Labor, aller drei Standorte (in mm)	52
Abbildung 97: Geländehöhen aller drei Standorte (in m)	52
Abbildung 98: Stängelanzahl pro 0,16 m ² aller drei Standorte	52

Abbildung 99: Trocken- und Frischmasse pro Pflanze der Standorte Balje und Hollerwettern (g pro Pflanze).....	53
Abbildung 100: Wassergehalt (WG) pro Pflanze (in %) für Balje (B), gemessen am 12.9. und Hollerwettern (H), gemessen am 25.9.	53
Abbildung 101: Photosynthetisch aktive Strahlung (par) (in %) aller drei Standorte (Balje, Hollerwettern und Krautsand)	53
Abbildung 102: Korrelationsmatrix für alle Parameter über alle drei Standorte (n = 146), zumindest D_H und D_DM erläutern oder Verweis zu Abb. 103,....	54
Abbildung 103: Scatter-Matrixplot für alle Parameter aller Standorte (n = 146) und Regressionen der Bestandsdichte (Anzahl), Geländehöhe (Orth_Hoehe) mit der Höhe der Pflanzen im Gelände (Hoehe) und im Labor (D_H), sowie zwischen der Pflanzenhöhe (Labor) und photosynthetisch aktiver Strahlung (PAR %).....	55
Abbildung 104: Korrelationsmatrix für alle Parameter von Hollerwettern und Balje (n = 98)	56
Abbildung 63: Orthomosaik der UAS-Befliegung Balje vom 11.8.2017, RGB-Kamera (S.O.D.A) mit einer Bodenauflösung von 1.5 cm.	59
Abbildung 64: Ausschnitt des Orthomosaiks UAS-Befliegung Balje vom 11.8.2017, RGB-Kamera (S.O.D.A) mit einer Bodenauflösung von 1.5 cm.	59
Abbildung 65: Digitales Oberflächenmodell der UAS-Befliegung Balje vom 11.8.2017, abgeleitet aus RGB-Kamera (S.O.D.A) mit einer Bodenauflösung von 1.5 cm.	59
Abbildung 66: Ausschnitt des Digitales Oberflächenmodells der UAS-Befliegung Balje vom 11.8.2017, abgeleitet aus RGB-Kamera (S.O.D.A) mit einer Bodenauflösung von 1.5 cm.	59
Abbildung 67: Orthomosaik der UAS-Befliegung Balje vom 11.8.2017, Multispektralkamera Sequoia mit einer Bodenauflösung von 7 cm.	59
Abbildung 68: Ausschnitt des Orthomosaiks UAS-Befliegung Balje vom 11.8.2017, Multispektralkamera Sequoia mit einer Bodenauflösung von 7 cm.	59
Abbildung 69: Orthomosaik der UAS-Befliegung Balje vom 12.9.2017, Thermalkamera Thermomap mit einer Bodenauflösung von 15 cm.	60
Abbildung 70: Ausschnitt des Orthomosaiks UAS-Befliegung Balje vom 12.9.2017, Thermalkamera Thermomap mit einer Bodenauflösung von 15 cm.	60
Abbildung 71: Orthomosaik der UAS-Befliegung Balje vom 12.9.2017, RGB-Kamera (DJI) Schrägaufnahmen mit einer Bodenauflösung von 1.8 cm.	60
Abbildung 72: Ausschnitt des Orthomosaiks UAS-Befliegung Balje vom 12.9.2017, RGB-Kamera (DJI) Schrägaufnahmen mit einer Bodenauflösung von 1.8 cm.	60
Abbildung 51: Orthomosaik der UAS-Befliegung Hollerwettern vom 10.8.2017, RGB-Kamera (S.O.D.A) mit einer Bodenauflösung von 1.5 cm.	60
Abbildung 52: Ausschnitt des Orthomosaiks UAS-Befliegung Hollerwettern vom 10.8.2017, RGB-Kamera (S.O.D.A) mit einer Bodenauflösung von 1.5 cm.	60
Abbildung 53: Digitales Oberflächenmodell der UAS-Befliegung Hollerwettern vom 10.8.2017, abgeleitet aus RGB-Kamera (S.O.D.A) mit einer Bodenauflösung von 7.5 cm.	61
Abbildung 54: Ausschnitt des Digitales Oberflächenmodells der UAS-Befliegung Hollerwettern vom 10.8.2017, abgeleitet aus RGB-Kamera (S.O.D.A) mit einer Bodenauflösung von 7.5 cm.	61
Abbildung 55: Orthomosaik der UAS-Befliegung Hollerwettern vom 10.8.2017, Multispektralkamera Sequoia mit einer Bodenauflösung von 7 cm.	61
Abbildung 56: Ausschnitt des Orthomosaiks UAS-Befliegung Hollerwettern vom 10.8.2017, Multispektralkamera Sequoia mit einer Bodenauflösung von 7 cm.	61
Abbildung 57: Orthomosaik der UAS-Befliegung Hollerwettern vom 10.8.2017, Thermalkamera Thermomap mit einer Bodenauflösung von 15 cm.	61
Abbildung 58: Ausschnitt des Orthomosaiks UAS-Befliegung Hollerwettern vom 10.8.2017, Thermalkamera Thermomap mit einer Bodenauflösung von 15 cm.	61

Abbildung 59: Orthomosaik der UAS-Befliegung Hollerwettern vom 25.9.2017, RGB-Kamera (DJI) mit einer Bodenauflösung von 1.8 cm.....	62
Abbildung 60: Ausschnitt des Orthomosaiks UAS-Befliegung Hollerwettern vom 25.9.2017, RGB-Kamera (DJI) mit einer Bodenauflösung von 1.8 cm.	62
Abbildung 61: Digitales Oberflächenmodell der UAS-Befliegung Hollerwettern 25.9.2017, RGB-Kamera (DJI) mit einer Bodenauflösung von 6 cm.	62
Abbildung 62: Ausschnitt des Digitales Oberflächenmodells der UAS-Befliegung Hollerwettern 25.9.2017, RGB-Kamera (DJI) mit einer Bodenauflösung von 6 cm.....	62
Abbildung 43: Orthomosaik der UAS-Befliegung Krautsand vom 8.8.2017, RGB-Kamera (S.O.D.A) mit einer Bodenauflösung von 1.5 cm.....	62
Abbildung 44: Ausschnitt des Orthomosaiks UAS-Befliegung Krautsand vom 8.8.2017, RGB-Kamera (S.O.D.A) mit einer Bodenauflösung von 1.5 cm.	62
Abbildung 45: Digitales Oberflächenmodell der UAS-Befliegung Krautsand vom 8.8.2017, abgeleitet aus RGB-Kamera (S.O.D.A) mit einer Bodenauflösung von 7.5 cm.	63
Abbildung 46: Ausschnitt des Digitales Oberflächenmodells der UAS-Befliegung Krautsand vom 8.8.2017, abgeleitet aus RGB-Kamera (S.O.D.A) mit einer Bodenauflösung von 7.5 cm.....	63
Abbildung 47: Orthomosaik der UAS-Befliegung Krautsand vom 8.8.2017, Multispektralkamera Sequoia mit einer Bodenauflösung von 7 cm.....	63
Abbildung 48: Ausschnitt des Orthomosaiks UAS-Befliegung Krautsand vom 8.8.2017, Multispektralkamera Sequoia mit einer Bodenauflösung von 7 cm.....	63
Abbildung 49: Orthomosaik der UAS-Befliegung Krautsand vom 8.8.2017, Thermalkamera Thermomap mit einer Bodenauflösung von 15 cm.....	63
Abbildung 50: Ausschnitt des Orthomosaiks UAS-Befliegung Krautsand vom 8.8.2017, Thermalkamera Thermomap mit einer Bodenauflösung von 15 cm.....	63
Daher wurde in deskriptive Statistik einzelner Bänder des originalen Multispektralbildes (durchgezogene Linien), sowie des fusionierten Datensatzes (gestrichelte Linien) gegenübergestellt (Abbildung 73). Es sind klare Unterschiede in den Extremwerten (Min und Max) zu erkennen, jedoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass diese Werte Ausreißer sind. Aussagekräftiger sind dafür der Mittelwert (Mean) und die Standardabweichung (Sd). Da liegen die Werte deutlich näher beieinander, woraus geschlossen werden kann, dass die Fusion die Farbwerte nicht sehr stark verändert hat. Auffällig ist, dass die Werte im sichtbaren Bereich (Grün, Rot) der Kanäle 1 und 2 sehr dicht beieinander sind und die Differenzen im infraroten Bereich größer werden. Der Grund dafür könnte daran liegen, dass die Fusion am besten in dem Wellenlängenbereich funktioniert, der auch vom panchromatischen Kanal abgedeckt wird. Dies wird auch in der Literatur diskutiert (SIEGMANN et al. 2015). Dies ist ein Indiz dafür, dass Farbinformationen aus dem panchromatischen Datensatz in das Ergebnis einfließen.	66
Abbildung 73: Vergleich des originalen grob aufgelösten Multispektraldatensatzes mit dem fusionierten hochaufgelösten Multispektraldatensatz pro Kanal. (Min = Minimum, Sd = Standardabweichung, Mean = Mittelwert, Max = Maximum).....	66
Abbildung 74: Workflow der Vorverarbeitungsschritte und der thematische Auswertung der TLS-Daten inklusive verwendeter Software.....	68
Abbildung 75: Beispielhafte Darstellung der zu bewertenden Polygone im Scan 020 (links) und 066 (rechts).	69
Abbildung 76: Beispielhafte Höhenbestimmung bei direkter Draufsicht im Scan 020 (Ufernahe Salz-Teichsimen).....	69
Abbildung 77: Bestimmung der Stängeldurchmesser mit unterschiedlichen Segmentgrößen. Oben: 1 m x 1 m. Unten: 1 m x 0,25 m.	70
Abbildung 78: Schwierigkeiten bei der Bestimmung der Vegetationshöhen durch geringe Punktedichten (Scan: 020, 3r).	70
Abbildung 79: Pflanzenidentifizierung im Scan 027/2m.	72

Abbildung 80: TLS-Punktdichte um den Laserscanning Standort (Scan 065, Standort Hollerwettern vom 25.9.).....	73
Abbildung 81: TLS-Datenanalyse zur Klassifikation von Bodenpunkten (links: 3D-Punktwolke als Draufsicht, Mitte, Perspektivansicht, rechts klassifizierte Bodenpunkte)	74
Abbildung 82: TLS-Punktwolke, Scan 65 (Hollerwettern) in der Draufsicht und Profil.....	74
Abbildung 83: Berechnete Vegetationshöhe aus den TLS-Daten über die Differenz der 01-99 Perzentile (Scan 065, Standort Hollerwettern vom 25.9.)	75
Abbildung 84: Aus TLS-Punktwolke abgeleitete Stängel, Scan 065, Hollerwettern 26.9.2017.....	76
Abbildung 85: Differenz zwischen dem TLS-Oberflächenmodell, ungefilterter Scan 068 mit 4 m Stativ (99%-Perzentil) und dem zeitgleich aufgenommenen und geometrisch Ko-registrierten UAS Oberflächenmodell (DEM), Standort Hollerwettern, 25.9.2017	77
Abbildung 86: Boxplot der vertikalen Differenzen zwischen den GPS-Messungen der beiden Messkampagnen (10.08. und 25.09.2017) am Standort Hollerwettern an den vorgegebenen Pflanzenmesspunkten (n = 50).....	78
Abbildung 87: Höhendifferenzen der GPS-Messungen (10.08. und 25.09.) an den Pflanzenmesspunkten am Standort Hollerwettern.....	79
Abbildung 88: Automatisch angepasstes Semivariogramm (K-Bessel Detrended) des Empirical Bayesian Kriging für den Standort Hollerwettern	80
Abbildung 89: DGM Hollerwettern auf der Grundlage von 50 GPS-Messungen und Empirical Bayesian Kriging.....	80
Abbildung 90: DGM Hollerwettern auf der Grundlage von 50 GPS-Messungen und Inverse Distance Interpolationsverfahren	80
Abbildung 91: DGM Hollerwettern auf der Grundlage von 50 GPS-Messungen und Kriging mit einem angepassten Semivariogramm	80
Abbildung 92: Angepasstes Semivariogramm (Powerfunktion) und Nuggeteffekt von 0.005.	80
Abbildung 93: Vertikale Differenz zwischen den beiden untersuchten geostatistischen Interpolationsmethoden	81
Abbildung 94: Vertikale Differenz zwischen dem Empirical Bayesian Kriging und dem Inverse Distance Interpolationsverfahren	81
Abbildung 105: Infrarotaufnahme des Standortes Balje mit der Ebee+ und der Sequoia Multispektral-Sensor.....	82
Abbildung 106: PLSR Modelle des multispektralen Datensatzes für ausgewählte Parameter.....	84
Abbildung 107: Modellierter mittlere Pflanzenhöhe mit Hilfe PLSR auf der Grundlage des multispektralen Datensatzes.....	85
Abbildung 108: Modellierter Gelände- bzw. Vegetationsoberfläche mit Hilfe PLSR auf der Grundlage des multispektralen Datensatzes	86
Abbildung 109: Modellierter Anteil der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) mit Hilfe PLSR auf der Grundlage des multispektralen Datensatzes	87
Abbildung 110: PLSR Modelle des multispektralen Datensatzes für ausgewählte Parameter.....	89
Abbildung 111: Vorhersagekarte der mittleren Pflanzenhöhe mit Hilfe PLSR auf der Grundlage des multisensoralen Datensatzes	90
Abbildung 112: Vorhersagekarte der Vegetationsoberfläche mit Hilfe PLSR auf der Grundlage des multisensoralen Datensatzes	91
Abbildung 113: Vorhersagekarte des Anteils der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) mit Hilfe PLSR auf der Grundlage des multisensoralen Datensatzes.....	92
Abbildung 114: Vorhersagekarte der Trockenmasse in g/Pflanze mit Hilfe PLSR auf der Grundlage des multisensoralen Datensatzes	93
Abbildung 115: Vorhersagekarte der orthometrischen Höhe mit Hilfe PLSR auf der Grundlage des multisensoralen Datensatzes vom 11.8. am Standort Balje	94

Abbildung 116: Vorhersagekarte der Trockenmasse in g/Pflanze indirekt abgeleitet aus der Pflanzenhöhe aus der PLSR und dem linearen Regressionsmodell der Pflanzenhöhe und der Trockenmasse.....	96
Abbildung 117: Differenz aus Vorhersagekarten der Trockenmasse (g/Pflanze) der PLSR und der indirekten Ableitung aus dem linearen Regressionsmodell.....	97
Abbildung 118: Variation des Wasserhalts der Pflanzen am Standort Balje unter Anwendung des linearen Regressionsmodells der orthometrische Höhe und Wassergehalt auf die PLSR-Karte der orthometrischen Höhe.	98
Abbildung 119: Variation der Stängeldurchmesser der Pflanzen am Standort Balje unter Anwendung des linearen Regressionsmodells der orthometrische Höhe und der Stängeldurchmesser auf die PLSR-Karte der orthometrischen Höhe.	99
Abbildung 120: Variation der Stängeldurchmesser der Strandsimsen am Standort Balje.	100
Abbildung 121: PLSR Modelle des multispektralen Datensatzes für ausgewählte Parameter.....	102
Abbildung 122: Modellierung der Pflanzenhöhe am 10.8.2017 (gemessen im Gelände) mit Hilfe der PLSR auf der Grundlage des multisensoralen Datensatzes für den Standort Hollerwettern.	103
Abbildung 123: Modellierung der orthometrischen Höhe mit Hilfe der PLSR auf der Grundlage des multisensoralen Datensatzes für den Standort Hollerwettern.....	104
Abbildung 124: Vorhersagekarte des Anteils der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) am 10.8.2017 mit Hilfe der PLSR auf der Grundlage des multisensoralen Datensatzes für den Standort Hollerwettern.....	105
Abbildung 125: Modellierter Wassergehalt der Pflanzen am 25.09. mit Hilfe der PLSR auf der Grundlage des multisensoralen Datensatzes für den Standort Hollerwettern.....	106
Abbildung 126: PLSR-Validierung-Pflanzenhöhe, Standort Krautsand	107
Abbildung 127: PLSR-Validierung-Orthometrische Höhe, Standort Krautsand	107
Abbildung 128: Modellierter Pflanzenhöhe am 08.08.2017 (gemessen im Gelände) mit Hilfe der PLSR auf der Grundlage des multisensoralen Datensatzes für den Standort Krautsand.	108
Abbildung 129: Modellierter orthometrischen Höhe mit Hilfe der PLSR auf der Grundlage des multisensoralen Datensatzes für den Standort Krautsand.	109
Abbildung 130: Digitales Orthophoto aus Senkrechtaufnahmen des UAS-Bildflugs mit Ebee RGB-Kamera vom 11.8.2017, GSD: 1.5 cm, Witterungsbedingungen gleichmäßig bewölkter Himmel. In Gelb dargestellt, Messpunkte der Referenzuntersuchungen	110
Abbildung 131: Digitales Orthophoto aus Schrägaufnahmen des UAS-Bildflugs mit Phantom 4 RGB-Kamera vom 12.9.2017, GSD: 2 cm, Witterungsbedingungen sonnig, teilweise bewölkter Himmel.	110
Abbildung 132: Ausschnitt aus dem digitalen Orthophoto der Senkrechtaufnahmen des UAS-Bildflugs mit Ebee RGB-Kamera vom 11.8.2017, GSD: 1.5 cm.....	111
Abbildung 133: Ausschnitt aus dem digitalen Orthophoto der Schrägaufnahmen des UAS-Bildflugs mit Phantom 4 RGB-Kamera vom 12.9.2017, GSD: 2 cm.	111
Abbildung 134: Vegetationsindex VARI, abgeleitet aus Ebee RGB-Befliegung vom 11.8.2017.....	111
Abbildung 135: Abgeleitete Vegetationshöhen aus der Differenz zwischen dem UAS-Oberflächenmodell, Ebee RGB-Flug vom 11.8.2017 und der interpolierten Geländeoberfläche aus 50 Messpunkten.....	111
Abbildung 136: Vegetationsindex VARI, abgeleitet aus Phantom 4 RGB-Schrägbefliegung vom 12.9.2017.....	111
Abbildung 137: Abgeleitete Vegetationshöhen aus der Differenz zwischen dem UAS-Oberflächenmodell, Phantom 4 RGB-Schrägbefliegung vom 12.9.2017 und der interpolierten Geländeoberfläche aus 50 Messpunkten.....	111
Abbildung 138: Differenz der Höhenmodelle (Ebee RGB vom 11.8.2017 und Phantom 4 vom 12.9.2017). Rote Farben bedeuten einen Rückgang der gemessenen Vegetationshöhe, gelb = keine Veränderung, grün : Zunahme der gemessenen Vegetationshöhe über den Zeitraum von circa einem Monat.....	112

Abbildung 139: Mittlere Vegetationshöhe, gemessen am 11.8. vs. der aus dem DSM ermittelten Vegetationshöhe. Ausreisser, z.B. durch Artefakte im DSM und vor allem durch liegende Pflanzen und DSM-Messungen in Lichtungen sind in orange markiert	112
Abbildung 140: Slope Gradient des digitalen Oberflächenmodells, Standort Hollerwettern 10.8.2017	114
Abbildung 141: Slope Gradient des digitalen Oberflächenmodells, Standort Hollerwettern 26.9.2017	114
Abbildung 142: Skyview Faktor Karte des DOM Hollerwettern vom 26.9.2017	115
Abbildung 143: Reste abgestorbener Teichsimen / Strandsimen, die sich als schwarze Punkte im Watt darstellen. Ausschnitt aus einem UAS-Orthophoto mit einem GSD von 2 cm, aufgenommen in Hollerwettern am 09. März 2015	116
Abbildung 144: Ansicht der Tidezyklen am Pegel Krautsand zum 3.1.2018 (ca. 2.5 km Elbabwärts vom Untersuchungsgebiet Krautsand) https://www.pegelonline.wsv.de/	118
Abbildung 145: Ganglinie eines mittleren Hochwassers in Bezug auf die Dauer der Überflutungszeit in Abhängigkeit der Höhe über N.N. am Pegel Glückstadt, erstes Tidehochwasser vom 3.1.2018 (https://www.pegelonline.wsv.de/)	119
Abbildung 146: Überflutungsdauer der Ufervegetation bei einem mittleren Tidehochwasser am Standort Krautsand . Datengrundlage: https://www.pegelonline.wsv.de/	119
Abbildung 147: Überflutungsdauer der Ufervegetation bei einem mittleren Tidehochwasser am Standort Balje . Datengrundlage: https://www.pegelonline.wsv.de/	120
Abbildung 148: Überflutungsdauer der Ufervegetation bei einem mittleren Tidehochwasser am Standort Hollerwettern . Datengrundlage: https://www.pegelonline.wsv.de/	120
Abbildung 149: Höhe der Vegetation über dem Wasserspiegel bei einem mittleren Hochwasser (1.51 m ü. N.N.) am Standort Balje am 11.8.2017	121
Abbildung 150: Höhe der Vegetation über dem Wasserspiegel bei einem mittleren Hochwasser (1.51 m ü. N.N.) am Standort Balje am 12.9.2017	122
Abbildung 151: Verwendete Messmethoden der Pflanzenhöhe im Rahmen der Messkampagnen ..	122
Abbildung 152: Vergleich der auf verschiedenen Arten und zu unterschiedlichen Zeitpunkten gemessenen Pflanzenhöhe am Beispiel des Standorts Balje	123
Abbildung 153: Statistischer Zusammenhang zwischen der im Labor gemessenen Pflanzenhöhe und der UAS-Pflanzenhöhe vom 12.9.2017, Standort Balje Ausreißer in Orange)	123
Abbildung 154: Vergleich eines Ausschnitts des Orthophotos und der zeitgleich aufgenommenen Thermalaufnahme vom Standort Balje am 12.9.2017 mit Hilfe eines Temperaturprofils durch das Watt mit unterschiedlichen Eigenschaften (Korngrößen, Wassergehalte, Neigung)	125
Abbildung 155: Vergleich eines Ausschnitts des Orthophotos und der zeitgleich aufgenommenen Thermalaufnahme vom Standort Balje am 12.9.2017 mit Hilfe eines Temperaturprofils das mehrere Phänomene durchläuft (hohe vitale Schilfvegetation, Schatten, Vegetation, liegende Strandsimen mit teilweise offenem Boden, Strandsimen)	125

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Datum und Anzahl der erzeugten UAS-Bilder	20
Tabelle 2: Datum, Anzahl und Datenmengen der Scans des terrestrischen Laserscanners	26
Tabelle 3: Dominante Arten auf den drei Standorten.....	27
Tabelle 4: Pflanzenparameter, Abkürzungen und Einheiten	28
Tabelle 5: Deskriptive Statistik der gemessenen Parameter am Standort Balje.....	30
Tabelle 6: Deskriptive Statistik der gemessenen Parameter am Standort Hollerwettern.....	41
Tabelle 7: Deskriptive Statistik der gemessenen Parameter am Standort Krautsand	47
Tabelle 8: Ausgewählte Parameter der photogrammetrischen UAS Bildflüge August / September 2017	57
Tabelle 9: Bildbeispiele für den Pan-sharpening-Prozess für einen Ausschnitt in Hollerwettern	65
Tabelle 10: Vergleich der Anzahl gemessener Vegetationshöhen und Stängeldurchmesser mit dem Abstand zwischen Laserscanner und Pflanzenbestand bei den Scans 020-028, Standort Hollerwettern, 10.8.2017.....	71
Tabelle 11: Spektrale Kanäle des multispektralen Datensatzes.....	82
Tabelle 12: Zusammensetzung des Multitemporalen Datensatzes	83
Tabelle 13: Zusammenfassung relevanter statistischer Parameter der PSLR auf der Grundlage des multispektralen Datensatzes (n = Anzahl; μ = Mittelwert; σ = Standardabweichung; LV = latente Variablen; R^2 = Bestimmtheitsmaß; RMSE = Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme; cal = Training; val = Validierung; PAR = Photosynthetisch aktive Strahlung)	83
Tabelle 14: Zusammenfassung relevanter statistischer Parameter der PSLR auf der Grundlage des multisensoralen Datensatzes (n = Anzahl; μ = Mittelwert; σ = Standardabweichung; LV = latente Variablen; R^2 = Bestimmtheitsmaß; RMSE = Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme; cal = Training; val = Validierung; PAR = Photosynthetisch aktive Strahlung)	88
Tabelle 15: Vergleich der PLSR Ergebnisse anhand des R^2 und der Vorhersagegenauigkeit RMSE für den rein multispektralen Ansatz und dem multisensoralen Ansatz.	94
Tabelle 16: Zusammenfassung relevanter statistischer Parameter der PSLR auf der Grundlage des multisensoralen Datensatzes für den Standort Hollerwettern (n = Anzahl; μ = Mittelwert; σ = Standardabweichung; LV = latente Variablen; R^2 = Bestimmtheitsmaß; RMSE = Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme; cal = Training; val = Validierung; PAR = Photosynthetisch aktive Strahlung) .	101
Tabelle 17: Zusammenfassung relevanter statistischer Parameter der PSLR auf der Grundlage des multisensoralen Datensatzes für den Standort Krautsand (n = Anzahl; μ = Mittelwert; σ = Standardabweichung; LV = latente Variablen; R^2 = Bestimmtheitsmaß; RMSE = Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme; cal = Training; val = Validierung; PAR = Photosynthetisch aktive Strahlung) .	107
Tabelle 18: Vergleich TLS und UAS für eine flächenhafte Erfassung der Makrophytenvegetation	126

1 Hintergrund/Anlass

Im Projekt „tibass“ (tidal bank science and services) der Bundesanstalt für Gewässerkunde werden mögliche Vorteile von natürlich bewachsenen Ufern gegenüber technischen Ufersicherungen an drei Standorten der Elbe bei Balje (Elbe-km 701), Hollerwettern (Elbe-km 679) und Krautsand (Elbe-km 674) untersucht. Dabei geht es um die Ermittlung möglicher Einflussfaktoren, die auf die Pflanzen wirken, wie der Salzgehalt, der Tidehub, die Strömungsgeschwindigkeiten oder die Bodeneigenschaften. Außerdem werden die Wechselwirkungen zwischen den Pflanzen (z. B. Stängelhöhe, -dichte und -durchmesser, Blätter, Nährstoffgehalte) und die Auswirkungen der Pflanzengesellschaften auf die Wellenhöhe, die Strömungsgeschwindigkeiten der Elbe und auf das Erosions- und Sedimentationspotential der Ufer untersucht. In tibass soll letztlich die Widerstandsfähigkeit der Ufer gegenüber hydraulischen Belastungen abgeleitet werden, indem die Wellenreduktion der Pflanzen, ihre Ökosystemfunktionen und notwendige Standortbedingungen quantifiziert werden (BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE, 2017).

Die zu erhebenden Daten dienen als Grundlage, um eine zuverlässige Karte zu entwickeln, die die potenzielle Wellenreduktionsleistung von Röhrichten darstellt. Denn Tideröhrichte tragen wesentlich dazu bei, die Hydrodynamik in Form von Wellen und Strömungen zu reduzieren. Dieses fördert die Sedimentationsprozesse auf den höher gelegenen Watten. Die ursprünglich dynamischen Lebensräume sind vor allem durch die Landgewinnung stark dezimiert worden. Die Ufer der Ästuare sind häufig erhöhter Strömung und Schiffswellen ausgesetzt. Um die Ufer vor Erosion zu schützen, sind sie ingenieurtechnisch gesichert. Durch die Flächendezimierung der Watten und Marschen wurden ihre, fürs Ökosystem regulierenden, Funktionen deutlich geschwächt. Gegenüber Einflüssen, z. B. Klimawandel, Fahrrinnenvertiefung, ist es wichtig, diese Funktionen zu stärken. Dadurch erlangt das Ästuar als Ökosystem eine höhere Toleranz gegenüber diesen Einflüssen.

Die regulierenden Funktionen sind Bestandteil des ökologischen Potenzials von naturraumtypischer Ufervegetation. Für eine bessere Nutzung des ökologischen Potenzials ist eine Quantifizierung dieser Funktionen unabdingbar. Im Projekt wird die Reduktion der Wellenhöhen durch Röhrichte in drei Untersuchungsgebieten in Transekten im Jahresverlauf gemessen. Durch eine zuverlässige Interpolation in die Fläche kann die Wellenreduktionsleistung nicht nur quantifiziert, sondern auch bilanziert und bewertet werden, welches eine wichtige Voraussetzung ist, um diese Leistung mit anderen Ökosystemleistungen zu vergleichen.

Die Leistung der Wellenreduktion ist stark von der Vegetationsstruktur abhängig (z. B. YSEBAERT *et al.* 2011). Einer der wichtigsten Faktoren ist die Stängeldichte der Pflanzen. Sie korreliert stark mit der Wellenreduktionsleistung, je dichter der Pflanzenbestand desto stärker ist die Reduktion der Wellenhöhe (z. B. HEUNER *et al.* 2015). Die Stängeldichte steht im engen Zusammenhang mit der Biomasse. Weitere Einflussfaktoren sind die Geländehöhe und die Morphologie der dominanten Röhrichtarten. Arten mit flexibleren Stängeln sind gegenüber der Wellenbelastung toleranter, haben dagegen aber auch eine geringere Reduktionsleistung. Arten mit rigiden Stängeln und Blättern können höheren Wellenbelastungen schlechter standhalten, besitzen aber durch die stärkeren Widerstände eine höhere Wellenreduktionsleistung (z. B. BOUMA *et al.* 2005).

Die Vegetationsstrukturen, Stängeldichte und Biomasse, werden mittels digitaler Oberflächenmodelle in drei Untersuchungsgebieten (siehe Abbildung 1) quantifiziert. Ziel des Teilprojekts ist, die Modelle zum einen aus drohnengestützten Luftbildern zu erzeugen, zum anderen an zwei Untersuchungsgebieten zu testen, ob mit terrestrischen Laserscandaten Oberflächenmodelle in ähnlicher Qualität erzeugt werden können. Des Weiteren ist zu testen, in wie weit die Vegetationsstruktur mittels spektraler Vegetationsindices quantifiziert werden kann. Über die Erfahrungen bei der Datenerfassung und -verarbeitung sowie das Ergebnis des Modellvergleichs soll in diesen Bericht festgehalten werden. Dieses soll unter anderem als Empfehlung für Ausschreibungen zur Erfassung der Ufervegetation durch terrestrische Laserscandaten dienen. Des Weiteren sollen an 150 Standorten

Geländehöhe mit Global Navigation Satellite System (GNSS), die dominanten Röhrcharten und andere Pflanzenparameter erhoben werden. Die Lage der drei Untersuchungsstandorte an der Unterelbe ist Abbildung 1 zu entnehmen.

Im Nachfolgenden werden die Messungen und Ergebnisse der Feldkampagnen an diesen Standorten beschrieben. Darüber hinaus wird die Datenprozessierung erläutert und die abgeleiteten Produkte vorgestellt. Der Bericht schließt mit Hinweisen und Empfehlungen für den Einsatz von UAS und TLS für vegetationskundliche Untersuchungen für Süßwasserwattflächen und darüber hinaus.



Abbildung 1: Lage der drei Untersuchungsgebiete an der Unterelbe

1.1 Fragestellungen

Die in dem Bericht näher erläuterten Untersuchungen sollen verschiedene Fragestellungen beantworten, die sich grob in vier Gruppen unterteilen lassen:

- 1) Welche signifikanten Zusammenhänge bestehen zwischen den terrestrisch erhobenen Daten z. B. Geländehöhe und Pflanzeigenschaften?
 - a) Gibt es Unterschiede zwischen den drei Untersuchungsgebieten und Dominanzbeständen?
 - b) Welche Parameter eignen sich, um die Stängeldichte der Röhrichte über die Fläche zu interpolieren?
- 2) Welche Genauigkeit erreichen photogrammetrisch erzeugte Oberflächenmodelle und wie genau kann die Geländeoberfläche mit den gemessenen GPS-Punkten bestimmt werden?
 - a) Welche Rolle spielt das Interpolationsverfahren?
 - b) Kann daraus die Vegetationshöhe und ein Geländemodell abgeleitet werden?
 - c) Wie beeinflusst die Mikrovarianz der Topographie die Qualität der Geländemodelle?
 - d) Welche geostatistischen Verfahren eignen sich zur Quantifizierung und Darstellung des Effekts?
 - e) Lässt sich ein Geländesprung zwischen unbewachsener und bewachsener Wattfläche erfassen, wie es in WANG & TEMMERMAN 2013 identifiziert wurde?

- 3) Welche UAS-fernerkundlichen Möglichkeiten gibt es, die punktuell gemessenen Pflanzenparameter in die Fläche zu extrapolieren und wie gut funktionieren diese?
 - a) Wie genau können die Zusammenhänge über die Fläche interpoliert werden?
 - b) Welche Vegetationsindices können die Zusammenhänge stärken?
 - c) Welchen Vorteil bietet ein multisensoraler Ansatz, bei dem neben Farbluftbildern auch multispektrale, thermale sowie photogrammetrisch abgeleitete Informationen inkludiert werden?
 - d) Welche Effekte/Unterschiede bei der Luftbildauswertung ergeben sich durch eine zeitlich unterschiedliche Erfassung, insbesondere im Übergang Spätsommer → Herbst?
- 4) Welche Vegetationsstrukturen kann ein terrestrischer Laserscanner in dominanten und dichten Röhrichtbeständen erfassen und welche nicht?
 - a) Kann mit einem terrestrischen Laserscanner die Mikrotopographie und die Vegetationshöhe erfasst werden?
 - b) Wie sind die Ergebnisse mit den anderen Methoden (terrestrische Messung und UAS-Photogrammetrie) vergleichbar?

2 Datenerhebung

2.1 Probedesign in den Untersuchungsflächen

Das Probedesign wurde mittels der Funktion „optimDist“ des R-Package ‘spsann’ erstellt (siehe Abbildung 2), um das Probedesign optimal für räumliche Trends und Interpolationen der Stängeldichte der Pflanzen (Anzahl der Stängel / m²) nutzen zu können (SAMUEL-ROSA *et al.* 2017). Hierfür wurden verschiedene Kovariablen herangezogen:

- bereits bestehende Standorte (16 Standorte in Balje, 11 in Hollerwettern und 15 in Krautsand)
- Dominanzbestände, abgeleitet aus den Luftbildern 2016
- Geländehöhen aus dem DGMw 2010
- Distanz zur Marschkante, abgeleitet aus dem Luftbild 2016

Die letzten drei Kovariablen sind Faktoren, die die Stängeldichte häufig prägen (MÖLLER 2006; SILINSKI *et al.* 2017). Abbildung 2 zeigt auch, dass die Anzahl der Standort in den Dominanzbeständen aufgrund ihrer unterschiedlichen Ausdehnung nicht gleichverteilt ist. Ziel war, artunabhängig zu testen, welche räumlichen Muster des Pflanzenmerkmals „Stängeldichte“ existieren.

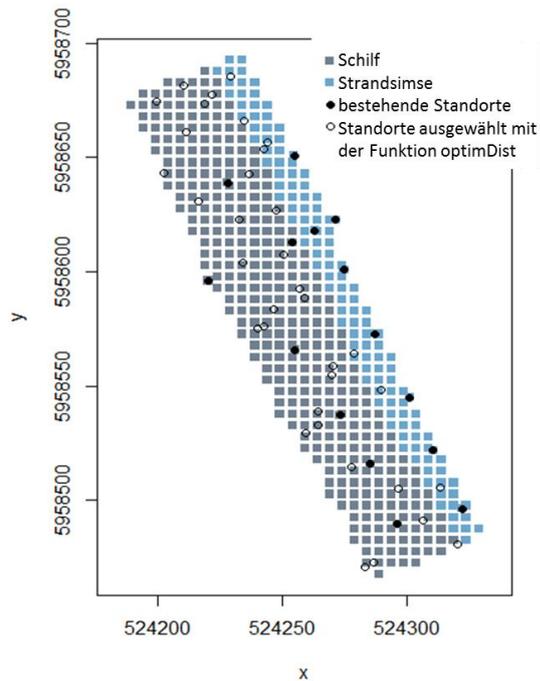


Abbildung 2: Probedesign am Beispiel von Krautsand

2.2 Erhebung der Ground truth-Daten

Im Rahmen der Geländekampagne an den drei Standorten wurden umfangreiche Ground Truth Messungen durchgeführt. Diese sollen einerseits als punktuelle Referenzmessungen genutzt werden, um in Kombination mit den fernerkundlichen Daten in die Fläche übertragen werden zu können. Die Daten sollen auch zur Validierung von Modellen und zum Verständnis des Ökosystems genutzt werden. Andererseits sollen im Gelände hochgenaue Daten zur Topographie erfasst werden, da diese durch die Vegetation nicht photogrammetrisch erfasst werden können. Die einzelnen Parameter und die Erfassungsmethoden werden im nachfolgenden detailliert vorgestellt.

2.2.1 Geländehöhen

Zur Passpunktmessung und der Vermessung der Ground Truth Daten sind drei hochwertige PDGNSS-Empfänger eingesetzt worden. Ein Leica Viva GS 10, ein Javad Triumph-1M GPS/GLONASS sowie eine Pentax G3100-R2 GPS+Glonass. Alle Geräte sind SAPOS-fähig. Bei der Einmessung der Probepunkte mit einem RTK-GPS-Empfänger ist gleichzeitig die Geländehöhe erfasst worden. Bei der Datenerfassung wurde darauf geachtet, dass die Spitze des GPS-Stabs nicht oder nur sehr wenig in den Boden einsinkt.

2.2.2 Pflanzeigenschaften

Bei den Pflanzenmessungen wurde an den jeweils 50 vorgegebenen Punkten folgende Parameter gemessen bzw. bestimmt:

- die dominierenden Pflanzenarten.
- die Pflanzendichte. Dazu wurde im Gelände in einem Kartierahmen mit einer Kantenlänge von 40 cm bzw. einer Fläche von 0.16 m² die Anzahl der Stängel gezählt (SILINSKI *et al.* 2017).
- die Stängeldicke. Die Messung der Stängeldurchmesser mit einer Schieblehre an 10 Pflanzen im Gelände erwies sich als problematisch und wenig praktikabel, da die Messung und Ableseung in einem Abstand von 3 cm über dem Gelände mit größeren Fehlern behaftet sein kann.

Aus diesem Grund wurden jeweils 10 Pflanzen pro Messpunkt entnommen und im Nachgang der Durchmesser der individuellen Pflanzen gemessen und zu einem Mittelwert verrechnet.

- die mittlere Pflanzenhöhe geschätzt. Zur Schätzung der mittleren Pflanzenhöhe wurde mit einem Zollstock die signifikante Pflanzenhöhe ermittelt. Dazu wurde an einer „typischen“ Pflanze die Höhe mit einem Zollstock gemessen, was in Kapitel 4.4 noch genauer beschrieben ist.
- die Pflanzenhöhe gemessen. Zu Messung der Pflanzenhöhe wurden pro Standort 10 Pflanzen kurz über dem Boden abgeschnitten und die maximale Höhe je Pflanze im Labor gemessen und anschließend ein Mittelwert gebildet.
- die Biomasse. Dazu wurden an jedem Standort 10 Pflanzen entnommen und im Labor jeweils die Frisch- und Trockenmasse ermittelt. Die Pflanzen wurden dafür vor und nach einer Trocknung im Trockenschrank (24 Stunden bei 105 °C) gewogen. Aus der Differenz zwischen der Frisch- und Trockenmasse wurde entsprechend der nachfolgenden Formel der prozentuale Wassergehalt der Pflanzen ermittelt

$$WG \text{ (in \%)} = \frac{(FM - TM) * 100}{FM} \quad (1)$$

- die photosynthetisch aktive Strahlung (**PAR**) gemessen. Zur PAR-Messung wurde ein LICOR 2500 Gerät verwendet. Für jeden Punkt erfolgten zwei Messungen. Eine Messung über dem Bestand, um die einkommende Strahlung zu bestimmen und eine zweite Messung im Bestand, d. h. ca. 3-5 cm über dem Boden. Die Werte am Boden schwanken je nach Dichte des Pflanzenbestandes stark, da die einkommende Strahlung je nach Bewölkung ebenfalls stark variierte. Um den Anteil der durch die Pflanzen absorbierten Strahlung zu bestimmen, wurde der Quotient zwischen dem Strahlungsdargebot, d. h. der verfügbaren Strahlung über dem Bestand und der nahe des Bodens gemessener Strahlung nach folgender Formel bestimmt.

$$PAR \text{ (in \%)} = \frac{PAR_{Pflanze} * 100}{PAR_{Sonne}}$$

- die genaue **GPS-Position** (inkl. der Höhe ü. N.N), s.o.
- und **Fotos** zur Dokumentation.

2.2.3 Zeitlicher Ablauf der Geländemessungen

Am 8.8.2017 wurden in Krautsand die Pflanzenparameter dominante Art, Pflanzendichte, mittlere Pflanzenhöhe und PAR bestimmt und Fotos von den einzelnen Messpunkten erstellt.

Am 9.8.2017 wurden in Balje die 50 Messpunkte eingemessen und die Pflanzenparameter dominante Art, PAR, Pflanzendichte, mittlere Pflanzenhöhe und mittlerer Stängeldurchmesser erfasst, mit Fotos dokumentiert und terrestrische Laserscanningmessungen vorgenommen. Eine UAS-Befliegung erfolgte nicht, da der Wind zu stark war.

Am 10.8.2017 wurden am Standort Hollerwettern die 50 Messpunkte eingemessen und folgende Pflanzenparameter (dominante Art, PAR, Pflanzendichte, mittlere Pflanzenhöhe und mittlerer Stängeldurchmesser) gemessen und alle anderen Messungen inkl. Laserscanning und UAS-Befliegungen durchgeführt.

Am 11.8.2017 wurden am Standort Krautsand die Standorte eingemessen und die restlichen Pflanzenmessungen (Messung der Stängeldurchmesser und der Pflanzenhöhe an zehn individuellen Pflanzen) durchgeführt und in Balje der UAS-Bildflug realisiert und weitere Laserscanningmessungen durchgeführt.

Am 12.9.2017 wurden in Balje an den 50 Messpunkten der Stängeldurchmesser, die Pflanzenhöhe sowie die Frisch- und Trockenmasse an zehn individuellen Pflanzen gemessen. Zusätzlich wurden die Punkte erneut eingemessen.

Am 25.9.2017 wurde in Hollerwettern an den 50 Messpunkten der Stängeldurchmesser, die Pflanzenhöhe sowie die Frisch- und Trockenmasse an zehn individuellen Pflanzen gemessen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass sich die Messung der Pflanzenparameter in dem teilweise sehr schwierigen Gelände aufwendig gestaltete und am effektivsten durch eine Gruppe von drei Personen erfolgte. Die Messungen der dominanten Pflanzenart, der Pflanzendichte, der genauen Position und die Fotodokumentation sind für alle Standorte einheitlich. So wurde die Pflanzenhöhe im Gelände immer vom gleichen Kartierer aufgenommen. Auch die Labor-Messungen der mittleren Pflanzenhöhe und des Stängeldurchmessers sind einheitlich durchgeführt worden. Die Messung der Stängeldurchmesser im Gelände ist in Balje und Hollerwettern bei der ersten Messkampagne etwas größer als geplant ausgefallen. Das Gleiche gilt für die genaue Messung der Pflanzenhöhe an zehn Pflanzen. Hier sind im Zuge der Nachuntersuchungen detaillierte pflanzenindividuelle Werte ermittelt worden.

2.3 UAS-Befliegung

2.3.1 Verwendete Technik

Die UAS-Bildflüge der drei Untersuchungsgebiete sind vorwiegend mit einem senseFly **Ebee+** UAS durchgeführt worden. Das Fluggerät selber ist ein Starrflügler mit ca. 1.100 Gramm ein Leichtgewicht, siehe Abb. 1. Das Fluggerät verfügt über ein RTK-GPS, was im Prinzip eine passpunktlose Georeferenzierung mit einer Absolutgenauigkeit von 2-5 cm ermöglicht.



Abbildung 3: Starrflügler UAS Ebee+ mit RTK-GPS und unterschiedlichen Sensoren

Das Fluggerät kann mit mehreren bildgebenden Sensoren bestückt werden, die sehr unterschiedliche Bereiche elektromagnetischen Spektrums abdecken. Aufgrund der geringen Tragfähigkeit? (Payload) des UAS, sind die nachfolgend detaillierter beschriebenen Sensoren nur nacheinander zum Einsatz gebracht worden und nicht zeitgleich.

- Zum ersten mit einer **hochauflösenden RGB-Digitalkamera (senseFly S.O.D.A.)** mit einem 20 Megapixel-Sensor. Mit diesem Sensor, der über den geforderten Global Shutter verfügt, der photogrammetrische Bildflug mit sehr hoher Bodenaufklärung geplant.
- Zum zweiten mit einem **Multispektralsensor (Sequoia)**. Dieser verfügt neben einer RGB-Kamera mit 16 Megapixel (allerdings mit Rolling Shutter) über vier einzelne multispektrale Sensoren mit einer Auflösung von jeweils nur 1.2 Megapixel (Global Shutter), die mit entsprechenden Filtern selektiv verschiedene Wellenlängen aufzeichnen. Im Einzelnen sind das, dass grüne (530-570 nm) und rote Licht (640-680 nm) sowie das nahe Infrarot (770-810 nm) und

ein so genannter Red Edge Kanal (730-740 nm), siehe Abbildung 3.

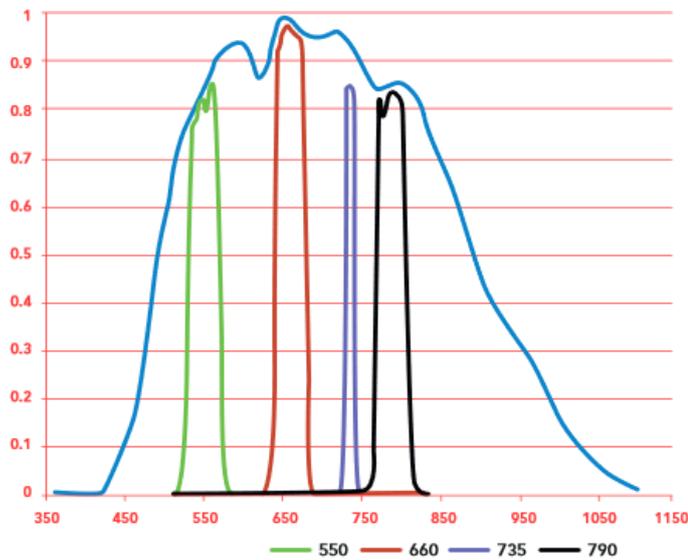


Abbildung 4: Definition der Multispektralkanäle des Sequoia Sensors

- Für die Vergleichbarkeit spektraler Messungen wird üblicherweise der Anteil der reflektierten Strahlung als Größe gemessen. Um diesen Anteil zu ermitteln, wird bei Satellitenaufnahmen eine mehr oder weniger aufwendige Atmosphärenkorrektur durchgeführt, die für präzise Aussagen auch zeitgleiche Feldspektrometernmessungen benötigt (Ground Truth). Alternativ sind „Empirical Line“ Methoden üblich, die ebenfalls zeitgleiche spektrale Referenzen benötigen. In unserem Fall ist das glücklicherweise nicht notwendig, da neben den zum Erdboden schauenden multispektralen Bildsensoren parallel ein weiterer, nach oben schauender Sensor die einkommende Sonnenstrahlung (Irradiance) misst. Im Zuge der Auswertung werden entsprechende Korrekturen vorgenommen und die Reflektanzen ermittelt. Damit wird es einerseits möglich, spektrale Produkte wie dem Normalisierter Differenzierter Vegetationsindex (NDVI) zu berechnen und andererseits sind Daten aus verschiedenen Befliegungen spektral einfach miteinander vergleichbar. Dieser Aspekt ist von besonderer Bedeutung, da die zu untersuchenden Pflanzen zum Aufnahmezeitpunkt einen maximalen Leaf Area Index (LAI) bzw. Vitalität aufweisen werden. Das bedeutet, die üblichen Vegetationsindices gehen in die Sättigung, d.h. sie nähern sich dem Maximalwert an und statistische Beziehungen zu gemessenen Pflanzenparametern sind nicht mehr möglich. Nichtsdestotrotz kann auch mit diesem Multispektralsensor nicht bei jedem Wetter geflogen werden. Sonne oder gleichmäßig bedeckter Himmel sind Voraussetzung. Bei schnell wechselnde Bewölkung hingegen können im Bild Schatten auftreten, die vom Irradiance Sensor nicht erfasst werden können. Diesen wichtigen Vorteilen steht leider auch ein Nachteil entgegen. Aufgrund der geringen Auflösung der multispektralen Sensoren, der Brennweite und der beschränkten Bildfolgezeit von 1 Sekunde können mit dem Ebee als Trägerplattform Bodenaufösungen von 7-8 cm realisiert werden. Gleichwohl lässt sich durch ein in der Satelliten- und Luftbildphotogrammetrie seit vielen Jahren üblich Verfahren des Pan-Sharpenings durchaus die gewünschte Bodenauflösung von 2 cm im Postprozessing rechnerisch erreichen.
- Der dritte verfügbare Sensor des Ebee+ ist eine **Thermalkamera (senseFly ThermoMAP)** mit einer Auflösung von 640 x 512 Pixeln. Die thermale Auflösung beträgt 0.1 °C. Aufgrund der geringen Auflösung und der Bildrate des Sensors sind Bodenaufösungen von 15 cm/ Pixel realisierbar. Neben dem Ebee wurden für Schrägbefliegungen ein **Falcon 8** der Firma Intel und ein **Phantom 4 Pro** verwendet. Die wichtigsten technischen Daten des UAS sind in nachfolgend zusammengefasst.

- **Falcon 8**

- Octocopter-1.04 m Durchmesser
- Payload: ca. 400 g (Sony 7R, 36 Mpix)
- Flugzeit: ca. 8 min bei max. Payload
- Abfluggewicht 2.4 kg
- Flughöhe: bis 300 m
- Autopilot integriert
- Max. Windresistenz: 12 m/s



Die Befliegungen im September in Balje und Hollerwettern wurden mit der Drohne Phantom 4 Pro der Firma DJI durchgeführt.

- **Phantom 4 Pro**

- Quadrocopter mit Hinderniserkennung
- Payload: ca. 200 g (RGB-Kamera 20 Mpix, global shutter)
- Flugzeit: ca. 25 min
- Abfluggewicht ca. 1.370 g
- Flughöhe: bis 1.000 m
- Autopilot integriert
- Externe App für automatische Flüge
- Max. Windresistenz: 10 m/s



2.3.2 Übersicht der erfassten UAS-Bildflugdaten

Die UAS-Bildflüge der drei Untersuchungsgebiete mit den unterschiedlichen Sensoren konnten erfolgreich realisiert werden. An den Standorten Hollerwettern und Balje ist ein zweites Mal geflogen worden, da es entweder bei der ersten Befliegung zu Fehlern, bzw. Systemausfällen gekommen ist oder als begleitende Dokumentation der Pflanzenentwicklung angezeigt war, einen weiteren Flug zu realisieren. Nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht der dabei erzeugten Bilder.

Tabelle 1: Datum und Anzahl der erzeugten UAS-Bilder

Standort	Datum	RGB	Multispektral	Thermal	Schräg / Video
Krautsand	8.8.	439	1224 (306 Bilder pro Kanal / keine RGB-Bilder)	2565	56
Hollerwettern	10.8.	395	1400 (350 pro Kanal / keine RGB-Bilder)	2911	34 / 1
Hollerwettern	25.9.	103	-	-	-
Balje	11.8.	306	990 (198 Bilder pro Kanal / 198 RGB-Bilder)	1817	Keine
Balje	12.9.	-	-	1520	134 + 135

Im Detail sind zu den Bildflügen und Standorten folgende Informationen von Bedeutung:

Der UAS-Bildflug in **Krautsand** erfolgte am 8.8. für das gesamte Projektgebiet von ca. 10 ha. Nachdem es am Vormittag sehr sonnig war, zog im Laufe des Tages mehr und mehr Bewölkung auf. Auch der Wind, der aus nordöstlicher Richtung blies, nahm im Laufe des Tages zu und erreichte gegen 13:00 Uhr etwa 4 Bft. Als Längs- und Querüberlappung wurde, abweichend den Anforderungen (80 / 60 %) aus Sicherheitsgründen bei den Flügen jeweils 80 % gewählt. Der Wind führte bei den alternierend abgeflogenen Flugstreifen zu unterschiedlichen Fluggeschwindigkeiten des Flächenflüglers, so dass nur bei Gegenwind die vorab gewählte Längsüberlappung realisiert werden konnte. Bei Rückenwind hingegen war die Längsüberlappung geringer, was durch die zusätzliche Querüberlappung bei der Auswertung problemlos kompensiert wird. Thermalaufnahmen werden generell mit einer sehr hohen Längsüberlappung (90-95%) aufgenommen, um bei der Auswertung unscharfe und fehlerhafte Aufnahmen eliminieren zu können.

Nachdem der in der Drohne eingebaute Bodensensor beim RGB-Flug mehrmals wegen der hohen Pappeln angeschlagen hat, wurde die Flughöhe für den Multispektralflug um ca. 15 m nach oben korrigiert.

Für die Schrägaufnahmen kam der Falcon 8 Multicopter zum Einsatz, der mit einer DSLR Kamera ausgestattet, für hochauflösende Bilder sorgt.

Der UAS-Bildflug in **Hollerwettern** am 10.8. konnte für das gesamte Untersuchungsgebiet durchgeführt werden. Die Windverhältnisse waren für den Bildflug recht günstig, da nur geringe nördliche Winde von 2-3 Bft. vorherrschten. Zum Befliegungszeitpunkt zogen bei heiterem Wetter verschiedene Wolkenfelder durch. Da es in Hollerwettern keine hohen Bäume gibt, konnten die geplanten Flughöhen eingehalten werden. Zusätzlich zu den Schrägaufnahmen wurde ein Video des Standorts aufgenommen.

Begleitend zu den terrestrischen Untersuchungen wurde am 25.9. in Hollerwettern das engere Untersuchungsgebiet mit einer Phantom 4 Pro Drohne befliegen, die über eine 20 Mpix. RGB-Kamera verfügt. Das Wetter war für den Bildflug nahezu ideal, durchgehende Bewölkung und wenig Wind.

Am 11.8. wurden die UAS-Bildflüge in **Balje** durchgeführt. Wegen leichten Niederschlags und einer immer näher rückenden Regenfront wurde das Befliegungsgebiet auf ca. 6 ha verkleinert. Das Wetter hat glücklicherweise gehalten und die drei Flüge mit der Ebee Drohne konnten durchgeführt werden. Das Wetter war optimal, d. h. gleichmäßig bewölkt, was schattenfreie Bildmosaiken erwarten lässt. Der Wind wehte aus nordwestlicher Richtung mit ca. 3-4 Bft. Im Nachgang der Schrägbefliegung zeigte sich, dass der Multicopter leider keine Bilder gemacht hatte. Ursache war, wie sich nach der Rückkehr herausgestellt hatte, ein Ermüdungsbruch eines Kabels. Da die Georeferenzierung der Thermalbilder fehlgeschlagen ist, sollte dieser in einem zweiten Versuch wiederholt werden. Ursache ist wahrscheinlich das Wetter, bzw. die fehlende Sonne und damit verbunden keine oder nur geringe lokale thermale Kontraste der Erdoberfläche. Es hat sich auch bei weiteren Projekten gezeigt, dass sich die Auswertesoftware bei Aufnahmen, die bei trübem Wetter erstellt worden sind, schwer getan hat.

Um die fehlenden Schrägaufnahmen zu ergänzen und die leider vom ersten Flug nicht auswertbaren Thermaldaten zu ersetzen, wurde am 12.9. - begleitend zur Messung der Biomasse und Länge von Einzelpflanzen - eine erneute Befliegung mit der Thermalkamera als Nutzlast der Ebee Drohne durchgeführt. Das Wetter war alles andere als ideal. Windstärke 5, d. h. 8- 10 m/s und in Böen ein wenig mehr. Trotz der widrigen äußeren Bedingungen konnte der Flug erfolgreich absolviert werden. Für die Aufnahme der Schrägaufnahmen wurde die Phantom 4 Pro Drohne verwendet. Die Schrägaufnahmen mit einem Blickwinkel von 45° erfolgten, über eine App gesteuert, systematisch in Flughöhen von 25 und 50 m über dem Kernbereich des Untersuchungsgebiets. Die Schrägaufnahmen waren ursprünglich nur zu Visualisierungszwecke gedacht, weshalb auch auf das Auslegen und Einmessen von Passpunkten verzichtet wurde. Wie sich nachträglich herausstellte, lassen sich die Schrägaufnahmen aus 50 m Höhe auch zu einem ansprechenden Orthomosaik zusammenführen. Als Passpunkte wurden natürliche Punkte aus den Orthophotos der ersten Befliegung verwendet, die leider nicht

überall zu finden waren. In der Summe führt das dazu, dass die absolute Lagegenauigkeit (± 6 cm) geringer ist, als bei den anderen Befliegungen.

Generell lässt sich sagen, dass die Technik gut funktioniert hat und die Befliegungen erfolgreich waren. Das gilt auch für die experimentell verwendete Thermalkamera. Zu den Befliegungszeitpunkten herrschten zwar keine Strahlungswetterlagen vor, gleichwohl sind deutliche Temperaturunterschiede zu beobachten, sowohl im Watt als auch in der Vegetation. Es hat sich bei den Befliegungen gezeigt, dass es bei Auflösungen von 15 cm noch zu Bewegungsunschärfen kommt, die durch die langen Integrationszeiten der Thermalkamera bedingt sind und die Bilder deshalb im allgemeinen recht verwaschen sind. Für zukünftige Bildflüge sind Bodenaufösungen von 19 cm anzustreben, was bei der in Deutschland maximalen erlaubten Flughöhe von 100 m möglich ist.

2.3.3 Photogrammetrische Datenprozessierung zur Georeferenzierung

Die senkrecht (Hollerwetter) und schrägblickenden (Balje) Bildverbände des Multicopters Phantom 4 Pro wurden mit der Software Photoscan Professional Vers. 1.3.2, der Firma Agisoft ausgewertet. Die Daten des Ebee+ (RGB, Multispektral und Thermal) wurden mit der Software Pix4D prozessiert. Die Ebee-Drohne verfügt über eine RTK-Option, was eine hochgenaue Bestimmung der Projektionszentren ermöglicht. Im Postprocessing nach der Befliegung, werden die während des Fluges aufgezeichneten GPS-Daten mit den GPS-Beobachtungen einer lokal aufgebauten und eingemessenen Referenzstation abgeglichen und die tatsächliche Position der Bilder auf wenige Zentimeter genau bestimmt. Mit diesen Informationen ist grundsätzlich eine sogenannte „Passpunktlose Aerotriangulation“ möglich, die dann auch sehr genaue Ergebnisse von wenigen Zentimetern liefert. Einige wenige Pass- bzw. Kontrollpunkte erhöhen die Genauigkeit weiter und liefern vor allem die notwendige Zuverlässigkeit und Sicherheit, dass die Orientierungen auch im gesamten Bildverband korrekt sind.

Der Lagebezug der Daten bezieht sich auf das amtliche System ETRS 89 / UTM, Streifen 32. Für die UAS-Befliegungen wurden eine hinreichende Anzahl Passpunkte signalisiert (10-15). Gemäß den Qualitätskriterien für UAS Befliegungen und Digitale Orthophotos (GRENZDÖRFFER, 2016) entsprechen die erzielten Genauigkeiten an den Passpunkten den vorgegebenen Normen, da bei den RGB-Flügen an den Passpunkten eine Genauigkeit von ca. 1-3 cm erreicht werden konnte. Bei den multispektralen Aufnahmen sind die Abweichungen an den Passpunkten mit 1,6-5 cm in der Lage etwas größer, was sich durch die wesentlich geringere Bodenaufösung (7-7,7 cm) der zugrundeliegenden Bilder erklärt. Die Georeferenzierung der Thermalaufnahmen basiert in erster Linie auf den Genauigkeiten der Projektionszentren, da die eingemessenen Passpunkte aufgrund ihrer geringen Größe in den Thermalaufnahmen nicht direkt zu erkennen sind. Entgegen der im Handbuch beschriebenen und vom Hersteller versprochenen Möglichkeit im Rahmen des Postprocessing RTK-Genauigkeit zu erzielen, war das in der Praxis nicht möglich. Nachfragen beim Hersteller Sensefly SA zeigten, dass es sich um ein „Software Bug“ handelt, der in zukünftigen Versionen der Software behoben werden soll (Voraussichtlich Mai 2018). Bis dahin ist es notwendig in einem ersten Schritt aus den Einzelbildern ein Orthophoto mit einer Lagegenauigkeit von ca. ± 3 m zu generieren. In einem zweiten Schritt werden die georeferenzierten Thermalmosaiken dann über 5-8 natürliche Passpunkte, die aus den zeitgleich geflogenen RGB-Daten gewonnen werden, an die „richtige Stelle“ geschoben bzw., fachlich korrekt durch eine Helmert-Transformation feinjustiert. Die so erzielten Genauigkeiten sind in der Lage in der Regel besser als 0,5 m, wie der visuelle Vergleich mit den RGB-Daten zeigt.

2.4 Terrestrisches Laserscanning

2.4.1 Stand der Forschung zur Erfassung von Vegetation

Im Gegensatz zu UAS-Befliegungen zur Erfassung von Makrophyten ist der Einsatz von terrestrischen Laserscannern in diesem Ökosystem ein recht neues Einsatzfeld, weshalb an dieser Stelle zuerst die Potentiale und den Stand der Forschung ausgelotet werden sollen. Traditionell lassen sich Vegetationsbestände und -strukturen durch Feldbegehungen und visuellen Schätzungen, Ermittlungen des Blattflächenindex, der Vegetationsdichte oder der Vegetationshöhe beschreiben. Die jüngsten Fortschritte im Bereich der Fernerkundung und des Laserscannings machen es möglich, die ökologischen Lebensräume und geomorphologische Eigenschaften digital zu analysieren und zu beschreiben (ASHCROFT ET AL., 2014). Beide Systeme haben ihre Vor- und Nachteile. Stationäre Laserscanner sind robuster und weniger wetteranfällig, sind aber schwerer und schlechter zu transportieren, da sie für die jeweiligen Scans im Feld positioniert werden müssen. Dadurch entsteht zudem ein hoher Zeitaufwand. Unbemannte Luftfahrzeuge (UAS) sind leichter, aber dadurch deutlich anfälliger gegenüber starken Winden und Regen. Die Datensammlung gelingt innerhalb kürzester Zeit. Bereiche, die von Bäumen abgedeckt werden, können durch UAS wesentlich schlechter aufgenommen werden als von stationären Laserscannern. Die Datenerfassung durch Laserscanner kann dadurch wesentlich komplexer sein (TILLY ET AL., 2016).

Aus der Literatur lassen sich auf einige der in der Einleitung und in Abschnitt 2.4 aufgeworfenen Fragen mehr oder weniger eindeutige Antworten erhalten. Z.B. haben GUARNIERI ET AL. 2008 eine flächendeckende TLS Kartierung von recht flacher Marschvegetation durch systematisch Rundumscans von erhöht aufgestellten Scanner erzielt. Das Gebiet von 100 x 150 m wurde mit zwei hochauflösenden Scans an beiden Seiten abgedeckt. Primäres Ziel war die Ableitung eines DGM. Der Vergleich mit terrestrisch gemessenen GPS Punkten zeigte, dass dies erfolgreich realisiert werden konnte und genügend „Bodenpunkte“ gemessen wurden. Zur Klassifikation bzw. Trennung der TLS-Punkte in Boden- und Nichtbodenpunkte wurden einfache statistische Verfahren (Min. Größe, K-Means und Max. Likelihood) verwendet. Untersuchungen zur Vegetationsstruktur und ein Vergleich zu einer UAS-Punktwolke erfolgte nicht.

ASHCROFT ET AL., 2014 haben zur Beschreibung und dem Vergleich von gescannten Vegetationsoberflächen Dichteprofile verwendet, die unter anderem die unterschiedliche Punktdichte in Abhängigkeit der Entfernung vom Scannerstandpunkt mit berücksichtigten.

RICHARDSON ET AL. 2014 nutzen mehrere Indizes zur Charakterisierung der Vegetation und deren Struktur mit TLS-Daten, z. B. den „Three-dimensional Vegetation Density Index (3DI)“ und den „Three-dimensional Vegetation Patchiness Index (3PI)“. Beide nutzen die kompletten Laserinformation und ermöglichen auch eine sehr gute Charakterisierung und Trennung unterschiedlicher Arten von Vegetation.

HANCOCK ET AL., 2016 haben speziell die 3D-Struktur von (forstlich) genutzter Vegetation untersucht und dabei einen VOXEL-Ansatz vorgestellt und mit Full-Waveform ALS Daten verglichen. Viele der in weiteren Arbeiten (z. B. RAUMONEN ET AL., 2013, SEIDEL ET AL, 2012) vorgestellten Verfahren, Parameter und Größen sind speziell für den forstwirtschaftlichen Bereich entwickelt worden und können nicht so einfach für den vorliegenden Fall übertragen werden können.

Während der Vergleich zwischen TLS und UAS-Daten bei Gebäuden eigentlich recht einfach ist, z. B. GRENZDÖRFFER ET AL., 2015 und die beiden Datenerfassungsmethoden auch sehr gut kombiniert werden können, ist dies bei Vegetation schon schwieriger, wie z. B. TILLY ET AL., 2016 anhand von einem vegetationsbestandenen Soll (=glaziale Mikrohohlform) dokumentiert haben. Allerdings zeigt diese Arbeit auch, dass die beobachteten Unterschiede zwischen den Datenerfassungsmethoden in großen Teilen auf die die Qualität der konkreten Datenerfassung und -prozessierung zurückzuführen sind. Da die Nutzung von TLS vor allem in der Forstwirtschaft angewendet wird, ist es notwendig eine Metho-

dik zu entwickeln, um Laserscandaten von Vegetationsbestände unterschiedlicher ökologischer Lebensräume verarbeiten zu können. Damit lassen sich unter anderem Informationen zur Artenvielfalt, dem Mikroklima und den Nährstoffkreisläufen ableiten. Der wesentliche Vorteil von TLS gegenüber der klassischen Fernerkundung mit Luftbildern ist, dass man den Scanner in den Vegetationsbestand stellen kann und somit auch den unteren Vegetationsbereich samt (Stängel-) oder Baumdicke erfassen kann. Als Nachteil ist die Ortsgebundenheit hervorzuheben. Mit der Fernerkundung lassen sich Daten von einem gesamten Gebiet erfassen, während man mit dem TLS auf einzelne Standorte, die mitunter schwer zugänglich sind, beschränkt ist (ASHCROFT ET AL., 2014).

ASHCROFT ET AL. (2014) haben aus diesem Grund terrestrische Laserscans an acht verschiedenen Standorten durchgeführt. Sie sahen dabei unter anderem die Überschätzung der Gesamtbedeckung bei windigen Verhältnissen als problematisch an, da die Vegetation dabei in Bewegung ist. Sie hatten ferner die Befürchtung, dass bei einer dichten Vegetation und einem unebenen Boden nur wenige Strahlen die Bodenoberfläche erreichen würden. Es galt weiterhin zu überprüfen, wie der Laserscanner die zunehmende Vegetationsdichte mit ansteigender Höhe erfasst. Schlussendlich sollte abgewogen werden, ob sich ein hoch aufgelöster Laserscan durch den zusätzlichen Zeitaufwand im Gegensatz zu herkömmlichen Methoden, wie der Feldbegehung oder der Befliegung, rechtfertigen lässt. In der Summe wurde der Einsatz von TLS als positiv bewertet, vor allem dann wenn im Gelände eine große Höhenvariation der Vegetation (Grass bis hohe Bäume) zu beobachten ist, was im vorliegenden Fall leider nicht gegeben ist.

2.4.2 Verwendete Technik und Methodik

Beim Laserscanning werden dreidimensionale Punktwolken, die dem Abbild der Realität entsprechen, durch Millionen von Laserstrahlen erzeugt, die durch den Laserscanner entsendet werden. Die Laserstrahlen werden von der Umgebung und darin befindlichen Objekten reflektiert. Durch die Berechnung der Laufzeit und den Winkeln vom Laserscanner zum Objekt können den einzelnen Messungen räumliche Koordinaten zugewiesen werden (ASHCROFT ET AL., 2014). Man kann zwischen terrestrischem und Airborne Laserscanning unterscheiden. Bei dem Airborne Laserscanning (ALS) befindet sich der Laserscanner an einem Flugobjekt, während der terrestrische Laserscanner (TLS) ein stationärer Scanner ist, dessen Scanposition mittels vermarkter Punkte zugeordnet werden kann. TLS erreichen hohe Messgenauigkeiten von bis zu 5 mm.

Die TLS-Daten wurden mit dem FARO Laser Scanner Focus 3D X 130 erhoben. Die Spezifikationen sind nachfolgend kurz zusammengefasst (FARO, 2018).

- Reichweite: 0,6 m bis 130 m
- Messgeschwindigkeit: max. 976.000 Punkte/Sekunde
- Distanzgenauigkeit: +/- 2 mm
- Integrierte Farbkamera (bis zu 70 Megapixel)
- Sichtfeld: 300° x 360°
- Laserklasse 1
- Gewicht: 5,2 kg
- Multi-Sensor (GPS, Kompass, Höhengsensor, Zweiachskompensator)
- Steuerung des Scanners über Touchscreen-Display und WLAN

Für die TLS Messungen wurde der Scanner auf den drei Standorten zuerst auf der Wattfläche positioniert, um von dort aus in den Bestand und das Wattvorland zu scannen. Weitere Scans erfolgten im Bestand. Ergänzend dazu wurde in Krautsand auf dem Hügel des Naturschutzgebäudes von oben in den Schilfbestand gescannt. Weitere spezielle Messungen erfolgten in Balje. Dort wurde der Scanner an einer Position aufgestellt und Scans aus 30 cm über dem Boden, 1 m über dem Boden und ca. 2 m über dem Boden erzeugt. Weiterhin wurde auf dem Pfad im Schilf ein Scan aus ca. 30 cm erzeugt, mit

dem Ziel die Stängeldichte des Schilfs zu erfassen und die Reichweite in der dichten Schilfvegetation zu testen.

Nachdem klar wurde, dass die Standhöhe des Scanners über dem dichten Schilfbestand kaum ausreicht, um diesen großflächig zu durchdringen, wurde für zwei Nachmessungen in Balje und Hollerwetter ein 4 m hohes Stativ verwendet, mit dem die Reichweite und Durchdringung der Vegetation wesentlich erhöht werden konnte, (Abbildung 5).



Abbildung 5: 4 m hohes Stativ am Standort Balje im Einsatz

Für die absolute Georeferenzierung der UAS-Aufnahmen und der Laserscans wurden gemeinsame Passpunkte, die sowohl für das Laserscanning geeignet sind, als auch für die UAS-Befliegungen entwickelt und konstruiert. Von oben betrachtet, bilden die Passpunkte einen weißen Kreis mit einer schwarzen Umrandung. Dessen Zentrum liegt 11,2 cm über dem Mittelpunkt eines Schachbrettmusters, was weitestgehend automatisch vom Laserscanner als Target erkannt werden kann. Die Targets sind auf dem Stativ frei drehbar und können darüber hinaus auch vertikal gekippt werden, um optimal zum Scanner hin ausgerichtet zu werden, vgl. Abbildung 6.



Abbildung 6: Kombinierte Targets für TLS und UAS-Bildflüge auf einem Vermessungsstab oder einem Dreibein montiert

2.4.3 Zeitlicher Ablauf der TLS-Datenerfassung

Folgende Tabelle gibt eine Übersicht der durchgeführten Scans und die dabei erzeugten Datenmengen.

Tabelle 2: Datum, Anzahl und Datenmengen der Scans des terrestrischen Laserscanners

Standort	Datum	Anzahl Scans	Datenmenge
Krautsand	08.08.2017	9	4,48 GB
Balje	09.08.2017	9	4,57 GB
Hollerwettern	10.08.2017	8	4,37 GB
Hollerwettern	25.09.2017	4	2,09 GB
Balje	11.08.2017	10	1,54 GB
Balje	12.09.2017	5	2,09 GB

Wind hat durch die damit verbundenen Bewegungen der Pflanzen einen eher negativen Einfluss auf die Qualität der TLS-Scans, da dies zu einem starken Rauschen in den Scans führt. Hervorzuheben sind in diesem Zusammenhang vor allem die Wetterbedingungen an den beiden nachträglichen Messtagen. Während es am 12.9. in Balje fast stürmte (Wind bis 7 Bft.) war es am 25.9. in Hollerwettern nahezu windstill. Der Wind führt leider dazu, dass sich die Stängel während der Messung mehr oder wenig stark bewegen.

3 Datenauswertung und Ergebnisse

3.1 Verteilung der Dominanzbestände

Tabelle 3 listet die kartierten Pflanzen auf. Außerdem sind Dominanzbestände gekennzeichnet.

Tabelle 3: Dominante Arten auf den drei Standorten.

Wissenschaftlicher Name	Deutscher Name	Dominanzbestand
<i>Bolboschoenus maritimus</i>	Meer-Strandsimse	*
<i>Schoenoplectus tabernaemontani</i>	Salz-Teichsimse	*
<i>Phragmites australis</i>	Schilf	*
<i>Phalaris arundinacea</i>	Rohr-Glanzgras	
<i>Typha spp.</i>	Rohrkolben	

Grundsätzlich war die Verteilung der dominanten Arten auf allen drei Standorten ähnlich ausgeprägt. In der Regel konnten drei Zonen identifiziert werden. Abbildung 7 zeigt diese Zonierung für den Standort Balje. Diese Karte wurde auf Basis des Multispektral-Datensatzes mithilfe eines Random-Forest-Klassifikators (500 Bäume, Klassifikationsgenauigkeit: 96.3 %) berechnet. Ausgehend von der Wattfläche ohne Vegetation in Richtung Deich kommt zunächst ein meist schmaler Saum an Teichsimsen. Die zweite Zone wird dominiert von Strandsimse. Der Übergang von den Teichsimsen zu den Strandsimsen ist fließend. In dieser Zone kommen jedoch auch Rohr-Glanzgras-Patches vor, vor allem in Hollerwettern. Die Grenze zur (dritten) Schilfzone bildet sich jedoch sehr scharf aus. Die Abbildung 8 zeigt die Klassifikationsergebnisse von Hollerwettern. Auch hier wurde die Klassifikation mit einem unabhängigen Datensatz validiert. Die Random Forest-Klassifikation ergab eine Gesamtgenauigkeit von 99 %.

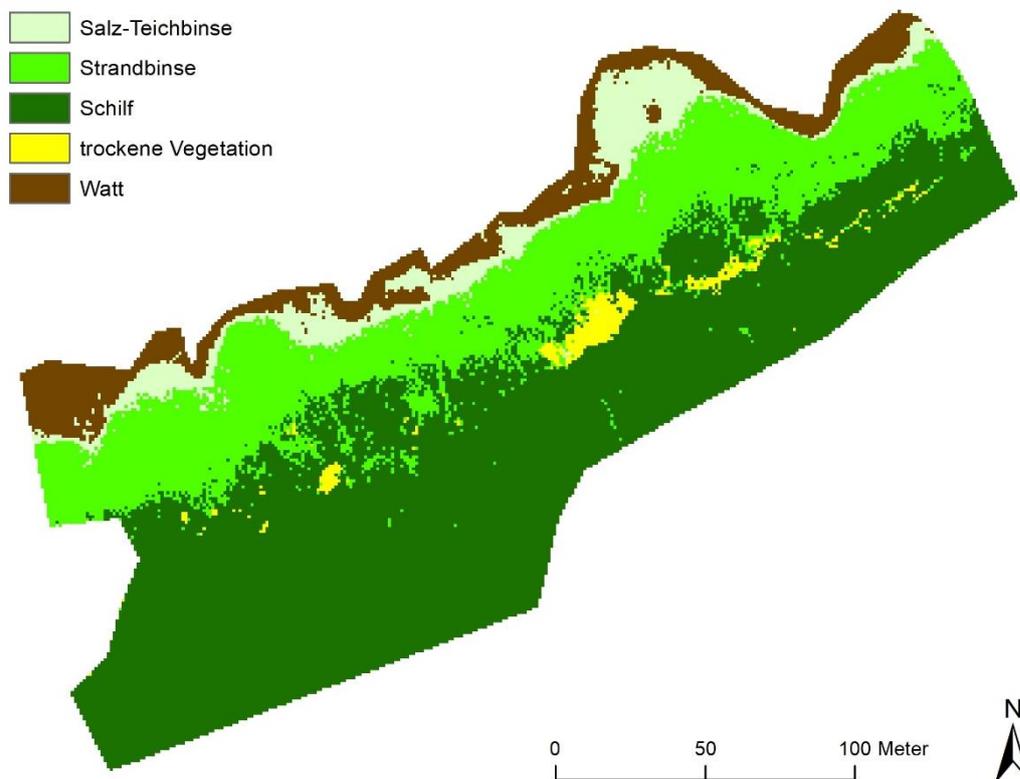


Abbildung 7: Zonierung der dominanten Pflanzenarten am Beispiel von Balje. Random forest Klassifikation (Genauigkeit = 96.3 %).

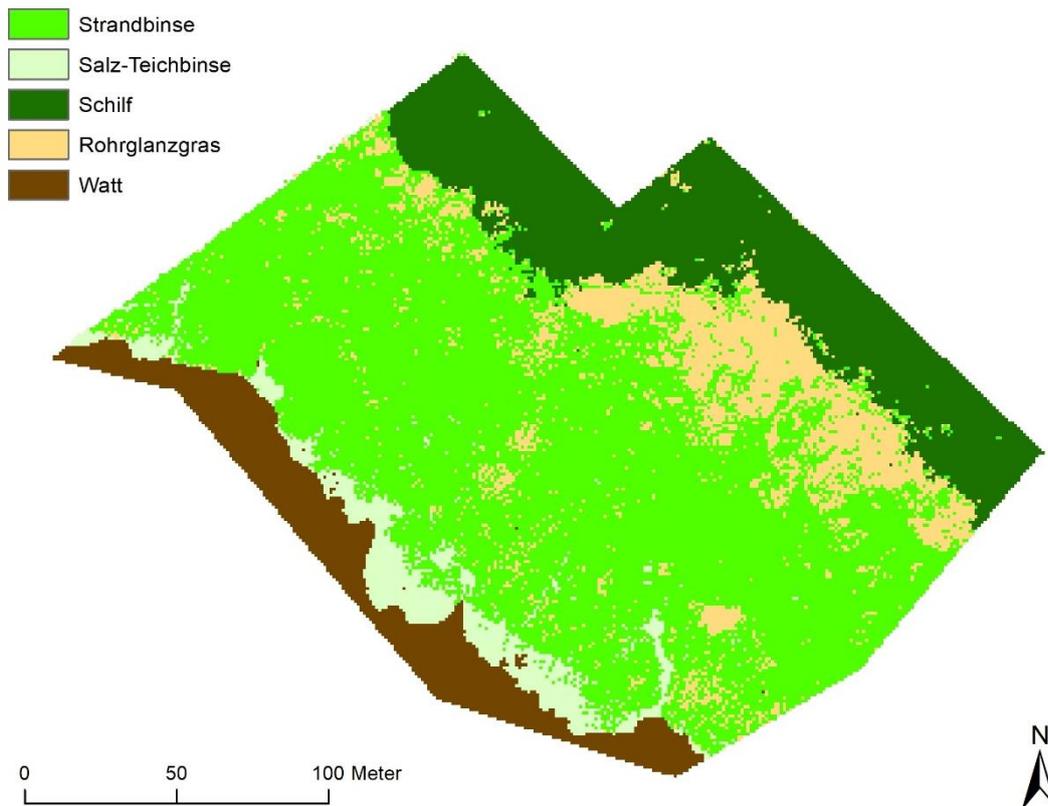


Abbildung 8: Zonierung der dominanten Pflanzenarten am Beispiel von Hollerwettern. Random forest Klassifikation (Genauigkeit = 99 %).

3.2 Zusammenhänge zwischen den terrestrisch erhobenen Daten

Im folgenden Abschnitt werden die im Gelände aufgenommen Pflanzenparameter statistisch untersucht. Die statistische Auswertung erfolgte mit der Programmier- und Skriptsprache Python 2.7.13 und den Paketen NumPy¹, Pandas², Seaborn³ und Statsmodels⁴. Jeder Datensatz wird standortspezifisch beschrieben. Die Tabelle 4 soll zur Abkürzungserklärung dienen.

Tabelle 4: Pflanzenparameter, Abkürzungen und Einheiten

Abkürzung	Erklärung	Einheit
Orth_Hoeh	Orthometrische Höhe (Geländehöhe über Normalnull)	m
Anzahl	Anzahl der Stängel auf 0,16 m ²	
AnzQM	Anzahl der Stängel auf 1 m ²	
Hoehe	Pflanzenhöhe gemessen im Gelände	cm
D_H	Durchschnittliche Höhe gemessen im Labor (n = 10 pro Standort)	cm
D_DM	Durchschnittlicher Stängeldurchmesser am Boden	mm
D_FM	Durchschnittliche Frischmasse	g

¹ <http://www.numpy.org/> - scientific computing

² <https://pandas.pydata.org/> - data structures and data analysis tools

³ <https://seaborn.pydata.org/> - visualization library for drawing statistical graphics

⁴ <https://www.statsmodels.org/stable/index.html> - estimation of statistical models, conducting statistical tests, and statistical data exploration

FM_QM	Frishmasse pro Quadratmeter	g/m ²
D_TM	Durchschnittliche Trockenmasse	g
TM_QM	Trockenmasse pro Quadratmeter	g/m ²
WG	Wassergehalt in den Pflanzen	%
Durchmesser	Stängeldurchmesser gemessen im Gelände	mm
PAR-Pflanze	Photosynthetisch aktive Strahlung im Pflanzenbestand	μmol/s*m ² pro mV
PAR-Sonne	Photosynthetisch aktive Strahlung über Pflanzenbestand	μmol/s*m ² pro mV
PAR %	Relative photosynthetisch aktive Strahlung im Bestand	%
Art1	Dominanzarten (Salzteichsimse, Strandsimse, Rohrglanzgras, Schilf)	

3.2.1 Balje

Das Gelände am Standort Balje steigt von der Vegetationsgrenze der Elbe ungleichmäßig bis etwa zur Grenze der mittleren Hochwasserlinie an. Das Wattvorland ist bei Niedrigwasser mehrere 100 m breit und sehr flach. Der mergelige Boden der Strandsimsenzone (0.6-1.5 m ü. N.N.) ist von einer Vielzahl von ca. 20-50 cm tiefen und etwa 30-60 cm breiten Rinnen durchzogen, die quer zur Hangrichtung verlaufen. Der Abstand der Rinnen beträgt etwa 2-3 m. Anschließend steigt das Gelände kontinuierlich bis auf ca. 2 m ü. N.N. zu dem Deich vorgelagerten Grünland an. Die Vegetationsgrenze liegt bei etwa 0,40-0,50 m ü. N.N. Hauptpflanzenart des Untersuchungsgebiets ist die Strandsimse. Als Ufervegetation wechseln sich die Teichsimsen und die Strandsimsen ab. Die Breite der Teichsimsenzone variiert inselartig und liegt zwischen 1 m und ca. 20 m (vgl. Abbildung 7). Die Pflanzendichte der Teichsimsen ist gering und der Boden ist oftmals von einem dichten immergrünen Algenteppich überdeckt (vgl. Abbildung 13). Die Pflanzenhöhe der Strandsimsen steigt innerhalb von 5 m vom Ufer von ca. 70 cm auf 1 m und mehr an. Die Vegetationsdichte und der Grad der beginnenden Seneszenz (saisonale Absterben) der Strandsimsen zum Zeitpunkt der ersten Datenerfassung am 09.08. variiert nesterartig (Abbildung 11). Zum Zeitpunkt der zweiten Messung gibt es noch einige grüne Inseln, der weitaus meiste Teil der Pflanzen hat sich braun verfärbt (Abbildung 10). An der Grenze zwischen den Strandsimsen und dem Schilfgürtel, die höhenmäßig in etwa mit der MThw übereinstimmt, kommt es zu Lagerbildung, d. h. die Strandsimsen und teilweise auch das Schilf sind niedergedrückt. Bei dem Schilf ist auf den höheren Messpunkten ein teilweise starker Gras-Unterwuchs festzustellen (vgl. Abbildung 14).



Abbildung 9: Überblick Standort Balje mit sichtbarer Vegetationskante zwischen Strandsimsen und Schilf



Abbildung 10: Schrägaufnahme Balje 12.09.2018 mit klar erkennbar lagernden Pflanzen an der MThw Linie und Querrillen in der Strandsimsenzone sowie die vorgelagerte Teichsimsenzone mit Algenbewuchs



Abbildung 11: lichte und niedrige Strandsimsen am Messpunkt B_26R (ca. 1 m hoch und etwa 5 m vom Ufer entfernt)



Abbildung 12: Dichte und hohe Strandsimsen am Messpunkt 9R, Höhe ca. 1,60 m, Entfernung zum Ufer etwa 30 m)



Abbildung 13: Teichsimsen am Messpunkt B_97 auf Algenteppich, Pflanzenhöhe bis 55 cm



Abbildung 14: Schilf am Messpunkt B_99 mit Gras-Unterwuchs (Messpunkt an lichter Stelle, Schilf ca. 2m hoch)



Tabelle 5 zeigt eine statistische Übersicht der im Feld aufgenommenen Parameter. Zu beachten ist, dass zwei Punkte aufgrund fehlender Pflanzenbedeckung aus der Auswertung herausgenommen wurden (B00, 14R).

Tabelle 5: Deskriptive Statistik der gemessenen Parameter am Standort Balje.

	Anzahl	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	25%-Quantil	50%-Quantil	75%-Quantil	Maximum
Orth_Hoehe	48	1.08	0.47	0.40	0.65	1.12	1.40	2.05
Anzahl	48	39.33	15.45	7.00	31.50	40.00	50.25	71.00
AnzQM	48	245.83	96.59	43.75	196.88	250.00	314.06	443.75
Hoehe	48	126.88	53.97	20.00	109.00	121.00	144.25	241.00
D_H	48	107.34	41.36	33.70	88.00	105.20	123.50	219.90
D_DM	48	5.45	1.31	2.70	4.75	5.10	6.23	9.90

Durchmesser	48	4.20	1.64	0.30	3.00	4.00	5.00	8.00
D_FM	48	6.72	3.30	2.69	4.29	6.20	8.08	16.12
FM_QM	48	1688.04	1077.45	163.49	1016.33	1523.72	2244.90	5441.85
D_TM	48	2.91	2.24	0.57	1.53	2.32	3.54	10.62
TM_QM	48	744.79	656.47	29.79	347.78	637.04	913.28	3585.26
PAR-Pflanze	46	177.39	325.81	17.00	36.00	51.50	95.00	1350.00
PAR-Sonne	46	1110.87	350.50	470.00	802.50	1115.00	1392.50	1920.00
PAR %	46	16.20	27.57	1.30	3.46	4.52	12.44	97.47
WG	48	60.26	13.79	26.79	55.89	62.83	66.32	84.02

Ausgewählte Parameter sind als Boxplot-Diagramme in Abbildung 15 dargestellt. Beispielsweise werden die beiden gemessenen Pflanzhöhen im Gelände (Höhe) und im Labor (D_H) gegenübergestellt. Im Mittel scheinen die Labormessungen niedriger zu sein, obwohl die Pflanzen während der Messung auf ihre volle Länge gezogen wurden. Für die Laboruntersuchungen wurden an jedem Standort zehn Pflanzen geerntet. Durch die willkürliche Wahl sind wahrscheinlich auch Pflanzen entnommen wurden, die nicht repräsentativ für die Bestandshöhe waren und somit den Durchschnitt mindern. Ebenfalls unterscheidet sich die Verteilung der Stängeldurchmesser im Gelände von den Labormessungen, wobei die Labormessungen systematischer und damit als vertrauenswürdiger anzusehen sind. Bei den PAR-Messungen im Bestand und als prozentualer Wert sind deutliche Ausreißer zu verzeichnen, die durch den sehr lichten Bestand der Teichsimen zu erklären ist. Beim lichten Bestand der Teichsimen dringt jedoch fast die gesamte eingehende Strahlung bis zum Boden vor. Daher sind die PAR % -Werte sehr hoch und erscheinen in der Verteilung als Ausreißer.

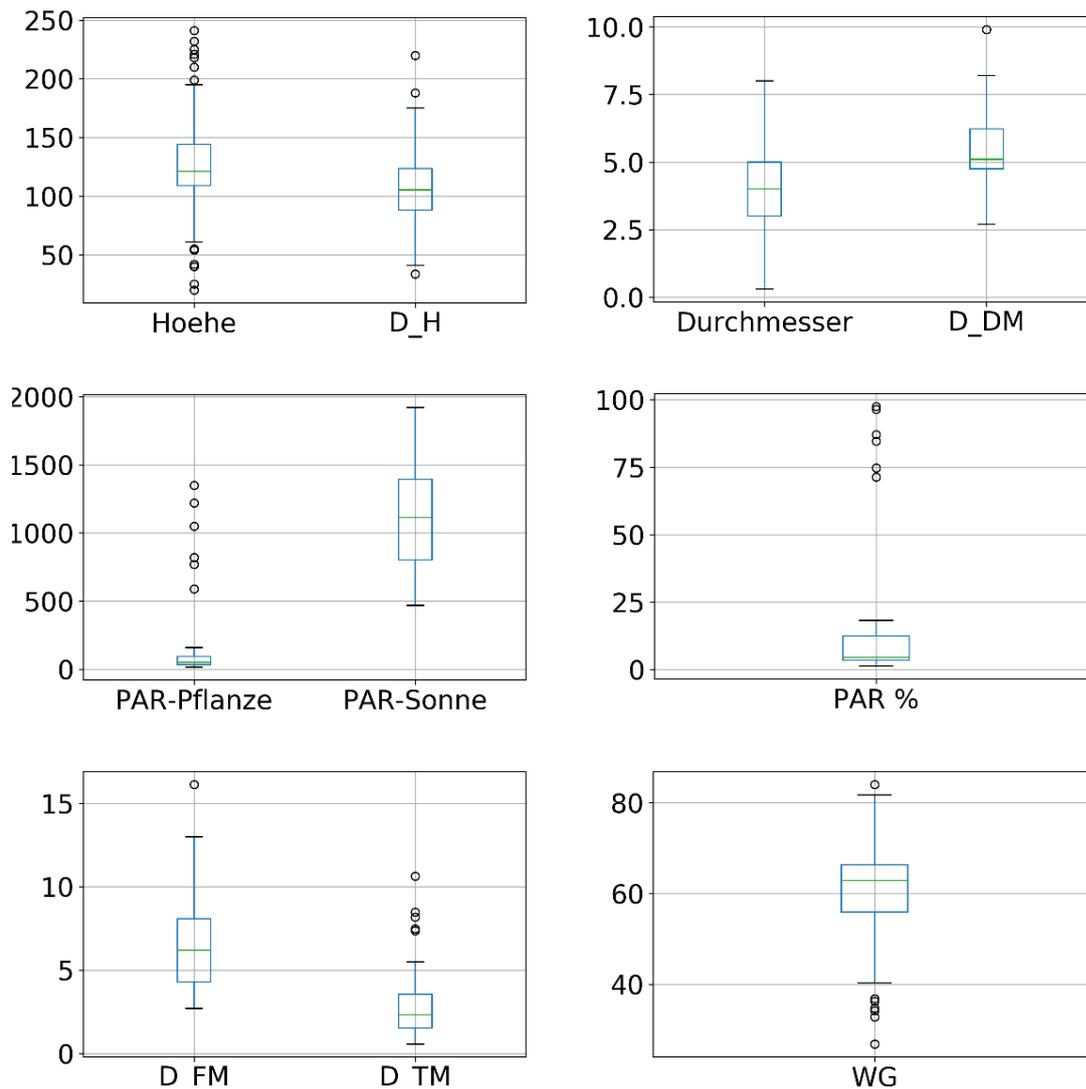


Abbildung 15: Boxplots ausgewählter Pflanzen-Parameter in Balje (Anzahl = Anzahl der Stängel auf 0,16 m²., Hoehe = Pflanzenhöhe gemessen im Gelände, D_H = Durchschnittliche Höhe gemessen im Labor (n = 10 pro Standort), D_DM = Durchschnittlicher Stängeldurchmesser am Boden, D_FM = Durchschnittliche Frischmasse, D_TM = Durchschnittliche Trockenmasse, WG = Wassergehalt in den Pflanzen, PAR-Pflanze = Photosynthetisch aktive Strahlung im Pflanzenbestand, PAR-Sonne = Photosynthetisch aktive Strahlung über Pflanzenbestand, PAR % = Relative photosynthetisch aktive Strahlung im Bestand)

Im nächsten Schritt wurden alle Parameter mithilfe des Pearson-Korrelationskoeffizienten kreuzkorreliert (Abbildung 16).

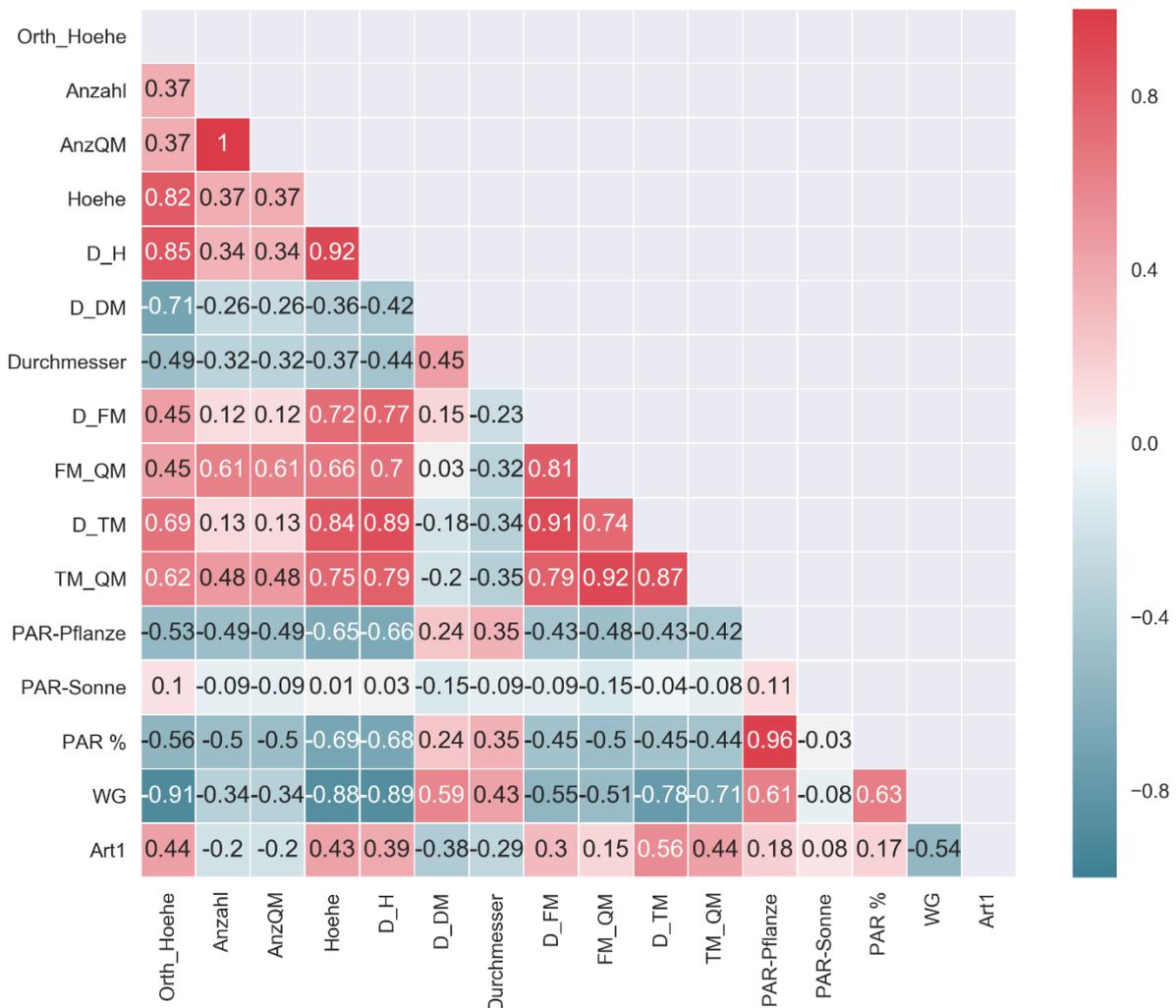


Abbildung 16: Korrelationsmatrix für alle Parameter am Standort Balje. Der Korrelationskoeffizient zeigt den Zusammenhang bzw. die Abhängigkeit zweier Variablen von -1 bis 1 an, wobei 0 (weiß) keinen, 1 (rot) einen positiven und -1 (dunkelblau) einen negativen Zusammenhang angeben (Abkürzungen siehe Tabelle 4).

Hohe Korrelationen waren zu erwarten bei der Beziehung zwischen Frisch-, Trockenmasse und Wassergehalt (0.79-0.91) und zwischen den Messungen der Pflanzenhöhe im Gelände und Labor (0.92). Der Zusammenhang zwischen Stängelanzahl auf 0.16 m² und 1 m² ist 1, weil die Werte einfach mit 6.25 multipliziert wurden.

Hochsignifikante Zusammenhänge finden sich jedoch weiterhin zwischen der orthometrischen Höhe und der Pflanzenhöhe (0.82, 0.85), der Stängeldurchmesser (-0.71), dem Wassergehalt der Pflanzen (-0.91) und bedingt auch der Trockenmasse (0.69, 0.62). Weitere signifikante Abhängigkeiten scheinen zwischen Pflanzenhöhe und Frisch-, Trockenmasse und Wassergehalt zu existieren. Einen schwachen negativen Zusammenhang scheint es zwischen den PAR-Werten und der Pflanzenhöhe zu geben (-0.68, -0.69). Die letztgenannten Beziehungen sollen im Folgenden mit Hilfe von Regressionen näher betrachtet werden, um die Kausalität zu prüfen.

Zunächst wurde die Verteilung der Werte nach Pflanzenart gegenübergestellt. Dazu wurde ein Scatter-Matrix-Diagramm erstellt zur Gegenüberstellung ausgewählter Parameter (Abbildung 17). In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist die Gesamtansicht aller Parameter der Vollständigkeit halber dargestellt. In Abbildung 17 ist klar zu erkennen, dass die drei dominanten Pflanzenarten die Verteilung der Parameter bestimmten.

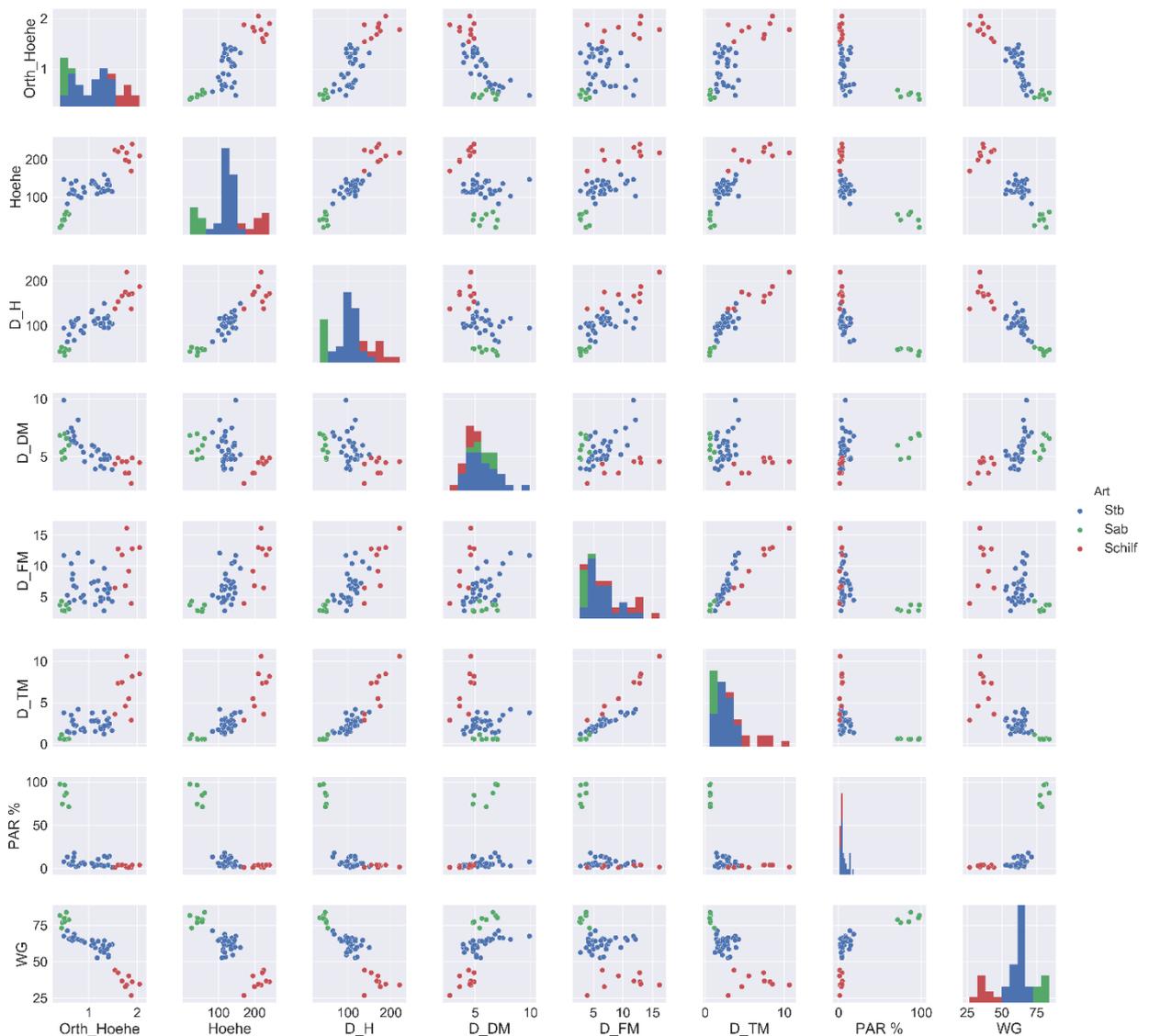


Abbildung 17: Scatter-Matrixplot der Parameter für Balje (Stb = Strandsimse, Sab = Teichsimse), Abkürzungen siehe Tabelle 4.

Wenn Tendenzen zu erkennen sind, dann liegt das an der gemeinsamen Betrachtung der dominanten Pflanzenarten. Am Beispiel der Pflanzenhöhen ist diese Tatsache sehr gut zu erkennen. So befinden sich die kurzen Teichsimsen nahe Koordinatenursprung und das sehr hohe Schilf am anderen Extrempunkt des Koordinatensystems, die Strandsimse im Zentrum (Abbildung 18).

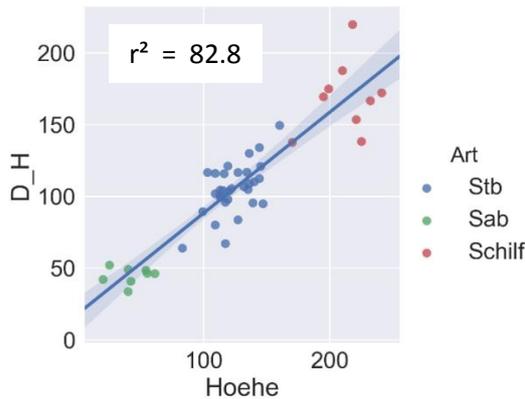


Abbildung 18: Gegenüberstellung der Messung der Pflanzhöhe im Labor und im Gelände differenziert auf die dominante Pflanzenart ($y = 0.7122x + 16.7364$).

Mit steigender Geländehöhe (Orthometrische Höhe) steigt auch die Höhe der Pflanzen (Abbildung 19), was im Gelände auch gut nachvollziehbar ist. Dies bestätigt, dass die Geländehöhe und somit die Fluss-Ufer-Lage ein Schlüsselparameter ist, der ausschlaggebend für die Entwicklung der Pflanzen auf den Wattflächen ist. Des Weiteren gibt es einen negativen Zusammenhang zwischen der steigenden Geländehöhe und dem Stängeldurchmesser sowie dem Wassergehalt der Pflanzen. Auch im Gelände waren signifikante Unterschiede zwischen Teichsimsen und Strandsimse zu erkennen. Außerdem erscheint der Zusammenhang logisch, dass Pflanzen, die näher am und länger im tidebeeinflussten Bereich stehen, einen höheren Wassergehalt haben.

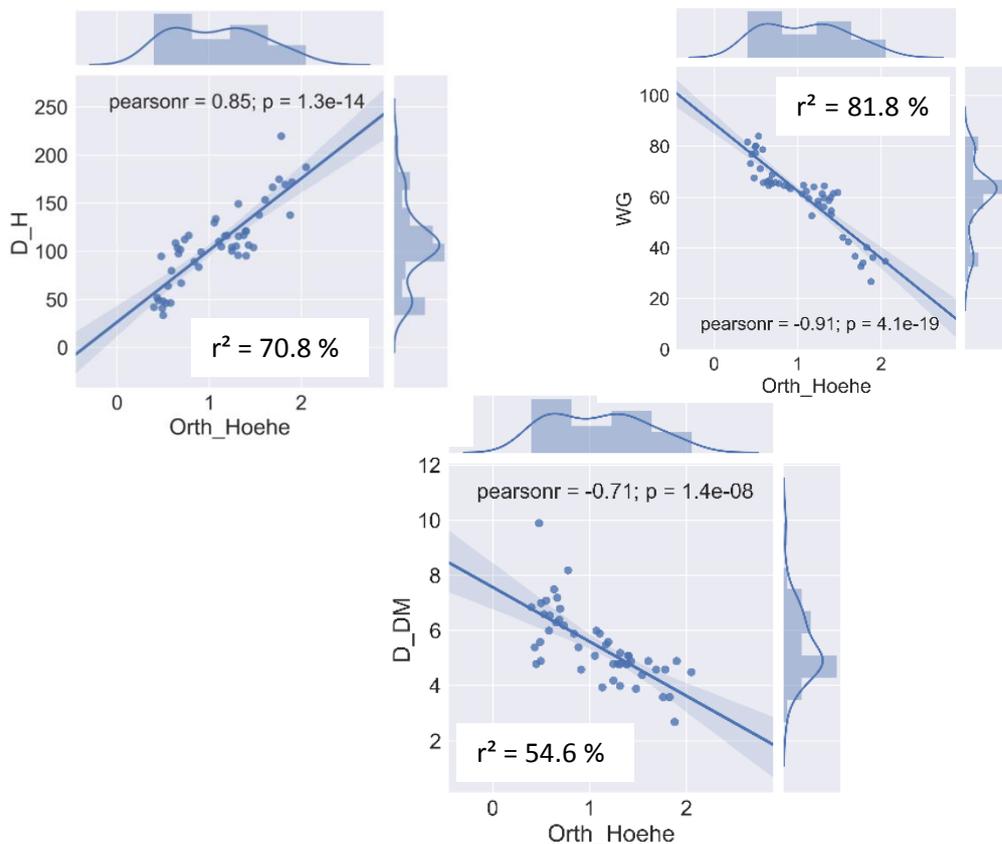


Abbildung 19: Regression der Pflanzhöhe (Labor; $y = 72.7299x + 29.3352$), Wassergehalt ($y = -26.5491x + 88.9928$) und Stängeldurchmesser ($y = -2.1244x + 7.8002$) zur orthometrischen Höhe.

Eigentlich war ein Zusammenhang zwischen der Bestandsdichte und den PAR-Messungen zu vermuten, denn je dichter der Bestand, desto niedriger ist die Strahlung, die am Boden des Pflanzenbestandes ankommt (Transmissivität). Die Dichte wurde aus der Multiplikation der Anzahl der Pflanzen pro Quadratmeter und der Frischmasse bzw. respektive der Trockenmasse pro Pflanze ermittelt. Die Dichte korrelierte jedoch nur sehr schwach mit den PAR-Werten (-0.5 - -0.44; Abbildung 16). Die negative Tendenz der Korrelation deutet auf die richtige Annahme hin, jedoch konnte statistisch kein robustes Modell erzeugt werden. Der Grund kann auch auf eine suboptimale Auswahl an Probepunkten im Gelände hindeuten oder die Probenahme-Strategie zur Bestimmung der Pflanzendichte sollte überdacht werden.

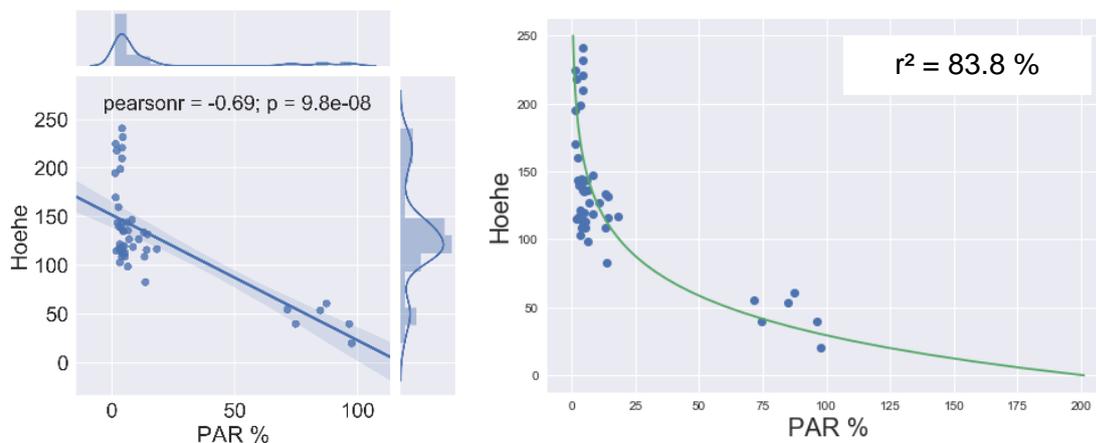


Abbildung 20: Möglicher Zusammenhang der PAR-Werte mit der Höhe des Pflanzenbestandes (links: $y = -1.2890x + 151.8153$; rechts: $y = 201.055 * e^{-0.0237x}$)

Abbildung 20 zeigt den Zusammenhang zwischen der Pflanzenhöhe und den PAR-Messungen. Aufgrund der Datenlücke ist die exponentielle Korrelation statistisch relativ unsicher, jedoch kann der Zusammenhang aus den Erfahrungen im Gelände bestätigt werden, denn mit steigender Pflanzenhöhe schien auch die Dichte des Bestandes zuzunehmen. Auch die PAR-Werte im Bestand wurden mit der Entfernung zur Uferlinie immer kleiner. Ein systematisches Anlegen von Gradienten von der offenen Wattfläche bis in den Schilfbestand wäre hilfreich um solche Annahmen statistisch abzusichern. Auch wenn es sich um Modelle für verschiedene Mais-Sorten handelt, wird der exponentielle Zusammenhang zwischen der Bestandshöhe und dem PAR-Wert auch in WANG ET AL. (2008) gezeigt.

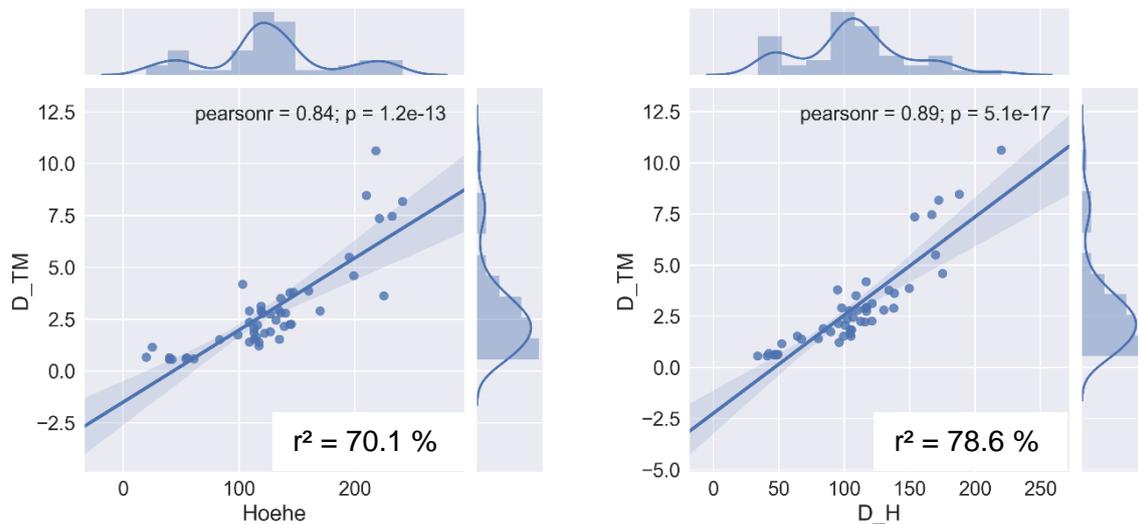


Abbildung 21: Regression zwischen der Trockenmasse (D_TM , $y = 0.0368x - 1.8141$) und der Pflanzhöhe (Höhe, $y = 0.0495x - 2.4448$)

Abbildung 21 zeigt die sehr guten statistischen Zusammenhänge zwischen der Pflanzhöhe und der mittleren Trockenmasse pro Pflanze. Diese Regressionsmodelle können genutzt werden um die Trockenmasse auf die Fläche umzurechnen, wenn man die Anzahl der Pflanzen im Untersuchungsgebiet kennt. Da der Parameter „Anzahl der Pflanzen“ jedoch statistisch recht schwach ist, kann der Fehler bei der Hochrechnung sehr groß werden.

Da die bisherigen Ergebnisse alle drei Zonen der Dominanzbestände eingeschlossen haben, wurde im nächsten Schritt nur die Zone der Strandsimse betrachtet. In dieser Zone lag die Mehrheit der 50 vorgegebenen Messpunkte ($n = 31$). Damit soll geprüft werden, ob die bisherigen Annahmen auch innerhalb einer Pflanzenzone statistisch valide sind.

Vergleicht man die Korrelationsmatrix in Abbildung 22 mit der für alle Pflanzenzonen (Abbildung 16), ist ein allgemeines Absinken der statistischen Sicherheit zu verzeichnen. Zwar korrelieren die Frisch- und Trockenmasse und auch die Pflanzhöhen im Gelände und im Labor immer noch, der statistische Zusammenhang ist jedoch deutlich schwächer. Die einzigen Parameter, die statistisch sicherer werden, sind die negativen Zusammenhänge zwischen der Geländehöhe zur Stängeldurchmesser und dem Wassergehalt der Pflanzen.

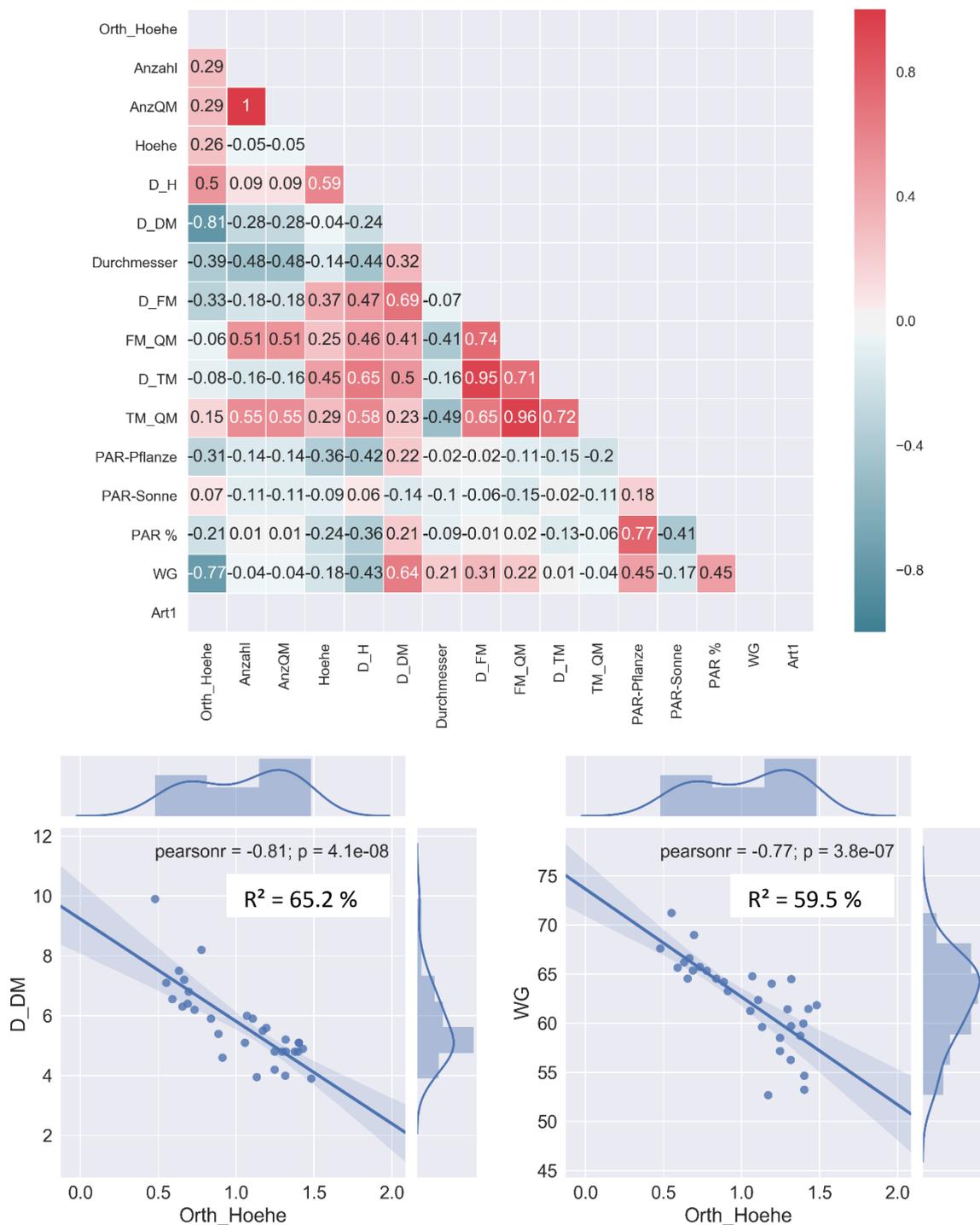
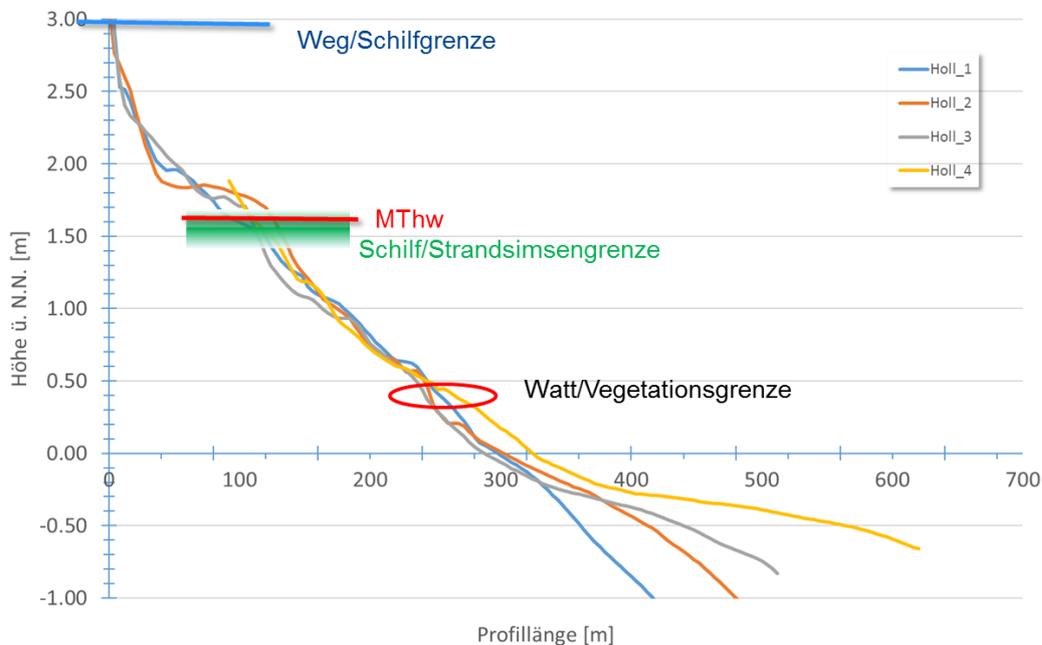


Abbildung 22: Korrelation aller Pflanzenparameter für die Zone der Strandlimse in Balje und Regressionen zwischen der orthometrischen Höhe und der Stängeldurchmesser ($y = -3.4180x + 9.2253$) und des Wassergehaltes ($y = -10.9696x + 73.6556$), Abkürzungen siehe Tabelle 4.

Ausgehend von diesen Ergebnissen werden im Fernerkundungsteil die statistischen Modelle verwendet um diese auf das gesamte Gebiet der Drohnenbefliegung anzuwenden, vgl. Kapitel 3.7. Zunächst aber werden die Standorte Hollerwettern und Krautsand auf die gleiche Art statistisch betrachtet.

3.2.2 Hollerwettern

Das Gelände am Standort Hollerwettern steigt von der Vegetationsgrenze der Elbe sehr gleichmäßig bis etwa 3m ü.N.N. zum Deich hin an, vgl. Abbildung 23.



Datengrundlage: Profilmessungen WSA Hamburg, Frühjahr 2013

Abbildung 23: Höhenverlauf und Höhenzonierung der Dominanzarten am Standort Hollerwettern aufgetragen auf vier Vermessungsprofilen des WSA Hamburg

In der Strandsimsenzone (0.6-1.5 m ü. N.N.) sind eine Reihe von ca. 10-25 cm tiefen und etwa 20-40 cm breiten Rinnen zu beobachten, die quer zur Hangrichtung verlaufen. Der Abstand der Rinnen beträgt etwa 4-7 m. Die Vegetationsgrenze liegt bei etwa 0,40 m ü. N.N.

Die Vegetation des Standort Hollerwettern wird von den drei Dominanzarten geprägt. Flusseitig gesehen beginnt die Vegetation mit einem ca. 3-5 m breiten Teichsimsen-Gürtel, Abbildung 24, der sukzessive in eine Strandsimsen dominierte Pflanzengesellschaft übergeht, Abbildung 25. Die Teichsimsen sind mit 1,10-1,30 m deutlich höher, dichter und breiter als in Balje. Der Strandsimsenbereich ist mit 90-140 m recht breit. Im Übergangsbereich zum Schilf finden sich mehrere, in der Regel runde Einschlüsse bzw. Patches mit Rohr-Glanzgras, vgl. Abbildung 28. Ab einer Höhe von etwa 1,35-1,60 m über dem Meeresspiegel beginnt die Schilfzone, die sich zum Deich hin ausbreitet.

Die Vegetationsverteilung in Hollerwettern ist generell somit ähnlich strukturiert wie in Balje, wenn auch die Pflanzen im Schnitt deutlich größer sind. Jedoch bildet das Rohr-Glanzgras (*P. arundinacea*) in der Strandsimsen-Zone kleinräumige „Patches“ aus.



Abbildung 24: Marschkante in Hollerwettern mit dichtem Teichsimsenbewuchs



Abbildung 25: Schrägaufnahme Standort Hollerwettern mit deutlich sichtbarer Grenze zwischen Schilf und Strandsimse, als auch Rohr-Glanzgrasnesten



Abbildung 26: Übergang Teichbinse zu Strandsimse am Messpunkt H 25R



Abbildung 27: Dichte Strandsimsen mit beginnender Seneszenz am Messpunkt 34R



Abbildung 28: Rohr-Glanzgras am Messpunkt Hreed



Abbildung 29: Schilf am Messpunkt H_23

In Hollerwettern konnten alle 50 Probenahme-Punkte in die Analyse einbezogen werden. Eine Übersicht der deskriptiven Statistik der berücksichtigten Parameter ist in Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zu finden. Die Abkürzungen und Einheiten der Parameter sind in Tabelle 4 beschrieben. Die Abbildung 30 vergleicht unter anderem die Pflanzenhöhen, gemessen im Gelände und im Labor. Es ist gut erkenntlich, dass die Geländemessungen eine höhere Spannweite und im Allgemeinen auch höhere Messwerte ergaben. Die Labormessungen am Standort Hollerwettern erfolgten etwa sechs Wochen nach den Feldmessungen. Die in der Zwischenzeit einsetzende Seneszenz der Pflanzen führte bei der Auswahl der zehn geernteten Pflanzen im Gelände teilweise zu kurzen Pflanzen, die die eigentliche Höhe des Bestandes nicht repräsentieren. Der Tabelle 6 ist zu entnehmen, dass der Höhenunterschied im Mittel sogar fast 50 cm beträgt. Dieser Unterschied ist bei den gemessenen Durchmesser im Gelände im Vergleich zu den Messungen im Labor nicht zu beobachten. Trotzdem wird in der statistischen Betrachtung sichtbar, dass die im Gelände gemessenen Durchmesser deutlich schlechter abschneiden. Diese Tatsache ist auch in Balje beobachtet worden.

Tabelle 6: Deskriptive Statistik der gemessenen Parameter am Standort Hollerwettern.

	Anzahl	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	25%-Quantil	50%-Quantil	75%-Quantil	Maximum
Orth_Hoehe	50	0.89	0.43	0.08	0.53	0.86	1.14	1.81
Anzahl	50	29.80	9.53	12.00	23.00	30.50	36.00	57.00
AnzQM	50	186.25	59.55	75.00	143.75	190.63	225.00	356.25
Hoehe	50	175.06	35.69	85.00	154.50	174.50	183.50	255.00
D_H	50	128.93	28.42	65.70	114.95	133.25	147.30	180.10

D_DM	50	7.13	1.93	3.10	6.23	7.15	7.90	11.80
Durchmesser	50	6.79	1.67	3.00	5.75	7.00	7.63	11.33
D_FM	50	14.44	6.13	5.20	11.08	14.02	16.23	49.27
FM_QM	50	2619.78	1065.58	739.34	1906.13	2570.60	3278.36	5588.85
D_TM	50	4.00	2.14	1.07	2.85	3.78	4.40	14.50
TM_QM	50	716.33	345.07	167.50	442.33	694.03	929.96	1851.43
PAR-Pflanze	50	92.31	164.39	1.30	27.00	51.00	86.50	900.00
PAR-Sonne	50	885.90	528.16	336.00	452.50	615.00	1300.00	2110.00
PAR %	50	11.48	14.26	0.23	2.79	6.70	12.15	61.54
WG	50	72.49	7.86	48.27	70.69	72.71	75.95	86.28

Auch bei den PAR-Werten sind wieder deutliche Ausreißer zu entdecken, welche wie in Balje den Teichsimsen zuzuschreiben sind.

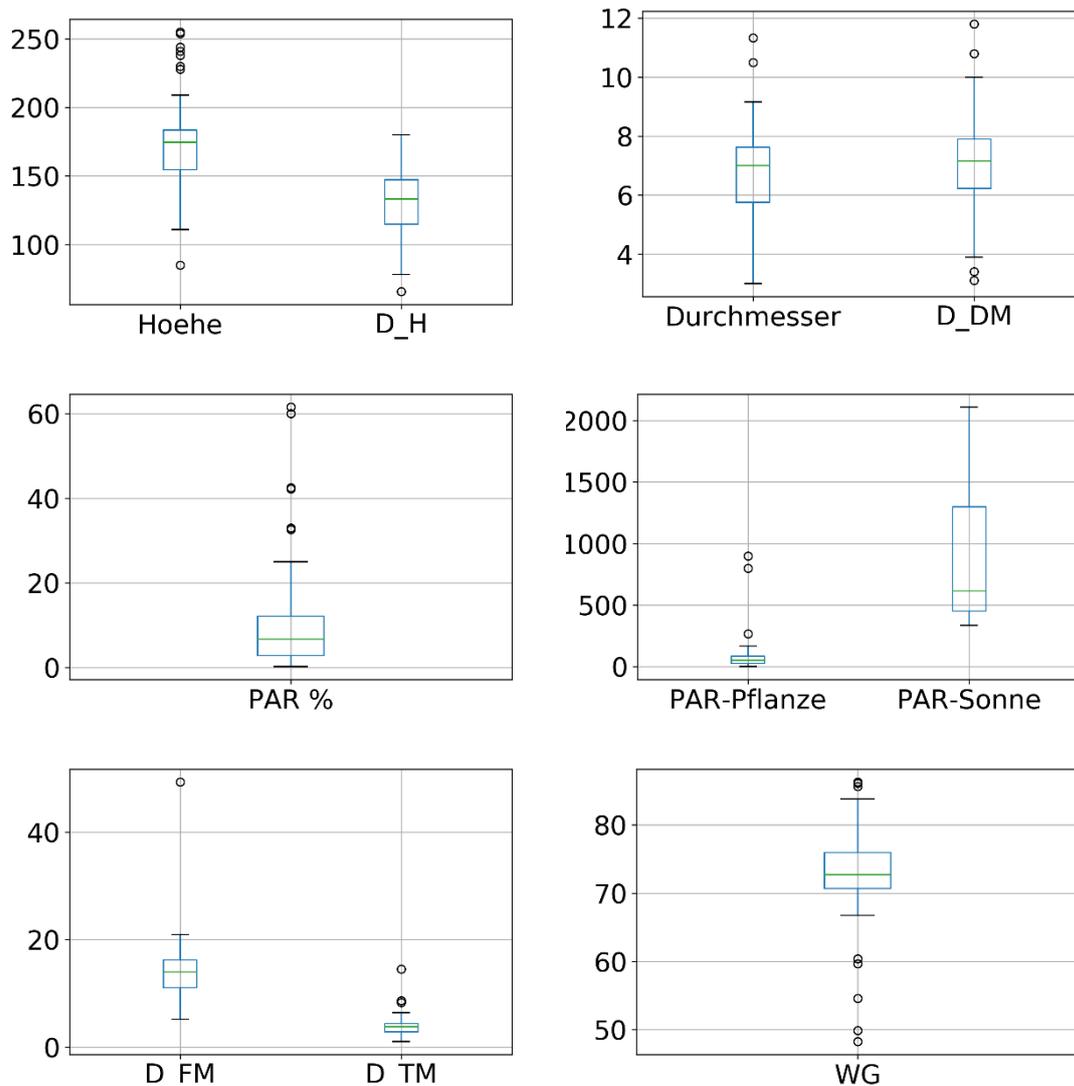


Abbildung 30: Boxplots ausgewählter Pflanzen-Parameter in Hollerwettern (Anzahl = Anzahl der Stängel auf 0,16 m², Hoehe = Pflanzhöhe gemessen im Gelände, D_H = Durchschnittliche Höhe gemessen im Labor (n =

10 pro Standort), D_{DM} = Durchschnittlicher Stängeldurchmesser am Boden, D_{FM} = Durchschnittliche Frischmasse, D_{TM} = Durchschnittliche Trockenmasse, WG = Wassergehalt in den Pflanzen, PAR -Pflanze = Photosynthetisch aktive Strahlung im Pflanzenbestand, PAR -Sonne = Photosynthetisch aktive Strahlung über Pflanzenbestand, $PAR\%$ = Relative photosynthetisch aktive Strahlung im Bestand)

Wie in Abbildung 31 dargestellt, korreliert die Geländehöhe (Orth_Hoehe) wieder mit einigen Parametern, nämlich der Pflanzenhöhe gemessen im Gelände sehr hoch (0.84) im Labor jedoch nur moderat (0.56) und moderat auch mit der mittleren Trockenmasse pro Pflanze (0.50). Letztere Korrelation sinkt jedoch auf 0.34 bei der Betrachtung pro Quadratmeter, was wieder die Vermutung nahelegt, dass die Anzahl pro Quadratmeter nicht repräsentativ für das Gelände ist. Des Weiteren zeigen sich starke bis moderate negative statistische Zusammenhänge der Geländehöhe mit dem Wassergehalt der Pflanzen (-0.83), dem Stängeldurchmesser (-0.63) und dem PAR -Werten (-0.66). Außerdem scheint eine relativ gute Korrelation zwischen der Pflanzenhöhe (Labor) und der Trockenmasse pro Pflanze zu bestehen. Die Scatter-Matrix (Abbildung 32) zeigt die Verteilung der ausgewählten Parameter. Der Vollständigkeit halber sind alle Parameter nach Pflanzenart in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** gegenübergestellt.

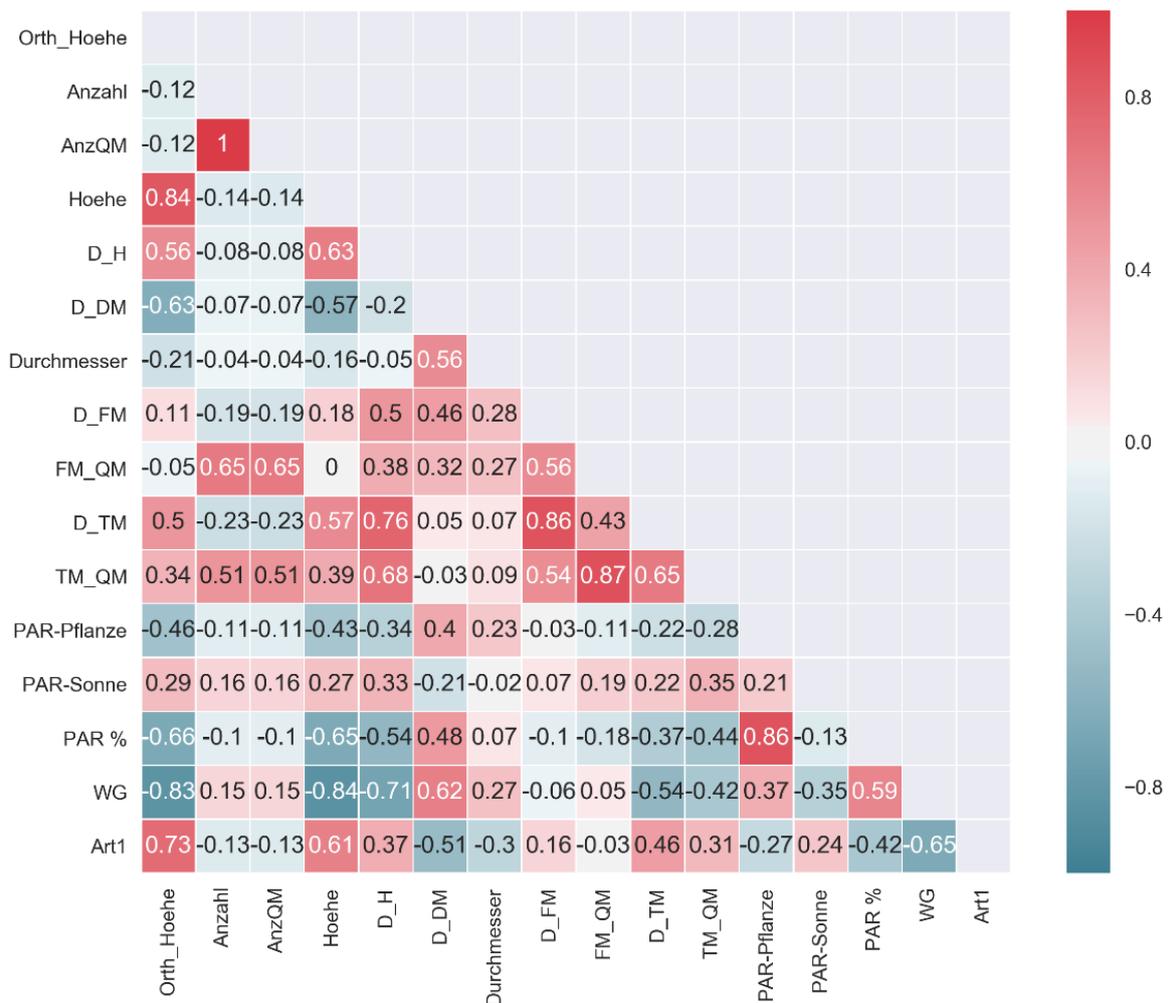


Abbildung 31: Korrelationsmatrix für alle Parameter am Standort Hollerwettern, Abkürzungen siehe Tabelle 4.

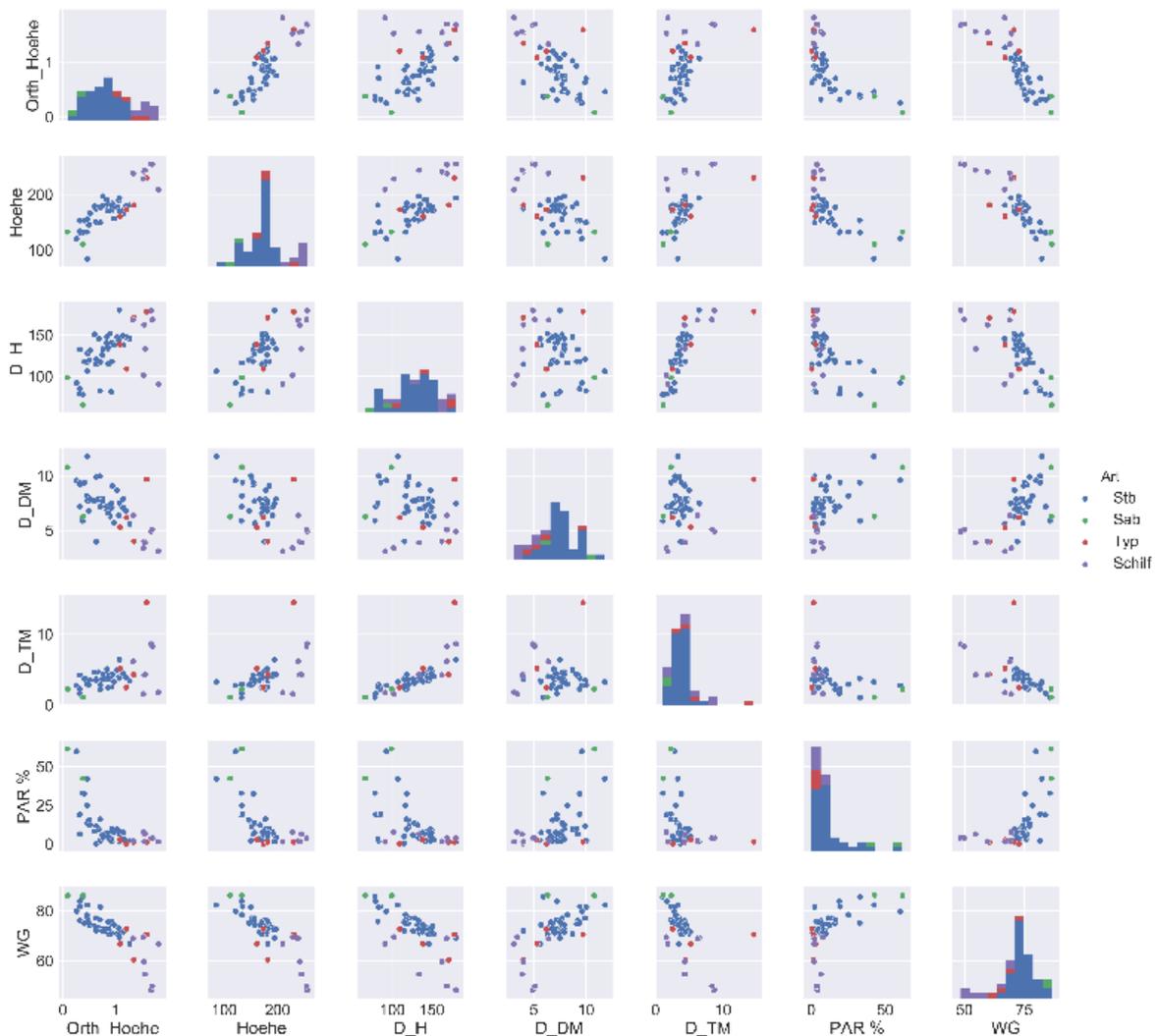


Abbildung 32: Scatter-Matrixplot ausgewählter Parameter für Hollerwettern (Stb = Strandsimse, Sab = Teichsimse, Typ = Typha), Abkürzungen siehe Tabelle 4

Im Folgenden werden die Regressionsmodelle, die gute oder moderate Zusammenhänge zeigten näher betrachtet. Die Geländehöhe zeigt besonders gegenüber den Parametern Pflanzhöhe (Gelände) und dem Wassergehalt der Pflanzen robuste Regressionen (Abbildung 33). Der negative Zusammenhang der Geländeoberfläche zur Stängeldichte sowie zu den PAR-Werten kann auch in Hollerwettern zumindest tendenziell belegt werden. Wie in WANG ET AL. (2008) und für Balje gezeigt, passt eine exponentielle Funktion besser in die Verteilung der PAR-Werte zu den Pflanzhöhen (Abbildung 34). Jedoch sind die Ergebnisse in Hollerwettern mit einer erklärten Varianz von 55.1 % nicht so robust, wie für Balje. Dieser Sachverhalt sollte nochmals genauer untersucht werden, indem man entlang eines Gradienten der orthogonal zum Küstenverlauf vom Watt bis in die Schilfbestände verläuft, eine oder mehrere Reihen von Proben zieht. Außerdem wäre neben der PAR Messung eine vergleichende Messung mit einem LAI-Messgerät interessant.

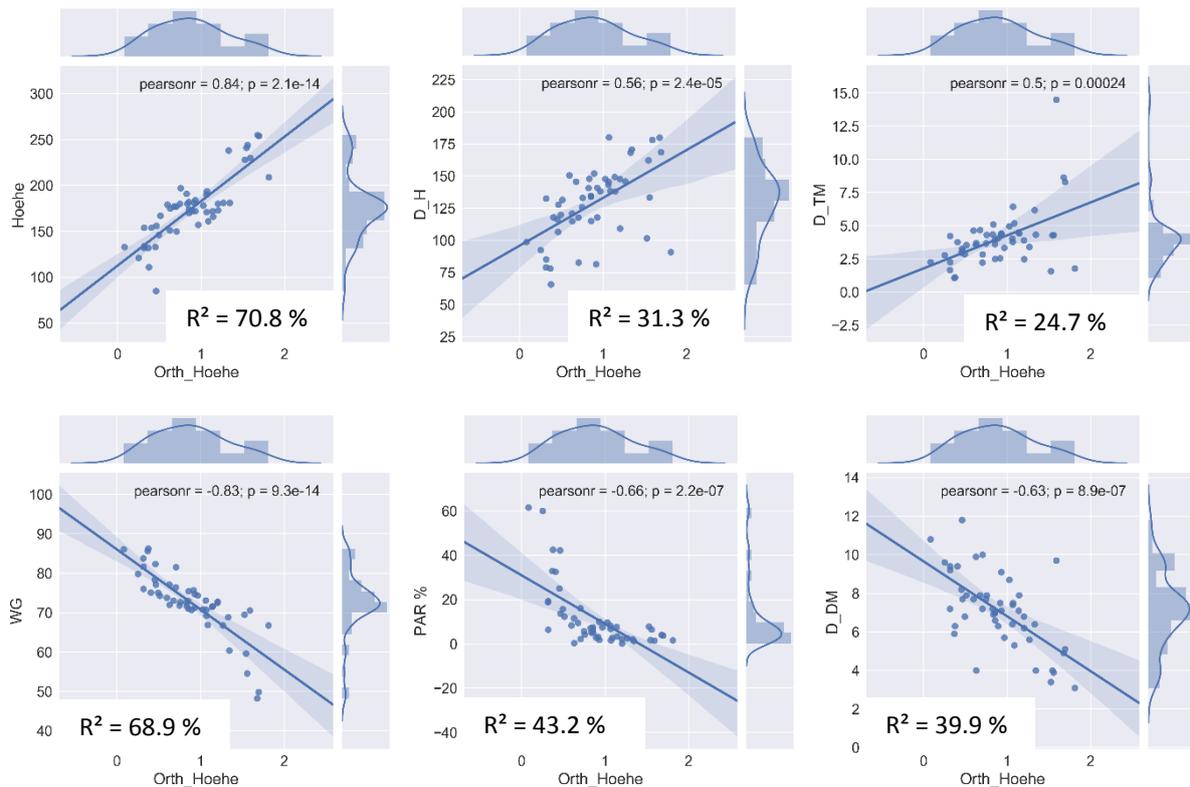


Abbildung 33: Regressionen der Geländehöhe (Orth_Hoehhe) mit verschiedenen Parametern in Hollerwettern (Hoehhe: $y = 70.2139x + 112.5524$, D_H: $y = 37.2078x + 95.8080$, D_TM: $y = 2.4838x + 1.7890$, WG: $y = -15.2472x + 86.0658$, PAR %: $y = -21.9128x + 30.9866$, D_DM: $y = -2.8442x + 9.6580$), Abkürzungen siehe Tabelle 4.

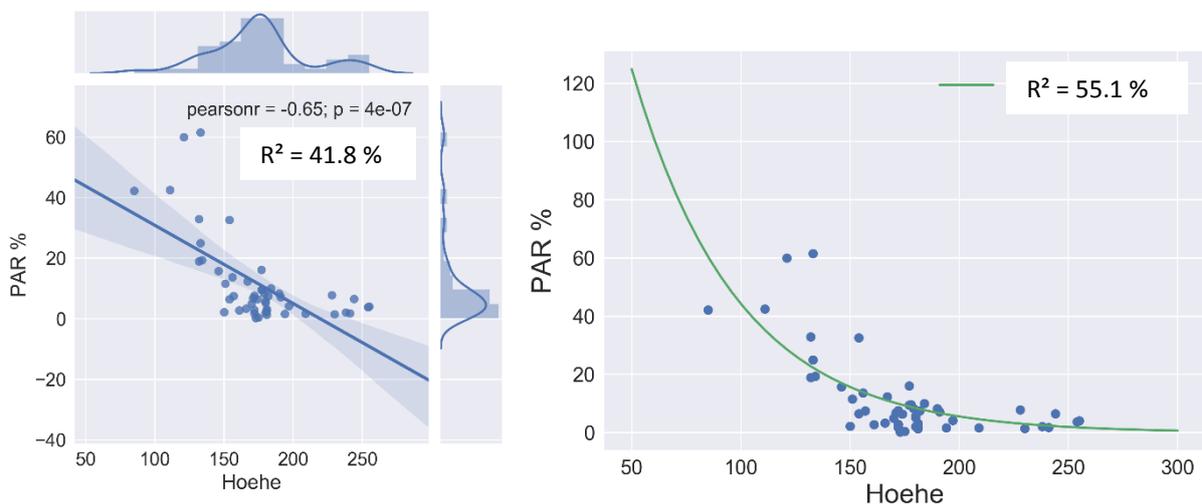


Abbildung 34: Lineare ($y = -0.2581x + 56.6621$) und exponentielle ($y = 352.001 * e^{-0.02073x}$) Regression zwischen Pflanzenhöhe (Gelände) und photosynthetisch aktiver Strahlung (PAR %) in Hollerwettern

Abbildung 35 zeigt die Regression zwischen der Trockenmasse pro Pflanze und der mittleren Trockenmasse pro Pflanze. Das Regressionsmodell ist mit 57.2 % erklärter Varianz für Hollerwettern etwas schwächer als für Balje, zeigt jedoch die erwartete Tendenz und kann somit weiter Verwendung finden.

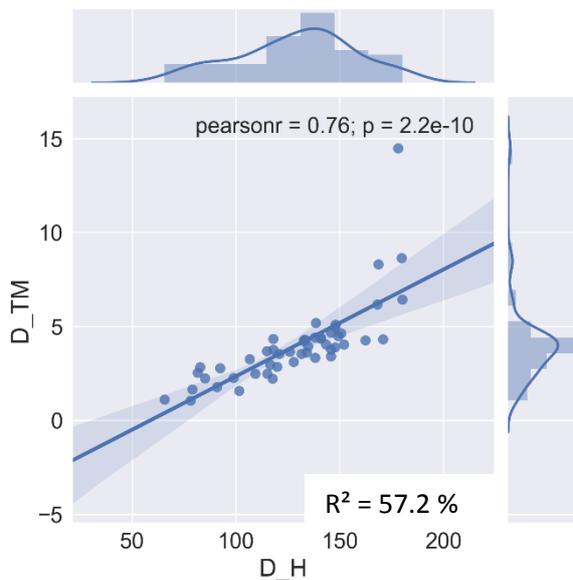
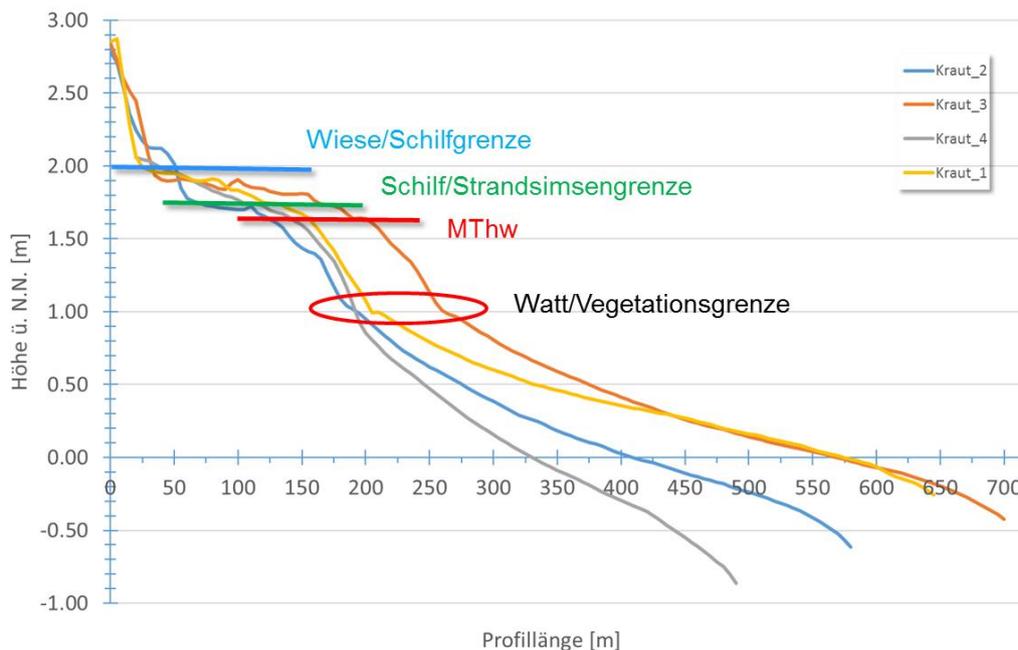


Abbildung 35: Regression ($y = 0.0569x - 3.3324$) zwischen Pflanzenhöhe (D_H , Gelände) und mittlerer Trockenmasse pro Pflanze (D_{TM})

3.2.3 Krautsand

Am Übergang vom Watt zur Vegetation ist am Standort Krautsand eine Geländekante und ein Anstieg des Geländes, bzw. eine größere Hangneigung als auf dem Watt zu beobachten. Eine Verebnung ist erst wieder außerhalb des engeren Untersuchungsgebiets, in der Schilfzone zu beobachten. Eine Verebnung in ähnlicher Höhenlage ist in Hollerwettern ebenfalls zu beobachten, vgl. Abbildung 36.



Datengrundlage: Profilmessungen WSA Hamburg, Frühjahr 2013

Abbildung 36: Höhenverlauf und Höhenzonierung der Dominanzarten am Standort Krautsand aufgetragen auf vier Vermessungsprofile des WSA Hamburg

Die Vegetationsgrenze liegt bei etwa 1,05-1,10 m ü. N.N. Hauptpflanzenart ist die Strandsimse, die auch als Ufervegetation dominiert, vgl. Abbildung 37. Auf dem Luftbild ist ein ca. 20 m breiter Bereich zu beobachten, in dem die Strandsimse schon erste Seneszenz-Erscheinungen zeigen. Die Pflanzen haben durchwegs Fruchtkörper gebildet. Die Seneszenz macht sich vor allem durch braune Blätter in den unteren Blättern bemerkbar, vgl. Abbildung 40. Der Boden scheint durch die generell niedrigeren Pflanzen teilweise durch, so dass rein fernerkundlich betrachtet ein Mischsignal aus vitalen Pflanzen, abgestorbenen Pflanzen und Boden zu beobachten ist. In einer Entfernung von ca. 35-40 m von der Uferlinie sind viele lagernde Pflanzen zu beobachten. Höhenmäßig deckt sich dieser Bereich sehr gut mit dem mittleren Hochwasserstand von 1,59 m ü. N.N. des Pegels Krautsand, der ca. 2,5 km flussabwärts liegt. Das engere Untersuchungsgebiet reicht nicht in den Schilfgürtel, der höhenmäßig ab etwa 1,70 m ü. N.N. anschließt. In der Konsequenz bedeutet das, dass die Strandsimse bei allen Pflanzenprobestellen die Dominanzart ist.



Abbildung 37: Ufervegetation Strandsimse, Standort Krautsand



Abbildung 38: Standort Krautsand aus der Schrägperspektive, Vegetationszonierung des Standorts, inkl. Schilfgürtel



Abbildung 39: Abgestorbener Unterwuchs bzw. angespülte Pflanzenreste auf der Höhe des mittleren Hochwassers



Abbildung 40: Messpunkt 22R – lockere Strandsimsen mit beginnender Seneszenz

Für die nachfolgend vorgestellte Beschreibung der Messergebnisse mussten zwei Punkte ausgeschlossen werden. Einer (1R) lag räumlich zu nah an einem anderen Punkt (66). Des Weiteren hatte ein zweiter Punkt keine Vegetationsbedeckung (K00). In Krautsand sind im Vergleich zu Balje und Hollerwettern keine Gewichtsmessungen im Labor vorgenommen worden. Daher stehen keine Informationen zur Frisch-, Trockenmasse und zum Wassergehalt zur Verfügung. Durch mehrfache Neuorientierung im Gelände, sind die Stängeldurchmesser nur im Labor ermittelt worden.

Tabelle 7: Deskriptive Statistik der gemessenen Parameter am Standort Krautsand

	Anzahl	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	25%-Quantil	50%-Quantil	75%-Quantil	Maximum
Orth_Hoehe	48	1.45	0.16	1.06	1.35	1.52	1.58	1.63
Anzahl	48	30.60	10.70	15.00	23.00	28.50	35.00	71.00
Hoehe	48	167.63	18.92	110.00	160.00	174.00	178.50	197.00
D_H	48	137.10	16.37	95.60	129.63	137.55	147.90	171.70
D_DM	48	4.52	1.13	2.35	3.70	4.53	5.26	7.40
PAR-Pflanze	48	78.13	75.27	13.23	23.84	51.18	92.72	267.90
PAR-Sonne	48	917.66	285.75	455.70	717.95	856.55	1006.08	1753.50
PAR %	48	8.47	7.58	1.28	2.82	6.88	11.04	36.18

Beim Vergleich der gemessenen Höhen im Gelände und im Labor zeigt sich das gleiche Bild, wie in Balje und Hollerwettern (Abbildung 41). Bei den Labormessungen kommt es zu einer Unterschätzung der Bestandshöhen im Mittel ca. 30 cm. Bei den PAR-Werten liegt die Standardabweichung mit 7.58% deutlich unter der der Standorte Hollerwettern und Balje (15-30 %). Dies liegt daran, dass es in Krautsand keine Teichsimsenzone gibt. Außerdem liegen keine der 50 Messpunkte im Schilf. Somit beziehen sich die Betrachtungen von Krautsand ausschließlich auf die Zone der Strandsimsen.

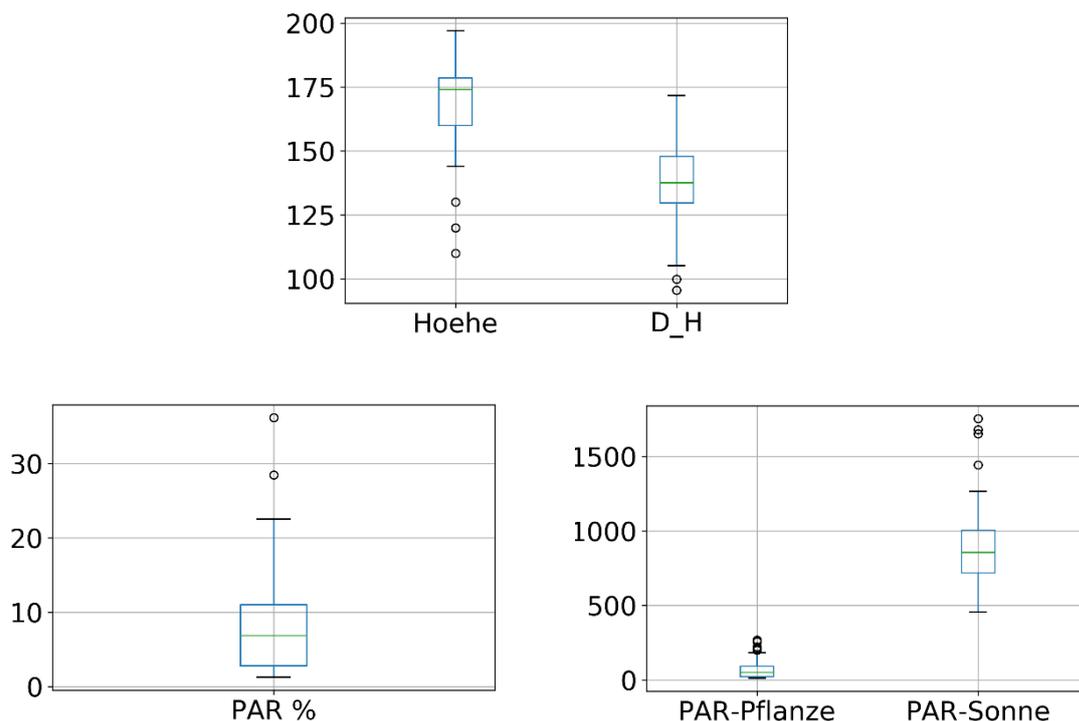


Abbildung 41: Boxplots ausgewählter Pflanzen-Parameter in Krautsand (Hoehe = Pflanzenhöhe gemessen im Gelände, D_H = Durchschnittliche Höhe gemessen im Labor (n = 10 pro Standort), PAR-Pflanze = Photosynthetisch aktive Strahlung im Pflanzenbestand, PAR-Sonne = Photosynthetisch aktive Strahlung über Pflanzenbestand, PAR % = Relative photosynthetisch aktive Strahlung im Bestand)

Auch für Krautsand zeigt sich die Orthometrische Höhe als Determinante für die Pflanzenhöhe (Abbildung 42). Leider zeigen andere Parameter wie der Stängeldurchmesser keine signifikanten Zusammenhänge zu anderen Messgrößen. Auch die Regression zwischen Pflanzenhöhe und PAR-Werten lässt hier keine zufriedenstellenden Erklärungsmuster zu. Auch eine exponentielle Funktion

scheint hier keine Verbesserung des Modells zu bringen. Ein Grund dafür könnte im Fehlen der Teichsimsen-Zone und der Schilf-Zone sein. Die kleine statistische Spannweite der Messwerte, also die ähnliche Ausprägung der Strandsimse im Gelände verschlechtert das statistische Signal-/Rauschverhältnis so, dass keine stabilen Modelle berechnet werden können. Dies wird auch nochmal in Abbildung 43 deutlich. Die Scatter-Plots der Werteverteilungen in der Korrelationsmatrix lassen kaum Trends erkennen.

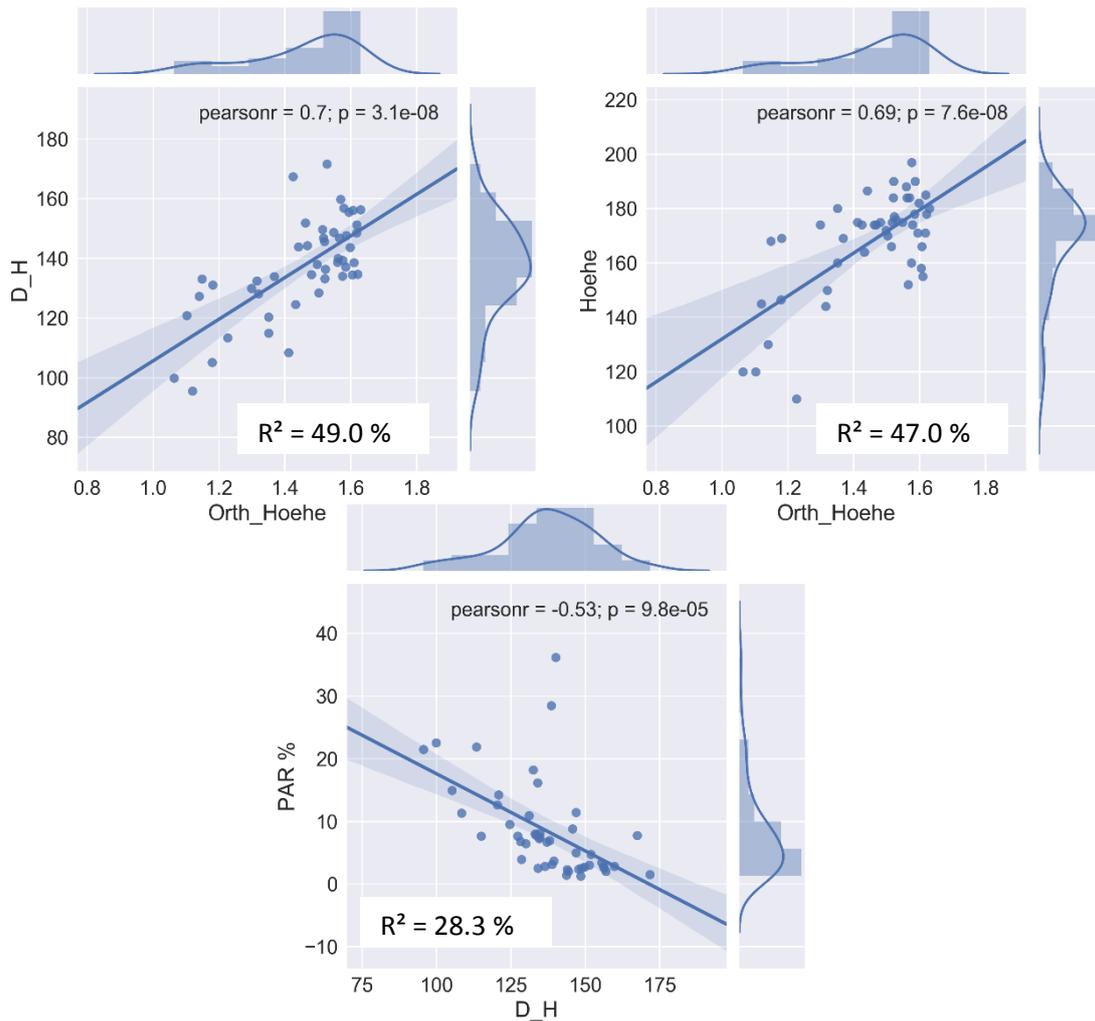
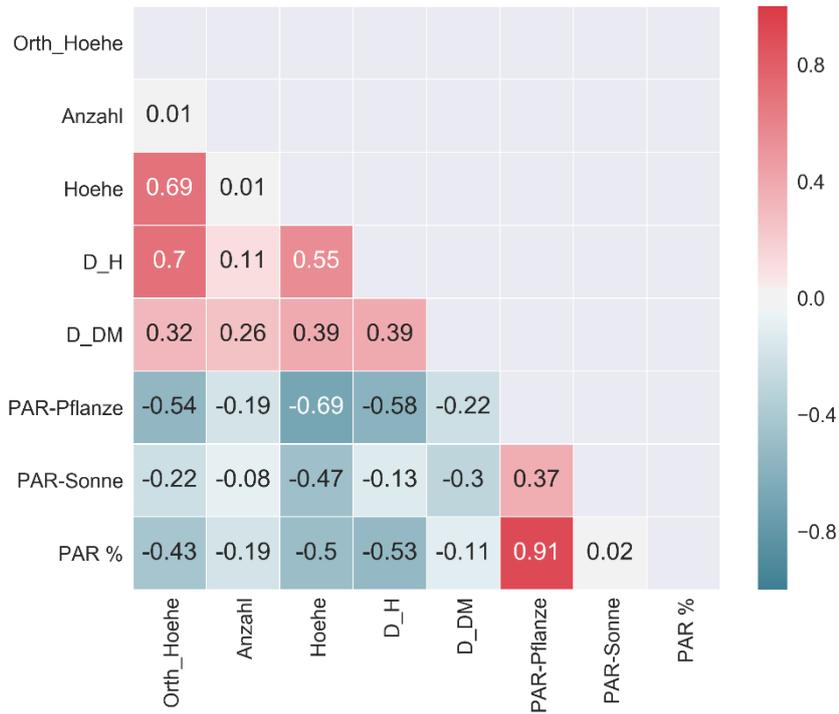


Abbildung 42: Korrelationsmatrix für alle Parameter am Standort Krautsand und Regressionen der Geländehöhe (Orth_Hoehe) mit der Höhe der Pflanzen im Gelände (Hoehe, $y = 79.0091x + 53.0344$) und im Labor (D_H, $y = 69.7750x + 35.8978$), sowie zwischen der Pflanzenhöhe (Labor) und photosynthetisch aktiver Strahlung (PAR %, $y = -0.2464x + 42.2475$).

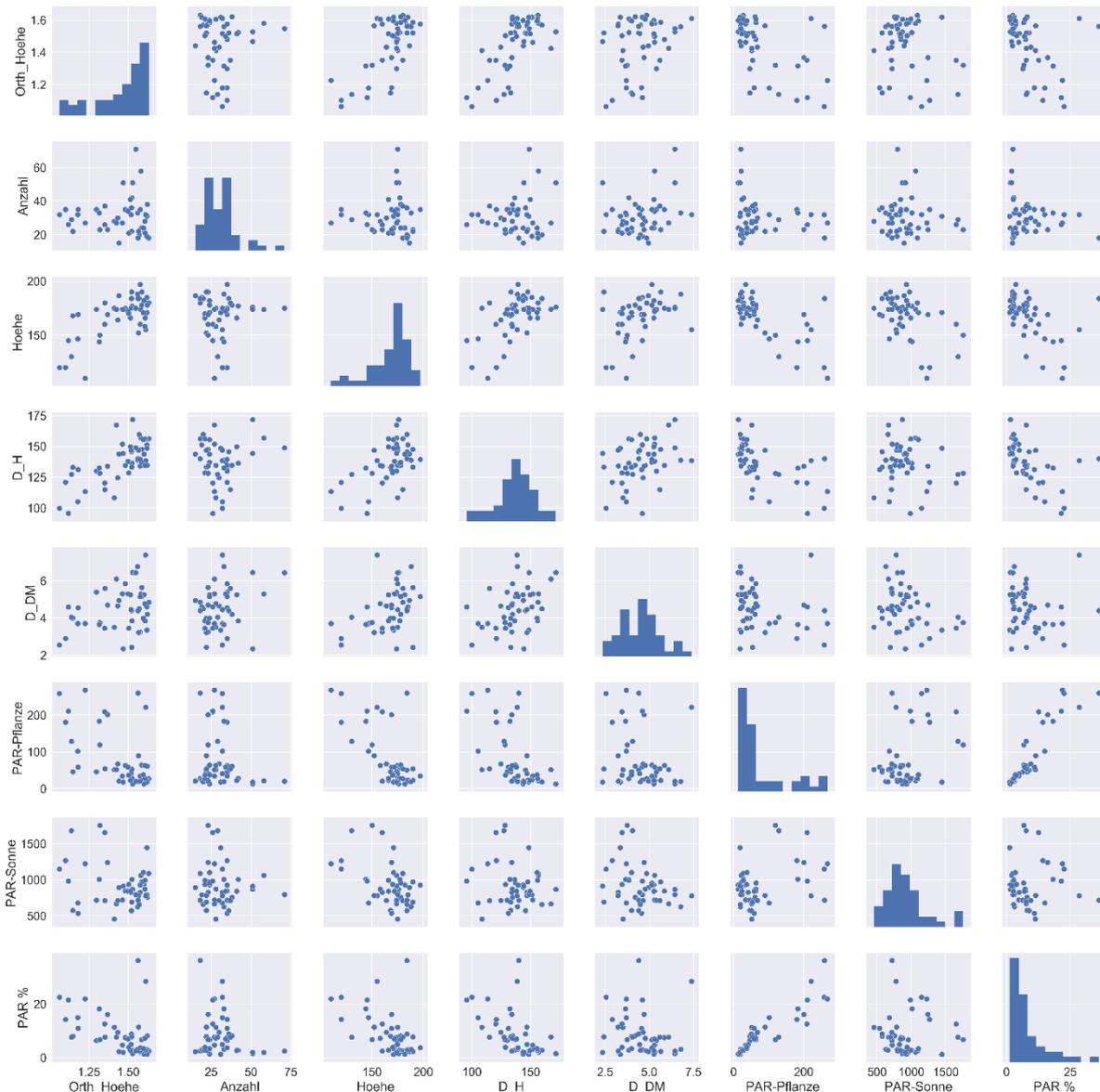


Abbildung 43: Scatter-Matrixplot aller Parameter für Krautsand, Abkürzungen siehe Tabelle 4.

3.2.4 Statistischer Vergleich der Geländemesswerte aller Standorte

Im Folgenden werden die Ergebnisse der statistischen Auswertung aller Standorte zusammen betrachtet, damit Unterschiede und Gemeinsamkeiten herausgearbeitet werden können. Die Bedeutung der Abkürzungen und Einheiten ist Tabelle 4 zu entnehmen. Die Buchstaben K_, B_ und H_ stehen jeweils für Krautsand, Balje und Hollerwettern.

Zunächst werden die im Gelände gemessenen Pflanzenhöhen aller Standorte verglichen (Abbildung 44). Die auffällig kleine Spannweite der Pflanzenhöhen von Krautsand ist der Tatsache geschuldet, dass dort nicht bis in den Schilfgürtel hinein beprobt wurde. Außerdem fehlt im Gegensatz zu den beiden anderen Standorten in Krautsand der typische Teichsimsen-Gürtel. Die beginnenden Pflan-

zenhöhen sind (vom Watt aus gesehen) zwischen den Standorten unterschiedlich hoch. Dabei sinkt die Höhe der niedrigsten Pflanzen in Fließrichtung der Elbe. So sind die Pflanzen am Watt in Krautsand tendenziell höher als in Hollerwettern und schließlich in Balje. Die größte Streuung aller Pflanzenhöhen bzw. Spannweiten ist für den Standort Balje festzustellen. Auch in dieser Abbildung ist zu erkennen, dass die Labormessungen systematisch niedriger ausfallen.

Um dem Wellenschlag entgegen zu wirken und die Standfestigkeit zu gewährleisten, sind am Ufer dickere Stängel zu beobachten als weiter landeinwärts, bzw. an einem höheren Standort (CARUS *et al.* 2016; SILINSKI *et al.* 2017). Dort ist der hydraulische Angriff der Wellen und der Strömung für die Pflanzen geringer und sie können stressfreier in die Höhe wachsen.

Die gemessenen Stängeldurchmesser (Abbildung 45) unterstützen die Ergebnisse von CARUS *et al.* 2016 und SILINSKI *et al.* 2017. Die dünnsten Stängel wurden in Krautsand gemessen, wo auf der Wattfläche allein die Strandsimse dominiert. Die Messwerte von Balje und Hollerwettern beruhen auf einem Mix aus Teichsimse (große Stängeldurchmesser), Strandsimse (mittlere Stängeldurchmesser) und Schilf (dünnere Stängeldurchmesser). In Balje sind die Stängeldurchmesser im Mittel dünner als in Hollerwettern. Dies liegt eventuell daran, dass Hollerwettern am Prallhang und Balje am Gleithang liegt. Somit müssen die Pflanzen in Hollerwettern widerstandsfähiger gegenüber dem auflaufenden Wasser sein. Ein anderer Grund könnte der höhere Salzgehalt in Balje sein.

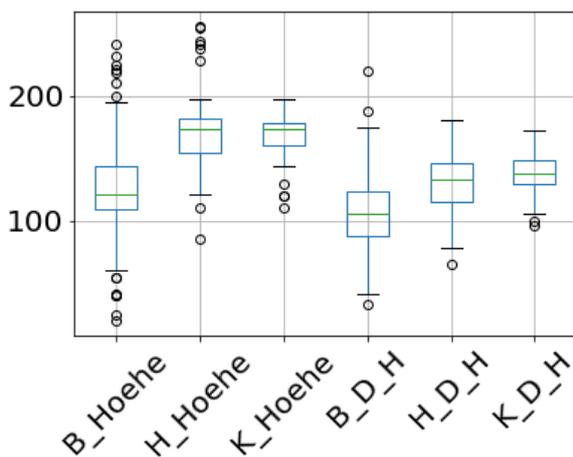


Abbildung 44: Pflanzenhöhen, gemessen im Gelände und im Labor, aller drei Standorte (in cm)

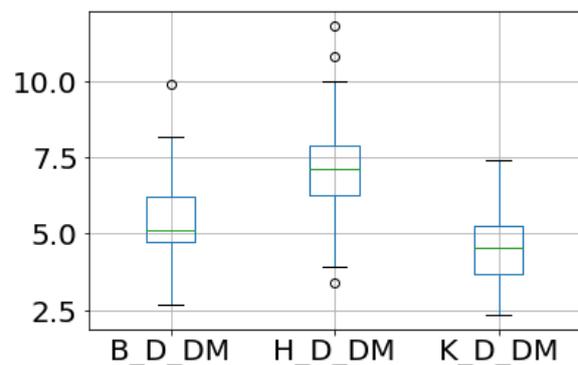


Abbildung 45: Stängeldurchmesser, gemessen im Labor, aller drei Standorte (in mm)

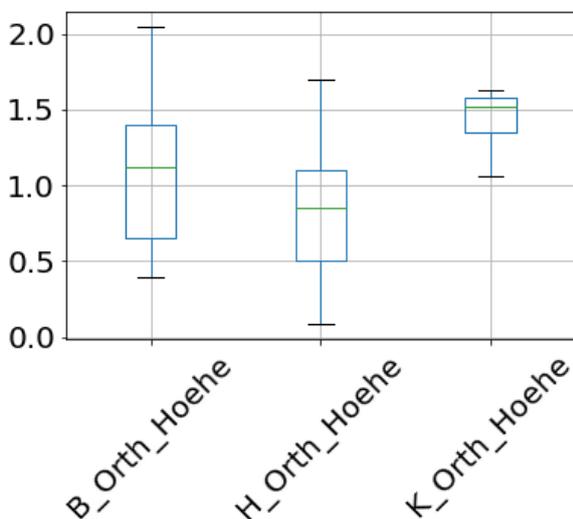


Abbildung 46: Geländehöhen aller drei Standorte (in

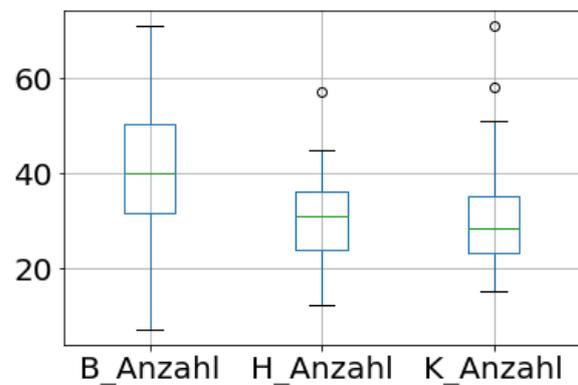


Abbildung 47: Stängelanzahl pro 0,16 m² aller drei

m)

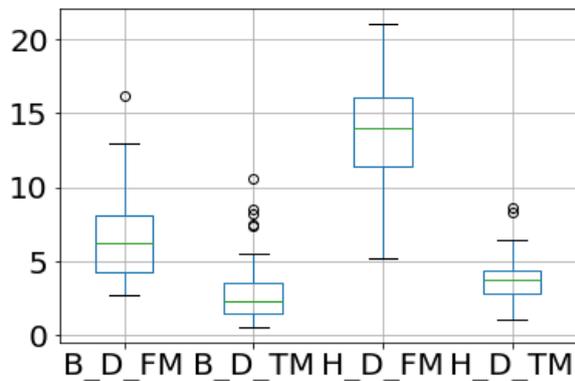


Abbildung 48: Trocken- und Frischmasse pro Pflanze der Standorte Balje und Hollerwettern (g pro Pflanze)

Standorte

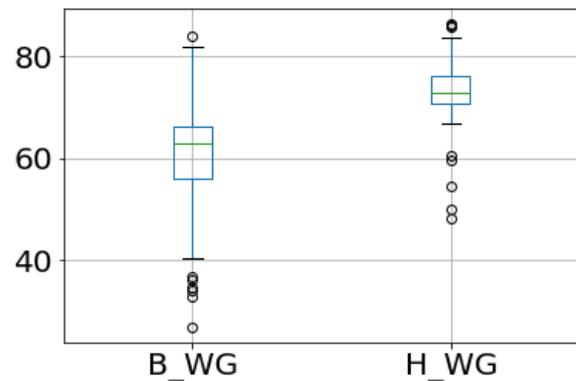


Abbildung 49: Wassergehalt (WG) pro Pflanze (in %) für Balje (B), gemessen am 12.9. und Hollerwettern (H), gemessen am 25.9.

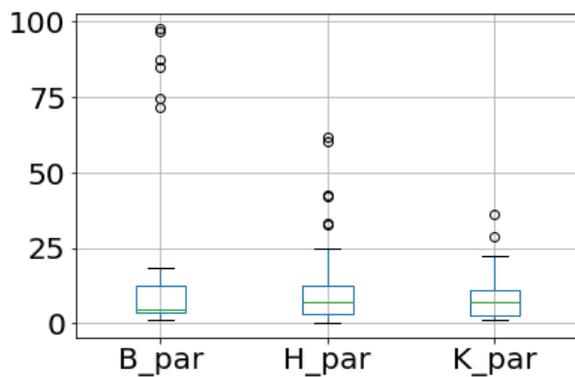


Abbildung 50: Photosynthetisch aktive Strahlung (par) (in %) aller drei Standorte (Balje, Hollerwettern und Krautsand)

Balje zeigt die höchste Spannweite und im Mittel die meisten Stängel auf 0,16 m² Fläche (Abbildung 47). Hollerwettern und Krautsand sind statistisch betrachtet relativ gleich. Jedoch haben die statistischen Analysen einen schwachen Zusammenhang zwischen der Stängelanzahl und den restlichen Parametern gezeigt, sodass dieser Parameter vorsichtig interpretiert werden muss.

Messungen zur Frisch-, Trockenmasse (Abbildung 48) und dem Wassergehalt (Abbildung 49) wurden nur für die Standorte Balje und Hollerwettern durchgeführt. Besonders die Frischmassewerte zeigen, dass in Hollerwettern mehr Pflanzenmasse pro Fläche zu finden ist. In Verbindung mit den größeren Stängeldurchmessern könnte auch hier eine Beziehung zur Prallhanglage und somit größeren Widerstandsfähigkeit oder zum Einfluss des Salzgehalts in Balje hergestellt werden. Krautsand und Hollerwettern sind oligohalin während der Standort Balje mesohalin ist, was es für die Vegetation schwierige macht. Auch die Wassergehalte sind im Mittel in Hollerwettern höher als in Balje. Eine Ursache dafür könnte der längere tägliche Überflutungszeitraum sein, dem die Pflanzen in einem Tidezyklus ausgesetzt sind, (vergleiche Abbildung 147 und Abbildung 148) in Kapitel 4.3. Die relativen PAR-Werte (Abbildung 50) zeigen statistisch keine großen Unterschiede. Einzig die Teichsimen zeigen sich als Ausreißer aufgrund ihres lichten Bestandes.

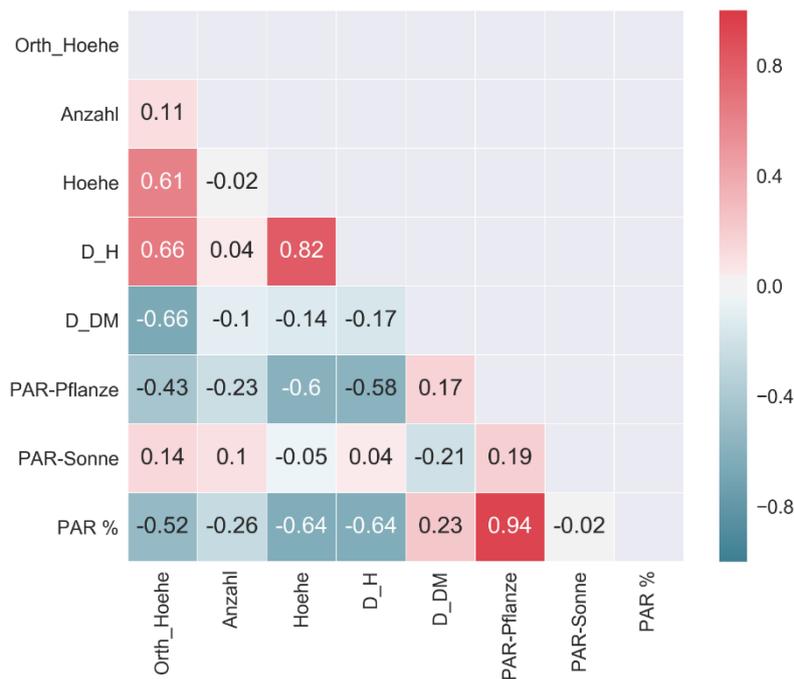


Abbildung 51: Korrelationsmatrix für alle Parameter über alle drei Standorte ($n = 146$), zumindest D_H und D_DM erläutern oder Verweis zu Abb. 103,...

Im Folgenden werden alle Parameter über alle Standorte auf Zusammenhänge geprüft, um allgemeine Aussagen über die Wattflächen entlang der Unterelbe treffen zu können. Sollten Parameter gut korrelieren, kann man das ergebende statistische Modell auf alle Standorte und darüber hinaus auf die Region übertragen. Da auch Krautsand mit betrachtet wurde und dort die Parameter Frisch- und Trockenmasse sowie Wassergehalt nicht in Labor erfasst wurden, werden zunächst nur die anderen Parameter berücksichtigt, die an allen drei Standorten gemessen wurden.

Abbildung 51 zeigt die Korrelationen aller zur Verfügung stehenden Parameter über alle Standorte ($n = 146$) an. Die Werte zeigen jedoch kaum hohe Korrelationskoeffizienten, die einer linearen Regression zur Übertragung standhalten könnten. Die beiden hohen Korrelationen zwischen Pflanzenhöhe im Gelände und im Labor (0.82) und PAR im Pflanzenbestand und relativ zur Gesamteinstrahlung (0.94) sind zu erwarten, jedoch nicht hilfreich für eine räumliche Betrachtung. Die restlichen Korrelationskoeffizienten zwischen 0.6 und 0.7 im positiven, wie auch im negativen Zusammenhang zeigen zwar eine Tendenz, die erklärte Varianz würde in einer linearen Regression jedoch unter 50 % fallen und ist somit nicht geeignet für eine räumliche Übertragung. Dass die Werte meist stark streuen zeigt auch Abbildung 52.

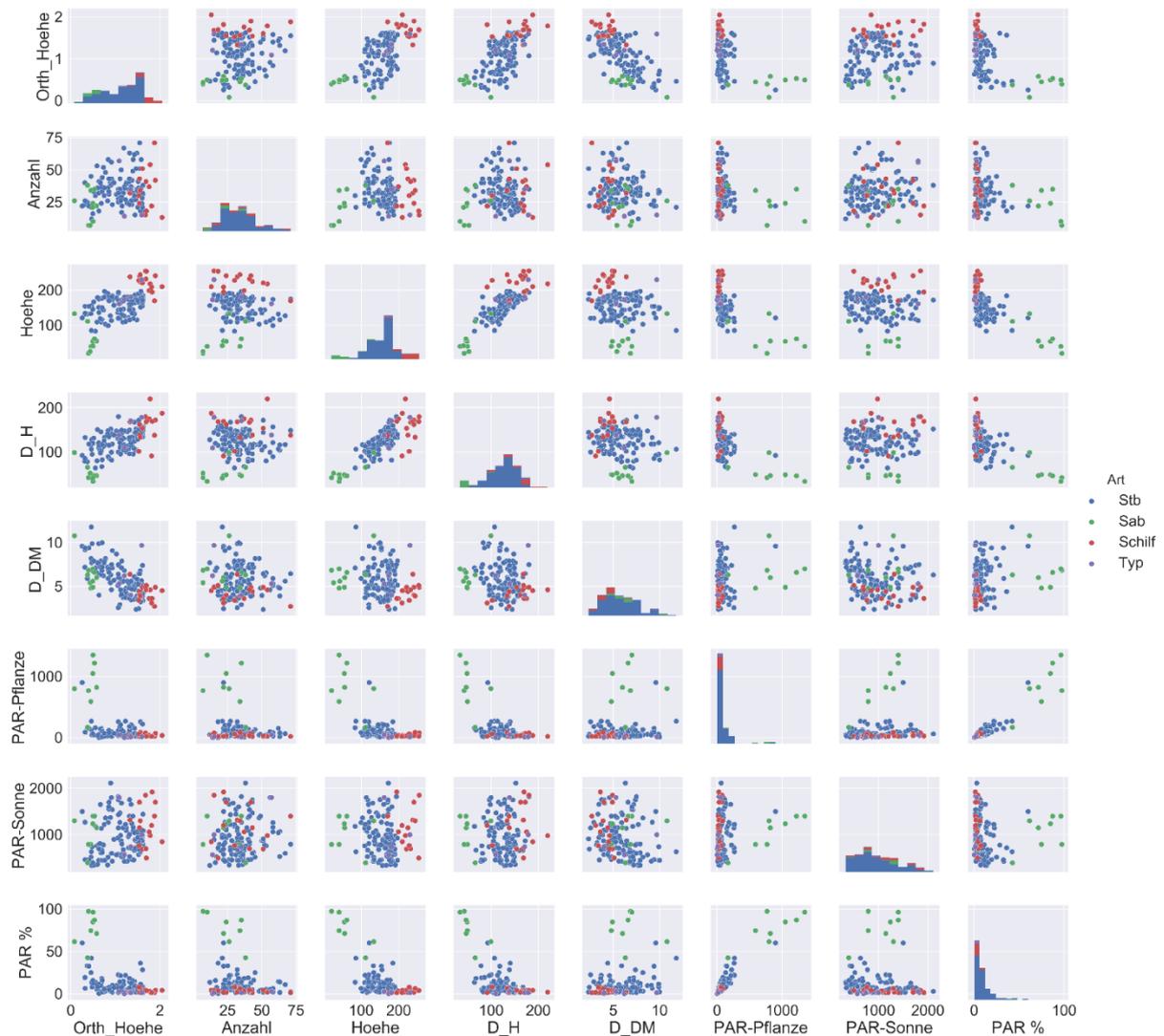


Abbildung 52: Scatter-Matrixplot für alle Parameter aller Standorte ($n = 146$) und Regressionen der Bestandsdichte (Anzahl), Geländehöhe (Orth_Hoehe) mit der Höhe der Pflanzen im Gelände (Hoehe) und im Labor (D_H), sowie zwischen der Pflanzenhöhe (Labor) und photosynthetisch aktiver Strahlung (PAR %)

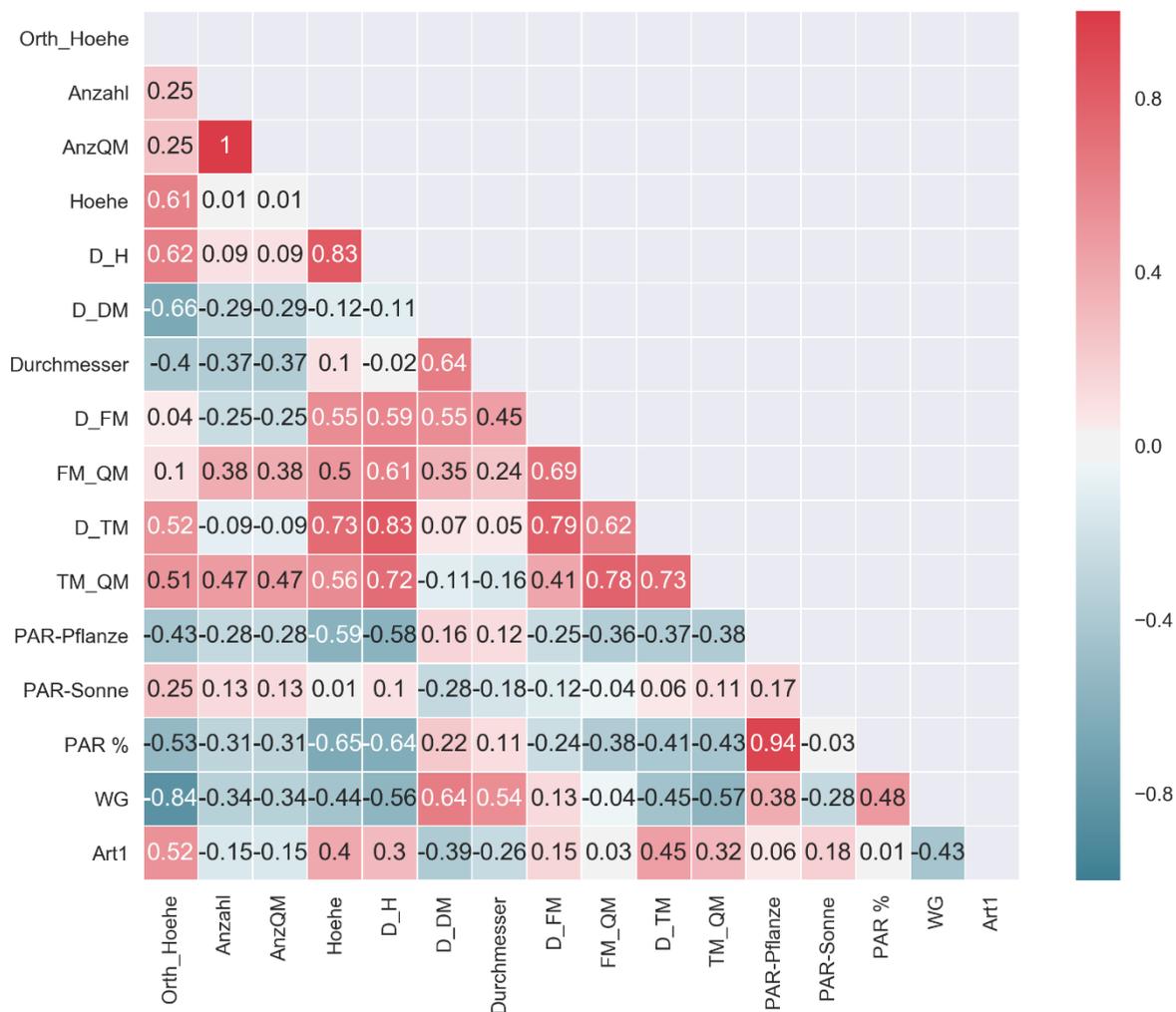


Abbildung 53: Korrelationsmatrix für alle Parameter von Hollerwettern und Balje (n = 98)

Abbildung 53 zeigt nun die Korrelation aller Parameter einschließlich Frisch-, Trockenmasse und Wassergehalt. Auch hier lassen sich keine signifikanten Zusammenhänge über die Standorte hinweg ableiten.

Generell ist über alle drei Standorte hinweg die Höhe über dem Meeresspiegel die wichtigste erklärende Variable für die Abfolge der verschiedenen Pflanzengesellschaften, Unterschiede im Stängeldurchmesser wie auch den Wassergehalt in den Pflanzen. Die gemessenen PAR-Werte sind erst ab einer gewissen Pflanzendichte sinnvoll mit der Pflanzendichte bzw. der Pflanzenhöhe und damit schlussendlich der Biomasse korreliert.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass die drei untersuchten Standorte individuelle Charakteristika aufweisen und am besten einzeln betrachtet und ausgewertet werden sollten.

Die Stängeldichte variiert stark zwischen den untersuchten Dominanzarten und den Standorten. Eindeutige erklärende Parameter, um die Stängeldichte in die Fläche zu interpolieren, existieren leider nicht. Aus diesem Grund werden alternative Methoden vorgeschlagen, um die Stängeldichte drohnengestützt, direkt zu messen, vgl. Kapitel 4.4.

3.3 Produkte der UAS-Befliegungen

Die nachfolgenden Auswertungen, Analysen und Ergebnisse aus den umfangreichen UAS-Befliegungen sind in diesem Bericht entweder vollständig oder exemplarisch für einen Standort dargestellt.

1. Georeferenzierung der Daten mit Hilfe von Passpunkten und dem RTK-GPS an Bord des UAS
2. Ableitung digitales Oberflächenmodell und 3D-Punktwolke aus hochaufgelösten RGB-Daten
3. Pansharping des multispektralen Sensors mit dem RGB-Sensor
4. Ableitung von Indizes (z.B. NDVI, VARI) aus RGB-Daten und MS-Sensordaten
5. Klassifikation der multispektralen Orthomosaik zur Kartierung der Dominanzbestände
6. Klassifikation der 3D-Punktwolke (Trennung in Boden- und Nichtbodenpunkte)
7. Ableitung von Oberflächen- und Geländemodell
8. Vergleich der Indizes und TIR-Daten und Korrelation zu erfassten Ground Truth Daten
9. Partial Least Square Regressionen (PLSR) auf der Basis multispektraler und multisensoraler Daten
10. Bestimmung des Vegetationshöhe aus der Differenz zwischen UAS-Oberflächenmodell und DGM aus Ground Truth-Daten Visualisierung der Rauigkeit des DOM / Vegetationsoberfläche zur Charakterisierung der Veränderung selber

3.4 Übersicht der photogrammetrischen Produkte der UAS-Bildflüge

Tabelle 8: Ausgewählte Parameter der photogrammetrischen UAS Bildflüge August / September 2017

	Krautsand	Hollerwettern	Balje
Sensor	Ebee S.O.D.A	Ebee S.O.D.A	Ebee S.O.D.A
Datum / Uhrzeit	8.8.17/10:56-11:18	10.8.17/11:45-12:05	11.8.17/09:36-09:54
Wetter	Wechselnd bewölkt / bedeckt	Vorwiegend sonnig	bedeckt
Wind	3 Bft (5 m/s)	2 Bft (3,2 m/s)	3 Bft (4,2 m/s)
Anzahl Passpunkte	10	17	15
RGB-Anzahl Bilder	438	369	298
Flughöhe	70 m	69 m	70 m
Bodenauflösung	1.5 cm	1.47 cm	1.5 cm
Abgedeckte Fläche	18 ha	19,1 ha	7,8 ha
Lage-/Höhengenauigkeit	1,2 cm / 2,6 cm	2,87 cm / 2,67 cm	1,22 cm / 4,2 cm
Punktwolke	63.126.357 Punkte	58.291.467 Punkte	38.775.939 Punkte
Punktdichte	706 Punkte / m ²	288 Punkte / m ²	364 Punkte / m ²
Größe Orthomosaik	41.388 x 31.875 Pixel	42.000 x 35.333 Pixel	28.037 x 28.724 Pixel
Größe DEM	16.103 x 14.207 Pixel	13.539 x 11.944 Pixel	28.037 x 28.724 Pixel
Sensor	Ebee Sequoia	Ebee Sequoia	Ebee Sequoia
Datum / Uhrzeit	8.8.17 / 11:30-11:47	10.8.17/12:15-12:35	11.8.17/10:07-10:23
Wind	3 Bft (5,3 m/s)	3 Bft (5,1 m/s)	3 Bft (4,2 m/s)
MS-Anzahl Bilder	305	312	163
Flughöhe	79 m	80 m	82 m
Bodenauflösung	7 cm	7,7 cm	7,5 cm

Abgedeckte Fläche	20 ha	19,1 ha	11,4 ha
Lage-/Höhengenauigkeit	1,6 cm / 2,4 cm	5,2 cm / 20 cm	2,9 cm / 9,2 cm
Größe Orthomosaik	9.489 x 6.917 Pixel	8.611 x 6.095 Pixel	5.622 x 4.712 Pixel
Sensor	Ebee Thermomap	Ebee Thermomap	Ebee Thermomap
Datum / Uhrzeit	8.8.17 / 11:56-12:11	10.8.17/12:00-12:15	11.8.17/10:41-10:53
Wind	3 Bft (5,3 m/s)	3 Bft (4,3 m/s)	5 Bft (9 m/s)
Thermal-Anzahl Bilder	2075	610	269
Flughöhe	89 m	91 m	94 m
Bodenauflösung	15 cm	17,8 (15) cm	17,1 (15) cm
Abgedeckte Fläche	20 ha	19,1 ha	9,7 ha
Lage-/Höhengenauigkeit (innere Genauigkeit)	ca. 3 m / 2 m	ca. 3 m / 2 m	ca. 3 m / 2 m
Lagegenauigkeit nach Transformation	< 0.5 m	< 0.5 m	< 0.5 m
Größe Orthomosaik	4.561 x 3.463 Pixel	3.439 x 2.653 Pixel	2.188 x 2.538 Pixel
Sensor		Phantom 4 Pro	Phantom 4 Pro (schräg)
Datum / Uhrzeit		25.9.17/11:20-11:08	12.9.17/14:00-14:08
Wetter		Bedeckt	Wechselnd bewölkt
Wind		2 Bft (ca. 2 m/s)	5 Bft (ca. 9 m/s)
Anzahl Passpunkte		8	8 (natürliche PP)
RGB-Anzahl Bilder		103	102
Flughöhe		72 m	50 m schräg ≙ 78 m senkrecht
Bodenauflösung		1.76 cm	1.86 cm
Abgedeckte Fläche		6,6 ha	12,3 ha
Lage-/ Höhengengenauigkeit		1,55 cm / 0,4 cm	13 cm / 1,6 cm
Punktwolke		14.856.378 Punkte	32.056.780 Punkte
Punktdichte		203 Punkte / m ²	181 Punkte / m ²
Größe Orthomosaik		19.518 x 19.452 Pixel	25.840 x 23.687 Pixel
Größe DEM		16.103 x 14.207 Pixel	6.951 x 6.016 Pixel

3.4.1 Orthomosaike und digitales Oberflächenmodell

Aufgrund der hohen Vegetationsdichte sind in der photogrammetrischen Punktwolke nur an wenigen Stellen tatsächlich so genannte Bodenpunkte gemessen worden. Eine erfolgreiche Trennung der Punktwolke in Boden- und Nichtbodenpunkte und damit auch die Ableitung eines digitalen Geländemodells setzt voraus, dass ein gewisser Anteil der Punkte die tatsächliche Geländeoberfläche bzw. Geländehöhe wiedergeben. Dies ist leider in den vorliegenden Fällen mit den Sommeraufnahmen und vollständiger Vegetationsbedeckung nicht gegeben. Eine Ableitung des Geländemodells aus der 3D-Punktwolke ist deshalb nicht erfolgreich.

3.4.2 Balje

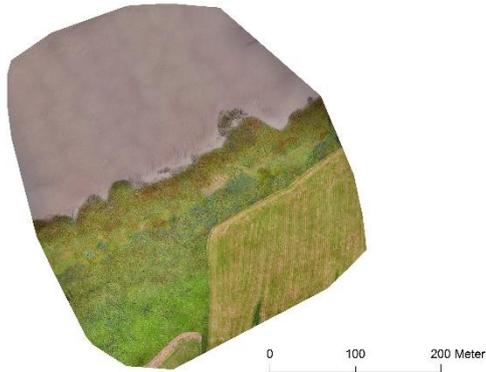


Abbildung 54: Orthomosaik der UAS-Befliegung Balje vom 11.8.2017, RGB-Kamera (S.O.D.A) mit einer Bodenauflösung von 1.5 cm.



Abbildung 55: Ausschnitt des Orthomosaiks UAS-Befliegung Balje vom 11.8.2017, RGB-Kamera (S.O.D.A) mit einer Bodenauflösung von 1.5 cm.

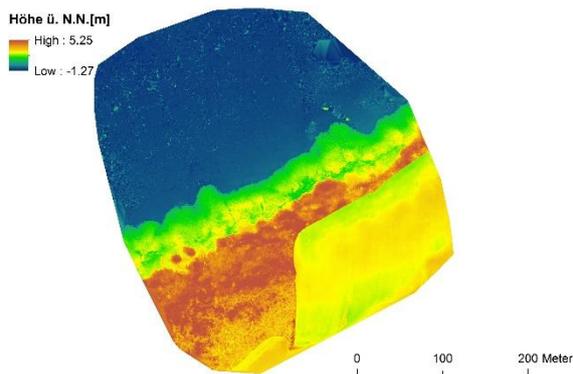


Abbildung 56: Digitales Oberflächenmodell der UAS-Befliegung Balje vom 11.8.2017, abgeleitet aus RGB-Kamera (S.O.D.A) mit einer Bodenauflösung von 1.5 cm.

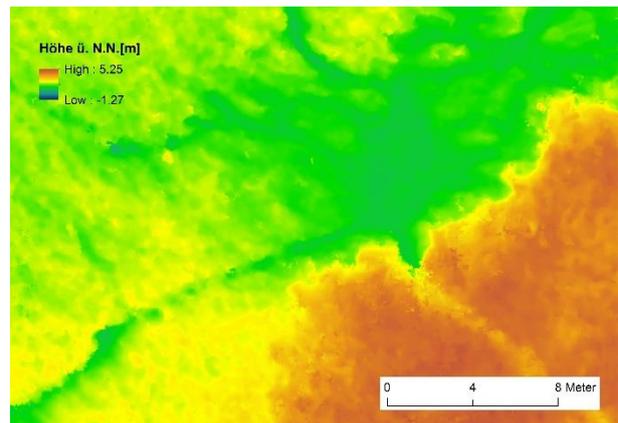


Abbildung 57: Ausschnitt des Digitalen Oberflächenmodells der UAS-Befliegung Balje vom 11.8.2017, abgeleitet aus RGB-Kamera (S.O.D.A) mit einer Bodenauflösung von 1.5 cm.

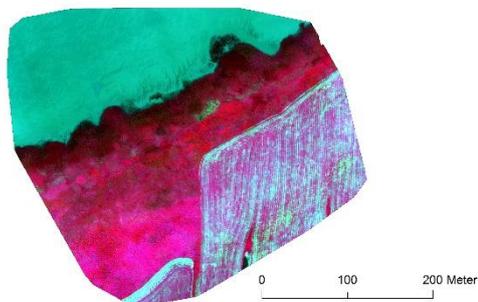


Abbildung 58: Orthomosaik der UAS-Befliegung Balje vom 11.8.2017, Multispektralkamera Sequoia mit einer Bodenauflösung von 7 cm.

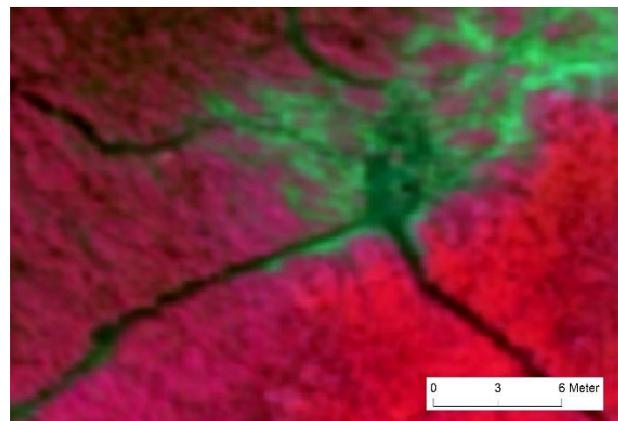


Abbildung 59: Ausschnitt des Orthomosaiks UAS-Befliegung Balje vom 11.8.2017, Multispektralkamera Sequoia mit einer Bodenauflösung von 7 cm.

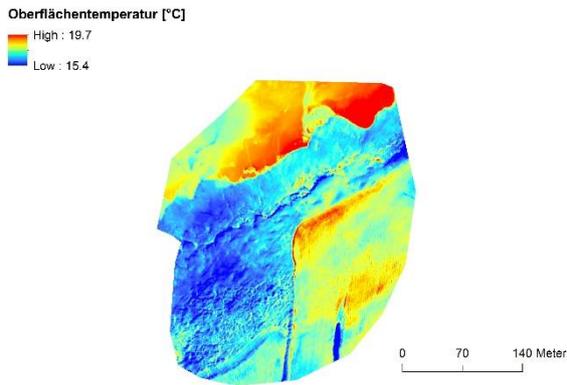


Abbildung 60: Orthomosaik der UAS-Befliegung Balje vom 12.9.2017, Thermalkamera Thermomap mit einer Bodenauflösung von 15 cm.

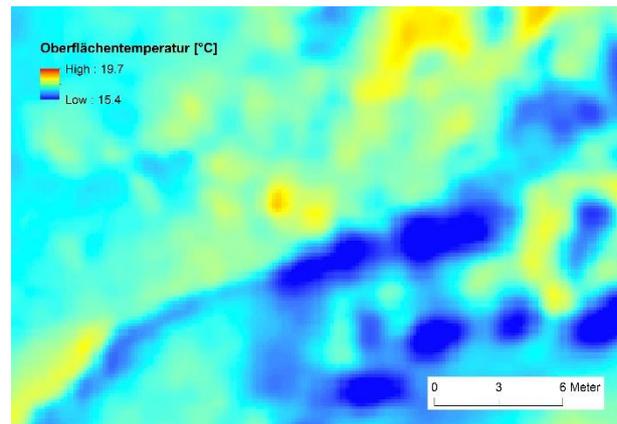


Abbildung 61: Ausschnitt des Orthomosaiks UAS-Befliegung Balje vom 12.9.2017, Thermalkamera Thermomap mit einer Bodenauflösung von 15 cm.

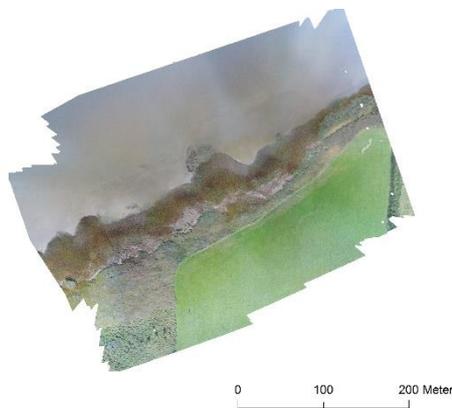


Abbildung 62: Orthomosaik der UAS-Befliegung Balje vom 12.9.2017, RGB-Kamera (DJI) Schrägaufnahmen mit einer Bodenauflösung von 1.8 cm.



Abbildung 63: Ausschnitt des Orthomosaiks UAS-Befliegung Balje vom 12.9.2017, RGB-Kamera (DJI) Schrägaufnahmen mit einer Bodenauflösung von 1.8 cm.

Hollerwettern

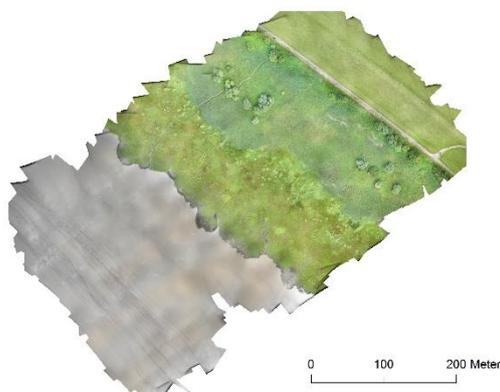


Abbildung 64: Orthomosaik der UAS-Befliegung Hollerwettern vom 10.8.2017, RGB-Kamera (S.O.D.A) mit einer Bodenauflösung von 1.5 cm.



Abbildung 65: Ausschnitt des Orthomosaiks UAS-Befliegung Hollerwettern vom 10.8.2017, RGB-Kamera (S.O.D.A) mit einer Bodenauflösung von 1.5 cm.

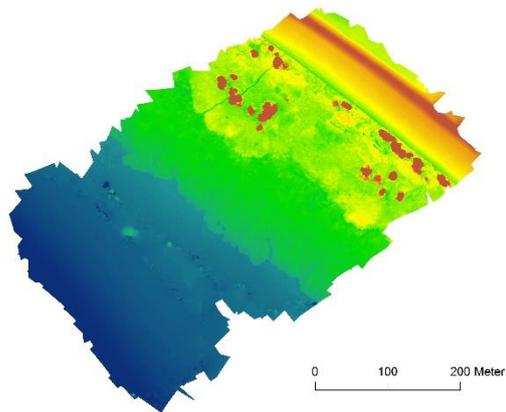


Abbildung 66: Digitales Oberflächenmodell der UAS-Befliegung Hollerwettern vom 10.8.2017, abgeleitet aus RGB-Kamera (S.O.D.A) mit einer Bodenauflösung von 7.5 cm.

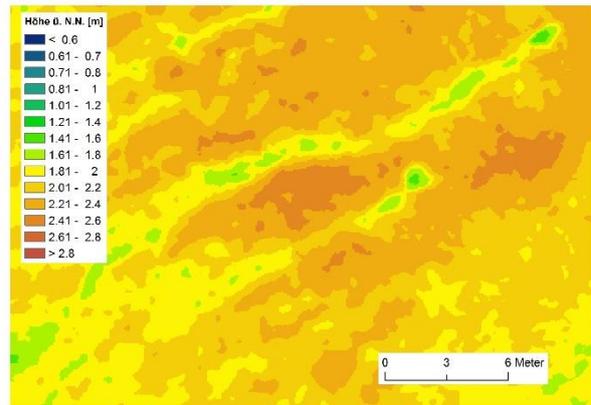


Abbildung 67: Ausschnitt des Digitalen Oberflächenmodells der UAS-Befliegung Hollerwettern vom 10.8.2017, abgeleitet aus RGB-Kamera (S.O.D.A) mit einer Bodenauflösung von 7.5 cm.

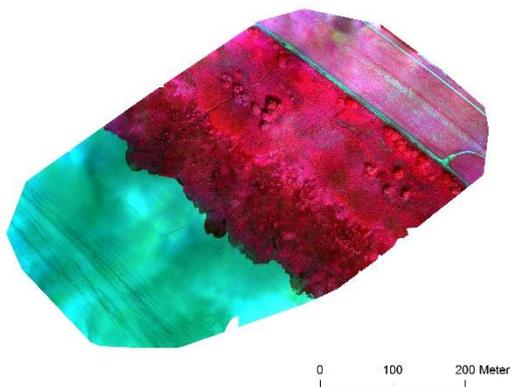


Abbildung 68: Orthomosaik der UAS-Befliegung Hollerwettern vom 10.8.2017, Multispektralkamera Sequoia mit einer Bodenauflösung von 7 cm.

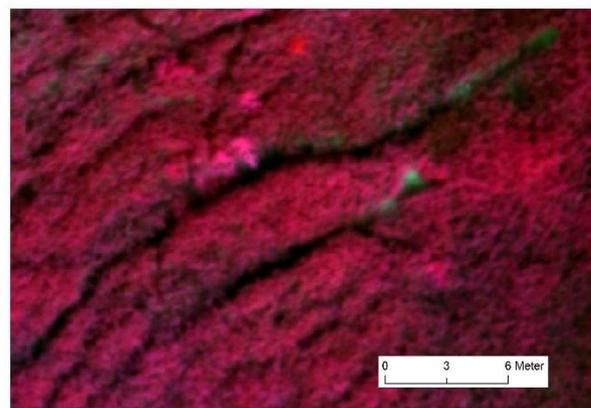


Abbildung 69: Ausschnitt des Orthomosaiks UAS-Befliegung Hollerwettern vom 10.8.2017, Multispektralkamera Sequoia mit einer Bodenauflösung von 7 cm.

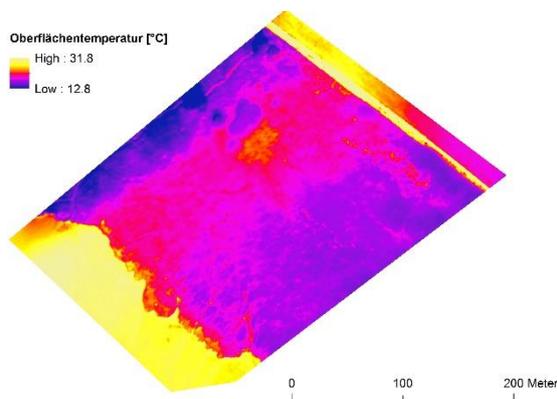


Abbildung 70: Orthomosaik der UAS-Befliegung Hollerwettern vom 10.8.2017, Thermalkamera Thermomap mit einer Bodenauflösung von 15 cm.

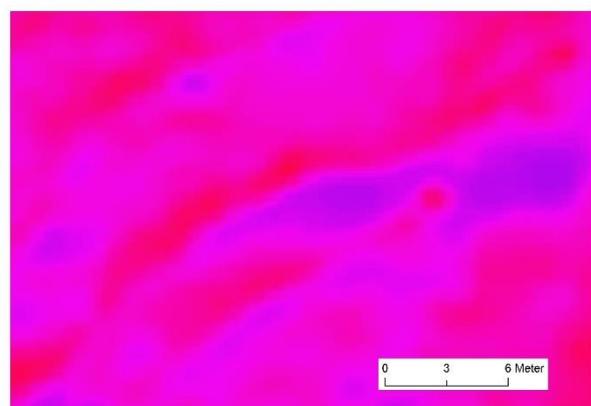


Abbildung 71: Ausschnitt des Orthomosaiks UAS-Befliegung Hollerwettern vom 10.8.2017, Thermalkamera Thermomap mit einer Bodenauflösung von 15 cm.

cm.

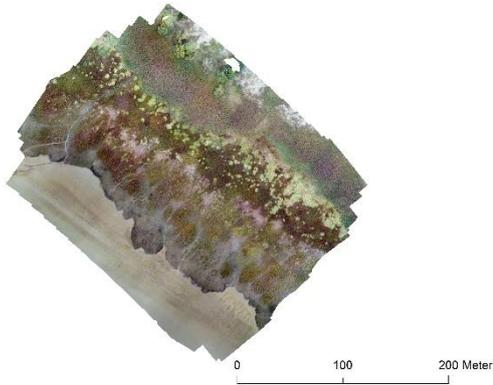


Abbildung 72: Orthomosaik der UAS-Befliegung Hollerwettern vom 25.9.2017, RGB-Kamera (DJI) mit einer Bodenauflösung von 1.8 cm.

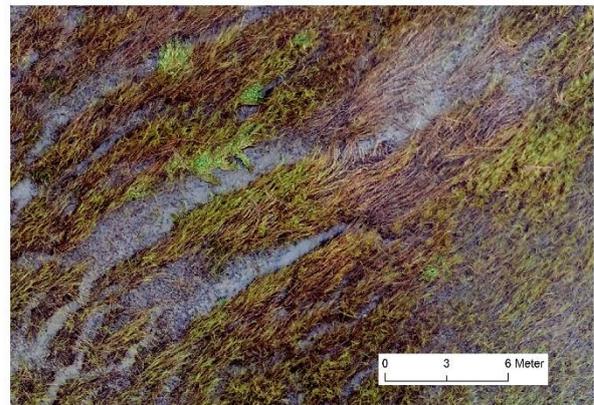


Abbildung 73: Ausschnitt des Orthomosaiks UAS-Befliegung Hollerwettern vom 25.9.2017, RGB-Kamera (DJI) mit einer Bodenauflösung von 1.8 cm.

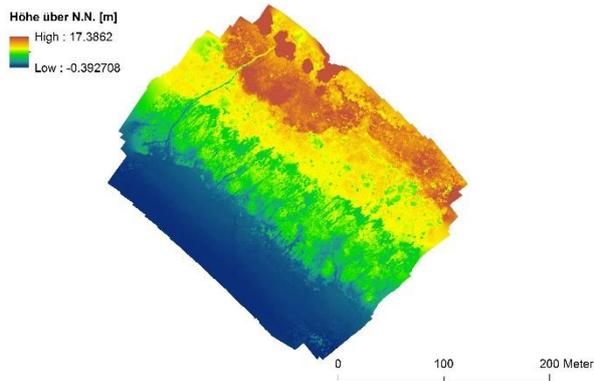


Abbildung 74: Digitales Oberflächenmodell der UAS-Befliegung Hollerwettern 25.9.2017, RGB-Kamera (DJI) mit einer Bodenauflösung von 6 cm.

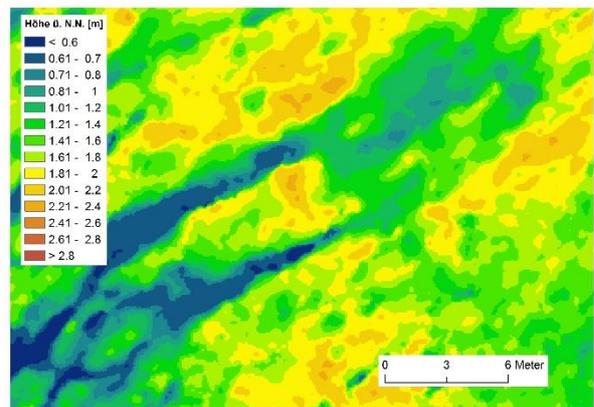


Abbildung 75: Ausschnitt des Digitales Oberflächenmodells der UAS-Befliegung Hollerwettern 25.9.2017, RGB-Kamera (DJI) mit einer Bodenauflösung von 6 cm.

Krautsand



Abbildung 76: Orthomosaik der UAS-Befliegung Kraut-



Abbildung 77: Ausschnitt des Orthomosaiks UAS-

sand vom 8.8.2017, RGB-Kamera (S.O.D.A) mit einer Bodenauflösung von 1.5 cm.

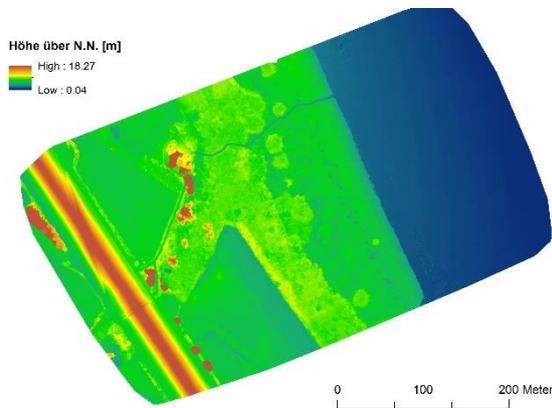


Abbildung 78: Digitales Oberflächenmodell der UAS-Befliegung Krautsand vom 8.8.2017, abgeleitet aus RGB-Kamera (S.O.D.A) mit einer Bodenauflösung von 7.5 cm.

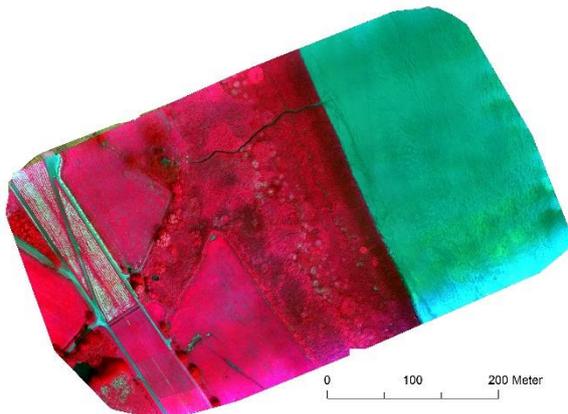


Abbildung 80: Orthomosaik der UAS-Befliegung Krautsand vom 8.8.2017, Multispektralkamera Sequoia mit einer Bodenauflösung von 7 cm.

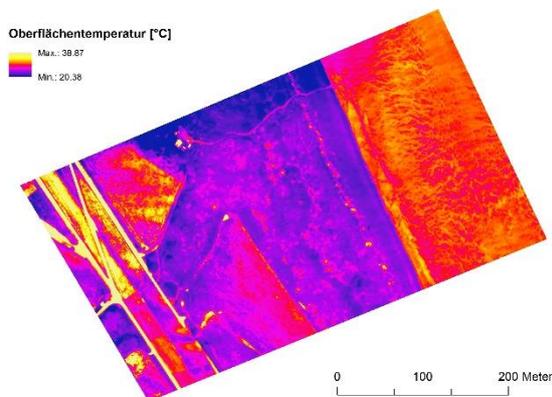


Abbildung 82: Orthomosaik der UAS-Befliegung Krautsand vom 8.8.2017, Thermalkamera Thermomap mit einer Bodenauflösung von 15 cm.

Befliegung Krautsand vom 8.8.2017, RGB-Kamera (S.O.D.A) mit einer Bodenauflösung von 1.5 cm.

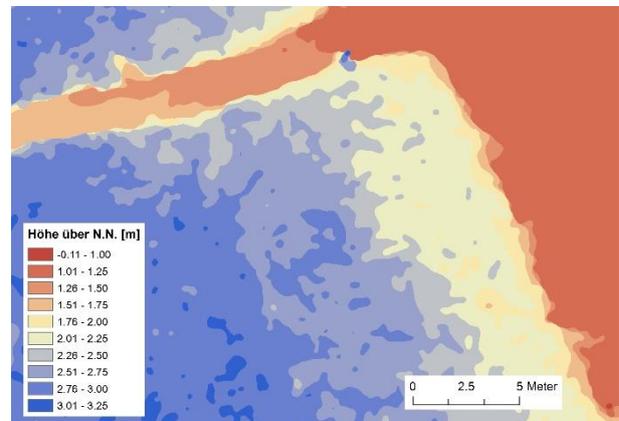


Abbildung 79: Ausschnitt des Digitalen Oberflächenmodells der UAS-Befliegung Krautsand vom 8.8.2017, abgeleitet aus RGB-Kamera (S.O.D.A) mit einer Bodenauflösung von 7.5 cm.

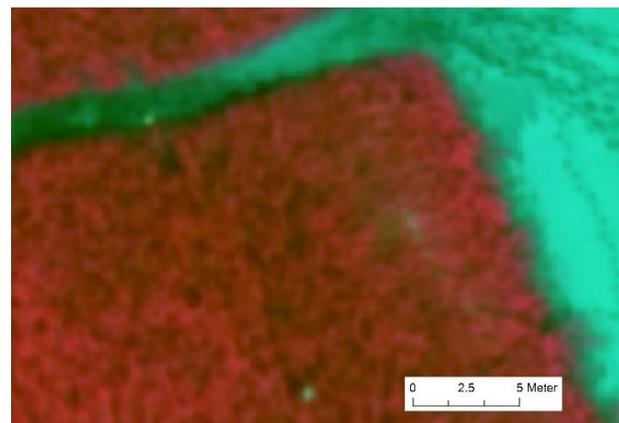


Abbildung 81: Ausschnitt des Orthomosaiks UAS-Befliegung Krautsand vom 8.8.2017, Multispektralkamera Sequoia mit einer Bodenauflösung von 7 cm.

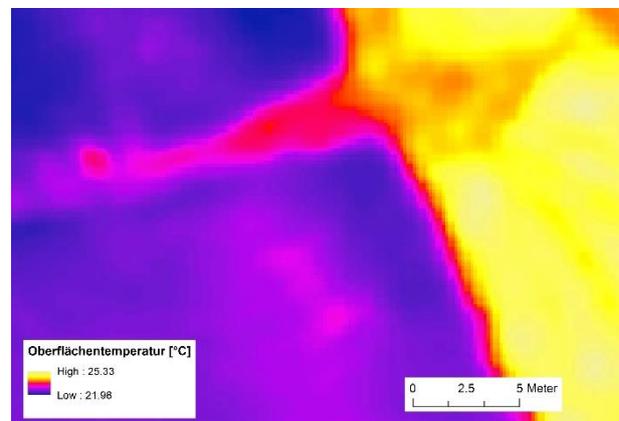


Abbildung 83: Ausschnitt des Orthomosaiks UAS-Befliegung Krautsand vom 8.8.2017, Thermalkamera Thermomap mit einer Bodenauflösung von 15 cm.

3.4.3 Pan-Sharpning-Schärfen der multispektralen Daten

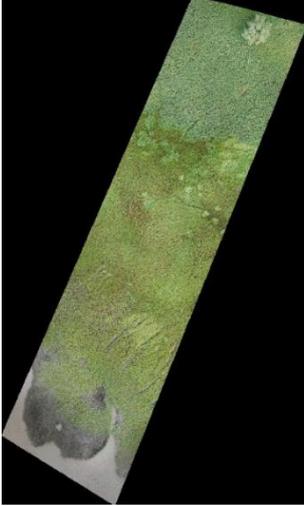
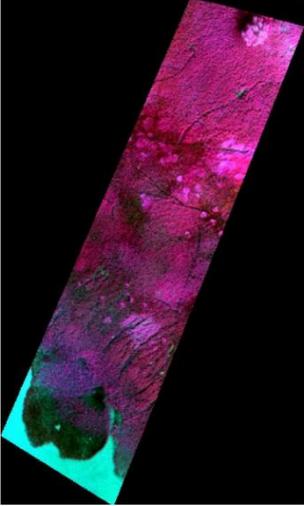
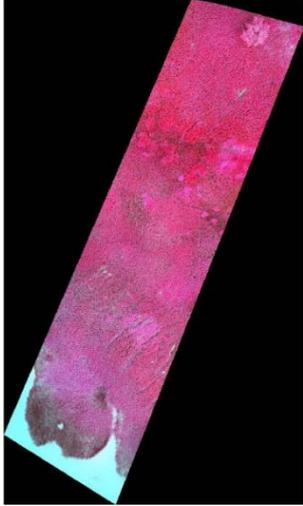
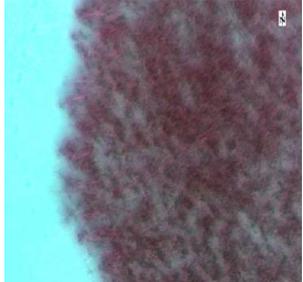
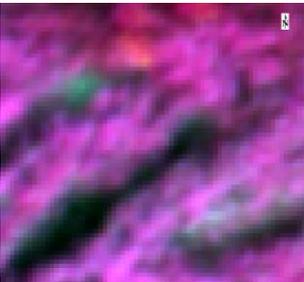
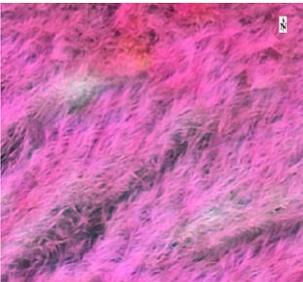
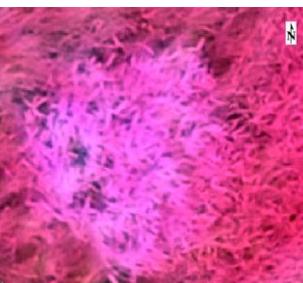
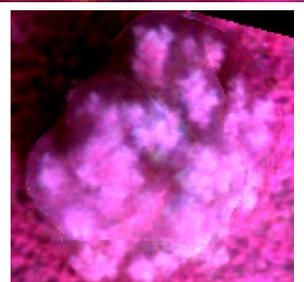
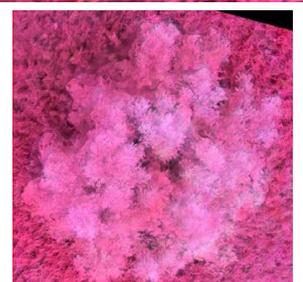
Beim Pan-sharpening wird ein räumlich hochaufgelöster Datensatz verwendet, um einen gröber aufgelösten multispektralen Datensatz zu schärfen. Pan steht dabei für den panchromatischen Kanal, der dabei als hochaufgelöstes Bild verwendet wird. Die Herausforderung liegt darin, die räumliche Information des hochaufgelösten Datensatzes zu fusionieren mit den „Farbinformationen“ des gröberen Datensatzes, weil letzterer meist multispektral, also mehr spektrale Informationen besitzt, als ein herkömmlicher RGB-Datensatz. Das Ergebnis ist nach der Fusion ein räumlich hochaufgelöster Datensatz, in dem die spektrale Information im besten Fall kaum verändert wurde.

Zur Veranschaulichung wurde ein Ausschnitt der hochaufgelöste RGB-Daten von Hollerwettern mit dem gröber aufgelösten Multispektral-Datensatz mit vier Spektralkanälen von Hollerwettern fusioniert (siehe Tabelle 9). Die RGB-Daten haben eine Bodenauflösung (GSD) von 1,47 cm und die multispektralen Daten ein GSD von 7,7 cm. Somit beträgt das Schärfungs- bzw. Fusionsverhältnis etwa 1:5, was laut Literatur noch akzeptabel ist (SIEGMANN et al. 2015). Bevor die Fusion durchgeführt werden konnte, wurde mithilfe des arithmetischen Mittels aus den drei RGB-Kanälen ein hochaufgelöster panchromatischer Kanal berechnet.

Der verwendete Algorithmus ist das Gram-Schmidt pan-sharpening (YUHENDRA et al. 2012), welcher eine Vektor-Orthogonalisierung verwendet, um die Kanäle des Multispektral-Datensatzes zu dekorrelieren (ähnlich einer Hauptkomponenten-Transformation). Nach der Orthogonalisierung symbolisiert der erste Kanal die räumliche Information, welcher durch die hochaufgelösten Daten ersetzt wird. Durch eine Rücktransformation in den normalen „Farbraum“ erhält man somit einen Multispektral-Datensatz mit der hohen Auflösung des panchromatischen Bildes.

Tabelle 9 zeigt die Ergebnisse für das Gram-Schmidt pan-sharpening. Die Einzelbildausschnitte der dominanten Pflanzenzonen zeigen, dass die Schärfung sehr gute Ergebnisse für die räumliche Verbesserung erbracht hat. Besonders die höheren Pflanzenstrukturen in der Schilfzone, sowie bei Strandsimse und Rohr-Glanzgras werden nach der Fusion sehr viel detaillierter abgebildet. Die Multispektraldaten können somit bis auf die Einzelpflanzenebene hinunter betrachtet werden. Im Bereich der Teichsimsen scheint die Schärfung der Daten keinen großen Gewinn zu bringen. Das Bild bleibt diffus, jedoch könnten auch hier eventuell Boden- bzw. Wattbereiche zwischen den Pflanzen besser maskiert werden, wenn es rein um das Pflanzensignal geht.

Tabelle 9: Bildbeispiele für den Pan-sharpening-Prozess für einen Ausschnitt in Hollerwettern

	RGB (1,47 cm)	MS (7,7 cm)	MS-Pansharp (1,47 cm)
gesamter Ausschnitt			
Teichsimse & Watt			
Strandsimse			
Rohr-Glanzgras			
Weide			

Vergleicht man die Gesamtansicht der Hollerwettern-Ausschnitte zeigen sich jedoch Farbwertveränderungen bei ähnlicher Skalierung der Farbwerte (Tabelle 9, gesamter Ausschnitt). Dies kann zum einen daran liegen, dass neue Information aus dem hochaufgelösten RGB-Bild ins neue hochaufgelöste Multispektralbild gekommen sind. So sind natürlich neben der besseren Sichtbarkeit der Pflanzenstruktur auch Schattenbereiche im Pflanzenbestand dazu gekommen, was insgesamt die Histogramme der einzelnen Bänder verändert. Zum anderen kann nicht ausgeschlossen werden, dass neben der räumlichen Information aus dem panchromatischen Bild auch Farbinformation extrahiert wurde.

Daher wurde in deskriptive Statistik einzelner Bänder des originalen Multispektralbildes (durchgezogene Linien), sowie des fusionierten Datensatzes (gestrichelte Linien) gegenübergestellt (Abbildung 84). Es sind klare Unterschiede in den Extremwerten (Min und Max) zu erkennen, jedoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass diese Werte Ausreißer sind. Aussagekräftiger sind dafür der Mittelwert (Mean) und die Standardabweichung (Sd). Da liegen die Werte deutlich näher beieinander, woraus geschlossen werden kann, dass die Fusion die Farbwerte nicht sehr stark verändert hat. Auffällig ist, dass die Werte im sichtbaren Bereich (Grün, Rot) der Kanäle 1 und 2 sehr dicht beieinander sind und die Differenzen im infraroten Bereich größer werden. Der Grund dafür könnte daran liegen, dass die Fusion am besten in dem Wellenlängenbereich funktioniert, der auch vom panchromatischen Kanal abgedeckt wird. Dies wird auch in der Literatur diskutiert (SIEGMANN et al. 2015). Dies ist ein Indiz dafür, dass Farbinformationen aus dem panchromatischen Datensatz in das Ergebnis einfließen.

Trotz allem kann das Ergebnis als vielversprechend und nahezu „farbecht“ bezeichnet werden und je nach Fragestellung für verschiedene Interpretationen und Analysen verwendet werden, in denen neben der spektralen Information auch detaillierte räumliche Strukturen wichtig sind.

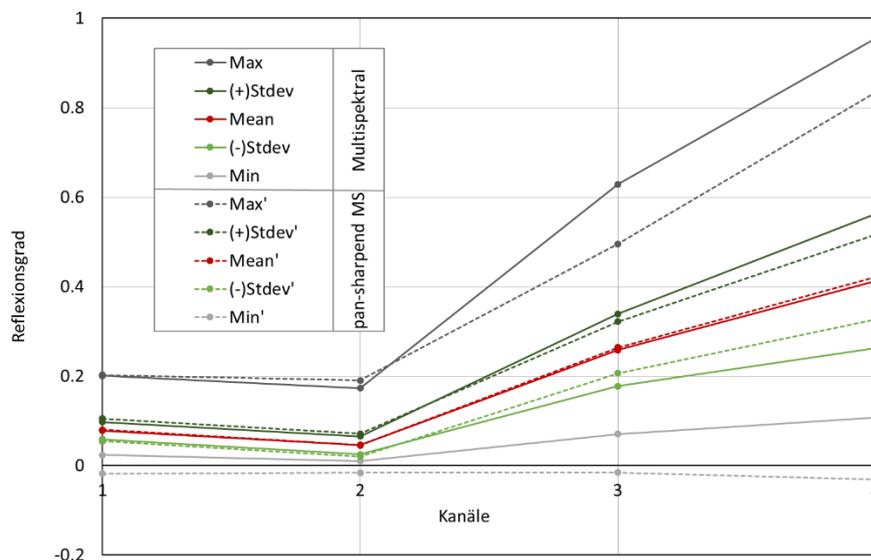


Abbildung 85: Vergleich des originalen grob aufgelösten Multispektral датensatzes mit dem fusionierten hochaufgelösten Multispektral датensatz pro Kanal. (Min = Minimum, Sd = Standardabweichung, Mean = Mittelwert, Max = Maximum)

3.4.4 Vegetationsindices NDVI und VARI

Bei Aufnahmen mit einer multispektralen Kamera, die auch den nahinfraroten Wellenlängenbereich mit abtastet, lässt sich auch der weithin genutzte normalisierte Differenzvegetationsindex NDVI berechnen. Die Formel zur Berechnung des NDVI lautet:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Alternativ können aus Farbluftbildern ebenfalls verschiedene Vegetationsindizes zur Differenzierung verschiedener Vegetationsarten abgeleitet werden, die die Interpretation durch einen Landschaftsökologen wesentlich erleichtern können. Der VARI Index (Visible Atmospherically Resistant Index), GITELSON ET AL., 2002, hat sich dabei als besonders geeignet herausgestellt. Die Formel zur Berechnung des VARI lautet:

$$VARI = \frac{G-R}{G+R-B}$$

Es stellt sich nun die Frage inwieweit die beiden Vegetationsindices übereinstimmen, bzw. ähnliche bzw. vergleichbare Informationen zur Vegetation und deren Vitalität liefern. Bei einem Vergleich am Standort Bielenberg im Herbst 2017 hat sich gezeigt, dass die Beleuchtung und deren Einfluss auf den unkalibrierten RGB-Sensor starke Auswirkungen haben können. Deshalb ist erst einmal festzuhalten, dass das für Fragen der Pflanzenvitalität, LAI, Biomasse etc. der abgeleitete NDVI des Sequoia Sensors in dieser Hinsicht wesentlich besser geeignet ist. Gleichwohl kann auch der VARI-Index im multitemporalen Vergleich durchaus wertvolle Hinweise liefern, was in Kapitel 3.8 genauer vorgestellt wird.

3.5 Auswertung der TLS-Daten

Analog zur Auswertung der UAS-Daten wurden für die terrestrischen Laserscanning Daten verschiedene Auswertungen durchgeführt. Dabei sind aus TLS-Daten folgende Informationen / Produkte abgeleitet worden:

- Georeferenzierung und Verknüpfung von Einzelscans
- Intensitätsbilder der Scans
- Visuelle Erfassung von Pflanzenparametern
- Untersuchung der Möglichkeiten und Verfahren zur Klassifikation der TLS-Daten in Boden- und Nichtbodenpunkte
- Punktdichtekarten
- Stängeldichte
- Vergleich und Analyse TLS-DOM mit UAS-DOM
- Ableitung einer Handlungsempfehlung / Ausschreibungshinweise

Die Arbeit mit den TLS-Daten wurde bei der Auswertung etwas unterschätzt. Eine Ursache ist darin zu sehen, dass zur Vorprozessierung der Daten eine Fülle verschiedener Softwarepakete notwendig sind und z. B. die Notwendigkeit und der Umfang der Rauschunterdrückung bzw. Filterung unterschätzt wurde (Abbildung 86). Zudem wurde im Zuge der Recherchen deutlich, dass verschiedene kommerziell verfügbare Software für andere Anwendungsfälle optimiert sind und somit auch nicht immer das macht, was sie sollen.

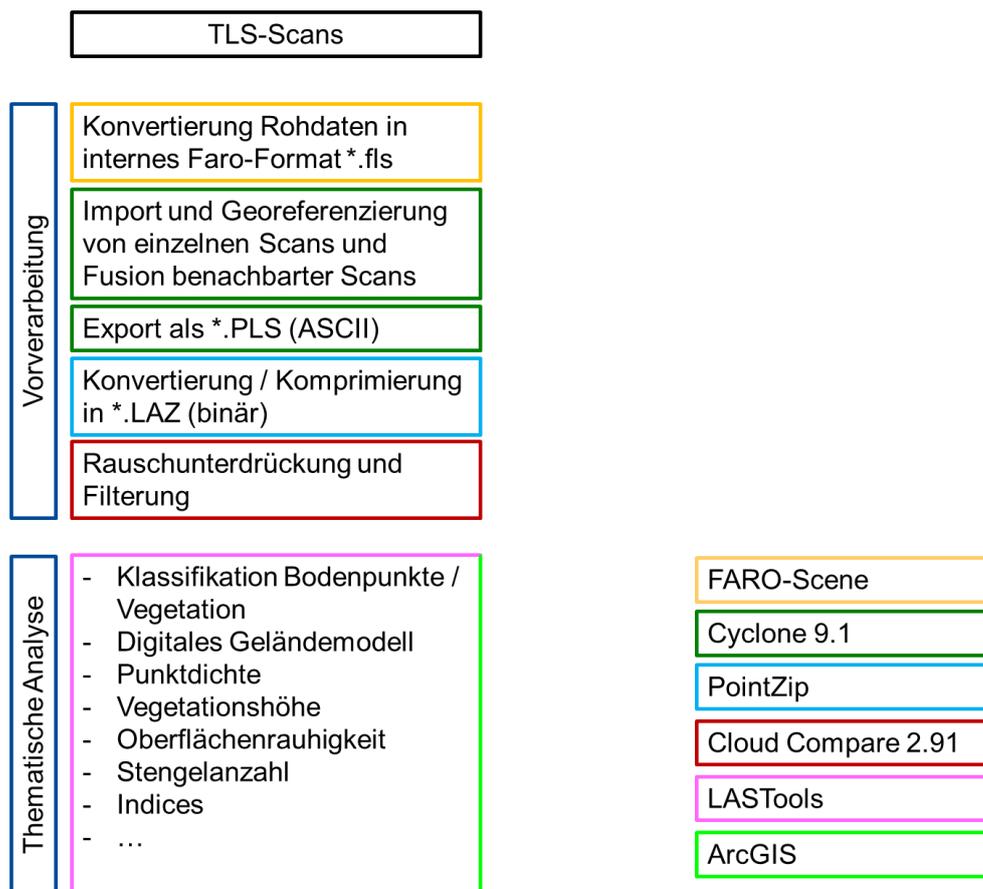


Abbildung 86: Workflow der Vorverarbeitungsschritte und der thematische Auswertung der TLS-Daten inklusive verwendeter Software

Zur Georeferenzierung der Punktwolken, also die Transformation der Punktwolken in ein übergeordnetes Koordinatensystem, wurde die Software Leica Cyclone 9.1 verwendet. Die Genauigkeit der registrierten Punktwolken betrug ca. 1-3 cm.

Zur Datenbereinigung der entstandenen Punktwolken sind mit der Software CloudCompare verschiedene Filter verwendet worden, um zufällige Scanfehler sowie Rauschen und Bewegungen zu reduzieren, was die Datenverarbeitung und Objektextraktion im Nachhinein wesentlich verbessert. Im Folgenden werden die TLS-Daten zuerst visuell und qualitativ untersucht und im Anschluss verschiedene Automatismen getestet, um verschiedene Pflanzenparameter wie z. B. die Pflanzenhöhe und die Anzahl der Pflanzen aus den Daten abzuleiten.

3.5.1 Visuelle Erfassung von Pflanzenparametern

Die folgenden Untersuchungen beziehen sich beispielhaft auf verschiedene Scans des Standorts Hollerwetter. Die Scans (020-028) sind dabei am 10.8. mit dem 1.80 m hohen Stativ vom Watt aus in die Teichsimsenzzone hinein gescannt worden. Die Scans 065-068 sind am 25.09. im Bestand, von dem 4 m hohen Stativ aus gescannt worden.

Um die Makrophyten durch die Punktwolken visuell zu beschreiben und zu identifizieren, wurden aus den TLS-Punktwolken circa 1 m breite Polygone ausgeschnitten. Da die Methode der visuellen Bewertung beispielhaft angewandt werden soll, beschränkt sich die Auswertung auf wenige Polygone (Abbildung 87). Die Polygone wurden zufällig ausgewählt, allerdings wurde bei den Scans, die von der Wattfläche aus aufgenommen wurden (020-028) versucht, dass die darin abgebildeten Pflanzen sich

in unterschiedlichen Entfernungen vom Laserscanner befinden. Die reduzierten Punktwolken sind anschließend mit der Software FugroViewer ausgewertet worden.

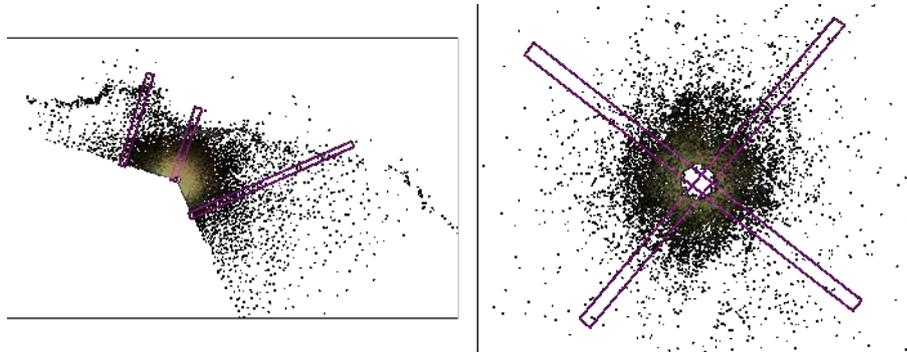


Abbildung 87: Beispielhafte Darstellung der zu bewertenden Polygone im Scan 020 (links) und 066 (rechts).

Im ersten Schritt wurde für jedes Polygon der Abstand zwischen Laserscanner und Pflanzenbestand ermittelt. Im nächsten Schritt wurde die maximale Pflanzenhöhe in einem ca. 1 m² Quadrat visuell bestimmt. Das Quadrat startet im Bereich jener Pflanzen, die vom Laserscanner per direkter Draufsicht erfasst wurden und nicht abgeschnitten wurden. Es wurden Vegetationshöhen, wie beispielhaft in Abbildung 88 dargestellt, von zehn verschiedenen Pflanzen erfasst, die möglichst ohne Unterbrechungen abgebildet wurden.



Abbildung 88: Beispielhafte Höhenbestimmung bei direkter Draufsicht im Scan 020 (Ufernahe Salz-Teichsimsen).

Die ca. 1 m² großen Quadrate wurden für die Bestimmung der Stängeldurchmesser (10 cm Höhe über der Bodenoberfläche) in kleinere Segmente geteilt. Damit wurden die Punktdichten reduziert und die Bestimmung der Stängeldurchmesser erleichtert, da die erfassten Punkte sich weniger überdeckten (Abbildung 89).



Abbildung 89: Bestimmung der Stängeldurchmesser mit unterschiedlichen Segmentgrößen. Oben: 1 m x 1 m. Unten: 1 m x 0,25 m.

Bei der visuellen Bestimmung der Vegetationshöhen und Stängeldurchmesser mit Hilfe des Fugro-Viewers wurde versucht mindestens zehn Höhen- und Durchmessermessungen in den ausgewählten Polygonen zu ermitteln. Dabei ging es nicht um die Verifizierung der Ergebnisse, sondern nur um die Durchführbarkeit. In den Scans 020-028 wurden je drei 1 m² große Polygone ausgewertet, in den Scans 065-068 jeweils vier.



Abbildung 90: Schwierigkeiten bei der Bestimmung der Vegetationshöhen durch geringe Punktedichten (Scan: 020, 3r).

Vergleicht man die Entfernungen vom Laserscanner bis zum Pflanzenbestand mit der Anzahl der möglichen messbaren Vegetationshöhen, lassen sich keine Gemeinsamkeiten erkennen, da auch ab

einer Entfernung von mehr als 20 m noch in zwei Scans mindestens zehn Stängel erfasst werden konnten (Tabelle 10).

Die zehn gewünschten Stängeldurchmesser konnten in lediglich vier Polygonen erfasst werden, bei denen auch die Ermittlung der zehn Vegetationshöhen eindeutig möglich war. Die höchste Anzahl an messbaren Stängeldurchmessern lag überwiegend in den Segmenten, in denen auch die Vegetationshöhen gut messbar waren (Tabelle 10). Nach Analyse der einzelnen Abschnitte ist festzustellen, dass die Messung der Stängeldurchmesser bei Beständen mit dünnen Pflanzen mit einem Durchmesser < 5mm auf Grund einer geringen Punktdichte nicht wahrheitsgetreu erfasst werden konnten.

Tabelle 10: Vergleich der Anzahl gemessener Vegetationshöhen und Stängeldurchmesser mit dem Abstand zwischen Laserscanner und Pflanzenbestand bei den Scans 020-028, Standort Hollerwettern, 10.8.2017.

Scan	Polygonnummer	Anzahl gemessener Vegetationshöhen	Anzahl gemessener Stängeldurchmesser	Entfernung Laserscanner zum Pflanzenbestand [m]
20	2m	10	10	7,07
23	2m	10	10	8,69
27	3r	5	5	9,61
20	1l	8	3	9,79
23	1l	10	5	10,42
27	2m	10	10	10,81
22	3r	4	1	11,05
28	1l	6	5	11,38
27	1l	6	3	11,58
23	3r	5	0	12,21
22	1l	3	0	16,72
21	3r	8	5	17,82
21	2m	10	10	20,94
22	2m	10	7	20,97
20	3r	7	0	22,66
21	1l	6	1	23,72
28	2m	2	2	25,61
28	3r	4	0	37,21

Bei den Scans, die direkt im Pflanzenbestand durchgeführt wurden (065-068), konnten in allen Beispieldpolygonen mindestens zehn Vegetationshöhen erfasst werden. Im Gegensatz zu den Scans 020-028 waren allerdings die Bodenpunkte deutlich schlechter von den Pflanzen zu unterscheiden und in geringerer Anzahl vorhanden, da der Bestand deutlicher dichter als im direkten Uferbereich war. Damit wurde die visuelle Ermittlung der Vegetationshöhen im Profil erschwert.

In 12 von 16 untersuchten Polygonen der Scans 065-068 konnten keine zehn Stängeldurchmesser erfasst werden, da die Punktdichte und das Rauschen zu hoch waren und die Stängel untereinander nicht voneinander unterscheidbar waren. Lediglich im vorgefilterten Scan 065 konnten alle Stängeldurchmesser erfasst werden, was für die Notwendigkeit einer Vorfilterung spricht, um das Rauschen auf ein Minimum zu reduzieren.

3.5.2 Visuelle Ermittlung und Zählung einzelner Pflanzen

Die Ermittlung und Zählung einzelner Pflanzen ist vor allem in Bereichen möglich, in denen auch mindestens zehn Pflanzenhöhen und Stängeldurchmesser erfasst werden konnten und damit eine ausreichende Punktdichte vorliegt. Im Scan 027/2m lassen sich beispielsweise die einzelnen Pflanzen samt Blüte erkennen (Abbildung 91). Die Zählung war allerdings nur aus einer Perspektive möglich, da man bei einem Perspektivwechsel nicht genau unterscheiden konnte, welche Pflanzen bereits gezählt wurden. Durch Veränderung der Segmente lassen sich zudem die Punktdichten verändern, sodass es leichter wird, die einzelnen Pflanzen voneinander zu unterscheiden.



Abbildung 91: Pflanzenidentifizierung im Scan 027/2m.

Bei den Scans 065 - 068 können einzelne Pflanzen lediglich im vorgefilterten Scan 065 identifiziert werden, da die Punktdichten und das Rauschen in ungefilterten Scans derartig hoch sind, dass eine genaue Unterscheidung der Pflanzen nicht möglich ist.

Insgesamt kann man festhalten, dass die Durchdringungstiefe der Vegetation des terrestrischen Laserscanners sehr überschaubar war und je nach Dichte des Bestands 1-3 m nicht überschritten hat. Das ist einerseits auf die hohe Bestandsdichte zurückzuführen und andererseits darauf, dass gerade die Strandsimsen mit einer signifikanten Pflanzenhöhe von 1,20-1,60 m vom Laserscanner mit einer Stativhöhe von ca. 1,80 m kaum überragt wurden und somit der Scanner den Bestand nur unter einem recht flachen Winkel erfassen konnte. Gleichwohl ist es möglich im Nahbereich der Scannerstandorte Informationen zur Pflanzendichte etc. abzuleiten.

Exakte Aussagen zum Stängeldurchmesser sind aus den TLS Daten aus zwei Gründen nicht ableitbar. Zum einen reicht die Auslösung des Laserscanners nicht aus, um feinen Unterschiede der Stängeldurchmesser von wenigen Millimetern zu messen und zum anderen werden die Laserstrahlen an den dünnen Stängeln eher abgelenkt und nur teilweise reflektiert, was dazu führt, dass die Stängel in der TLS-Punktwolke eher zu dick abgebildet werden.

3.5.3 Ableitung / Berechnung der Punktdichte

Die Berechnung der Punktdichte erfolgt mit der Funktion „lasinfo“ der LAsTools-Software⁵ aus der gefilterten Punktwolke. Dabei zeigt sich, dass die Punktdichte nahezu logarithmisch zur Entfernung zum Standort des Laserscanners abnimmt. Bei dem in Abbildung 92 dargestellten Scan, nimmt die Punktdichte von 650 Tsd. Punkte / m² auf 2.500 Punkte pro m² innerhalb von 1-2 m ab.

⁵ <https://rapidlasso.com/lasools/lasinfo/>

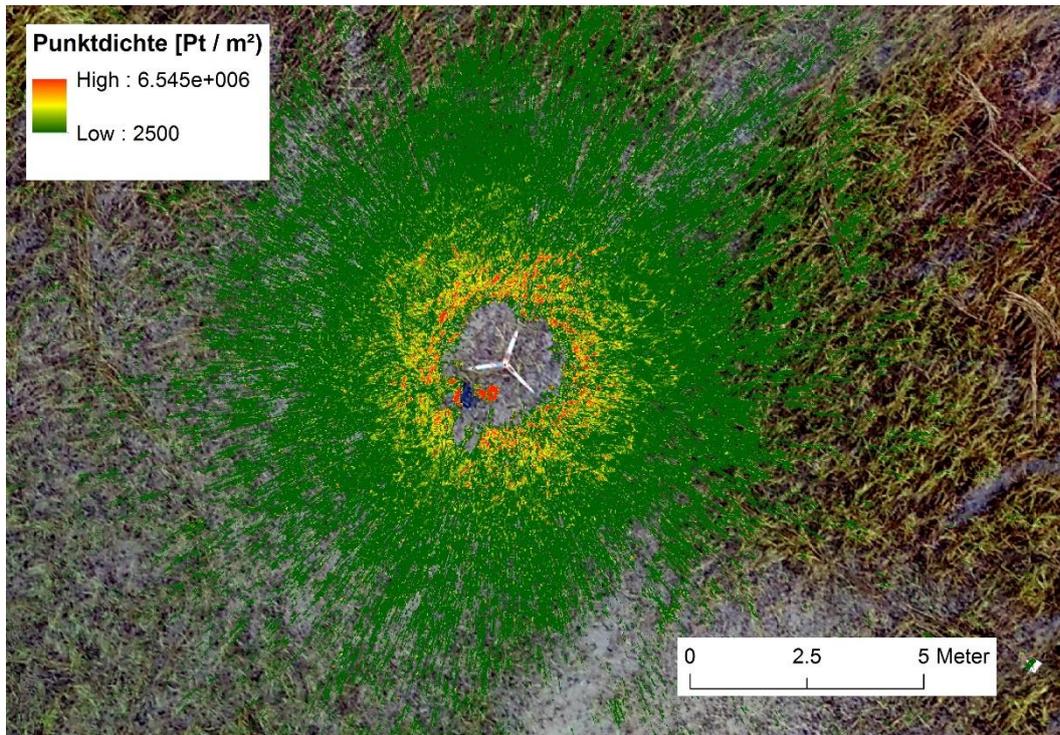


Abbildung 92: TLS-Punktdichte um den Laserscanning Standort (Scan 065, Standort Hollerwettern vom 25.9.)

3.5.4 Erstellung und Bewertung digitaler Geländemodelle aus den TLS-Daten

Die Bodenpunkte wurden mittels der Funktion „lasground“⁶ von den „nicht-Bodenpunkten“, d. h. der Vegetation differenziert. Anschließend wurde mit Hilfe des Moduls „lasgrid“⁷ aus den Bodenpunkten ein digitales Geländemodell (DGM) als Rasterdaten erstellt. Für die Bewertung des erstellten Geländemodells wurde es mit dem DGM auf der Basis der GPS-Messungen verglichen. Dabei zeigt sich, dass der Klassifikationserfolg, d. h. die korrekte Unterscheidung in Boden- und Nichtbodenpunkte maßgeblich von der Bestandsdichte und zusätzlich der Entfernung vom Laserscanner abhängen. Eine hohe Bestandsdichte führt dazu, dass nur wenige Punkte den Boden erreichen und die Reichweite auf wenige Meter reduziert wird. Das ist für den Klassifikator, der für Airborne Laserscanning optimiert ist, problematisch. Mit zunehmender Entfernung zum Laserscanner wird der Auftreffwinkel immer flacher und somit die Messung des Bodens immer unzuverlässiger (siehe Abbildung 93).

⁶ <https://rapidlasso.com/lastools/lasground/>

⁷ <https://rapidlasso.com/lastools/lasgrid/>



Abbildung 93: TLS-Datenanalyse zur Klassifikation von Bodenpunkten (links: 3D-Punktwolke als Draufsicht, Mitte, Perspektivansicht, rechts klassifizierte Bodenpunkte)

3.5.5 Ableitung der Pflanzenhöhe aus TLS-Daten

Zur Ableitung der Pflanzenhöhe aus den TLS-Daten wurde folgende Annahme getroffen. Von den schräg auf den Pflanzenbestand und den Boden ausgesandten Laserstrahlen erreicht ein, wenn auch kleiner Teil der Punktwolke immer den Boden. Die Pflanzenhöhe kann also aus der Differenz zwischen den niedrigsten und den höchsten Laserreflexionen an jedem Punkt ermittelt werden.

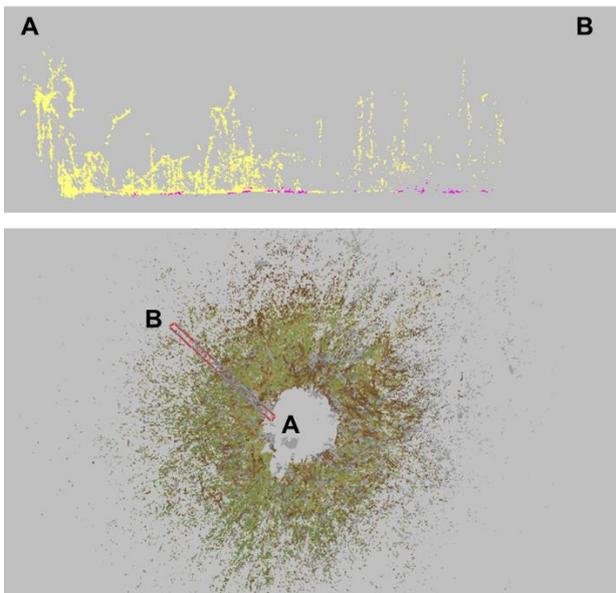


Abbildung 94: TLS-Punktwolke, Scan 65 (Hollerwettern) in der Draufsicht und Profil

Mit der Funktion „lascanopy“ wurden in einer Rastergröße von 2 cm verschiedene Perzentile berechnet. Das 1%-Perzentil, d. h. die kleinsten Werte definieren dabei den Boden, während das 99%-Perzentil die Oberfläche darstellt. Aus der Differenz der beiden Flächen ergibt sich dann die Pflanzenhöhe, wie in Abbildung 95 für einen Scan in Hollerwettern dargestellt.

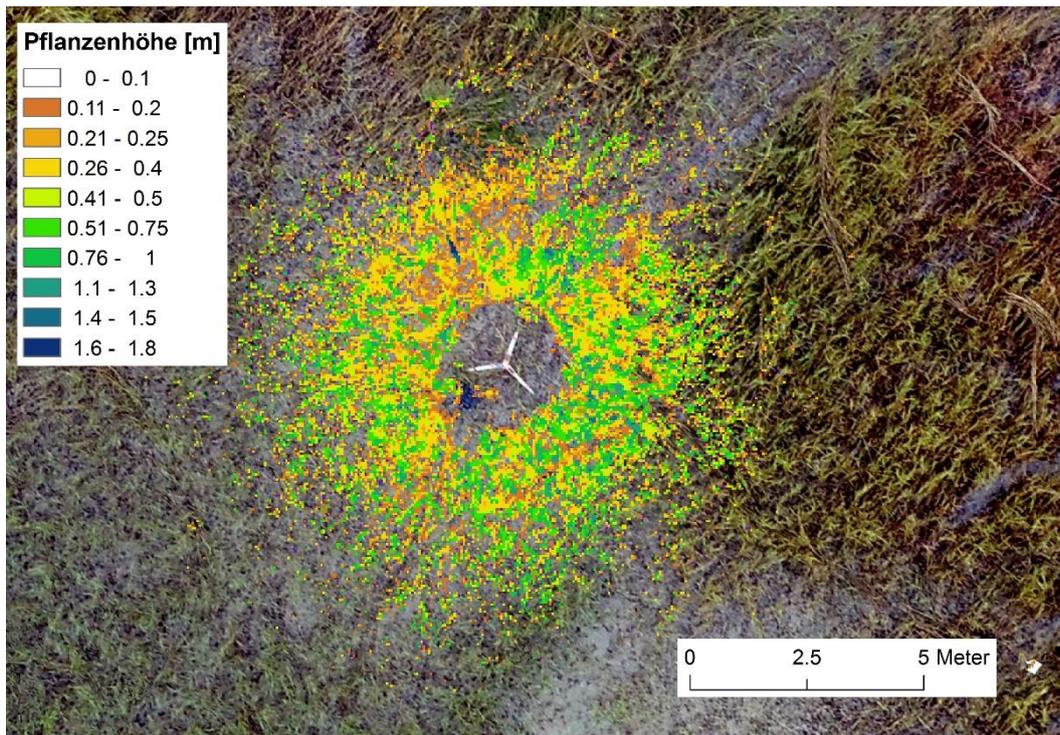


Abbildung 95: Berechnete Vegetationshöhe aus den TLS-Daten über die Differenz der 01-99 Perzentile (Scan 065, Standort Hollerwettern vom 25.9.)

3.5.6 Ableitung der Anzahl der Triebe / Stängel aus TLS-Daten

Die Ermittlung der Anzahl der Pflanzen / Stängel aus den TLS-Daten ist nicht trivial, da sich die Pflanzen in der TLS-Punktwolke als dreidimensionale Objekte darstellen, die sich schwierig oder besser gesagt gar nicht als Individuen klassifizieren lassen. Auch im Profil (vgl. Abbildung 94) ist zu sehen, dass die Pflanzen ineinander gewachsen sind und die Blätter sich teilweise überlappen. Gleichwohl sind die einzelnen Pflanzen bzw. die Strandsimsen am ehesten kurz über dem Boden voneinander zu trennen, da in dieser Höhe keine oder nur wenige Blätter vorkommen. Aus diesem Grund wurde eine 10 cm hohe Scheibe aus der Punktwolke extrahiert und die Punktdichte mit einer Auflösung von 1 cm berechnet. Beim Auftreffen der Laserimpulse an einem Stängel werden besonders viele Laserreflexionen erzeugt, wohingegen ein Blatt weniger Reflexionen erzeugt. Über einen Schwellwert kann anschließend auf die Anzahl / Standort der Stängel geschlossen werden. Da zum Zeitpunkt des Scans einzelne Stängel schon am Boden lagen, wurden größere, längliche Objekte nach der Raster/Vektor Konvertierung herausgefiltert und direkt nebeneinander liegende Objekte zu einem Stängel vereint.



Abbildung 96: Aus TLS-Punktwolke abgeleitete Stängel, Scan 065, Hollerwettern 26.9.2017

Nach der Filterung konnten um den Scannerstandort 1.941 Pflanzen auf einer Fläche von 26 m² um den Scanner herum ermittelt werden, was einer mittleren Pflanzendichte von 74 Pflanzen / m² entspricht. Das ist weniger als erwartet. Dafür gibt es zwei Ursachen. Eine ist, dass ein Teil der Pflanzen, wie auf dem als Hintergrund dargestellten zeitgleich aufgenommenen Orthophoto zu erkennen ist, schon abgestorben sind und somit nicht mehr stehen und der andere Aspekt ist, dass die Dichte der Laserstrahlen rasch durch den Bewuchs abnimmt. Wenn man nur den inneren Radius von ca. 1 m um den Laserscanner nimmt, verbessert sich das Verhältnis von 1.463 Pflanzen auf 15 m² bzw. 98 Pflanzen / m². Leider sind keine parallelen manuellen Zählungen der Pflanzenanzahl um die Standpunkte des TLS erfolgt, so dass die Ergebnisse nicht validiert werden können. Dies ist notwendig, um einen Korrekturfaktor, der die Vegetationsdichte und damit die Abschattung berücksichtigt, zu bestimmen. Dieses Verfahren ist prinzipiell sehr gut geeignet um die Stängelanzahl in einem engen Radius um den Laserscanner zu ermitteln. Voraussetzung ist allerdings, dass die Pflanzen in einem geeigneten phänologischen Stadium sind und keine Stängel oder anderes über dem Boden liegt, d. h. im vorliegenden Fall Fröhsommer-Sommer. Da die Pflanzen im unteren Bereich weniger Blätter ausbilden und sich nicht so verzweigen, funktioniert die Methode generell bei den Teichsimen und Schilf besser als bei Strandsimen,

3.5.7 Vergleich zwischen den Oberflächenmodellen aus TLS-Daten und UAS

Aufgrund unterschiedlicher Verfahren, Perspektiven und Reichweiten unterscheiden sich die photogrammetrisch abgeleiteten Vegetationsoberflächen eines UAS und dem terrestrischen TLS-Scan. Der direkte Vergleich in Form einer Differenzbildung ist im vorliegenden Fall aussagekräftig, da die beiden Datensätze zeitgleich erhoben wurden und über gemeinsame Passpunkte geometrisch ko-registriert sind (Abbildung 97). Die TLS-Oberfläche in Form eines Rasters wurde über die Berechnung des 99%-Perzentils erreicht. Das GSD des TLS-Oberflächenmodells beträgt 2 cm, um auch feine Details abbilden zu können. Eine positive Differenz steht in diesem Falle dafür, dass die TLS-Daten höhere Geländehöhen aufweisen als das UAS DOM. Negative Werte beschreiben den Fall, dass das Oberflächenmodell der Drohnen höhere Werte aufweist als die TLS-Daten.

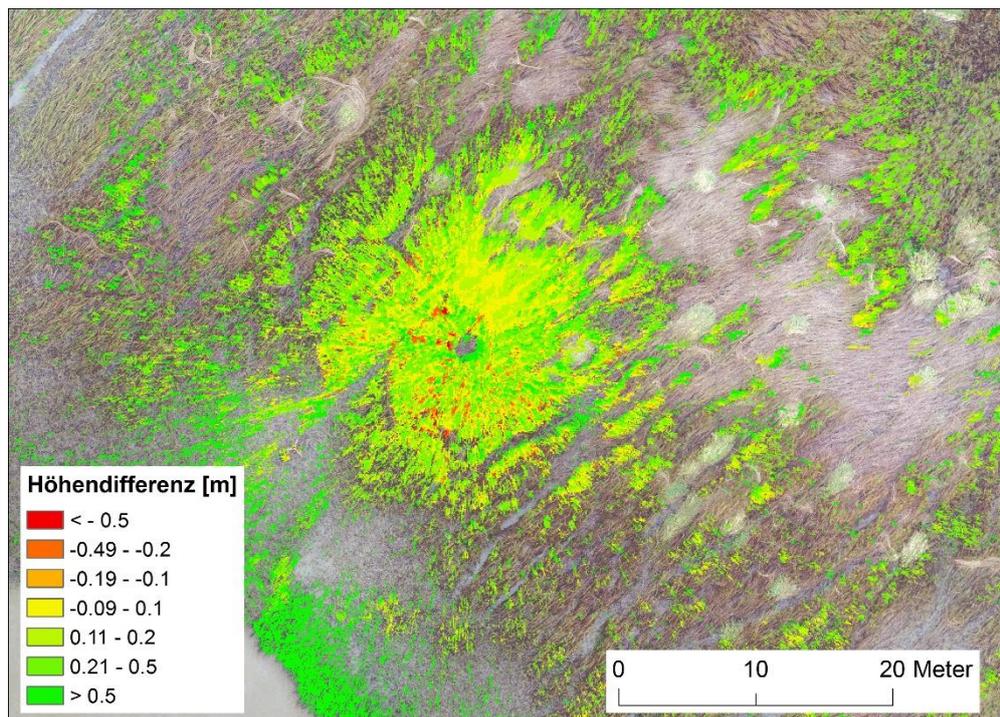


Abbildung 97: Differenz zwischen dem TLS-Oberflächenmodell, ungefilterter Scan 068 mit 4 m Stativ (99%-Perzentil) und dem zeitgleich aufgenommenen und geometrisch Ko-registrierten UAS Oberflächenmodell (DEM), Standort Hollerwettern, 25.9.2017

Es zeigt sich, dass das TLS-DOM tendenziell geringfügig höhere Werte der Vegetationsoberfläche erzeugt als das UAS-DOM. Im direkten Umfeld des Scanners sind auch einige niedrigere Werte zu beobachten. Die Differenzen bei den Teichsimsen, südlich in einer Entfernung von circa 20 m zum Scanner sind mit teilweise über 50 cm zum UAS-DOM auffallend groß.

Kleine, tiefe Löcher im Bestand können photogrammetrisch schlecht erfasst werden, da für eine Höhenbestimmung eines Punktes Strahlen aus mindestens zwei Bildern erforderlich sind. Hier ist der Laserscanner im Nahbereich besser geeignet, da eine Distanzmessung ausreicht. Die photogrammetrisch abgeleitete Vegetationsoberfläche bezieht sich generell auf eine „signifikante“ Pflanzenhöhe (GRENZDÖRFFER, 2014) und ist damit grundsätzlich niedriger als die maximale Vegetationsoberfläche. Diese wird hingegen durch die hohe Datendichte und den flachen Scanwinkeln sehr gut mit dem TLS abgebildet. Dadurch werden gerade in einer größeren Entfernung zum Scannerstandort einzelne, die Umgebung überragende Pflanzen abgetastet. Bei den Teichsimsen kommt noch ein weiterer Aspekt hinzu. Die Dichte dieser Pflanzen reicht nicht immer aus, um eine geschlossene Oberfläche zu bilden, deren Höhe zuverlässig photogrammetrisch zu messen ist. Als Fazit lässt sich festhalten, dass die TLS-Messungen mit einem 4 m hohen Stativ sehr gut geeignet sind, die maximale Bestandshöhe in einem Umkreis von 10 m zu messen.

3.6 Erstellung und Genauigkeit digitaler Geländemodelle (Fragestellung 2b und 2c)

Ein hochgenaues digitales Geländemodell wird für verschiedene Fragestellungen benötigt, u.a. für

- Höhe der Wattflächen, auf denen die Pflanzen wachsen können, da die Geländehöhe ein Schlüsselparameter für Pflanzenarten ist, die überflutet werden.
- die Bestimmung der Pflanzenhöhe durch Differenzbildung mit dem photogrammetrisch bestimmten Oberflächenmodell
- die Berechnung und Modellierung von Tidehochwässern
- ...

Deshalb soll auf der Grundlage der bei den Pflanzenmessungen ermittelten 3D GPS-Positionen ein digitales Geländemodell abgeleitet werden. Dabei stellt sich natürlich die Frage, wie genau denn das Ergebnis wird und welche Faktoren, die Genauigkeit beeinflussen. Im Folgenden werden dazu drei Faktoren genauer untersucht:

1. Messgenauigkeit des GPS
2. Genauigkeit des Messens und Einfluss der Geländerauhigkeit
3. Einfluss der Interpolationsmethode

Die GPS-Messung als solche ist in der Regel auf 1-2 cm sehr genau und auch recht zuverlässig, wenn auf die Referenzdaten eines Echtzeitkorrekturdienstes (z. B. SAPOS, o.ä.) zurückgegriffen werden kann. Das gilt für Messungen an unterschiedlichen Zeitpunkten und auch mit unterschiedlichen GPS-Empfängern. Das konnte z. B. durch eine Vergleichsmessung in Hollerwettern von Passpunkten mit zwei verschiedenen GPS-Empfängern validiert werden.

Weitaus fehleranfälliger sind die GPS-Messungen als solche und die Mikrotopographie, die sich durch kleinräumige Variationen in der Höhe ergibt. Die Watt- und Geländeoberflächen in den Untersuchungsgebieten sind nur auf den ersten Blick eben bzw. gleichmäßig ansteigend. Bei näherer Betrachtung kommen kleine Rinnen, bzw. Priele und sonstige Unebenheiten zum Tragen. Auch der Untergrund ist unterschiedlich fest. Das kann in der Praxis dazu führen, dass bei der Messung die Spitze des GPS-Messstabes in den Boden um ein paar Zentimeter einsinkt. Pflanzenreste, bzw. Wurzeln können ebenfalls auf dem Boden liegen und die exakte Messung der Geländeoberfläche erschweren. Um das Problem einmal statistisch zu fassen, wurden die beiden Messkampagnen in Hollerwettern (10.8. und 25.9.) miteinander verglichen (vgl. Abbildung 98).

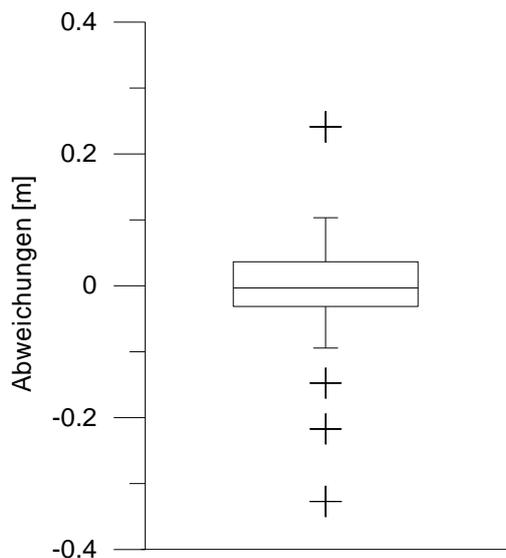


Abbildung 98: Boxplot der vertikalen Differenzen zwischen den GPS-Messungen der beiden Messkampagnen (10.08. und 25.09.2017) am Standort Hollerwettern an den vorgegebenen Pflanzenmesspunkten ($n = 50$)

Die Punkte der beiden Kampagnen sind an in etwa der gleichen Stelle, d. h. < 1 m voneinander gemessen worden. Danach stimmen die GPS-Messungen der beiden Kampagnen im Mittel sehr gut überein (± 3 mm), auch die mittleren 50% sind mit ± 3 cm als sehr plausibel anzusehen. Interessant wird es bei den fünf Ausreißern mit Abweichungen von mehr als 9 cm in der Höhe. Bei den positiven Abweichungen (d. h. bei der Messung am 25.9. sind kleinere Werte gemessen worden als am 10.8.) liegt die Ursache darin, dass bei der zweiten Messung auf einer kleinen Bulte aus festerem Material, die mit Schilf bewachsen ist, gemessen wurde. Bei den negativen Abweichungen sind die Messungen zum ersten Zeitpunkt in einer kleinen Rinne erfolgt und beim zweiten Mal daneben.

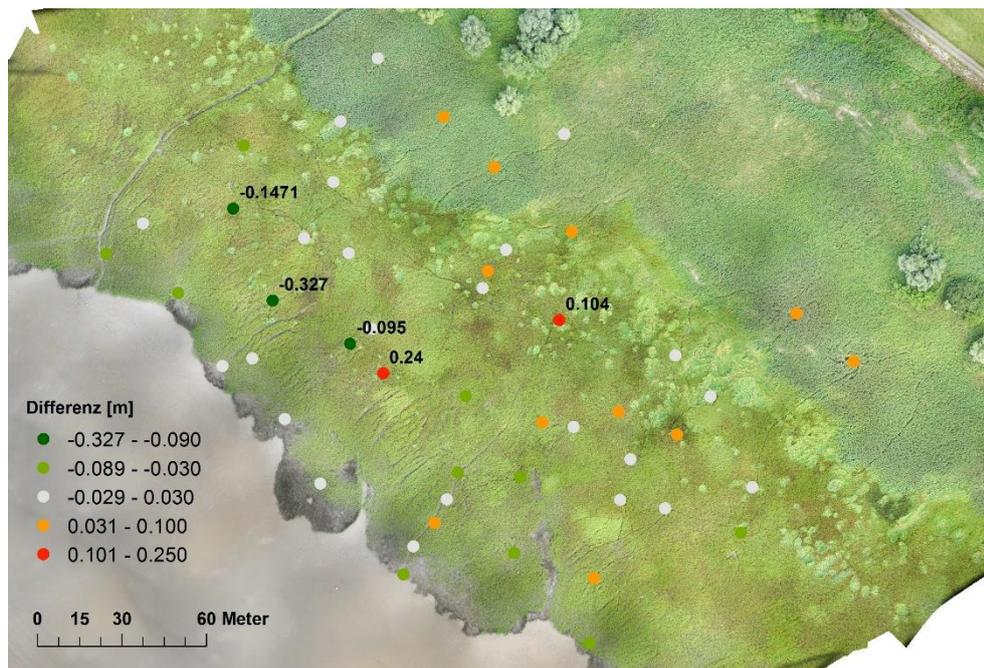


Abbildung 99: Höhendifferenzen der GPS-Messungen (10.08. und 25.09.) an den Pflanzenmesspunkten am Standort Hollerwettern

Dies ist natürlich für die nachfolgende Interpolation der Geländeoberfläche problematisch, da alle Punkte in die Berechnung eingehen sollen und eine weitere Qualitätskontrolle normalerweise nicht erfolgt. Im vorliegenden Fall wurde bei Messpunkten mit großen Abweichungen zwischen den zwei Messungen die Werte gemittelt.

Um aus den einzelnen Höhenpunkten flächendeckende Daten abzuleiten, ist eine Interpolation erforderlich. Als Interpolationsmethoden kommen einfache Verfahren, wie z.B. Inverse Distance Verfahren oder auch komplexere geostatistische Verfahren in Frage. Je geringer die Stützpunktdichte ist, desto stärker beeinflusst die Wahl des Interpolationsverfahrens das Erscheinungsbild der berechneten Oberfläche. Im vorliegenden Fall sind die Messpunkte unterschiedlich weit voneinander entfernt (7-35 m). Unter Berücksichtigung der oben genannten Fehlerquellen ist nicht davon auszugehen, dass jede Messung absolut richtig ist. Dies wird bei geostatistischen Verfahren, die die räumliche Varianz mit berücksichtigt, die sich mit Hilfe der Semivariogramme ermitteln lässt. Für einen gesuchten Wert werden dabei die Gewichte der in die Berechnung einfließenden Messwerte so bestimmt, dass die Schätzfehlervarianz möglichst gering ist. Der Fehler hängt dabei von der Qualität des Variogramms bzw. der Variogrammfunktion ab. Als geostatistisches Verfahren zur Bestimmung der räumlichen Varianz wurde das Empirical Bayesian Kriging verwendet (KRIVORUCHKO UND GRIBOV, 2014), das im ArcGIS Geostatistical Analyst implementiert ist. Vorteile dieses Verfahrens sind unter anderem, dass es nur eine minimale interaktive Modellierung erfordert und die Standardfehler der Vorhersage sind genauer als bei anderen Kriging-Methoden. Das rechenintensive Verfahren ist vor allem genauer als andere Kriging-Methoden für kleine Datensets. Nicht zuletzt können Trends der ersten Ordnung in den Daten erkannt und berücksichtigt werden. Dieses ist bei den vorliegenden Daten gegeben.

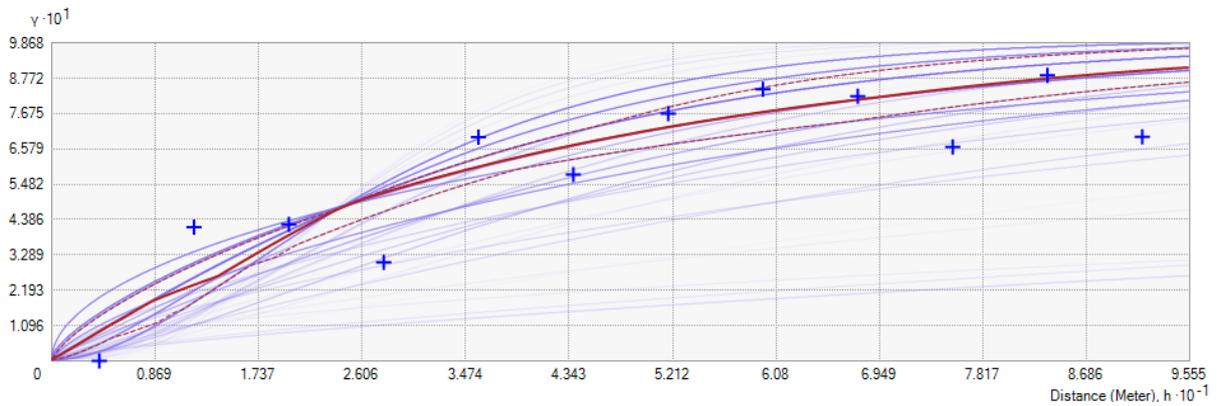


Abbildung 100: Automatisch angepasstes Semivariogramm (K-Bessel Detrended) des Empirical Bayesian Kriging für den Standort Hollerwettern

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen das aus den GPS-Messungen abgeleitete Geländemodelle und den Einfluss verschiedener Interpolationsverfahren und –methoden.

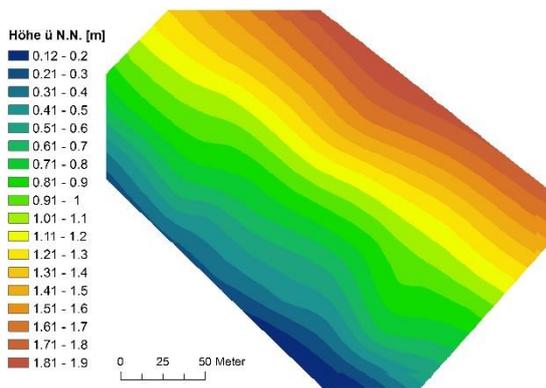


Abbildung 101: DGM Hollerwettern auf der Grundlage von 50 GPS-Messungen und Empirical Bayesian Kriging

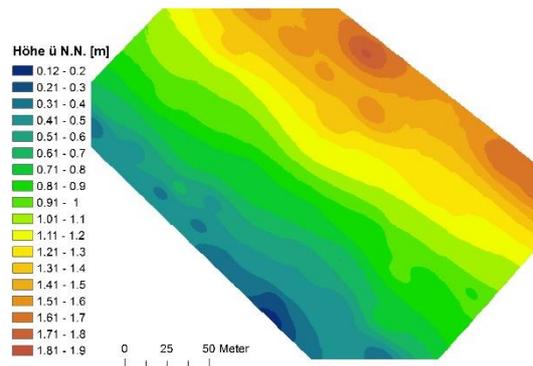


Abbildung 102: DGM Hollerwettern auf der Grundlage von 50 GPS-Messungen und Inverse Distance Interpolationsverfahren

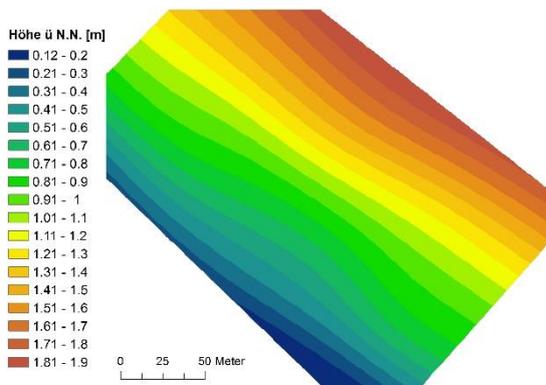


Abbildung 103: DGM Hollerwettern auf der Grundlage

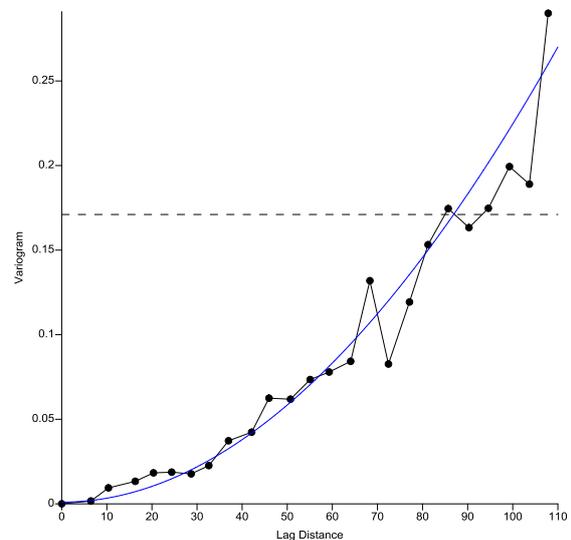


Abbildung 104: Angepasstes Semivariogramm

von 50 GPS-Messungen und Kriging mit einem angepassten Semivariogramm

(Powerfunktion) und Nuggeteffekt von 0.005.

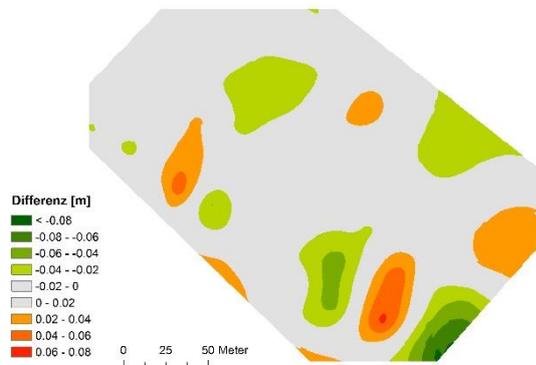


Abbildung 105: Vertikale Differenz zwischen den beiden untersuchten geostatistischen Interpolationsmethoden

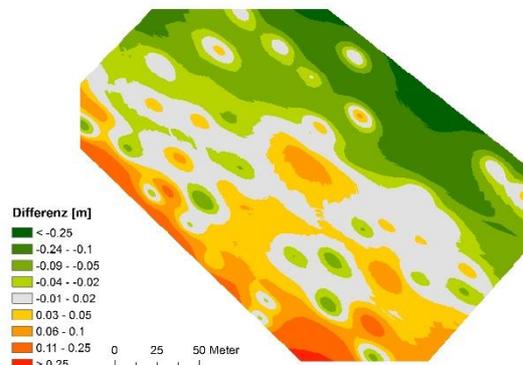


Abbildung 106: Vertikale Differenz zwischen dem Empirical Bayesian Kriging und dem Inverse Distance Interpolationsverfahren

Zusammenfassend kann man folgendes festhalten:

- Die RTK GPS-Messungen sind auf 1 -2 cm genau, Empfängerunabhängig und reproduzierbar, wenn sie am exakt gleichen Ort auf einer wohldefinierten Oberflächenhöhe (z. B. Asphalt) durchgeführt werden.
- Der Einfluss der Messoberfläche (Dichte) und die Mikrovarianz, d.h. die im Gelände vorkommenden Rinnen etc. sind erheblich und können unter Umständen die zu interpolierende Geländeoberfläche verfälschen.
- Bei der GPS-Messung bzw. der räumlichen Auswahl der Punkte ist darauf zu achten, dass diese nicht in oder an einer Rinne liegen.
- Die im Gelände vorkommenden Rinnen und Priele, insbesondere in den Standorten Hollerwettern und Balje sind mit terrestrischen GPS-Messungen nicht erfasst worden.
- Die beiden untersuchten geostatistischen Verfahren liefern zwar unterschiedliche Ergebnisse, was im Wesentlichen auf eine unterschiedliche Glättung zurückzuführen ist. Hier glättet das Semivariogramm auf der Grundlage einer Exponentialfunktion stärker als das Empirical Bayesian Kriging Verfahren. Im Hinblick auf die Residuen sind die beiden untersuchten Verfahren gleichwertig.

3.7 Zusammenhänge zwischen den terrestrisch erhobenen und den UAS-Daten

Im Folgenden werden auf der Basis von Partial Least Squares Regression (PLSR) Beziehungen von den im Feld gemessenen Pflanzenparametern und den zeitgleich erfassten fernerkundlichen Daten ermittelt und in die Fläche übertragen.

Die PLSR hat in den letzten Jahren sehr stark an Bedeutung gewonnen und hat sich im Vergleich zu anderen komplexen multivariaten Regressionsverfahren (wie der Support Vector Regression oder der Gaussian Process Regression) als sehr robust erwiesen. Dies konnten unter anderen SIEGMANN & JARMER (2015) für multi- und hyperspektrale Daten durch unabhängige Validierungsversuche nachweisen. Außerdem konnten sie nachweisen, dass die PLSR relativ robust gegenüber einer Überanpassung (over fitting) der Modelle agiert. Vor allem in der Spektroskopie wird die PLSR zur Kalibrierung von Eigenschaften aus Spektren verwendet.

PLSR kombiniert Merkmale der Hauptkomponentenanalyse mit Merkmalen der mehrfachen Regression. Zunächst wird ein Set latenter Faktoren extrahiert, die einen möglichst großen Anteil der Kova-

rianz zwischen den unabhängigen und den abhängigen Variablen erklären. Anschließend werden in einem Regressionsschritt die Werte der abhängigen Variablen mithilfe der Zerlegung der unabhängigen Variablen vorhergesagt.

Die Berechnungen der PLSR wurden mit der frei verfügbaren Software EnMAP-Box (VAN DER LINDEN et al. 2015) durchgeführt.

3.7.1 Balje

Anhand des Standorts Balje wird die PLSR auf zwei verschiedenen Datensätzen angewendet. In einem ersten Abschnitt nur auf Basis der vierkanaligen **Multispektraldaten** des Sequoia-Sensors (Tabelle 11) die auf eine räumliche Auflösung von 1 m (= 1m GSD⁸) vergrößert wurden, um einerseits eine sichere räumliche Zuordnung zwischen den gemessenen Pflanzendaten zu erreichen und zum anderen ungewollte Mikrovarianzen durch eine Mittelung zu vermeiden. Mikrovarianzen können zum einen andere Pflanzen neben dem Dominanzbestand sein oder Bereiche, wo Schatten der Pflanzen dominiert und andererseits die verschiedenen Geometrien des Pflanzenbestandes.

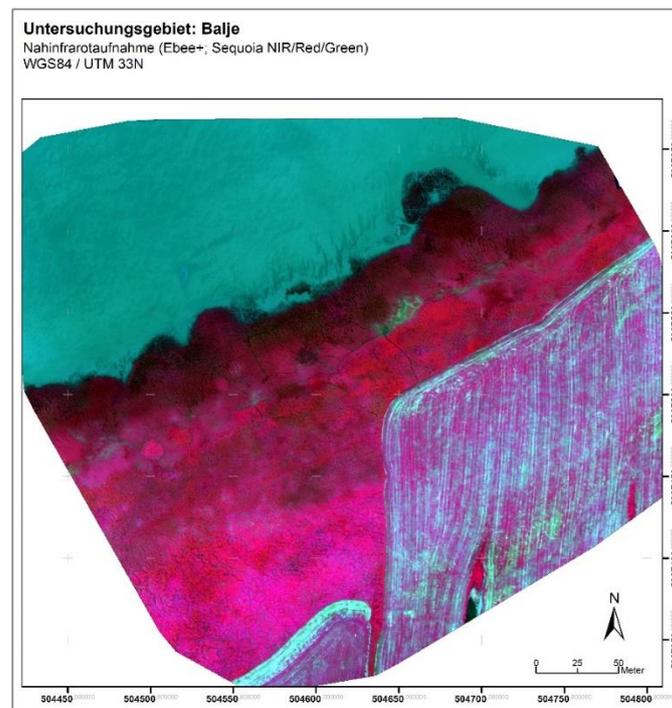


Abbildung 107: Infrarotaufnahme des Standortes Balje mit der Ebee+ und der Sequoia Multispektral-Sensor

Tabelle 11: Spektrale Kanäle des multispektralen Datensatzes

Nr.	Band	Sensor
2	Grün	Sequoia-Sensor
3	Rot	Sequoia-Sensor
4	Red Edge	Sequoia-Sensor
5	NIR	Sequoia-Sensor

⁸ GSD = Ground Sampling Distance

In einem zweiten experimentellen Abschnitt sind weitere erklärende Variablen von den anderen Sensoren der Ebee+-Drohne in Form eines **multisensoralen** Datensatzes hinzugenommen worden. Die Idee ist es, die Vorhersagegenauigkeit der PLSR zu steigern durch die Berücksichtigung weiterer erklärender Variablen. Die Parameter sind in Tabelle 12 aufgeführt. Neben den multispektralen Kanälen des Sequoia-Sensors wurde zusätzlich das blaue Band der S.O.D.A.-Kamera, der thermale Datensatz der ThermoMAP und das Digitale Oberflächenmodell (DOM), was aus S.O.D.A.-Daten generiert wurde, hinzugefügt. Die Daten wurden, analog zum multispektralen Ansatz auf einen Meter vergrößert. Der neue multisensorale Datensatz besitzt nun sieben statt vier Kanäle bzw. Bänder.

Tabelle 12: Zusammensetzung des Multitemporalen Datensatzes

Nr.	Band	Sensor
1	Blau	S.O.D.A.-Sensor
2	Grün	Sequoia-Sensor
3	Rot	Sequoia-Sensor
4	Red Edge	Sequoia-Sensor
5	NIR	Sequoia-Sensor
6	Thermal	ThermoMap
7	DOM	Generiert aus S.O.D.A.-Sensor

PLSR, Multispektraler Sequoia-Datensatz mit 1m GSD:

Zunächst werden alle Ergebnisse der PLSR für den vier-kanaligen Multispektral-Datensatz in Tabelle 13 zusammengefasst. Das Bestimmtheitsmaß (R^2) des Trainings- (cal) und des Validierungsdatensatzes (val) zeigen die Genauigkeit des Regressionsmodells. Dabei entsprechen ein R^2 von Eins einer 100 prozentigen Vorhersagegenauigkeit für den entsprechenden Parameter. Null bedeutet kein bestehender Zusammenhang zwischen den fernerkundlichen Drohnen-Datensatz und dem zu modellierenden Parameter. Bis auf drei Parameter konnten mit den Multispektral-Daten keine zufriedenstellende Modellierung der Pflanzenparameter produziert werden. Lediglich die Modelle der drei Parameter mittlere Pflanzenhöhe gemessen im Labor, im Gelände und die PAR-Werte können eine Varianz über 60 % erklären.

Tabelle 13: Zusammenfassung relevanter statistischer Parameter der PLSR auf der Grundlage des multispektralen Datensatzes (n = Anzahl; μ = Mittelwert; σ = Standardabweichung; LV = latente Variablen; R^2 = Bestimmtheitsmaß; RMSE = Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme; cal = Training; val = Validierung; PAR = Photosynthetisch aktive Strahlung)

Parameter	n	μ	σ	LV	R^2	RMSE	R^2	RMSE
					cal	cal	val	val
Anzahl Stängel	48	39,33	15,45	1	0,30	12,83	0,24	13,30
mittl. Durchmesser	48	5,45	1,31	2	0,13	1,20	0,05	1,26
mittl. Frischmasse	48	6,72	3,30	2	0,34	2,64	0,28	2,78
mittl. Pflanzenhöhe	48	107,34	41,35	1	0,66	23,90	0,63	24,90
mittl. Trockenmasse	48	2,91	2,24	3	0,43	1,68	0,34	1,80
Durchmesser Gelände	48	4,20	1,64	1	0,09	1,55	-0,01	1,63
Höhe Gelände	48	126,88	53,97	2	0,71	28,61	0,67	32,40
Orthometr. Höhe	48	1,08	0,47	1	0,40	0,36	0,36	0,37

PAR aussortiert	40	3,19	4,20	1	0,09	3,96	0,01	4,12
PAR alle Werte	46	16,20	27,57	1	0,78	12,68	0,74	13,79

Nachfolgend sind für die grün eingefärbten Zeilen die PLSR-Modelle in Abbildung 108 die Vorhersagarten in Abbildung 109, Abbildung 110 und Abbildung 111 erstellt worden.

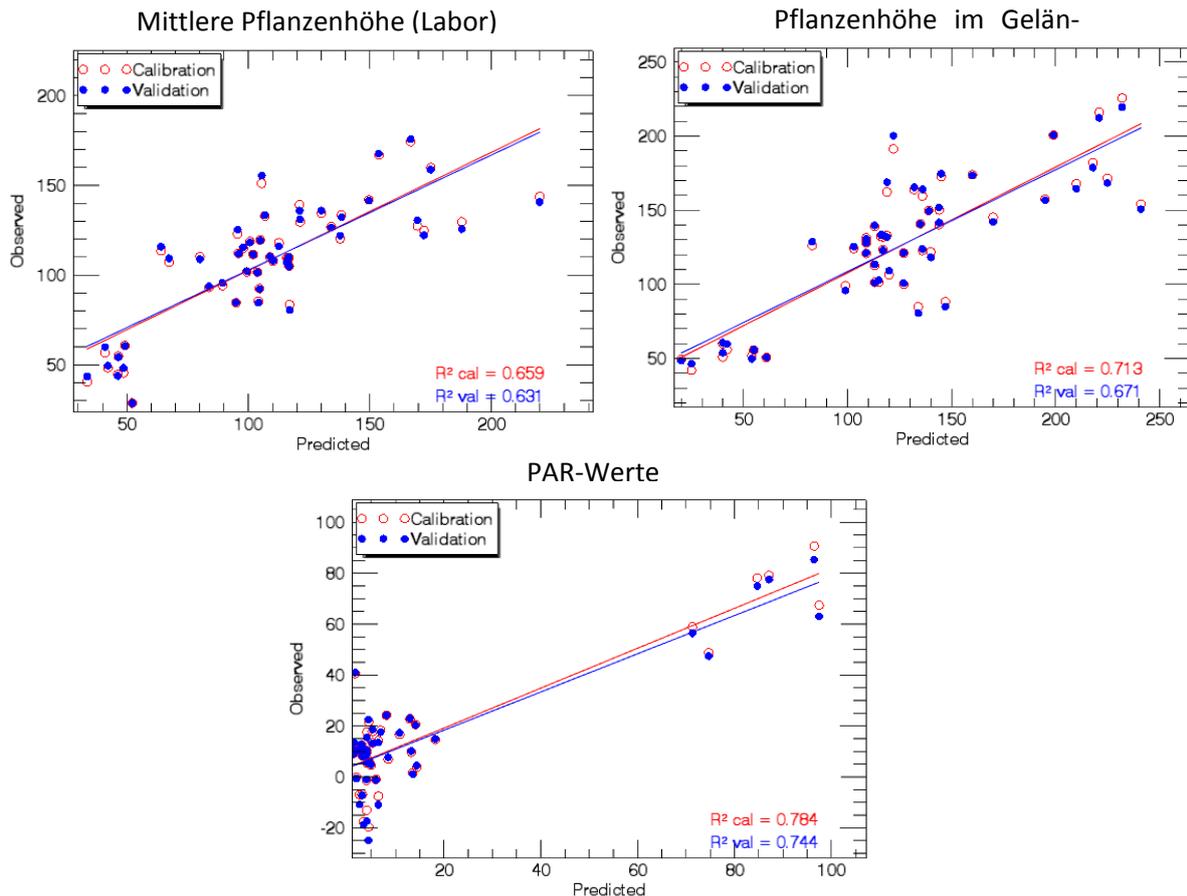


Abbildung 108: PLSR Modelle des multispektralen Datensatzes für ausgewählte Parameter

Die Modelle in Abbildung 108 vergleichen die im Gelände beobachteten (gemessenen) Werte mit den vom PLSR-Modell vorhergesagten Werten. Um die Werte vorherzusagen wurde die 10-fold-Kreuzvalidierung verwendet, in der immer zehn Punkte zur Validierung herausgenommen werden und mit den restlichen 38 Datenpunkten das Modell trainiert wurde um in Anschluss die zehn herausgenommenen Werte vorherzusagen. Dies wird solange iteriert bis alle Kombinationen aus zehn Werten vorhergesagt worden. Es ist gut zu erkennen, dass besonders die Mittlere Pflanzenhöhe und die Orthometrische Höhe moderat und akzeptabel vorhergesagt wurden. Bei den PAR-Werten wird das Modell höchstwahrscheinlich extrem unsicher, wenn man die sechs „Ausreißer“ aus der Betrachtung herausnimmt. Dies sind die Teichsimen, die durch ihre sehr lichte Ausprägung im Gelände auffallen. Nichtsdestotrotz wurden alle drei Modelle auf den Bilddatensatz angewendet, um die drei Parameter flächenhaft darstellen zu können. Die Karte zur Höhe des Pflanzenbestandes (Abbildung 109) zeigt, dass die PLSR Höhen zwischen 0 und 2,18 m ermittelt hat. Die Verteilung der mittleren Pflanzenhöhen zeigt ein schlüssiges Bild, könnte jedoch etwas unterschätzt sein. Das Modell zur Pflanzenhöhe (gemessen im Gelände) in Abbildung 110 zeigt ebenfalls eine schlüssige Verteilung der Höhen, ermittelt jedoch ein Maximum von etwa 3 m. Dies scheint eher eine Überschätzung der

Pflanzenhöhe zu sein. Auch der negative Zusammenhang der PAR-Werte in Abbildung 111 bildet die Erfahrung aus dem Gelände und die Annahmen des Kapitels der statistischen Auswertung gut ab, auch wenn das Modell statistisch sehr unsicher ist. Im niedrigen lichten Pflanzenbestand sind die relativen PAR-Werte sehr hoch, weil viel eintreffende Sonnenstrahlung bis zum Boden in den Bestand eindringt. Mit dichter und höher reichender Vegetation nimmt der PAR-Wert stark ab.

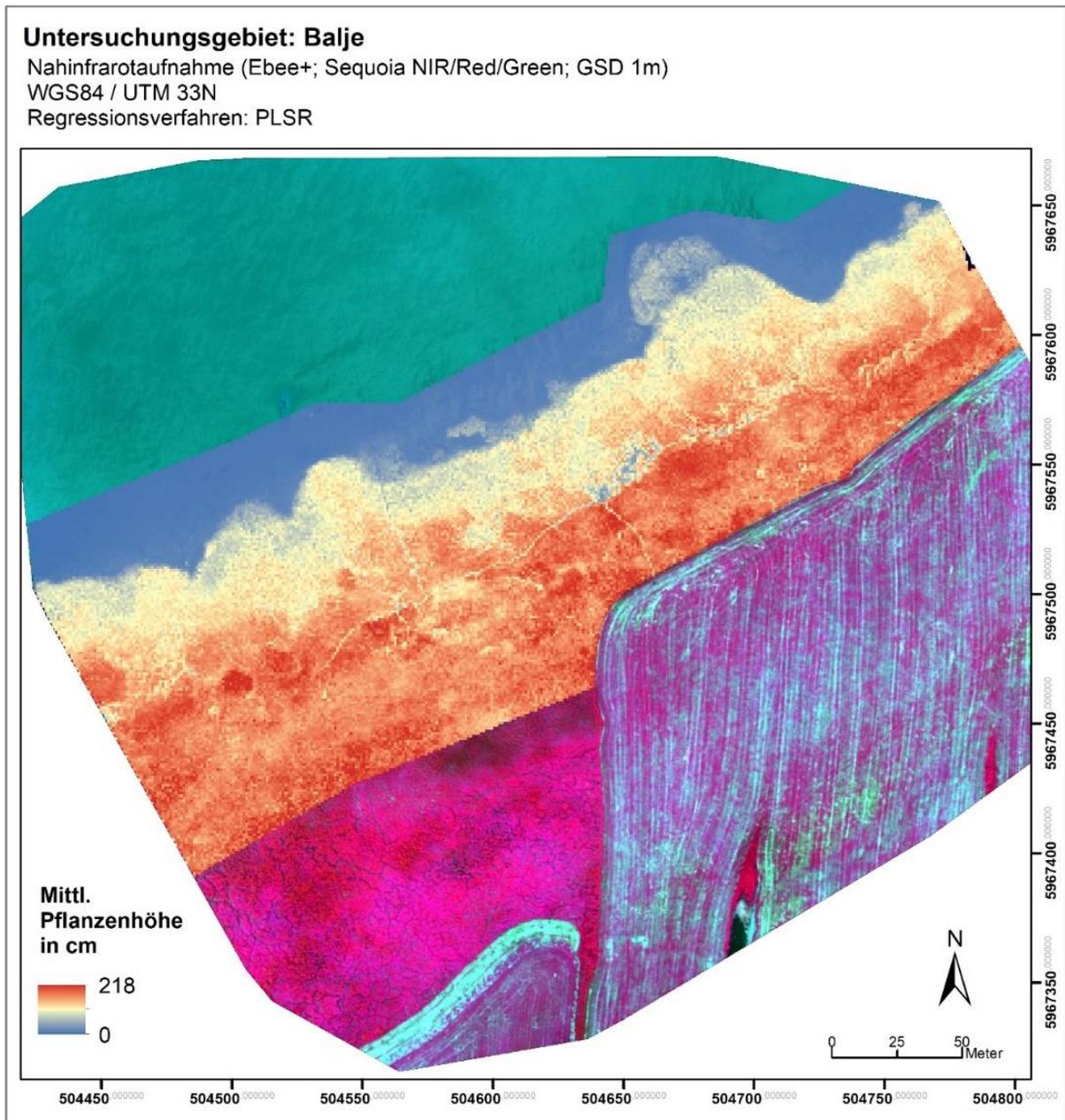


Abbildung 109: Modellierte mittlere Pflanzenhöhe mit Hilfe PLSR auf der Grundlage des multispektralen Datensatzes

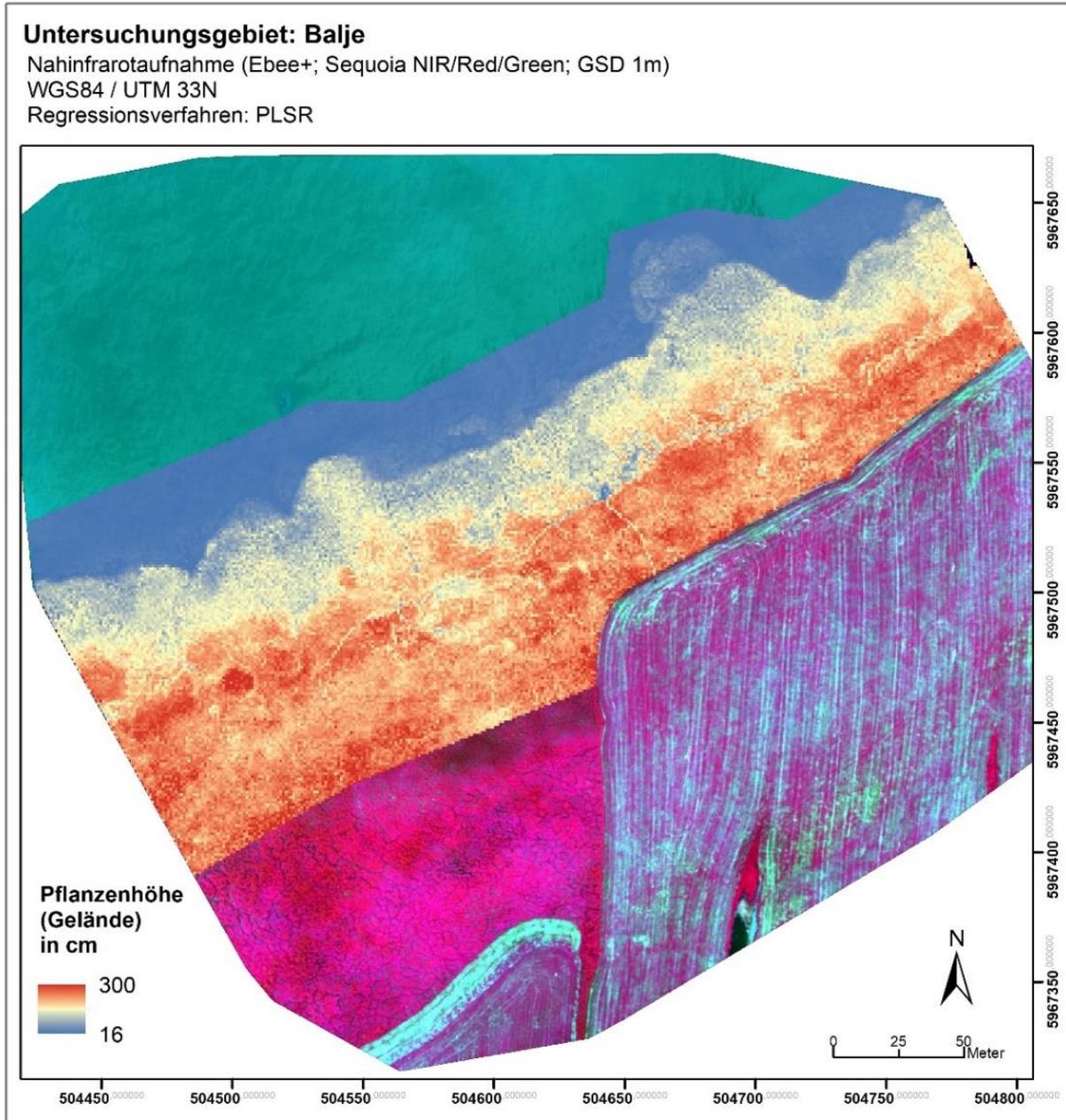


Abbildung 110: Modellierter Gelände- bzw. Vegetationsoberfläche mit Hilfe PLSR auf der Grundlage des multi-spektralen Datensatzes

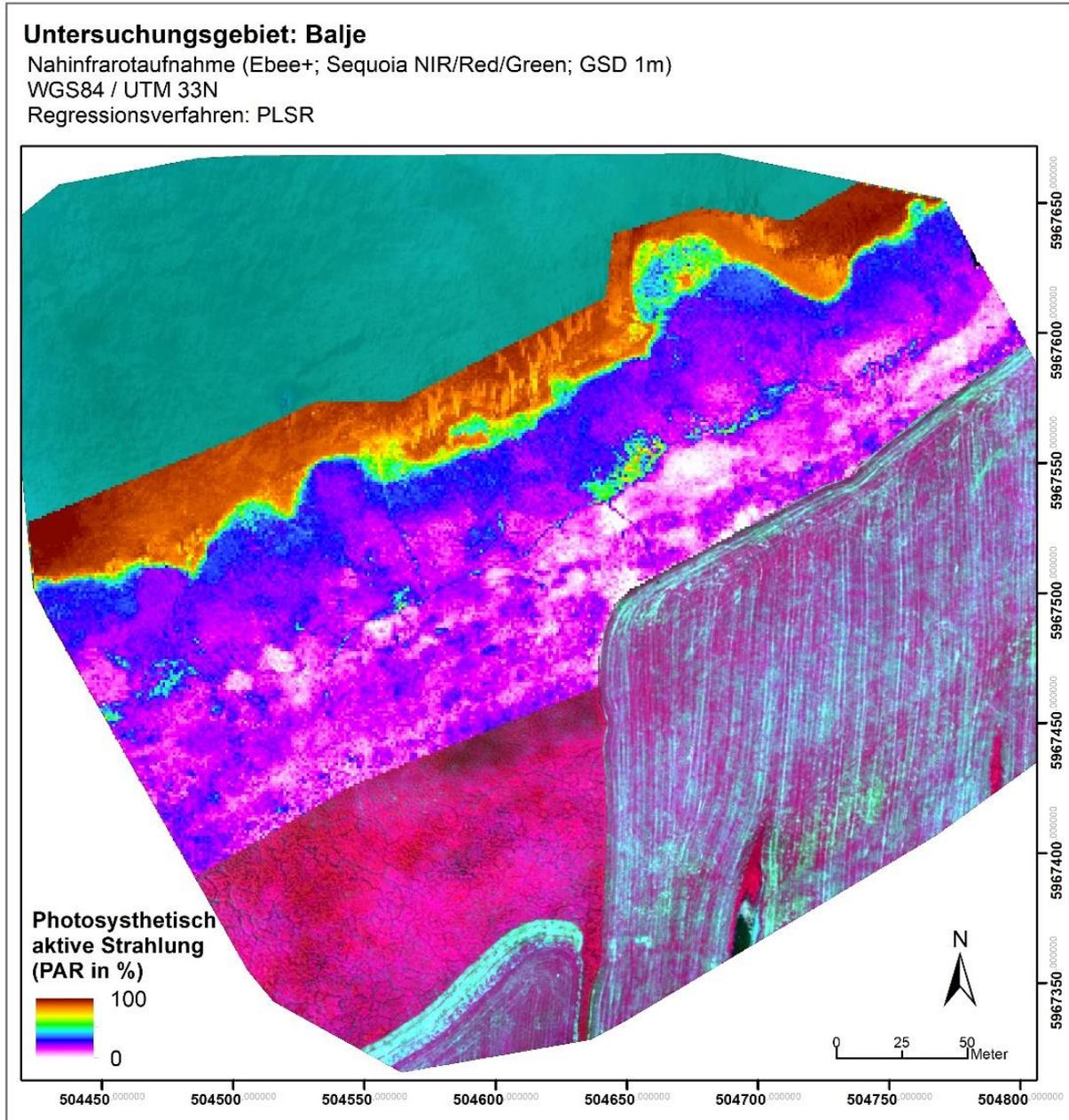


Abbildung 111: Modellierter Anteil der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) mit Hilfe PLSR auf der Grundlage des multispektralen Datensatzes

PLSR, Multisensoraler Datensatz mit 1m GSD (Blau + Sequoia + Thermal + DOM):

Im zweiten Abschnitt wurde nun ein experimenteller Ansatz gewählt, mit dem getestet wurde, ob man die betrachteten Parameter erstens verbessern kann. Des Weiteren wurden schwache Parameter auf ihre Stärke getestet, um die Sicherheit der räumlichen Aussagekraft zu erhöhen. Der multispektrale Datensatz wurde deswegen um weitere Variablen zu einem multisensoralen Datensatz erweitert (siehe Tabelle 12). Die Tabelle 14 zeigt, dass sämtliche R^2 -Werte gestiegen sind. Dies wird nochmal in Tabelle 15 deutlich, wo die Bestimmtheitsmaße beider Datensätze gegenübergestellt werden. Bis auf die Anzahl der Stängel, konnte eine zum Teil deutliche Verbesserung der PLSR-Modelle erreicht werden. Schon in der statistischen Betrachtung der gemessenen Parameter korreliert die Anzahl der Stängel mit keinem anderen Parameter. Die ohnehin schon robusten Ergebnisse der Pflanzenhöhe und der PAR-Werte sind nun noch robuster, aber auch die Geländehöhe und die

Trockenmasse sind auf einen akzeptablen Wert gestiegen. Besonders die Orthometrische Höhe fällt mit einer Verbesserung von 46 % ins Gewicht. Dies liegt sicher vor allem am Hinzufügen des DOM zum multisensoralen Datensatzes.

Tabelle 14: Zusammenfassung relevanter statistischer Parameter der PLSR auf der Grundlage des multisensoralen Datensatzes (n = Anzahl; μ = Mittelwert; σ = Standardabweichung; LV = latente Variablen; R^2 = Bestimmtheitsmaß; RMSE = Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme; cal = Training; val = Validierung; PAR = Photosynthetisch aktive Strahlung)

Parameter	n	μ	σ	LV	R^2	RMSE	R^2	RMSE
					cal	cal	val	Val
Anzahl Stängel	48	39,33	15,45	1	0,25	13,20	0,12	14,36
mittl. Durchmesser	48	5,45	1,31	2	0,36	1,03	0,21	1,15
mittl. Frischmasse	48	6,72	3,30	1	0,38	2,57	0,28	2,77
mittl. Pflanzenhöhe	48	107,34	41,35	4	0,88	14,31	0,84	16,49
mittl. Trockenmasse	48	2,91	2,24	4	0,65	1,32	0,54	1,51
Durchmesser Gelände	48	4,20	1,64	1	0,12	1,52	-0,01	1,63
Höhe Gelände	48	126,88	53,97	2	0,87	19,45	0,82	22,34
Orthometr. Höhe	48	1,08	0,47	3	0,86	0,18	0,82	0,20
PAR aussortiert	40	3,19	4,20	1	0,21	3,70	-0,02	4,18
PAR alle Werte	46	16,20	27,57	3	0,87	9,71	0,79	12,43

Dies ist Ausgangspunkt die in Tabelle 14 grün gekennzeichneten Parameter als PLSR-Modell und die Vorhersagekarten zu erstellen. Die Modelle in Abbildung 112 zeigen die Genauigkeitsverteilung der PLSR-Ergebnisse. Die Pflanzenhöhen und die orthometrische Höhe (Geländehöhe) können über die gesamte Spannweite gut modelliert werden. Besonders bei den höheren Werten der PAR-Werte und der Trockenmasse kommt es zu einer Unterschätzung.

In Abbildung 113 und Abbildung 114 werden die beiden Pflanzenhöhen dargestellt, die aus den Labor- und den Geländemessungen generiert wurden.

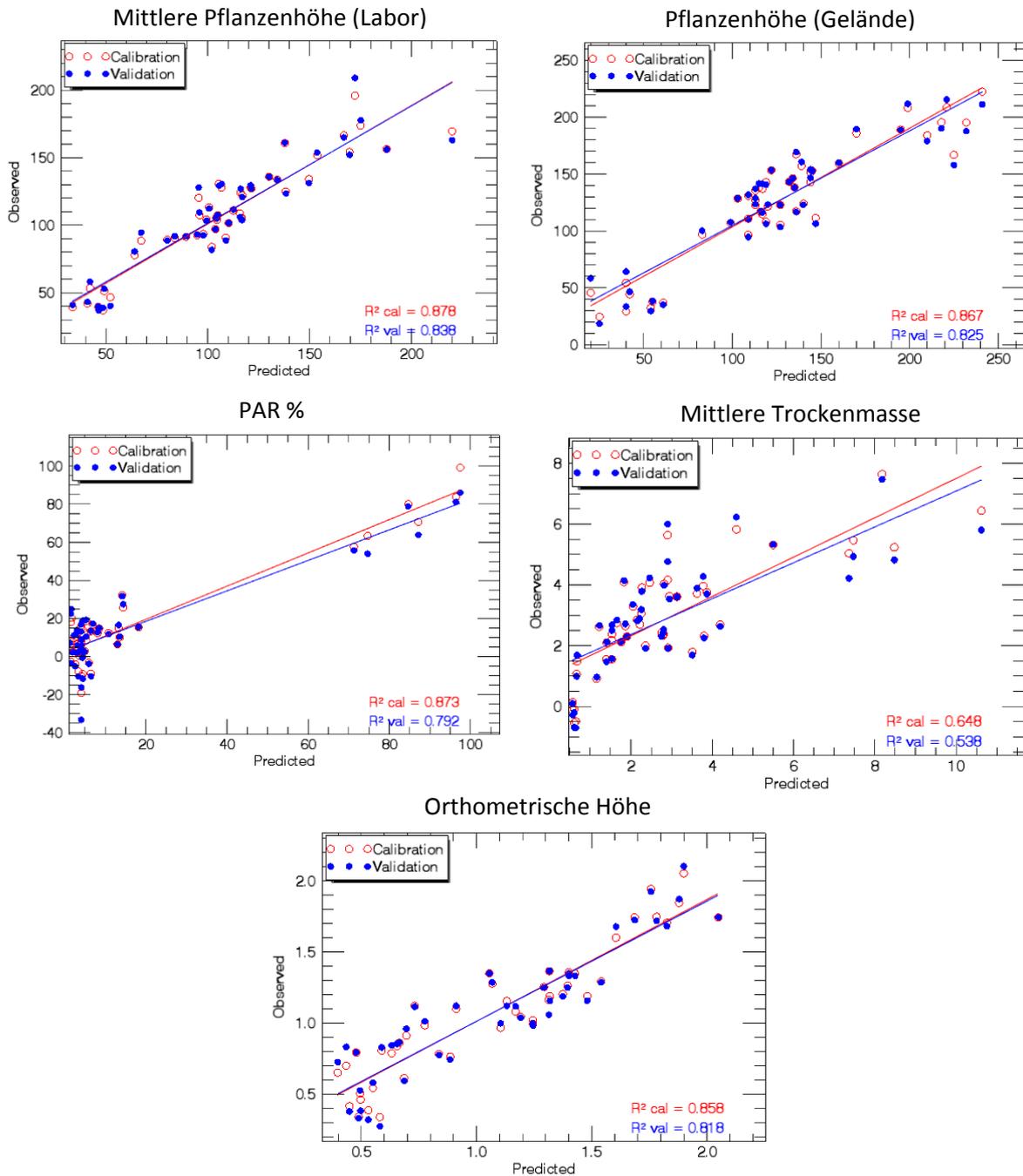


Abbildung 112: PLSR Modelle des multispektralen Datensatzes für ausgewählte Parameter

Untersuchungsgebiet: Balje

Nahinfrarotaufnahme (Ebee+; Sequoia NIR/Red/Green; GSD 1m)
 WGS84 / UTM 33N
 Regressionsverfahren: PLSR
 Ausgangsdatensatz: Multisensoraler Stack

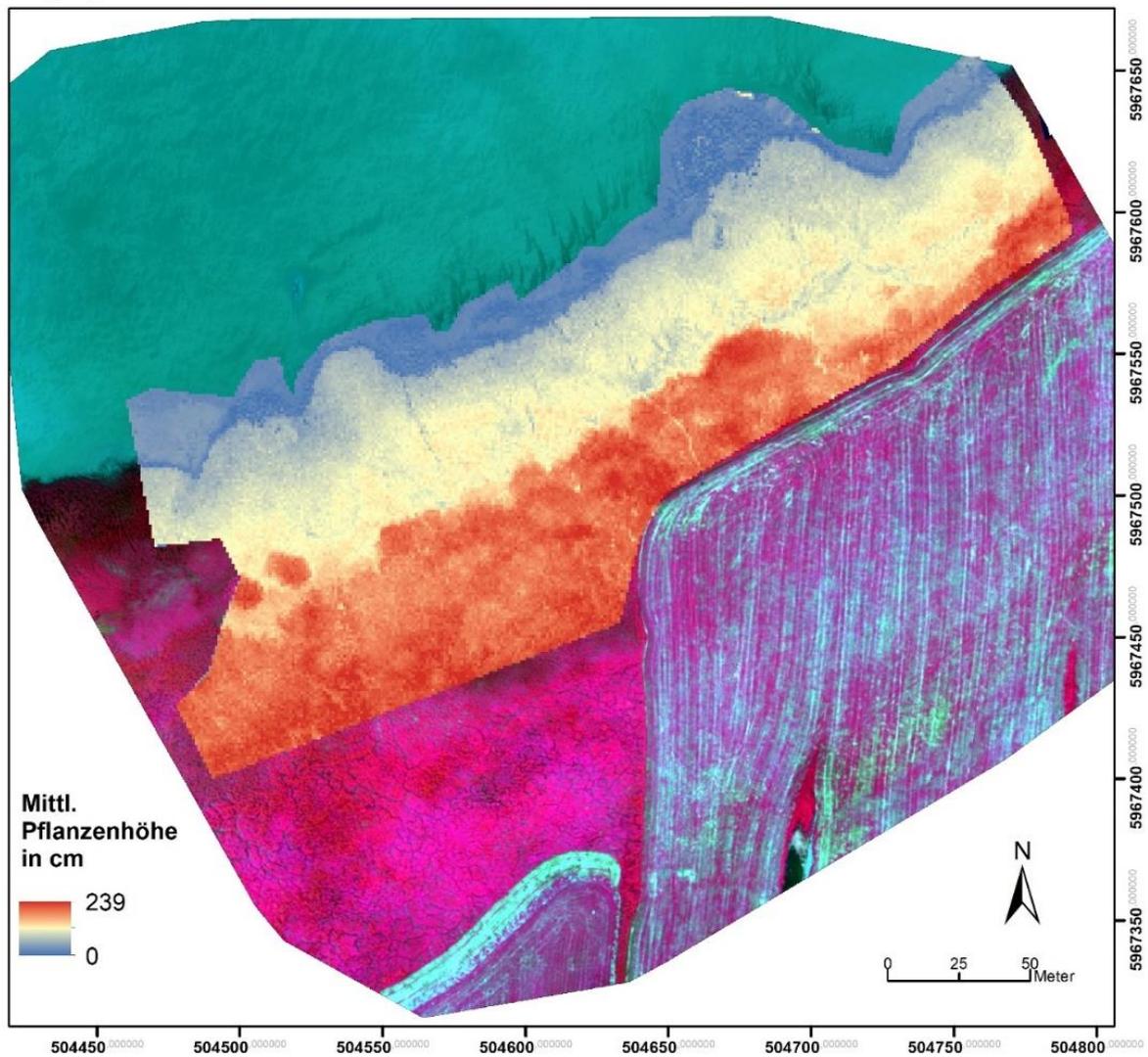


Abbildung 113: Vorhersagekarte der mittleren Pflanzhöhe mit Hilfe PLSR auf der Grundlage des multisensoralen Datensatzes

Untersuchungsgebiet: Balje

Nahinfrarotaufnahme (Ebee+; Sequoia NIR/Red/Green; GSD 1m)

WGS84 / UTM 33N

Regressionsverfahren: PLSR

Ausgangsdatensatz: Multisensoraler Stack

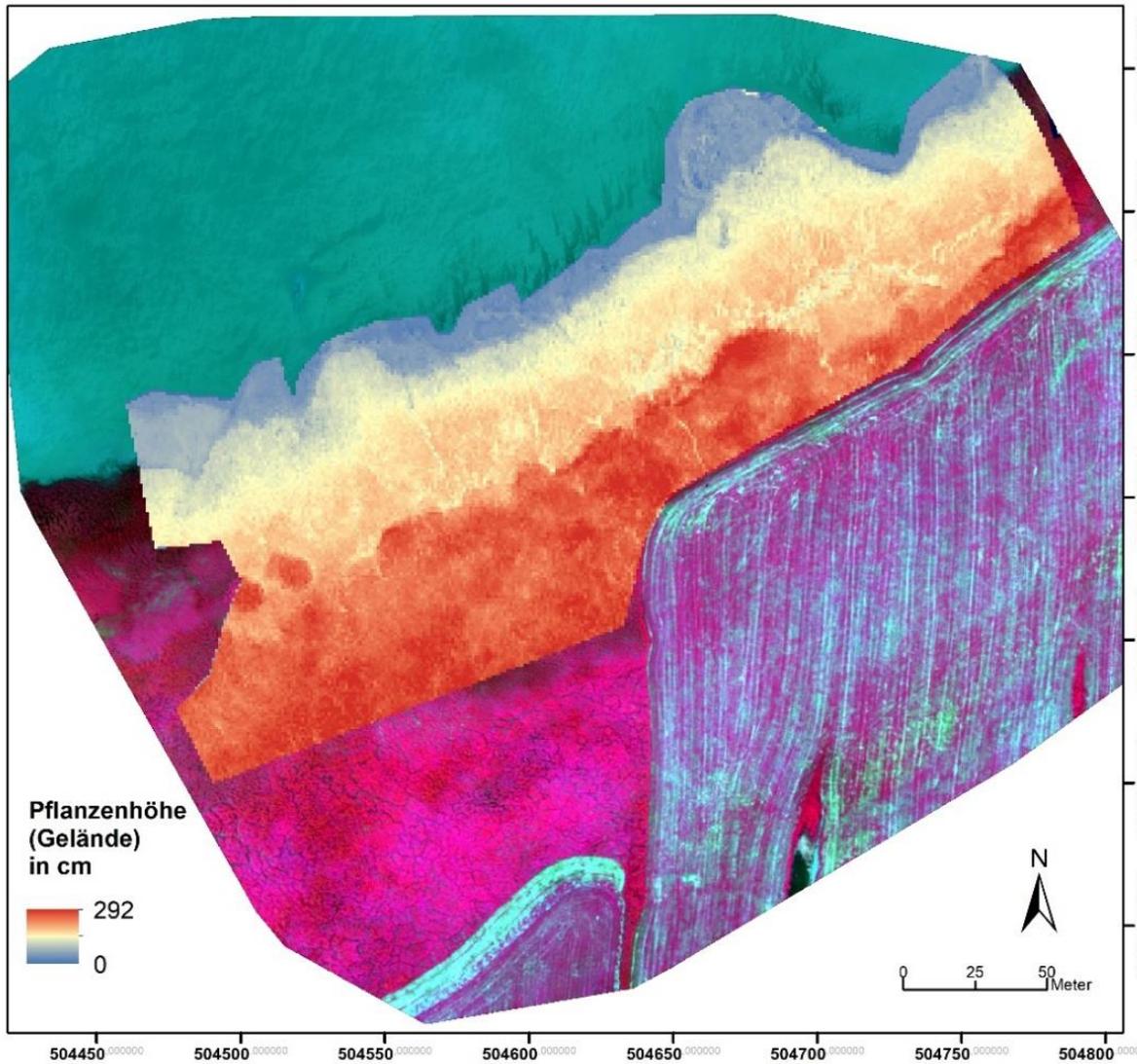


Abbildung 114: Vorhersagekarte der Vegetationsoberfläche mit Hilfe PLSR auf der Grundlage des multisensoralen Datensatzes

Untersuchungsgebiet: Balje

Nahinfrarotaufnahme (Ebee+; Sequoia NIR/Red/Green; GSD 1m)

WGS84 / UTM 33N

Regressionsverfahren: PLSR

Ausgangsdatensatz: Multisensoraler Stack

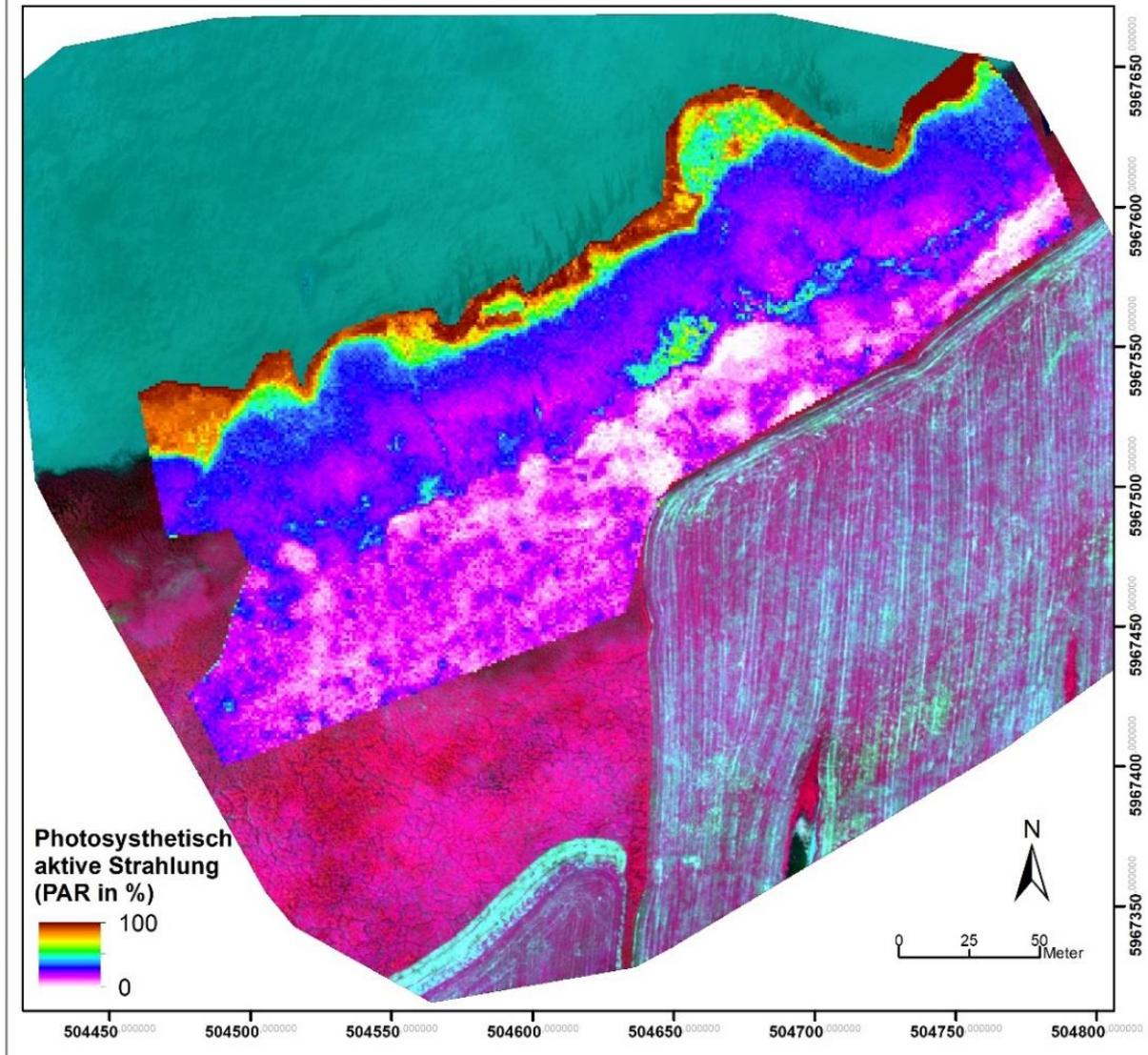


Abbildung 115: Vorhersagekarte des Anteils der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) mit Hilfe PLSR auf der Grundlage des multisensoralen Datensatzes

Untersuchungsgebiet: Balje

Nahinfrarotaufnahme (Ebee+; Sequoia NIR/Red/Green; GSD 1m)

WGS84 / UTM 33N

Regressionsverfahren: PLSR

Ausgangsdatensatz: Multisensoraler Stack

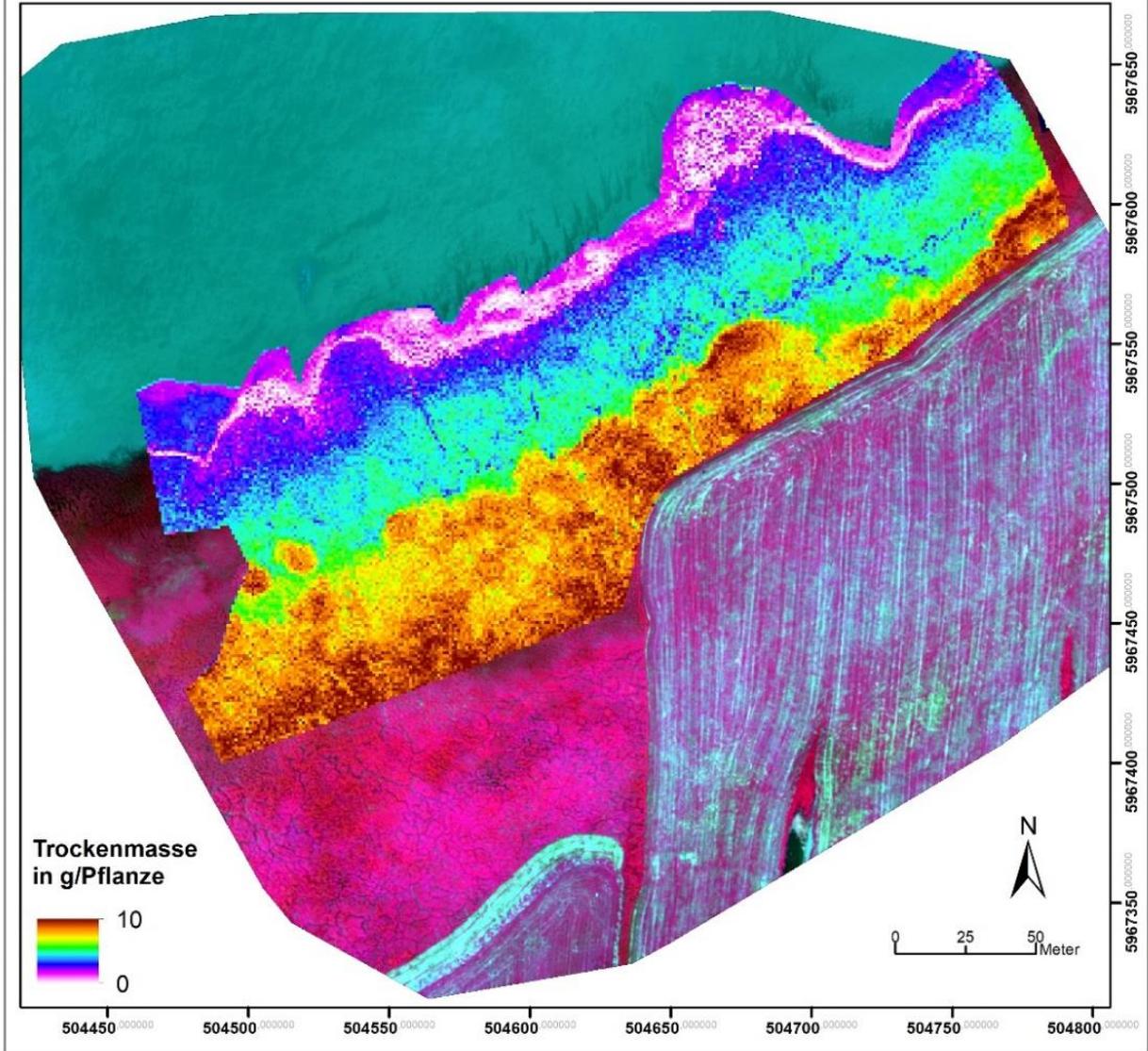


Abbildung 116: Vorhersagekarte der Trockenmasse in g/Pflanze mit Hilfe PLSR auf der Grundlage des multi-sensoralen Datensatzes

Untersuchungsgebiet: Balje

Nahinfrarotaufnahme (Ebee+; Sequoia NIR/Red/Green)
 WGS84 / UTM 33N
 Regressionsverfahren: PLSR
 Ausgangsdatensatz: Multitemporaler Stack

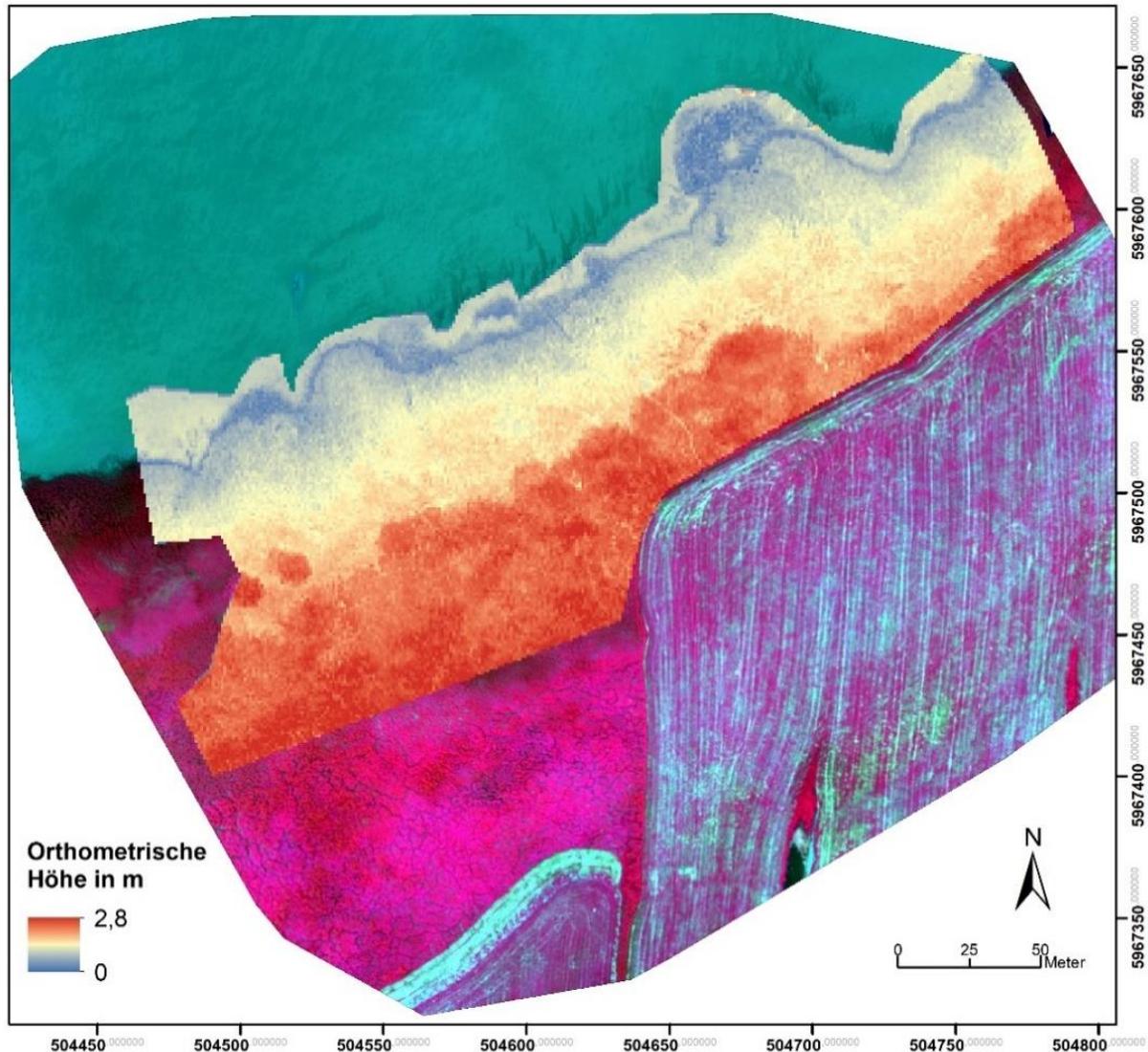


Abbildung 117: Vorhersagekarte der orthometrischen Höhe mit Hilfe PLSR auf der Grundlage des multisensoralen Datensatzes vom 11.8. am Standort Balje

Tabelle 15: Vergleich der PLSR Ergebnisse anhand des R^2 und der Vorhersagegenauigkeit RMSE für den rein multispektralen Ansatz und dem multisensoralen Ansatz.

PLSR auf Basis von:	Multispektraler Datensatz*		Multisensoraler Datensatz**		Differenz	
	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
	cal	cal	cal	cal	cal	cal
Anzahl Stängel	0.3	12.83	0.25	13.2	-0.05	+0.37
mittl. Durchmesser	0.13	1.2	0.36	1.03	0.23	-0.17

mittl. Frischmasse	0.34	2.64	0.38	2.57	0.04	-0.07
mittl. Pflanzenhöhe	0.66	23.9	0.88	14.31	0.22	-9.59
mittl. Trockenmasse	0.43	1.68	0.65	1.32	0.22	-0.36
Durchmesser Gelände	0.09	1.55	0.12	1.52	0.03	-0.03
Höhe Gelände	0.71	28.61	0.87	19.45	0.16	-9.16
Orthometr. Höhe	0.4	0.36	0.86	0.18	0.46	-0.18
PAR aussortiert	0.09	3.96	0.21	3.7	0.12	-0.26
PAR alle Werte	0.78	12.68	0.87	9.71	0.09	-2.97

* *EBee- Sequoia Sensor (G, R, NIR, Red Edge)*

** *EBee- Sequoia Sensor (G, R, NIR, Red Edge) + Blau, Thermal und DOM*

Im Folgenden werden sinnvolle Regressionsmodelle aus dem Kapitel der statistischen Analyse der Felddaten auf die Ergebnisse der PLSR angewendet. So können weitere Parameter auf die Untersuchungsfläche übertragen werden.

Da in der statistischen Auswertung eine gute Korrelation zwischen der Pflanzenhöhe und der Trockenmasse pro Pflanze gefunden wurde, wird dieses Regressionsmodell verwendet, um eine räumliche Vorhersage zu generieren. Die Pflanzenhöhen-Karte aus der PLSR wird als Grundlage genommen, um die Trockenmasse auf die Fläche zu übertragen. Abbildung 118 zeigt das Ergebnis der indirekten Ermittlung der Trockenmasse pro Pflanze in Gramm. Um nun die beiden Trockenmasse-Karten direkt aus der PLSR (Abbildung 116) und indirekt aus dem linearen Regressionsmodell (Abbildung 118) zu vergleichen, wurde eine Differenzkarte berechnet, die in Abbildung 119 dargestellt ist. Die Abweichungen sind besonders gering im Bereich des Schilfes. Dort beträgt der Fehler zwischen -1 bis 1 Gramm Trockenmasse. Die Teichsimsenbereiche sind etwas fehlerbehafteter, wobei die PLSR die Trockenmasse etwas höher geschätzt hat, weil die Differenzen im Mittel bei 1 bis 2 g pro Pflanze liegen.

Weiterhin wurde die PLSR-Karte der orthometrischen Höhe, also der Geländehöhe genutzt, um den Wassergehalt und die Stängeldurchmesser auf die gesamte Fläche zu übertragen. In Abschnitt der statistischen Auswertungen zeigte sich, dass diese beiden Parameter gut mit der orthometrischen Höhe korrelieren. Die Ergebnisse der Übertragung der linearen Modelle auf die PLSR-Karte der orthometrischen Höhe sind in Abbildung 120 und Abbildung 121 abgebildet.

Da die Variationen innerhalb der Dominanz-Bestände schwer erkennbar sind, wurde in Abbildung 122 ausschließlich der Verlauf der Stängeldurchmesser der Strandsimsen-Zone dargestellt. Es ist ein klarer Trend zu erkennen: Je näher die Stängel an der Maschkante sind, desto dicker sind sie. Dies bestätigt die bereits existierenden Ergebnisse von, die einen signifikanten Zusammenhang zwischen Stängeldurchmesser und Strömungsgeschwindigkeit (CARUS *et al.* 2016) bzw. Wellenexposition (SILINSKI *et al.* 2017) fanden.

Untersuchungsgebiet: Balje

Nahinfrarotaufnahme (Ebee+; Sequoia NIR/Red/Green; GSD 1m)

WGS84 / UTM 33N

Ausgangsdatensatz: Pflanzenhöhe(Gelände) aus der PLSR

Trockenmasse abgeleitet aus linearer Regression

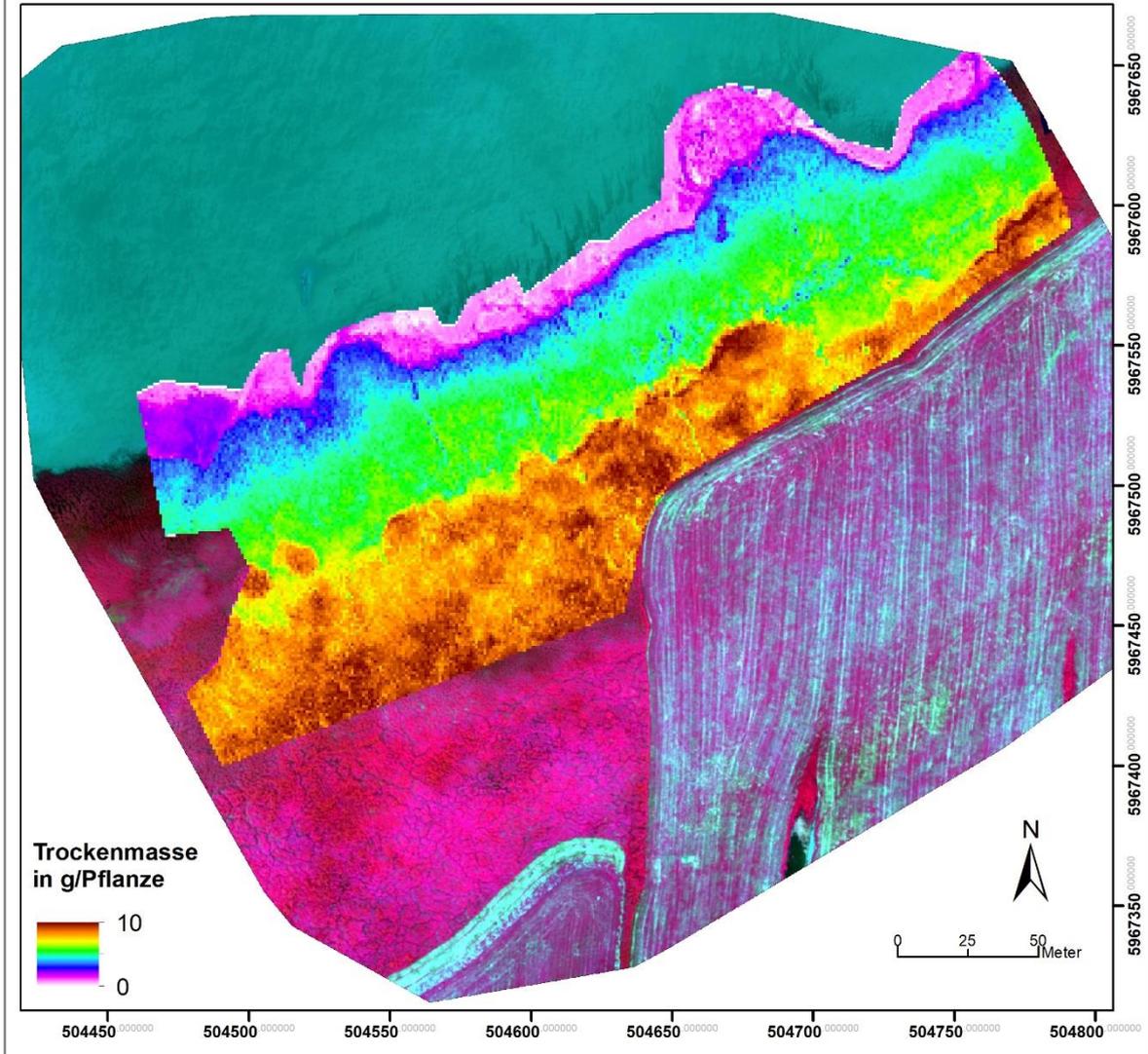


Abbildung 118: Vorhersagekarte der Trockenmasse in g/Pflanze indirekt abgeleitet aus der Pflanzenhöhe aus der PLSR und dem linearen Regressionsmodell der Pflanzenhöhe und der Trockenmasse.

Untersuchungsgebiet: Balje

Nahinfrarotaufnahme (Ebee+; Sequoia NIR/Red/Green; GSD 1m)

WGS84 / UTM 33N

Differenz zwischen PLSR_TM & LIN_TM

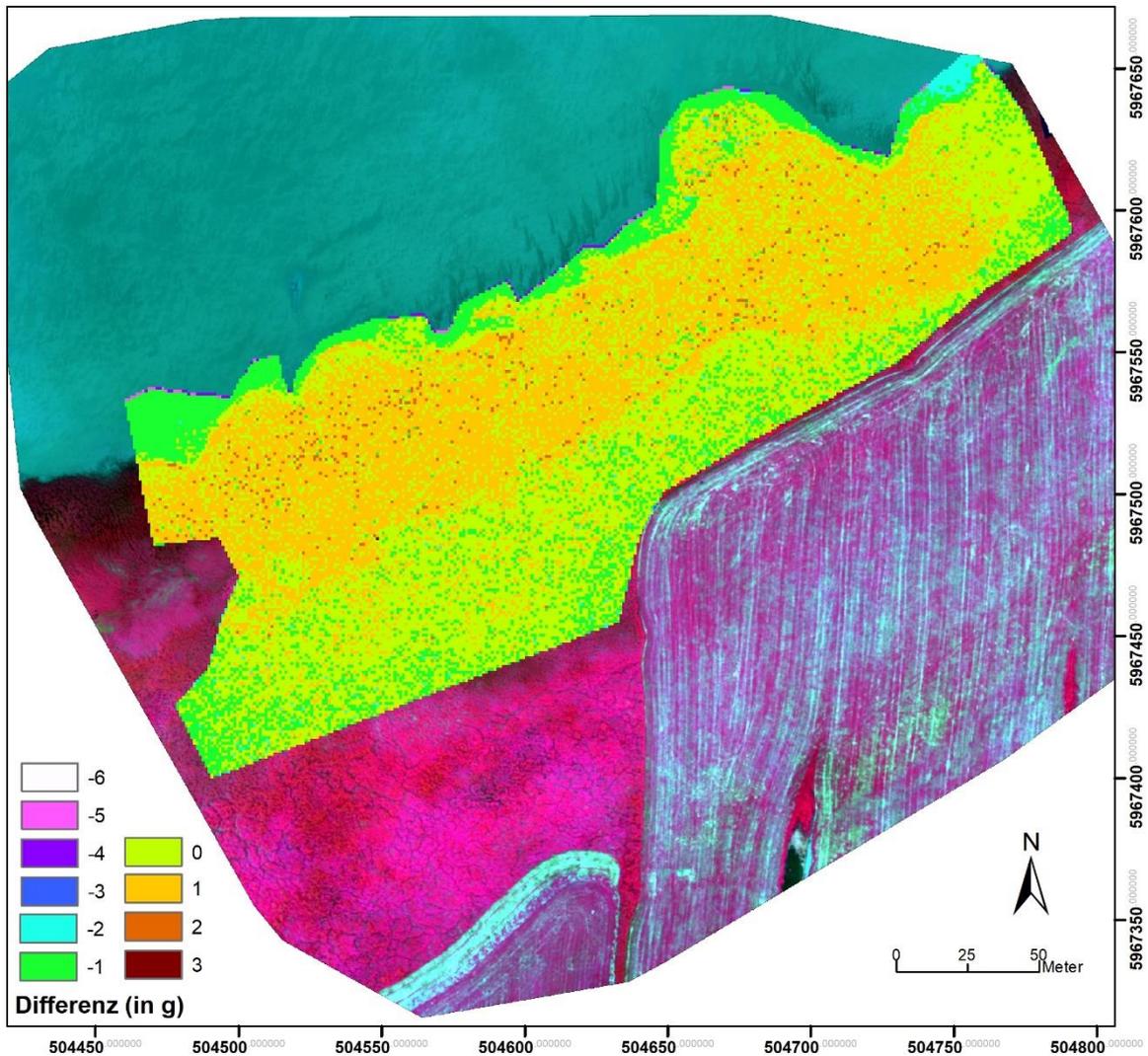


Abbildung 119: Differenz aus Vorhersagekarten der Trockenmasse (g/Pflanze) der PLSR und der indirekten Ableitung aus dem linearen Regressionsmodell.

Untersuchungsgebiet: Balje

Nahinfrarotaufnahme (Ebee+; Sequoia NIR/Red/Green; GSD 1m)

WGS84 / UTM 33N

Ausgangsdatensatz: Orthometrische Höhe aus der PLSR

Wassergehalt abgeleitet mit linearer Regression

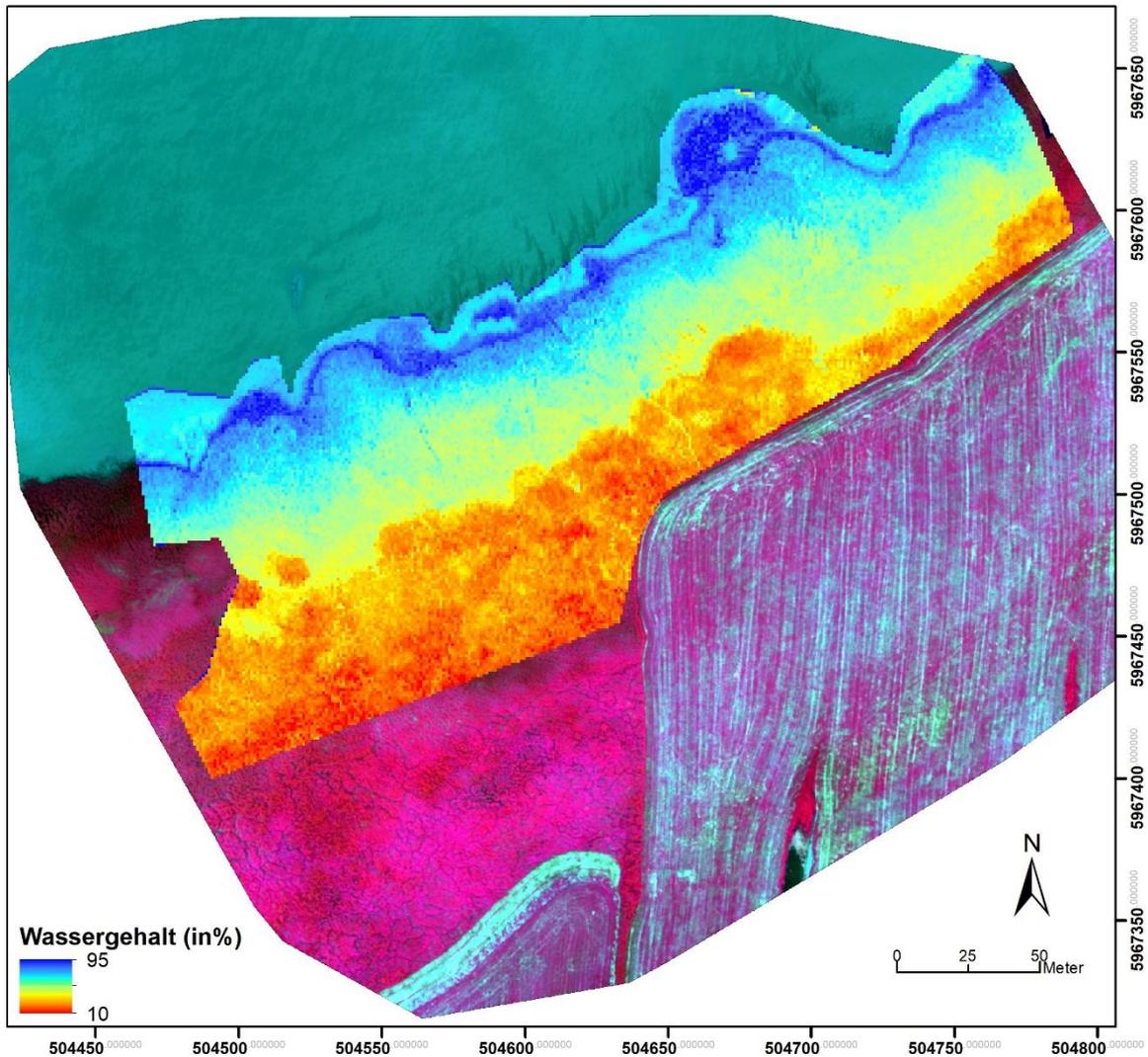


Abbildung 120: Variation des Wasserhalts der Pflanzen am Standort Balje unter Anwendung des linearen Regressionsmodells der orthometrische Höhe und Wassergehalt auf die PLSR-Karte der orthometrischen Höhe.

Untersuchungsgebiet: Balje

Nahinfrarotaufnahme (Ebee+; Sequoia NIR/Red/Green; GSD 1m)

WGS84 / UTM 33N

Ausgangsdatensatz: Orthometrische Höhe aus der PLSR

Stängeldurchmesser abgeleitet mit linearer Regression

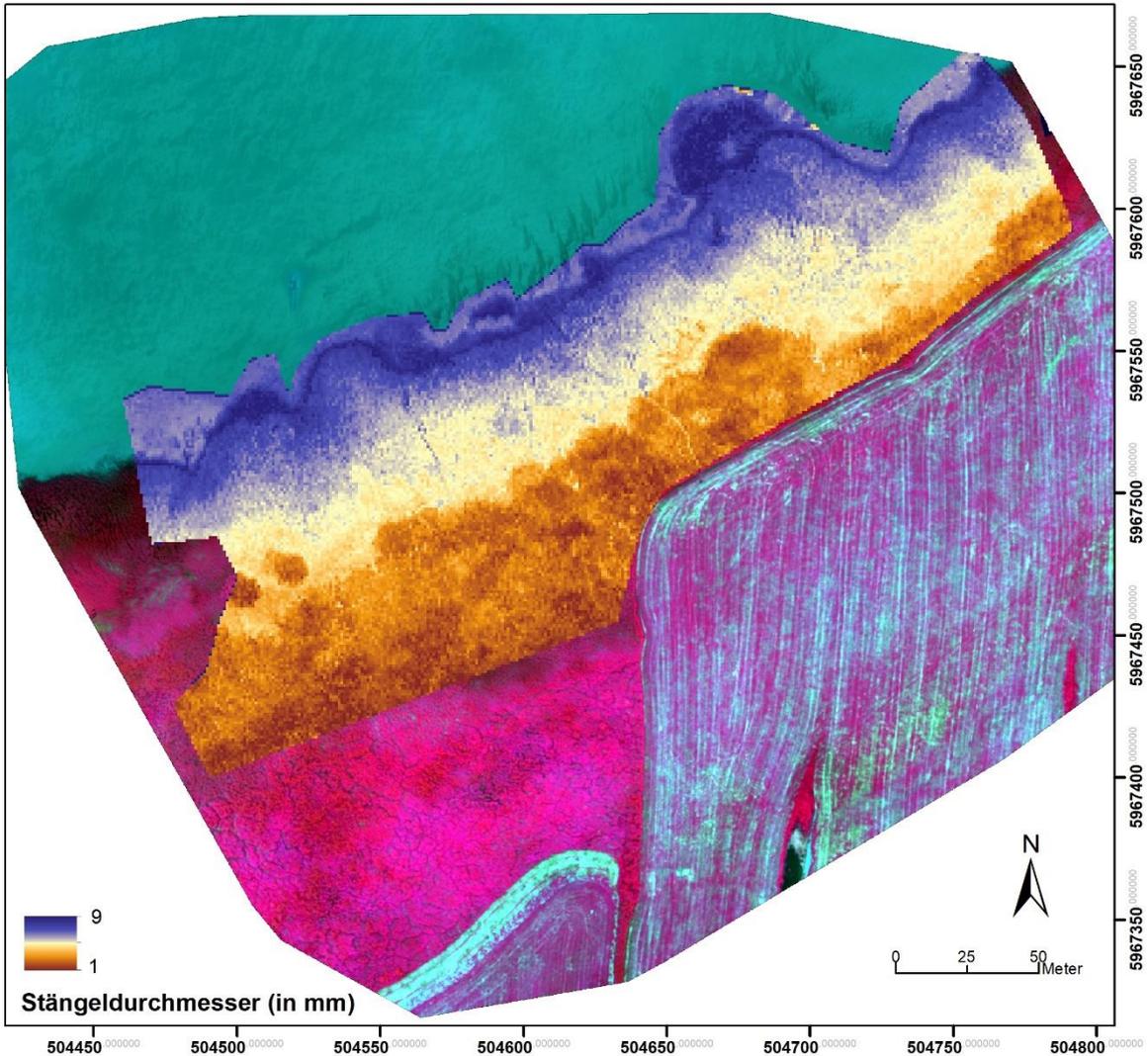


Abbildung 121: Variation der Stängeldurchmesser der Pflanzen am Standort Balje unter Anwendung des linearen Regressionsmodells der orthometrische Höhe und der Stängeldurchmesser auf die PLSR-Karte der orthometrischen Höhe.

Untersuchungsgebiet: Balje

Nahinfrarotaufnahme (Ebee+; Sequoia NIR/Red/Green)

WGS84 / UTM 33N

Regression zwischen Orthometrischer Höhe und Stängeldurchmesser für Strandbinse

$r = -0,81$, $r^2 = 0,77$

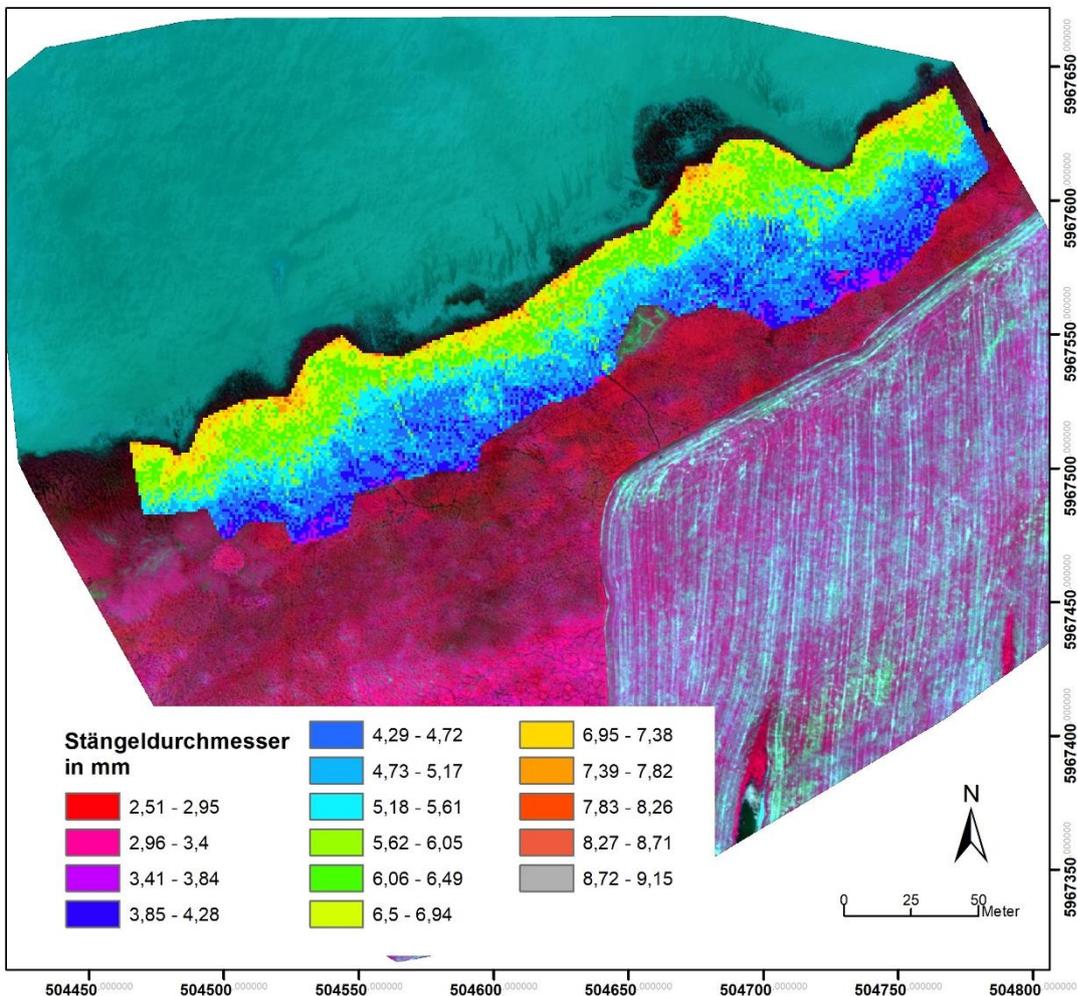


Abbildung 122: Variation der Stängeldurchmesser der Strandsimsen am Standort Balje.

3.7.2 Hollerwettern

Aufgrund der positiven Ergebnisse von Balje wurde der multisensorale Datensatz auch für Hollerwettern erstellt und auf dessen Basis die PLSR durchgeführt. Tabelle 16 listet die Ergebnisse der PLSR für Hollerwettern auf. Die Ergebnisse unterscheiden sich jedoch von denen des Standortes Balje. Beispielweise konnte kein stabiles Regressionsmodell für die Trockenmasse pro Pflanze erreicht werden. Die Parameter Pflanzenhöhe im Gelände, die Orthometrische Höhe und die PAR-Werte zeigen allerdings wieder ein hohes Bestimmtheitsmaß. Diesmal wurde auch der Wassergehalt berechnet und als PLSR-Modell gerechnet. Dieser zeigt, wie in der Statistik schon, eine hohe Vorhersagegenauigkeit ($R^2 = 0.83$). Wie schon in den statistischen Betrachtungen ist die Anzahl der Stängel kein geeigneter Wert zur Erklärung der gemessenen Parameter und kann auch nicht mithilfe des multisensoralen Datensatzes und der PLSR modelliert werden. Dadurch ist auch keine Hochrechnung der Biomasse auf den Quadratmeter möglich.

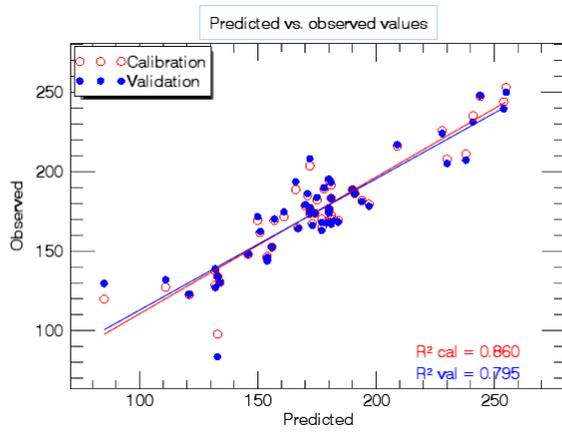
Tabelle 16: Zusammenfassung relevanter statistischer Parameter der PLSR auf der Grundlage des multisensoralen Datensatzes für den Standort Hollerwettern (n = Anzahl; μ = Mittelwert; σ = Standardabweichung; LV = latente Variablen; R^2 = Bestimmtheitsmaß; RMSE = Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme; cal = Training; val = Validierung; PAR = Photosynthetisch aktive Strahlung)

Parameter	n	μ	σ	LV	R^2	RMSE	R^2	RMSE
					cal	cal	val	val
Anzahl Stängel	50	39,80	9,53	1	0,06	9,13	-0,11	9,94
Anzahl Stängel pro QM	50	186,25	59,55	1	0,06	57,07	-0,11	62,13
mittl. Durchmesser	50	7,12	1,93	2	0,52	1,32	0,39	1,49
mittl. Frischmasse	50	14,44	6,13	2	0,08	5,81	-0,15	6,51
mittl. Höhe	50	128,93	28,42	1	0,41	21,69	0,27	29,95
mittl. Trockenmasse	50	4,00	2,14	1	0,24	1,85	0,08	2,03
Frische Biomasse g/QM	50	2619,78	1065,58	7	0,36	841,38	0,06	1023,18
Trockene Biomasse g/QM	50	716,33	345,07	1	0,21	304,37	0,06	331,33
Durchmesser Gelände	50	6,79	1,67	3	0,38	1,29	0,19	1,48
Pflanzhöhe Gelände	50	175,06	35,69	4	0,86	13,20	0,79	15,99
Orthometr. Höhe	50	0,89	0,43	5	0,94	0,10	0,92	0,12
PAR	50	11,48	14,26	3	0,75	7,02	0,68	7,97
PAR nur Pflanze	50	92,31	164,16	3	0,43	122,33	0,23	142,59
Wassergehalt (%)	50	27,51	7,86	5	0,83	3,19	0,73	4,02

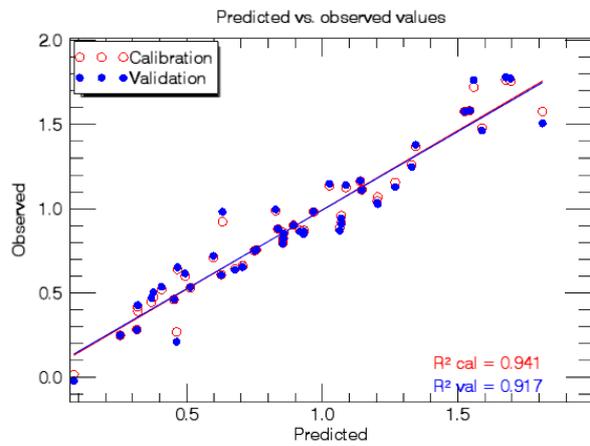
Abbildung 123 zeigt die PLSR-Modelle, die auch für die Flächenvorhersage genutzt wurden. Die Punktverteilung der beobachteten (observed) und vorhergesagten (predicted) für die orthometrische Höhe ist sehr uniform und im Sinne der Statistik gut verteilt. Die drei anderen Parameter Pflanzhöhe, PAR und Wassergehalt zeigen eine „Klumpung“. Besonders bei den PAR-Messungen wird dies deutlich. Dort scheint der niedrige Wertebereich gut abgedeckt zu sein. Jedoch ist der hohe Wertebereich nur durch sehr wenige Punkte repräsentiert, was die Vorhersagegenauigkeit der PAR-Werte stark reduziert. Beim Wassergehalt kommt es bei den hohen Werten zu einer Überschätzung und bei den niedrigen Werten zu einer leichten Unterschätzung. In beiden Fällen ist die Begründung bei der Festlegung an Messpunkten zu suchen. Die große Mehrheit der Messungen fand im Bereich der Strandsimse statt. Nur wenige Messungen fanden in den Bereichen des Schilfs und der Teichsimse statt.

In Abbildung 124 - Abbildung 127 sind die Vorhersagekarten der vier Parameter dargestellt.

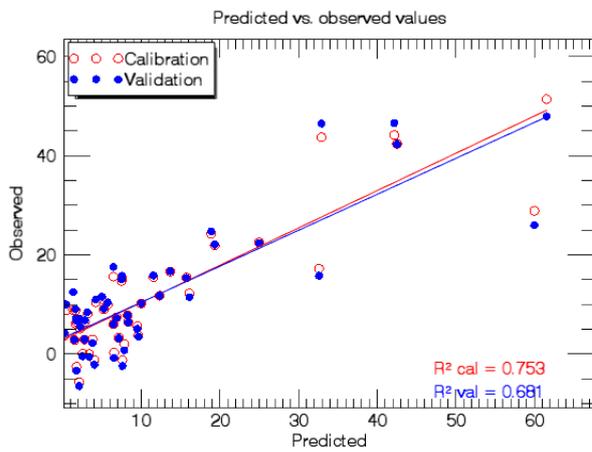
Pflanzenhöhe in cm



Orthometrische Höhe in m



PAR



Wassergehalt

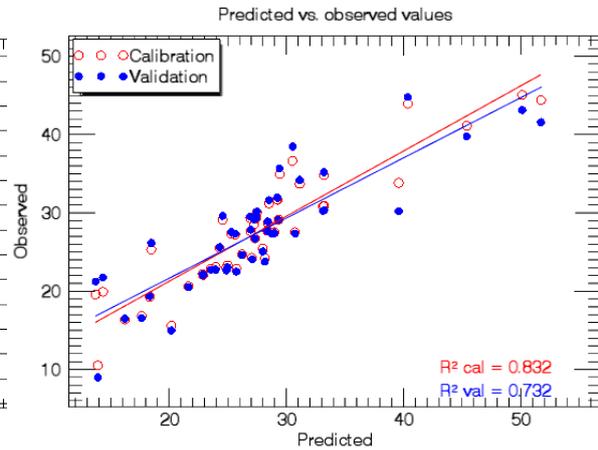


Abbildung 123: PLSR Modelle des multispektralen Datensatzes für ausgewählte Parameter

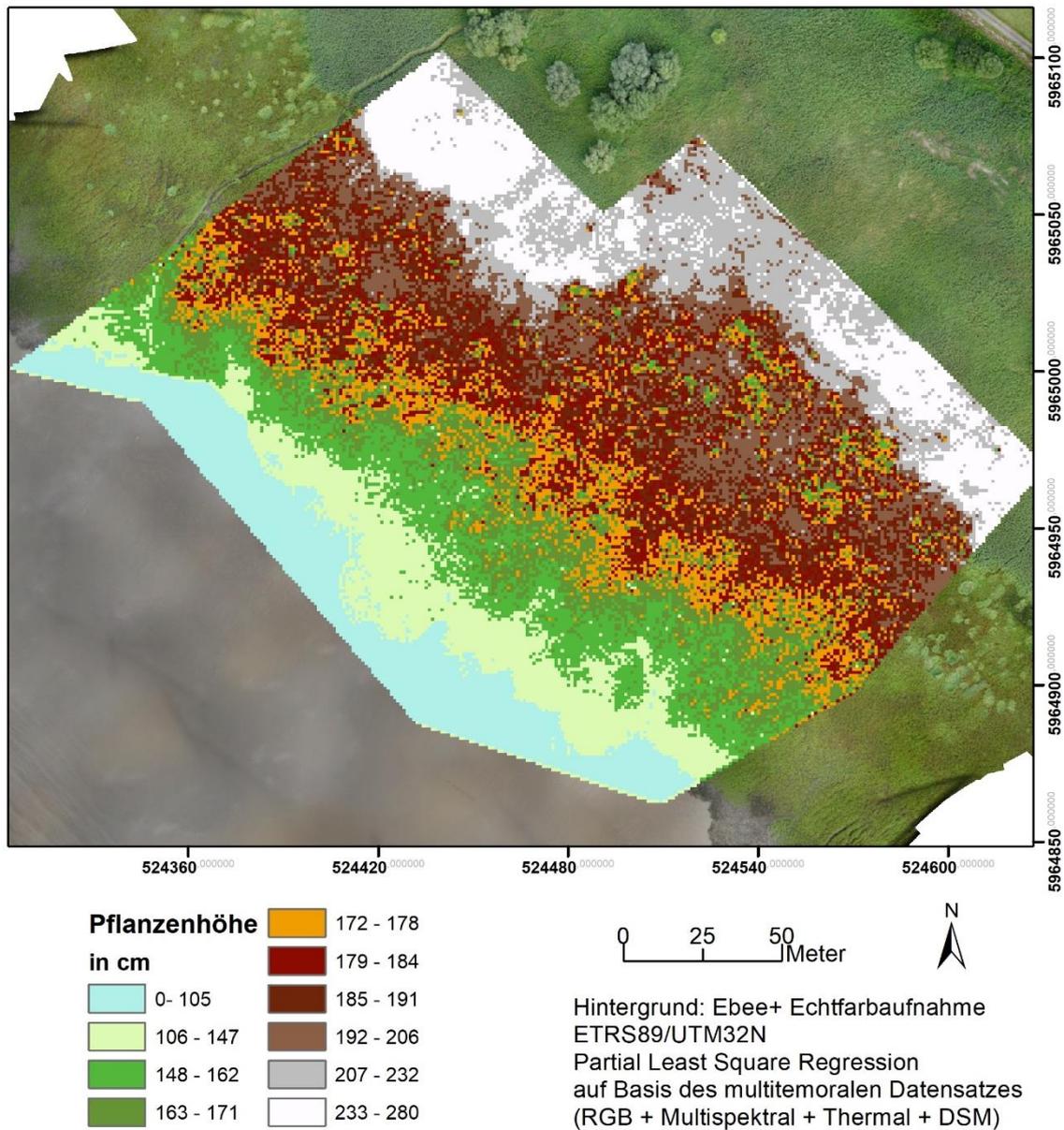


Abbildung 124: Modellierung der Pflanzhöhe am 10.8.2017 (gemessen im Gelände) mit Hilfe der PLSR auf der Grundlage des multisensoralen Datensatzes für den Standort Hollerwettern.

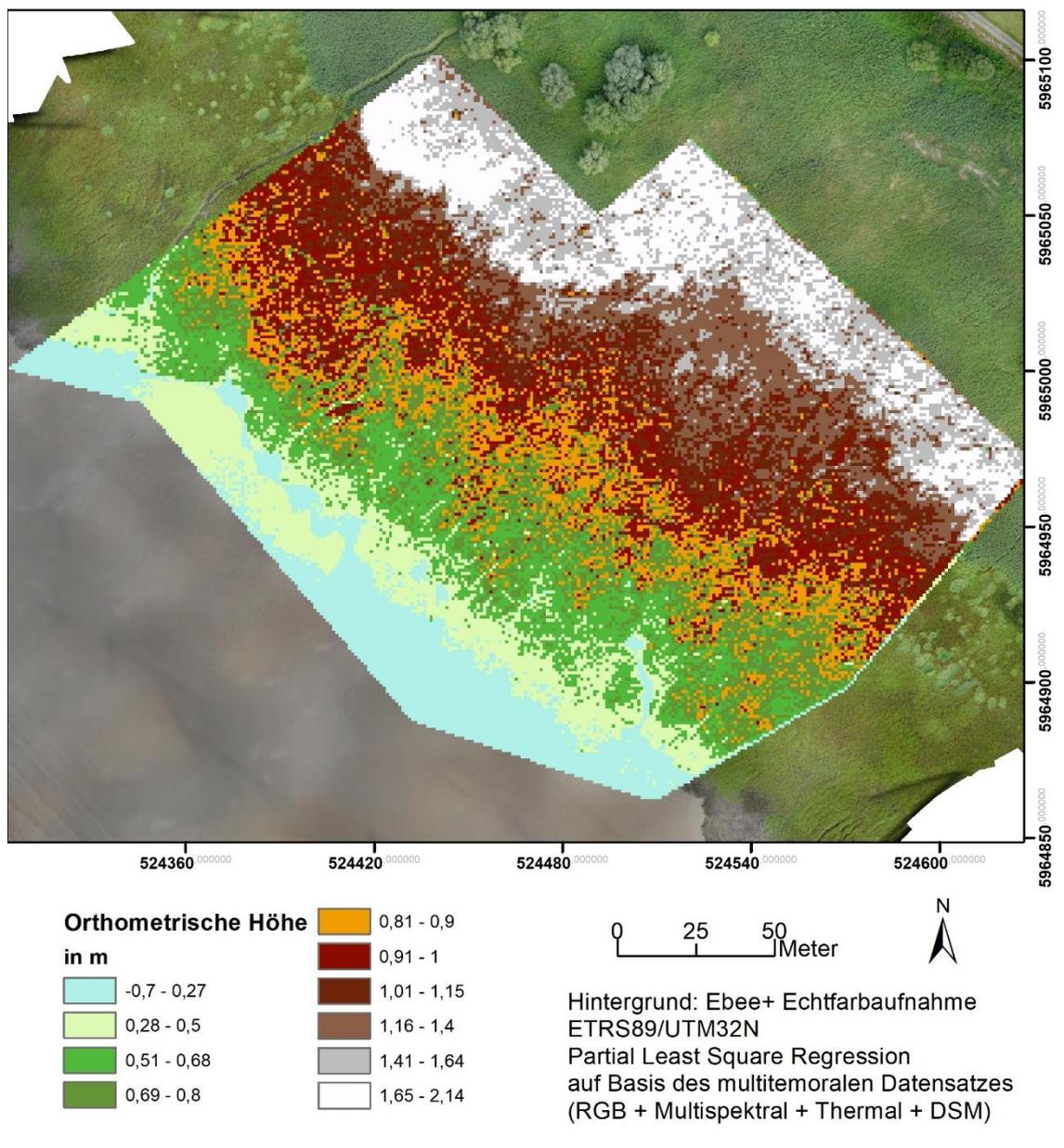
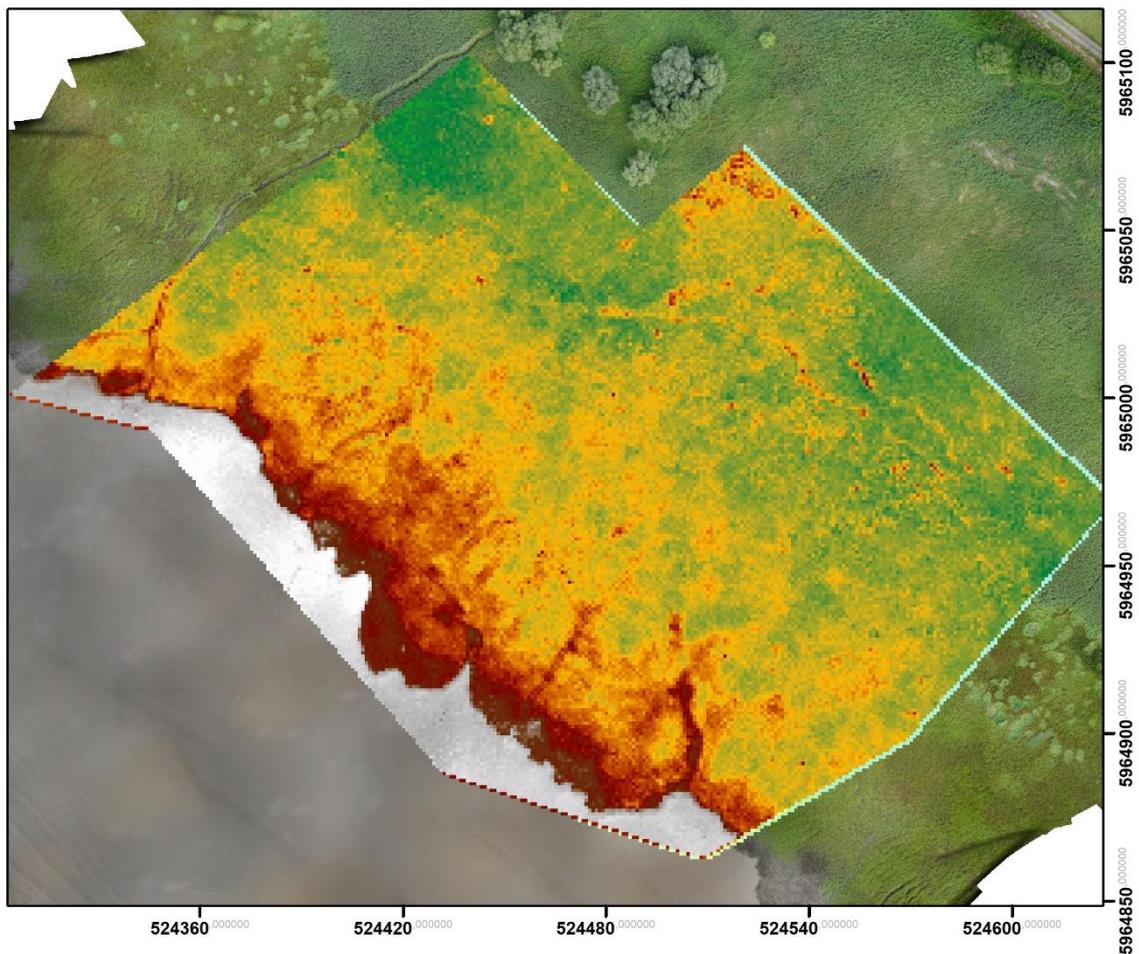
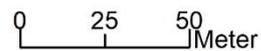
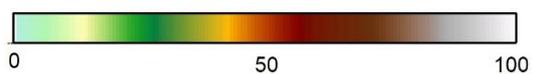


Abbildung 125: Modellierung der orthometrischen Höhe mit Hilfe der PLSR auf der Grundlage des multisensorialen Datensatzes für den Standort Hollerwettern



Photosynthetisch aktive Strahlung (PAR)
in %



Hintergrund: Ebee+ Echtfarbaufnahme
ETRS89/UTM32N
Partial Least Square Regression
auf Basis des multitemoralen Datensatzes
(RGB + Multispektral + Thermal + DSM)

Abbildung 126: Vorhersagekarte des Anteils der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) am 10.8.2017 mit Hilfe der PLSR auf der Grundlage des multisensoralen Datensatzes für den Standort Hollerwettern

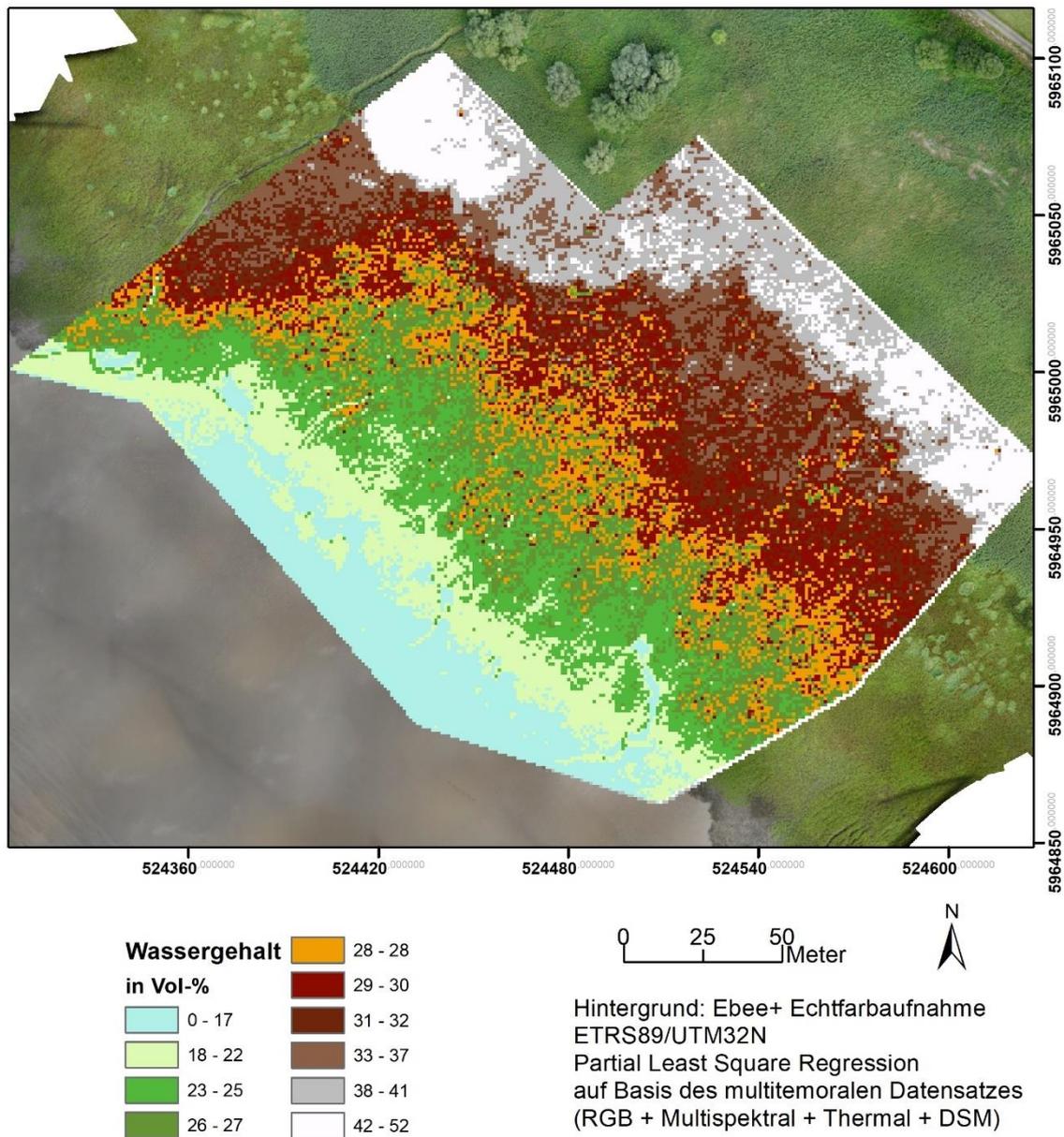


Abbildung 127: Modellierter Wassergehalt der Pflanzen am 25.09. mit Hilfe der PLSR auf der Grundlage des multisensoralen Datensatzes für den Standort Hollerwettern

3.7.3 Krautsand

Auch für Krautsand wurde der multisensorale Datensatz aus hochaufgelösten RGB-, Multispektral- und Thermal-Daten erstellt um diesen mithilfe einer PLSR mit den Geländeparametern zu verknüpfen. Wie an obiger Stelle bereits erklärt, wurden in Krautsand keine Frisch- und Trockenmassebestimmungen für die geernteten Pflanzen durchgeführt. Nur die Parameter aus dem Gelände wurden daher in die Betrachtung mit einbezogen. Dies umfasst die Anzahl der Stängel auf 0,16 m², die Pflanzenhöhe im Gelände und im Labor, die Geländehöhe (orthometrische Höhe), die Stängeldurchmesser, sowie die PAR-Werte. Die Tabelle 17 fasst die Ergebnisse der PLSR-Berechnungen für alle Parameter zusammen. Die Ergebnisse bestätigen die bisherigen Betrachtungen insofern, dass die Pflanzenhöhe, gemessen im Gelände, und die orthometrische Höhe gute statistische Zusammenhänge mit

den Werten des multisensoralen Datensatzes zeigen und somit auch auf die gesamte Fläche übertragen werden können. Da Krautsand ausschließlich aus einer dominanten Strandsimsen-Zone besteht, zeigt sich auch im PLSR-Modell (Abbildung 128) eine Clusterbildung in den hohen Werten. Die niedrigen Pflanzen sind von der Anzahl der aufgenommenen Punkte im Gelände unterrepräsentiert und somit verringert sich auch die Vorhersagegenauigkeit. Auch in Abbildung 129 ist eine ähnliche Clusterbildung zu erkennen, jedoch ist der Höhenunterschied des Geländes in Krautsand vom Ufer zum Wasser auch deutlich geringer, verglichen mit den beiden Untersuchungsgebieten Balje und Hollerwetter. Nichtsdestotrotz ist das Modell mit einem R^2 von 0,84 robust und valide. Diese beiden Modelle wurden im Anschluss auch auf die Fläche übertragen und sind in Abbildung 130 und Abbildung 131 dargestellt.

Tabelle 17: Zusammenfassung relevanter statistischer Parameter der PLSR auf der Grundlage des multisensoralen Datensatzes für den Standort Krautsand (n = Anzahl; μ = Mittelwert; σ = Standardabweichung; LV = latente Variablen; R^2 = Bestimmtheitsmaß; RMSE = Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme; cal = Training; val = Validierung; PAR = Photosynthetisch aktive Strahlung)

Parameter	n	μ	σ	LV	R^2		RMSE	
					cal	cal	val	val
Anzahl Stängel	48	30,60	10,70	1	0,08	10,15	-0,06	10,90
Anzahl Stängel pro QM	48	191,28	66,87	1	0,08	63,46	-0,06	68,15
mittl. Höhe	48	137,10	16,37	2	0,55	10,84	0,45	12,01
Mittl. Durchmesser	48	4,52	1,13	2	0,30	0,94	0,16	1,03
Höhe Gelände	48	167,63	18,92	2	0,61	11,67	0,50	13,24
Orthometr. Höhe	48	1,45	0,16	2	0,84	0,06	0,81	0,07
PAR	48	8,47	7,58	1	0,26	6,47	0,15	6,91
PAR nur Pflanze	48	78,13	75,27	2	0,42	56,79	0,26	64,06

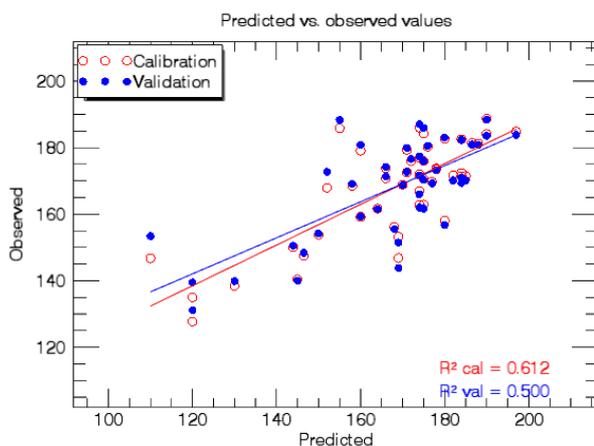


Abbildung 128: PLSR-Validierung-Pflanzenhöhe, Standort Krautsand

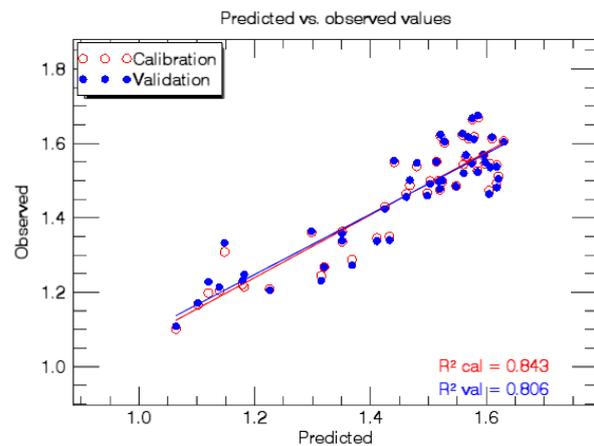


Abbildung 129: PLSR-Validierung-Orthometrische Höhe, Standort Krautsand

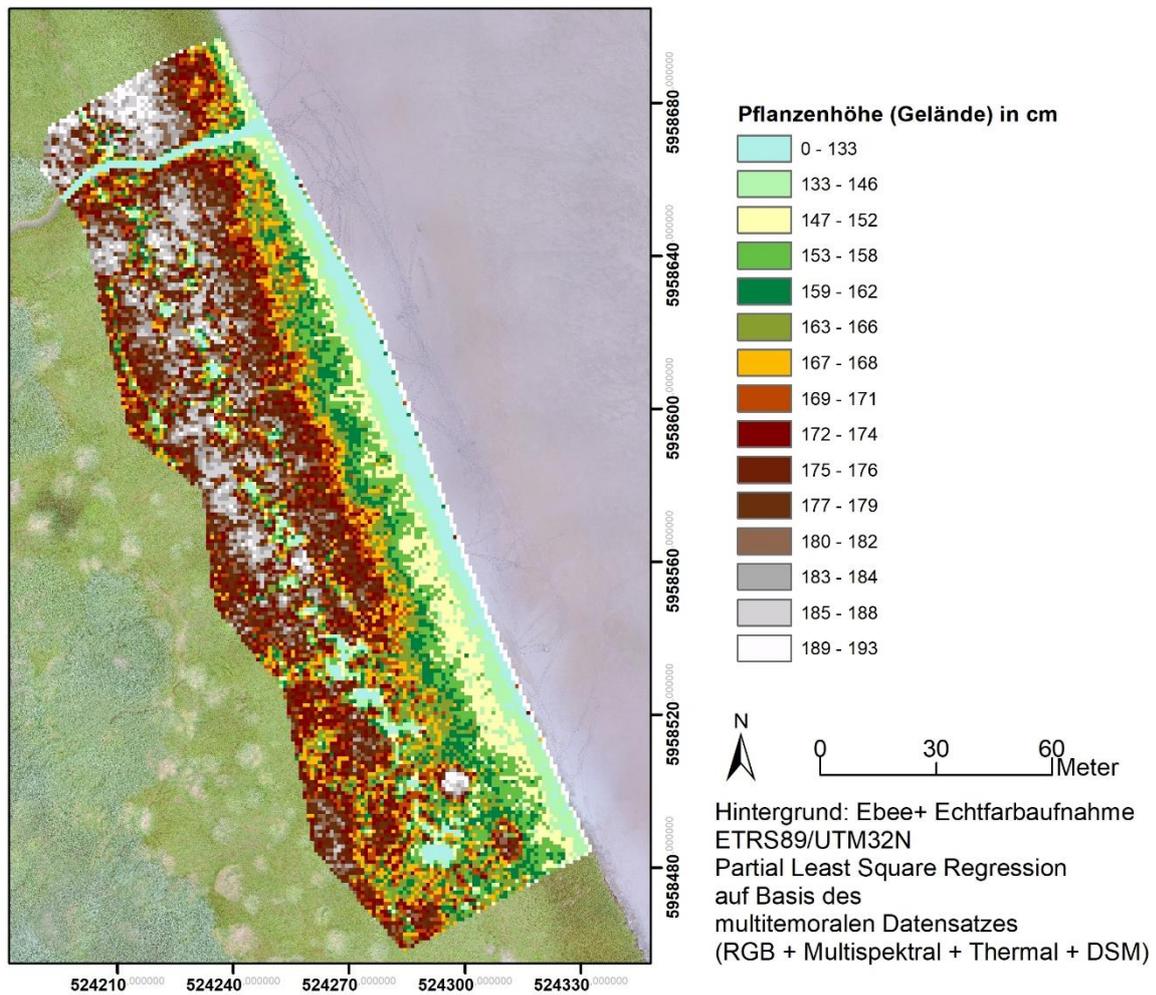


Abbildung 130: Modellierte Pflanzenhöhe am 08.08.2017 (gemessen im Gelände) mit Hilfe der PLSR auf der Grundlage des multisensoralen Datensatzes für den Standort Krautsand.

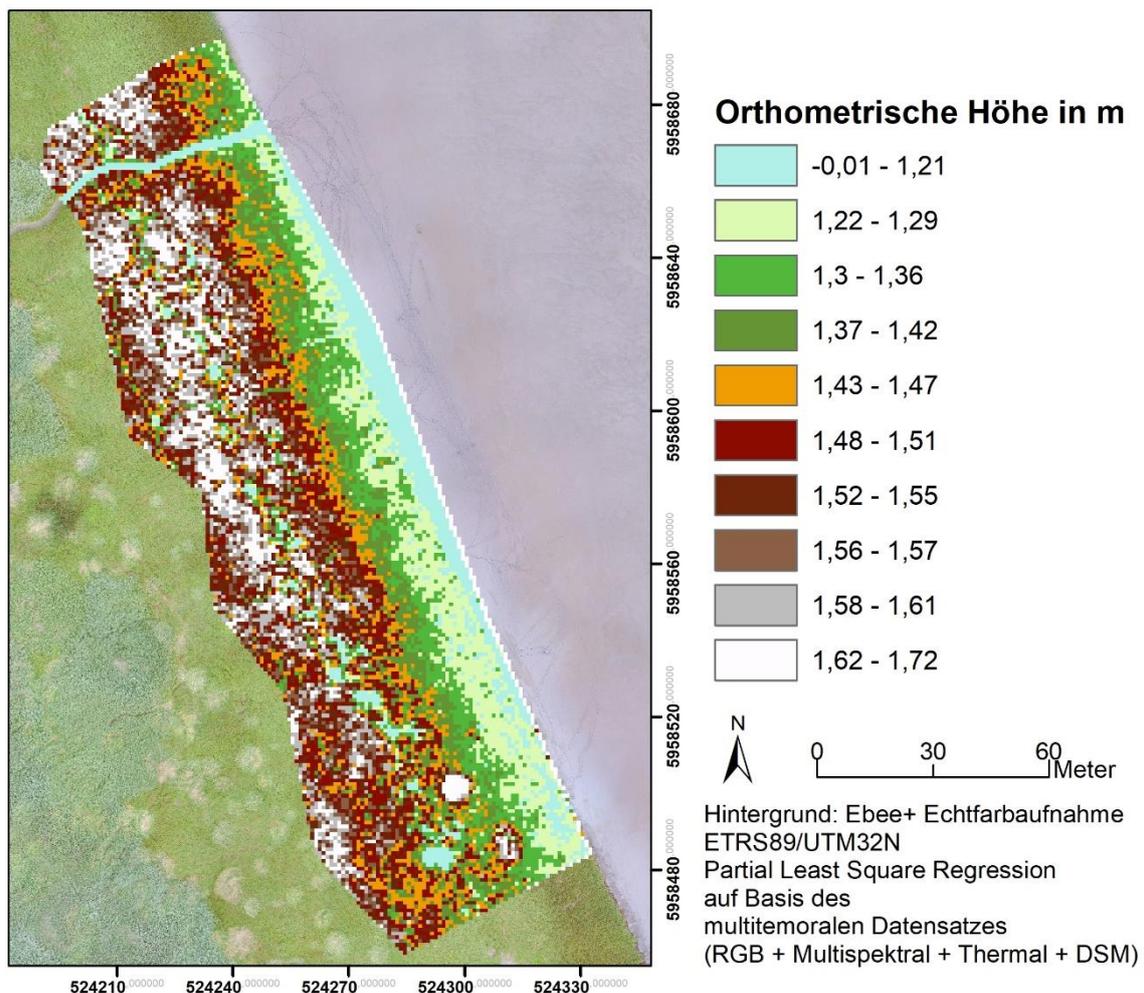


Abbildung 131: Modellierte orthometrischen Höhe mit Hilfe der PLSR auf der Grundlage des multisensoralen Datensatzes für den Standort Krautsand.

3.8 Veränderung der Vegetationstruktur im Übergang Sommer-Herbst

Im Zuge von notwendig gewordenen Nachmessungen und ergänzenden Untersuchungen stehen für die Standorte Balje und Hollerwettern an zwei Terminen Geländemessungen und parallel erhobene fernerkundliche Daten zur Verfügung. Diese können miteinander verglichen werden, um das Ausmaß der Veränderung der Vegetation zu erfassen und im Hinblick auf das Ökosystem zu bewerten. Die im nachfolgenden vorgestellten Untersuchungen konzentrieren sich auf zwei Aspekte, die exemplarisch für Balje bzw. Hollerwettern vorgestellt werden. Zum einen auf die Untersuchung und Erfassung der Seneszenz der Strandsimen mit Hilfe eines Vegetationsindex und der Pflanzenhöhe am Beispiel Balje und zum anderen die Beschreibung und Visualisierung der Veränderung der Vegetationsstruktur in Hollerwettern mit Hilfe verschiedener Visualisierungsmethoden.

3.8.1 Balje

Im Zeitraum vom 08.08. bis zum 12.09., also circa in einem Monat hat sich die Landschaft am Standort Balje signifikant geändert. Die Veränderungen sind zum ersten qualitativ aus dem visuellen Vergleich der beiden RGB-Luftbilder sehr gut zu erkennen. Zum zweiten lassen sich auch quantitative Aussagen der Pflanzenvitalität / Bedeckungsgrad vitaler Pflanzen über den Vergleich eines Vegeta-

tionsindex ableiten. Zum dritten liefern auch die aus den UAS-Daten abgeleiteten Oberflächenmodelle wertvolle Informationen über die Veränderungen der Pflanzenhöhe und damit über den möglichen hydraulischen Widerstand der Pflanzen.

- Die Strandsimsen sind im September in der Seneszenz befindlich, d. h. die Blätter und Pflanzen verfärben sich braun. Teilweise sind auch die Stängel schon verfault und liegen am Boden. Die Seneszenz verläuft allerdings nicht gleichmäßig, sondern nesterweise, vgl. Abbildung 132 und Abbildung 133.
- Die Teichsimsen und der sie umgebende grünen Algenmatten hingegen sind noch vital und grün
- Die Rinnenstrukturen sind durch den Rückgang der Vegetation deutlicher zu erkennen, vgl. Abbildung 133.
- Das Schilf an der Kante zum Wasser hin ist ins Lager gegangen, d. h. die Pflanzen wurden wahrscheinlich durch ein Hochwasser / Sturm oder einer Kombination aus beidem umgeknickt. In der Summe hat sich der Schilfgürtel mit stehendem Schilf um 5-10 m landwärts verlagert, vgl. Abbildung 135
- Ähnlich wie die Strandsimsen beginnt die Seneszenz bei den Schilfbeständen. Allerdings noch nicht in dem Umfang, was auch durch die durchwegs höheren Werte des aus den RGB-Daten gewonnenen Vegetationsindex (VARI) verdeutlicht wird, vgl. Abbildung 138.
- Die Veränderung der Pflanzenvitalität geht nicht unbedingt mit einer Veränderung der Pflanzenhöhe einher. Diese folgt einem anderen Rhythmus, da die seneszierende Pflanze zuerst nur wenig an Höhe verliert und dann plötzlich z. B. durch ein Hochwasser oder andere äußere Einflüsse abknickt und zum Liegen kommt, bzw. weggeschwemmt wird, vgl. VAN IERSEL ET AL., 2016.

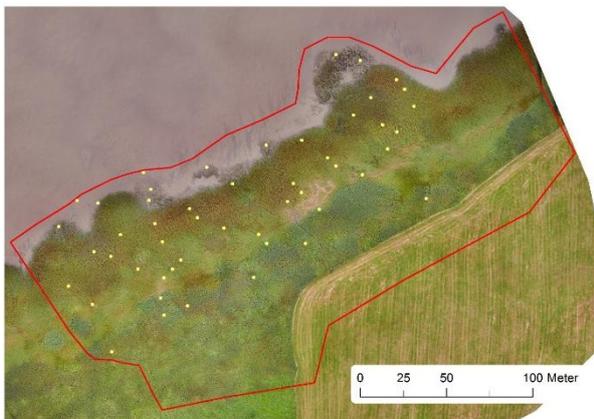


Abbildung 132: Digitales Orthophoto aus Senkrechtaufnahmen des UAS-Bildflugs mit Ebee RGB-Kamera vom 11.8.2017, GSD: 1.5 cm, Witterungsbedingungen gleichmäßig bewölkter Himmel. In Gelb dargestellt, Messpunkte der Referenzuntersuchungen



Abbildung 133: Digitales Orthophoto aus Schrägaufnahmen des UAS-Bildflugs mit Phantom 4 RGB-Kamera vom 12.9.2017, GSD: 2 cm, Witterungsbedingungen sonnig, teilweise bewölkter Himmel

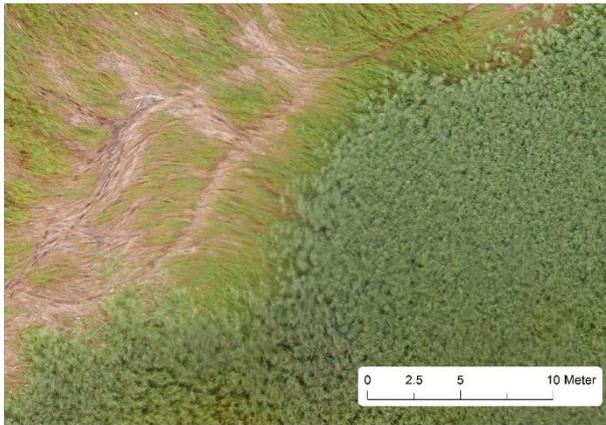


Abbildung 134: Ausschnitt aus dem digitalen Orthophoto der Senkrechtaufnahmen des UAS-Bildflugs mit Ebee RGB-Kamera vom 11.8.2017, GSD: 1.5 cm.



Abbildung 135: Ausschnitt aus dem digitalen Orthophoto der Schrägaufnahmen des UAS-Bildflugs mit Phantom 4 RGB-Kamera vom 12.9.2017, GSD: 2 cm.

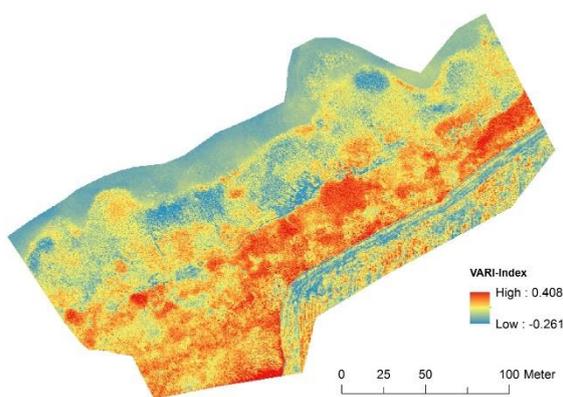


Abbildung 136: Vegetationsindex VARI, abgeleitet aus Ebee RGB-Befliegung vom 11.8.2017

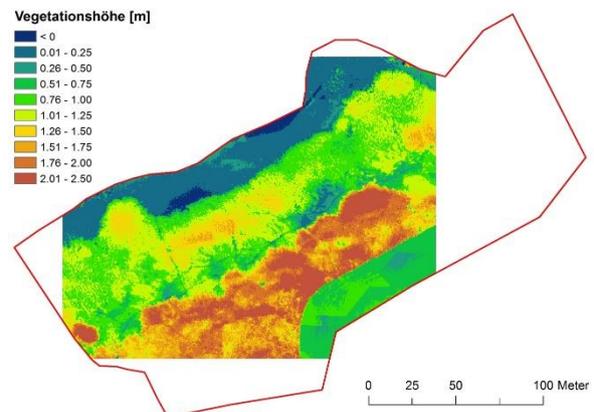


Abbildung 137: Abgeleitete Vegetationshöhen aus der Differenz zwischen dem UAS-Oberflächenmodell, Ebee RGB-Flug vom 11.8.2017 und der interpolierten Geländeoberfläche aus 50 Messpunkten

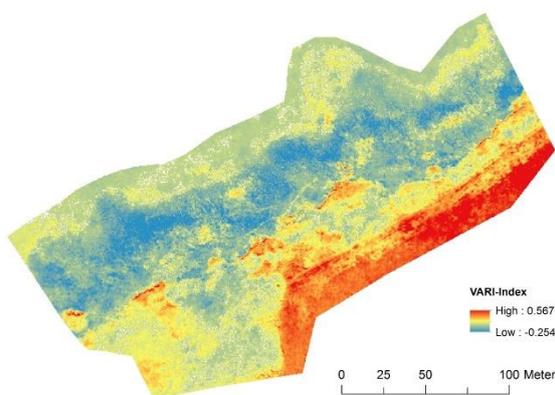


Abbildung 138: Vegetationsindex VARI, abgeleitet aus Phantom 4 RGB-Schrägbefliegung vom 12.9.2017

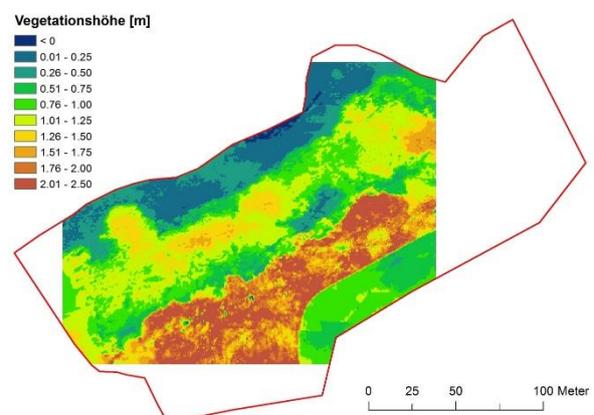
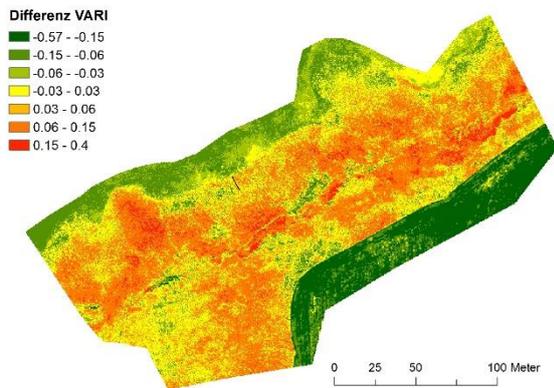


Abbildung 139: Abgeleitete Vegetationshöhen aus der Differenz zwischen dem UAS-Oberflächenmodell, Phantom 4 RGB-Schrägbefliegung vom 12.9.2017 und der interpolierten Geländeoberfläche aus 50 Mess-

punkten



Veränderung des VARI-Vegetationsindex im Zeitraum 11.8.-12.9. am Standort Balje. Abnahme der Vitalität = rot, keine Veränderung = gelb, Zunahme = grün

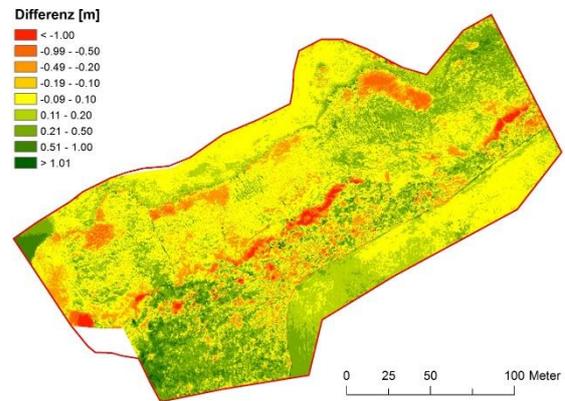


Abbildung 140: Differenz der Höhenmodelle (Ebee RGB vom 11.8.2017 und Phantom 4 vom 12.9.2017). Rote Farben bedeuten einen Rückgang der gemessenen Vegetationshöhe, gelb = keine Veränderung, grün : Zunahme der gemessenen Vegetationshöhe über den Zeitraum von circa einem Monat

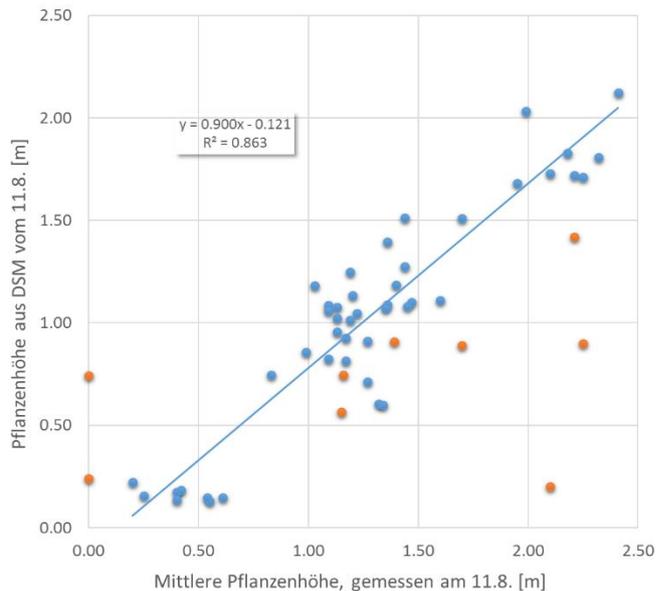


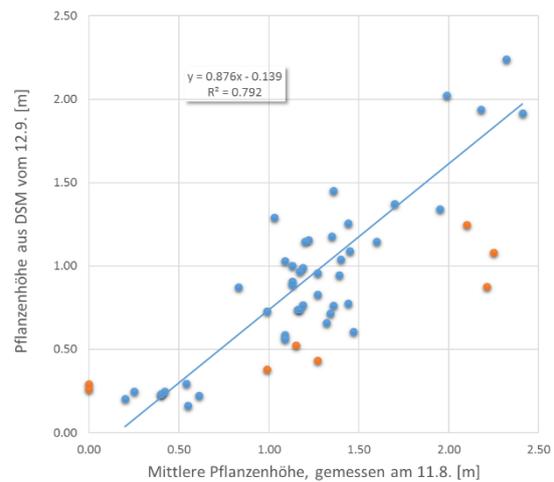
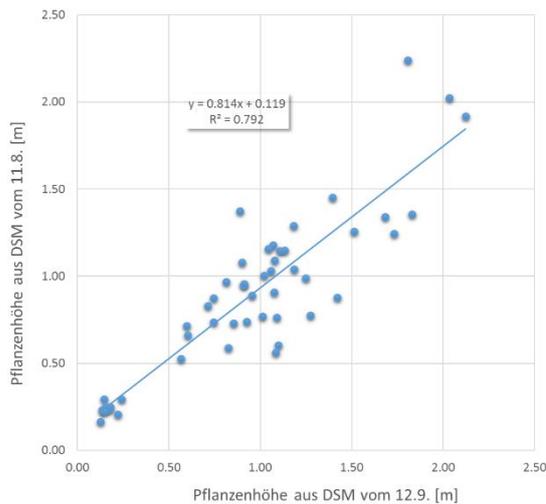
Abbildung 141: Mittlere Vegetationshöhe, gemessen am 11.8. vs. der aus dem DSM ermittelten Vegetationshöhe. Ausreisser, z.B. durch Artefakte im DSM und vor allem durch liegende Pflanzen und DSM-Messungen in Lichtungen sind in orange markiert

Um die Aussagefähigkeit der im Feld gemessenen Pflanzenhöhen zu untersuchen, sind diese mit der aus der zeitgleichen UAS-Befliegung ermittelten Pflanzenhöhe verglichen worden, Abbildung 141.

Wie zu erwarten war, weichen die photogrammetrisch ermittelten Pflanzenhöhen von den in situ gemessenen Pflanzenhöhen ab. Das ist auf mehrere Faktoren zurück zu führen:

- Bei der Messung der Pflanzenhöhe wird vom Boden bis zum oberen Endes des höchsten Fahnenblatts gemessen. Die Pflanzen bzw. das Fahnenblatt sind jedoch in der Regel abgeknickt, so dass sich die Pflanzen nicht in ihrer ganzen Höhe aufrichten.

- Bei der Messung im September sind aufgrund der fortschreitenden Seneszenz an vielen Beprobungspunkten auch einige kleine Stängel gemessen worden, die photogrammetrisch, d.h. von oben im Bestand gar nicht zu erkennen sind, da sie durch andere Pflanzen verdeckt sind.
- Bei der photogrammetrischen Messung können einzelne (steil emporstehende) Blätter und Blütenstände gar nicht erkannt werden, vielmehr wird das Bild beim Multi-Ray-Matching um den Faktor 16 vergrößert (ca. 7.5 cm / Pixel), um schneller und zuverlässige Ergebnisse zu erzielen. Aus der Erfahrung bei landwirtschaftlichen Kulturen zeigt sich, dass eher eine signifikante Bestandeshöhe berechnet wird.



3.8.2 Hollerwettern

Die Veränderungen der Vegetationsoberfläche und damit auch der hydraulischen Bremswirkung der Vegetation im Zeitraum zwischen dem 10.8. und dem 25.09. am Standort Hollerwettern lässt sich in idealer Weise mit Hilfe geeigneter Visualisierungen des digitalen Oberflächenmodells veranschaulichen. Auf der Grundlage der Relief Visualization Toolbox (RVT)⁹ sind mehrere Parameter berechnet worden, von denen nachfolgend zwei Beispiele gezeigt und erläutert werden sollen. Der Slope Gradient z.B. zeigt die Unterschiede der Homogenität der Vegetationsoberfläche sehr eindrucksvoll. Während am 10.8. die Vegetationsoberfläche bis zum Ufer homogen ist, ist die am 25.09. in einem ca. 70 m breiten Streifen schon „ausgefranst“ und teilweise niedergerückt.

⁹ <https://iaps.zrc-sazu.si/en/rvt#v>

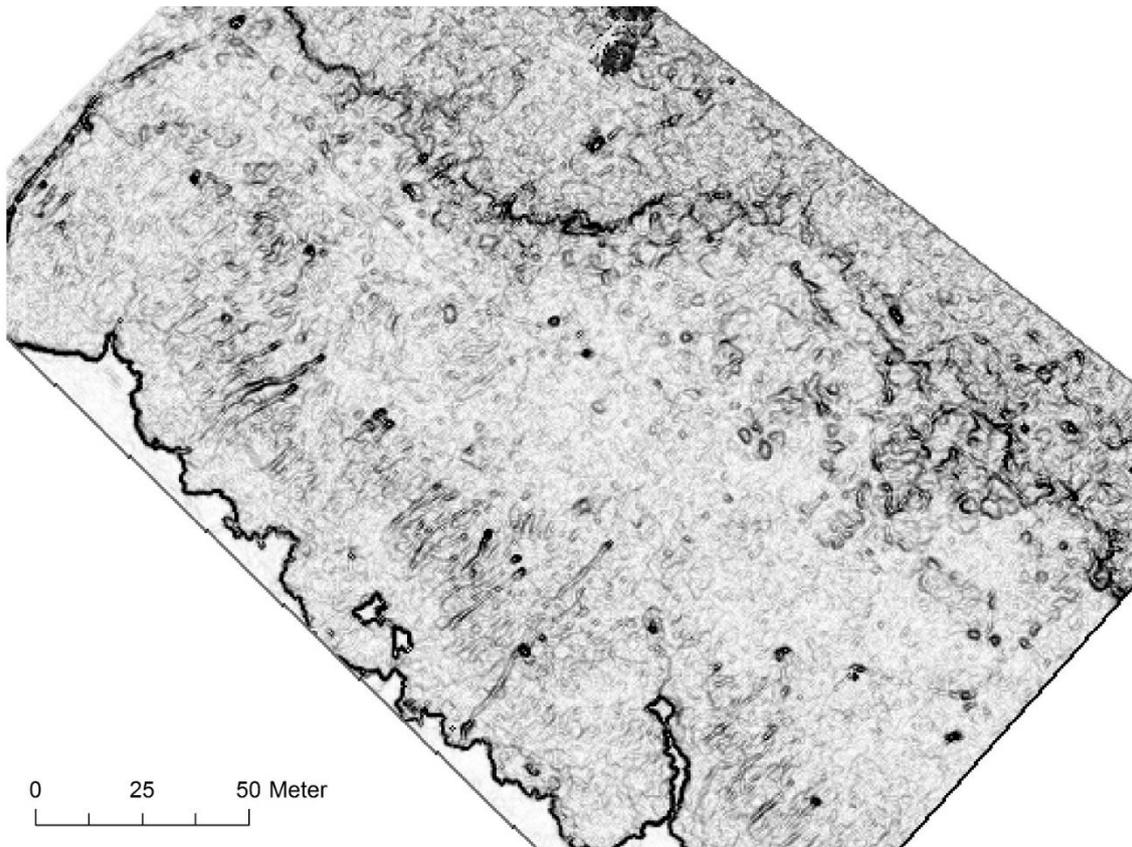


Abbildung 142: Slope Gradient des digitalen Oberflächenmodells, Standort Hollerwettern 10.8.2017

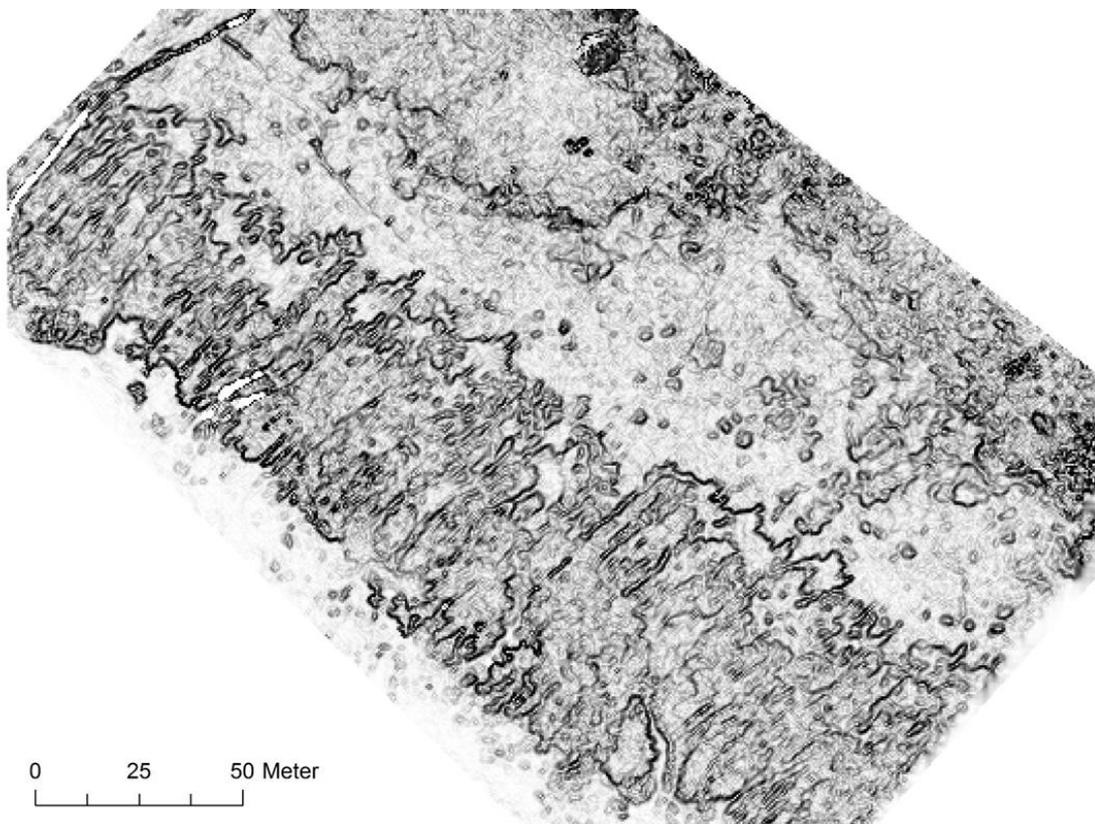


Abbildung 143: Slope Gradient des digitalen Oberflächenmodells, Standort Hollerwettern 26.9.2017

Um den Zu- und Abfluss der Tide über die Rinnen zu verdeutlichen, eignet sich der so genannte Skyview Faktor (SVF) in idealer Weise (ZAKŠEK ET AL., 2011). Dieser ist ein Proxy für diffuse Beleuchtung und misst den Anteil des Himmels, der von einem bestimmten Punkt aus sichtbar ist. Lokal flaches Gelände, Grate und im vorliegenden Fall eine homogene Vegetationsoberfläche, die mehr Beleuchtung erhalten, sind hervorgehoben und erscheinen in hellen bis weißen Farben auf einem SVF-Bild, während Vertiefungen (z. B. Priele, Rinnen, Pfade) dunkel sind, da in sie weniger Licht einfällt, vgl. Abbildung 144.

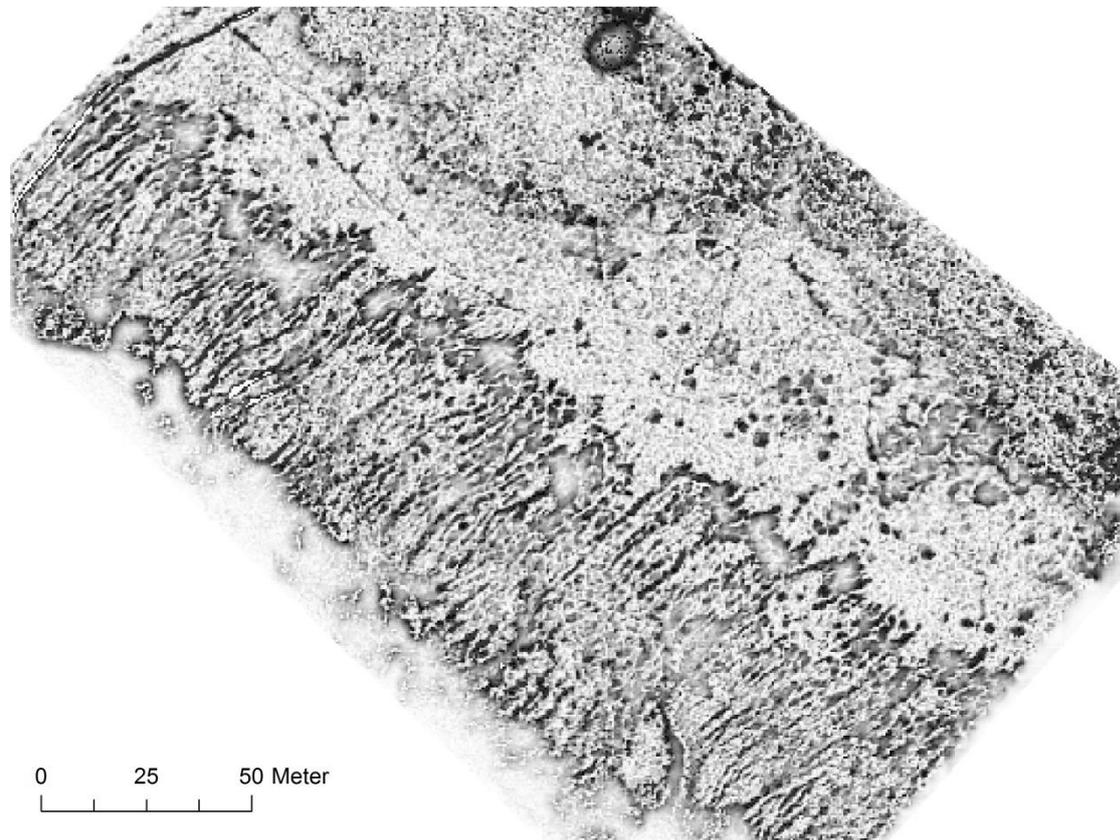


Abbildung 144: Skyview Faktor Karte des DOM Hollerwettern vom 26.9.2017

4 Schlussfolgerungen und Empfehlungen für weitere Studien

4.1 Erfassung der saisonalen Veränderung der Pflanzenstruktur und deren Auswirkung auf die Topographie

Der untersuchte Küstenraum ist Gegenstand kontinuierlicher Veränderungen, die durch eine einmalige Messkampagne nicht erfasst werden können. Z. B. variiert die hydraulische Bremswirkung der Vegetation innerhalb der Vegetationsperiode sehr deutlich. Das wiederum kann Auswirkungen auf die Topographie im Watt haben. Eigene Untersuchungen zum Makrophytenmonitoring (GRENZDÖRFER UND SCHRÖDER, 2016) haben gezeigt, dass die vegetationsfreie Watttopographie innerhalb eines Jahres um 10-20 cm variieren kann. Gleichzeitig hat sich auch gezeigt, dass in einem Zeitraum von drei Jahren an der Uferlinie keine Veränderungen in der Höhe zu beobachten sind. Umfangreiche Feldkampagnen zu mehreren Zeitpunkten sind leider sehr aufwendig. UAS-Flüge mit einer RTK-GPS-fähigen Drohne hingegen sind einfach und kostengünstig zu realisieren, da keine oder nur eine sehr geringe Anzahl von Passpunkten zur Georeferenzierung notwendig sind. Aus der Literatur als auch

aus eigenen Untersuchungen ist bekannt, dass die relative Genauigkeit von digitalen Oberflächenmodellen zueinander und damit auch das Wachstum der Pflanzen genauer bestimmt werden kann, als vergleichbare terrestrische Messungen, Grenzdörffer, 2014; . UAS-Flüge zu anderen Jahreszeiten bieten darüber hinaus auch Daten und Antworten auf andere spannende Fragestellungen. Es ließen sich keine Übertragung der Stängelanzahl auf fernerkundlichen Parameter finden. Eine Ursache ist vielleicht, dass die Anzahl der Pflanzen und die Pflanzendichte mit einem Messrahmen von 40 x 40 cm, bzw. 0.16 m² nicht hinreichend genau zu bestimmen ist, da die Pflanzen nicht gleichmäßig genug verteilt sind, um von der gemessenen Anzahl auf eine repräsentative Größe hochzurechnen. Bei voller Vegetationsbedeckung kann mit dem fernerkundlichen Blick von oben ebenfalls nicht zuverlässig auf die Anzahl der Pflanzen geschlossen werden, da ab einem LAI von 4 und mehr die meisten Vegetationsindices in die Sättigung gehen und das von oben sichtbare Volumen und die Pflanzenhöhe auch durch eine unterschiedliche Pflanzendichte erreicht werden kann.

Strandsimsen und Teichsimsen sterben im Herbst ab und die Pflanzenreste verrotten. In den Wintermonaten bzw. bis zum Wiederaustrieb im Frühjahr sind die Reste der Triebe an der Wattoberfläche in Form von kleinen schwarzen Punkten zu sehen, wie ein Beispiel aus einer UAS-Frühjahrsbefliegung aus dem Jahr 2015 in Hollerwettern zeigt (vgl. Abbildung 145). Die Bodenauflösung des damaligen Flugs von ca. 2 cm reicht allerdings kaum aus, um daraus automatisch alle Pflanzenreste zu extrahieren. Hierfür ist eine höhere Bodenauflösung von etwa 3-5 mm/Pixel erforderlich, die durch einen UAS-Flug aus geringerer Höhe (10-20 m) gewonnen werden kann. Einschlägige Erfahrungen zur Identifikation von Einzelpflanzen im Feldversuchswesen liegen vor (z. B. GRENZDÖRFFER, 2017).

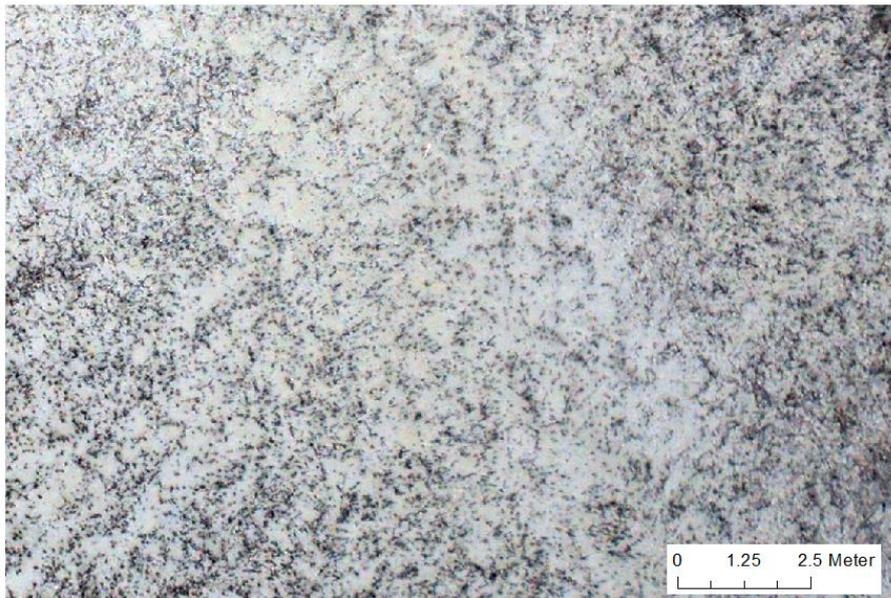


Abbildung 145: Reste abgestorbener Teichsimsen / Strandsimsen, die sich als schwarze Punkte im Watt darstellen. Ausschnitt aus einem UAS-Orthophoto mit einem GSD von 2 cm, aufgenommen in Hollerwettern am 09. März 2015

4.2 UAS-Photogrammetrie zur Erfassung von morphologisch wichtigen Mikrostrukturen

An den Standorten Balje und Hollerwettern sind die flachen Rinnen bei auflaufendem und ablaufendem Wasser interessante mikromorphologische Elemente für die Strömung. Da das fließende Wasser in einer Rinne eine größere Schleppekraft hat als in einer pflanzenbewachsenen Umgebung, wirkt es in den Flutrinnen erosionsaktiv. Gleichzeitig stabilisieren die Rinnen wahrscheinlich auch die umgeben-

den Pflanzenstandorte, da das Wasser an wenigen Stellen konzentrierter auf- und ablaufen kann. Die Abstände zwischen den Rinnen und deren Breite und Tiefe der Rinnen sind in Hollerwettern und Balje recht unterschiedlich. Mögliche Gründe dafür (z. B. unterschiedliche Tidenverläufe, topographische Besonderheiten, Bodenunterschiede etc.) bedürfen einer Prüfung. Zudem stellt sich die Frage, ob und inwieweit die Rinnen ihre Lage und Form über die Zeit verändern. Schließlich ist die Landschaft sowohl land- als auch seeseitig stark vom Menschen überprägt und ebenfalls ständig in Bewegung. Hier sind z.B. die Elbvertiefungen und Deichbaumaßnahmen der letzten Jahrzehnte zu nennen. Es stellt sich also die Frage, ob sich die Rinnen verbreitern und zur Erosion beitragen oder stabil bleiben und nur den effizienten täglichen Wassertransport gewährleisten.

In der Literatur sind diese Objekte noch nicht quantifiziert und vermessen worden, da gängige flächendeckende Vermessungsverfahren (Airborne Laserscanning, Luftbildphotogrammetrie) nicht in der Lage sind, die Objekte hinreichend genau zu erfassen. Der Verlauf und die Ausmaße der Rinnen können durch terrestrisch durch eine GPS-Vermessung nicht effektiv erfasst werden, da die vielen Objekte recht klein sind. Bei der Sommer- als auch der Herbstbefliegung verdeckt die Vegetation die Strukturen. Bei einer Winterbefliegung hingegen sind die Rinnen gut zu erkennen und können mit Hilfe photogrammetrischer Verfahren auch in ihrer genauen Lage, Größe und Form erfasst und vermessen werden. Im Gegensatz zur Zählung der Strandsimsentriebe ist dafür eine Bodenauflösung von ca. 1 cm völlig ausreichend.

Die Landschaft verändert sich nicht nur kontinuierlich, sondern auch durch Extremereignisse, wie Stürme oder extreme Hochwasserereignisse. UAS-Bildflüge die gezielt nach entsprechenden Extremereignissen durchgeführt werden, können die Ausmaße bzw. topographischen Veränderungen solcher Ereignisse sehr gut dokumentieren und quantifizieren.

4.3 Überflutungsdauer und Überflutungshöhe

Um die Dauer und das Ausmaß der täglichen Überflutungen durch die Tidehochwässer der Elbe auf die Makrophytenstandorte bestimmen, visualisieren und bewerten zu können, sind einerseits hochgenaue Geländedaten erforderlich und andererseits Informationen über einen typischen Tidezyklus. Der Verlauf der Tide an den verschiedenen Pegeln entlang der Unterelbe und die wichtigsten Kenndaten, wie z. B. das mittlere Tidehochwasser sind im Datenportal „PegelOnline¹⁰“ der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes verfügbar. Das Morgenhochwasser vom 3.1.2018 erscheint nach Inaugenscheinnahme als typisch und wurde deshalb für die empirische Untersuchung ausgewählt (vgl. Abbildung 146).

¹⁰ <https://www.pegelonline.wsv.de/gast/start>

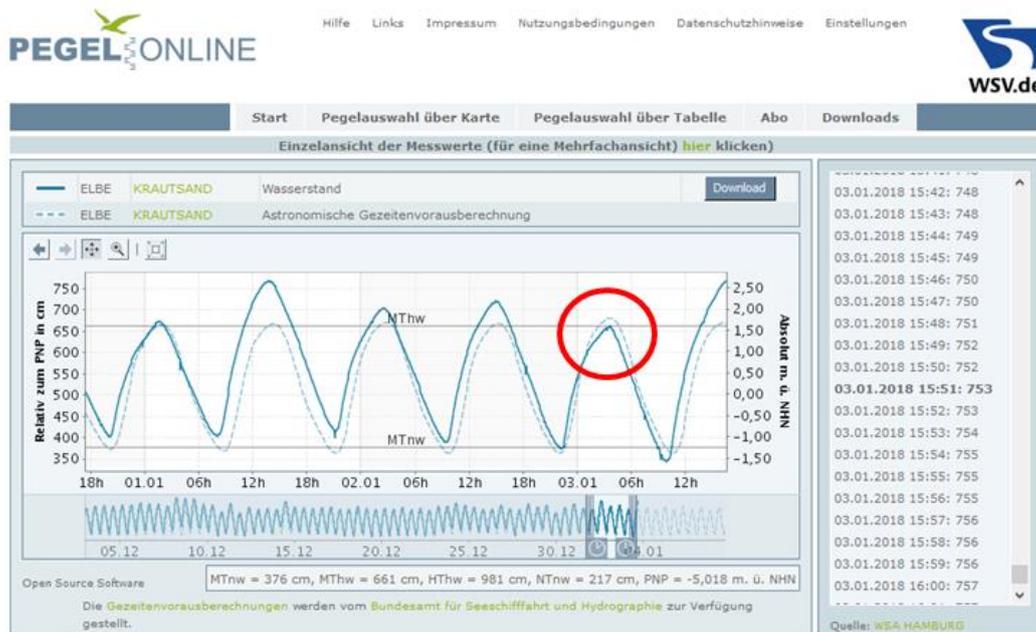


Abbildung 146: Ansicht der Tidezyklen am Pegel Krautsand zum 3.1.2018 (ca. 2.5 km Elbabwärts vom Untersuchungsgebiet Krautsand) <https://www.pegelonline.wsv.de/>

Aus den Daten der Pegel Krautsand, Brunsbüttel (ca. 3,5 km Luftlinie nordöstlich vom Standort Balje) und Glückstadt (Nähe Hollerwettern) wurde mit der Software CurveExpert (Referenz, welche Version?) die Überflutungsdauer (y) oberhalb von 0,20 m ü. N.N. für jeden Standort berechnet. Als Regressionsfunktion mit Bestimmtheitsmaßen R^2 von 0.9978-0.99986 wurden Hyperbolic Decline Funktionen mit folgenden Parametern ermittelt.

$$y = q_0(1 + bx/a)^{-1/b}$$

Parameter	Krautsand	Balje	Hollerwettern
q_0	6.8915	7.2115	7.2086
a	2.54789	2.4942	2.5327
b	- 1.59166	-1.633216	-1.625367

Graphisch ausgedrückt, sieht der Zusammenhang zwischen der Dauer einer Überschwemmung und der Höhe über dem Meeresspiegel, wie folgt aus (Abbildung 147)

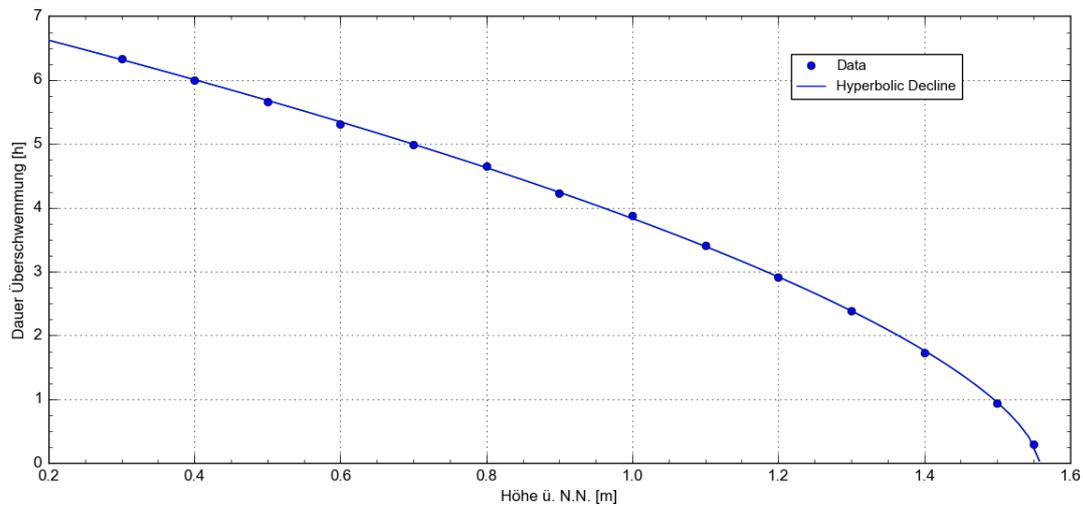


Abbildung 147: Ganglinie eines mittleren Hochwassers in Bezug auf die Dauer der Überflutungszeit in Abhängigkeit der Höhe über N.N. am Pegel Glückstadt, erstes Tidehochwasser vom 3.1.2018 (<https://www.pegelonline.wsv.de/>)

Die Anwendung der obigen Formel auf die aus den GPS-Daten ermittelten Geländemodelle ergibt folgende Bilder der Überflutungsdauer der Ufervegetation bei einem mittleren Tidehochwasser an den drei Standorten (Abbildung 148-Abbildung 150).



Abbildung 148: Überflutungsdauer der Ufervegetation bei einem mittleren Tidehochwasser am Standort **Kraut-sand**. Datengrundlage: <https://www.pegelonline.wsv.de/>

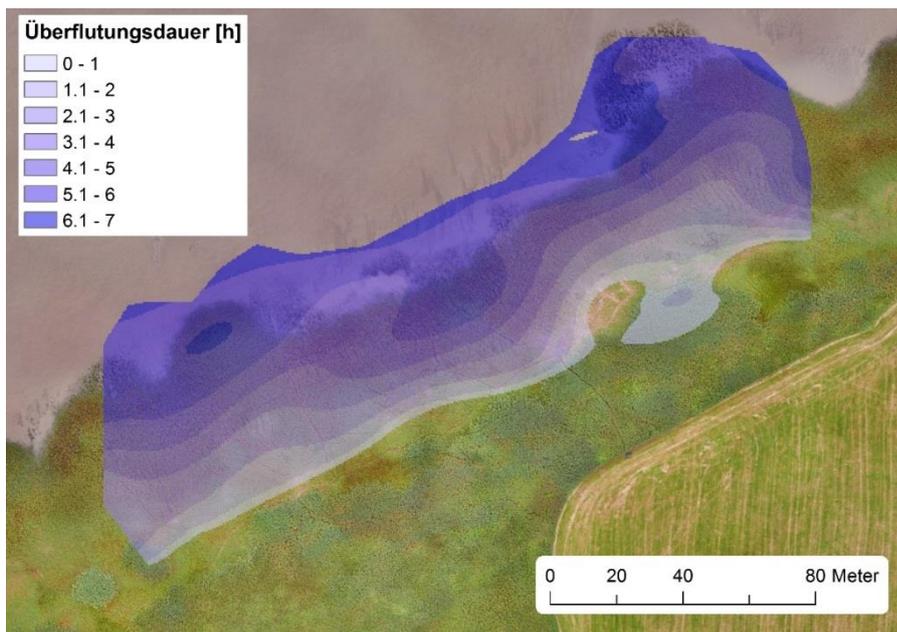


Abbildung 149: Überflutungsdauer der Ufervegetation bei einem mittleren Tidehochwasser am Standort **Balje**.
Datengrundlage: <https://www.pegelonline.wsv.de>)

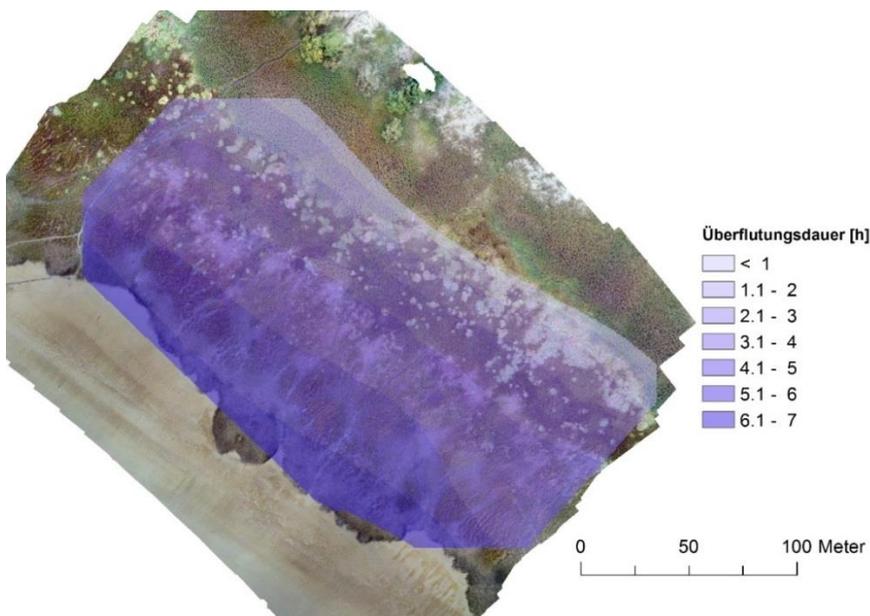


Abbildung 150: Überflutungsdauer der Ufervegetation bei einem mittleren Tidehochwasser am Standort **Hollerwettern**. Datengrundlage: <https://www.pegelonline.wsv.de/>

Aus den Abbildungen zeigt sich, dass die überflutete Makrophytenfläche an den drei Standorten stark variiert. Das gilt auch für die berechnete maximale Überflutungsdauer der Vegetation an den drei Standorten, die sich teilweise um mehrere Stunden unterscheidet.

Während in Balje und Krautsand ein jeweils ca. 50 m breiter Streifen bei einem mittleren Tidehochwasser überschwemmt wird und die der Grenze zwischen Strandsimse und Schilf in etwa mit der Mittlere Tidehochwasserlinie übereinstimmt, ist es in Hollerwettern anders. Dort überflutet das Wasser bei einem Mittlere Tidehochwasser einen ca. 130 m breiten Vegetationsbereich. Die Salz-Teichsimsen stehen teilweise über 6 Stunden im Wasser. Die Grenze zwischen den Salz-Teichsimsen und dem Schilf liegt zwischen 1.30-1.55 m ü. N.N. und stimmt nicht mit der mittleren Tidehochwas-

serlinie überein, d. h. auch Teile des Schilfs werden bei einem durchschnittlichen Tidezyklus überschwemmt.

Wenn man für den Standort Balje einen mittleren Hochwasserstand zugrunde legt, wird die Ufervegetation im Sommer, zum Vegetationsmaximum nur teilweise komplett überflutet. Ein Großteil der Vegetation ragt bei einem mittleren Tidehochwasser teilweise aus den Fluten. Der Anteil nimmt allerdings zum Herbst hin rasch ab, da die Pflanzen niedriger und weniger dicht werden, bzw. niedergedrückt wurden oder in Teilen bzw. ganz absterben. Damit nimmt die natürliche hydraulische Bremswirkung der Vegetation im Herbst rasch ab, wie die folgenden Abbildungen zu den beiden Befliegsterminen vom 11.8. und dem 12.9. zeigen.

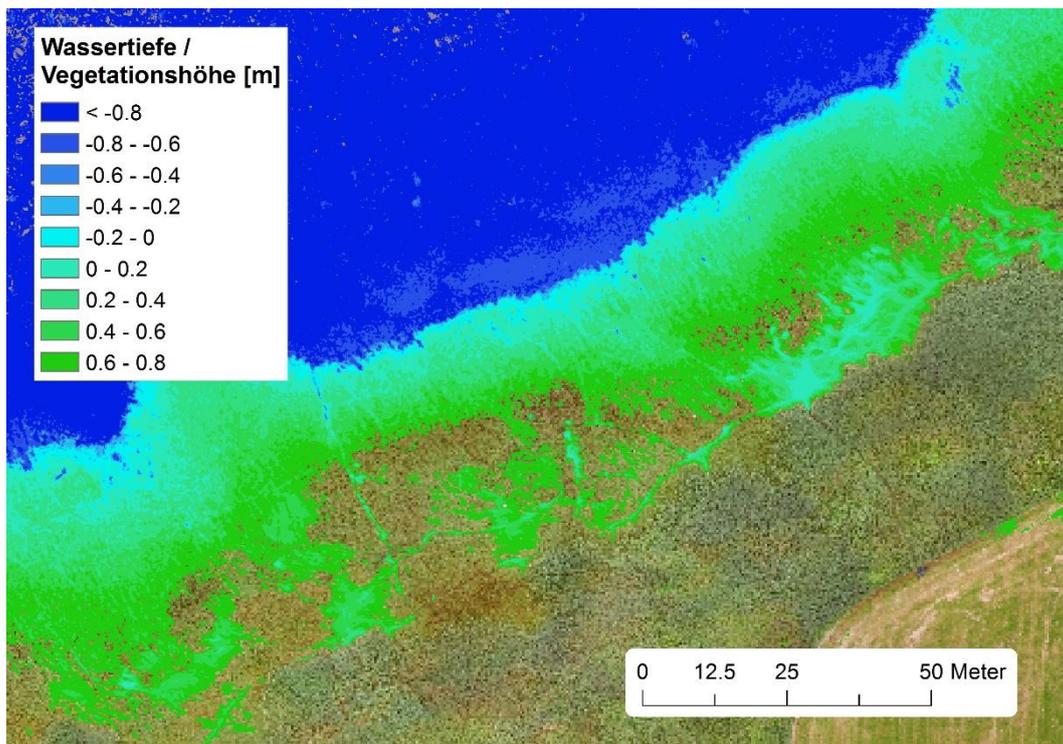


Abbildung 151: Höhe der Vegetation über dem Wasserspiegel bei einem mittleren Hochwasser (1.51 m ü. N.N.) am Standort Balje am 11.8.2017.

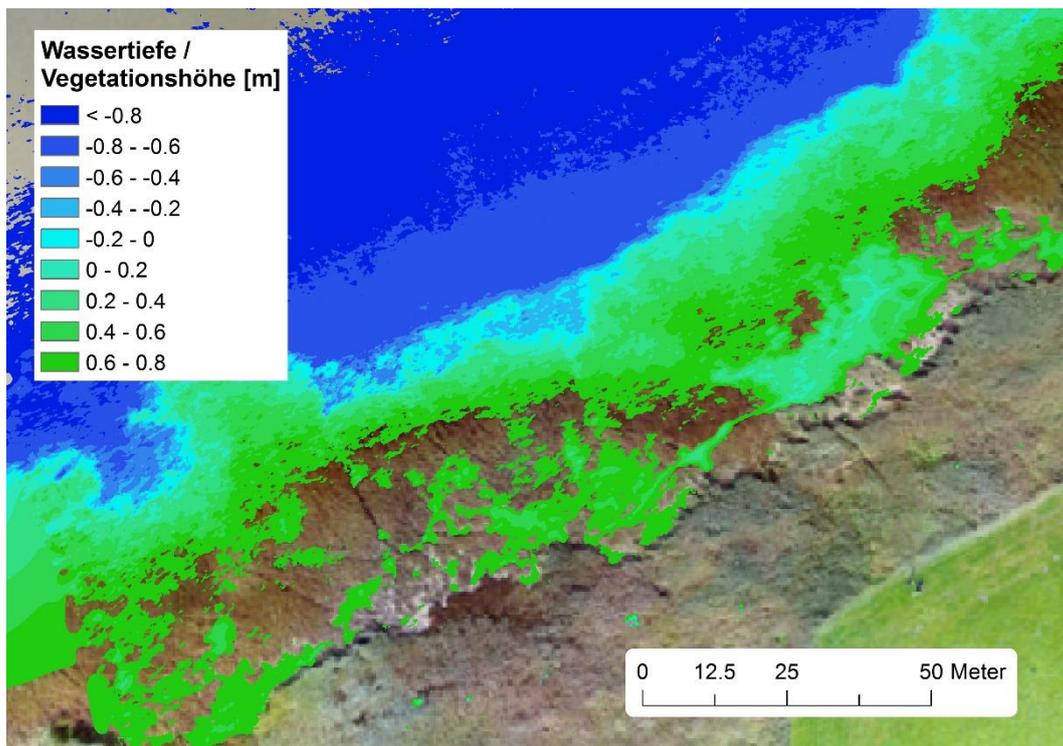


Abbildung 152: Höhe der Vegetation über dem Wasserspiegel bei einem mittleren Hochwasser (1.51 m ü. N.N.) am Standort Balje am 12.9.2017.

4.4 Messung und Verwendung der Pflanzenhöhe und Stängeldichte

Die Pflanzenhöhe scheint auf den ersten Blick ein einfach zu erfassender Parameter zu sein, der bei landwirtschaftlichem Grünland auch aus Literatur bekannt (z.B. LÓPEZ-DÍAZ ET AL., 2011), sehr gut mit der Biomasse korreliert und zudem auch für hydraulische Fragestellungen im Kontext des tibass-Projekts von Bedeutung ist. Sind die Pflanzen größer üben sie mehr Wellenwiderstand aus. Auf den zweiten Blick jedoch ist schon die Definition der Pflanzenhöhe ein Problem und im Rahmen des Projekts und abhängig von der Messmethode ergeben sich quasi natürlich unterschiedliche Werte der Pflanzenhöhe, wie die nachfolgende Abbildung zeigt.

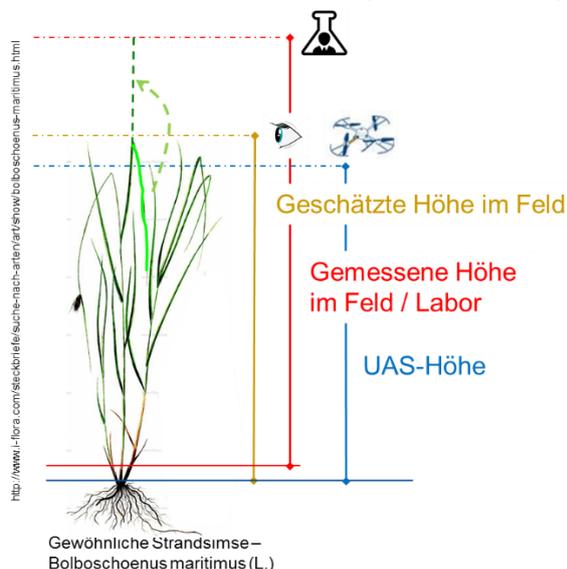


Abbildung 153: Verwendete Messmethoden der Pflanzenhöhe im Rahmen der Messkampagnen

Ein Teil des Problems liegt auch in den Untersuchungsgegenständen, insbesondere der Strandsimse. Die höchsten Leitblätter der Strandsimsen neigen dazu umzuknicken, so dass nur ein (großer) Teil der Gesamtpflanze die in situ Pflanzenhöhe ausmacht. Gleichzeitig ist die Pflanzenoberfläche in Abhängigkeit der Pflanzendichte, der Phänologie und dem Standort relativ rau, teilweise lückig oder auch lagernd. Kurzum die visuell erfassbare Pflanzenhöhe im Feld variiert sehr kleinräumig und spiegelt nicht unbedingt die maximale Pflanzenhöhe wieder.

Wenn die Pflanzen im Feld dicht über dem Boden abgeschnitten werden, ist es im Labor schwer zu sagen, wie hoch die Pflanze in situ war, gleichwohl besteht für einen validen Vergleich zwischen den Messpunkten nur die Möglichkeit die maximale Höhe zu bestimmen. Gleichzeitig werden bei der Labormessung alle im Feld abgeschnittenen Pflanzen gemessen. Dabei sind in der Regel auch kleinere Pflanzen mit gemessen worden, die für die Bestandshöhen nicht bestimmend sind und somit auch wieder den Durchschnitt nach unten ziehen.

Die visuelle Vor-Ort Messung wiederum ist ebenfalls fehlerbehaftet bzw. uneindeutig, da weder eine einzelne Pflanze noch die Vegetationsoberfläche eine eindeutige und wohldefinierte Höhe aufweisen. Vielmehr liefert die visuelle Höhe eine mehr oder weniger genaue Schätzung der in situ Höhe des Pflanzenbestands.

Die photogrammetrische Messung der Pflanzenhöhe ist ebenfalls nicht fehlerfrei. Zum ersten setzt die Berechnung der Pflanzenhöhe eine exakte Bestimmung der Geländeoberfläche voraus. Nur dann kann die Differenz zum digitalen Oberflächenmodell, d. h. die Pflanzenhöhe korrekt sein. Wie an obiger Stelle ausgeführt, liegt die Genauigkeit des digitalen Geländemodells bei etwa 3-5 cm. Zum zweiten werden bei der Berechnung der 3D-Punktwolke die zugrundeliegenden Bilder vergrößert und Ausreißer in einem Filterprozess eliminiert. In der Summe führt das dazu, dass das abgeleitete digitale Oberflächenmodell einzelne nach oben stehende Blätter nicht widerspiegelt, sondern eher eine signifikante Bestandsoberfläche ab einer bestimmten Bestandsdichte widerspiegelt (siehe z.B. GRENZDÖRFFER, 2014). Zum dritten liegen bzw. lagern die Pflanzen an den Messpunkten bzw. an den vorgegebenen Messpunkten sind durch andere Messungen schon Pflanzen entnommen worden, so dass der eigentliche Messpunkt eine zu niedrige Höhe des Bestands widerspiegeln kann.

Die zwei nachfolgenden Abbildungen zeigen die Unterschiede und statistische Zusammenhänge zwischen den Messmethoden auf verschiedene Weisen.

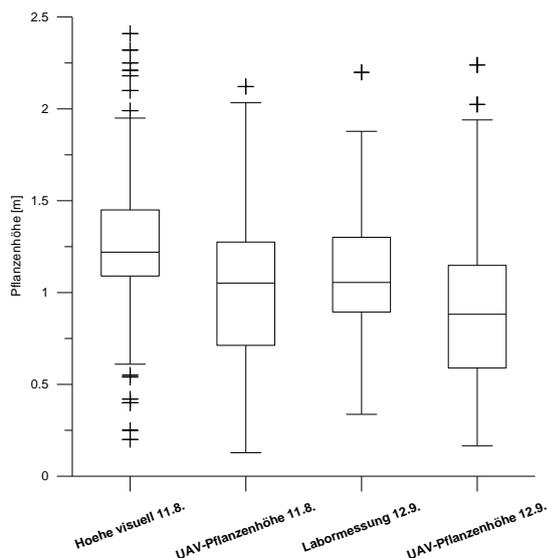


Abbildung 154: Vergleich der auf verschiedenen Arten und zu unterschiedlichen Zeitpunkten gemessenen Pflanzenhöhe am Beispiel des Standorts Balje

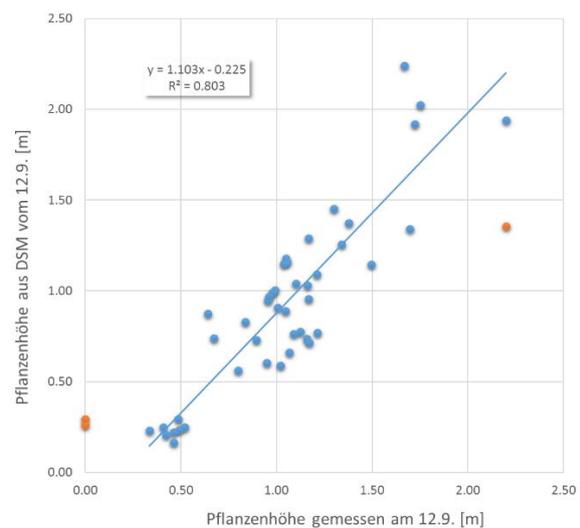


Abbildung 155: Statistischer Zusammenhang zwischen der im Labor gemessenen Pflanzenhöhe und der UAS-Pflanzenhöhe vom 12.9.2017, Standort Balje (Ausreißer in Orange)

Die Messung der Pflanzenhöhe ist natürlich auch zeitabhängig, worauf in Abschnitt 3.8.1 schon näher eingegangen wurde.

Bei den Teichsimsen ist es auf den ersten Blick einfacher. Diese Pflanzen bestehen nur aus einzelnen Trieben, deren Größe einfach im Labor und auch im Feld zu messen ist. Gleichwohl stimmen die Messungen nicht mit den photogrammetrischen Bestandsoberflächen überein, da die geringe Bestandsdichte der Teichsimsen oft kaum ausreicht, um eine messbare Vegetationsoberfläche zu bilden.

Aus den verschiedenen Messdaten der drei Standorte hat sich gezeigt, dass in der Regel die im Feld erhobene Bestandshöhe besser mit den fernerkundlichen Daten korreliert, als die im Labor gemessene. Das ist auch sachlich begründbar, da diese Pflanzenhöhe nicht von herabhängenden oder auch zu kleinen Pflanzen beeinflusst wird. Für zukünftige Messkampagnen ist demnach von einer Labormessung abzusehen und die Feldmessung zu objektivieren. Das kann am besten durch die Verwendung eines so genannten „Plate Meter“ oder einer vergleichbaren Platte erfolgen. Bei einem „Plate Meter“ wird eine Platte mit einem definierten Gewicht auf den Bestand gelegt. Durch das Gewicht der Platte werden die Pflanzen leicht nach unten gedrückt und eine „signifikante“ Pflanzenhöhe gemessen, die mit dem Volumen, d. h. der Biomasse am besten korreliert, wie Vergleiche von verschiedenen Methoden für Grünland gezeigt haben (LÓPEZ-DÍAZ ET AL., 2011).

4.5 Potenzial und Grenzen des Thermalsensors

Die Befliegungen mit der Thermalkamera haben gezeigt, dass sich auf allen Standorten signifikante Temperaturunterschiede zu beobachten sind. Temperaturunterschiede in den frei liegenden Wattflächen sind in erster Linie auf unterschiedliche Feuchte bzw. auf die Dicke des Wasserfilms zurück zu führen. Temperaturunterschiede in der Vegetation sind ebenfalls zu beobachten, wenngleich sie verschiedene Ursachen haben. Grundsätzlich können Temperaturunterschiede in Vegetationsflächen auf Unterschiede in der Wasserversorgung (Trockenstress) hindeuten, was im vorliegenden Fall ausgeschlossen werden kann. Gleichwohl sind unterschiedliche Temperaturen auch auf Unterschiede in der Transpirationsleistung (Biomasse) zurückzuführen. Für Bereiche mit einem LAI < 1, können Temperaturunterschiede auch Rückschlüsse auf den Boden zulassen.

Ein wirklicher Mehrwert der Thermalfernerkundung ergibt sich in der Regel vor allem dann, wenn die Verteilung der Oberflächentemperatur relevante Muster zeigt, die durch andere Sensoren nicht erkannt werden können. Das kann z. B. die Messung von Durchfeuchtungen an Deichen oder auch Auffinden von Einleitungen in einen Fluss sein. Die bloße Erkenntnis, dass bei den vorliegenden Aufnahmen die Wattflächen wärmer sind als die Vegetation, ist noch kein Grund diesen Sensor zukünftig standardmäßig zu verwenden. Gleichwohl ist es durchaus von Interesse zu sehen, welche Objekte und ihre Eigenschaften signifikante Temperaturunterschiede hervorrufen. Die Thermalaufnahme vom 12.9. in Balje zeigt, dass liegende Pflanzen und senescente Pflanzen signifikant wärmer sind als höhere und vitalere Pflanzen. Auch auf den Wattflächen zeigt sich, dass auf den Luftbildern oftmals nur schwer differenzierbare Korngrößen / Wassergehalte eindeutige Unterschiede in der thermalen Signatur hervorrufen (Abbildung 156). Auf der anderen Seite erzeugen die Schatten an der Kante zwischen Schilf und Strandsimsen ebenfalls einen deutlichen Temperaturunterschied (Abbildung 157).

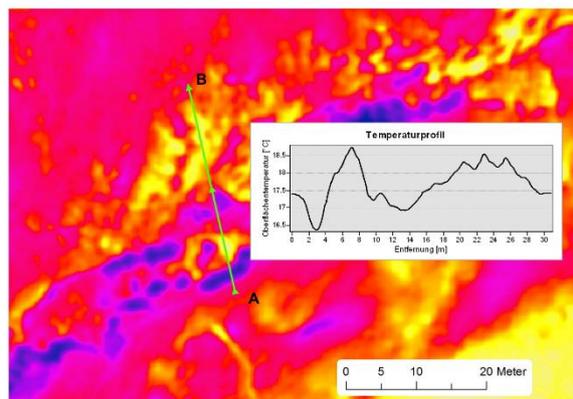
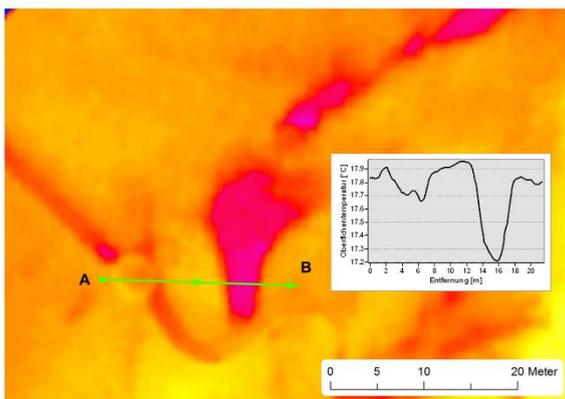
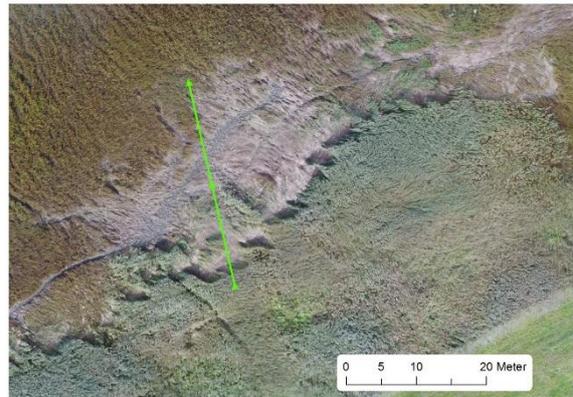
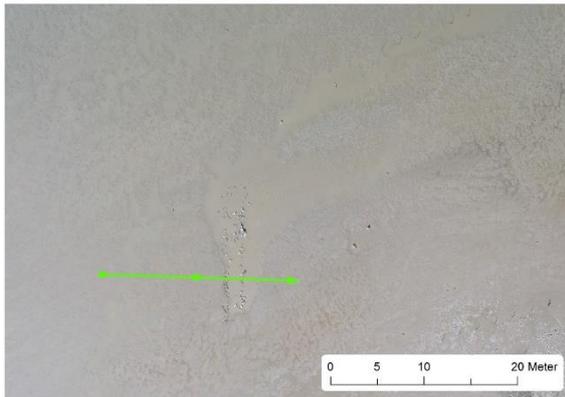


Abbildung 156: Vergleich eines Ausschnitts des Orthophotos und der zeitgleich aufgenommenen Thermalaufnahme vom Standort Balje am 12.9.2017 mit Hilfe eines Temperaturprofils durch das Watt mit unterschiedlichen Eigenschaften (Korngrößen, Wassergehalte, Neigung)

Abbildung 157: Vergleich eines Ausschnitts des Orthophotos und der zeitgleich aufgenommenen Thermalaufnahme vom Standort Balje am 12.9.2017 mit Hilfe eines Temperaturprofils das mehrere Phänomene durchläuft (hohe vitale Schilfvegetation, Schatten, Vegetation, liegende Strandsimsen mit teilweise offenem Boden, Strandsimsen)

Es stellt sich also die Frage, welche Prozesse für Fragestellungen im Kontext des tibass-Projekts in der Landschaft mit Hilfe der Thermalfernerkundung besser oder vielleicht auch einzigartig erfasst werden können? Nun das lässt sich auf der Basis einzelner Aufnahmen schwer beurteilen, da gerade die Thermalfernerkundung sehr Tageszeiten, Wetter- und Saisonabhängig ist und in der Regel am besten durch einen Vergleich zwischen Nacht- und Tagaufnahmen funktioniert, um die dirurnale thermale Amplitude unterschiedlicher Objekte zu erfassen und zu bewerten. Im vorliegenden Fall wird diese durch die Tidezyklen überlagert. Es lässt sich allerdings festhalten, dass die Thermalaufnahmen im Rahmen der PLSR-Analysen als wertvolle Eingangsgröße fungiert haben und positiv mit mehreren Bestandsparametern korrelieren. Wie aus der Abbildung 156 deutlich wird, eröffnen die Thermalflächen auf den Wattflächen eine feine Differenzierung der Sedimente, die unter Umständen von Bedeutung ist.

4.6 Potenzial und Grenzen des terrestrischen Laserscanners zur Erfassung von Röhrichtpflanzen

TLS-Messungen sind erfolgreich zur Wattvermessung und dort speziell zur Erfassung der Oberflächenrauigkeit eingesetzt worden (z.B. HANNAM UND MOSKAL, 2015). Die erzielten Reichweiten liegen bei ca. 50 m rund um die Scanstandorte. Da der Aufwand und Datenverlust durch eine nachfolgende Filterung der TLS-Punktwolke bei Watt sehr gering ist, kann TLS als Alternative zu UAS-Befliegungen

für diesen speziellen Fall durchaus eingesetzt werden. Bei dichter und mannshoher Vegetation, wie im vorliegenden Fall sieht das deutlich anders aus, wie der nachfolgende tabellarische Vergleich zeigt.

Tabelle 18: Vergleich TLS und UAS für eine flächenhafte Erfassung der Makrophytenvegetation

	UAS	TLS
Aufwand Datenerhebung	Gering, große Flächenleistung, mit RTK-GPS auch passpunktlos möglich	Aufwendig, geringe Flächenleistung pro Zeit, da an vielen Standorten gemessen werden muss, mindestens 3 -4 Passpunkte pro Standort notwendig
Wetterabhängigkeit	Mittel, d.h. kein Regen, Wind bis 5 Bft.	Mittel, d.h. wenig Wind (< 4 Bft.) TLS-Messungen der Pflanzen werden bei Wind veräuscht
Aufwand Datenprozessierung	Einfach, definierter Workflow	Aufwendig, experimenteller Workflow
Reichweite (horizontal)	Beliebig	1 - 3 m (je nach Pflanzendichte)
Reichweite (vertikal)	Nur Vegetationsoberfläche	Komplette Pflanzenhöhe
Pflanzenanzahl	Indirekt - Schätzung über Regression zu spektralen und geometrischen Bildeigenschaften-Güte der Schätzung geringmittel	Manuelle oder automatische Zählung
3D-Pflanzenstruktur	Nicht möglich	Im Profil möglich
Stängeldichte	Indirekt - Schätzung über Regression zu spektralen und geometrischen Bildeigenschaften. Güte der Schätzung gering	Überschätzung durch Ablenkung TLS an Kanten, Auflösung des TLS reicht nicht aus
Mikrorelief des Bodens	Unter dichter Vegetation nicht erfassbar	Im engen Umkreis um Scannerstandort erfassbar, muss durch mehrere Schritte gefiltert werden.

In der Summe lässt sich festhalten, dass für flächenhafte Datenerfassungen TLS-Aufnahmen UAS-Bildflüge nicht ersetzen, sondern ggf. nur ergänzen können. Gleichwohl ermöglichen TLS-Scans einen faszinierenden Einblick in die 3D-Struktur der Pflanzengesellschaft sowie einen Blick auf das Mikrorelief des Bodens in einem Umkreis von einigen Metern um den Scannerstandort. TLS-Scans können darüber auch genutzt werden, um die Anzahl der Pflanzen zu zählen und deren räumliche Verteilung im Kleinen genau zu beschreiben und somit Parameter für Rauigkeit der Pflanzenstruktur ermitteln, die als Eingangsgröße für hydrodynamische Modelle verwendet werden können.

5 Literatur

- ANDERSON, K.; BENNIE, J.; WETHERELT, A. (2010): Laser scanning of fine scale pattern along a hydrological gradient in a peatland ecosystem. *Landsc. Ecol.* 2010, 25, 477–492.
- ASHCROFT, M. B.; GOLLAN, J. R.; RAMP, D.; KRITICOS, D. (2014): Creating vegetation density profiles for a diverse range of ecological habitats using terrestrial laser scanning. In: *Methods Ecol Evol* 5 (3), S. 263–272. DOI: 10.1111/2041-210X.12157.
- BARNES, C.; BALZTER, H.; BARRETT, K.; EDDY, J.; MILNER, S.; SUÁREZ, J. C. (2017): Airborne laser scanning and tree crown fragmentation metrics for the assessment of Phytophthora ramorum infected larch forest stands.- *Forest Ecology and Management* 404, S. 294–305. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.08.052.
- BOUMA, T.J.; DE VRIES, M.B.; LOW, E.; PERALTA, G.; TANCZOS, C.; VAN DE KOPPEL, J. & HERMAN, P.M.J. (2005): Trade-offs related to ecosystem engineering: A case study on stiffness of emerging macrophytes. *Ecology*, 86, 2187-2199.
- BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (Hrsg.) (2017): Natürlich bewachsene Ufer an der Elbe. Online verfügbar http://www.bafg.de/DE/01_Leistungen/02_F_E/Themen/Tibass/tibass.html?nn=174410, zuletzt geprüft am 01.12.2017.
- CARUS, J.; PAUL, M. & SCHRÖDER, B. (2016): Vegetation as self-adaptive coastal protection: Reduction of current velocity and morphologic plasticity of a brackish marsh pioneer. *Ecology and Evolution*, 6, 1579-1589, <http://dx.doi.org/10.1002/ece3.1904>.
- DURRIEU, S.; ALLOUIS, T.; FOURNIER, R.; VÉGA, C.; ALBRECH, L. (2008): Spatial quantification of vegetation density from terrestrial laser scanner data for characterization of 3D forest structure at plot level. In: *SilviLaser*, S. 325–334.
- FARO (2014): FARO® Laser Scanner Focus 3D X 130. Der neue leistungsstarke Laserscanner der X-Serie. Online http://am-la-ser.at/fileadmin/templates/content/Produkte/Laserscanner/FARO_X130/Tech_Sheet_FARO_Laser_Scanner_Focus3D_X_130.pdf, zuletzt aktualisiert am 28.12.2017.
- GRENDÖRFFER, G. (2017): Automatische Ableitung geometrischer Pflanzenparameter aus UAS-Aufnahmen im Feldversuchswesen am Beispiel von Eisbergsalat und Blumenkohl.- *Bornimer Agrartechnische Berichte*, Heft 93, ISSN 0947-7314, Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB).- S. 190 - 198
- GITELSON, A.A.; KAUFMAN, Y.J.; STARK, R.; RUNDQUIST, D. (2002): Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction.- *Remote Sens. Environ.*, 80 (2002), pp. 76–87
- GRENDÖRFFER, G. (2016): Pflichtenheft zur Ausschreibung von UAS-Dienstleistungen.- Dreiländertagung der DGPF, der OVG und der SGPF in Bern, Schweiz-Publikationen der DGPF, Band 25, 2016, 12 S.
- GRENDÖRFFER, G. UND SCHRÖDER, U. (2017): UAS unterstützte Vegetationserfassung tidebeeinflusster Makrophytenbestände in der Unterelbe.- In: Kersten, Th. [Hrsg.]: 37. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF-Publikationen der DGPF, Band 26, 2017, 12 S.
- GUARNIERIA, A.; VETTOREA, A.; PIROTTIA, F.; MARANIB, M. (2008): Comparison of data classification techniques applied to TLS point clouds. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XXXVII. Part B5, S. 1131–1136.
- HANNAM, M UND MOSKAL, L.M. (2015): Terrestrial Laser Scanning Reveals Seagrass Microhabitat Structure on a Tideflat.- *Remote Sensing* 2015, 7(3), 3037-3055; doi:10.3390/rs70303037
- HEUNER, M.; SILINSKI, A.; SCHOELYNCK, J.; BOUMA, T.J.; PUJALON, S.; TROCH, P.; FUCHS, E.; SCHRÖDER, B.; SCHRÖDER, U.; MEIRE, P. & TEMMERMAN, S. (2015): Ecosystem engineering by plants on wave-exposed intertidal flats is governed by relationships between effect and response traits. *PLOS one*, 10, e0138086, <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0138086>.

- KRIVORUCHKO K. UND GRIBOV A. (2014): Pragmatic Bayesian kriging for non-stationary and moderately non-Gaussian data.- *Mathematics of Planet Earth. Proceedings of the 15th Annual Conference of the International Association for Mathematical Geosciences.* Springer 2014, pp. 61-64.
- LÓPEZ-DÍAZ, J. E.; ROCA-FERNÁNDEZ A. I. UND GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, A. (2011): Measuring Herbage Mass by Non-Destructive Methods: A Review.- *Journal of Agricultural Science and Technology A 1* (2011) 303-314
- MÖLLER, L. (2006): Quantifying saltmarsh vegetation and its effect on wave height dissipation: Results from a UK East coast saltmarsh. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 69, 337-351, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2006.05.003>.
- SAMUEL-ROSA, A.; CUNHA DOS ANJOS, L.H.; DE MATTOS VASQUES, G.; HEUVELINK, G.B.M.; PEBESMA, E.; SKOIJEN, J.; FRENCH, J.; ROUDIER, P.; BRUS, D. & LARK, M. (2017): R-Package 'spsann'. Optimization of Sample Configurations using Spatial Simulated Annealing. Version 2.1-0. pp. 42
- SIEGMANN, B., JARMER, T. (2015): Comparison of different regression models and validation techniques for the assessment of wheat leaf area index from hyperspectral data. *International Journal of Remote Sensing* 36(18): S. 4519-4534. DOI: 10.1080/01431161.2015.1084438
- SIEGMANN, B., JARMER, T., BEYER, F., & EHLERS, M. (2015): The Potential of Pan-Sharpended EnMAP Data for the Assessment of Wheat LAI. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs71012737>
- SILINSKI, A.; SCHOUTENS, K.; PUJALON, S.; SCHOELYNCK, J.; LUYCKX, D.; TROCH, P.; MEIRE, P. & TEMMERMAN, S. (2017): Coping with waves: Plasticity in tidal marsh plants as self-adapting coastal ecosystem engineers. *Limnology and Oceanography*, 1-17, <http://dx.doi.org/10.1002/lno.10671>.
- STRAATSMA, M.W.; WARMINK, J.J.; MIDDELKOOP, H. (2008): Two novel methods for field measurements of hydrodynamic density of floodplain vegetation using terrestrial laser scanning and digital parallel photography. *International Journal of Remote Sensing* 29(5): S. 1595-1617. DOI: 10.1080/01431160701736455
- STARK, J. (2016): Effects of intertidal ecosystems on estuarine hydrodynamics and flood wave attenuation: a multi-scale study.- Dissertation Univ. Antwerpen, 166 S. (=https://www.uantwerpen.be/en/rg/ecobe/research/phd/)
- TILLY, N.; KELTERBAUM, D.; ZEESE, R. (2016): Geomorphological mapping with terrestrial laser scanning and UAV-based imaging.- *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLI-B5, S. 591-597. DOI: 10.5194/isprsarchives-XLI-B5-591-2016.
- VAN DER LINDEN, S.; RABE, A.; HELD, M.; JAKIMOW, B.; LEITÃO, P.J.; OKUJENI, A.; SCHWIEDER, M.; SUESS, S.; HOSTERT, P. (2015): The EnMAP-Box—A Toolbox and Application Programming Interface for EnMAP Data Processing. *Remote Sensing* 2015, 7, 11249-11266.
- VAN IERSEL, W.K.; STRAATSMA, M.W.; ADDINK, E.A. ; MIDDELKOOP, H. (2016): Monitoring Phenology of Floodplain Grassland and Herbaceous Vegetation with UAV Imagery.- *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* Vol XLI-B7, S. 569 - 571 doi:10.5194/isprsarchives-XLI-B7-569-2016
- WANG, C. UND TEMMERMAN, S. (2013): Does biogeomorphic feedback lead to abrupt shifts between alternative landscape states?: An empirical study on intertidal flats and marshes.- *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 118 (1), 229-240
- WARMINK, J. (2007): Vegetation Density Measurements using Parallel Photography and Terrestrial Laser Scanning.- A Pilot Study in the Duursche en Gamerensche Waard.- 80 S.
- XIPING, W.; YAN, G.; XIYONG, W.; YUNTAO, M.; BAOGUO, L. (2008): Estimating photosynthetically active radiation distribution in maize canopies by a three-dimensional incident radiation model.- *Functional Plant Biology* 35, 867-875. DOI:10.1071/FP08054YUHENDRA, ALIMUDDIN, I., SUMANTYO, J. T. S., & KUZE, H. (2012): Assessment of pan-sharpening methods applied to image fusion of remotely sensed multi-band data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18, 165-175. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2012.01.013>

YSEBAERT, T.; YANG, S.L.; ZHANG, L.Q.; HE, Q.; BOUMA, T.J. & HERMAN, P.M.J. (2011): Wave attenuation by two contrasting ecosystem engineering salt marsh macrophytes in the intertidal pioneer zone. *Wetlands*, 31, 1043-1054, <http://dx.doi.org/10.1007/s13157-011-0240-1>.

ZAKŠEK, KL.; OŠTIR, K.; KOKALI, Ž (2011): Sky-View Factor as a Relief Visualization Technique. *Remote Sensing* 3: 398–415.

Anhang

Im Folgenden sind die Scatterplots aller Parameter für Balje und Hollerwettern dargestellt.

