

Masterarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades
„Master of Science (M.Sc.)“

**Ökophysiologischer Vergleich von biologischen
Bodenkrustentypen an den ehemaligen Tagebaustandorten
Schlabendorf und Welzow „Neuer Lugteich“**

**Ecophysiological comparison of types of biological soil crusts
on post-mining sites Schlabendorf and Welzow „Neuer
Lugteich“**

von

Stella Gypser
Matr.Nr. 2833541

Master-Studiengang Landnutzung und Wasserbewirtschaftung

Erstgutachter: Dr. habil. Thomas Fischer
Zweitgutachter: Dr. Maik Veste
Tag der Einreichung: 18. August 2014

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass diese Arbeit mit dem Titel „Ökophysiologischer Vergleich von biologischen Bodenkrustentypen an den ehemaligen Tagebaustandorten Schlabendorf und Welzow „Neuer Lugteich““ selbstständig verfasst wurde und keine anderen Quellen oder Hilfsmittel genutzt wurden als jene, die in der Arbeit benannt worden sind.

Datum

Unterschrift

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
1. Einleitung	1
2. Stand der Forschung	2
3. Material und Methodik	3
3.1 Untersuchungsgebiete	3
3.2 Probenahmedesign	7
3.3 Untersuchungsumfang	7
3.4 Bestimmung der Organismen	8
3.5 Physikalische Analyse	9
3.5.1 NDVI	9
3.5.2 Chlorophyllfluoreszenz	10
3.5.3 Gaswechsel	11
3.5.4 Repellency Index	12
3.5.5 Matrixpotential und Wassergehalt	13
3.6 Chemische Analyse	13
3.6.1 Chlorophyll	13
3.6.2 pH	14
3.6.3 C- und N-Gehalte	14
4. Ergebnisse	15
4.1 Welzow „Neuer Lugeich“	15
4.1.1 Bestimmung der Organismen	15
4.1.2 Ökophysiologische Parameter	17
4.1.2.1 Chlorophyll	17
4.1.2.1 NDVI	17
4.1.2.3 Chlorophyllfluoreszenz	22
4.1.2.4 Gaswechsel	26
4.1.2 Hydrologische Parameter	28
4.1.2.1 Repellency Index	28
4.1.2.2 Matrixpotential und Wassergehalt	28
4.1.3 Pedologische Parameter	31
4.1.3.1 pH	31

4.1.3.2 C-und N-Gehalte	32
4.2 Schlabendorf	34
4.2.1 Bestimmung der Organismen	34
4.2.2 Ökophysiologische Parameter	36
4.2.2.1 Chlorophyll	36
4.2.2.2 NDVI	36
4.2.2.3 Chlorophyllfluoreszenz	40
4.2.2.4 Gaswechsel	43
4.2.3 Hydrologische Parameter	44
4.2.3.1 Repellency Index	44
4.2.3.2 Matrixpotential und Wassergehalt	45
4.2.4 Pedologische Parameter	47
4.2.4.1 pH	47
4.2.4.2 C- und N-Gehalte	48
5. Diskussion	49
5.1 Bestimmung der Organismen	49
5.2 Ökophysiologische Parameter	51
5.2.1 Chlorophyllgehalt	59
5.2.2 NDVI	53
5.2.3 Chlorophyllfluoreszenz	56
5.2.4 Gaswechsel	59
5.3 Hydrologische Parameter	64
5.3.1 Repellency Index	64
5.3.2 Matrixpotential und Wassergehalt	66
5.4 Pedologische Parameter	69
5.4.1 pH	69
5.4.2 C-und N-Gehalte	71
5.5 Vergleich der Daten von 2009, 2013 und 2014	73
5.5.1 Schlabendorf	73
5.5.2 Lugteich	76
6. Zusammenfassung	79
7. Fazit	82
Literatur	84
Danksagung	93

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abbildung 1. Geografische Lage der untersuchten Standorte	3
Abbildung 2. Beprobungsstandort Welzow „Neuer Lugteich“	4
Abbildung 3. Übersicht Beprobungsstandort Welzow „Neuer Lugteich“	5
Abbildung 4. Beprobungsstandort Schlabendorf	6
Abbildung 5. Übersicht Beprobungsstandort Schlabendorf	6
Abbildung 6. a) Küvette mit Beleuchtung für Photosynthese, b) abgedunkelte Küvette für Respiration	11
Abbildung 7. Übersicht der Krustenproben Welzow „Neuer Lugteich“	16
Abbildung 8. a) <i>Ceratodon purpureus</i> , <i>Zygonium spec.</i> und <i>Ulothrix spec.</i> in BSC 3 und 4, b) durch Algenfilamente vernetzte Sandpartikel in BSC 1, c) <i>Zygonium spec.</i>	16
Abbildung 9. Chlorophyll a und b-Gehalte der Krustenproben Welzow „Neuer Lugteich“	17
Abbildung 10. NDVI-Werte der Krustenproben Welzow „Neuer Lugteich“	18
Abbildung 11. NDVI-Aufnahmen der Probenahmestellen Welzow „Neuer Lugteich“	19
Abbildung 12. NDVI-Aufnahmen der Krustenproben Welzow „Neuer Lugteich“	21
Abbildung 13. Mittlere Chlorophyllfluoreszenz (F_0 , F_m) und Effizienz (F_v/F_m) der Krustenproben Welzow „Neuer Lugteich“	23
Abbildung 14. F_0 und F_m der Chlorophyllfluoreszenzmessung der Krustenproben Welzow „Neuer Lugteich“	26
Abbildung 15. Mittlerer CO_2 -Austausch der Krustenproben Welzow „Neuer Lugteich“	27
Abbildung 16. BP/R-Verhältnis der Krustenproben Welzow „Neuer Lugteich“	27
Abbildung 17. Repellency Index der Krustenproben Welzow „Neuer Lugteich“	28
Abbildung 18. Stechzylinder mit Flechten und Moos der Krustenprobe 6 Welzow „Neuer Lugteich“	29
Abbildung 19. pFWG-Kurven der Substrat- und Krustenproben Welzow „Neuer Lugteich“	30
Abbildung 20. pH-Werte der Substrat- und Krustenproben Welzow „Neuer Lugteich“	32

Abbildung 21.	C- und N-Gehalte der Substrat- und Krustenproben Welzow „Neuer Lugeich“	33
Abbildung 22.	Übersicht der Krustenproben Schlabendorf	35
Abbildung 23.	a) <i>Ceratodon purpureus</i> und <i>Anthoceros levis</i> in BSC 1 Schlabendorf, b) <i>Placynthiella oligotropha</i> in BSC 3 und <i>Polytrichum piliferum</i> in BSC 4 Schlabendorf	35
Abbildung 24.	Chlorophyll a und b-Gehalte der Krustenproben Schlabendorf	36
Abbildung 25.	NDVI-Werte der Krustenproben Schlabendorf	37
Abbildung 26.	NDVI-Aufnahmen der Probenahmestellen Schlabendorf	38
Abbildung 27.	NDVI-Aufnahmen der Krustenproben Schlabendorf	39
Abbildung 28.	Mittlere Chlorophyllfluoreszenz (F_0 , F_m) und Effizienz (F_v/F_m) der Krustenproben Schlabendorf	40
Abbildung 29.	F_0 und F_m der Chlorophyllfluoreszenzmessung der Krustenproben Schlabendorf	42
Abbildung 30.	Mittlerer CO_2 -Austausch der Krustenproben Schlabendorf	43
Abbildung 31.	BP/R-Verhältnis der Krustenproben Schlabendorf	44
Abbildung 32.	Repellency Index der Krustenproben Schlabendorf	45
Abbildung 33.	Stechzylinder mit Flechten und Moos der Krustenprobe 4 Schlabendorf	45
Abbildung 34.	pF-Kurven der Substrat- und Krustenproben Schlabendorf	46
Abbildung 35.	pH-Werte der Substrat- und Krustenproben Schlabendorf	47
Abbildung 36.	C- und N-Gehalte der Substrat- und Krustenproben Schlabendorf	48
Abbildung 37.	Korrelation zwischen totalem C-Gehalt und Chlorophyllgehalt an den Standorten Schlabendorf und Welzow „Neuer Lugeich“	52
Abbildung 38.	Grafischer Zusammenhang zwischen Artenausprägung und Chlorophyll a-Gehalt der Bodenkusten in Schlabendorf und Welzow „Neuer Lugeich“	52
Abbildung 39.	Korrelation zwischen NDVI und Chlorophyll a-Gehalt der Standorte Schlabendorf und „Neuer Lugeich“	54
Abbildung 40.	a) <i>Polytrichum piliferum</i> in BSC 4 Schlabendorf, b) <i>Ceratodon purpureus</i> BSC 6 „Neuer Lugeich“	54
Abbildung 41.	Korrelation zwischen Netto-Photosynthese und NDVI der Standorte Schlabendorf und „Neuer Lugeich“	55

Abbildung 42.	a) Beziehung zwischen NDVI und Netto-Photosynthese befeuchteter BSC Lieberose (T = 28°C) von Fischer et al. (2012), b) Korrelation zwischen NDVI und Netto- Photosynthese Welzow „Neuer Lugteich“	56
Abbildung 43.	Grund- und Maximalfluoreszenz der Bodenkruste 3 Welzow „Neuer Lugteich“	57
Abbildung 44.	Korrelation zwischen F_v/F_m und NDVI der Standorte Schlabendorf und „Neuer Lugteich“	58
Abbildung 45.	Grafischer Zusammenhang von Chlorophyll a-Gehalte, Netto-Photosynthese und Respiration der Standorte Schlabendorf und „Neuer Lugteich“	60
Abbildung 46.	a) Polarisationsmikroskopie angeschwollener Exopolymere nach Wasserkontakt von Fischer et al. (2010), b) Lufttrockene <i>Zygonium spec.</i> Bodenkruste, c) Lichtmikroskopie <i>Zygonium spec.</i> lufttrocken, d) Polarisationsmikroskopie <i>Zygonium spec.</i> lufttrocken, e) Lichtmikroskopie <i>Zygonium spec.</i> feucht, f) Polarisationsmikroskopie <i>Zygonium spec.</i> feucht	66
Abbildung 47.	Vernetzte Sandpartikel durch <i>Zygonium spec.</i> und <i>Placynthiella oligotropha</i> in Bodenkruste 3 Schlabendorf	67
Abbildung 48.	Korrelation zwischen Respiration und pH des Krustensubstrates von Schlabendorf und Welzow „Neuer Lugteich“	70
Abbildung 49.	Korrelation zwischen C-Gehalt (total, organisch) und Chlorophyll a-Gehalt der Bodenkrustenproben Schlabendorf von 2009, 2013 und 2014	74
Abbildung 50.	Korrelation zwischen Chlorophyll a-Gehalt und pH des Substrates von 2009, 2013 und 2014	75
Abbildung 51.	Korrelation zwischen C-Gehalt (total, organisch) und pH des Substrates von 2009, 2013 und 2014	75
Abbildung 52.	pF-Kurven der Bodenkrustenproben von 2013 und 2014	76
Abbildung 53.	Korrelation zwischen Chlorophyll a-Gehalt und pH des Substrates von 2009 und 2014	77
Abbildung 54.	Repellency Index der Bodenkrusten von 2009 und 2014	77

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 1. Einteilung der Krustentypen nach ihrer Dicke und Ausprägung	7
Tabelle 2. Bestimmungsliteratur Krustenorganismen	8
Tabelle 3. Charakterisierung der Krustenorganismen	9
Tabelle 4. Arteninventur Welzow „Neuer Lugteich“	15
Tabelle 5. Arteninventur Schlabendorf	34

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
°C	Grad Celsius
a	Jahr
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BPR	Brutto-Photosyntheserate
BSC	Biological Soil Crust (Biologische Bodenkruste)
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
C	Kohlenstoff
ca.	circa
Chl	Chlorophyll
cm	Zentimeter
CO ₂	Kohlendioxid
d.h.	das heißt
DTAD	Deutscher Auftragsdienst
DWD	Deutscher Wetterdienst
H ₂ CO ₃	Dihydrogencarbonat
H ₂ O	Dihydrogenmonoxid
ha	Hektar
hPa	Hektopascal
KA 5	Bodenkundliche Kartieranleitung 5
LMBV	Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH
m	Meter
m ²	Quadratmeter
mg	Milligramm
min	Minute
Mio	Million
mm	Millimeter
N	Stickstoff
nm	Nanometer
NP	Netto-Photosynthese
NPR	Netto-Photosyntheserate
NW	Nord-West

ø	Durchmesser
pF	Saugspannung
R	Respiration
s	Sekunde
S	Substrat
SO	Süd-Ost
SW	Süd-West
t	Tonne
W	West
WHK _{max}	maximale Wasserhaltekapazität
μmol	Mikromol

1. Einleitung

In der Praxis der Braunkohlegewinnung im Lausitzer Tagebaurevier wurden natürlich gewachsene Böden in den betroffenen Gebieten zerstört. Der verbleibende Abraum besteht überwiegend aus quarzreichen, basenarmen Substraten tertiären und quartären Ursprungs. In der Folge entwickeln sich aus den verkippten Substraten vergleichsweise nährstoffarme Rohböden (QUINKENSTEIN et al. 2011). Die ersten Pioniere auf der neuen Bodenoberfläche nach Störungen (VESTE 2005) sind zumeist Grünalgen, Moose, Lebermoose, Flechten und Bakterien, welche die obersten Bodenpartikel vernetzen und somit durch Akkumulation von organischer Biomasse biologische Bodenkrusten ausbilden (BÜDEL 2003).

Biologische Bodenkrusten stabilisieren die durch spärliche Vegetation gekennzeichneten Rekultivierungsflächen (SPRÖTE et al. 2009) und wirken somit erosionshemmend (VESTE 2005). Auch beeinflusst die Entwicklung der oberen Bodenschicht die Hydrologie und Wasserumverteilung, wodurch die Rolle der Bodenkrustenorganismen bei einer Rehabilitation von gestörten Ökosystemen diskutiert wird. Bisher konnte gezeigt werden, dass biologische Krusten Einfluss auf Ökosystemfunktionen und Bodenentwicklung nehmen (VESTE 2005).

Besonders in ariden und semi-ariden Gebieten wurden verschiedene Typen von Bodenkrusten gründlich untersucht, allerdings bedeutet das Zusammenwirken von unterschiedlichen Organismen nicht zwangsläufig, dass alle im gleichen Maße den Charakter von Krusten mitbestimmen (BÜDEL et al. 2013). Daher soll in dieser Arbeit untersucht werden, ob auf zwei Rekultivierungsstandorten bei ähnlichen Ausgangsbedingungen verschiedenartige Bodenkrustentypen identifiziert werden können. Aufgrund der unterschiedlichen Rekultivierungszeiten, Topografie sowie Substrateigenschaften der Untersuchungsgebiete wird auch geschaut, ob sich die Krustentypen hinsichtlich ihrer Artenausprägung und den damit verbundenen Eigenschaften divergent entwickelt haben. Des Weiteren sollen ökophysiologische Parameter der Photosynthese verknüpft und deren Bedeutung für die Funktion und Charakterisierung der Bodenkrusten untersucht werden. Welche Bedeutung haben biologische Bodenkrusten für den Kohlenstoffhaushalt der Böden und welche Rolle spielen dabei Photosynthese und Respiration? Zuletzt soll festgestellt werden, ob und wie die kleinräumige Mosaikstruktur der Bodenkrusten die Hydrologie sowie Funktion und Aktivität der Krustenorganismen beeinflusst.

2. Stand der Forschung

Über den Aufbau und die Eigenschaften von Bodenkrusten und Pionierorganismen wurde sowohl auf natürlich gewachsenen Böden (HOLZINGER et al. 2010, CABALA et al. 2010, BÜDEL 2003) als auch auf gestörten Landschaften (VESTE 2005, SPRÖTE et al. 2009) geforscht. Bodenkrusten können durch vermehrtes Algenwachstum infiltrationshemmend wirken, indem entweder durch Porenverschluss oder extrazelluläre Polymere (NEVO & MITCHELL 1967, KATZNELSON 1989, MAZOR et al. 1996, KIDRON et al. 1999, MALAM ISSA et al. 2009, HOPPERT et al. 2010, FISCHER et al. 2010, ROSSI et al. 2012, CHEN et al. 2014, COLICA et al. 2014) die Infiltration der Krusten herabgesetzt wird. Somit beeinflussen sie bereits im anfänglichen Entwicklungsstadium die hydrologischen Bodenprozesse eines Ökosystems (BELNAP 2006).

Auch wurden der Kohlenstoff- und Stickstoffhaushalt der Bodenkrusten (DRAHORAD & FELIX-HENNINGSSEN 2009, DÜMIG et al. 2013, BRANKATSCHK et al. 2013) untersucht. Um C-Fixierungsraten und die Rolle von Bodenkrusten im Kohlenstoffhaushalt der Ökosysteme bei verschiedenen Krustenzusammensetzungen zu ermitteln, wurden zum einen Netto-Photosyntheseraten von kompletten Bodenkrusten als auch einzelnen Krustenorganismen bestimmt (LANGE et al. 1994, LANGE et al. 1995, LANGE et al. 1997, LANGE et al. 1998, LANGE & GREEN 2003, LANGE 2003, BÜDEL et al. 2013). Zum anderen kann über Fluoreszenzmessungen die Effektivität der photosynthetischen Leistung der Krustenorganismen quantifiziert werden. Allerdings wurden Chlorophyllfluoreszenzmessungen in ariden Gebieten (DEMMING-ADAMS et al. 1990, SCHROETER et al. 1992, HOUSMAN et al. 2006) oder der Antarktis (POST 1990, SCHLENSOG 2000) durchgeführt und Abweichungen in der Quantenausbeute mit Lichtstress begründet.

Auch viele andere Untersuchungen an Bodenkrusten fanden in ariden und semi-ariden Gebieten statt, welche andere klimatische Bedingungen, Böden (GERWIN et al. 2009, MANHENKE et al. 2010, QUINKENSTEIN et al. 2011) und somit Krustenorganismenzusammensetzungen aufweisen als die Rekultivierungsflächen der Lausitz. Auf den ehemaligen Tagebauflächen wurden bisher weniger Untersuchungen durchgeführt (SPRÖTE et al. 2009, SPRÖTE et al. 2010, SPRÖTE 2013), zusätzliche Messungen wurden an einer natürlich gewachsenen Sanddüne in Lieberose (FISCHER et al. 2010, FISCHER et al. 2012) vorgenommen. Vor allem in Lieberose konnten bereits Netto-Photosyntheseleistung und NDVI genauer untersucht werden.

3. Material und Methodik

3.1 Untersuchungsgebiete

Die Probenahmen der Bodenkrusten fanden auf dem Rekultivierungsgebiet des ehemaligen Tagebaus Schlabendorf-Süd ($51^{\circ}46'7.07''$ N, $13^{\circ}44'27.70''$ E) sowie einem künstlichen Wassereinzugsgebiet in Welzow, dem „Neuer Lugteich“ ($51^{\circ}35'53.00''$ N, $14^{\circ}17'23.20''$ E), statt. Beide Untersuchungsstandorte liegen ca. 42 km Luftlinie (NW - SO) auseinander (Abb.1), es herrscht eine mittlere Jahrestemperatur von $9,3^{\circ}\text{C}$ sowie eine mittlere Niederschlagssumme von 581 mm/a (Mittelwerte für den Zeitraum 1981 bis 2010) (DWD & BMVI 2014). Die vorherrschende Windrichtung ist W-SW (WindFinder 2014).

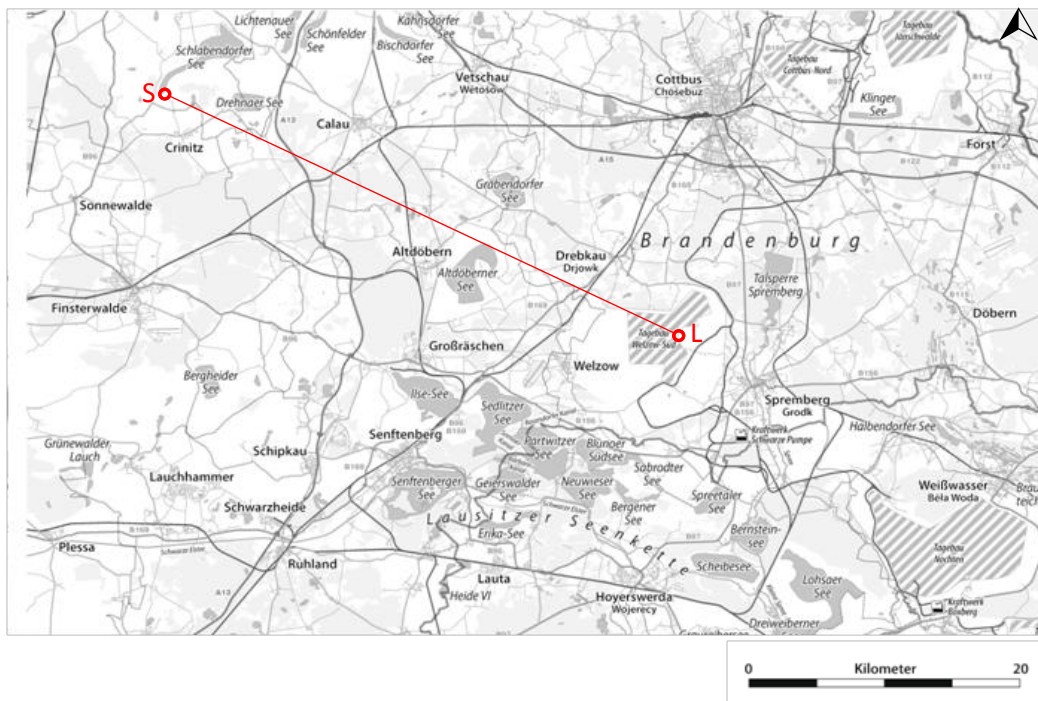


Abbildung 1. Geografische Lage der untersuchten Standorte (S - Schlabendorf, L - Lugteich) (nach DÖRRBECKER 2009)

Welzow „Neuer Lugteich“

Bei dem Standort „Neuer Lugteich“ handelt es sich um eine künstliche Sanddüne im Tagebau Welzow-Süd (Vattenfall Europe Mining AG 2012, SPRÖTE et al. 2010) (Abb.2), welche 2001 durch Bergbaugroßtechnik künstlich aufgebaut wurde und natürlich als Einzugsgebiet für Gewässer und Feuchtgebiete wirkt (KENDZIA et al. 2008, Vattenfall Europe Mining AG

2012). Das Einzugsgebiet erstreckt sich über etwa 4,3 ha zuzüglich ca. 0,7 ha Oberflächengewässer und besteht aus einer 1 bis 2 m mächtigen stauenden, tertiären Tonschüttung sowie einer 0 bis 2 m mächtigen Sandschüttung aus quartärem und tertiärem Material. Ziele des Gebietsaufbaus waren unter anderem die Definition technologischer Ansätze für den Aufbau von Einzugsgebieten für Fließgewässer in Bergbaufolgelandschaften, Biomonitoring sowie eine Erfolgskontrolle für die Revitalisierung der Bergbaufolgelandschaft (KENDZIA et al. 2008).

Die Probenahme am Standort Welzow „Neuer Lugteich“ fand am 19.03.2014 statt. Es war bewölkt und vor sowie während der Probenahme regnerisch, die Lufttemperatur betrug 10°C. In der Umgebung der offenen Sanddüne bestand die Hauptvegetation aus einzelnen *Pinus sylvestris*, *Juniperus*, *Schisandra* sowie diversen Gräsern wie *Corynephorus* oder *Koeleria* (SPRÖTE 2013).



Abbildung 2. Beprobungsstandort Welzow „Neuer Lugteich“ (Google Earth 2014)

Insgesamt wurden sechs Bodenkrustenproben und zwei Substratproben als Kontrollgruppe genommen. Die Bodenkrusten wurden anhand ihres Entwicklungszustandes, also von Krusten geringer Dicke, Deckung sowie Rauigkeit hin zu Krusten starker Ausprägung ausgewählt. Auch wurde entlang der Catena vom Kulminations- bis zum Tiefenbereich der Düne beprobt. Pro Krustentyp wurden für Analysen jeweils vier Proben erfasst. Die Substratproben 0 als

auch die Krustenproben 1 bis 5 befanden sich auf der Düne des „Neuen Lugeichs“ und verlaufen auf einer Breite von 6 m vom Dünenkamm ca. 9 m in Richtung Tiefenbereich. Krustenprobe L6 wurde etwa 25 bis 30 m südwestlicher unterhalb der Düne beprobt (Abb.3).

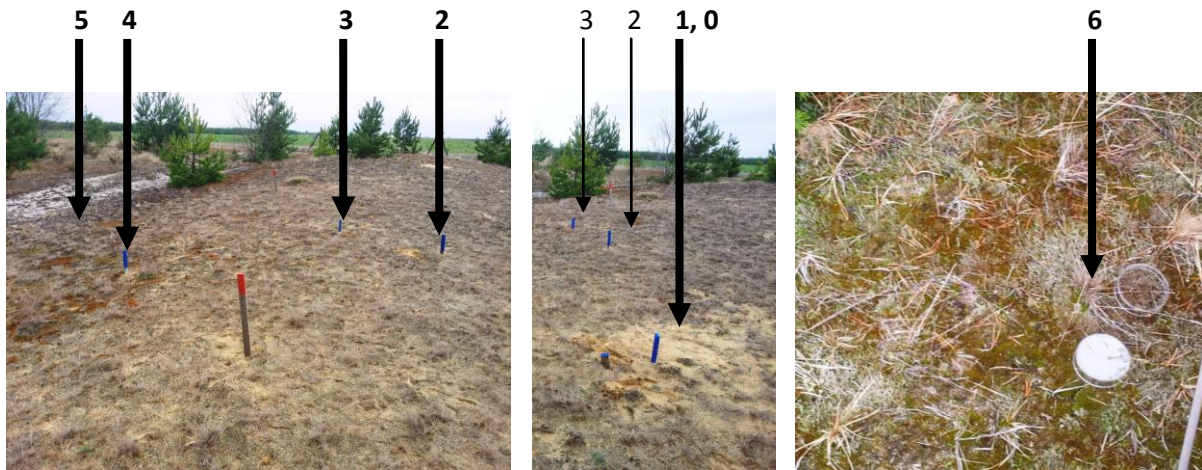


Abbildung 3. Übersicht Beprobungsstandort Welzow „Neuer Lugeich“

Schlabendorf

Der Probenahmestandort Schlabendorf liegt auf dem Gelände des ehemaligen Tagebaus Schlabendorf-Süd, welcher sich über eine Fläche von ca. 3.269 ha erstreckt (LMBV 2003). Die Kippe setzt sich zu 80% aus tertiärem und zu 20% aus quartärem Material zusammen. Der bindige Anteil beträgt nur etwa 1% (REICHEL & UHLMANN 1995). Seit 1991 laufen die Sanierungsarbeiten in Schlabendorf-Süd (LMBV 2012), somit dauert der Rekultivierungszustand bereits 10 Jahre länger an als in Welzow „Neuer Lugeich“. Hauptziele der Sanierung sind die Wiedernutzbarmachung der vom Bergbau beanspruchten Flächen sowie die Wiederherstellung und Normalisierung des Wasserhaushaltes. Derzeit findet auf dem beprobten Gelände überwiegend forstwirtschaftliche Nutzung statt (LMBV 2003).

Die Probenahme am Standort Schlabendorf (Abb.4 und 5) fand am 20.03.2014 statt und im Gegensatz zur Probenahme am „Neuen Lugeich“ vom Vortag war es trocken, sonnig und klar bei ca. 11 bis 12°C. Die Hauptvegetation bestand aus *Pinus sylvestris*, *Betula* sowie diversen Gräsern.

Anders als am Standort Welzow „Neuer Lugeich“ wurden in Schlabendorf aufgrund ihres Entwicklungszustandes nur vier Krustenproben identifiziert, welche kleinräumig verteilt waren. Die Krusten nehmen in ihrer Ausprägung von Dicke, Deckungsgrad und Rauigkeit zu.

Die Krustenproben 1 bis 3 und die Substratprobe 0 wurden auf einer Fläche von 1 m x 4 m erfasst, Probe 4 befand sich ca. 9 m entfernt zwischen einer *Betula*-Anpflanzung.



Abbildung 4. Beprobungsstandort Schlabendorf (Google Earth 2014)

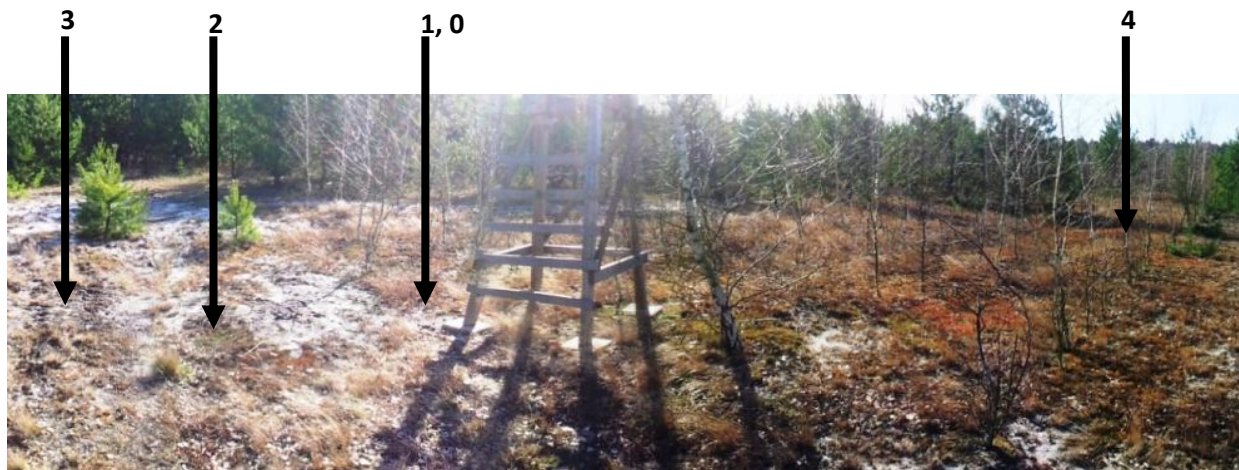


Abbildung 5. Übersicht Beprobungsstandort Schlabendorf

3.2 Probenahmedesign

Die Bodenkrusten wurden hinsichtlich ihrer Dicke und ökologischen Ausprägung unterschieden. L0 bzw. S0 markieren dabei die Substrat-Kontrollproben. Diese wurden in einigen Zentimetern Tiefe genommen, um zwar den Untergrund für vergleichende Analysen heranziehen zu können, aber gleichzeitig eine Beeinflussung durch phototrophe Organismen auszuschließen. Ab L1/S1 nehmen die Krustendicke sowie die ökologische Ausprägung der Krustenorganismen zu. Während der initialen Krustenbildung vernetzen Algenfilamente die Sandpartikel und füllen die Matrixporen partiell aus. Mit zunehmendem Krustenwachstum nimmt der Anteil an Algen und Pilzhyphen zu und es kommt zur Ausbildung von Moosen sowie Flechten (FISCHER et al. 2010). L6 bzw. S4 kennzeichnen das Endstadium der Bodenkrustenentwicklung durch ausgeprägte Flechten und Moose.

Um die Standorte Schlabendorf und Lugteich bezüglich ihrer Bodenkrusten miteinander vergleichen zu können, wurde eine Einteilung der Krusten hinsichtlich ihrer Dicke, des Deckungsgrades sowie der Rauigkeit vorgenommen (Tab.1).

Tabelle 1. Einteilung der Krustentypen nach ihrer Dicke und Ausprägung

Krustentyp		Dicke	Deckung	Rauigkeit
L0	S0	-	-	-
L1	S1	sehr gering	sehr gering	sehr gering
L2	-	gering	gering	gering
L3	S2	mittel	mittel	mittel
L4	-	hoch	hoch	hoch
L5	S3	hoch	hoch	gering
L6	S4	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch

L - Neuer Lugteich, S - Schlabendorf

3.3 Untersuchungsumfang

Die Probenahmen wurden mit Petrischalen durchgeführt, um eine definierte und vergleichbare Fläche zu erhalten und um die Krustenproben nicht nachhaltig zu verändern und damit Einfluss auf mögliche Ergebnisse zu nehmen. Auch wurde zeitnah mit den zerstörungsfreien

Untersuchungen begonnen. Dazu gehören die Bestimmung der Organismen, Gaswechsellmessungen, Chlorophyllfluoreszenz mittels Imaging PAM, die Bestimmung der photosynthetischen Aktivität über NDVI, die Untersuchung des Repellency Index sowie die Erstellung der pF-Kurven. Um die Stoffwechselaktivitäten möglichst natürlich abbilden zu können, wurden die Proben direkt nach der Probenahme gewogen und der tägliche Wasserverlust ausgeglichen. Infolgedessen wurden ein Austrocknen und die daraus resultierende reduzierte Aktivität der Krusten verhindert.

Für die invasiven Analysen, welche nicht auf unversehrte Krustenproben angewiesen sind, konnten die jeweiligen Proben in Bodenkruste und darunterliegendes Substrat unterteilt werden. Für die einzelnen Teile der Gesamtprobe wurden im Labor der pH-Wert, die C- und N-Gehalte sowie der Gesamtchlorophyllgehalt bestimmt.

3.4 Bestimmung der Organismen

Für die Bestimmung der Organismen in den Bodenkrusten wurden ein Stereomikroskop (Zeiss Stemi 2000-CS) sowie ein Lichtmikroskop (Olympus BX60) für Detailuntersuchungen genutzt. Folgende Bestimmungsliteratur (Tab.2) kam dabei zum Einsatz:

Tabelle 2. Bestimmungsliteratur Krustenorganismen

Flechten	Moose	Algen
AICHELE & SCHWEGLER (1993) MOBERG & HOLMÅSEN (1992) WIRTH (1995) WIRTH & DÜLL (2000) WIRTH et al. (2013) a WIRTH et al. (2013) b WIRTH & KIRSCHBAUM (2014)	AICHELE & SCHWEGLER (1993) FRAHM & FREY (1992) WIRTH & DÜLL (2000)	GUIRY online (2014) KINROSS online (2012) LINNE VON BERG et al. (2012)

Um die Artmächtigkeit der unterschiedlich stark ausgeprägten Krusten genauer beschreiben zu können, wird in Anlehnung an die BRAUN-BLANQUET-Skala für Vegetationsaufnahmen (1964) folgende Einteilung vorgenommen (Tab.3). Da für Algen oder Flechten keine Einteilung in „Exemplare“ möglich ist, wird nur die jeweilige Gesamtdeckung berücksichtigt.

Tabelle 3. Charakterisierung der Krustenorganismen

Symbol	Individuenzahl und Deckung
1	selten, ein bis wenige Exemplare, sehr geringe Deckung
2	wenige Exemplare, geringe Deckung
3	mäßig viele Exemplare, höhere Deckung, einzeln oder in kleinen Gruppen wachsend
4	viele Exemplare, Flecken oder kleinere Polster bildend
5	sehr viele Exemplare, ausgedehntes Polster oder Teppich bildend

3.5 Physikalische Analyse

3.5.1 NDVI

Der **Normalized Differenced Vegetation Index** ist ein häufig angewandter Vegetationsindex und ein gebräuchliches Maß, welches Informationen über Dichte und photosynthetische Aktivität bzw. Vitalität eines Pflanzenbestandes liefert (DEFRIES & TOWNSHEND 1994, DICKE & KÜHBAUCH 2005). Gesunde Vegetation reflektiert im sichtbaren roten Spektralbereich relativ wenig und im darauf folgenden nahen Infrarotbereich relativ viel Strahlung. Die Reflexion im nahen Infrarotbereich ist auf die Anwesenheit von Chlorophyll zurückzuführen, d.h. je vitaler eine Pflanze bzw. Bodenkrustenorganismen, desto höher ist der Reflexionsgrad. Boden, Stein oder auch tote Vegetation zeigen somit keinen Unterschied des Reflexionsgrades in den Spektralbereichen (KARNIELI et al. 1996, JACOBI et al. 2006, BURGHEIMER et al. 2006).

Für die Betrachtung des NDVI wurden am Probenahmestandort sowie im Labor Fotos (Olympus Camedia 5000z mit Stativ) mit und ohne Infrarotfilter (Hoya R72 52 mm) (FISCHER et al. 2012) gemacht. Die NDVI- Berechnung lautet nach DICKE & KÜHBAUCH (2005):

$$NDVI = \frac{(NIR - VIS)}{(NIR + VIS)}$$

NIR kennzeichnet dabei die Reflexion den nahen Infrarotbereich von 800 bis 900 nm, VIS den sichtbaren Rotbereich von 600 bis 700 nm (JACOBI et al. 2006). Das konkrete Vorgehen wurde ausführlich in FISCHER et al. (2012) beschrieben.

3.5.2 Chlorophyllfluoreszenz

Als Fluoreszenz wird die kurzzeitige spontane Emission von Licht beim Übergang eines elektronisch angeregten Systems in einen Zustand niedrigerer Energie bezeichnet. Das abgegebene Licht ist im Normalfall energieärmer als das vorher absorbierte. Wird einem Molekül energiereiche Strahlung zugeführt, werden Elektronen aus ihren ursprünglichen Orbitalen herausgelöst und in unbesetzte Orbitale mit höherem Energiegehalt gehoben. Allerdings ist dieser angeregte Zustand instabil, wodurch das Elektron bereits nach Bruchteilen von Sekunden wieder in sein ursprüngliches Orbital zurückfällt. Dabei wird Energie als elektromagnetische Strahlung (Fluoreszenzlicht) frei, welches durch den Energieverlust langwelliger und energieärmer als das eingestrahlte Anregungslicht ist (VON WILLERT et al. 1995, BAURIEGEL 2012).

Bei der sogenannten Imaging **Pulse-Amplitude-Modulation** (Pulsamplitudenmodulation) wird die Fluoreszenz des Untersuchungsobjektes durch kurze, wenige Mikrosekunden dauernde Pulse amplitudenmodulierten Schwachlichts einer lichtemittierenden Diode (LED), die eine Peak-Wellenlänge von 655 nm aufweist, angeregt. Die angeregten kurzen Fluoreszenzpulse werden von einer, durch einen Langpaßfilter vor kurzwelligem Streulicht geschützten, schnellen PIN-Photodiode detektiert (VON WILLERT et al. 1995). So können Abbildungen photosynthetisch aktiver Bereiche, die flächenhafte Verteilung der Chlorophyllfluoreszenz-Parameter sowie räumlich-zeitliche Variationen erstellt werden (Heinz Walz GmbH 2005).

In die Untersuchung gehen die die Grundfluoreszenz (F_0), maximale Fluoreszenz (F_m), variable Fluoreszenz (F_v) sowie die Effizienz (Q_y) ein. F_0 stellt die minimale Fluoreszenz dar und beschreibt die Fluoreszenzemission der angeregten Chl a-Moleküle, bevor die Anregungsenergie die Reaktionszentren erreicht und ist somit unabhängig von photochemischen Vorgängen. F_m steht für die Fluoreszenz bei sättigender Lichtintensität, wobei das aktinische Licht sein Maximum erreicht. F_v beschreibt den Anstieg von F_0 bis F_m und ist dadurch eng mit den photochemischen Reaktionen verknüpft. Q_y (F_v/F_m) ist das Maß für die Effizienz, mit der die Anregungsenergie aus den Antennenkomplexen vom Photosystem II übernommen wird (VON WILLERT et al. 1995).

Die Messungen wurden mit Hilfe der FluorCAM 700MF (Photon Systems Instruments) sowie einer CCD-Kamera (SN-CCD 339, ebenfalls von PSI) durchgeführt. Das System wurde durch die Software FluorCAM 7 (PSI) gesteuert. Um die Proben beider Standorte auch visuell miteinander vergleichen zu können, wurde der Skalenbereich der Abbildungen an den

Minima und Maxima aller Krustenproben ausgerichtet. Der Skalenbereich umfasst somit eine Fluoreszenz von 0 bis 1150 [relative Einheit]. Vor der Untersuchung wurden die Proben angefeuchtet.

3.5.3 Gaswechsel

Nach VON WILLERT et al. (1995) wird unter Gaswechsel der Austausch von Gasen zwischen der Pflanze und der Umgebung verstanden. In dieser Untersuchung wird sich allerdings auf den Austausch von CO₂ beschränkt und der Netto-CO₂-Austausch der Bodenkrusten gemessen. In den Netto-CO₂-Austausch gehen sowohl CO₂-fixierende und CO₂-freisetzende Reaktionen (VON WILLERT et al. 1995) der Krustenorganismen sowie des darunterliegenden Substrates ein. Die Gesamtbilanz lautet demnach:

$$\text{Netto} - \text{CO}_2 - \text{Austausch BSC} = \\ \text{Bruttophotosynthese} - \text{Atmung (Photoautotrophe)} - \text{Atmung (Heterotrophe)}$$

Die Küvettentemperatur wurde auf 15°C festgelegt, der Taupunkt betrug 10°C, die relative Luftfeuchte 72%. Für die Gaswechsellmessungen wurden die Proben vor dem Messvorgang angefeuchtet, kleine Gräser mit Wurzel gründlich entfernt. Die Messung der Photosynthese erfolgte bei eingeschalteter Beleuchtung (Abb.6a) und einer konstanten Lichtintensität von ca. 300 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Für die Respirationmessungen wurde die Lichtquelle ausgeschaltet und die Küvette mit der darin enthaltenden Krustenprobe mittels Decken für mindestens 10 min verdunkelt (Abb.6b).

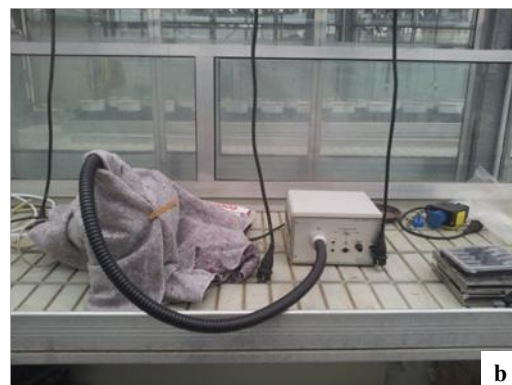


Abbildung 6. a) Küvette mit Beleuchtung für Photosynthese, **b)** abgedunkelte Küvette für Respiration

Aus den Daten der Netto-Photosynthese sowie der Respiration kann im Anschluss die Brutto-Photosyntheserate ermittelt werden. Pro Krustenstandort wurden jeweils vier Proben untersucht, Substratproben ausgenommen. Die Speicherung der Daten wurde vorgenommen, wenn die Probe einen steady-state-Zustand erreicht hat und die Photosynthese- bzw. Respirationsrate konstant verlief.

3.5.4 Repellency Index

Um die Benetzungseigenschaften der Bodenkrusten zu charakterisieren wurden die Sorptionseigenschaften von Ethanol im Vergleich zu Wasser gemessen, woraus der Repellency Index R_i als Kenngröße der Benetzungshemmung abgeleitet werden kann (HALLETT & YOUNG 1999, HARTMANN 2008).

Für die Berechnung des Repellency Index wurde die Mikroinfiltration der Krusten mittels Ethanol und Wasser bestimmt. Die Messung erfolgte nach HALLETT & YOUNG (1999), wobei über die Kapillarkwirkung des Bodens bzw. der Krusten Wasser/Ethanol aus einem Vorratsgefäß angesaugt wird. Die Gewichtsänderung der Probe beschreibt deren Infiltrationsverhalten. Aus diesen Ergebnissen lässt sich der Repellency Index nach folgender Gleichung ermitteln (HALLETT & YOUNG 1999):

$$R_i = 1,95 \cdot \frac{S_{Ethanol}}{S_{Wasser}}$$

S bezeichnet dabei die Sorptivität und berechnet sich aus dem konstanten Fluss Q (mg/s) wie folgt:

$$S = \sqrt{\frac{Qf}{4br}}$$

f = luftgefüllter Porenanteil

b = Parameter

r = Radius der Schwammkapillare in cm

Weist ein Boden einen R_i -Wert von $> 1,95$ wird von einer Benetzungshemmung ausgegangen, da die Infiltration von Wasser bei stark benetzungsgehemmten Böden gegen Null tendiert und

R_i gegen unendlich geht (HARTMANN 2008). Nicht in die Mikroinfiltrationsmessung wurden L6 und S4 mit den jeweiligen Endstadien der Bodenkrustenentwicklung einbezogen, da die Flechten und Moose bereits ein ausgeprägtes Höhenwachstum aufweisen und für die Messungen nicht geeignet sind.

3.5.5 Matrixpotential und Wassergehalt

Des Weiteren wurden die pF-Kurven der einzelnen Proben ermittelt. Sie beschreiben die funktionale Beziehung zwischen Bodenwassergehalt und Saugspannung und charakterisieren somit die Wasserspeichereigenschaften des Bodens (SCHEFFER et al. 2010), in diesem Fall der Bodenkrusten. Für die Bestimmung der Feuchtigkeitscharakteristik wurden die ungestörten Krustenproben mit einem Stechzylinder (\varnothing 3 cm) ausgestochen und gesättigten in eine sogenannte „Kaolinbox“ gesetzt. Über eine hängende Wassersäule wird ein Unterdruck erzeugt, bis sich ein Gleichgewicht einstellt. Jeder Feuchtigkeitsspannung (0 bis -200 hPa) wird durch Wiegen somit ein Feuchtigkeitsgehalt zugewiesen. Für die Berechnung der pF-Kurven wurden zusätzlich die lufttrockenen sowie die bei 60°C getrockneten Proben gewogen.

3.6 Chemische Analyse

3.6.1 Chlorophyll

Ebenfalls wurden die Gesamtgehalte an Chlorophyll a und b der photosynthetisch aktiven Bestandteile der Krusten gemessen. Da Chlorophylle die wichtigste Gruppe der Photosynthesepigmente ausmachen, können durch ihre Quantifizierung Aussagen zur Aktivität und ökologischen Ausprägung der Bodenkrusten getroffen werden.

Für die Bestimmung von Chlorophyll a und b wurden die Krusten gemörsert und mit 80%igem Aceton gesättigt. Nach einem Ultraschallbad wurden die Proben filtriert und der Absorptionsgrad mittels Lambda 2 Spektrometer von Perkin Elmer ermittelt, woraus die jeweiligen Chlorophyllgehalte berechnet wurden. In die Auswertung wurde nur Chl a einbezogen, da es ein photosynthetisch aktives Pigment ist und die Antenne für die

Absorption von Photonen bildet. Chl b hingegen dient lediglich als zusätzliches Pigment der Lichtsammlung, ist aber an der Energieumwandlung nicht direkt beteiligt (JÄGER et al. 2003).

Die reinen Substratproben dienen als Kontrolle und werden in die Untersuchung mit einbezogen.

3.6.2 pH

Der pH-Wert ist ein logarithmisches Maß für die Wasserstoffionenaktivität und beschreibt die Acidität eines Bodens. Er ist ein wichtiges Kriterium für dessen Reaktivität und gibt an, ob eine Boden sauer ($\text{pH} < 7$), neutral ($\text{pH} = 7$) oder alkalisch ($\text{pH} > 7$) ist. Der pH-Wert beeinflusst die chemischen, physikalischen und biologischen Bodeneigenschaften und wirkt sich somit besonders auf die Lebensbedingungen der Bodenorganismen sowie den Wasser- und Lufthaushalt aus (KA5) und erlaubt Aussagen über das Verhalten von Nähr- und Schadstoffen (SCHEFFER et al. 2010).

Für die beiden Standorte Schlabendorf und Welzow „Neuer Lugeich“ wurden der pH-Wert der Bodenkruste selbst und des unmittelbar darunterliegenden Substrates bestimmt. Dazu wurden die gemahlten Proben mit Aqua dest. im Verhältnis von 1:2,5 aufbereitet. Die Messung erfolgte im klaren Überstand.

3.6.3 C- und N-Gehalte

Um genauere Aussagen über Biokrumentypen und deren photosynthetisch aktive Biomasse treffen zu können, wurden die prozentualen Gesamtgehalte von organischem und anorganischem Kohlenstoff sowie Stickstoff per Elementaranalysator VARIO EL Micro Cube in den gemahlten Proben bestimmt. Dazu wurden die Bodenkruste und das jeweils darunterliegende Substrat separat betrachtet, um eine Verteilung in Ober- und Unterkruste zu untersuchen. Eine Unterscheidung in organische und anorganische Elementgehalte wurde nicht vorgenommen, so dass in Bezug auf die Krustenbiomasse nur relative Aussagen getroffen werden.

4. Ergebnisse

4.1 Welzow „Neuer Lugteich“

4.1.1 Bestimmung der Organismen

Die Arteninventur der Krustenproben auf dem Standort „Neuer Lugteich“ (Abb.7) ergab folgende Verteilung (Tab.4):

Tabelle 4. Arteninventur Welzow „Neuer Lugteich“

Bodenkruste	Art	Abundanz
1	Zygogonium spec.	1
	Ulothrix spec.	2
2	Ceratodon purpureus	2
	Zygogonium spec.	3
	Ulothrix spec.	3
3	Ceratodon purpureus	3 - 4
	Polytrichum piliferum	2
	Zygogonium spec.	3
	Ulothrix spec.	2
4	Cladonia glauca	2
	Ceratodon purpureus	3
	Polytrichum piliferum	2
	Zygogonium spec.	4
	Ulothrix spec.	1
5	Cladonia glauca	2
	Ceratodon purpureus	2 - 3
	Zygogonium spec.	5
6	Cladonia glauca	4 - 5
	Ceratodon purpureus	4 - 5

In den Krustenproben des „Neuen Lugteichs“ fanden sich überwiegend die Arten *Ceratodon purpureus*, *Zygogonium spec.* und *Ulothrix spec.* (Abb.8a). In Krustenprobe 1 kann die initiale Krustenbildung durch das Verkleben der Bodenpartikel durch Algenfilamente (FISCHER et al. 2010), überwiegend *Zygogonium spec.*, beobachtet werden (Abb.8b-c). Da keine weiteren Krustenorganismen in der Probe vorhanden sind, ist in BSC 1 nur eine geringe Inkrustation zu erkennen. Insgesamt nehmen die Artenanzahl sowie Deckung von BSC 1 bis BSC 4 zu. Das Algenwachstum schreitet ebenfalls fort und es werden kleinsträumige Teppiche gebildet, welche sich langsam vergrößern und in BSC 5 schließlich die komplette

obere Substratschicht vernetzen. In BSC 6 fanden sich in der finalen Krustenentwicklung nur noch recht ausgeprägte *Cladonia glauca* und *Ceratodon purpureus*, wodurch die Krustenproben als „*Ceratodon purpureus-Cladonia glauca*-Krusten“ charakterisiert werden können. In den Substratproben fanden sich wie erwartet keine Krustenorganismen.

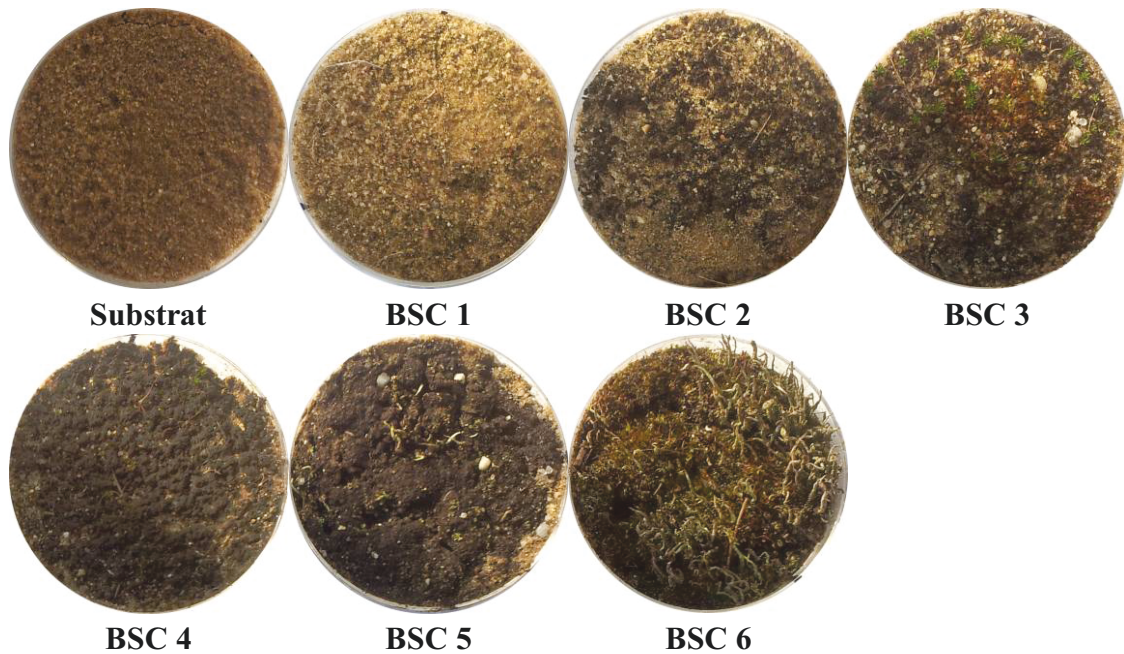


Abbildung 7. Übersicht der Krustenproben Welzow „Neuer Lugteich“

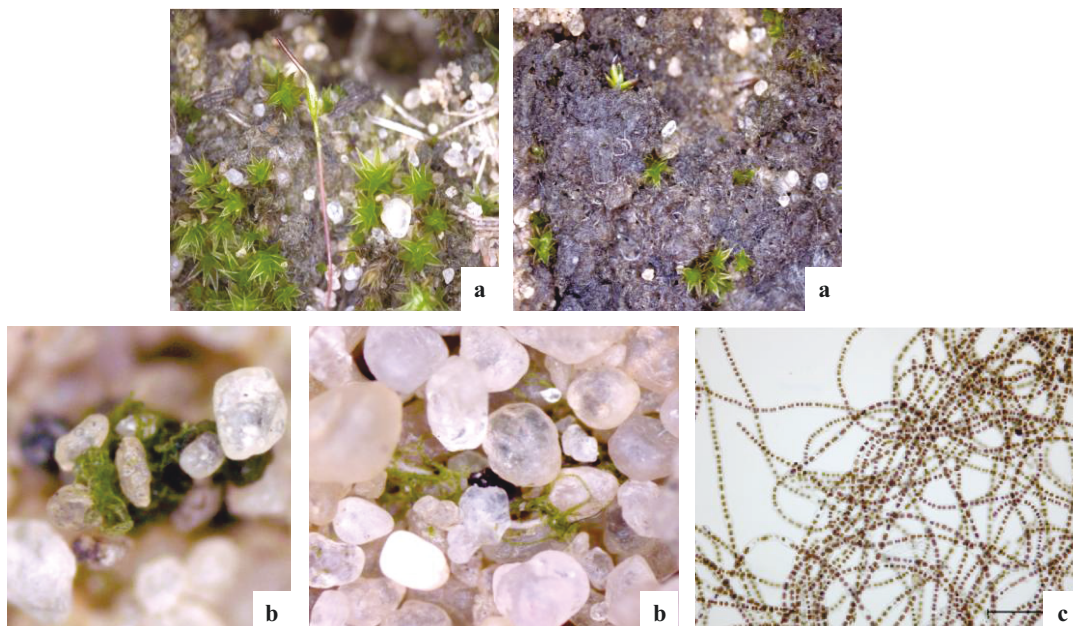


Abbildung 8. a) *Ceratodon purpureus*, *Zygonium spec.* und *Ulothrix spec.* in BSC 3 und 4, b) durch Algenfilamente vernetzte Sandpartikel in BSC 1, c) *Zygonium spec.*

4.1.2 Ökophysiologische Parameter

4.1.2.1 Chlorophyll

Auf der Düne des „Neuen Lugeichs“ steigen die Gehalte an Chlorophyll a von 2,50 mg/m² in BSC 1 über 16,36 mg/m² in BSC 2, 29,79 mg/m² in BSC 3, 30,27 mg/m² in BSC 4, 39,74 mg/m² in BSC 5 auf 49,30 mg/m² in BSC 6 kontinuierlich an. Durch die inhomogene Verteilung von Moosen oder Grünalgen kommt es zu variierenden Chlorophyllgehalten innerhalb einer Probe, welche in hohen Standardabweichungen, bspw. in BSC 3 und 5, resultiert. In der reinen Substratprobe, welche als Kontrolle dient und im Grunde keine phototrophen Organismen enthalten sollte, wurde eine geringe Menge Chl a (0,61 mg/m²) gemessen. Grund dafür könnten kleinste Mengen chlorophyllhaltige, vereinzelt Organismen sein. Im Ganzen ist festzustellen, dass der Chlorophyllgehalt mit zunehmender Inkrustation und Ausprägung phototropher Krustenorganismen ansteigt (Abb.9).

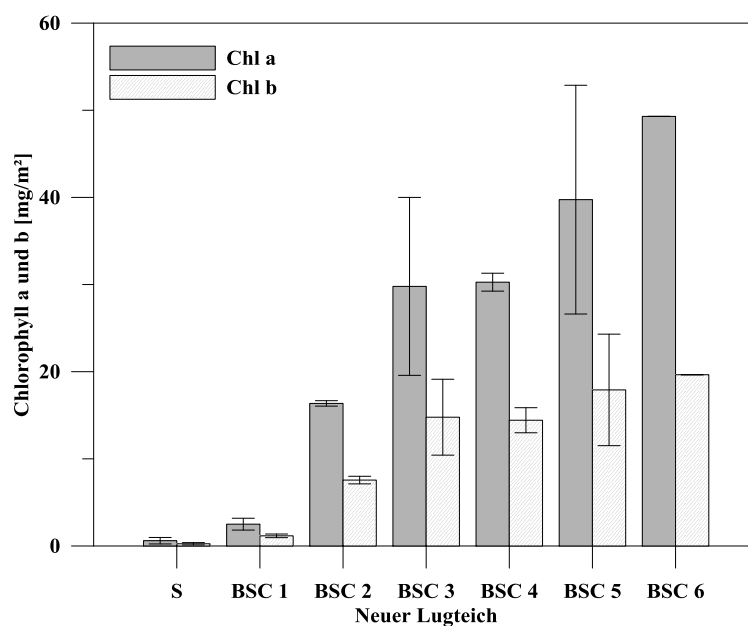


Abbildung 9. Chlorophyll a und b-Gehalte der Krustenproben Welzow „Neuer Lugeich“

4.1.2.1 NDVI

Mit Hilfe der NDVI-Messungen können die Krustenproben und ihre enthaltenen Organismen hinsichtlich des Vorhandenseins von Chlorophyll miteinander verglichen werden. Um die

einzelnen Bodenkrusten mittels NDVI gegenüberstellen zu können, wurden sowohl Fotos der Krustenstandorte und der separaten Krusten gemacht sowie deren Index bestimmt.

Am Standort Welzow „Neuer Lugteich“ steigt der mittlere NDVI von 0,16 in BSC 1 über 0,25 in BSC 2 auf 0,39 in BSC 3 (Abb.10). In Bodenkruste 4 sinkt der Wert mit 0,31 wieder etwas ab. Die Krusten 5 und 6 weisen mit 0,45 sowie 0,50 die höchsten NDVI-Werte auf.

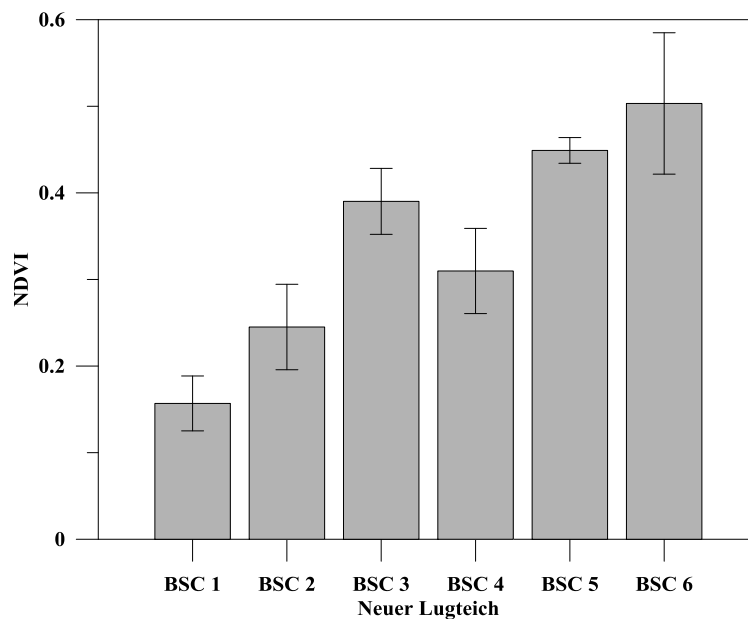
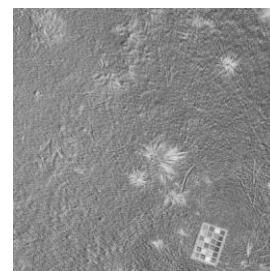


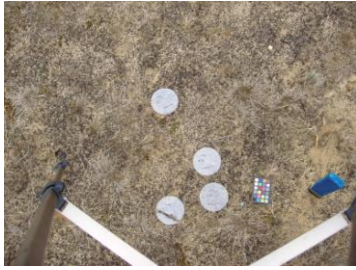
Abbildung 10. NDVI-Werte der Krustenproben Welzow „Neuer Lugteich“

Auch in den NDVI-Aufnahmen ist eine Zunahme des Chlorophyllgehaltes zu erkennen (Abb.11 und 12). Mit zunehmender Entwicklung reflektieren die Bodenkrusten stärker und besonders die flächenhaft zunehmende Ausbreitung der Grünalge *Zygonium spec.* ist zu erkennen. Zwischen *Zygonium spec.* und dem Moos *Ceratodon purpureus* lassen sich jedoch kaum bis keine optischen Unterschiede auszumachen. Dies fällt besonders in den BSC-Proben 5 auf.

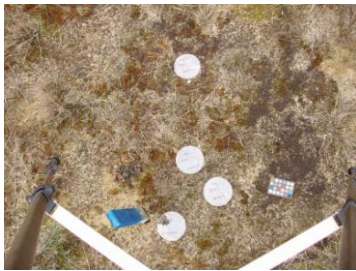
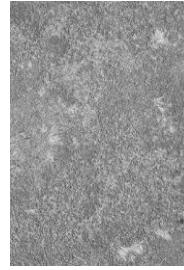
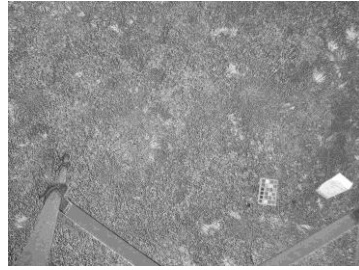


BSC 1

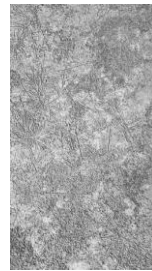
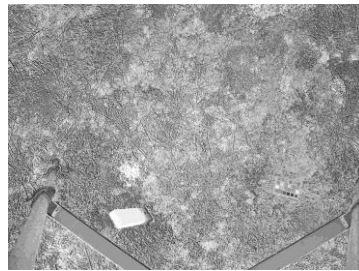




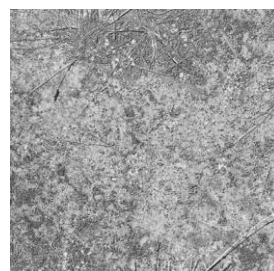
BSC 2



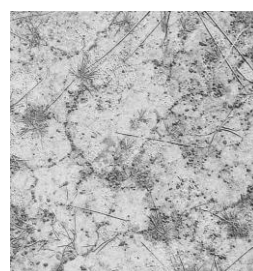
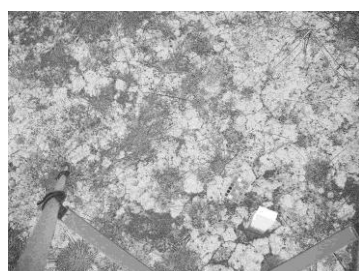
BSC 3



BSC 4



BSC 5



BSC 6

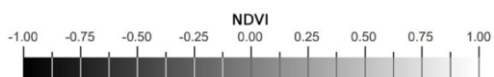
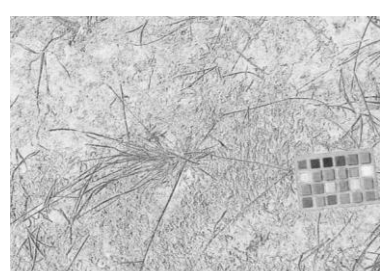
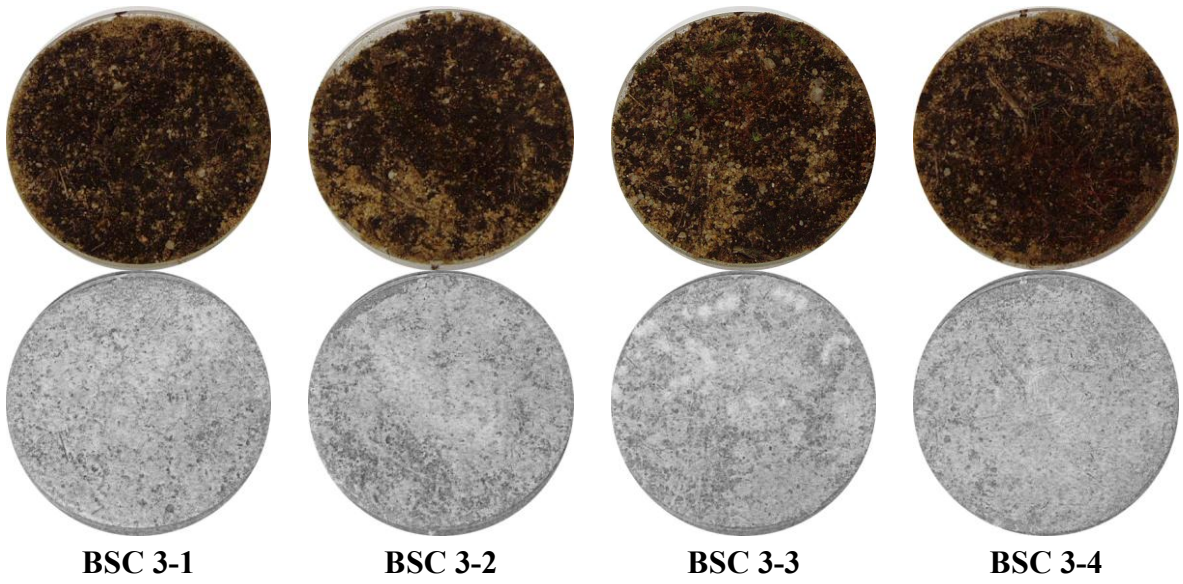
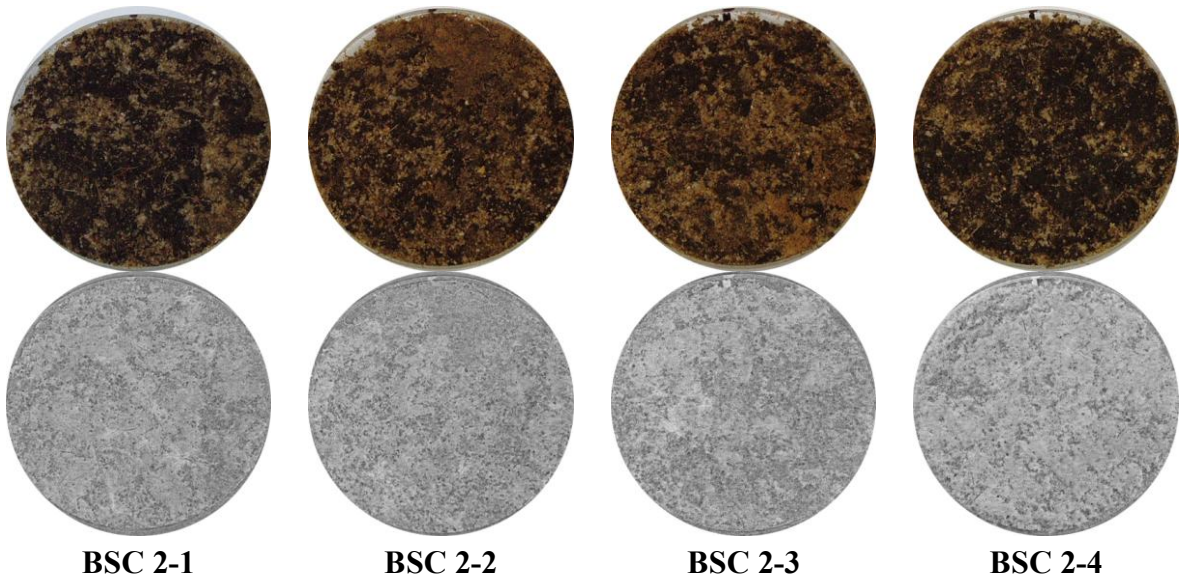
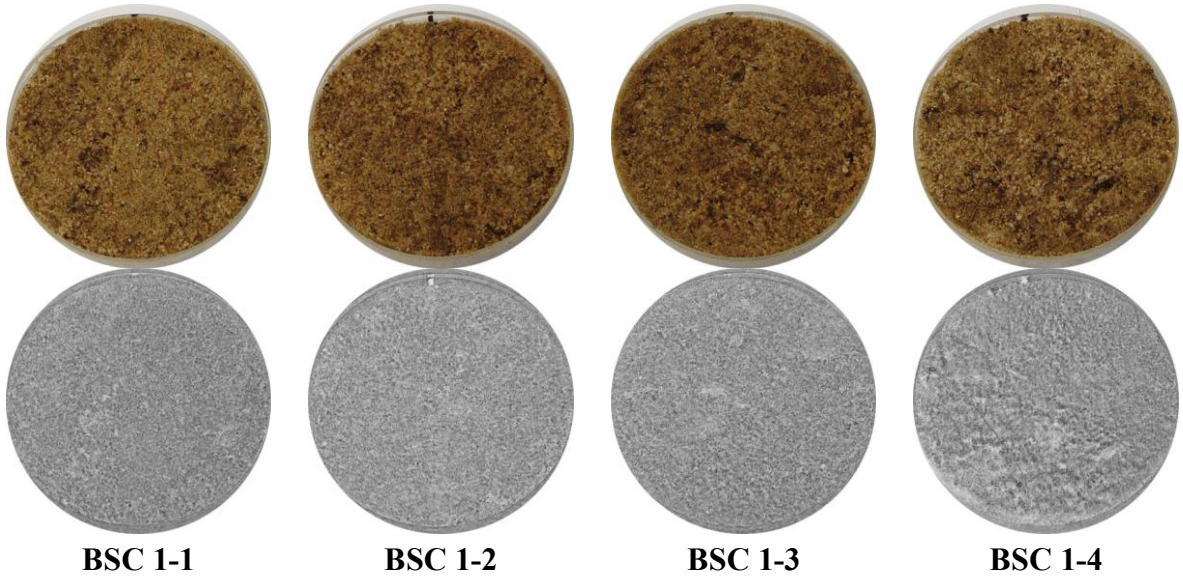
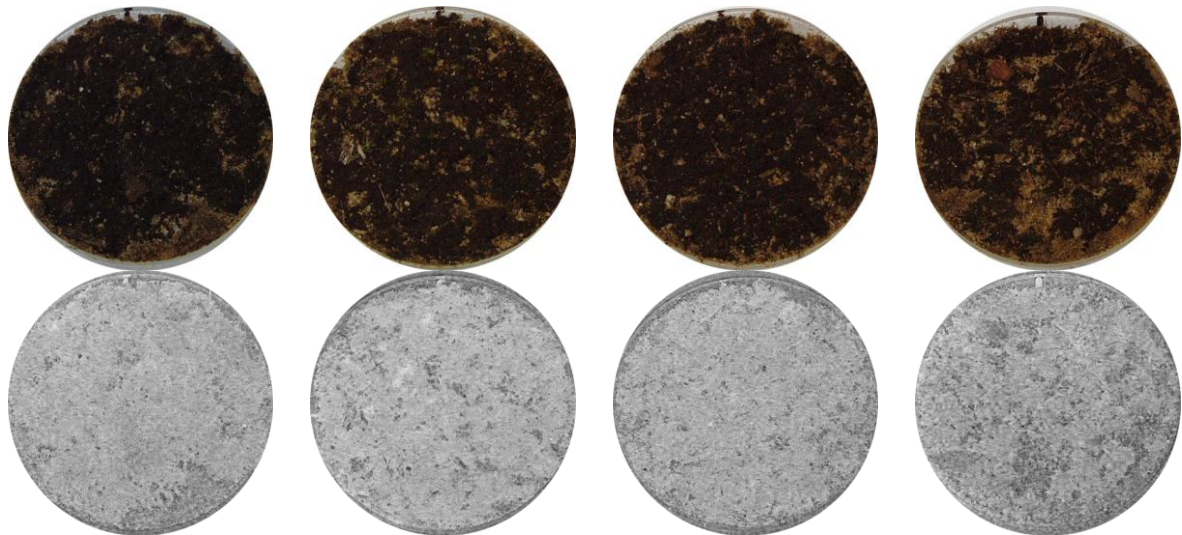


Abbildung 11. NDVI-Aufnahmen der Probenahmestellen Welzow „Neuer Lugteich“



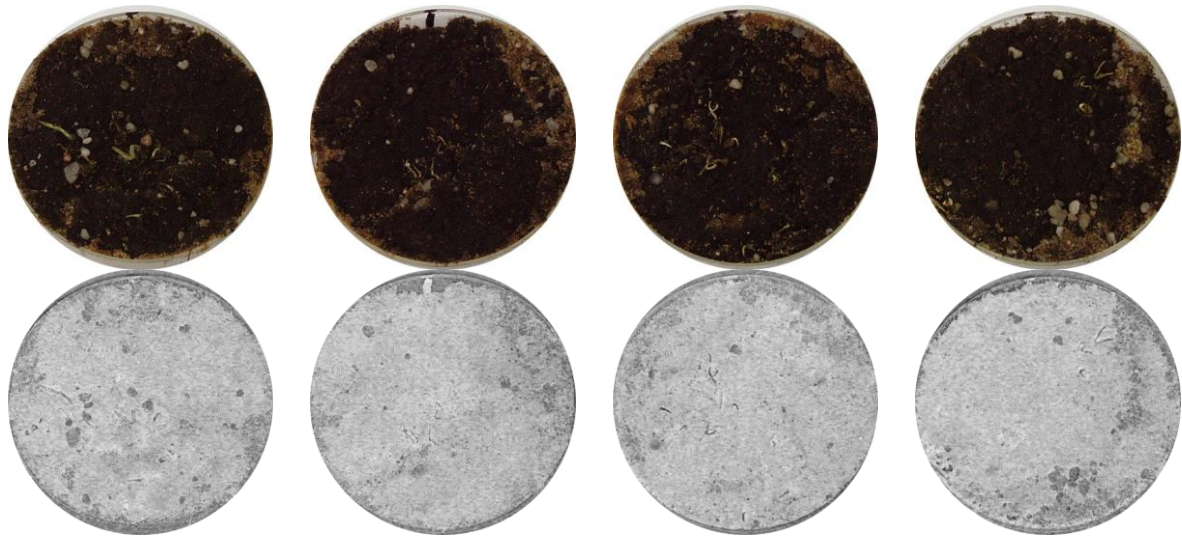


BSC 4-1

BSC 4-2

BSC 4-3

BSC 4-4

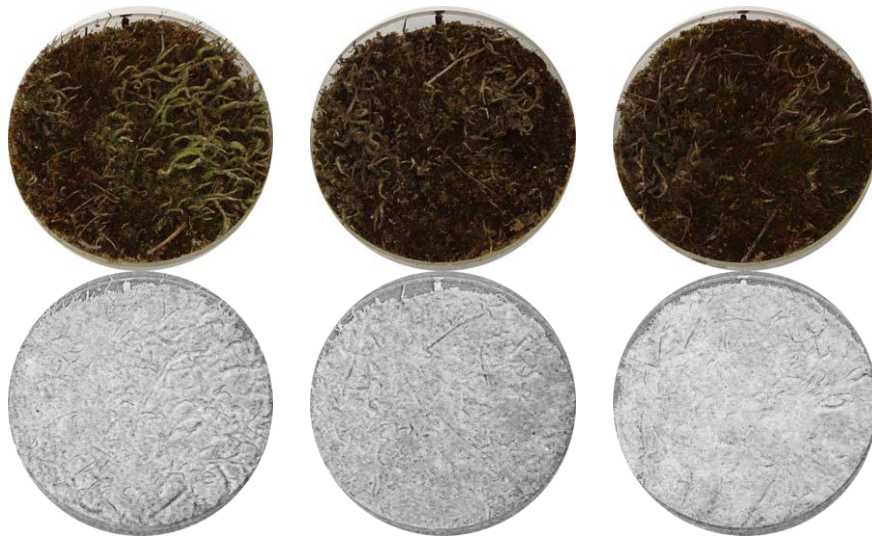


BSC 5-1

BSC 5-2

BSC 5-3

BSC 5-4



BSC 6-1

BSC 6-2

BSC 6-3

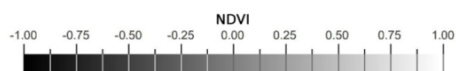


Abbildung 12.
 NDVI-Aufnahmen
 der Krustenproben
 Welzow „Neuer
 Lugteich“

4.1.2.3 Chlorophyllfluoreszenz

Per Imaging PAM wurde die Chlorophyllfluoreszenz der einzelnen Krustenproben bestimmt und optisch mit den Proben verglichen. Die Visualisierung der gemessenen Chlorophyllfluoreszenz der einzelnen Proben zeigt die aktiven Bereiche der Krustenproben an (Abb.14). Dabei ist zu erkennen, dass in allen Krustenproben von BSC 1 und 2 die Grundfluoreszenz sehr gering ausfällt (hier dunkelblau dargestellt). Durch die geringe Anzahl phototropher Organismen fällt F_0 in den Krustenproben 1 mit 22,98 am geringsten aus. BSC 2 liegt mit 23,41 nur leicht höher. In gleicher Reihenfolge ordnen sich die F_m -Werte an. BSC 1 und 2 weisen mit 90,03 und 108,51 die niedrigsten Werte auf (Abb.13).

In BSC 3 und 4 kommen in den Proben die Moose *Ceratodon purpureus* und *Polytrichum piliferum* dazu, was sich auch auf den Fluoreszenzbildern widerspiegelt. Die Bereiche mit den Moospflänzchen geben ein stärkeres Fluoreszenzsignal ab als die mit *Zygonium spec.* bewachsenen Flächen. Diese unterscheiden sich bis auf ihre flächenhafte Ausprägung nicht von den Bodenkrusten 1 und 2. In den Bodenkrusten 3 und 4 wurden demnach höhere F_0 -Werte von 59,83 und 29,24 sowie F_m -Wert von 277,22 und 150,10 gemessen.

In der Bodenkruste 5 nimmt die Deckung an Moosen ab, es kommen jedoch wenige Flechtenthalli von *Cladonia glauca* dazu. Auch *Zygonium spec.* überzieht fast die komplette Kruste bzw. bildet diese. Das Chlorophyllfluoreszenzsignal der Grünalgen verändert sich im Vergleich zu den Krusten 1 bis 4 nicht, jedoch fallen die Signale der Thalli und Moospflanzen stärker aus und sind in den Bildern heller dargestellt. Die F_0 - und F_m -Werte fallen mit 32,25 und 162,90 niedriger aus als in BSC 3, aber leicht höher als in BSC 4. Bodenkruste 6 besteht im Gegensatz zu den vorhergehenden Krusten fast ausschließlich aus *Cladonia glauca* und *Ceratodon purpureus*. Jedoch sind die Flechtenthalli nicht deutlich auszumachen und die stärkeren Fluoreszenzsignale werden von den Moospflanzen zwischen den Flechten erzeugt. Dennoch weist BSC 6 die höchsten F_0 - und F_m -Werte mit 71,21 und 307,94 auf. In den reinen Substratproben konnte keine photosynthetische Aktivität festgestellt werden.

Q_y ($= F_v/F_m$) als Maß der Effizienz, mit der die Anregungsenergie aus den Antennenkomplexen von offenen Reaktionszentren im Photosystem II übernommen wird (VON WILLERT et al. 1995), liegt bei den Bodenkrusten auf dem „Neuen Lugeich“ im Bereich zwischen 0,73 und 0,80. Dabei weisen BSC 1 mit 0,73 die niedrigste, BSC 4 und 5 mit 0,80

die höchste Effizienz auf. BSC 2 und 6 sowie BSC 3 liegen mit 0,77 bzw. 0,78 etwas darunter.

Aufgrund der gemessenen und grafischen Chlorophyllfluoreszenzsignale kann davon ausgegangen werden, dass, bei gleichen pedogenetischen, klimatischen und hydrologischen Bedingungen, die Grünalgen die niedrigste photosynthetische Aktivität aufweisen. Etwas mehr Vitalität zeigen die Strauchflechten. Die höchste Aktivität ist jedoch bei den Moosen zu erkennen.

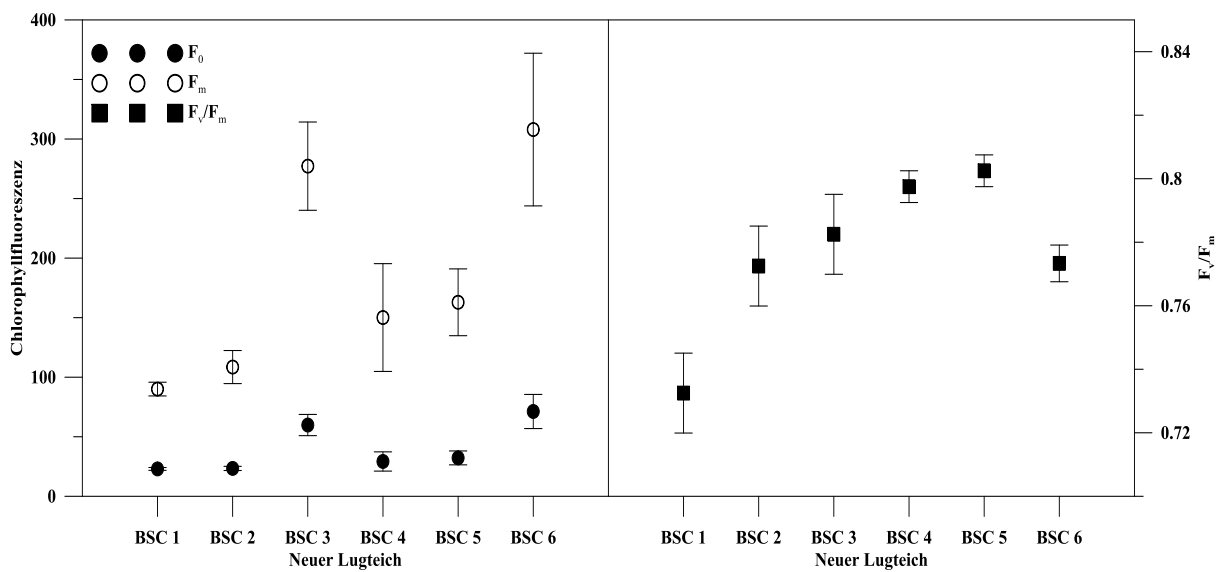
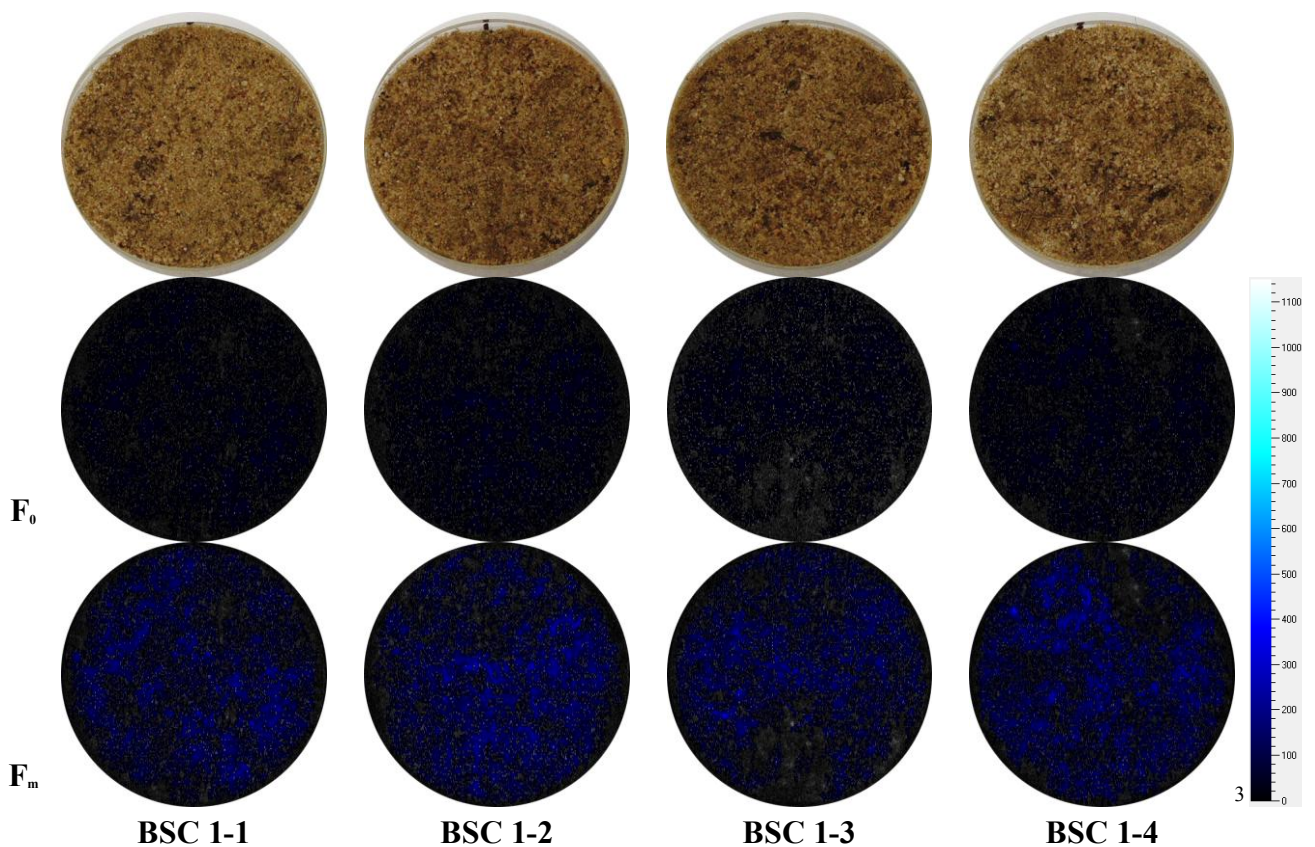
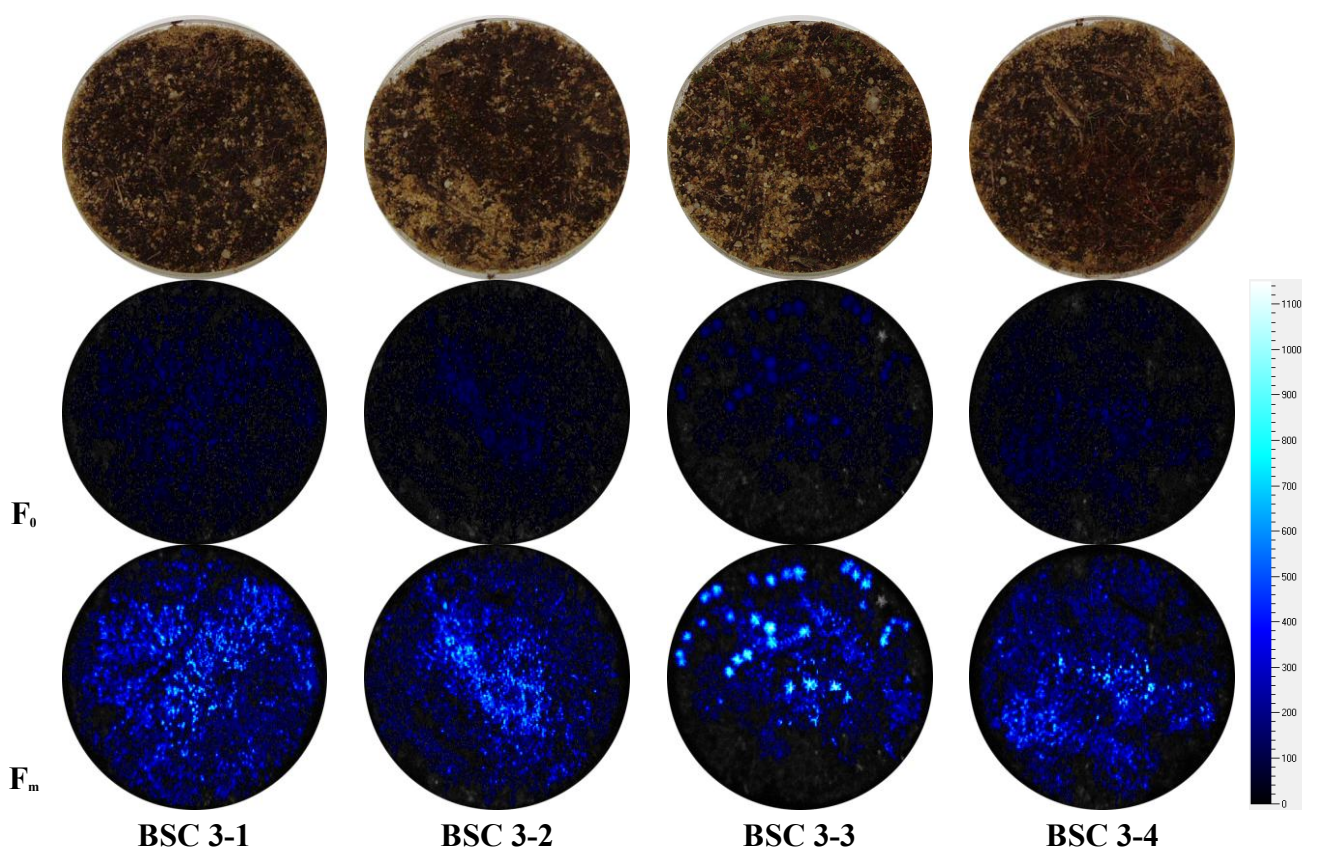
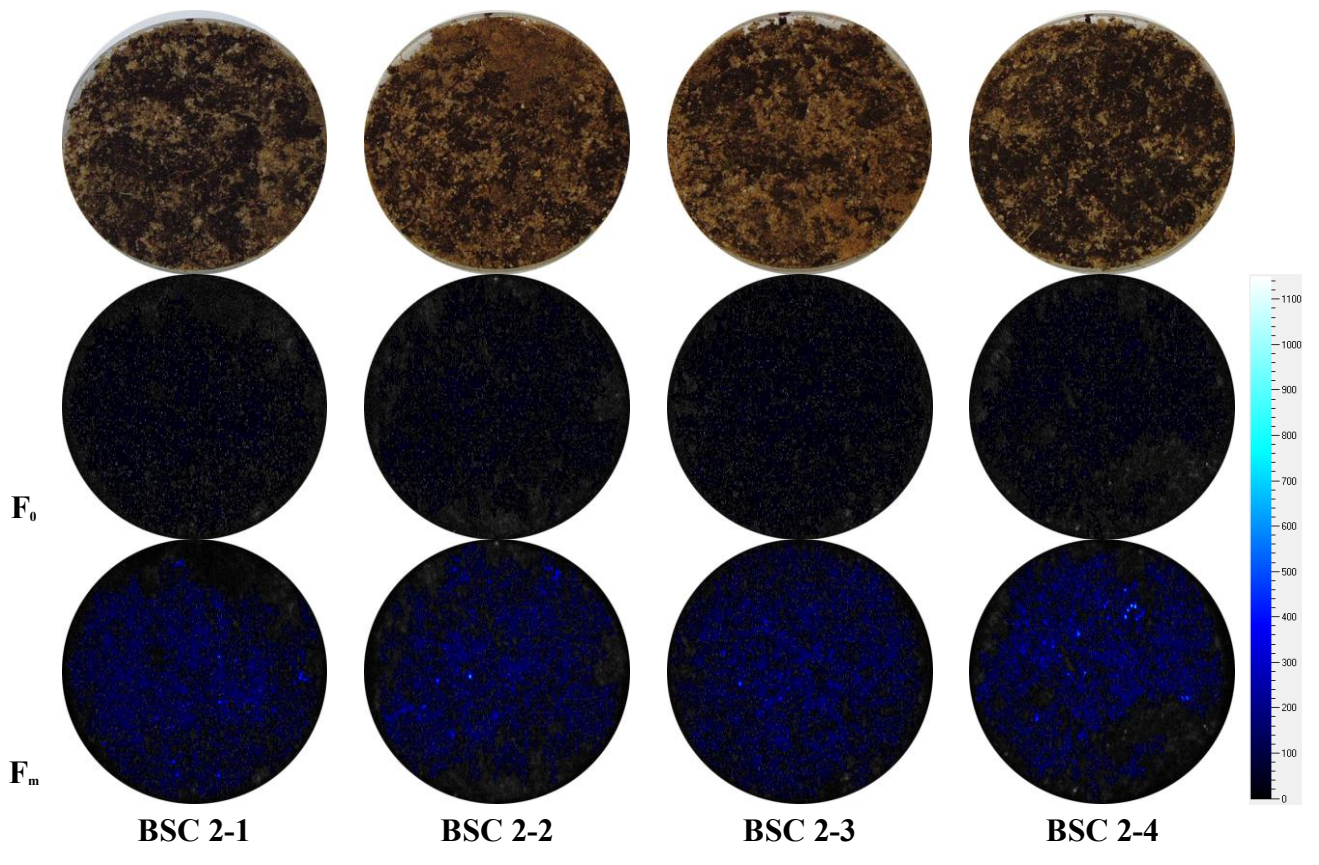
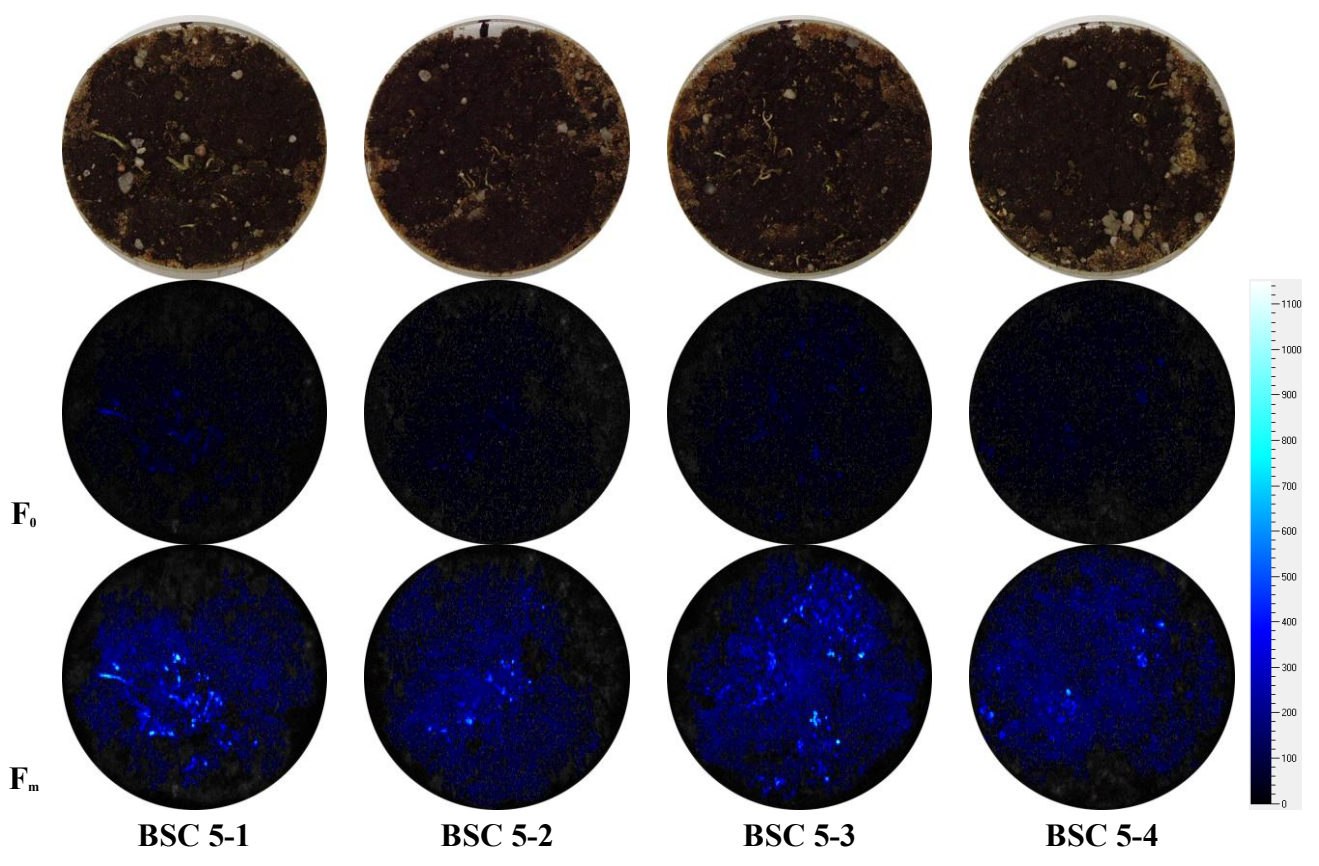
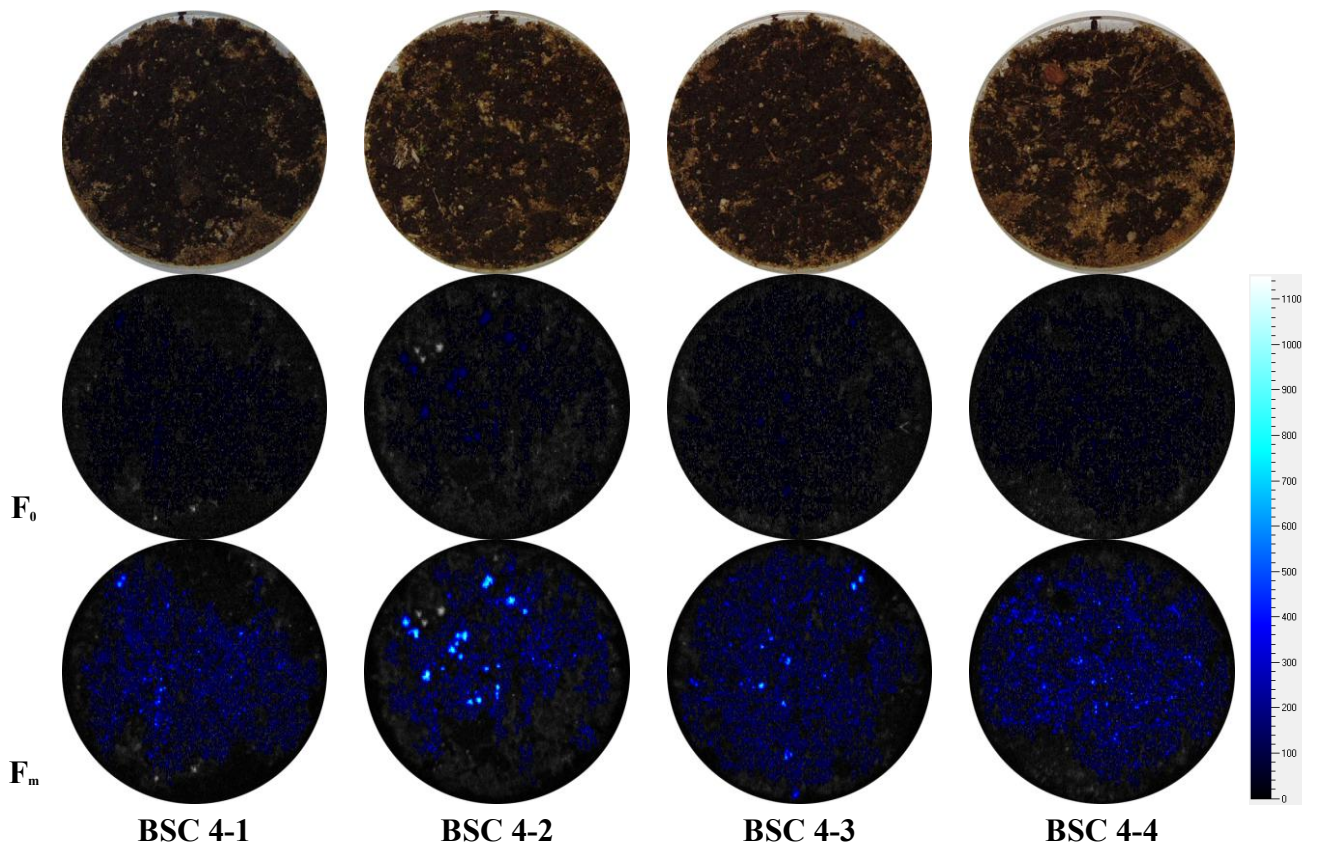


Abbildung 13. Mittlere Chlorophyllfluoreszenz (F_0 , F_m) und Effizienz (F_v/F_m) der Krustenproben Welzow „Neuer Lugteich“







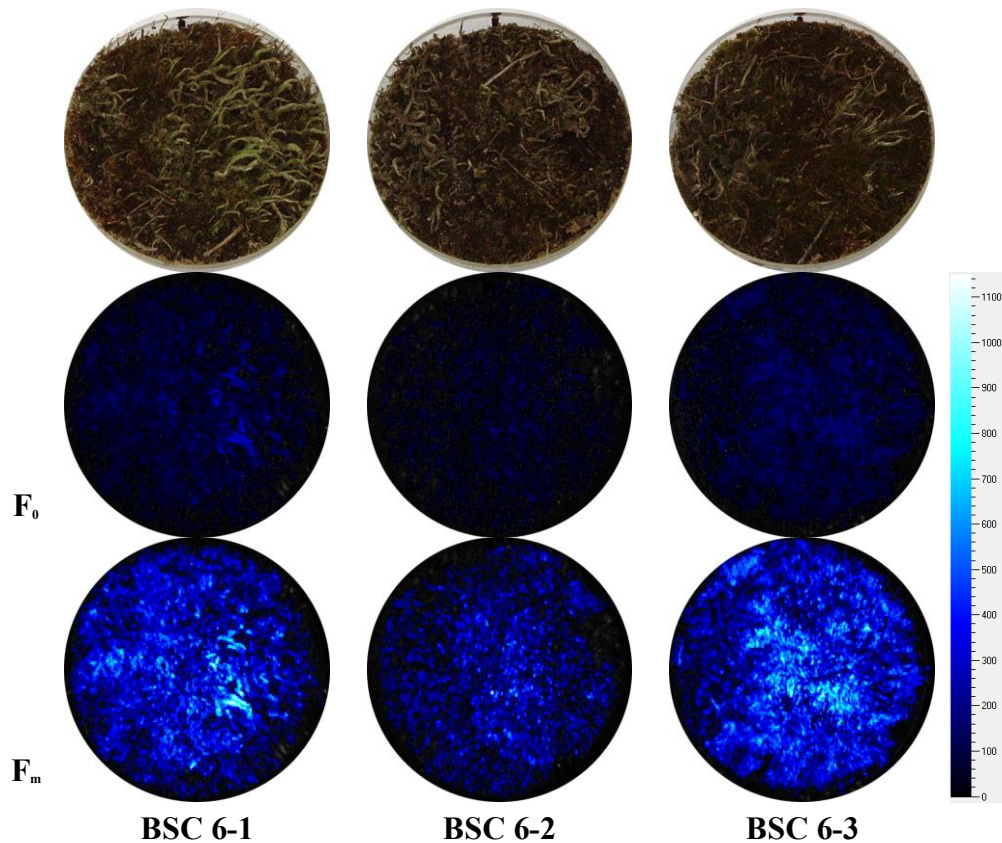


Abbildung 14. F_0 und F_m der Chlorophyllfluoreszenzmessung der Krustenproben Welzow „Neuer Lugeich“

4.1.2.4 Gaswechsel

In Krustenprobe 1 wurde wie zu erwarten die niedrigste Netto-Photosynthese als auch Respiration mit $0,40 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ bzw. $-0,07 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ gemessen (Abb.15). Die daraus resultierende Brutto-Photosyntheserate beträgt $0,47 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. BSC 2 weist bereits eine Netto-Photosyntheserate von $0,71 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, eine Respirationsrate von $-0,28 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ und eine Brutto-Photosyntheserate von $1,00 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ auf. Während sich NPR und BPR verdoppelt haben, hat sich die Respirationsleistung vervierfacht. In der weiteren Betrachtung nehmen die jeweiligen Raten von Bodenkruste zu Bodenkruste zwar unterschiedliche stark zu bzw. ab, jedoch im etwa gleichen Verhältnis zueinander. BSC 3 weist ein vorläufiges Maximum mit einer BPR von $2,10 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ auf, jedoch nimmt der CO_2 -Austausch in BSC 4 wieder ab (BPR = $1,54 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$). Die Brutto-Photosyntheserate steigt allerdings wieder an und erreicht ihr Maximum in BSC 6 mit $2,95 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

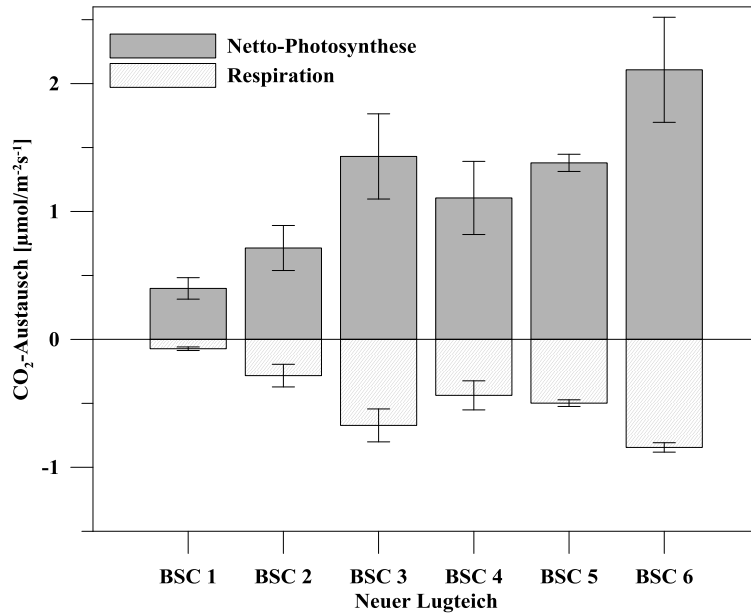


Abbildung 15. Mittlerer CO₂-Austausch der Krustenproben Welzow „Neuer Lugeich“

Das BP/R-Verhältnis fällt in BSC 1 mit 6,54 im Mittel am höchsten aus (Abb.16). BSC 3 weist mit 3,23 den niedrigsten Wert auf. Die übrigen Krustenproben bewegen sich im Bereich von 3,58 (BSC 2), 3,68 (BSC 4), 3,78 (BSC 5) bis 3,49 (BSC 6).

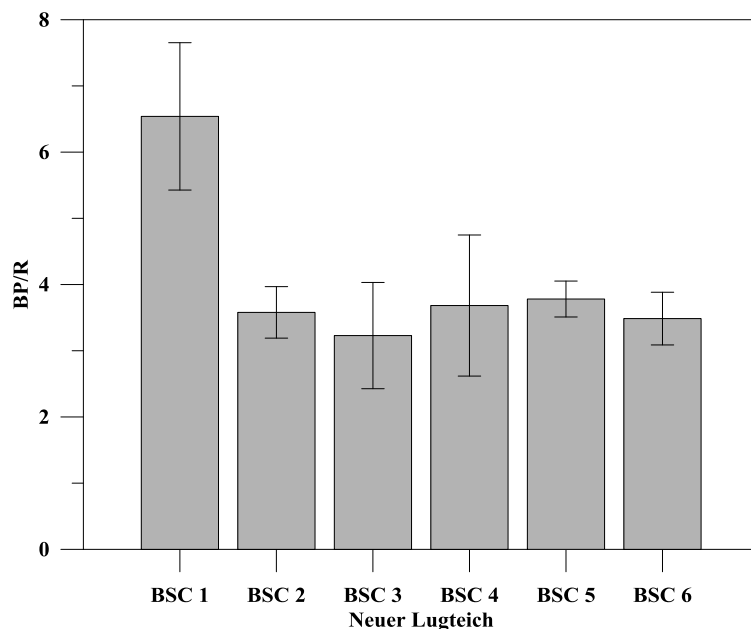


Abbildung 16. BP/R-Verhältnis der Krustenproben Welzow „Neuer Lugeich“

4.1.2 Hydrologische Parameter

4.1.2.1 Repellency Index

In der reinen Substratprobe liegt der Repellency Index R_i im Mittel bei 0,45, wodurch die Probe ohne Inkrustation die höchste Infiltration und somit geringste Benetzungshemmung aufweist. Sobald es zur Krustenbildung kommt, nimmt der R_i zu (Abb.17). In BSC 1 liegt der R_i bei 1,30 und steigt in BSC 2 auf 1,61 an, BSC 3 liegt mit 1,38 wieder darunter. BSC 4 weist mit einem R_i von 1,66 den höchsten Wert auf. Trotz des leicht niedrigeren Wertes in BSC 3 nimmt die Infiltrationsrate mit zunehmender Bodenkrustenausprägung ab. Die Krustenproben reagieren zunehmend benetzungsgehemmt. In BSC 5, also bei einer ausgeprägten Algenkruste mit Moospflanzen nimmt die Infiltration zu und der Repellency Index mit 1,26 ab.

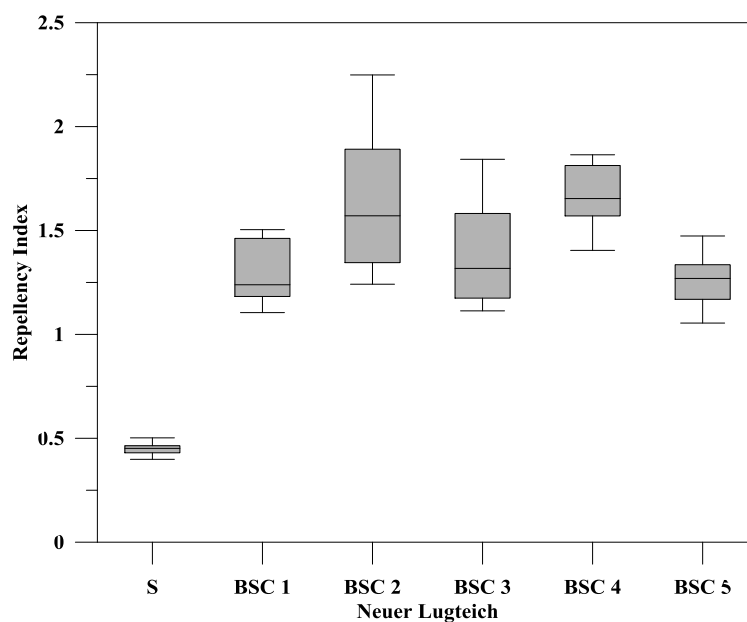


Abbildung 17. Repellency Index der Krustenproben Welzow „Neuer Lugteich“

4.1.2.2 Matrixpotential und Wassergehalt

Um Aussagen über die Wasserspeichereigenschaften der Bodenkrusten treffen zu können, wurden die erstellten Wasserspannungskurven der Proben gegenübergestellt (Abb.19).

Die maximalen Wasserhaltekapazitäten der reinen Substratproben sowie die BSC-Proben 1 bis 3 bewegen sich im Bereich von ca. 67,6% bis 77,5%, im Mittel 72%, und fallen recht

homogen aus. Bis zu einem Matrixpotential von -31,6 hPa ($pF=1,5$) entwässern die Proben etwa gleich stark. Ab einem pF von 1,5 erfolgt die Entwässerung der Proben BSC 3 im Vergleich jedoch langsamer. Während die Substratproben sowie BSC 1 und 2 bei der letzten Messung (-200 hPa, $pF=2,3$) einen mittleren volumetrischen Wassergehalt von 5,2% aufweisen, liegt dieser in BSC 3 bei 9,6%. Damit entwässert BSC 3 ab -63,1 hPa im gleichen Maße wie BSC 4, wobei in den Proben von BSC 4 die maximale Wasserhaltekapazität mit 62% im Mittel etwas niedriger ausfällt. BSC 3 hält somit das gespeicherte Wasser ab einem pF -Wert von 1,8 länger und BSC 4 weist zwar eine geringere maximale Wasserhaltekapazität auf, dafür erfolgt die Entwässerung im Vergleich zu den weniger stark ausgeprägten Krusten langsamer.

In der Betrachtung der pF -Kurven fällt auf, dass in den Krustenproben 5 und 6 maximale Wasserhaltekapazitäten von ca. 96% bis sogar 123% gemessen wurden. Da in diesen Proben die Flechte *Cladonia glauca* sowie Moospflanzen von *Ceratodon purpureus* über den Stechzylinderrand hinausragen (Abb.18), wird der Volumenbezug zur Berechnung der Kurven nicht eingehalten. So wird beispielsweise Wasser bei der Sättigung der Proben in die Flechtenthalli aufgenommen und geht zwar in die Wägung, aber nicht in die Volumenberechnung ein. Zwar werden diese Werte methodisch nicht gestützt, in diesem Fall jedoch trotzdem berücksichtigt, da sich selbst bei schwächer ausgeprägten Flechten- oder Mooskrusten kein korrekter Volumenbezug sicherstellen lässt.



Abbildung 18. Stechzylinder mit Flechten und Moos der Krustenprobe 6 Welzow „Neuer Lugteich“

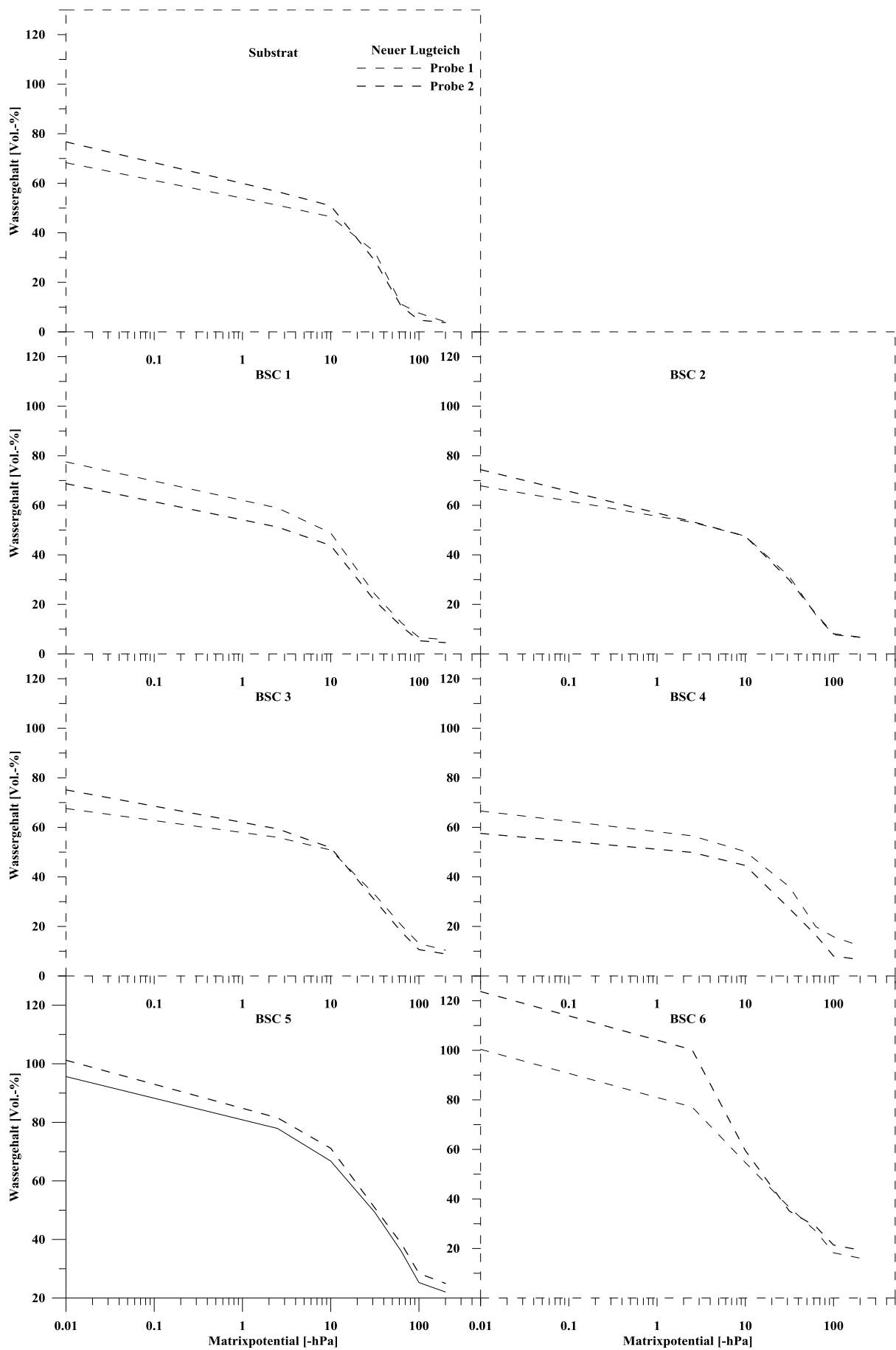


Abbildung 19. pFWG-Kurven der Substrat- und Krustenproben Welzow „Neuer Lugteich“

BSC 5 entwässert bis zu einen pF-Wert von 1 schneller als die ökologisch weniger stark ausgeprägten Krusten, ab einem pF von 1,5 nimmt jedoch das Wasserhaltevermögen zu und die Proben weisen bei einem pF von 2,3 den höchsten mittleren volumetrischen Wassergehalt von 23,5% auf. Die Proben von BSC 6 weisen mit einer mittleren maximalen Wasserkapazität von 112% den höchsten Ausgangswassergehalt auf, entwässern allerdings bis -31,6 hPa auch schneller als BSC 1 bis 5. Trotz der höchsten maximalen Wasserhaltekapazität beträgt der Endwassergehalt 17,7% im Mittel und liegt damit unter BSC 5.

4.1.3 Pedologische Parameter

4.1.3.1 pH

Die pH-Werte der Substratproben am Standort Welzow „Neuer Lugteich“ bewegen sich im Bereich von 5,16 bis 5,48 und sind somit mäßig sauer (KA5). Während die reine Substratprobe mit 5,43 den höchsten pH-Wert der Proben aufweist, fällt dieser im Substrat von BSC 1 auf 5,18 und in BSC 2 auf 5,17. Das Substrat von BSC 3 weist ebenfalls einen höheren Wert mit 5,48 auf. In BSC 4 und 5 ähnelt der pH-Wert den Proben BSC 1 und 2 mit jeweils 5,16 und 5,17. In BSC 6 steigt er auf 5,22 wieder leicht an.

In den Bodenkrusten selbst bewegen sich die pH-Werte in einem Bereich von 4,96 bis 5,35 und sind somit ebenfalls mäßig sauer (KA5). In der Bodenkruste von Probe 1 beträgt der pH-Wert 5,30, in Probe 2, 3 und 4 jeweils 5,35, 5,32 und 5,27. Damit liegen der Werte recht nah beieinander. In den Proben 5 und 6 fallen die pH-Werte leicht auf 4,98 und 4,96.

Insgesamt ist zu erkennen, dass die pH-Werte der Bodenkrusten und der darunterliegenden Substrate nicht gewichtig voneinander abweichen (Abb.20). Die größte Differenz findet sich in BSC 6 mit 0,25. Auch ist keine Trend zwischen Kruste und Substrat zu erkennen, da BSC 1, BSC 2 und BSC 4 einen pH-Wert von Kruste > Substrat aufweisen, im Gegensatz dazu BSC 3, BSC 5 und BSC 6, welche einen pH-Wert von Kruste < Substrat haben.

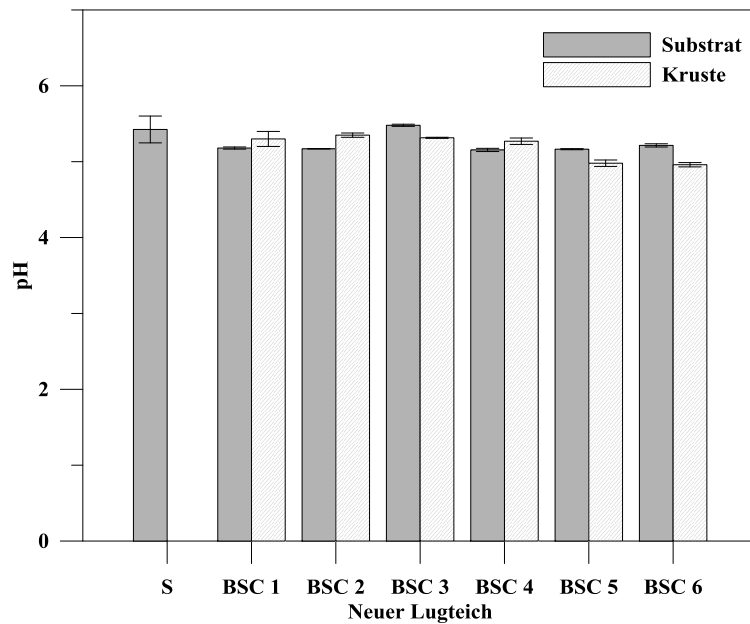


Abbildung 20. pH-Werte der Substrat- und Krustenproben Welzow „Neuer Lugteich“

4.1.3.2 C- und N-Gehalte

Der Gesamtkohlenstoffgehalt in den Substraten fällt in der reinen Substratprobe mit 0,05% am geringsten aus. In den Substratproben von BSC 1 steigt der C-Gehalt auf 0,12%, in BSC 2 auf 0,20% und in BSC 3 auf 0,31%. In der Probe BSC 4 sinkt der Gesamtkohlenstoffgehalt des Substrates auf 0,15%, steigt in BSC 5 aber wieder auf 0,34% und in BSC 6 auf 8,82% an. Der Gesamtstickstoffgehalt in den jeweiligen Substratproben fällt sehr gering aus und liegt in fast allen Proben bei 0,01%. Lediglich in BSC 3 und BSC 5 konnten 0,02% nachgewiesen werden, in BSC 6 sogar 0,45% (Abb.21).

Die Kohlenstoffgehalte in den Bodenkrusten fallen höher aus als in den dazugehörigen Substratproben. BSC 1 weist dabei den niedrigsten C-Gehalt mit 0,25% auf. In BSC 2 konnte ein Wert von 1,03%, in BSC 3 von 1,25%, in BSC 4 von 1,58% und in BSC 5 von 6,54% gemessen werden. Die final ausgeprägt Bodenkruste 6 weist mit 37,54% den höchsten C-Gehalt auf. Auch die Gesamtgehalte an Stickstoff sind in den Bodenkrusten höher als im darunterliegenden Substrat. Ab BSC 1 mit 0,02% steigt der Gehalt über BSC 2 mit 0,06%, BSC 3 und 4 mit 0,08% sowie BSC 5 mit 0,10% kontinuierlich an. Den höchsten N-Gesamtgehalt weist BSC 6 mit 0,90% auf.

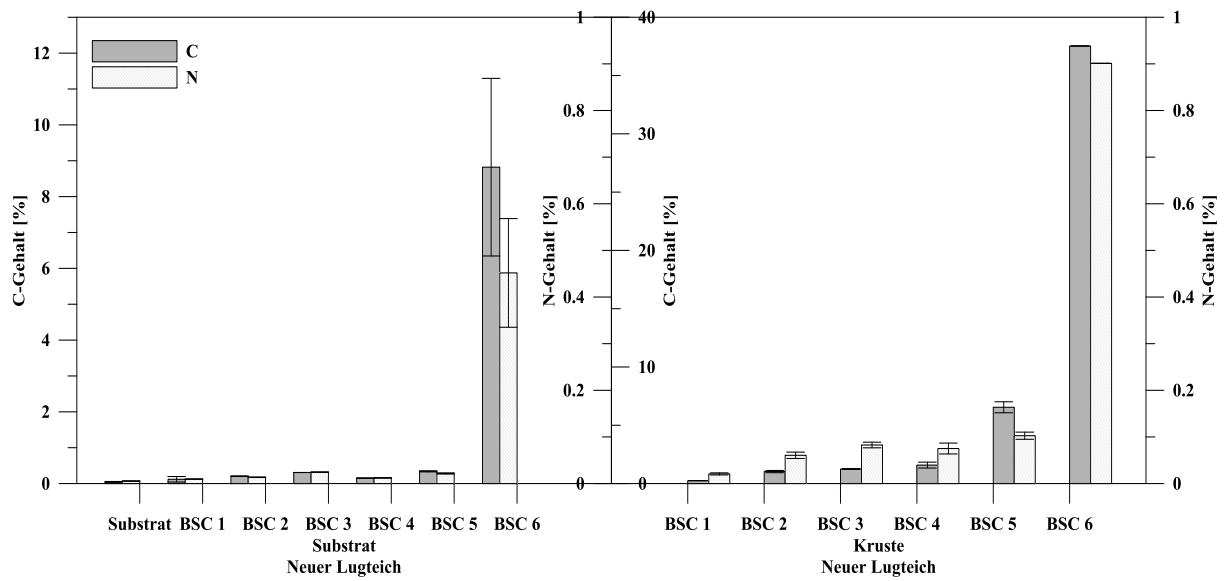


Abbildung 21. C- und N-Gehalte der Substrat- und Krustenproben Welzow „Neuer Lügteich“

4.2 Schlabendorf

4.2.1 Bestimmung der Organismen

Die Arteninventur der Krustenproben auf dem Standort Schlabendorf (Abb.22) ergab folgende Verteilung (Tab.5):

Tabelle 5. Arteninventur Schlabendorf

Bodenkruste	Art	Abundanz
1	<i>Ceratodon purpureus</i>	2
	<i>Anthoceros levis</i>	1
	<i>Zygonium spec.</i>	2 - 3
	<i>Ulothrix spec.</i>	2
2	<i>Polytrichum piliferum</i>	2
	<i>Ceratodon purpureus</i>	1
	<i>Anthoceros levis</i>	3
	<i>Cladonia subulata</i>	2
	<i>Placynthiella oligotropha</i>	2-3
	<i>Zygonium spec.</i>	4
	<i>Ulothrix spec.</i>	3
3	<i>Ceratodon purpureus</i>	2
	<i>Anthoceros levis</i>	2
	<i>Placynthiella oligotropha</i>	3 - 4
	<i>Zygonium spec.</i>	4
	<i>Ulothrix spec.</i>	2
	<i>Haematococcus spec.</i>	2
4	<i>Polytrichum piliferum</i>	4 - 5
	<i>Ceratodon purpureus</i>	1
	<i>Cladonia subulata</i>	3
	<i>Zygonium spec.</i>	1

In den Krustenproben vom Standort Schlabendorf herrschen *Ceratodon purpureus*, *Zygonium spec.* und *Anthoceros levis* vor. Wie am Standort „Neuer Lugteich“ nimmt auch hier die Ausprägung der Krustenorganismen von BSC 1 bis BSC 4 zu, die Organismenanzahl ab BSC 3 allerdings ab. In den Substratproben fanden sich ebenfalls keine Krustenorganismen, allerdings ist die Krustenentwicklung in BSC 1 bereits weiter fortgeschritten als am „Neuen Lugteich“. Neben der Partikelvernetzung durch Algenfilamente konnten sich bereits die ersten Moose ausbilden (Abb.23a). In BSC 2 bilden *Zygonium spec.* und *Ulothrix spec.* lückenhafte Teppiche aus, welche sich in BSC 3 zu einer durchgängigen Kruste

verdichten. Des Weiteren kommt es zur Ausbildung von *Polytrichum piliferum*, *Placynthiella oligotropha* (Abb.23b) sowie *Cladonia subulata*. Das Endstadium der Krustenentwicklung in BSC 4 wird durch ausgeprägte *Cladonia subulata* und *Polytrichum piliferum* angezeigt, wobei sich zwischen den Substratpartikeln noch vereinzelt Algenfilamente festgesetzt haben. Die Bodenkrustentypen können sich somit als „*Polytrichum piliferum*-*Cladonia subulata*-Krusten“ bezeichnen lassen.

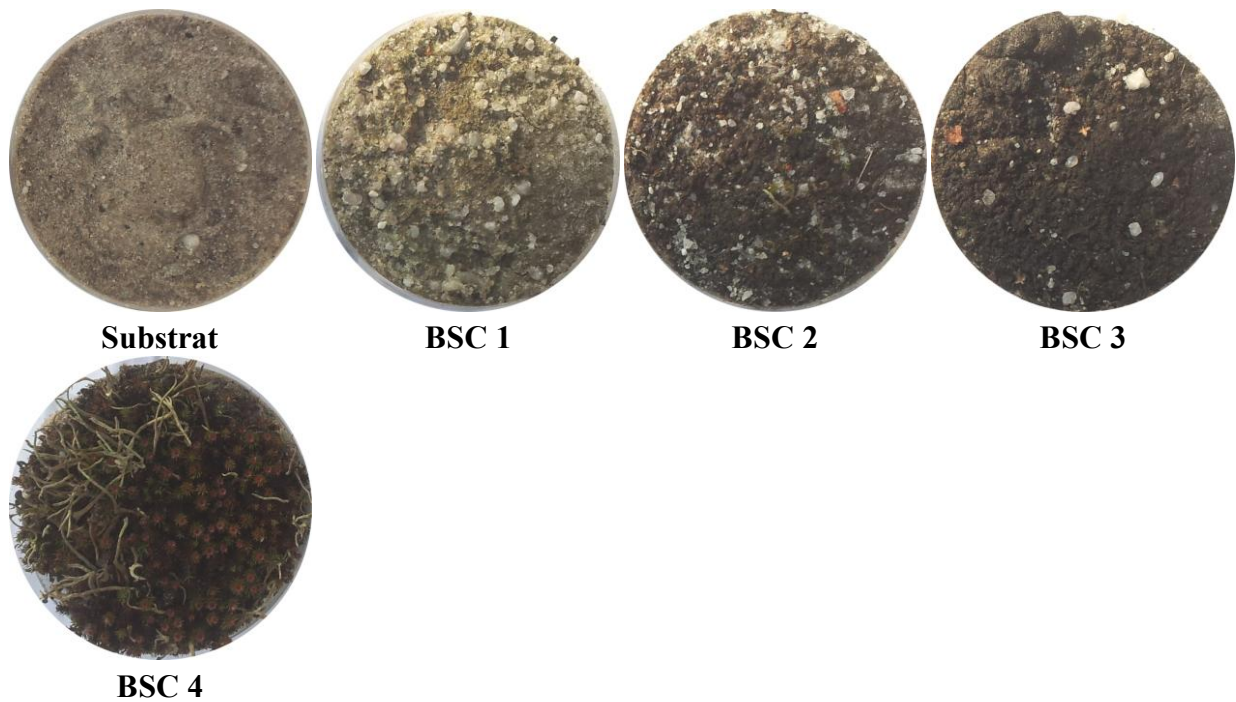


Abbildung 22. Übersicht der Krustenproben Schlabendorf

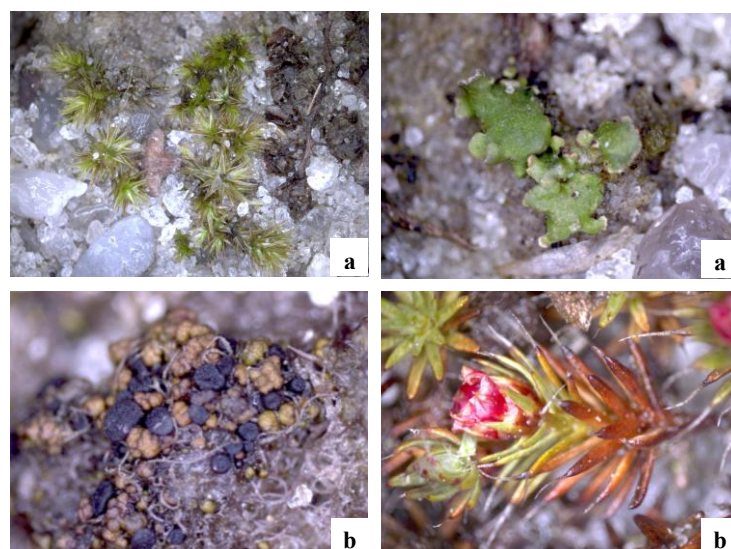


Abbildung 23. a) *Ceratodon purpureus* und *Anthoceros levis* in BSC 1 Schlabendorf,
b) *Placynthiella oligotropha* in BSC 3 und *Polytrichum piliferum* in BSC 4 Schlabendorf

4.2.2 Ökophysiologische Parameter

4.2.2.1 Chlorophyll

Ebenso wie am Standort „Neuer Lugteich“ weist auch hier die reine Substratprobe einen geringen Chlorophyllgehalt von $0,71 \text{ mg/m}^2$ auf. Eine kontinuierliche Zunahme bei zunehmender Inkrustation ist nicht festzustellen (Abb.24). In BSC 1 wurde ein Chl a-Gehalt von $5,32 \text{ mg/m}^2$ und in BSC 2 eine Gehalt von $10,90 \text{ mg/m}^2$ gemessen. Anders als erwartet, nimmt der Chl a-Gehalt in BSC 3 wieder ab und beträgt $7,59 \text{ mg/m}^2$. Das Endstadium der Krustenentwicklung in BSC 4 zeigt den höchsten Gehalt an Chl a, sowohl in „Neuer Lugteich“ als auch Schlabendorf, mit $91,11 \text{ mg/m}^2$.

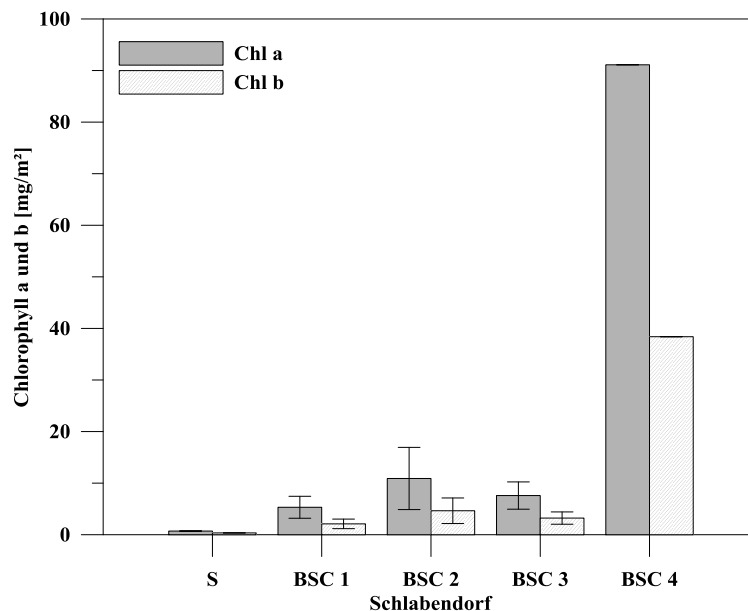


Abbildung 24. Chlorophyll a und b-Gehalte der Krustenproben Schlabendorf

4.2.2.2 NDVI

Die NDVI-Werte der Bodenkrusten aus Schlabendorf fallen in BSC 1 mit 0,19 im Mittel am geringsten aus. In BSC 2 steigt der Wert bereits auf 0,43, fällt aber in BSC 3 wieder auf 0,34. BSC 4 weist mit 0,52 den höchsten NDVI auf (Abb.25).

Auch in den NDVI-Aufnahmen ist ein Anstieg der Reflexion der Bodenkrusten bei zunehmender Bedeckung zu erkennen (Abb.26 und 27). In den Bodenkrustenproben 1 ist der NDVI am niedrigsten, was an der geringen Deckung mit photoautotrophen Organismen liegt.

Besonders die Moose *Ceratodon purpureus* und *Anthoceros levis* können auf den Aufnahmen durch ihren NDVI identifiziert werden. In den Krustenproben 2 und 3 nimmt die Deckung durch Grünalgen zu, vor allem *Zygonium spec.*, wodurch die Reflexion insgesamt ansteigt. Auch ist zu erkennen, dass sich die photosynthetische Aktivität von Moosen und Grünalgen in den NDVI-Bildern auf annähernd gleichem Niveau bewegt.

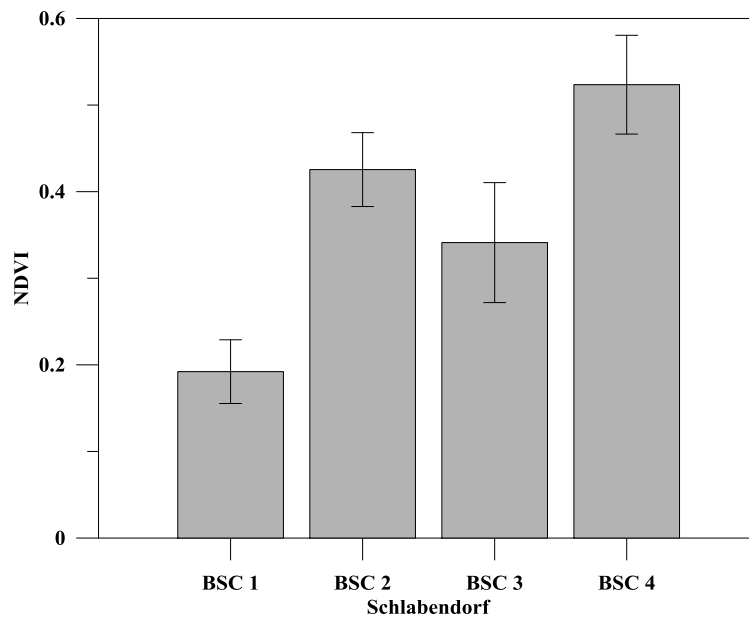
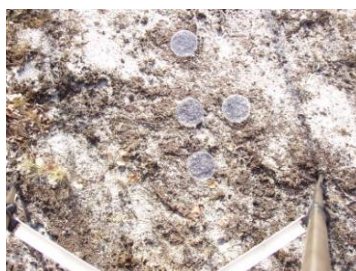
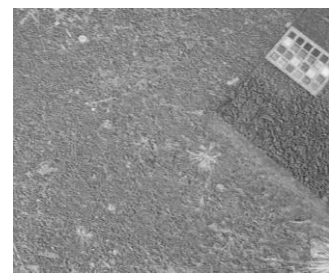


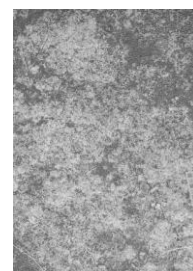
Abbildung 25. NDVI-Werte der Krustenproben Schlabendorf

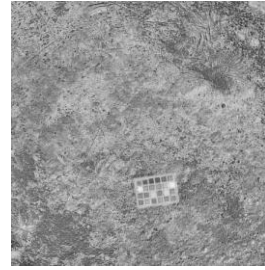
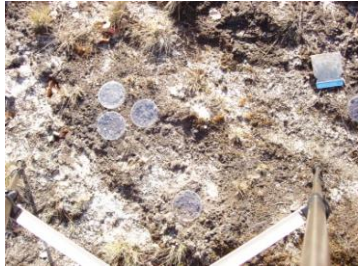


BSC 1

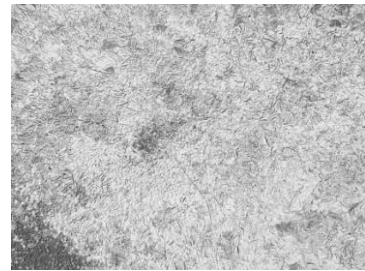
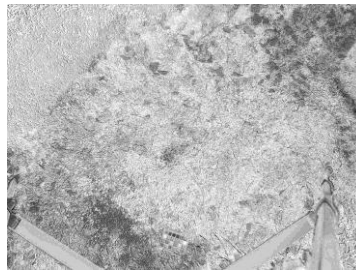
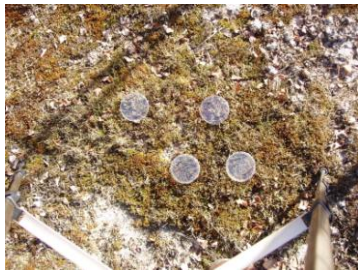


BSC 2





BSC 3



BSC 4

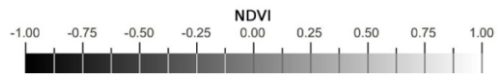
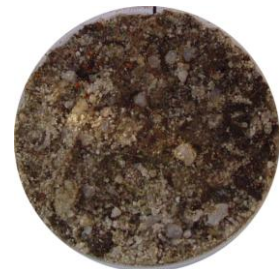
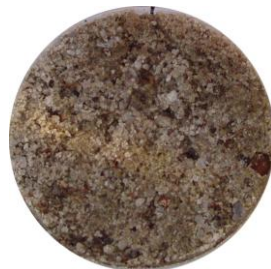
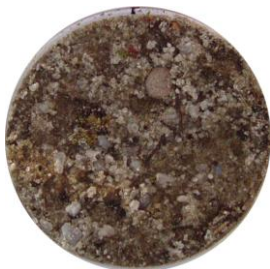


Abbildung 26. NDVI-Aufnahmen der Probenahmestellen Schlabendorf

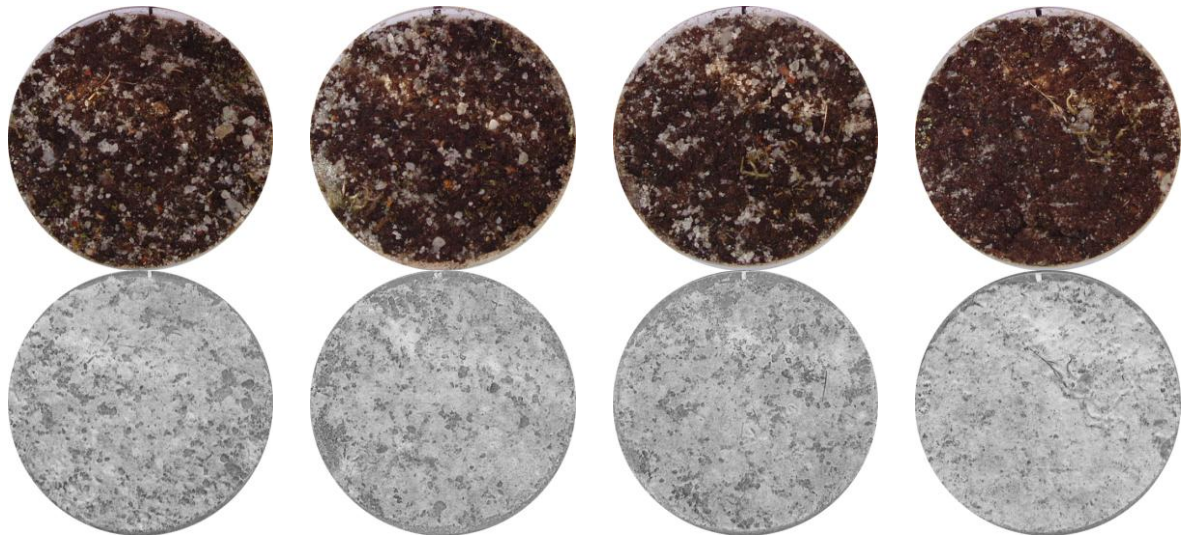


BSC 1-1

BSC 1-2

BSC 1-3

BSC 1-4



BSC 2-1

BSC 2-2

BSC 2-3

BSC 2-4

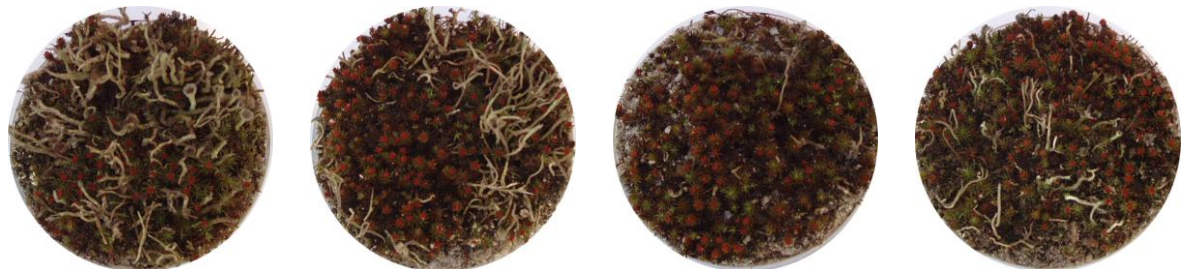


BSC 3-1

BSC 3-2

BSC 3-3

BSC 3-4



BSC 4-1

BSC 4-2

BSC 4-3

BSC 4-4

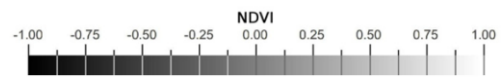
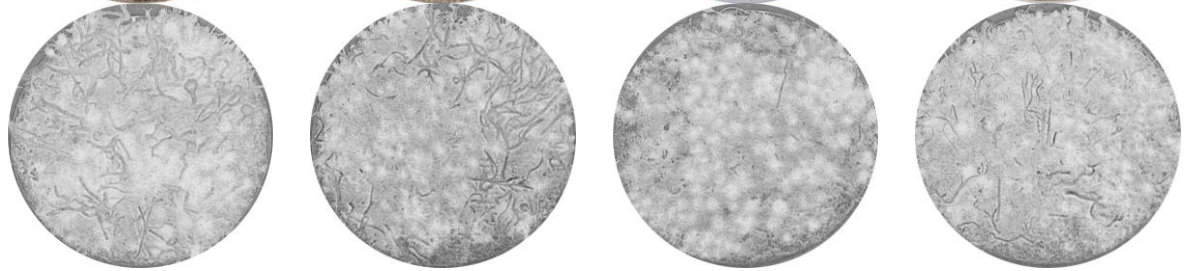


Abbildung 27. NDVI-Aufnahmen der Krustenproben Schlabendorf

4.2.2.3 Chlorophyllfluoreszenz

In der Krustenprobe 1 fällt die Grundfluoreszenz F_0 trotz der geringeren Anzahl phototropher Organismen mit 31,15 etwas höher aus als in Krustenprobe 2 mit 30,80 (Abb.28). In den Fluoreszenzbildern sind in BSC 2 jedoch flächenhaft und auch punktuell höhere F_m -Signale gemessen worden (BSC 1 = 127,81 und BSC 2 = 158,37). Auch hier kommen die hohen Fluoreszenzsignale von den enthaltenen Moospflanzen.

In BSC 3 nimmt zwar die Ausprägung phototropher Organismen zu, jedoch F_0 und F_m , im Vergleich zu BSC 1 und 2, mit 19,38 und 96,80 ab. Zwar finden sich in den Proben ein paar Moospflanzen von *Ceratodon purpureus* und *Anthoceros levis*, allerdings fallen deren Fluoreszenzsignale wesentlich geringer aus als in den Krusten 1 und 2. Bodenkruste 4 weist mit einem F_0 -Wert von 80,58 und einem F_m -Wert von 392,33 die höchsten Werte auf beiden Standorten auf. Besonders die hohen Chlorophyllfluoreszenzsignale der Moospflanzen von *Polytrichum piliferum* sind auf den Bildern sehr gut zu erkennen, während die ausgeprägten Flechten von *Cladonia subulata* kaum bis sehr geringe Signale ausstrahlen (Abb.29). In den reinen Substratproben konnte, wie auch am „Neuen Lugteich“, keine photosynthetische Aktivität festgestellt werden.

Q_y liegt bei den Bodenkrusten im Bereich zwischen 0,75 und 0,81. Dabei weisen BSC 1 mit 0,75 die niedrigste und BSC 2 mit 0,81 die höchste Effizienz auf. BSC 3 und 4 liegen mit 0,79 etwas darunter.

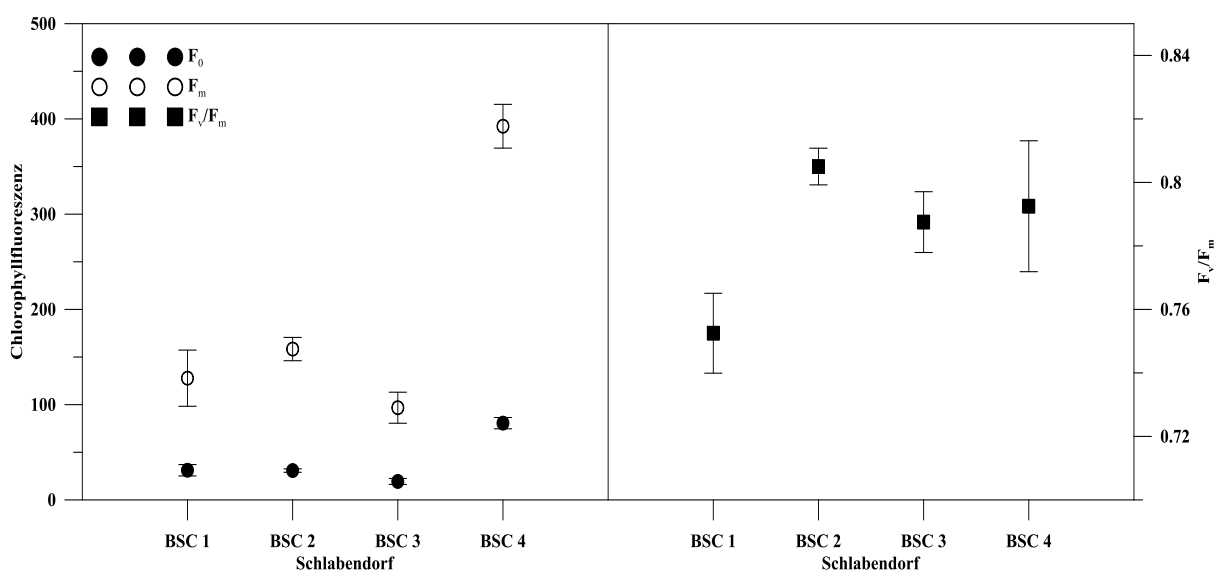
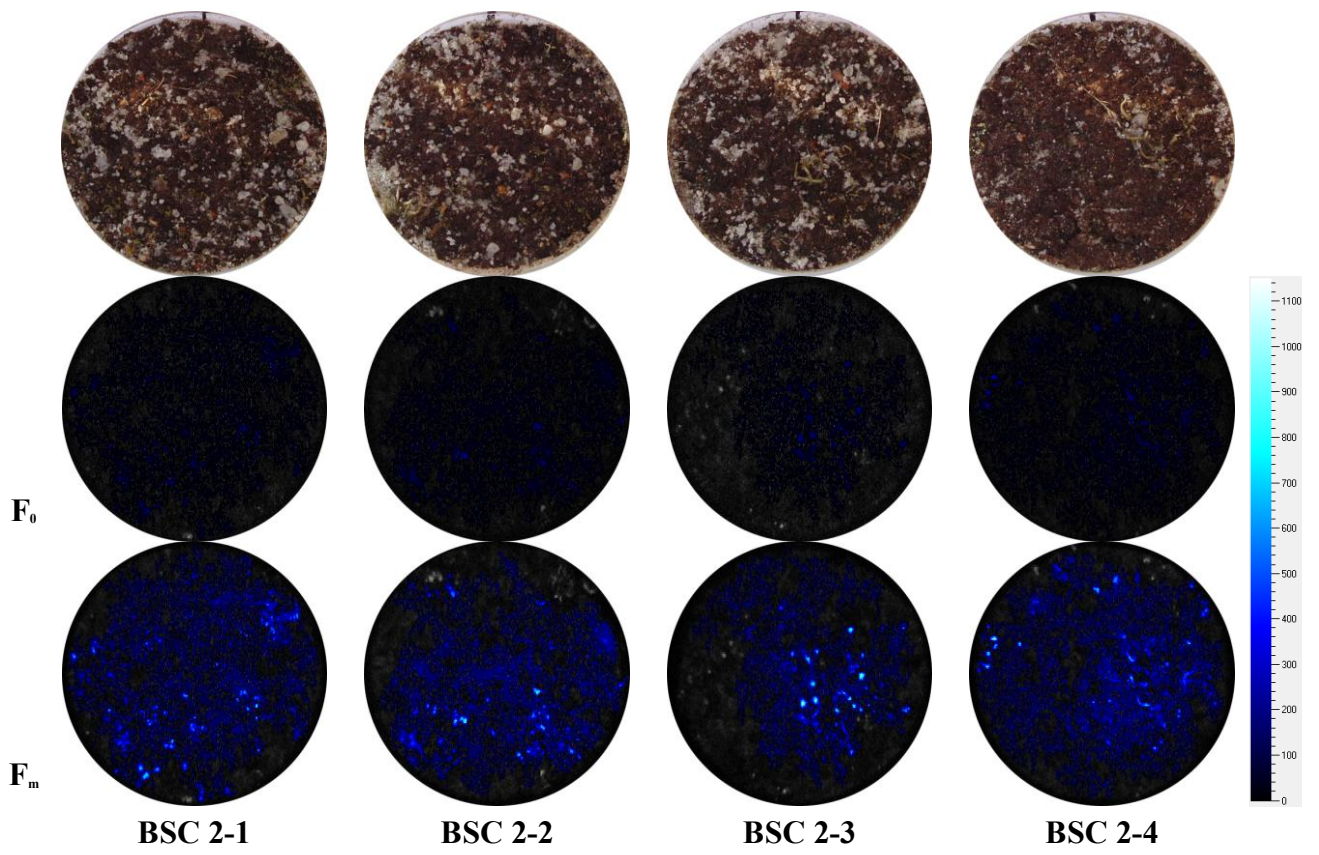
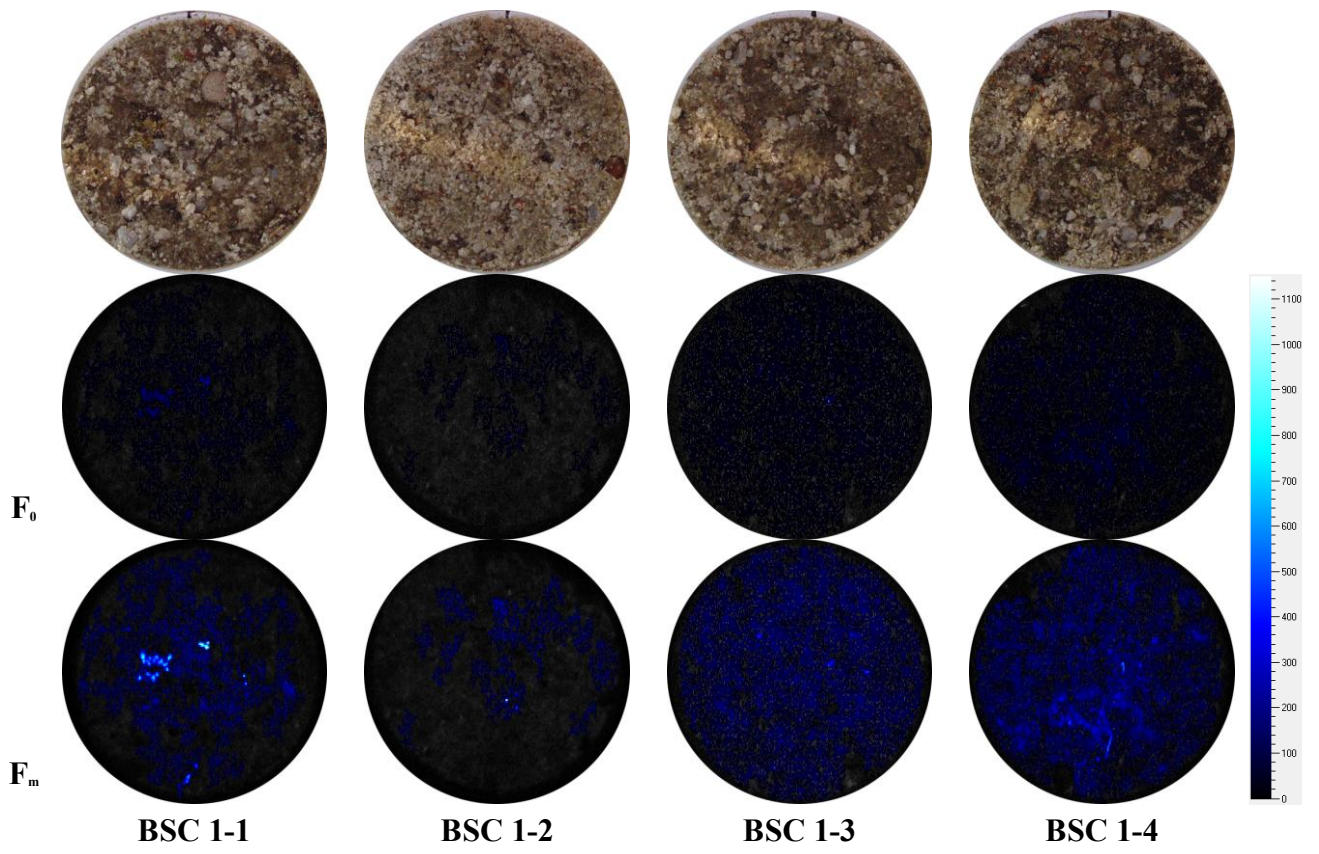


Abbildung 28. Mittlere Chlorophyllfluoreszenz (F_0 , F_m) und Effizienz (F_v/F_m) der Krustenproben Schlabendorf



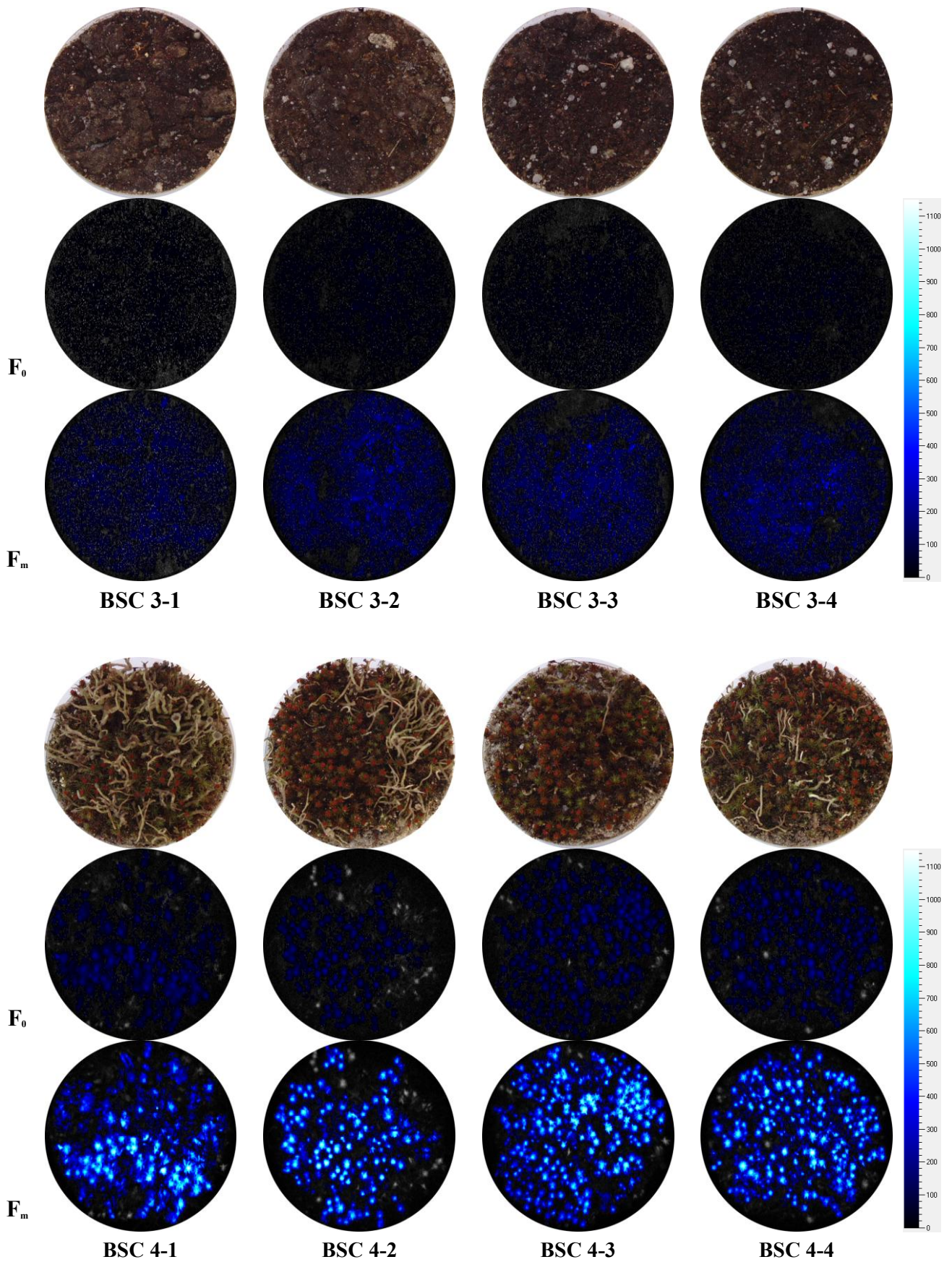


Abbildung 29. F_0 und F_m der Chlorophyllfluoreszenzmessung der Krustenproben Schlabendorf

4.2.2.4 Gaswechsel

Wie bereits am Standort „Neuer Lugteich“ wurde auch in Schlabendorf in BSC 1 die niedrigste Netto-Photosyntheserate mit $0,18 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ als auch Respiration mit $-0,27 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ gemessen (Abb.30). Da die Anzahl und Deckung an phototrophen Organismen in dieser Krustenprobe am geringsten ist, war mit diesem Ergebnis zu rechnen. In BSC 2 steigen NPR und R auf $0,81 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ bzw. $-0,44 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ an, wodurch sich die BPR auf $1,25 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ erhöht. Bodenkrustenprobe 3 steigt jedoch nicht wie erwartet weiter an. Die NPR steigt nur leicht auf $0,90 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, R nimmt sogar ab und beträgt $-0,25 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Damit fällt die BPR mit $1,15 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ niedriger aus als in BSC 2. In BSC 4 steigt der CO_2 -Austausch wieder an und erreicht eine BPR von $2,95 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

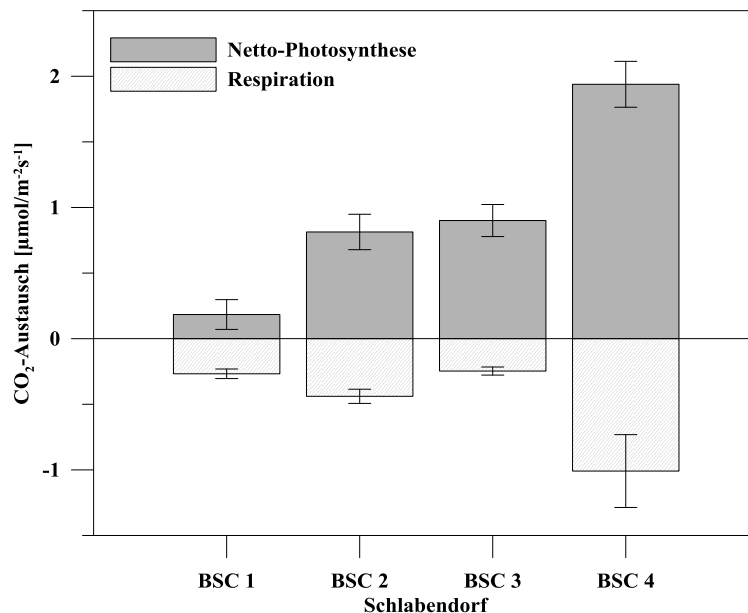


Abbildung 30. Mittlerer CO_2 -Austausch der Krustenproben Schlabendorf

Der höchste relative CO_2 -Zuwachs konnte in BSC 3 mit 4,68 gemessen werden (Abb.31). Den niedrigsten Wert weist BSC 1 mit 1,66 auf. In BSC 2 beträgt die CO_2 -Fixierung 2,88 und in BSC 4 3,01.

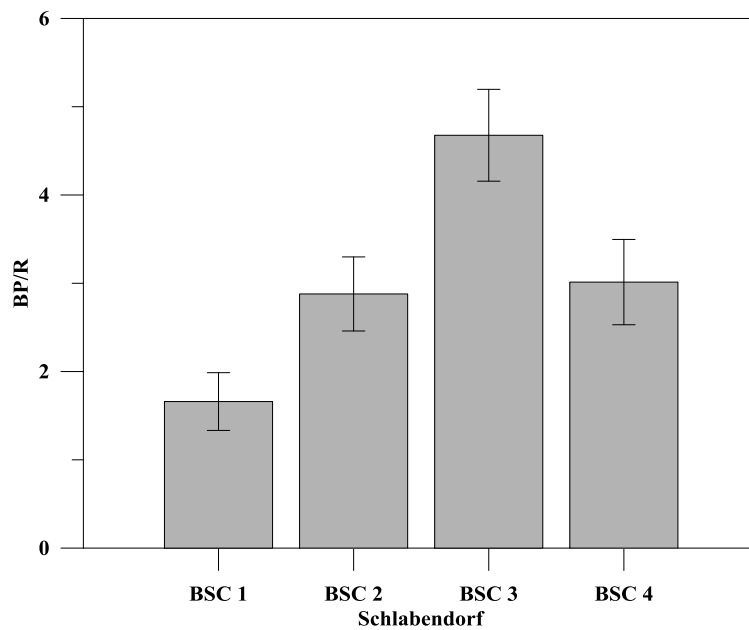


Abbildung 31. BP/R-Verhältnis der Krustenproben Schlabendorf

4.2.3 Hydrologische Parameter

4.2.3.1 Repellency Index

In der reinen Substratprobe liegt der Repellency Index bei 0,73, die Probe ist somit gering bis nicht benetzungsgehemmt. Die Proben BSC 1 und 2 weisen den gleichen R_i mit 0,97 auf, wobei in BSC 2 die Streuung der Messwerte größer ausfällt als in BSC 1 (Abb.32). BSC 3 liegt mit einem R_i von 1,23 im oberen Bereich der Krustenproben aus Schlabendorf. Im Ganzen ist zu erkennen, dass bei einer Zunahme der Krustendicke und Organismenentwicklung ihr Infiltrationsverhalten abnimmt bzw. gehemmt wird.

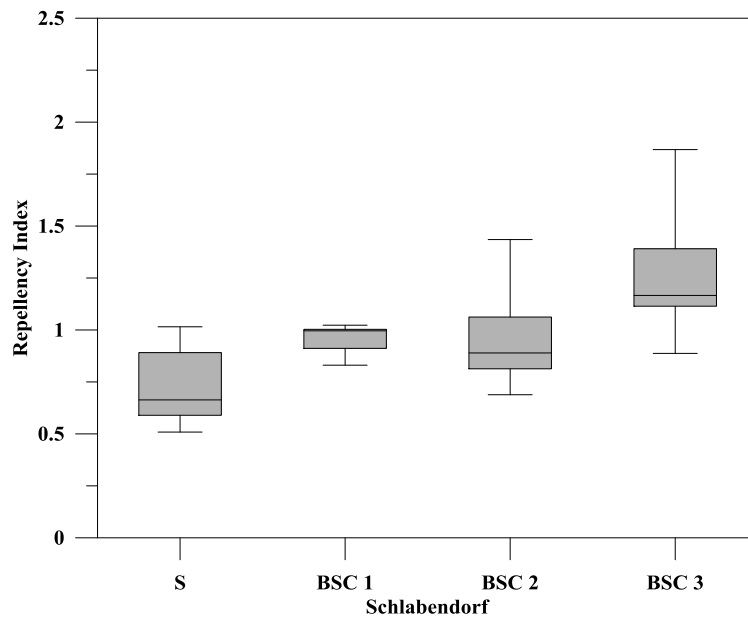


Abbildung 32. Repellency Index der Krustenproben Schlabendorf

4.2.3.2 Matrixpotential und Wassergehalt

Die maximale Wasserhaltekapazität der reinen Substratproben am Standort Schlabendorf fällt mit 63,7% am geringsten aus (Abb.34). Es folgen die Proben von BSC 3 mit 65,3% im Mittel, BSC 1 mit 68,0% und BSC 2 mit 71,9%. Die höchste maximale Wasserhaltekapazität erreicht auch hier die finale Krustenprobe BSC 4 mit 93,6%, wobei ebenfalls wie am Standort „Neuer Lugteich“ durch die Moospflanzen der Volumenbezug nicht korrekt gegeben ist (Abb.33).



Abbildung 33. Stechzylinder mit Flechten und Moos der Krustenprobe 4 Schlabendorf

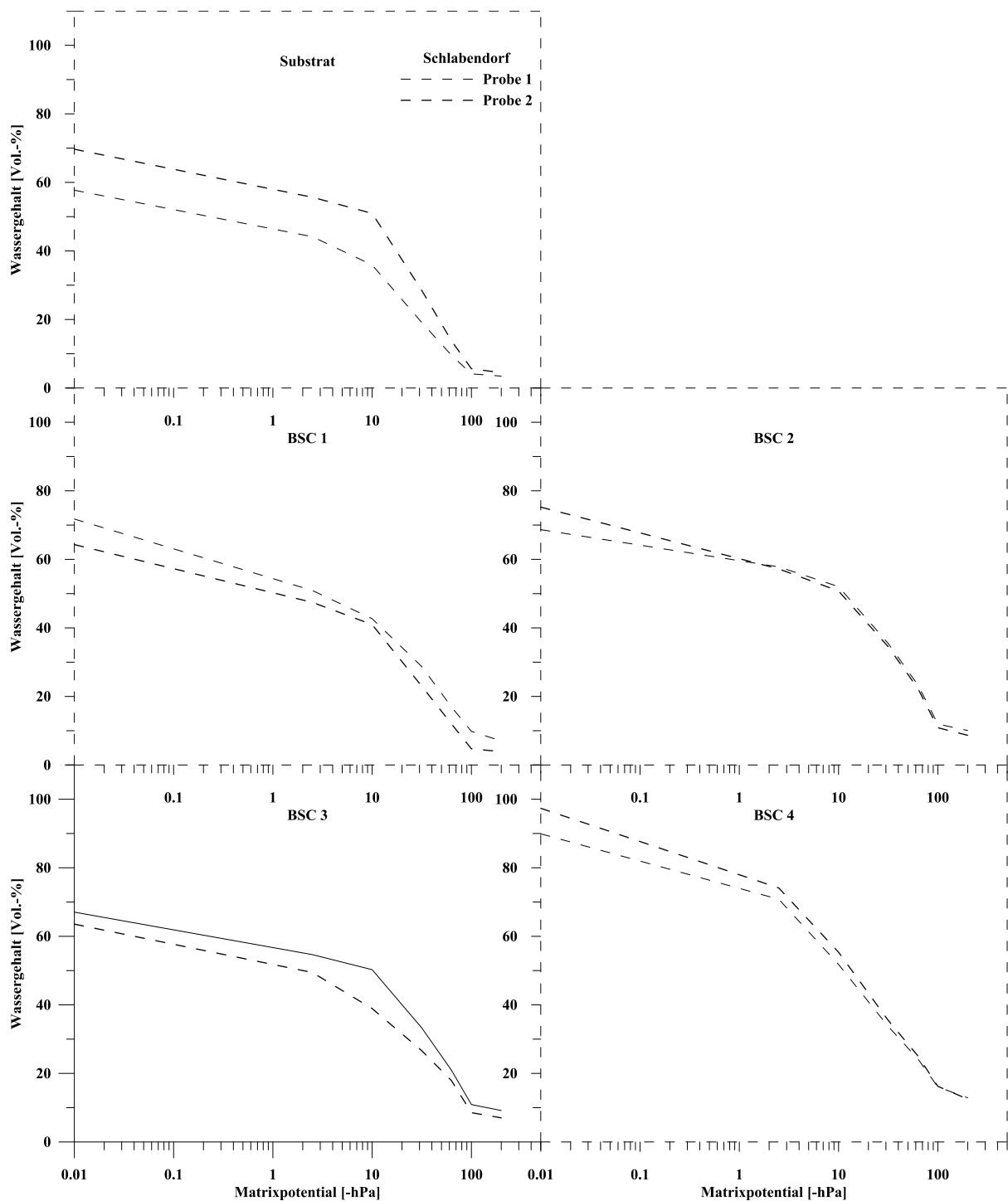


Abbildung 34. pF-Kurven der Substrat- und Krustenproben Schlabendorf

Die reinen Substratproben haben am Ende der Messungen einen mittleren volumetrischen Wassergehalt von 3,9% und entwässern damit am schnellsten. Es folgen BSC 1 mit 5,4% und BSC 2 mit 9,3%, welche das Wasser länger halten können und dadurch eine höhere Wasserhaltekapazität aufweisen. Die Krustenproben 3 können mit einer maximalen Wasserhaltekapazität von 65,3% zwar leicht mehr Wasser aufnehmen als die reinen Substrate,

liegen damit aber unter den Kapazitäten der Bodenkrusten 1 und 2. Bis zu einem pF-Wert von 1 verlaufen die pF-Kurven der Substrate und BSC 3 recht homogen, ab einer höheren Saugspannung kann aber verhältnismäßig mehr Wasser gehalten werden. Die letzte Messung ergab einen Wassergehalt von 8,1%, doppelt so hoch wie in der Substratprobe. Die pF-Kurven der vollständig entwickelten Bodenkrusten BSC 4 entwässern bis zu einer Saugspannung von -10 hPa stärker als alle anderen Proben, halten aber ab -63,1 hPa auch mehr Wasser. Die letzte Messung bei einem pF von 2,3 ergab einen Wassergehalt von 12,7%.

4.2.4 Pedologische Parameter

4.2.4.1 pH

Die pH-Werte der untersuchten Bodenkrusten bewegen sich im Bereich von 4,83 bis 5,52 und sind demnach mäßig bis schwach sauer (KA5). Die Kruste von BSC 1 weist den höchsten pH-Wert mit 5,52 auf. Ab BSC 2 mit einem pH von 5,15 fallen die Werte kontinuierlich. BSC 3 und BSC 4 zeigen somit niedrigere pH-Werte von 5,03 und 4,83 (Abb.35).

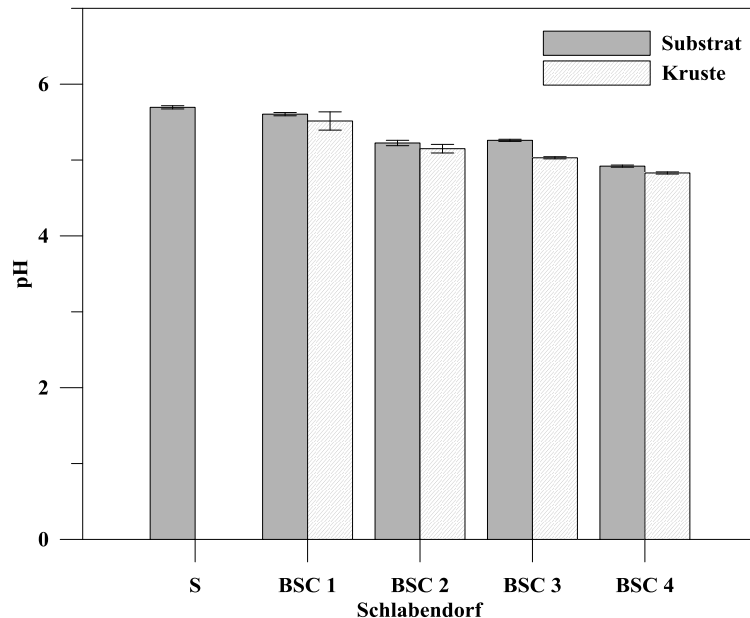


Abbildung 35. pH-Werte der Substrat- und Krustenproben Schlabendorf

Die pH-Werte der reinen Substratprobe sowie der unter den Krusten liegenden Substrate erstrecken sich über einen Bereich von 4,92 bis 5,70. Auch hier kann von einem mäßig bis schwach saurem Untergrund gesprochen werden (KA5). Den höchsten Wert weist die reine

Substratprobe mit 5,70 auf. Absteigend folgen BSC 1 und BSC 2 mit einem pH-Wert von 5,61 und 5,23. In BSC 3 steigt der pH zwar leicht auf 5,26, sinkt in BSC 4 aber auf 4,92 ab.

Zusammenfassend ist, im Gegensatz zum Standort „Neuer Lugteich“, ein Trend zur Abnahme des pH-Wertes bei fortschreitender Inkrustation, sowohl in der Bodenkruste selbst als auch im darunterliegenden Substrat auszumachen. Auch ist zu erkennen, dass der Krusten-pH leicht niedriger ist als der dazugehörige Substrat-pH.

4.2.4.2 C- und N-Gehalte

Der Gesamtkohlenstoffgehalt der reinen Substratprobe liegt bei 0,10% und steigt in Probe 1 auf 0,30%. BSC 2 liegt mit 0,28% leicht darunter und auch in BSC 3 nimmt der C-Gehalt mit 0,24% weiter ab (Abb.36). Lediglich in der Unterkruste von BSC 4 nimmt der Wert wieder zu und liegt bei 1,39%. Ebenso wie am Standort Welzow „Neuer Lugteich“ konnten auch in Schlabendorf nur geringe Stickstoffgehalte gemessen werden. Während BSC 4 mit 0,07% den höchsten N-Gehalt aufweist, liegen die Werte in der reinen Substratprobe sowie in BSC 3 bei 0,01% und in BSC 1 und 2 bei 0,02%.

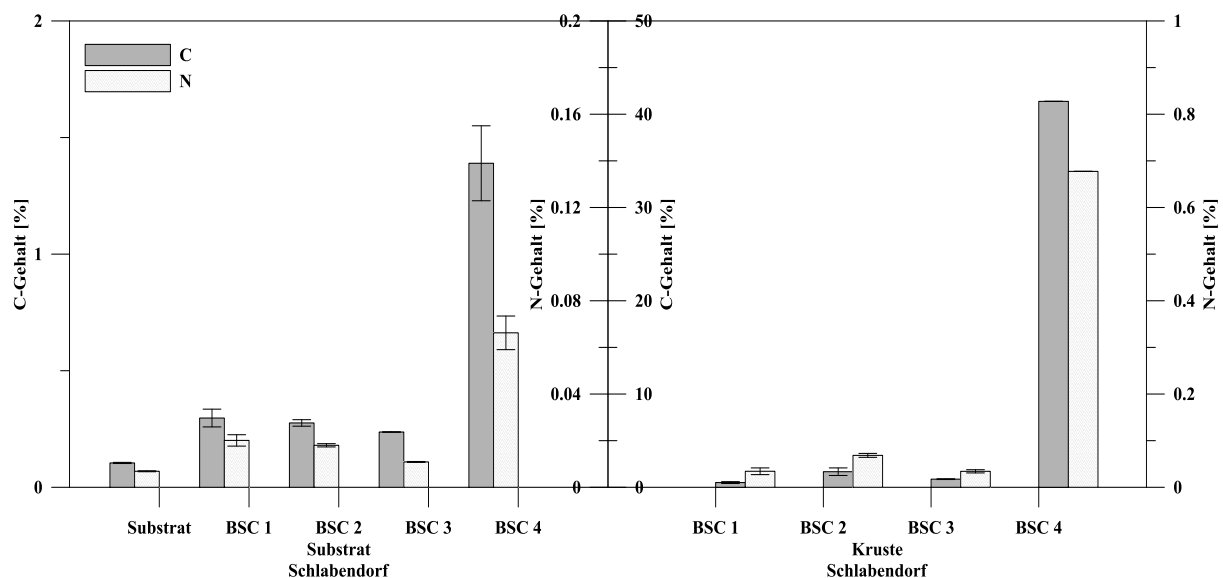


Abbildung 36. C- und N-Gehalte der Substrat- und Krustenproben Schlabendorf

In den Oberkrusten liegen sowohl die Kohlenstoff- als auch Stickstoffgehalte höher als in den Unterkrusten. Der gemessene C-Gehalt in BSC 1 und 2 liegt bei 0,51% sowie 1,67%. In BSC 3 nimmt der Wert mit 0,87% wieder ab und erreicht sein Maximum mit 41,38% in

BSC 4. Der Gesamtstickstoffgehalt korreliert hier mit dem C-Gehalt, da BSC 1 und 3 mit 0,03% den geringsten Wert aufweisen. In BSC 2 wurde mit 0,07% ein etwas höherer N-Gehalt gemessen, welcher auch ebenfalls in BSC 4 mit 0,68% sein Maximum erreicht.

5. Diskussion

5.1 Bestimmung der Organismen

Sowohl auf der Rekultivierungsfläche Schlabendorf als auch auf der künstlichen Sanddüne Welzow „Neuer Lugteich“ konnten die Moosarten *Ceratodon purpureus* und *Polytrichum piliferum* sowie die Grünalgen *Zygonium spec.* und *Ulothrix spec.* identifiziert werden. Vor allem das Laubmoos *Ceratodon purpureus* ist eins der am häufigsten vorkommenden Moose, welches als Ubiquist auf den verschiedensten Standorten beschrieben wurde. Bevorzugt wächst es aber auf kalkarmen, sonnigen und offenerdigen Standorten wie Abbauhalden oder Sanddünen. Es gilt als Substratbildner und wirkt dadurch erosionshemmend (WIRTH & DÜLL 2000).

Polytrichum piliferum ist an kalkfreien Magerstandorten nicht zu warmer Lagen ebenfalls fast weltweit verbreitet. Sein Vorkommen wird besonders an offenerdigen und sonnig-trockenen Plätzen, besonders auf Sanddünen, steinigen Silikatböden oder an Wegsäumen beschrieben. Durch die durchscheinenden Oberseiten der Blättchen wird die Verdunstung der Moospflanzen verhindert und die Photosynthese verlängert. Die Haarpinsel und derbwandigen, glänzenden Unterseiten wirken als Lichtreflektoren und die nach oben gerichteten Blätter vermindern die Sonneneinstrahlung. Trockene Pflanzen überstehen eine Erwärmung bis über 70°C. Die Haare bilden Kondensationspunkte für eine zusätzliche Wasseraufnahme durch Taubildung. Wie auch bei *Ceratodon purpureus* wird ihrem Wachstum eine erosionshemmende Wirkung zugeschrieben (WIRTH & DÜLL 2000).

Unterschiede in der Artenzusammensetzung der jeweiligen Bodenkrusten finden sich in der Krustenflechte *Placynthiella oligotropha*, der Strauchflechte *Cladonia subulata*, dem Lebermoos *Anthoceros levis* sowie der Grünalge *Haematococcus spec.*, welche lediglich auf dem Standort Schlabendorf zu finden waren. Auf der Düne „Neuer Lugteich“ konnte dagegen die Strauchflechte *Cladonia glauca* identifiziert werden.

Die Strauchflechte *Cladonia subulata* kommt auf sauren, nährstoffarmen Substraten, vor allem auf humusarmen, aber auch bis ziemlich humusreichen Sandböden vor. Sie findet sich oft auf gestörten Standorten, an offenen Böschungen, Weg- und Waldrändern oder Schonungen und weist eine klimatisch weite ökologische Amplitude auf (WIRTH et al. 2013 a). Nach WIRTH & DÜLL (2000) bevorzugt sie lichtreiche, saure, sandige bis lehmige Böden in Vegetationslücken. Die Strauchflechte *Cladonia glauca* ist der *Cladonia subulata* ökologisch sehr ähnlich, fehlt jedoch oft in Kalkgebieten (WIRTH et al. 2013 a). Somit lässt sich das ungleiche Vorkommen von *Cladonia subulata* und *Cladonia glauca* nicht über standortspezifische Anforderungen erklären, da beide analoge ökologische Ansprüche stellen und sich lediglich darin unterscheiden, dass *Cladonia glauca* auch an verrottenden Baumstämmen wachsen kann. Auch das Auftreten von *Placynthiella oligotropha* in Schlabendorf kann dadurch erklärt werden, dass *Cladonia subulata* oft in Vergesellschaftungen wächst, unter anderem mit der Gattung *Placynthiella* (WIRTH et al. 2013a). Auch die Krustenflechte *Placynthiella oligotropha* lässt kaum Rückschlüsse über variierende Standorte zu, da sie weltweit vertreten ist und in Europa als heimische Art weit verbreitet. Sie findet sich vor allem auf nährstoffarmen, sauren und frischen Böden, z.B. auf sandigen, humosen Lehm Böden an Wegböschungen oder in Lücken von Silikatmagerrasen und Heiden (WIRTH 1995, WIRTH et al. 2013b).

Das Hornmoos *Anthoceros levis* kommt ausschließlich auf Stoppeläckern oder lückigem Brachland vor und bevorzugt entkalkten Löss oder kalkfreien Lehm, geht aber selten auch auf Sandböden. Da die abgeernteten Äcker jedoch recht schnell umgebrochen werden, ist die Anzahl des Moores zurückgehend (AICHELE & SCHWEGLER 1993). Bis auf die arktische Zone tritt es nahezu kosmopolitisch auf (FRAHM & FREY 1992). In geringer Menge und auch nur in einer Krustenprobe konnte die Grünalge *Haematococcus spec.* identifiziert werden. Sie kommt vor allem in schnell austrocknenden Kleinstgewässern, bspw. Pfützen oder Vogeltränken vor. Bei zunehmender Austrocknung färben sich die Algen blutrot, da das Carotinoid Astaxanthin die trockenfallenden Zellen vor Schäden durch UV-Strahlung schützen (LINNE VON BERG et al. 2012).

Mit zunehmender Bodenkrustenentwicklung auf beiden Standorten konnte beobachtet werden, dass besonders der Bewuchs mit Grünalgen (*Zygonium spec.*) als Vernetzung der Sandpartikel durch Grünalgenfilamente beginnt, ansteigt und in den ausgeprägten Krusten (BSC 3 und 4 „Neuer Lugteich“, BSC 2 und 3 Schlabendorf) dominiert. Wie auch die Moose ist die Grünalge *Zygonium spec.* ein Kosmopolit und findet sich in einer Vielfalt von

Habitaten, wobei die meisten von ihnen als sauer und nährstoffarm beschrieben wurden (HOLZINGER et al. 2010). Grünalgen, darunter auch *Ulothrix spec.*, weisen besonders im Frühjahr und Herbst eine intensive Besiedlung der oberen Sandschicht auf. In gemäßigttem Klima sind diese Jahreszeiten durch hohe Luftfeuchten gekennzeichnet und bieten somit bevorzugte Bedingungen für das Algenwachstum (CABALA et al. 2010). Besonders *Zygonium spec.* stellt auf nackten, sauren Böden der gemäßigten Zone Deutschlands einen Pionierorganismus der Bodenkrusten dar, welchem Moose wie *Polytrichum spec.* folgen (BÜDEL 2003).

Die Bodenkrusten in Schlabendorf hatten im Vergleich zum „Neuen Lugteich“ bereits 10 Jahre länger Zeit, sich zu etablieren. Somit fanden sich in den Proben von BSC 1 bereits mehr Krustenorganismen als in Welzow. Auch die Gesamtartenzahl fällt im Vergleich höher aus. Anders als in Welzow „Neuer Lugteich“ verzeichnen die Grünalgen keinen so starken Anstieg ab BSC 1, sondern sind bereits in höhere Zahl vertreten, ebenso die Moose. Auch das Flechtenwachstum beginnt hier schon in BSC 2, wobei in BSC 3 *Placynthiella* und in BSC 4 *Cladonia* dominiert.

Durch das kosmopolitische Auftreten fast aller identifizierten Krustenorganismen ist eine standortspezifische Präferenz hinsichtlich des vorhandenen Substrates oder der mikroklimatischen Bedingungen nicht ersichtlich.

5.2 Ökophysiologische Parameter

5.2.1 Chlorophyllgehalt

Die Chlorophyllgehalte steigen mit zunehmender Bodenkrustenentwicklung kontinuierlich an, wobei ein deutlicher Unterschied zwischen Schlabendorf und dem „Neuen Lugteich“ zu erkennen ist. Da die Schlabendorf-Bodenkrusten bereits eine längere Etablierungszeit hatten und sich in den geringer ausgeprägten Stadien bereits mehr Moose und Flechten angesiedelt haben als in den Welzow-Bodenkrusten, wäre zu erwarten, dass auch die standortspezifischen Chlorophyll a-Gehalte in Schlabendorf höher ausfallen. Trotz der höheren Artenzahl in den Bodenkrusten Schlabendorf und den relativen höheren C-Gehalten weisen lediglich BSC 1 und 4 höhere Chl a-Gehalte als die Bodenkrusten „Neuer Lugteich“ auf (Abb.37 und 38).

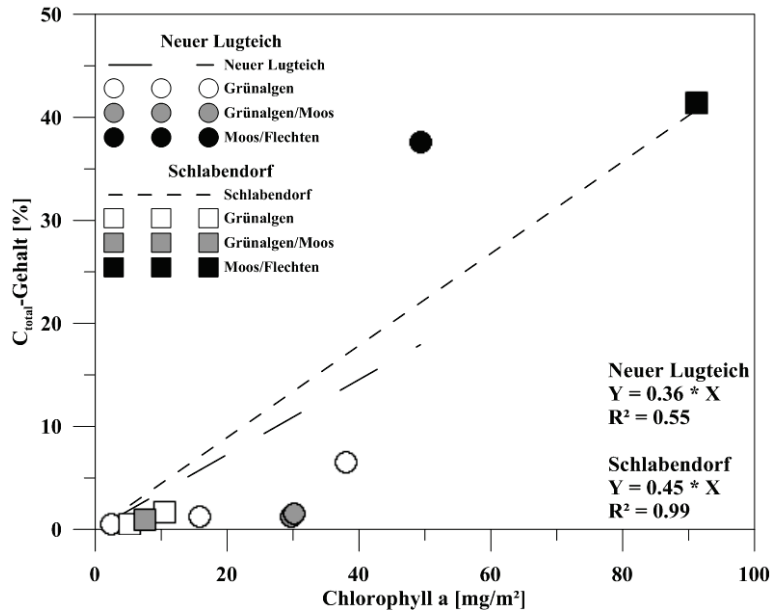


Abbildung 37. Korrelation zwischen totalem C-Gehalt und Chlorophyllgehalt an den Standorten Schlabendorf und Welzow „Neuer Lugteich“

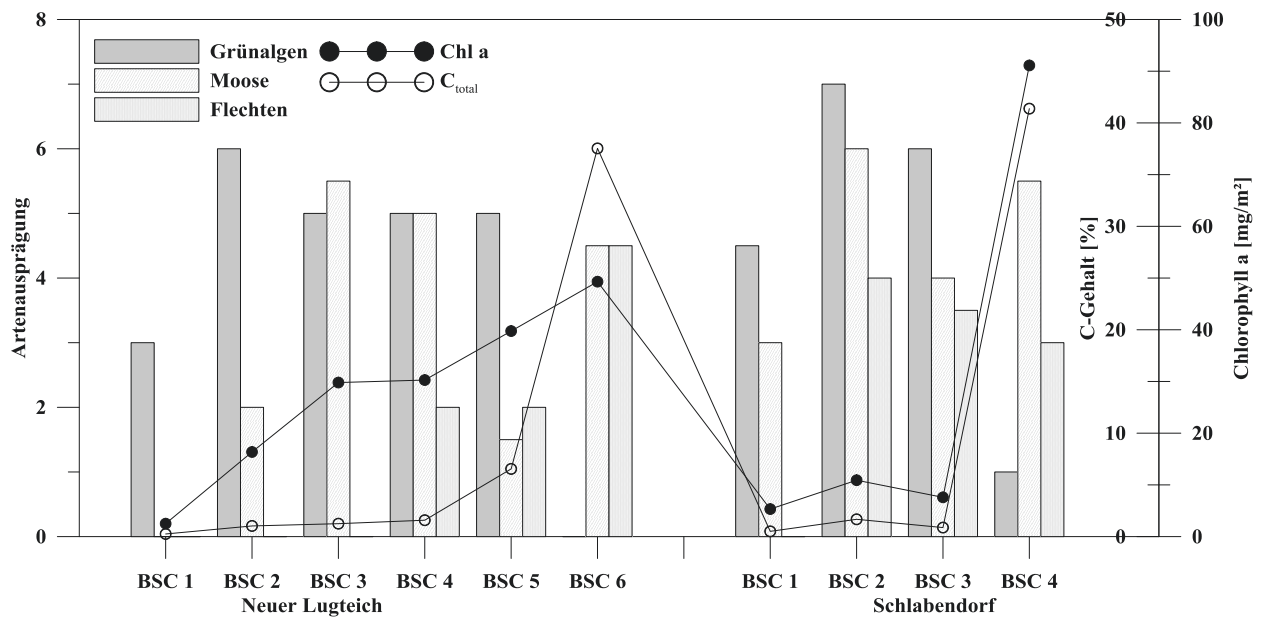


Abbildung 38. Grafischer Zusammenhang zwischen Artenausprägung und Chlorophyll a-Gehalt der Bodenkrusten in Schlabendorf und Welzow „Neuer Lugteich“

Werden die C- und Chlorophyllgehalte der beiden Standorte in Beziehung gesetzt, ergibt sich für Schlabendorf eine fast lineare Korrelation, während „Neuer Lugteich“ nur bedingt linear zusammenhängt. Vielmehr lässt sich ein exponentieller Zusammenhang erkennen. Bei

geringerem Kohlenstoffgehalt lassen sich in den Bodenkrusten 2 bis 4 „Neuer Lugteich“ höhere Chl-a-Gehalte als in Schlabendorf feststellen.

Im Vergleich der Bodenkrusten 3 und 4 „Neuer Lugteich“ ist die stärkere Organismenausprägung in BSC 4 durch einen leicht abnehmenden Moosgehalt, zunehmender Flechtenanzahl sowie einer dickeren *Zygonium*-Schicht gekennzeichnet. Trotz einer stärkeren Krustenausprägung nimmt der Chlorophyllgehalt nur in leichtem Maße zu. Grund dafür könnte der Aufbau der Flechten sein. Nach MASUCH (1993) bestehen Grünalgen-Flechten aus einem Mycobiont mit heterotropher Lebensweise und einem Phycobiont mit autotropher Lebensweise. In *Cladonia spec.* konnte als Phycobiont die Grünalge *Trebouxia spec.* identifiziert werden (ARCHIBALD 1975), wobei der photosynthesetreibende Phycobiont lediglich 5 bis 10% des Flechtenvolumens ausmacht (MASUCH 1993). Somit ist es möglich, dass trotz eines steigenden Flechtenanteils der Chlorophyllgehalt in den Krusten nur geringfügig zunimmt. Wird BSC 5 in den Vergleich mit einbezogen, müsste der Chlorophyllgehalt aufgrund der Abnahme an Moosen sinken. Dieser steigt jedoch weiter an. Eine mögliche Ursache könnte das weitere Dickenwachstum der *Zygonium*-Schicht sein, was in einer höheren Krustenbiomasse resultiert. Dafür würde der relative Vergleich mit den totalen C-Gehalten sprechen. Von BSC 3 über BSC 4 bis BSC 5 hat sich ein immer dicker werdender Algenteppich gebildet, welcher bei gleichem Flächenbezug an Volumen gewinnt.

In BSC 3 Schlabendorf nimmt der Chlorophyllgehalt leicht ab. Zwar steigt der Anteil an *Placynthiella oligotropha* (Phycobiont *Chlorella spec.* (ROSENRETER et al. 2007)) und Grünalgen im Vergleich mit BSC 2 an, allerdings nehmen Moose sowie *Cladonia subulata* ab. Somit ist BSC 3 zwar flächig zusammenhängender ausgeprägt, besteht aber aus insgesamt weniger Krustenorganismen, was sich auch in einem geringen C-Gehalt zeigt.

5.2.2 NDVI

Insgesamt fallen die NDVI-Werte in Schlabendorf höher aus als auf dem „Neuen Lugteich“. Dies lässt sich einfach dadurch erklären, dass bereits in der Arteninventur eine höhere Artendichte und auch ökologische Ausprägung der Bodenkruste in Schlabendorf festgestellt wurde. Auch im Vergleich beider Standorte hinsichtlich der gemessenen Chlorophyll a-Gehalte, fällt auf, dass in Schlabendorf schon bei geringeren Chl a-Gehalten höhere NDVI-Werte ermittelt wurden (Abb.39). Lediglich BSC 4 als finale Bodenkruste weist einen hohen

NDVI bei hohem Chl a-Gehalt auf. Grund dafür könnte das Moos *Polytrichum piliferum* sein, welches in BSC 4 Schlabendorf dominiert, in BSC 6 „Neuer Lugteich“ jedoch nicht vorkommt. Anders als *Ceratodon purpureus* bildet *Polytrichum piliferum* höhere Stämmchen und größere Blätter (AICHELE & SCHWEGLER 1993, WIRTH & DÜLL 2000) aus, wodurch ein *Polytrichum*-Rasen mehr Biomasse und somit Chlorophyll trotz gleichem Flächenbezug erzeugen kann (Abb.40). Das könnte die hohe Abweichung in Abbildung 39 erklären. Auf dem „Neuen Lugteich“ besteht ein mehr linearer Zusammenhang, d.h. ein niedriger Chl a-Gehalt resultiert in einem niedrigen NDVI und andersherum, was auch durch die Arteninventur der Bodenkrusten gestützt wird.

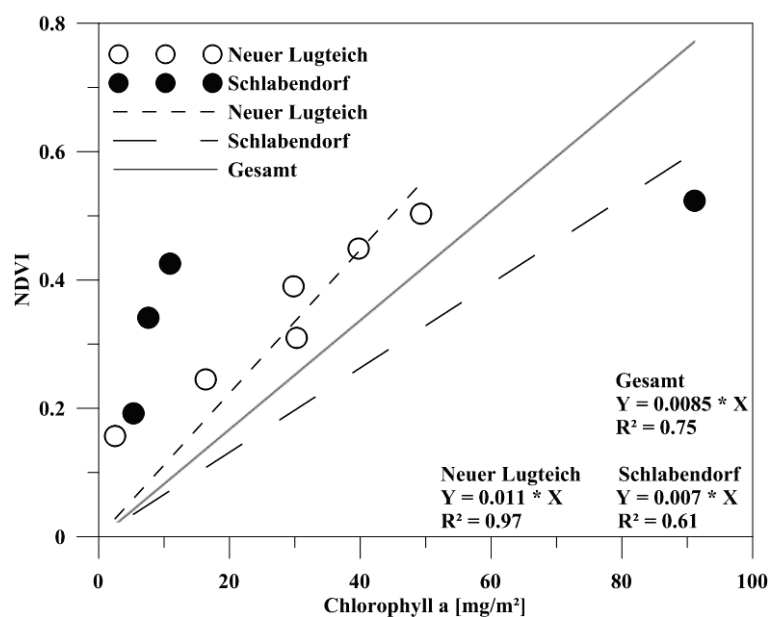


Abbildung 39. Korrelation zwischen NDVI und Chlorophyll a-Gehalt der Standorte Schlabendorf und „Neuer Lugteich“

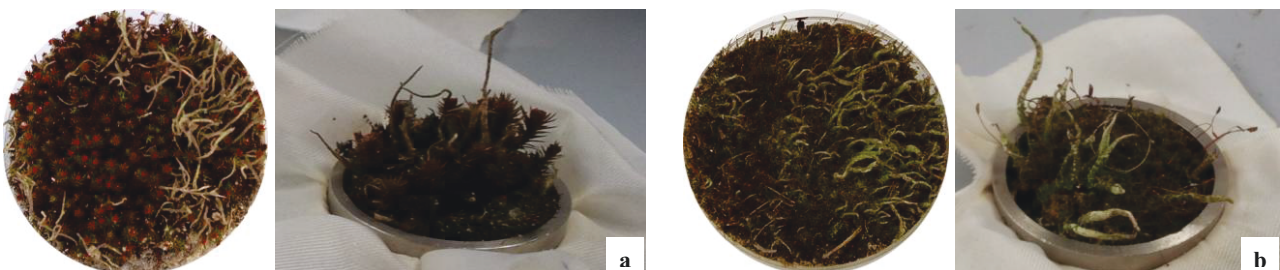


Abbildung 40. a) *Polytrichum piliferum* in BSC 4 Schlabendorf, b) *Ceratodon purpureus* BSC 6 „Neuer Lugteich“

Der NDVI in BSC 4 „Neuer Lugteich“ nimmt im Vergleich zu BSC 3 trotz eines leicht höheren Artenaufkommens ab. Zwar nimmt die Grünalgenausprägung zu, auch kommen kleine Thalli von *Cladonia glauca* in der Bodenkruste vor, allerdings nimmt der Moosanteil leicht ab bzw. werden kleine Moospflanzen von den Grünalgen überwachsen. Da der NDVI nur über die Pixelwerte der Krustenoberfläche bestimmt wird, kann dieser bei insgesamt höheren Chlorophyllgehalten der Gesamtkruste durch verdeckte Moose niedriger ausfallen. Auch in BSC 3 Schlabendorf sind im Vergleich zu BSC 2 ein niedrigerer NDVI, C- und N-Gehalte der Kruste sowie abnehmende Chlorophyll a-Gehalte zu verzeichnen. Das liegt an der zunehmend flächigen Ausprägung von *Placynthiella oligotropa* bei gleichzeitiger Abnahme von Moosen und der Flechte *Cladonia subulata*. Zum einen nimmt die Krustenbiomasse ab, zum anderen macht der chlorophyllhaltige Phycobiont der *Placynthiella oligotropa* nur einen kleinen Teil der Flechte aus (MASUCH 1993), was in einem niedrigeren NDVI resultiert.

Wird die CO₂-Fixierung in die Betrachtung beider Standorte einbezogen, ist zu erkennen, dass NDVI und Netto-Photosynthese positiv korrelieren (Abb.41). Allerdings gibt es zwischen den Standorten Unterschiede. Bei geringerer Netto-Photosyntheseleistung weisen die Bodenkrusten aus Schlabendorf höhere NDVI-Werte auf als die Proben vom „Neuen Lugteich“.

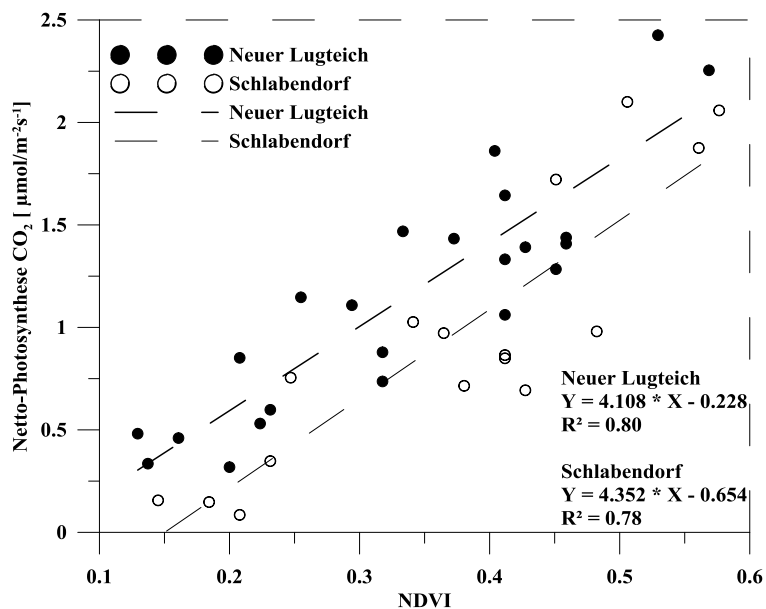


Abbildung 41. Korrelation zwischen Netto-Photosynthese und NDVI der Standorte Schlabendorf und „Neuer Lugteich“

In FISCHER et al. (2012) wurden bereits NDVI-Werte von unterschiedlich entwickelten Bodenkrusten entlang der Catena einer Sanddüne (Lieberose, Brandenburg) untersucht, allerdings handelt es sich dabei um eine natürlich gebildete Düne. Bei zunehmender Bodenkrustenentwicklung wurden in Lieberose NDVI-Werte zwischen 0,25 für initiale und 0,55 für entwickelte Krusten mit Moosen gemessen, während auf der künstlichen Sanddüne „Neuer Lugteich“ der NDVI zwischen 0,16 für initiale und 0,50 für entwickelte Krusten liegt. FISCHER et al. (2012) haben ebenfalls Korrelationen zwischen Netto-Photosynthese und NDVI für die Bodenkruste erstellt. Es wurde eine CO_2 -Aufnahme von $4,58 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ pro NDVI-Einheit festgestellt. Auf dem „Neuen Lugteich“ konnte vergleichend eine CO_2 -Aufnahme von $4,12 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ pro NDVI-Einheit abgeleitet werden (Abb.42). Sowohl NDVI als auch Netto-Photosynthese pro NDVI-Einheit fallen auf dem „Neuen Lugteich“ etwas geringer aus als in Lieberose.

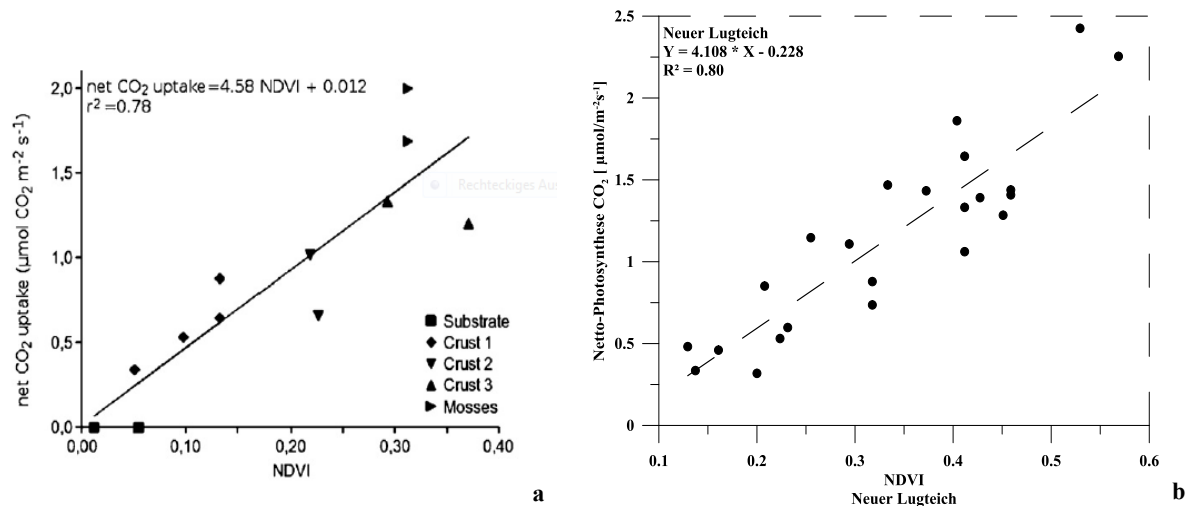


Abbildung 42. a) Beziehung zwischen NDVI und Netto-Photosynthese befeuchteter BSC Lieberose ($T = 28^\circ\text{C}$) von FISCHER et al. (2012), **b)** Korrelation zwischen NDVI und Netto-Photosynthese Welzow „Neuer Lugteich“

5.2.3 Chlorophyllfluoreszenz

Stellt man die Grund- und Maximalfluoreszenzen beider Standorte gegenüber, ist eine stetige Zunahme bei fortschreitender Krustenentwicklung zu erkennen. Die Messung der photosynthetisch aktiven Krustenbereiche per Imaging PAM ergab allerdings, dass sowohl die Grundfluoreszenz als auch die maximale Fluoreszenz der Schlabendorf-Bodenkrusten selbst

bei geringer Krustenausbildung höher liegt als in Welzow „Neuer Lugteich“, was vermutlich an dem höherem Krustenorganismenvorkommen bei geringer Krustenentwicklung in Schlabendorf liegt. Ausnahmen bilden BSC 3 „Neuer Lugteich“, die eine höhere Fluoreszenz als die nachfolgenden Krusten aufweist und BSC 3 Schlabendorf, die eine geringere Fluoreszenz als die vorhergegangenen Proben aufzeigt.

Die erhöhte Fluoreszenz des „Neuen Lugteichs“ lässt sich besonders gut in den PAM-Aufnahmen sehen (Abb.43). Durch die Gegenüberstellung der PAM-Aufnahmen als auch der normalen Krusten aufnahmen kann der stärkere Wuchs des Mooses *Ceratodon purpureus* sowie einige Pflanzen *Polytrichum piliferum* als Quelle der erhöhten Chlorophyllfluoreszenz ausgemacht werden. Da ansonsten nur in BSC 6 eine höhere Anzahl von *Ceratodon purpureus* nachgewiesen wurde, lässt sich daraus der Peak in BSC 3 ableiten.

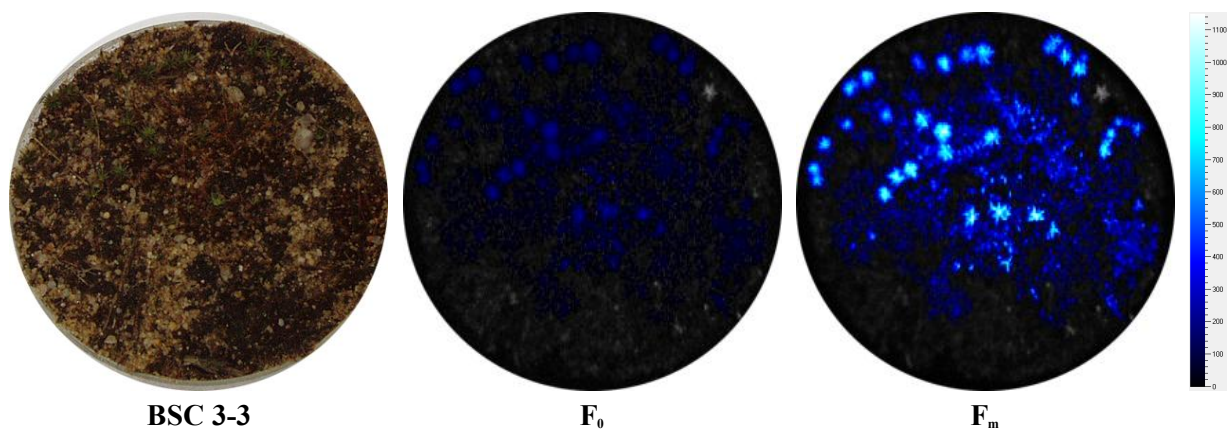


Abbildung 43. Grund- und Maximalfluoreszenz der Bodenkruste 3 Welzow „Neuer Lugteich“

Die niedrigere Fluoreszenz der BSC 3 aus Schlabendorf lässt sich, ebenso wie der niedrige NDVI, durch einen geringeren Chlorophyll a-Gehalt aufgrund geringerer Biomasse, fehlender bzw. überwachsener Moose und dem niedrigeren phototrophen Anteil von *Placynthiella oligotropa* erklären. Allerdings ist auffällig, dass die Chlorophyllfluoreszenz trotz stärkerer Krustenentwicklung geringer ausfällt als in BSC 1. Eine mögliche Erklärung kann die dunkle Pigmentierung des *Placynthiella*-Thallus sein, welcher stärker im roten und fernen Infrarotspektrum absorbiert, wo die Fluoreszenz angeregt und emittiert wird (SCHROETER et al. 1992).

F_v/F_m beträgt auf dem „Neuen Lugteich“ sowie in Schlabendorf im Mittel 0,78. Trotz unterschiedlicher Krustenzusammensetzung verläuft die Beziehung zwischen F_v/F_m und NDVI auf beiden Standorten recht homogen, wobei die Quantenausbeute in Schlabendorf mit der Krustenentwicklung etwas stagniert (Abb.44). Sowohl in Schlabendorf als auch in Welzow „Neuer Lugteich“ weisen die Bodenkrusten 1 mit 0,75 und 0,73 die geringste Quantenausbeute auf. Auf dem „Neuen Lugteich“ fällt die Quantenausbeute in BSC 4 und 5 mit 0,80 am höchsten aus, in Schlabendorf in BSC 2 mit 0,81. Alle anderen Krusten beider Standorte liegen im Bereich von 0,77 bis 0,79.

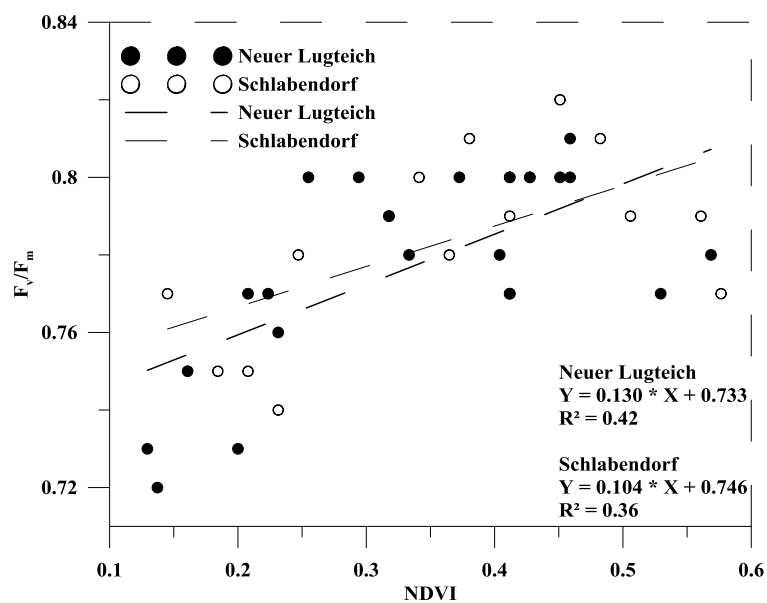


Abbildung 44. Korrelation zwischen F_v/F_m und NDVI der Standorte Schlabendorf und „Neuer Lugteich“

Bei vielen Pflanzenarten und Ökotypen liegen die Maximalwerte von F_v/F_m in dem engen Bereich von 0,83. Oftmals wird über die Abnahme dieses Quotienten eine photoinhibitorische Schädigung des Photosyntheseapparates durch zu hohe Lichtintensitäten oder Stress durch Kälte, Frost, Hitze oder Trockenheit indiziert. Allerdings lassen Änderungen von F_0 und F_m auf unterschiedliche Stresswirkungen schließen, die allein durch die Betrachtung des Quotienten nicht aufgedeckt werden (VON WILLERT et al. 1995). Insbesondere in den Bodenkrusten wird ein variierender F_v/F_m -Wert mit Lichtstress bei Moosen (POST 1990, SCHLENSOG 2000) und Flechten (DEMMING-ADAMS et al. 1990, SCHROETER et al. 1992) begründet. Auch HOUSMAN et al. (2006) konnten feststellen, dass stärker entwickelte Krusten eine höhere Quantenausbeute aufweisen als geringer entwickelte Krusten, was aufgrund der

Wüstenstandorte an den Pigmenten liegt, welche das Photosystem II mit zunehmender Entwicklung vor Sonneneinstrahlung schützen.

Allerdings wurden die meisten Untersuchungen unter ariden Bedingungen oder höheren Lichtintensitäten, bspw. Antarktis (POST 1990), vorgenommen. Von Licht-, Hitze- oder Trockenstress kann bei Probenahmen im März in Brandenburg nicht ausgegangen werden. Dies zeigt sich in den relativ konstanten Werten von 0,77 bis 0,81. Lediglich die schwach entwickelten Bodenkrusten fallen etwas niedriger aus. Hier besteht die Möglichkeit, dass aufgrund der geringen Biomasse Wasser kürzer gehalten wird und es eher zu einer leichten Belastung durch Trockenheit kommt.

5.2.4 Gaswechsel

Um die Gaswechselergebnisse der beiden Standorte vergleichen zu können, werden zuerst die CO₂-fixierenden als auch -freisetzenden Reaktionen aufgeführt, welche in die Gesamtbilanz eingehen. Zu den CO₂-fixierenden Reaktionen gehört die photosynthetische CO₂-Assimilation, welche CO₂ in den Stoffwechsel des Organismus einbezieht. Zu den CO₂-freisetzenden Reaktionen gehören die mitochondriale Atmung, welche auch bei photosynthetischer Aktivität stattfindet, um Energie in Form von ATP bereitzustellen sowie die Photorespiration, welche als Nebenweg der Dunkelreaktion O₂ verbraucht und CO₂ abgibt (VON WILLERT et al. 1995). Anders als bei der „echten Atmung“ ist die Photorespiration nicht mit einer ATP-Bildung verbunden und es wird angenommen, dass unter normalen atmosphärischen Bedingungen (20% O₂, 0,03% CO₂) bis zu 50% des assimilierten Kohlenstoffs durch Photorespiration energetisch nutzlos wieder in CO₂ umgewandelt wird (JÄGER et al. 2003).

Photorespiration findet in Algen und Moosen (SMITH & SMITH 2009) sowie Flechten statt (MASUCH 1993). Bei Flechten kann eine Temperaturerhöhung das Verhältnis von CO₂ zu O₂ zugunsten der Photorespiration verlagern, wobei durch hohe CO₂-Grenzflächenwiderstände des Flechten-Cortex das respiratorisch und photorespiratorisch freigesetzte CO₂ bis zu 100% recycelt werden kann (GREEN et al. 1985). Photorespiratorische Messungen an Grünalgen und Cyanobakterien von CHENG & COLMAN (1974) zeigen, dass Grünalgen eine höhere Photorespirationsrate aufweisen als Cyanobakterien und BIRMINGHAM et al. (1982) haben für

einzellige Grünalgen eine Photorespiration von 3,3 bis 7,2% der Netto-Photosynthese gemessen.

So gehen von der Brutto-Photosynthese der Bodenkrusten selbst die Photorespiration sowie Respiration von autotrophen und heterotrophen Geweben ab (GIFFORD 2003). In Flechten betreibt auch nur der Phycobiont Photosynthese, aber sowohl er als auch der Mycobiont gehen in die Respiration ein (MASUCH 1993). Zusätzlich wird die Atmung der mikrobiellen Bodenorganismen abgezogen (SCHEFFER et al. 2010). Nach Abzug der Atmungsverluste verbleibt die Netto-Photosynthese. Maximale Netto-Photosyntheseraten von Messungen aus verschiedenen Regionen der Welt reichen von 0,11 bis 11,5 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (LANGE 2003).

In Abbildung 45 sind die CO_2 -Austauschraten sowie die Chlorophyllgehalte der Bodenkrusten im Verlauf aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die Netto-Photosyntheseraten sowohl auf dem „Neuen Lugteich“ als auch in Schlabendorf mit zunehmender Krustenentwicklung ansteigen.

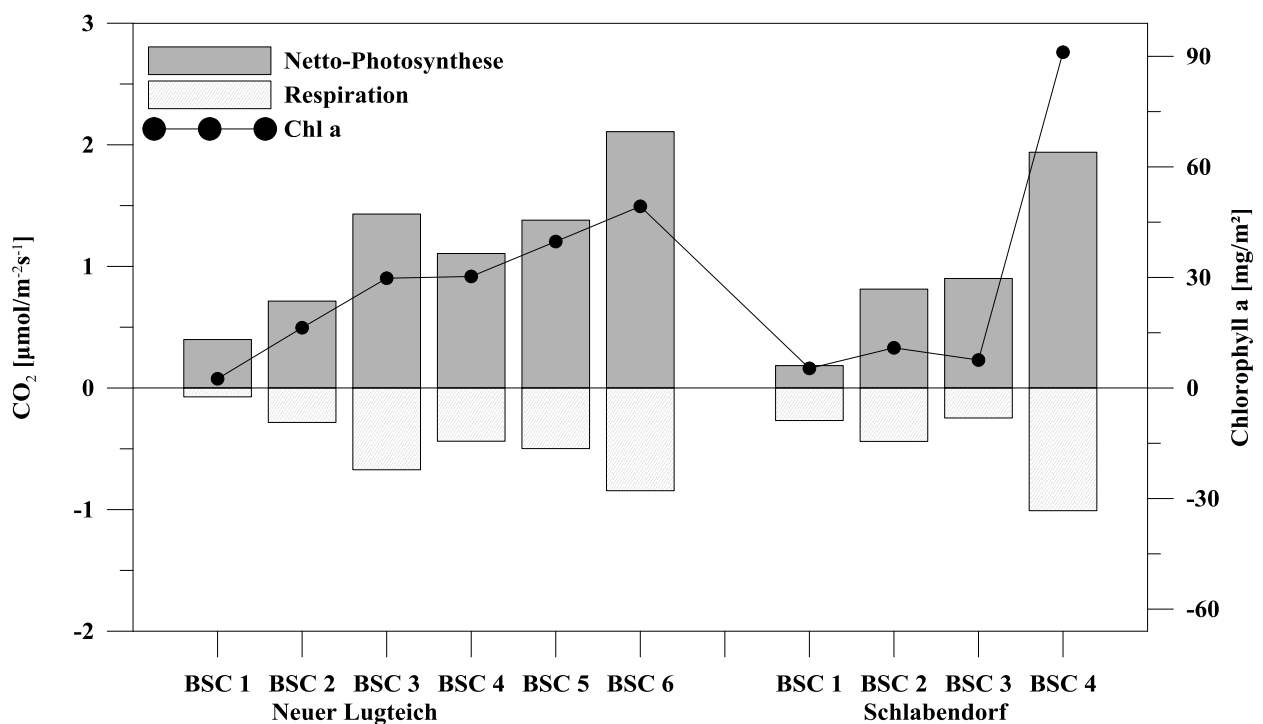


Abbildung 45. Grafischer Zusammenhang von Chlorophyll a-Gehalten, Netto-Photosynthese und Respiration der Standorte Schlabendorf und „Neuer Lugteich“

Auf dem „Neuen Lugteich“ ist in BSC 3 bereits ein vorläufiges Maximum festzustellen, wobei auch die Respiration höher ausfällt. Im Vergleich zu den Bodenkrusten 1 bis 5 liegt in

BSC 3 der höchste Anteil an Moosen vor, welche durch ihre Rhizoidausbildung tiefer in das Substrat eindringen als Grünalgen und es dort zur Anhäufung von organischer Substanz kommt (DRAHORAD & FELIX-HENNINGSSEN 2009). Diese bildet die Nahrungsgrundlage für heterotrophe Bodenorganismen, die durch Zersetzung der Biomasse für eine Anreicherung mit anorganischem N im Substrat sorgen (SCHEFFER et al. 2010). Durch das höhere Moosaufkommen nimmt auch die Rhizoidausbildung zu, was zu höheren C-Gehalten im Substrat unter den Bodenkrusten führt. Es besteht somit ein höheres Nahrungsangebot für Bodenorganismen, der Gehalt an N steigt an und dies führt zu einem stärkeren Krustenorganismenwachstum durch das steigende Nährstoffangebot. In der Gaswechselformung ist dieser Prozess durch eine hohe Netto-Photosynthese als auch Gesamtrespiration gekennzeichnet. Im weiteren Verlauf nimmt sowohl die Netto-Photosyntheserate als auch Respirationsrate bei wachsenden C- und N-Gehalten sowie ansteigender Chlorophyllmenge in den Bodenkrusten zu.

Trotz höherem Krustenorganismenaufkommen fallen die Netto-Photosyntheseraten in Schlabendorf durchweg geringer aus als auf dem „Neuen Lugteich“. Werden die C- und N-Gehalte der Krustensubstrate betrachtet, fällt auf, dass sich unter der am geringsten ausgeprägten Kruste die höchsten Gehalte an Stickstoff finden. Diese nehmen im Verlauf der Krustenentwicklung, anders wie am „Neuen Lugteich“, kontinuierlich ab. Da allerdings sowohl Chlorophyll a, der Krusten-C- und N-Gehalt sowie der NDVI zunehmen, kann so auf ein Krustenwachstum geschlossen werden, welches die C- und N-Reserven aus dem Boden in Biomasse umsetzt. Da die umgebende Vegetation in Schlabendorf bereits länger Zeit hatte, sich zu etablieren, ist auch bereits mehr abgestorbene Biomasse (bspw. Birkenpollen oder Gräser) in das Substrat gelangt, wodurch in BSC 1 der C- und N-Pool anwächst und die Respiration aufgrund der Mikroorganismen höher ausfällt als die Netto-Photosynthese der wenigen Krustenorganismen. In BSC 2 nimmt die aktive Krustenbiomasse zu, so auch Netto-Photosynthese und Respiration, aber der Nährstoffpool im Substrat schrumpft und wird in die Biomasse eingebaut. Die Krustenorganismen befinden sich vermutlich in ihrer Vegetationsperiode, in welcher der Gehalt an abgestorbener Biomasse sehr gering ausfällt und somit weniger Nahrung für heterotrophe Bodenorganismen zur Verfügung steht.

In BSC 3 ist jedoch ein gänzlich anderes Verhalten zu beobachten. Im Vergleich zu BSC 2 nimmt der Moosanteil der Krusten leicht ab, statt *Polytrichum piliferum* findet sich eher *Ceratodon purpureus*. Auch der Flechtenanteil verschiebt sich von der Strauchflechte *Cladonia subulata* und *Placynthiella oligotropa* hin zu einem alleinigen *Placynthiella-*

Bewuchs. Die Grünalgengehalte ändern sich kaum. Während sich in BSC 2 noch kleine, freie Stellen zwischen den Krustenpunkten zeigen, füllen die Organismen in BSC 3 die Krustenfläche komplett aus. Dessen ungeachtet haben sich die gemessenen C- und N-Gehalte der Bodenkruste im Vergleich zu BSC 2 um die Hälfte verringert. Trotz geringerer Chl a-Gehalte, Chlorophyllfluoreszenz und NDVI als in BSC 2 wurde eine höhere Netto-Photosynthese, allerdings auch eine wesentlich kleinere Gesamtrespiration gemessen. Wird angenommen, dass sich Photorespiration und mitochondriale Respiration der Krustenorganismen nicht von den anderen Krusten unterscheiden, bleibt nur die Vermutung, dass entweder die mikrobielle Bodenrespiration abgenommen hat oder *Placynthiella oligotropa* bei geringem Chlorophyllgehalt eine höhere Netto-Photosynthese aufweist als Flechten der Gattung *Cladonia* oder sogar den Moosen der Bodenkrusten Schlabendorf.

Bereits MASUCH (1993), LANGE et al. (1994), LANGE et al. (1995), LANGE et al. (1997), LANGE et al. (1998), LANGE & GREEN (2003) als auch BÜDEL et al. (2013) haben ein speziesspezifisches Photosyntheseverhalten von Flechten festgestellt. An einer Auswahl von Grünalgen- sowie Cyanoflechten konnten variierende Chlorophyllgehalte als auch unterschiedliche maximale Netto-Photosyntheseraten bestimmt werden. Dabei wurden Flechten aus Namibia, Mexico, Utah sowie Deutschland betrachtet (BÜDEL et al. 2013). Interessant sind in diesem Fall besonders die Flechten aus Deutschland, welche eine maximale Netto-Photosynthese von 2,6 bis 6,9 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Temperatur 15-22°C) aufweisen. Für die Strauchflechte *Cladonia convoluta* wurde eine maximale Netto-Photosynthese von 5,1 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ gemessen (LANGE & GREEN 2003). Zwar wurden in Schlabendorf und in Welzow „Neuer Lugteich“ Bodenkrusten mit ausgeprägten *Cladonia*-Flechten untersucht, jedoch wurden nur maximale Netto-Photosyntheserate von 1,94 bis 2,11 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ gemessen, inklusive einer zusätzlichen, hohen Moosdeckung, welche ebenfalls in die CO₂-Bilanz eingeht.

Häufig sind Chlorophyllgehalt und CO₂-Assimilation in den Flechten nicht gut korreliert, weshalb das Enzym RuBisCO als Bezugsgröße für aufgenommenes CO₂ vorgeschlagen wurde (SEEMANN & SHARKEY 1986). Da jedoch Algenanteile in verschiedenen Arten, zu verschiedenen Jahreszeiten und Ökotypen sowie in unterschiedlich alten Thallusteilen variieren, entscheidet die Fragestellung über die Bezugseinheit (MASUCH 1993). In diesem Fall ist es also durchaus möglich, dass die Krustenflechte *Placynthiella oligotropa*, welche einen großen Teil der Bodenkruste 3 in Schlabendorf ausmacht, bei geringerem Chlorophyllgehalt eine relativ hohe CO₂-Assimilationsrate hat.

LANGE (2003) hat die maximalen Netto-Photosyntheseraten verschiedenartiger Bodenkrusten zusammengetragen (siehe oben), wobei durchmischte Krusten mit einer dichten Grünalgenpopulation (*Klebsormidium spec.*) eine maximale Rate von $11,5 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ aufweisen, Krusten aus Grünalgen sich jedoch im Bereich von $4,8$ bis $5,9 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ bewegen. Mit $2,11 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ auf dem „Neuen Lugteich“ und $1,94 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ in Schlabendorf liegen die stärker entwickelten Bodenkrusten somit im unteren Bereich. Auch die Grünalgenkrusten liegen unter dem von LANGE (2003) angegebenen Niveau.

Betrachtet man den Quotient aus Brutto-Photosynthese und Respiration, ist zu erkennen, dass die Bodenkrusten aus Welzow „Neuer Lugteich“, bis auf BSC 1, eine CO_2 -Fixierung im Bereich von $3,23$ bis $3,78$ aufweisen. BSC 1, welche nur aus wenigen Grünalgen besteht, weist zwar die niedrigsten Netto-Photosynthese- und Respirationsraten auf, fixiert aber den meisten CO_2 aller Krusten. Kommen Moose hinzu, nimmt zwar die Photosyntheseleistung zu, aber auch die Respiration steigt stärker an, wodurch weniger CO_2 in Biomasse umgesetzt wird. Dieser Zusammenhang zeigt sich besonders gut in dem Artenverlauf der Krusten 1 bis 3, welche zwar sowohl mehr Grünalgen als auch Moose aufzeigen, der Mooszuwachs jedoch wesentlich stärker ausfällt. Ab BSC 4 nehmen die Moose wieder etwas ab, dafür kommen Flechten hinzu, welche im Verlauf zu BSC 6 in Größe und Anzahl zunehmen. Durch die abnehmenden Moose und die zusätzliche Respiration des Mycobionten sinkt die Netto-Photosynthese, aber auch die Respiration, es wird wieder mehr CO_2 fixiert. Das könnte an den ausgeprägteren Algenteppichen liegen, welche in BSC 5 nochmals zunehmen. In dieser Kruste findet sich noch weniger Moos und die Flechtenbiomasse nimmt zu, da die Thalli bereits größer sind. Hier reduziert wieder der Mycobiont die Netto-Photosynthese, trotzdem fällt sie höher aus als in BSC 4, was wahrscheinlich an der hohen Grünalgenbiomasse liegt. Auch die Respiration nimmt zu, allerdings wird wieder mehr CO_2 in Krustenbiomasse umgesetzt. BSC 6 unterstützt die These, dass ein alleiniges Vorkommen von Flechten und Moosen zwar eine ansteigende Netto-Photosynthese bewirkt, aber durch die ebenfalls stärker ansteigende Respiration weniger Biomasse aufgebaut wird als beim Vorhandensein von Grünalgen.

In Schlabendorf lässt sich diese Hypothese übertragen, lediglich die Ausprägung der Flechte *Placynthiella oligotropa* verschiebt das Verhältnis von Photosynthese und Respiration hin zu einer höheren CO_2 -Fixierung. Diese Vermutung wurde bereits weiter oben geäußert und scheint zuzutreffen.

Die Auswertung der PAM- und NDVI-Aufnahmen lässt den Schluss zu, dass die photosynthetische Aktivität der Moose im Schnitt am höchsten ausfällt. An zweiter Stelle stehen Grünalgen und die Flechte *Placynthiella oligotropha* und die geringste Vitalität konnte in den *Cladonia*-Flechtenproben beobachtet werden. Diese erscheinen im Vergleich zu den Grünalgen dunkler, während die Moose auf den Fotos sehr hell und detailliert zu erkennen sind. Die Gaswechseldaten unterstützen diese Reihenfolge in Bezug auf die Netto-Photosyntheseleistung, allerdings wird auch ersichtlich, dass besonders die Moose eine recht hohe Respirationsrate und somit einen hohen CO₂-Durchsatz und weniger Fixierung aufweisen. Die Grünalgen haben zwar eine geringere Photosyntheseleistung im Vergleich zu den Moosen, geben aber weniger CO₂ durch Atmung wieder ab, wodurch möglichst viel Biomasse aufgebaut werden kann. Auch die *Cladonia*-Flechten haben eine geringere Photosyntheserate wie die Moose und aus den NDVI-Aufnahmen wird ersichtlich, dass diese sogar niedriger ausfällt als die Photosyntheseleistung der Grünalgen. Es wurde bereits gesagt, dass der Photobiont lediglich einen geringen Teil des Thallus ausmacht (MASUCH 1993) und auch die Photosyntheserate mit zunehmendem Alter der Thallusteile sukzessive abnimmt (LECHOWICZ 1983). Pilz und Alge gehen jedoch beide in die Respiration ein, können aber je nach Thallusaufbau bereits respiriertes CO₂ wieder nutzen (GREEN et al. 1985).

5.3 Hydrologische Parameter

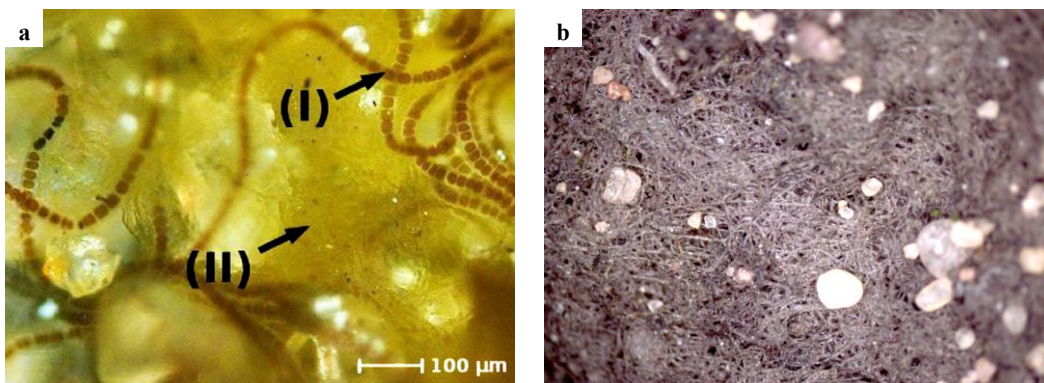
5.3.1 Repellency Index

Werden die Mittelwerte der Repellency Index-Messungen gegenübergestellt, sind deutliche Unterschiede zwischen den Bodenkrusten und ihrer ökologischen Ausprägung zu erkennen. Die Werte der Benetzungshemmung ergeben in Verbindung mit den Krustenaufnahmen und Artenbeschreibungen ein genaues Bild des Infiltrationsverhaltens der Bodenkrusten.

Mittels Vernetzung der Sandpartikel durch Algenfilamente nimmt die Infiltration im Vergleich zu den reinen Substratproben durch das Blockieren der Porenräume ab und der Repellency Index zu (FISCHER et al. 2010, SPRÖTE 2013). Je großflächiger und dichter die Vernetzung ausfällt, desto geringer die Infiltrationswirkung der Krusten. Kommen Moospflanzen hinzu, nimmt die Benetzungshemmung aufgrund der Moosrhizoide ab, da diese das Substrat etwas auflockern (SPRÖTE 2013), bzw. sich entlang der Rhizoide präferenzielle Fließwege bilden (REINKEN 2014).

Eine Abweichung stellt lediglich Probe 5 von der Düne des „Neuen Lugeichs“ dar. Im Vergleich zur vorhergehenden Bodenkruste nimmt der R_i -Wert ab, obwohl die Ausprägung von *Zygonium spec.* zu-, von Moosen aber abnimmt. Bei der genauen Betrachtung des Krustenaufbaus ist zu erkennen, dass die Kruste oberflächlich komplett mit *Zygonium spec.* überzogen ist. Dieser Grünalgent Teppich hat kleine Moospflanzen überwachsen, welche durch kleine Auflockerungen zu erkennen sind. Ebenso verhält es sich mit kleinen Kiespartikeln. Dadurch werden präferentielle Fließwege durch die Algenschicht hindurch geschaffen.

Einige Untersuchungen (bspw. NEVO & MITCHELL 1967, KATZNELSON 1989, KIDRON et al. 1999, MALAM ISSA et al. 2009, ROSSI et al. 2012, CHEN et al. 2014, COLICA et al. 2014) führen als weitere Erklärung für die abnehmende Infiltration der Krusten das Verkleben durch extrazelluläre polymere Substanzen von Algen an. Allerdings haben diese Studien eine Biokrustenzusammensetzung von Grünalgen und Cyanobakterien oder sogar nur Cyanobakterien zur Grundlage. Auch wurden bestimmte Arten der Cyanobakterien oder auch Grünalgen daraufhin erforscht. In den hier untersuchten Bodenkrusten finden sich allerdings keine Cyanobakterien, lediglich *Zygonium spec.* und in geringeren Anteilen *Ulothrix spec.*. HOOPERT et al. (2010) konnte bei elektronen- und lichtmikroskopischen Untersuchungen von Algenkulturen zwar bei einigen Cyanobakterien extrazelluläre Polymere feststellen, ebenso MAZOR et al. (1996), jedoch wurde bei der Grünalgen-Gattung *Zygonium* trotz dicker, mehrschichtiger Zellwand keine Polysaccharid-Einkapselungen oder schleimige Umhüllungen beobachtet (HOOPERT et al. 2010). In FISCHER et al. 2010 wurden optisch per Polarisationsmikroskop Exopolymere zwischen filamentösen Algen sichtbar gemacht. In dieser Untersuchung konnte das selbst bei mehrmaliger Wiederholung nicht bestätigt werden (Abb.46).



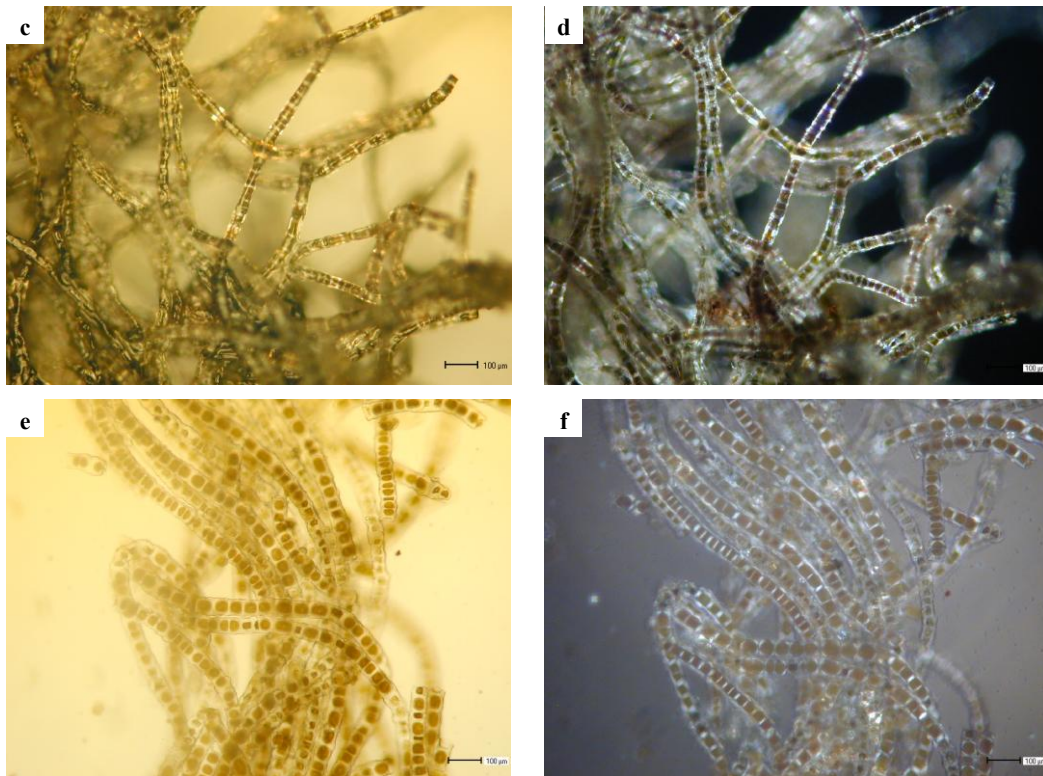


Abbildung 46. **a)** Polarisationsmikroskopie angeschwollener Exopolymere nach Wasserkontakt von FISCHER et al. (2010), **b)** Lufttrockene *Zygogonium spec.* Bodenkruste, **c)** Lichtmikroskopie *Zygogonium spec.* lufttrocken, **d)** Polarisationsmikroskopie *Zygogonium spec.* lufttrocken, **e)** Lichtmikroskopie *Zygogonium spec.* feucht, **f)** Polarisationsmikroskopie *Zygogonium spec.* feucht

5.3.2 Matrixpotential und Wassergehalt

Anhand der Schlabendorf-Bodenkrusten ist zu erkennen, dass die maximale Wasserspeicherkapazität als auch die Wassergehalte bei zunehmender Krustenausprägung, insbesondere der Grünalgen, zunehmen. Die unterschiedliche Bindungsstärke und Wasserspeicherung kann auf einer Zunahme der adsorbierenden Oberfläche sowie einer Abnahme des Porendurchmessers (SCHEFFER et al. 2010) aufgrund einer Vernetzung der Sandpartikel durch Algenfilamente beruhen. Durch die Kapillarwirkung der verengten Poren üben die Bodenkrusten eine höhere Saugspannung aus, welche mit abnehmendem Wassergehalt ansteigt (SCHEFFER et al. 2010). Auch absorbieren die einzelnen Krustenorganismen selbst Wasser (BELNAP 2006).

Im Vergleich der Bodenkrusten 2 und 3 aus Schlabendorf ist jedoch eine deutliche Abnahme der maximalen Wasserspeicherkapazität zu erkennen. Grund dafür könnte sein, dass die

Bodenkrusten 3 durch den dichten Bewuchs mit *Placynthiella oligotropha* einen hohen Porenverschluss aufweisen (Abb.47), Wasser also nicht mehr in den Poren aufgenommen werden kann. Vermutlich durch die Adsorption an lebende organische Substanz, welche in der Kruste sowohl in der Fläche als auch in der Dicke sehr ausgeprägt ist, kann das Wasser entgegen der Sauspannung länger als in BSC 2 gehalten werden.

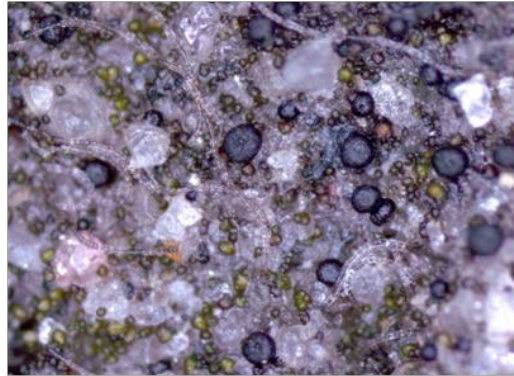


Abbildung 47. Vernetzte Sandpartikel durch *Zygonium spec.* und *Placynthiella oligotropha* in Bodenkruste 3 Schlabendorf

Die Wasserspannungskurven der Bodenkrustenproben Welzow „Neuer Lugteich“ zeigen, dass es zwischen den reinen Substratproben und BSC 1 kaum Unterschiede gibt, da die Ausprägung von Grünalgen sehr gering ausfällt. Die maximale Wasserspeicherkapazität verändert sich von den reinen Substratproben bis hin zu BSC 3 kaum bis gar nicht, allerdings erhöht sich das Matrixpotential leicht aber kontinuierlich. Dies kann zum einen daran liegen, dass die Ausprägung der Algenteppiche und somit die Vernetzung der Poren im Vergleich zu Schlabendorf wesentlich geringer ausfällt, zum anderen auch weniger adsorbierbare Biomasse vorhanden ist.

Auffällig sind die Wasserspannungskurven der Bodenkrusten 4 und 5. Während BSC 4 die geringste maximale Wasserspeicherkapazität aller untersuchten Proben aufweist, liegt BSC 5 mit einer WHK_{max} von 98,4% im sehr hohen Bereich, obwohl keine Abweichungen im Volumenbezug vorliegen. Die hohe maximale Wasserhaltekapazität in BSC 5 kann eventuell damit erklärt werden, dass die Bodenkruste fast vollständig aus *Zygonium spec.* besteht und nur in geringem Maße Moospflanzen oder Flechten enthält. Auch ist sie wesentlich dicker beschaffen als alle anderen Bodenkrusten und konnte bei Austrocknung sogar als dicke Substrat-Algen-Schicht vom Sand abgehoben werden. Die Kruste könnte aufgrund dieser

Beschaffenheit wie eine Art Schwamm mehr Wasser an die beträchtliche innere Oberfläche adsorbieren als auch durch Quellung aufnehmen (BELNAP 2006).

BSC 4 „Neuer Lugteich“ enthält zwar Moospflanzen und wenige Flechtenthalli welche selbst Wasser speichern können, allerdings sind, im Gegensatz zu BSC 3 und auch anderen Krusten, die meisten Moose in den Algent Teppich eingewachsen. Dadurch entsteht eine Verbindung der oberen Krustenfläche zum Substrat und Wasser kann präferenziell abgeleitet werden. Auch bilden die Grünalgen kleinräumige Teppiche aus, welche etwas dicker ausfallen als in BSC 3. Durch die Moosblätter und die darin verwobenen Algenfilamente werden zusätzliche Kapillarräume geschaffen, welche in der Probe verbliebenes Wasser länger gegen die Saugspannung halten. Somit kann BSC 4 aufgrund der eingewachsenen Moose maximal weniger Wasser aufnehmen, es allerdings länger als alle anderen untersuchten Proben gegen die Saugspannung halten. Im Vergleich zu den reinen Substratproben fallen auch in BSC 2, 3 sowie BSC 4 die WHK_{max} geringer aus. Dies kann an der porösen Struktur der Bodenkrusten liegen, welche somit weniger Volumen aufweisen als die reinen Substrate.

Der fehlerhafte Volumenbezuges der stark bis final ausgeprägten Bodenkrusten, in denen Moose und Flechten über den Stechzylinder hinausragen, resultiert in Wassersättigungen über 90 bzw. 100%. Dadurch liegt auch der Endwassergehalt bei einer Saugspannung von -200 hPa höher als bei den Vergleichsproben. Die finalen Bodenkrusten BSC 6 („Neuer Lugteich“) und BSC 4 (Schlabendorf) können durch das höhere Volumen zwar mehr Wasser aufnehmen, entwässern aber wesentlich schneller als alle anderen Krusten. In Bodensäulenversuchen konnte gezeigt werden, dass Wasser stark an organischer Bodensubstanz sorbiert und damit die Ausbildung der präferentiellen Fließpfade mit der Verteilung der Biomasse im und auf dem Boden variiert (REINKEN 2004). Besonders durch das Rhizoid als auch die Stämmchen der Moose an sich kann Wasser anhaften und bei entsprechender Saugspannung präferentiell und schnell abfließen. Da die Sandpartikel in diesem Stadium auch nicht mehr durch Algen oder Krustenflechten vernetzt werden, fehlen die Kapillarwirkung der verengten Poren sowie die zusätzliche adsorbierbare Oberfläche.

Im Vergleich liegen lediglich die maximalen Wasserspeicherkapazitäten der Bodenkrusten des Standortes Schlabendorf etwas niedriger als in Welzow „Neuer Lugteich“, was an den bereits früher ausgebildeten Moosrhizoiden liegen kann.

5.4 Pedologische Parameter

5.4.1 pH

Die Substrat-pH-Werte aus Schlabendorf folgen der Tendenz, mit steigendem C-Gehalt der Bodenkrusten zu versauern. Die pH-Werte in den Oberkrusten aus Schlabendorf fallen durchweg saurer aus als in den Substraten und werden ebenfalls von BSC 1 zu BSC 4 stetig kleiner. Wie bereits in den Substraten ist eine Tendenz der Versauerung bei zunehmender Krustenausprägung zu erkennen. Die pH-Werte der Bodenkrusten BSC 1 bis 3 lassen sich eher mit den C- und N-Gehalten der Substrate korrelieren, je höher C und N, desto höher der pH. In BSC 4 sind die pH-Werte von Substrat und Kruste am niedrigsten. In Welzow „Neuer Lugteich“ ist von BSC 1 bis BSC 4, mit Ausnahme von BSC 3, ebenfalls eine leichte Versauerung zu beobachten, jedoch halten die Werte ein gemeinsames Niveau von 5,17. In BSC 6 steigt der pH etwas an und bis auf BSC 3, welcher den höchsten Wert auf dem „Neuen Lugteich“ aufweist, liegen die Werte noch unter dem pH der reinen Substratproben. Insgesamt fallen die pH-Werte in Schlabendorf etwas höher aus als auf dem „Neuen Lugteich“, nehmen aber bei fortschreitender Krustenentwicklung stärker ab.

Infolge des Braunkohleabbaus kam es zu einer Verlagerung des in den tertiären Schichten auftretenden FeS_2 in den Abraumkippen sowie im ungestörten Schichtbereich. Durch Grundwasserabsenkung und dem damit verbundenen Sauerstoffzutritt führte der Wechsel vom reduzierenden zum oxidierenden Milieu zur Bildung von löslichen Sulfaten mit erheblichem Versauerungspotential. Für den Tagebau Schlabendorf-Süd wurde bspw. ein Pyritüberschuss von 36 Mio t und dem entsprechend hohen Versauerungspotential berechnet (MANHENKE et al. 2010). Laut Ausschreibung der LMBV wurden auf dem Standort Schlabendorf Dünge- und Meliorationsmaßnahmen zur Bodenverbesserung für die Herstellung von forstwirtschaftlichen Nutzflächen durchgeführt (DTAD 2008). Durch Kalkung konnte somit der Boden-pH angehoben werden. Mit zunehmender Krustenaktivität sowie Ausprägung von Moosrhizoiden nimmt der pH des Substrates ab, da durch die Aufnahme von Nährstoffen durch die Rhizoide Protonen abgegeben werden. Auch nimmt bei steigender organischer Substanz der mikrobielle Abbau durch Bodenorganismen zu, welche bspw. durch Nitrifikation zur natürlichen Bodenversauerung beitragen. Zwar kann der versauernde Effekt der Nitrifikation durch die Aufnahme von Nitrat durch Moose leicht abgeschwächt werden, allerdings bleibt ein Protonenüberschuss vorhanden (SCHEFFER et al.

2010). Da BSC 4 bereits weit entwickelt ist und auch die umgebende Vegetation stärker ausfällt, ist auch der Boden-pH bereits stärker versauert.

Werden pH-Werte der Substrate und Respirationsraten korreliert, ist in Schlabendorf eine deutliche Versauerung des Bodens mit zunehmender Respiration zu erkennen (Abb.48). Durch die aerobe Atmung wird CO_2 freigesetzt, wodurch auch die Konzentration an H_2CO_3 ($\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) im Boden ansteigt.

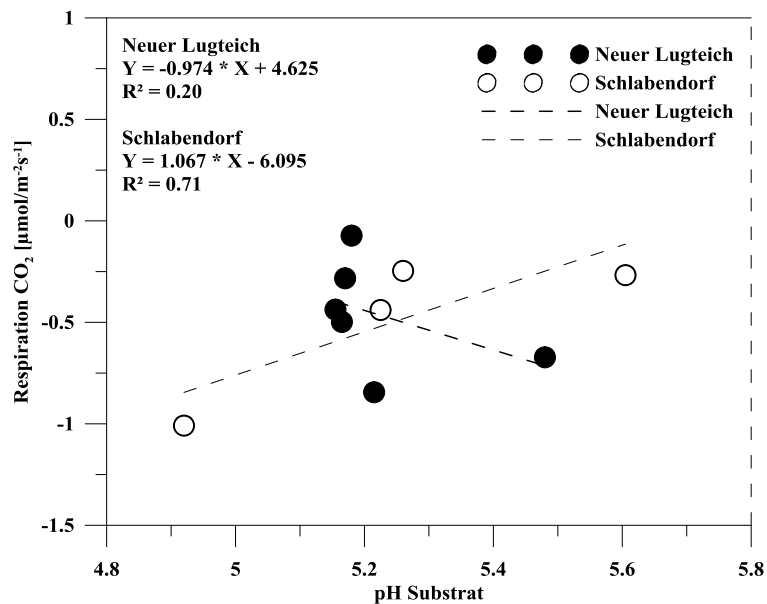


Abbildung 48. Korrelation zwischen Respiration und pH des Krustensubstrates von Schlabendorf und Welzow „Neuer Lugteich“

Über der tonigen Stauschicht des „Neuen Lugteichs“ wurde eine 2 bis 3 m mächtige Sandschicht aufgebracht, welche aus quartärem und tertiärem Substrat besteht. Während eine Deckschicht aus pleistozänem Sand frei von Pyriten und Ligniten ist, enthält tertiäres Material Lignite und Xylite, was in einer höheren Bodenlösungsacidität sowie höherem organischem Kohlenstoffgehalt, 0,35% im Vergleich zu quartärem Material mit 0,15%, resultiert. Bei einer reinen quartären Deckschicht könnte die tagesauspezifische Versauerung durch Pyritoxidation weitgehend ausgeschlossen werden (GERWIN et al. 2009), allerdings liegt dieser Fall hier nicht vor. Auf dem Standort Welzow „Neuer Lugteich“ wurden keine Meliorationsmaßnahmen wie Kalkung oder Düngung durchgeführt (GERWIN et al. 2009), wodurch der Boden-pH insgesamt niedriger ausfällt als auf dem Standort Schlabendorf.

Auf dem „Neuen Lugteich“ liegen die pH-Werte der Krusten recht konstant bei 5,17, lediglich BSC 3 mit 5,48 und BSC 6 mit 5,21 fallen etwas höher aus. Da BSC 6 leicht abseits der übrigen Krusten lag und auch der pH-Wert nur um 0,04 abweicht, kann es sich hier um eine kleinräumige Heterogenität handeln. Die größer ausfallende Abweichung in BSC 2 von 0,31 wird hier nicht durch die Gaswechseldaten erklärt. Auf der weniger heterogen ausgeprägten Sanddüne wären weitere chemische Bodenuntersuchungen sinnvoll, um diese Divergenz aufzuklären.

5.4.2 C- und N-Gehalte

Da die totalen C- und N-Gehalte bestimmt wurden, werden die organisch gebundenen Anteile nur relativ miteinander verglichen. Im Ganzen konnte auf beiden Standorten ein Anstieg der totalen C- und N-Gehalte der Bodenkrusten bei zunehmender Krustenausprägung festgestellt werden. Werden die dazugehörigen Krustensubstrate des „Neuen Lugteichs“ betrachtet, ist ebenfalls ein Zuwachs bei fortschreitender Krustenentwicklung zu erkennen, jedoch weicht hier BSC 4 mit einer Abnahme der C- und N-Gehalte um die Hälfte ab. BSC 1 bis 3 liegen zwar auf den Kulminationsbereich der Düne „Neuer Lugteich“, allerdings liegt in Richtung BSC 3 ein leichtes Gefälle vor. Dieses könnte ein Verlagerung von Nitrat in Richtung BSC 3 begünstigen, da diese Form des Stickstoffs nicht an Bodenpartikel gebunden und daher leicht ausgewaschen und verlagert wird (SCHEFFER et al. 2010). Da BSC 4 als einzige Kruste direkt auf dem Hang liegt, kann eine Auswaschung und Akkumulation des Nitrates im Tiefenbereich der Düne (DÜMIG et al. 2013) die unterschiedlichen N-Gehalte von BSC 4 und 5 erklären. BSC 6 lag zwar im Tiefenbereich der Düne, jedoch in einiger Entfernung und in unmittelbarer Umgebung zu Kiefern. Auch durch Gräser lag die umgebende Vegetation von BSC 6 höher als bei den anderen Krusten. Durch die Zersetzung von abgestorbenem Pflanzenmaterial können die höheren C- und N-Gehalte im Substrat von BSC 6 erklärt werden.

Die Krustensubstrate aus Schlabendorf verlaufen im Vergleich zum „Neuen Lugteich“ genau andersherum, hier nehmen sowohl C- als auch N-Gehalte mit fortschreitender Krustenentwicklung bis BSC 3 stetig ab. Hier könnte eine Erklärung durch die Netto-Photosynthese geliefert werden. Mit abnehmendem Nährstoffgehalt steigt diese an. Es ist möglich, dass durch die hohe photosynthetische Aktivität mehr C und N aufgenommen wird als kurzfristig nachgeliefert wird. Lediglich BSC 4 kann höhere C- und N-Substratgehalte vorweisen.

Allerdings lag auch hier die Kruste etwas abseits zwischen Birken und Gräsern, wodurch mehr Pflanzenbiomasse positiv auf die C-, N-Bilanz wirken kann.

BRANKATSCHK et al. (2013) sowie DÜMIG et al. (2013) konnten bereits aufzeigen, dass der totale C-Gehalt mit der Krustenentwicklung ansteigt und im Krustensubstrat niedriger ausfällt als in der Kruste selbst. Um diesen Umstand zu erklären, hat BRANKATSCHK et al. (2013) drei Phasen des Stickstoffkreislaufs in den Bodenkrusten definiert. Die erste Phase, die sogenannte „Heterotrophe Phase“ wird durch die Mineralisation von allochthoner und /oder Resten von organischer Substanz durch heterotrophe Bakterien charakterisiert. Durch den Abbau der organischen Substanz bringen die heterotrophen Organismen anorganisches N in das Substrat, welches noch keine Ausprägung von Krustenorganismen wie Grünalgen aufweist. Die zweite Phase nennt sich „Übergangsphase“ und beschreibt Bodenkrusten, welche bereits mittels Grünalgen photosynthetisch aktiv sind und durch den Aufbau von Biomasse ein steigendes N-Angebot verzeichnen. Währenddessen nimmt die Anreicherung von N im Boden ab. In der dritten Phase, der „Entwickelten Phase“, ist der N-Kreislauf mit dem eines entwickelten Ökosystems zu vergleichen. Neben einem zunehmenden Aufbau von Biomasse nimmt auch die Nitrifikation zu und der N-Gehalt im Boden steigt an. Der interne N-Umsatz steigt in dieser Phase an.

Die heterotrophe Phase trifft auf die reinen Substratproben beider Standorte zu, da geringe Chlorophyllgehalte gemessen, aber keine photosynthetische Aktivität festgestellt wurde. Dadurch ist auf das Vorhandensein von abgestorbener, vormals phototropher Biomasse zu schließen. Durch die tote Biomasse an sich sowie heterotrophen Organismen ist neben organischem Stickstoff und Kohlenstoff auch anorganisches Nitrat in den Substratproben vorhanden. Da die umgebende Vegetation in Schlabendorf bereits länger Zeit hatte, sich zu etablieren, ist auch bereits mehr Biomasse (bspw. Birkenpollen oder Gräser) in das Substrat gelangt. In der Übergangsphase bauen die photosynthetisch aktiven Bodenkrusten Biomasse auf, daher die höheren Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte als in den reinen Substraten sowie der Zuwachs entlang der Krustenentwicklung. Auch die N-Abnahmen im Substrat lassen sich mit steigenden Netto-Photosynthesen vereinbaren. Dies trifft auf die Bodenkrusten 1 bis 5 „Neuer Lugteich“ als auch auf die Krusten 1 bis 3 Schlabendorf zu. Die Zunahme der C- und N-Gehalte im Substrat von BSC 6 „Neuer Lugteich“ sowie BSC 4 Schlabendorf lassen erkennen, dass sich diese Krusten bereits in Richtung „Entwickelte Phase“ bewegen bzw. diese erreicht haben.

Während der totale C-Gehalt im reinen Substrat ohne Einfluss der Bodenkrusten in Schlabendorf doppelt so hoch liegt wie in Welzow, ist in den finalen Krustenstadien genau das Gegenteil erkennbar. Da liegen C und N auf dem „Neuen Lugeich“ sechsmal so hoch wie in Schlabendorf. Der höhere C- und N-Substratgehalt in Schlabendorf könnten abermals eine Auswirkung der längeren Rekultivierungszeit und der höheren Vegetationsdichte sein. Dafür sprechen würde, dass SPRÖTE (2013) bereits 2009 an beiden Standorten einen Anstieg des organischen C-Gehaltes mit zunehmender Krustenausbildung feststellen konnte, wobei die C-Gehalt in Schlabendorf dreimal höher ausfielen als auf der Düne des „Neuen Lugeichs“. Die höheren Gehalte auf dem „Neuen Lugeich“ bei finaler Krustenausbildung können entweder an fehlender N-Auswaschung im Vergleich zum Dünenkörper, N-Akkumulation aufgrund des Dünenkörpers oder atmosphärische Deposition von N durch die Nähe zum Kraftwerk Jänschwalde liegen. Besonders auf initialen Ökosystemen mit quartärem Ausgangsmaterial stellt die Nährstoffverfügbarkeit einen limitierenden Faktor für die Primärproduktion dar. Atmosphärische Deposition, vor allem Stickstoff als Hauptnährelement, beeinflusst die Entwicklung von Ökosystemen (VESTE & SCHAAF 2010, SCHEFFER et al. 2010). Besonders die Region im Süd-Osten Berlins wird durch relativ hohe N-Einträge über die Atmosphäre charakterisiert (WELLBROCK et al. 2005), welche in Welzow 2008 ca. 20 kg/ha/a (VESTE & SCHAAF 2010) betragen.

5.5 Vergleich der Daten von 2009, 2013 und 2014

5.5.1 Schlabendorf

Bereits 2009 wurden von SPRÖTE (2013) auf dem Standort Schlabendorf an gleicher Stelle Bodenkrustenproben untersucht. Aus dieser Untersuchung können die Daten der Chlorophyllgehalte, pH-Werte der Krustensubstrate und der organische C-Gehalt der Krusten in einen Vergleich einbezogen werden. Auch wurden 2013, zwar in Schlabendorf, aber an einem anderen Standort (N 51°46'11.88'', E 13°45'22.54''), Bodenkrustenproben untersucht. In den Vergleich gehen die pH-Werte der Krustensubstrate, Chlorophyll a-Gehalte, totale C-Gehalte der Bodenkrusten sowie die Wasserspannungskurven der Krusten ein. Sowohl 2009 als auch 2013 wurden die Krustentypen anhand ihrer Krustendicke, Rauigkeit und dem Grad der Oberflächenbedeckung ausgewählt.

Während die Bodenkrusten von 2013 den jetzigen Krustenproben trotz abweichendem Standort hinsichtlich der vorkommenden Krustenorganismen recht ähnlich sind, weichen die Proben von SPRÖTE (2013) hinsichtlich ihrer Artenzusammensetzung komplett ab. Dennoch können die totalen (2013,2014) als auch organischen (2009) C-Gehalte der Krusten gegen ihre jeweiligen Chlorophyll a-Gehalte aufgetragen werden (Abb.49)

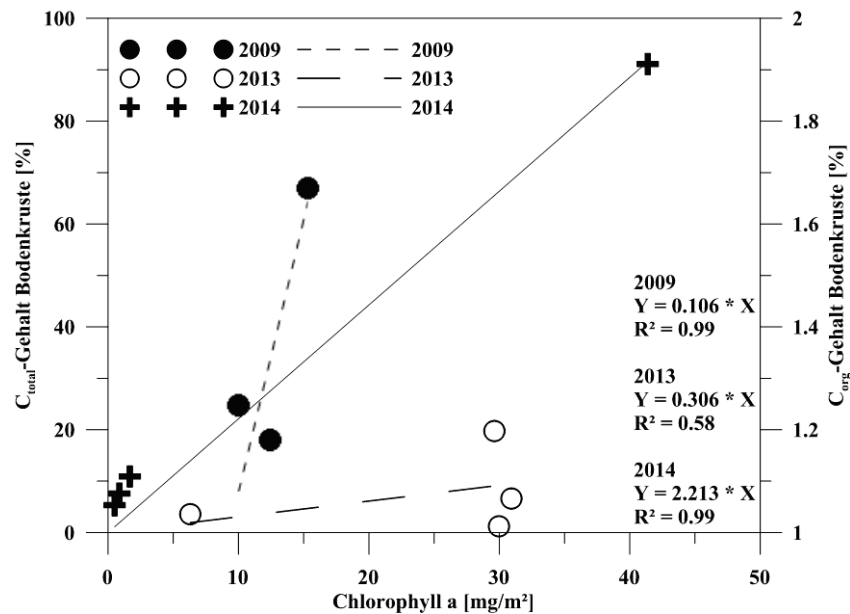


Abbildung 49. Korrelation zwischen C-Gehalt (total, organisch) und Chlorophyll a-Gehalt der Bodenkrustenproben Schlabendorf von 2009, 2013 und 2014

In den Krustenproben von 2009 bis 2014 ist zu erkennen, dass die Chlorophyll a-Gehalte nicht zwangsläufig mit den C-Gehalten der Krusten korrelieren. Das kann durch die Artenzusammensetzung und die unterschiedlichen Krustendicken begründet werden. Auch ist in 2013 bei geringer Krustenentwicklung die Flechte *Placynthiella oligotropa* auf Residuen von Moos und anderem organischem Material gewachsen, wodurch zwar der C-, aber nicht der Chlorophyllgehalt höher ausfällt. Insgesamt weisen die stärker entwickelten Krusten, welche hauptsächlich aus Moosen und Flechten bestehen, die höchsten Chlorophyllgehalte auf.

Werden die Chlorophyll- als auch C-Gehalte der Krusten in Beziehung zu dem pH-Wert des Substrates gesetzt, ergibt sich für alle Bodenkrustenmessungen die Tendenz eines sinkenden Boden-pH bei zunehmender Bodenkrustenentwicklung (Abb.50 und 51). Allerdings ist auch ersichtlich, dass dieser Zusammenhang nicht bei allen Bodenkrusten gleich stark ausgeprägt ist. Gründe für die Versauerung des Krustensubstrates liegen in der Protonenabgabe der

Moosrhizoide, der mikrobielle Abbau durch Bodenorganismen sowie die unterschiedlich starken Respirationsleistungen der Krustenorganismen. Auch hier spielt die Krustenzusammensetzung wieder eine große Rolle.

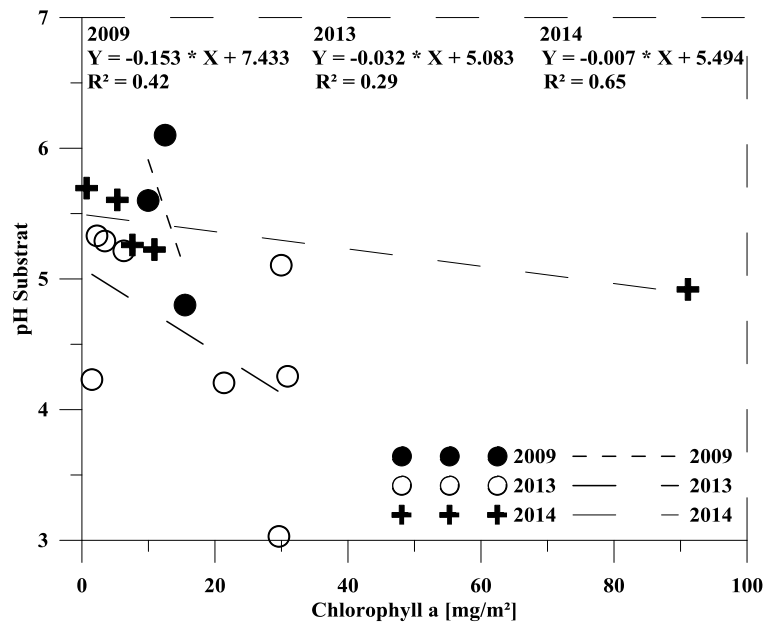


Abbildung 50. Korrelation zwischen Chlorophyll a-Gehalt und pH des Substrates von 2009, 2013 und 2014

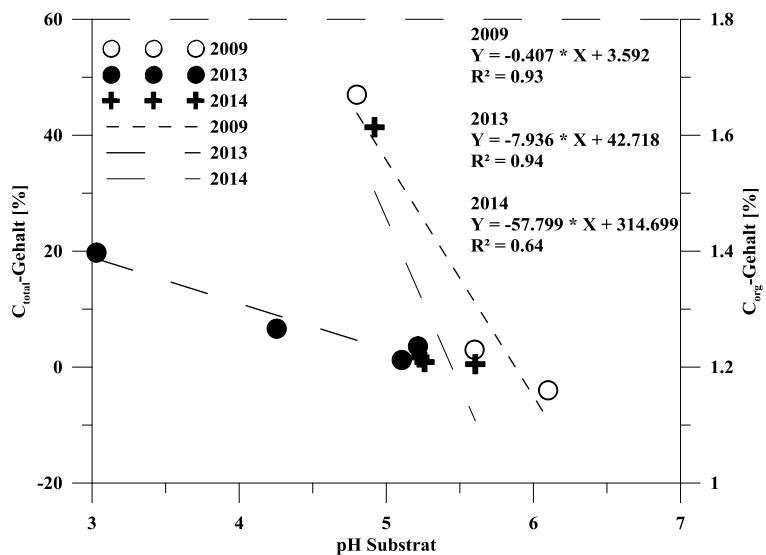


Abbildung 51. Korrelation zwischen C-Gehalt (total, organisch) und pH des Substrates von 2009, 2013 und 2014

2013 wurden ebenfalls Wasserspannungskurven der Bodenkrusten erstellt. Auch hier kann eine Zunahme der maximalen Wasserhaltekapazität bei fortschreitender Krustenentwicklung

ausgemacht werden (Abb.52). In 2013 fallen besonders die unterschiedlichen WHK_{max} der eigentlich reinen Substratproben (S 1 bis S 3) auf, wobei lediglich in S 3 keine Krustenorganismen nachgewiesen wurde. S 2 enthält lediglich in geringer Ausprägung *Placynthiella oligotropha*, während in S 1 zusätzlich Grünalgen und Moose nachgewiesen wurden.

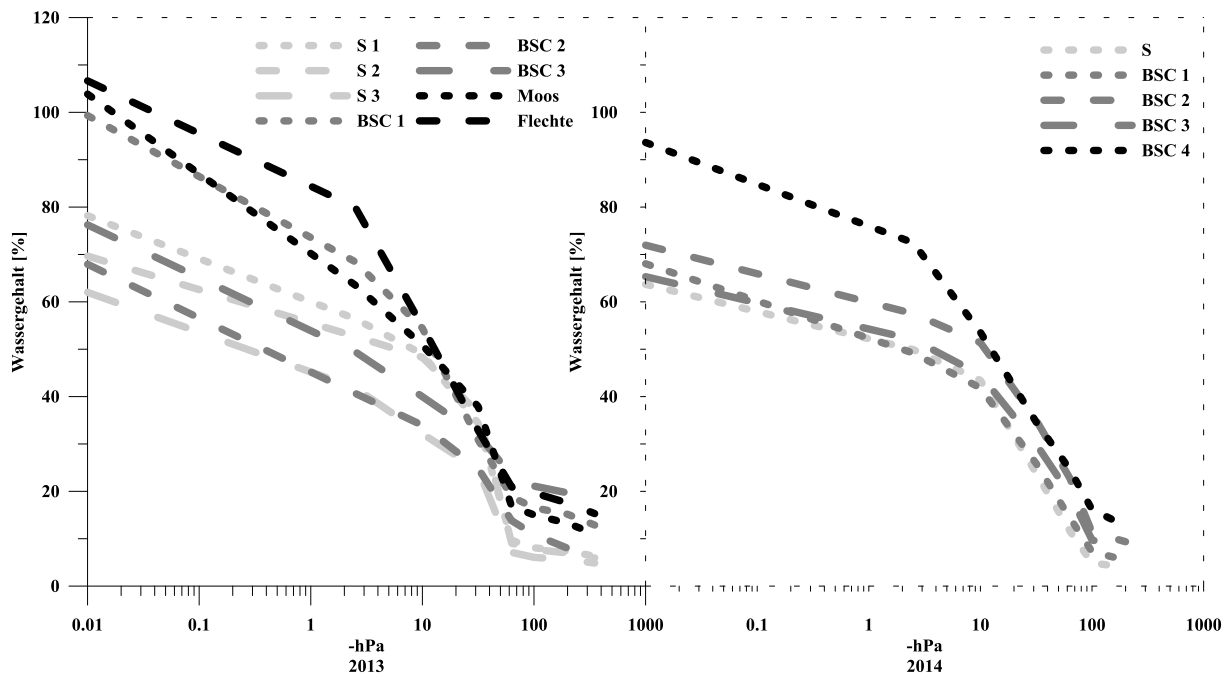


Abbildung 52. pF-Kurven der Bodenkrustenproben von 2013 und 2014

5.5.2 Lugteich

Auf der Düne des „Neuen Lugteichs“ können die untersuchten Bodenkrusten von SPRÖTE (2013) herangezogen werden. Für einen Vergleich werden die Chlorophyll a-Gehalte, pH-Werte der Krustensubstrate und Repellency Indices herangezogen

Anders als in Schlabendorf zeigen die Werte von 2009 einen tendenziellen Anstieg des Krustensubstrat-pH bei zunehmendem Chlorophyllgehalt (Abb.53). 2014 ist ein leichter Trend zur Versauerung zu erkennen, jedoch folgen die Werte nicht kontinuierlich dieser Tendenz, sondern bewegen sich hauptsächlich um den pH 5,17. Werden die Daten beider Jahre zusammengenommen, ist kein linearer Zusammenhang zwischen Chlorophyllgehalt und Substrat-pH zu erkennen. Trotz unterschiedlicher Chlorophyllgehalte und variierender pH-Werte ist aufgrund der vorliegenden Daten keine präzise Tendenz der Versauerung bei fortschreitender Krustenentwicklung zu erkennen.

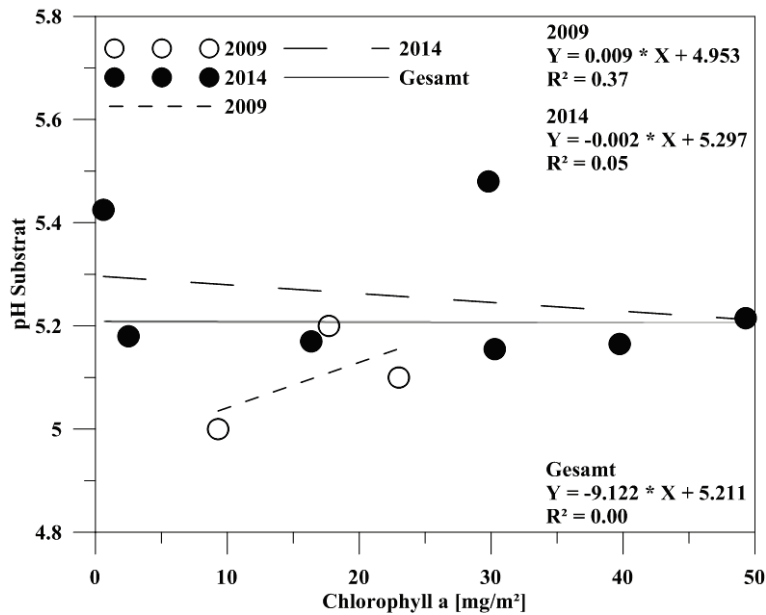


Abbildung 53. Korrelation zwischen Chlorophyll a-Gehalt und pH des Substrates von 2009 und 2014

Zusätzlich kann die Infiltrationshemmung der Krusten gegenübergestellt werden (Abb.54). 2014 ist das Blockieren der Porenräume durch Grünalgen Grund für die Infiltrationshemmung der Bodenkrusten. Je großflächiger und dichter die Vernetzung der Algenfilamente, desto geringer die Infiltrationswirkung. Kommen Moose hinzu, nimmt diese wieder zu. In 2009 ist ein ähnlicher Verlauf zu erkennen. Welche Krustenorganismen daran beteiligt sind, ist jedoch unklar, da keine Artenliste vorliegt.

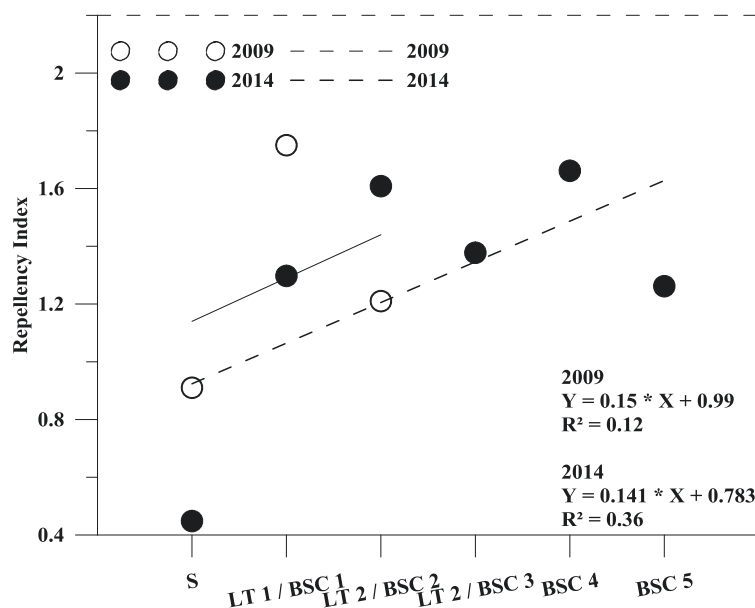


Abbildung 54. Repellency Index der Bodenkrusten von 2009 und 2014

Insgesamt ist ein Vergleich der Krustenproben nur relativ möglich, da besonders die Krustenzusammensetzung ausschlaggebend für die Eigenschaften der Bodenkrusten und deren Einfluss auf das darunterliegende Substrat sind. 2009 wurde nur auf dem Standort Schlabendorf eine Artenliste erstellt und diese stimmt nicht mit den jetzigen Untersuchungen überein bzw. weist eine gänzlich andere Artenzusammensetzung auf. Um genauere Aussagen zu ermöglichen, wäre eine detailliertere Beschreibung der ökologischen Ausprägung oder Deckung von Vorteil. 2013 wurde zwar eine Artenbeschreibung vorgenommen, allerdings fand die Probenahme an einem anderen Standort in Schlabendorf als auch zu einer anderen Jahreszeit (Juni) statt. Wie bereits im Diskussionsteil erwähnt, wird besonders das Verhalten von Flechten im Laufe des Jahres durch variierende klimatische Bedingungen bestimmt. Für einen umfassenden Vergleich wären zusätzliche Untersuchungen wie Gaswechsel oder auch Chlorophyllfluoreszenz-Messungen zweckmäßig. Insgesamt liegt in Schlabendorf eine starke Heterogenität vor und auch die wenigen untersuchten Krusten lassen nur bedingt eine Korrelation zu.

Auf der Sanddüne Welzow „Neuer Lugteich“ sind aufgrund der kleineren beprobten Fläche die untersuchten Bodenkrusten etwas homogener hinsichtlich ihres Typs und der Lokalität. Allerdings wäre auch hier eine detailliertere Beschreibung der Krustentypen bezüglich Artenzusammensetzung und Ausprägung für weitere Schlussfolgerungen hilfreich.

6. Zusammenfassung

In Bezug auf die Artenzusammensetzung der Bodenkrusten konnten auf beiden Standorten Übereinstimmungen als auch Abweichungen festgestellt werden. Allerdings handelt es sich bei allen Arten um ubiquitäre und somit kosmopolitische Organismen. Selbst verschiedene Arten einer Gattung (*Cladonia*) unterscheiden sich nur sehr gering und kommen sogar vergesellschaftet vor, wodurch eine standortspezifische Präferenz hinsichtlich des Substrates oder der naturräumlichen Gegebenheiten nicht festgestellt werden konnte.

Die Auswertung der ökophysiologischen Parameter ergab im Ganzen einen Anstieg der Chlorophyllgehalte, des NDVI, der Chlorophyllfluoreszenzen (Grund- als auch Maximalfluoreszenzen) sowie der Netto-Photosyntheseraten bei fortschreitender Krustenentwicklung, jedoch liegt eine enge Beziehung zwischen vorhandenen Arten und individueller Krustenzusammensetzung vor. Da besonders Flechten oftmals Bestandteil von Bodenkrusten sind, ist ein Zusammenhang zwischen gebildeter Biomasse und Chlorophyllgehalt ungenau, da der Phycobiont lediglich 5 bis 10% des Flechtenthallus ausmacht. Dadurch kann im Vergleich zu einer Moos-dominierten Kruste bei einer Bodenkrustenentwicklung hin zu einer Flechten-dominierten Kruste der Chlorophyllgehalt weniger stark zunehmen. Die Chlorophyllgehaltsuntersuchung wird durch die Berechnung sowie optische Darstellung des NDVI unterstützt. Auch hier ist ein Anstieg des Index bei Krustenentwicklung nicht zwingend linear. Da der NDVI nur die Krustenoberfläche abbildet, werden eingewachsene Moose oder auch ausgeprägte Flechten- oder Moosrasen nicht in der Tiefe dargestellt. Der NDVI fällt somit trotz höherer Biomasse sowie Chlorophyll a geringer aus.

Die Auswertung der Chlorophyllfluoreszenz-Aufnahmen der einzelnen Bodenkrusten in Verbindung mit dem NDVI zeigen auf, dass besonders die Moose hohe Chlorophyllgehalte aufweisen. Zwischen den Flechten *Cladonia* und *Placynthiella* lassen sich Unterschiede in der Fluoreszenzleistung ausmachen, wobei die dunkle Pigmentierung von *Placynthiella* hier Einfluss nehmen könnte. Die Quantenausbeute der einzelnen Krusten fällt auf beiden Standorten gleich hoch aus, variiert aber zwischen den Krusten leicht. Ob die Werte für die Bodenkrusten auf den Standorten charakteristisch sind oder eine Schädigung des Photosyntheseapparates vorliegt, geht aus den Daten jedoch nicht hervor.

Anhand der Gaswechseldaten ist zu sehen, dass Netto-Photosynthese als auch Respiration mit den steigenden C- und N-Gehalten sowie Chlorophyllgehalten in den Bodenkrusten

zusammenhängen. Werden PAM- und NDVI-Aufnahmen einbezogen, zeigt sich, dass die photosynthetische Aktivität der Moose am höchsten ausfällt, gefolgt von den Grünalgen. Im Vergleich der *Placynthiella*- und *Cladonia*-Anteile in den Krusten konnten unterschiedliche Photosynthese- als auch Respirationsraten gemessen werden. Es ist wahrscheinlich, dass die Krustenflechte *Placynthiella* eine höhere Netto-Photosyntheserate aufweist als die Strauchflechte *Cladonia*. Der Quotient aus Brutto-Photosynthese und Respiration lässt außerdem den Schluss zu, dass die CO₂-Fixierungsrate in den Grünalgen höher liegt als in den Moosen. In den Moos-Flechten-Krusten wird aufgrund der mycobiontischen Respiration weniger CO₂ fixiert.

In den hydrologischen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass die Infiltration durch das Vernetzen von Sandpartikeln durch Grünalgenfilamente und das dadurch verursachte Blockieren der Porenräume, gehemmt wird. Je großflächiger die Vernetzung, desto geringer die Infiltrationswirkung der Bodenkrusten. Einen Einfluss von quellenden Exopolymeren konnte in diesem Versuch nicht bestätigt werden. Das Auftreten von Moosen fördert hingegen die Infiltration, da Rhizoide das Substrat leicht auflockern bzw. sich entlang der Rhizoide präferentielle Fließwege bilden. Auch die zunehmende Wasserspeicherkapazität kann durch die Vernetzung von Sandpartikeln durch Grünalgen erklärt werden. Die verengten Porenräume üben eine höhere Saugspannung aus, welche mit abnehmendem Wassergehalt ansteigt. Auch absorbieren die Krustenorganismen selbst Wasser. Durch das Wachstum von *Placynthiella oligotropha* wird allerdings ein großer Teil der Porenräume der oberen Bodenschicht verschlossen, so dass die maximale Wasserhaltekapazität abnimmt. Aufgrund der Adsorption an die organische Substanz kann das Wasser dessen ungeachtet länger entgegen der Saugspannung gehalten werden. Auch das Auftreten von Moosen und deren Rhizoiden verringern die Wasserhaltekapazität. Jedoch weist gerade die Ermittlung der Wasserspannungskurven ein methodisches Defizit auf. Angesichts der fehlerhaften Volumenbezüge durch ausgeprägte Flechten und Moose sowie die poröse Struktur der Bodenkrusten selbst, werden zum einen zu hohe WHK_{max}, zum anderen aber auch zu niedrige WHK_{max} gemessen.

Die pH-Wert-Messungen zeigen in Schlabendorf ein klares Bild der zunehmenden Versauerung bei fortschreitender Krustenentwicklung. Dies kann durch CO₂-Freisetzung der Krustenorganismen durch Respiration, Protonenabgabe der Moosrhizoide bei der Nährstoffaufnahme sowie dem mikrobiellen Abbau durch Bodenorganismen erklärt werden. In Welzow „Neuer Lugteich“ wurden trotz kürzerer Rekultivierungszeit niedrigere pH-Werte

gemessen, was an der fehlenden Kalkung und Düngung liegt. Die Substrat-pH-Werte verlaufen recht konstant und ein prägender Einfluss durch Bodenkrustenrespiration kann ausgeschlossen werden.

Werden die Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte der Krusten untersucht, ist auf beiden Standorten eine Zunahme der C- und N-Gehalte bei fortschreitender Krustenentwicklung zu erkennen, was an dem Zuwachs der organischen Biomasse liegt. Analog dazu nehmen in Schlabendorf auch die C- und N-Gehalte in den Krustensubstraten ab, da die Krustenorganismen photosynthetisch aktiv sind und N sowie C in den Biomasseaufbau stecken und die Menge im Boden abnimmt. Die entwickelten Krusten weisen bereits den N-Kreislauf eines entwickelten Ökosystems auf, wodurch neben dem Aufbau von Biomasse auch der N-Gehalt im Boden durch Nitrifikation wieder ansteigt. In Welzow „Neuer Lugteich“ ist dieser Trend nicht klar zu erkennen, da es durch den Dünenkörper zum einen bereits auf dem Kulminationsbereich, zum anderen auf dem Hang zu Verlagerungen von Nitrat kommt. Besonders auf initialen Ökosystemen mit geschüttetem Substrat stellt die Nährstoffverfügbarkeit den limitierenden Faktor der Primärproduktion dar. Während in Schlabendorf zusätzliche Meliorationsmaßnahmen ergriffen wurden, kann es in Welzow „Neuer Lugteich“ zu hohen atmosphärischen N-Einträgen kommen.

Da bereits 2009 und 2013 Untersuchungen sowohl in Schlabendorf und auf dem „Neuen Lugteich“ durchgeführt wurden, lag ein Vergleich der Messdaten nahe. Insgesamt konnten die Ergebnisse dieser Arbeit in ihrer Tendenz bestätigt werden. Allerdings ist ein genauer Vergleich nur bedingt möglich, da die Krustenproben entweder auf anderen Standorten gewonnen wurden, die Artenzusammensetzung vollständig abweicht oder überhaupt keine Artenbeschreibung vorliegt.

Im Ganzen ist zu erkennen, dass die konkrete Artenzusammensetzung der Bodenkrusten einen großen Einfluss auf ökophysiologischen Eigenschaften wie Photosynthese und Respiration, Chlorophyllgehalt und -fluoreszenz hat. Die hydrologischen Parameter werden vor allem durch Grünalgen und Moose beeinflusst, bzw. spielt auch das Auftreten von Krustenflechten eine Rolle. Ebenfalls werden die pedogenetischen Parameter durch Bodenkrusten nachhaltig verändert, wobei hier lediglich die Bodenkruste als Ganzes Einfluss auf den Boden-pH oder Nährstoffakkumulation nimmt.

7. Fazit

In dieser Arbeit wurden die Eigenschaften und Zusammensetzungen von Bodenkrusten auf zwei ehemaligen Tagebaustandorten im Rekultivierungszustand untersucht. Bei ähnlichen Ausgangsbedingungen konnten sowohl Arten identifiziert werden, welche auf beiden Standorten vorkommen, als auch Arten, die nur auf einem Standort vorkommen. Da es sich bei fast allen Moosen, Flechten und Grünalgen um ubiquitäre und kosmopolitische Gattungen und Arten handelt, kann ein Wachstum aufgrund von standortspezifischen Eigenschaften nicht festgestellt werden. Durch die längere Rekultivierungszeit in Schlabendorf konnten sich bereits in den schwach entwickelten Bodenkrusten Moose ausprägen. Auch Meliorationsmaßnahmen können sich positiv auf die Krustenentwicklung ausgewirkt haben.

Auf der künstlichen Sanddüne des „Neuen Lugteichs“ wird das Wachstum der Bodenkrusten durch die Hangneigung beeinflusst, da Nährstoffe wie N durch Auswaschung und Verlagerung in den Tiefenbereich limitierend auf die Primärproduktion wirken. Dies wirkt sich lediglich auf das Krustenwachstum aus, aber weniger auf Eigenschaften wie Infiltrationswirkung oder höhere Wasserhaltekapazität, welche mit zunehmender Krustenentwicklung einhergehen. Auch die kleinräumige Mosaikstruktur der Bodenkrusten, sowohl die Ausprägung von kleineren Algenpolstern als auch die heterogene Artenzusammensetzung und -verteilung hat eher Einfluss auf die Hydrologie der einzelnen Bodenkrustenproben, wirken sich aber großflächig weniger stark aus. Ein Einfluss der Mosaikstruktur auf die Aktivität der Bodenkrusten konnte nicht festgestellt werden.

Die Bedeutung der Bodenkrusten für den Kohlenstoffhaushalt nimmt ebenfalls erst bei fortgeschrittenem Wachstum der Krusten zu. Während initiale als auch sich entwickelnde Bodenkrusten mehr C und N aus dem Ökosystem nehmen und in Biomasse umsetzen, steigt der interne Umsatz von bereits entwickelten Krusten an und es kommt zu einer Anreicherung von C und N im Boden. Ansteigende Netto-Photosyntheseraten während der Krustenentwicklung führen zu einer höheren C- und N-Fixierung, welche in den entwickelten Krusten wieder in das Ökosystem zurückgeführt werden.

Allerdings zeigen die Untersuchung der ökophysiologischen Parameter der Photosynthese auf, dass nicht alle Krustenorganismen in gleicher Weise den Charakter der Bodenkrusten prägen. Zwar ist in den Krusten ein Biomassezuwachs vorhanden, jedoch abhängig von der Artenzusammensetzung unterschiedlich stark. Um die Kruste als Gesamtheit zu verstehen,

sollten die einzelnen Organismen und ihr Anteil am Krustenwachstum charakterisiert werden. Dies könnte in weiteren Untersuchungen geschehen, indem die Krustenorganismen separiert und sowohl unter Laborbedingungen als auch in definierten Freilandprojekten kultiviert werden.

Literatur

Aichele, D.; Schwegler, H.-W. (1993): Unsere Moos- und Farnpflanzen. Eine Einführung in die Lebensweise, den Bau und das Erkennen heimischer Moose, Farne, Bärlappe und Schachtelhalme, 10. Auflage, Kosmos, Stuttgart.

Archibald, P.A. (1975): Trebouxia De Puymaly (Chlorophyceae, Chlorococcales) and Pseudotrebouxia gen. nov. (Chlorophyceae, Chloresarcinales), Phycologia, Volume 14, International Phycological Society, S. 73-89.

Bauriegel, E. (2012): Messtechnische Möglichkeiten zur Ermittlung Partieller Taubähigkeit bei Winterweizen mittels Chlorophyllfluoreszenz- und hyperspektraler Bildanalyse, Dissertation, Humboldt-Universität, Berlin.

Belnap, J. (2006): The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles, Hydrological Processes, Volume 20, S. 3159-3178.

Birmingham, B.C.; Coleman, J.R.; Colman, B. (1982): Measurement of Photorespiration in Algae, Plant Physiology, Volume 69, S. 259-262.

Brankatschk, R.; Fischer, T.; Veste, M.; Zeyer, J. (2013): Succession of N Cycling Processes in Biological Soil Crusts on a Central European Inland Dune, FEMS Microbiology Ecology, Volume 83, Issue 1, S. 149-160.

Braun-Blanquet, J. (1964): Pflanzensoziologie. Grundzüge der Vegetationskunde, 3. Auflage, Springer, Wien, New York.

Büdel, B. (2003): Biological Soil Crusts of European Temperate and Mediterranean Regions, In: Belnap, J.; Lange, O.L. (Hrsg.): Biological Soil Crusts: Structure, Function and Management, Ecological Studies, Volume 150, 2. Auflage, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 75-86.

Büdel, B.; Vivas, M.; Lange, O.L. (2013): Lichen species dominance and the resulting photosynthetic behavior of Sonoran Desert soil crust types (Baja Californiam Mexico), Ecological Processes, Volume 2, URL <http://www.ecologicalprocesses.com/content/2/1/6>, [aufgerufen am 23.06.2014].

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.) (2005): Bodenkundlichen Kartieranleitung, 5. Auflage, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Hannover.

Burgheimer, J.; Wilske, B.; Maseyk, K.; Karnieli, A.; Zaady, E.; Yakir, D.; Kesselmeier, J. (2006): Relationships between Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and carbon fluxes of biologic soil crusts assessed by ground measurements, *Journal of Arid Environments*, Volume 64, Elsevier, S. 651-669.

Cabala, J.; Rahmonov, O.; Jablonska, M.; Teper, E. (2011): Soil Algal Colonization and Its Ecological Role in an Environment Polluted by Past Zn-Pb Mining and Smelting Activity, *Water Air Soil Pollut*, Volume 215, Issue 1, Springer, S. 339-348.

Chen, L.; Rossi, F.; Deng, S.; Liu, Y.; Wang, G.; Adessi, A.; De Philippis, R. (2014): Macromolecular and chemical features of excreted extracellular polysaccharides in induced biological soil crusts of different ages, *Soil Biology & Biochemistry*, Volume 78, S. 1-9.

Cheng, K.H.; Colman, B. (1974): Measurement of Photorespiration in Some Microscopic Algae, *Planta*, Volume 115, S.207-212.

Colica, G.; Li, H.; Rossi, F.; Li, D.; Liu, Y.; De Philippis, R. (2014): Microbial secreted exopolysaccharides affect the hydrological behavior of induced biological soil crusts in desert sandy soils, *Soil Biology & Biochemistry*, Volume 68, S. 62-70.

Defries, R.S.; Townshend, J.R.G. (1994): NDVI-derived land cover classifications at a global scale, *International Journal of Remote Sensing*, Volume 15, Nr. 17, S. 3567-3586.

Demmig-Adams, B.; Adams, W.W.; Czygan, F.C.; Schreiber, U.; Lange, O.L. (1990): Differences in the capacity for radiationless energy dissipation in the photochemical apparatus of green and blue-green algal lichens associated with differences in carotenoid composition, *Planta*, Volume 180, S.582-589.

Deutscher Auftragsdienst (2008): Ausschreibung Rekultivierung Tagebaufelder Seese und Schlabendorf, URL http://www.dtad.de/details/Rekultivierung_und_Landschaftsgestaltung_Melioration_zur_Herstellung_von_FNF_Aufforstung_Pflege_und_Bewirtschaftung_von_FNF_Massenbewegung_mit_Planiertechnik_15926_Luckau-3070049_1, [aufgerufen am 07.7.2014].

Deutscher Wetterdienst, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur online (2014): Mittelwerte 30-jähriger Perioden. Mittelwerte für den aktuellen Stationsstandort (2012) für den Zeitraum 1981-2010, URL: http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_menu2_presse&T98029gsbDocumentPath=Navigation%2FPresse%2FKlimainformationen%2Fbeschreibung__mittelwerte__node.html%3F__nnn%3Dtrue, [aufgerufen am 28.04.2014].

Dicke, D.; Kühbauch, W. (2005): Einsatz von satellitengestützter Fernerkundung zur Früherkennung von herbizidbedingten Schäden im Mais, In: GI Jahrestagung (1), S. 355-359.

Dörrbecker, M. (2009): Karte vom Lausitzer Seenland, URL http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Karte_vom_Lausitzer_Seenland.png, [aufgerufen am 22.05.2014].

Drahorad, S.; Felix-Henningsen, P. (2009): Bedeutung biologischer Bodenkrusten für Stoffflüsse in Böden eines semiariden Dünenökosystems der Negev in Israel entlang eines Niederschlagsgradienten, In: Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft „Böden - eine endliche Ressource, Berichte der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Bonn.

Dümig, A.; Veste, M.; Hagedorn, F.; Fischer, T.; Lange, P.; Spröte, R.; Kögel-Knabner, I. (2013): Biological soil crusts on initial soils: organic carbon dynamics and chemistry under temperate climatic conditions, Biogeosciences Discuss, Volume 10, S. 851-894.

Fischer, T., Veste, M., Wiehe, W., Lange, P. (2010): Water repellency and pore clogging at early successional stages of microbiotic crusts on inland dunes, Brandenburg, NE Germany, Catena, Volume 80, S.47-52.

Fischer, T.; Veste, M.; Eisele, A.; Bens, O.; Spyra, W.; Hüttl, R.F. (2012): Small scale spatial heterogeneity of Normalized Difference Vegetation Indices (NDVIs) and hot spots of photosynthesis in biological soil crusts, Flora, Volume 207, S. 159-167.

Frahm, J.-P.; Frey, W. (1992): Moosflora, 3. Auflage, Ulmer, Stuttgart.

Gerwin, W.; Raab, T.; Biemelt, D.; Bens, O.; Hüttl, R.F. (2009): The artificial water catchment „Chicken Creek“ as an observatory for critical zone processes and structures, Hydrology and Earth System Sciences Discussions, Volume 6, S. 1769-1795.

Gifford, R.M. (2003): Plant respiration in productivity models: conceptualisation, representation and issues for global terrestrial carbon-cycle research, *Functional Plant Biology*, Volume 30, Issue 2, S. 171-186.

Google Earth 2014, aufgerufen am 22.04.2014

Green, T.G.A.; Snelgar, W.P.; Wilkins, A.L. (1985): Photosynthesis, water relations and thallus structure of Stictaceae lichens, In: Brown, D.H. (Hrsg.): *Lichen physiology and cell biology*, New York, S. 57-75.

Guiry, M. D.(2014): AlgaeBase, URL <http://algaebase.org/> [aufgerufen am 01.04.2014].

Hallett, P.D.; Young, I.M. (1999): Changes to water repellence of soil aggregates caused by substrate-induced microbial activity, *European Journal of Soil Science*, Volume 50, Issue 1, S. 35-40.

Hartmann, M. (2008): Bodenphysikalische Eigenschaften, Benetzbarkeit und Wasserhaushalt von Waldböden unter Flugascheeinfluss, Dissertation, Christian-Albrechts-Universität, Kiel.

Heinz Walz GmbH (2005): IMAGING-PAM M-Series. Chlorophyll Fluorescence System, Walz Mess- und Regeltechnik, Effeltrich.

Holzinger, A.; Tschalkner, A.; Remias, D. (2010): Cytoarchitecture of the desiccation-tolerant green alga *Zygonium ericetorum*, *Protoplasma*, Volume 243, Issue 1-4, Springer, S. 15-24.

Hoppert, M.; Reimer, R.; Kemmling, A.; Schröder, A.; Günzl, B.; Heinken, T. (2004): Structure and Reactivity of a Biological Soil Crust from a xeric sandy soil in Central Europe, *Geomicrobiology*, Volume 21, Issue 3, S. 183-191.

Housman, D.C.; Powers, H.H.; Collins, A.D.; Belnap, J. (2006): Carbon and nitrogen fixation differ between successional stages of biological soil crusts in the Colorado Plateau and Chihuahuan Desert, *Journal of Arid Environments*, Volume 66, S. 620-634.

Jacobi, J.; Backes, M.; Kühbauch, W.; Plümer, L. (2006): Identifikation von Unkräutern in Zuckerrüben anhand spektraler Reflexionsunterschiede in Fernerkundungsaufnahmen, *Journal of Plant Diseases and Protection*, Sonderheft XX, Ulmer, Stuttgart, S. 241-248.

Jäger, E.J.; Neumann, S.; Ohmann, E. (2003): Botanik, 5. Auflage, Spektrum, Berlin.

Karnieli, A.; Shachak, M.; Tsoar, H.; Zaady, E.; Kaufman, Y.; Danin, A.; Porter, W. (1996): The Effect of Microphytes on the Spectral Reflectance of Vegetation in Semiarid Regions, *Remote Sensing of Environment*, Volume 57, Elsevier, S. 88-96.

Katznelson, R. (1989): Clogging of groundwater recharge basins by cyanobacterial mats, *FEMS Microbiology Ecology*, Volume 62, Issue 4, S. 231-242.

Kendzia, G.; Reissmann, R.; Neumann, T. (2008): Gezielte Entwicklung von naturschutzfachlich bedeutsamen Feuchtbiotopen mit natürlicher Speisung in der Lausitzer Bergbaufolgelandschaft, *World of Mining - Surface & Underground*, Volume 60 (2), S. 88-95.

Kidron, G.J.; Yaalon, D.H.; Vonshak, A. (1999): Two causes for runoff initiation on microbiotic crusts: hydrophobicity and pore clogging, *Soil Science*, Volume 164, Issue 1, Lippincott Williams & Wilkins, S. 18-27.

Kinross, J. (2012): The Algal Web, URL <http://algalweb.net/algweb2.htm> [aufgerufen am 01.04.2014].

Lange, O.L. (2003): Photosynthesis of soil-crust biota as dependent on environmental factors, In: Belnap, J.; Lange, O.L. (Hrsg.): *Biological soil crusts: structure, function and management*, Springer, Berlin, S. 217-240.

Lange, O.L.; Belnap, J.; Reichenberger, H. (1998): Photosynthesis of the cyanobacterial soil crust lichen *Collema tenax* from arid lands in southern Utah, USA: role of water content on light and temperature response of CO₂ exchange, *Functional Ecology*, Volume 12, S. 195–202.

Lange, O.L.; Belnap, J.; Reichenberger, H.; Meyer, A. (1997): Photosynthesis of green algal soil crust lichens from arid lands in southern Utah, USA: role of water content on light and temperature responses of CO₂ exchange, *Flora*, Volume 192, S. 1–15.

Lange, O.L.; Green, T.G.A. (2003): Photosynthetic performance of a foliose lichen of biological soil-crust communities: long-term monitoring of the CO₂ exchange of *Cladonia convoluta* under temperate habitat conditions, *Bibliotheca Lichenologica*, Volume 86, S. 257–280.

Lange, O.L.; Reichenberger, H.; Meyer, A. (1995): High Thallus Water Content and Photosynthetic CO₂ Exchange of Lichens. In: Daniels, F.J.A.; Schulz, M.; Peine, J. (Hrsg.):

Contribution to lichenology in honour of Gerhard Follmann, Botanisches Institut Universität Köln, Köln, S. 139–153.

Lange, O.L.; Zellner, H.; Heber, U. (1994): Photosynthesis and water relations of lichen soil crusts: field measurements in the coastal fog zone of the Namib Desert, *Functional Ecology*, Volume 8, S. 253–264.

Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (Hrsg.) (2003): Braunkohlenbergbau und Sanierung im Förderraum Kittlitz, Brieske.

Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (Hrsg.) (2012): Wandlungen und Perspektiven. Lausitzer Braunkohlerevier, Schlabendorf, Band 20, Senftenberg.

Lechowicz, M.J. (1983): Age dependence of photosynthesis in the caribou lichen *Cladonia stellaris*, *Plant Physiology*, Volume 71, S. 893-853.

Linne von Berg, K.-H.; Hoef-Emden, K.; Marin, B.; Melkonian, M. (2012): Der Kosmos-Algenführer. Süßwasseralgen unter dem Mikroskop. Ein Bestimmungsbuch, 2. Auflage, Kosmos, Stuttgart.

Malam Issa, O.; Défarge, C.; Trichet, J.; Valentin, C.; Rajot, J.L. (2009): Microbiotic soil crusts in the Sahel of Western Niger and their influence on soil porosity and water dynamics, *Catena*, Volume 77, S. 48-55.

Manhenke, V.; aktualisiert Höding, T.; Wetzel, E. (2010): Das Geopotenzial Brandenburgs, In: Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (Hrsg.): Atlas zur Geologie von Brandenburg, 4. Auflage, Cottbus, S. 25-33.

Masuch, G. (1993): Biologie der Flechten, Quelle & Meyer, Heidelberg.

Mazor, G.; Kidron, G.J.; Vonshak, A.; Abeliovich, A. (1996): The role of cyanobacterial exopolysaccharides in structuring desert microbial crusts, *FEMS Microbiology Ecology*, Volume 21, S. 121-130.

Moberg, R.; Holmåsén, I. (1992): Flechten von Nord- und Mitteleuropa. Ein Bestimmungsbuch, Fischer, Stuttgart, Jena, New York.

Nevo, Z.; Mitchell, R. (1967): Factors affecting biological clogging of sand associated with ground-water recharge, *Water Research*, Volume 1, Issue 3, S. 231-236.

Post, A. (1990): Photoprotective Pigment as an Adaptive Strategy in the Antarctic Moss Ceratodon purpureus, Polar Biology, Volume 10, S. 241-245.

Quinkenstein, A.; Böhm, C.; Freese, D. (2011): Blattstreu-Umsatz in Robinien-Kurzumtriebsplantagen auf Lausitzer Tagebau-Rekultivierungsflächen, In: Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft „Böden verstehen, Böden nutzen, Böden fit machen“, Berichte der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Berlin, Potsdam.

Reichel, F.; Uhlmann, W. (1995): Wasserbeschaffenheit in Tagebaurestseen, Schriftenreihe des Landesumweltamtes Brandenburg, Studien und Tagungsberichte 6, Potsdam.

Reinken, G. (2004): Bodenphysikalische Untersuchungen zur Prozeßanalyse der Wasserbewegungen und des Stofftransportes in ungesättigten, strukturierten Böden unter besonderer Berücksichtigung der Mechanismen der präferentiellen Wirkstoffverlagerung, Dissertation, Universität zu Köln, Köln.

Rosentreter, R., Bowker, M., and Belnap, J. (2007): A field guide to biological soil crusts of western U.S. drylands: Common lichens and bryophytes, U.S. Government Printing Office, Denver, Colorado.

Rossi, F.; Potrafka, R.M.; Pichel, F.G.; De Philippis, R. (2012): The role of the exopolysaccharides in enhancing hydraulic conductivity of biological soil crusts, Soil Biology & Biochemistry, Volume 46, S. 33-40.

Scheffer, F., Schachtschabel, P., Blume, H.-P., Brümmer, G.W., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretschmar, R., Stahr, K., Wilke, B.-M., Thiele-Bruhn, S., Welp, G. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde, 16. Auflage, Spektrum, Heidelberg.

Schlensog, M. (2000): Zur Photosynthese antarktischer Kryptogamen unter besonderer Berücksichtigung von Photoinhibition, Dissertation, Christian-Albrechts-Universität, Kiel.

Schroeter, B.; Green, T.G.A.; Seppelt, R.D.; Kappen, L. (1992): Monitoring photosynthetic activity of crustose lichens using a PAM-2000 fluorescence system, Oecologia, Volume 92, S. 457-462.

Seemann, J.R.; Sharkey, T.D. (1986): Salinity and nitrogen effects on photosynthesis, ribulose-1,5-biphosphate carboxylase and metabolite pool sizes in Phaseolus vulgaris L., Plant Physiology, Volume 82, S. 555-560.

Smith, T.M.; Smith, R.L. (2009): Ökologie, 6. Auflage, Pearson Studium, München.

Spröte, R. (2013): Entwicklung von Benetzungshemmung auf sandigen Substraten unter dem Einfluss biologischer Bodenkrusten und höherer Vegetationsentwicklung, Dissertation, Cottbuser Schriften zu Bodenschutz und Rekultivierung, Band 44, Brandenburgische Technische Universität, Cottbus.

Spröte, R.; Fischer, T.; Veste, M.; Raab, T.; Wiehe, W.; Lange, P.; Bens, O.; Hüttl, R.F. (2010): Biological topsoil crusts at early successional stages on Quaternary substrates dumped by mining in Brandenburg, NE Germany. *Géomorphologie*, Volume 4, S. 359-370.

Spröte, R.; Veste, M.; Fischer, T.; Lange, P.; Bens, O.; Raab, T.; Hüttl, R.F. (2009): Development of biological soil crusts in initial ecosystems in Lusatia, Germany, In: Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft „Böden - eine endliche Ressource“, Berichte der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Bonn.

Vattenfall Europe Mining AG, Vattenfall Europe Generation AG (Hrsg.) (2012): Braunkohle. Energieträger mit Zukunft, Wissen 04 - Daten, Fakten, Einblicke in die Energiewirtschaft, Cottbus.

Veste, M. (2005): Importance of biological soil crusts for rehabilitation of degraded arid and semi-arid ecosystems, *Science of Soil and Water Conservation*, Volume 3, Issue 4, S. 42-47.

Veste, M.; Schaaf, W. (2010): Atmospheric deposition, In: Schaaf, W.; Biemelt, D.; Hüttl, R.F. (Hrsg.): Initial development of the artificial catchment „Chicken Creek“ - monitoring program and survey 2005 - 2008, *Ecosystem Development*, Volume 2, S.21-25.

von Willert, D.J.; Matyssek, R.; Herppich, W. (1995): Experimentelle Pflanzenökologie. Grundlagen und Anwendungen, Thieme, Stuttgart.

Wellbrock, N.; Rick, W.; Wolff, B. (2005): Characterisation of and changes in the atmospheric deposition situation in German forest ecosystems using multivariate statistics, *European Journal of Forest Research*, Volume 124, S. 261-271.

WindFinder online (2014): Wind- und Wetterstatistiken Brandenburg, URL: <http://de.windfinder.com/windstatistics/brandenburg>, [aufgerufen am 28.04.2014].

Wirth, V. (1995): Flechtenflora. Bestimmung und ökologische Kennzeichnung der Flechten Südwestdeutschlands und angrenzender Gebiete, 2. Auflage, Ulmer, Stuttgart.

Wirth, V.; Düll, R. (2000): Farbatlas Flechten und Moose, Ulmer, Stuttgart.

a Wirth, V.; Hauck, M.; Schultz, M.; de Bruyn, U.; Bültman, H.; John, V.; Litterski, B.; Otte, V. (2013): Die Flechten Deutschlands, Band 1, Ulmer, Stuttgart.

*b*Wirth, V.; Hauck, M.; Schultz, M.; de Bruyn, U.; Bültman, H.; John, V.; Litterski, B.; Otte, V. (2013): Die Flechten Deutschlands, Band 2, Ulmer, Stuttgart.

Wirth, V.; Kirschbaum, U. (2014): Flechten einfach bestimmen. Ein zuverlässiger Führer zu den häufigsten Arten Mitteleuropas, Quelle & Mayer, Wiebelsheim.

Wu, L.; Lan, S.; Zhang, D.; Hu, C. (2013): Recovery of chlorophyll fluorescence and CO₂ exchange in lichen soil crusts after rehydration, European Journal of Soil Biology, Volume 55, S. 77-82.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinen Dank Herrn Dr. rer. nat. habil. T. Fischer für die Möglichkeit der Bearbeitung des Themas, dem wissenschaftlichen Austausch und der Erstbegutachtung ausdrücken.

Ebenfalls danke ich im besonderen Herrn Dr. rer. nat. M. Veste für seine unermüdliche wissenschaftliche Unterstützung, den motivierenden Gesprächen sowie wertvollen Hinweisen. Vielen Dank für die Mühe und Geduld zu jeder Tageszeit.

Daneben gilt mein Dank Herrn Dr. rer. nat. W. Herppich für die Möglichkeit, die Imaging PAM für die Untersuchungen zu nutzen sowie für die Zeit, mir diese näher zu bringen.

Auch möchte ich mich in besondere Weise bei Herrn P. Lange bedanken, welcher eine große Unterstützung bei den Beprobungen auf dem Gelände und den Laborarbeiten war. Ebenso danke ich für die Geduld, die er sich genommen hat, um mir die Untersuchungsmethoden im Labor gründlich zu erklären.

Für die Unterstützung bei den Laborarbeiten gilt mein Dank auch G. Franke und A. Maletzki.