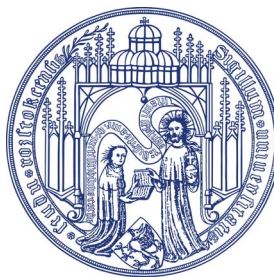


ÖKOPHYSIOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUR
SALZ- UND LICHTTOLERANZ AN
NAJAS MARINA UND *ZANNICHELLIA PALUSTRIS*
IN DEN INNEREN KÜSTENGEWÄSSERN
MECKLENBURG - VORPOMMERN

DIPLOMARBEIT

EINGEREICHT AM 31. JANUAR 2007

AM INSTITUT FÜR BIOWISSENSCHAFTEN
AN DER MATHEMATISCH - NATURWISSENSCHAFTLICHEN FAKULTÄT DER
UNIVERSITÄT ROSTOCK



VERFASSTER: CHRISTIAN PORSCHE
GEBOREN AM 02. JANUAR 1979 IN TETEROW

1. GUTACHTER: PROF. H. SCHUBERT
UNIVERSITÄT ROSTOCK
INSTITUT FÜR BIOWISSENSCHAFTEN
ABTEILUNG: ÖKOLOGIE

2. GUTACHTER: DR. U. SELIG
UNIVERSITÄT ROSTOCK
INSTITUT FÜR BIOWISSENSCHAFTEN
ABTEILUNG: ÖKOLOGIE

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	III
TABELLENVERZEICHNIS	IX
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	XII
1. EINLEITUNG	1
1.1. Einführung	1
1.2. Stand der Forschung	2
1.3. Zielstellung	11
2. MATERIAL UND METHODEN	13
2.1. Charakterisierung der untersuchten Arten	13
2.1.1. Kurze Beschreibung von <i>Najas marina</i>	13
2.1.2. Kurze Beschreibung von <i>Zannichellia palustris</i>	14
2.2. Datenanalyse zur Verbreitung der untersuchten Arten in den Küstengewässern der deutschen Ostsee.....	16
2.3. Ökophysiologische Untersuchungen	19
2.3.1. Freilanduntersuchungen an <i>Najas marina</i>	19
2.3.2. Laboruntersuchungen hinsichtlich der Salz - und Lichtakklimation.....	21
2.3.3. Messmethoden	26
2.3.4. Statistische Überprüfung der Ergebnisse	34
3. ERGEBNISSE	36
3.1. Datenanalyse zur Verbreitung der untersuchten Arten in den Küstengewässern der deutschen Ostsee.....	36
3.1.1. Charakterisierung der Untersuchungsgewässer anhand von (a)biotischen Parametern	36
3.1.2. Verbreitung von <i>Najas marina</i> und <i>Zannichellia palustris</i>	37

3.2. Ökophysiologische Untersuchungen	43
3.2.1. Freilanduntersuchungen an <i>Najas marina</i>	43
3.2.2. Laboruntersuchungen hinsichtlich Salz - und Lichtakklimatisation.....	45
4. DISKUSSION.....	74
5. ZUSAMMENFASSUNG.....	91
LITERATURVERZEICHNIS	93
ANHANG	100
DANKSAGUNG.....	101
SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG	102

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Komponenten der Widerstandsfähigkeit gegen Salzbelastung. Nach STEINER (1934), WAISEL (1972), KREEB (1974) und FLOWERS et al. (1977). Aus LARCHER (1994).....	4
Abb. 2: Degradationsreihe nach BLÜMEL (unpubliziert) Die vollständigen Bezeichnungen sind in Tab. 1 aufgelistet.....	8
Abb. 3: Systematische Stellung der untersuchten Arten	13
Abb. 4: <i>Najas marina</i>	14
Abb. 5: <i>Zannichellia palustris</i>	15
Abb. 6: Beprobte Küstengewässer der deutschen Ostsee. Die zu den Abkürzungen gehörenden Gewässerbezeichnungen sind in Tab. 2 (S.16) aufgelistet.	17
Abb. 7 Entnahmeort (roter Kreis) von <i>Najas marina</i> in ca. 0,75 m Tiefe im Bereich des Prerowstroms (Darß – Zingster – Boddenkette).....	20
Abb. 8: Versuchsaufbau	21
Abb. 9: Messung des sichtbaren Lichtes [Lux] (schwarze Linie) und der Photonenflussrate [$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$] (rote Linie). (A) = niedrigste Lichtstufe; (B) = mittlere Lichtstufe; (C) = höchste Lichtstufe; (D) = ohne Gaze	22
Abb.10: befülltes Kultivierungsgefäß	23
Abb. 11: Belüftungsanlage als Element des Versuchsaufbaus	23
Abb. 12: Salinität (A), Sichttiefe (B) und Chl <i>a</i> Gehalt (C) der untersuchten Küstengewässer (Interquartilbereiche (25 bis 75 Perzentilwerte) = gelbe Box, Median = horizontale schwarze Linie; Standardabweichung = senkrechte schwarze Linien; Ausreißer = Kreise; Extremwerte = Sterne) – Abkürzung der Gewässer siehe Tab. 2 in Abschnitt 2.2 auf S.16.....	37

- Abb. 13: Rezente Nachweise von *Najas marina* und *Zannichellia palustris* in den Küstengewässern Mecklenburg-Vorpommerns und Schleswig-Holsteins auf Grundlage der Daten aus den in Tab. 3 auf S.17 aufgeführten Beprobungen. (blau = *Zannichellia palustris*; gelb = *Najas marina*; leere Kreise = kein nachgewiesenes Vorkommen der beiden Arten). – Abkürzung der Gewässer siehe Tab. 2 in Abschnitt 2.2 auf S.16..... 38
- Abb. 14: Dargestellt sind hier die aus der Datenanalyse in Abschnitt 3.1.1 und 3.1.2 ermittelten Toleranzbereiche hinsichtlich der Salinität (A), der Sichttiefe (B) und des Chl *a* Gehaltes (C). In (D) ist der Bereich des Anteils der Oberflächenstrahlung in den Verbreitungstiefen angegeben (N.m. = *Najas marina*; Z.p. = *Zannichellia palustris*; gelber Balken = Bereich der 25 bis 75 Percentile; schwarze Linie = Bereich außerhalb der 25/75 Percentile, wobei die senkrechten Endstriche die Minimal- bzw. Maximalwerte angeben) 41
- Abb. 15: Dargestellt sind die im Beprobungszeitraum gemessenen täglichen Strahlendosen (im Bereich der PAR) durch die Biologische Station Zingst (schwarz). Aus den Chl *a*-Konzentrationen (täglich gemessen durch die Biologische Station Zingst) wurden die k_{PAR} -Werte berechnet. Aus diesen k_{PAR} -Werten und den täglichen Strahlendosen wurde dann wiederum die tägliche Strahlendosis in 0,75 m Wassertiefe berechnet (blau). Die roten Kurven entstanden bei der Verwendung von $k_{PAR} \pm$ Konf. anstelle des mittleren k_{PAR} (blaue Kurve). 43
- Abb. 16: Mittlere tägliche Strahlendosis (PAR) oberhalb der Wasseroberfläche und in 0,75 m unterhalb der Wasseroberfläche. Dies wurde anhand der Daten der Biologischen Station Zingst (Globalstrahlung und Chl *a* - Konzentration) berechnet und auf die Tagesdosis gemittelt. 44
- Abb. 17: Dargestellt sind die Wachstumsparameter der aus dem Freiland entnommenen Pflanzen von *Najas marina* 45
- Abb. 18: Darstellung der Photosyntheseparameter der aus dem Freiland entnommenen Pflanzen von *Najas marina* 45

- Abb. 19: *Najas marina* Versuch 1: RWR in Bezug auf die Biomasse (A) bzw. die Länge (B) in Abhängigkeit vom Salzgehalt und von der Kultivierungs-Lichtintensität (kleine Buchstaben = Test der Salinitätsstufen auf Signifikanz bei gleicher Lichtstufe; Großbuchstaben = Test der Lichtstufen auf Signifikanz bei gleicher Salinitätsstufe) 47
- Abb. 20: *Najas marina* Versuch 1: Photosyntheseparameter in Abhängigkeit von Salzgehalt und Kultivierungs-Lichtintensität. (A = Photosynthesekapazität; B = Photosyntheseeffizienz; C = Lichtsättigungspunkt; D = Lichtkompensationspunkt; kleine Buchstaben = Test der Salinitätsstufen auf Signifikanz bei gleicher Lichtstufe; Großbuchstaben = Test der Lichtstufen auf Signifikanz bei gleicher Salinitätsstufe) 48
- Abb. 21: *Najas marina* Versuch 1: Ermittlung der minimalen Lichtanforderung $E_{\min}$ (A) $\pm$ Konf. (rot). Die angegebenen Gleichungen entsprechen den dargestellten Kurven (mit y = schwarz; y^- und y^+ = rot) 49
- Abb. 22: *Najas marina* Versuch 2: RWR in Bezug auf die Biomasse (A) bzw. die Länge (B) in Abhängigkeit vom Salzgehalt und von der Kultivierungs-Lichtintensität. (kleine Buchstaben = Test der Salinitätsstufen auf Signifikanz bei gleicher Lichtstufe; Großbuchstaben = Test der Lichtstufen auf Signifikanz bei gleicher Salinitätsstufe) 50
- Abb. 23: *Najas marina* Versuch 2: Photosyntheseparameter (Photosynthesekapazität (A); Photosyntheseeffizienz (B); Lichtsättigungspunkt (C); Lichtkompensationspunkt (D)) in Abhängigkeit von Salzgehalt und Kultivierungs-Lichtintensität. (kleine Buchstaben = Test der Salinitätsstufen auf Signifikanz bei gleicher Lichtstufe; Großbuchstaben = Test der Lichtstufen auf Signifikanz bei gleicher Salinitätsstufe) 51
- Abb. 24: *Najas marina* Versuch 2: Ermittlung der minimalen Lichtanforderung $E_{\min}$ (A) $\pm$ Konf. (rot). Die angegebenen Gleichungen entsprechen den dargestellten Kurven (mit y = schwarz; y^- und y^+ = rot) 53

- Abb. 25: *Najas marina* Versuch 3: RWR in Bezug auf die Biomasse (A) bzw. die Länge (B) sowie der Gehalt an Chlorophyll a in den Pflanzen (C) und die Ammoniumkonzentration im Versuchswasser (D) in Abhängigkeit vom Salzgehalt und von der Kultivierungs-Lichtintensität. (kleine Buchstaben = Test der Salinitätsstufen auf Signifikanz bei gleicher Lichtstufe; Großbuchstaben = Test der Lichtstufen auf Signifikanz bei gleicher Salinitätsstufe) 55
- Abb. 26: *Najas marina* Versuch 3: Photosyntheseparameter (Photosynthesekapazität (A); Photosyntheseeffizienz (B); Lichtsättigungspunkt (C); Lichtkompensationspunkt (D)) in Abhängigkeit von Salzgehalt und Kultivierungs- Lichtintensität. (kleine Buchstaben = Test der Salinitätsstufen auf Signifikanz bei gleicher Lichtstufe; Großbuchstaben = Test der Lichtstufen auf Signifikanz bei gleicher Salinitätsstufe) 57
- Abb. 27: *Najas marina* Versuch 3: Ermittlung der minimalen Lichtanforderung $E_{\min}$ (A) $\pm$ Konf. (rot). Die angegebenen Gleichungen entsprechen den dargestellten Kurven (mit y = schwarz; y^- und y^+ = rot). Des Weiteren ist die reale O_2 -Produktion in Abhängigkeit zur Kultivierungslichtintensität (B) und zu E_k (C) dargestellt..... 59
- Abb. 28: Ermittlung der minimalen Lichtanforderung von *Najas marina* durch Auftragen des Quotienten aus E_k und E gegenüber E . $E_{\min}$ ist dabei die Lichtintensität (E), bei der der Quotient von E_k und $E = 1$ ist. Grundlage sind die Daten aller drei Versuche mit *Najas marina* (erwartete $E_{\min}$ (schwarz) $\pm$ Konf. (rot). Die angegebenen Gleichungen entsprechen den dargestellten Kurven mit y = schwarz; y^- und y^+ = rot) 60
- Abb. 29: Theoretische untere Verbreitungsgrenze von *Najas marina* im Zingster Strom. Die schwarze Linie gibt die erwartete Tiefe der unteren Verbreitung an. Mit rot ist der Bereich der uVg gekennzeichnet, der auf den berechneten Konfidenzintervallen (95 %) sowohl der $E_{\min}$ - als auch der k_{PAR} -Werte beruht. 60

- Abb. 30: *Zannichellia palustris* Versuch 1: RWR in Bezug auf die Biomasse (A) bzw. die Länge (B) sowie der Gehalt an Chlorophyll a in den Pflanzen (C) und die Ammoniumkonzentration im Versuchswasser (D) in Abhängigkeit vom Salzgehalt und von der Kultivierungs-Lichtintensität. (kleine Buchstaben = Test der Salinitätsstufen auf Signifikanz bei gleicher Lichtstufe; Großbuchstaben = Test der Lichtstufen auf Signifikanz bei gleicher Salinitätsstufe) 62
- Abb. 31: *Zannichellia palustris* Versuch 1: Photosyntheseparameter (Photosynthesekapazität (A); Photosyntheseeffizienz (B); Lichtsättigungspunkt (C); Lichtkompensationspunkt (D)) in Abhängigkeit von Salzgehalt und Kultivierungs- Lichtintensität. (kleine Buchstaben = Test der Salinitätsstufen auf Signifikanz bei gleicher Lichtstufe; Großbuchstaben = Test der Lichtstufen auf Signifikanz bei gleicher Salinitätsstufe) 64
- Abb. 32: *Zannichellia palustris* Versuch 1: Ermittlung der minimalen Lichtanforderung $E_{\min}$ (A) $\pm$ Konf. (rot). Die angegebenen Gleichungen entsprechen den dargestellten Kurven (mit y = schwarz; y^- und y^+ = rot). Des Weiteren ist die reale O_2 -Produktion in Abhängigkeit zu E (B) und zu E_k (C) dargestellt..... 66
- Abb. 33: *Zannichellia palustris* Versuch 2: RWR in Bezug auf die Biomasse (A) bzw. die Länge (B) sowie der Gehalt an Chlorophyll a in den Pflanzen (C) und die Ammoniumkonzentration im Versuchswasser (D) in Abhängigkeit vom Salzgehalt und von der Kultivierungs-Lichtintensität. (kleine Buchstaben = Test der Salinitätsstufen auf Signifikanz bei gleicher Lichtstufe; Großbuchstaben = Test der Lichtstufen auf Signifikanz bei gleicher Salinitätsstufe) 67
- Abb. 34: *Zannichellia palustris* Versuch 2: Photosyntheseparameter (Photosynthesekapazität (A); Photosyntheseeffizienz (B); Lichtsättigungspunkt (C); Lichtkompensationspunkt (D)) in Abhängigkeit von Salzgehalt und Kultivierungs- Lichtintensität. (kleine Buchstaben = Test der Salinitätsstufen auf Signifikanz bei gleicher Lichtstufe; Großbuchstaben = Test der Lichtstufen auf Signifikanz bei gleicher Salinitätsstufe) 69

- Abb. 35: *Zannichellia palustris* Versuch 2: Ermittlung der minimalen Lichtanforderung $E_{\min}$ (A) $\pm$ Konf. (rot). Die angegebenen Gleichungen entsprechen den dargestellten Kurven (mit y = schwarz; y^- und y^+ = rot). Des Weiteren ist die reale O_2 -Produktion in Abhängigkeit zu E (C) und zu E_k (D) dargestellt. 71
- Abb. 36: *Zannichellia palustris*: Ermittlung der minimalen Lichtanforderung von *Zannichellia palustris* durch Auftragen des Quotienten aus E_k und E gegenüber E . $E_{\min}$ ist dabei die Lichtintensität (E), bei der der Quotient von E_k und $E = 1$ ist. Grundlage sind die Daten aller drei Versuche mit *Najas marina* (erwartete $E_{\min}$ (schwarz) $\pm$ Konf. (rot). Die angegebenen Gleichungen entsprechen den dargestellten Kurven mit y = schwarz; y^- und y^+ = rot) 72
- Abb. 37: Theoretische untere Verbreitungsgrenze von *Najas marina* im Zingster Strom. Die schwarze Linie gibt die erwartete Tiefe der unteren Verbreitung an. Mit rot ist der Bereich der uVg gekennzeichnet, der auf den berechneten Konfidenzintervallen (95 %) sowohl der $E_{\min}$ - als auch der k_{PAR} -Werte beruht. 72
- Abb. 38: Aus den Laborversuchen (*Najas marina* 3 und *Zannichellia palustris* 2) ermittelte Lichtsättigungspunkte (A) und Photosynthesekapazität (B). (gelbe Box = 25 bis 75 Percentile; Kreise = Ausreißer) 85

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Abkürzungsverzeichnis der aus SCHUBERT et al. 2004 aufgeführten Pflanzengemeinschaften.....	9
Tab. 2:	Abkürzungsverzeichnis der beprobten Gewässer und Zuordnung zu den Messstationen für die (a)biotischen Parameter	16
Tab. 3:	Für die Vegetationsanalyse verwendete Datenbanken mit Projekt- und Gewässerbezeichnung, der Anzahl der untersuchten Transekte und den Untersuchungszeiträumen. Die Zuordnung der Abkürzungen zu den beprobten Gewässern sind in Tab. 2 (S.16) aufgeführt.....	17
Tab. 4:	Schätzklassen nach BRAUN-BLANQUET (1951), verändert nach WILMANN (1993).....	18
Tab. 5:	Einteilung der Stetigkeitsklassen nach dem Anteil der Deckung einer Art an der Gesamtdeckung der beprobten Fläche	19
Tab. 6:	Versuchsdesign der einzelnen Versuche mit den jeweiligen Bedingungen.....	24
Tab. 7:	Versuchsdesign der einzelnen Versuche mit den jeweiligen Bedingungen.....	25
Tab. 8:	Herkunft und Eigenschaften der für die Versuche verwendeten Sedimente und des benutzten Biotopwassers.....	25
Tab. 9:	Herkunft und Eigenschaften der für die Versuche verwendeten Sedimente und des benutzten Biotopwassers.....	26
Tab. 10:	Einteilung der Substrattypen nach dem Anteil der Schlufffraktion (KOLP 1966)	27
Tab. 11:	Einstellungen der Datei pfcontr.prn, die für die Steuerung der Lichtintensitäten verantwortlich ist.....	32

Tab. 12:	Rezente Nachweise von <i>Najas marina</i> und <i>Zannichellia palustris</i> in den untersuchten Gewässern Mecklenburg-Vorpommerns (uVg = untere Vegetationsgrenze; Dg = mittlere Gesamtdeckung je Gewässer; D = mittlerer Anteil der Deckung der Art an der Gesamtdeckung aller beprobter Flächen je Gewässer; Vg = Verbreitungsgrenze; S = Stetigkeit; „>“ = Vg bzw. uVg wird in der maximal beprobten Tiefe nicht erreicht; - = kein Vorkommen bzw. Nachweis der jeweiligen Art).....	39
Tab. 13:	Rezente Nachweise von <i>Najas marina</i> und <i>Zannichellia palustris</i> in den untersuchten Gewässern Schleswig-Holsteins (uVg = untere Vegetationsgrenze; Dg = mittlere Gesamtdeckung je Gewässer; D = mittlerer Anteil der Deckung der Art an der Gesamtdeckung aller beprobter Flächen je Gewässer; Vg = Verbreitungsgrenze; S = Stetigkeit; „>“ = Vg bzw. uVg wird in der maximal beprobten Tiefe nicht erreicht; - = kein Vorkommen bzw. Nachweis der jeweiligen Art).....	40
Tab. 14:	Anzahl (n) der für die Datenauswertung verwendeten Pflanzen aus den jeweiligen Ansätzen. (- = Versuch wurde nicht mit diesen Licht- und Salinitätsstufen durchgeführt, Wp = Wachstumsparameter; Php = Photosyntheseparameter)	46
Tab. 15:	<i>Najas marina</i> Versuch 1: F-Test für die Wachstumsparameter (df = Freiheitsgrade; F = Ergebnis des F – Tests; Sig. = Ergebnis der Signifikanzprüfung (mit $\alpha = 0,05$))	47
Tab. 16:	<i>Najas marina</i> Versuch 1: F-Test für die Photosyntheseparameter (df = Freiheitsgrade; F = Ergebnis des F – Tests; Sig. = Ergebnis der Signifikanzprüfung (mit $\alpha = 0,05$))	49
Tab. 17:	<i>Najas marina</i> Versuch 2: F-Test für die Wachstumsparameter (df = Freiheitsgrade; F = Ergebnis des F – Tests; Sig. = Ergebnis der Signifikanzprüfung (mit $\alpha = 0,05$))	50
Tab. 18:	<i>Najas marina</i> Versuch 3: F-Test für die Wachstumsparameter (df = Freiheitsgrade; F = Ergebnis des F – Tests; Sig. = Ergebnis der Signifikanzprüfung (mit $\alpha = 0,05$))	54

Tab. 19:	<i>Najas marina</i> Versuch 3: F-Test für die Photosyntheseparameter (df = Freiheitsgrade; F = Ergebnis des F – Tests; Sig. = Ergebnis der Signifikanzprüfung (mit $\alpha = 0,05$))	57
Tab. 20:	<i>Zannichellia palustris</i> Versuch 1: F-Test für die Wachstumsparameter (df = Freiheitsgrade; F = Ergebnis des F – Tests; Sig. = Ergebnis der Signifikanzprüfung (mit $\alpha = 0,05$))	61
Tab. 21:	<i>Zannichellia palustris</i> Versuch 2: F-Test für die Wachstumsparameter (df = Freiheitsgrade; F = Ergebnis des F – Tests; Sig. = Ergebnis der Signifikanzprüfung (mit $\alpha = 0,05$))	66
Tab. 22:	<i>Zannichellia palustris</i> Versuch 2: F-Test für die Photosyntheseparameter (df = Freiheitsgrade; F = Ergebnis des F – Tests; Sig. = Ergebnis der Signifikanzprüfung (mit $\alpha = 0,05$)).....	69
Tab. 23:	Vergleich von potentieller und rezenter Verbreitung von <i>Najas marina</i> und <i>Zannichellia palustris</i> in Abhängigkeit der Salinität. Wobei das potentielle Vorkommen unter Berücksichtigung der 25 und 75 Percentilwerte der in den jeweiligen Gewässern gemessenen Salinitäten und den aus den Laborversuchen ermittelten artspezifischen Toleranzbereichen hinsichtlich der Salinität bestimmt wurde. Die Daten für die rezenten Vorkommen stammen aus den in Tab. 3 (S.17) erhobenen Vegetationsaufnahmen (min = Minimum; max = Maximum; 25 Perc = 25 Percentil; 75 Perc = 75 Percentil; pV = potentielles Vorkommen; rV = rezentes Vorkommen; „x“ / „X“ = positiv; „ – “ = negativ). Das Abkürzungsverzeichnis für die untersuchten Gewässer befindet sich in Tab. 2 (S.16)	78
Tab. 24:	Historische Nachweise von <i>Najas marina</i> erstellt aus Daten von BLÜMEL 2002	79
Tab. 25:	Historische Nachweise von <i>Zannichellia palustris</i> erstellt aus Daten von MERTENS 2006	79
Tab. 26:	Vergleich der aus dem Labor gewonnenen Ergebnisse mit Daten anderer Arten (aus der Literatur). (Zahl in Klammern geben den Median an; - = keine Daten vorhanden)	86

Abkürzungsverzeichnis

bzw.	= beziehungsweise
c.a.	= circa
Chl <i>a</i>	= Chlorophyll a
E_c	= Lichtkompensationspunkt
E_k	= Lichtsättigungspunkt
E_{min}	= artspezifische minimale Lichtanspruch
FM	= Frischmasse
Konf.	= Konfidenzintervall
k_{PAR}	= Lichtattenuationskoeffizient für die photosynthetisch aktive Strahlung
NH_4^+	= Ammonium (-ionen)
oTM	= organische Trockenmasse
P_{netto}	= Nettophotosyntheserate
PAR	= Photosynthetisch aktive Strahlung (Photosynthetic Active Radiation)
P_{max}	= Photosynthesekapazität bzw. maximale Photosyntheseleistung
Resp.	= Respiration
RWR	= Relative Wachstumsrate
RWR_{BM}	= Relative Wachstumsrate bezogen auf die Biomassezunahme
RWR_L	= Relative Wachstumsrate bezogen auf die Längenzunahme
S.	= Seite
TM	= Trockenmasse
u.a.	= unter anderem

1. Einleitung

1.1. Einführung

Der Mensch hat die Küstenregionen und damit auch die Ostsee nachhaltig beeinflusst. Insbesondere seit der industriellen Revolution am Ende des 19. Jahrhunderts wurden die Ostsee und ihre Küstengewässer einer starken anthropogenen Beeinträchtigung unterzogen. So erfolgte die Einleitung toxischer und großer Mengen eutrophierender Stoffe in die Küstengewässer. Die eingeleiteten Stoffe hatten ihren Ursprung überwiegend in den Industrie-, Landwirtschafts- und Abwasseranlagen. Aufgrund der Pufferwirkung der inneren Küstengewässer zeigten sich diese Auswirkungen und Veränderungen nicht sofort, sondern zeitlich versetzt. So wurden die Auswirkungen der Eutrophierung in den Küstengewässern der deutschen Ostseeküste selbst erst seit Ende der 1960er Jahre sichtbar. SCHNESE & HÜBEL (1976) dokumentierten erste Veränderungen in der Phyto- und Zooplanktonproduktion dieser Gewässer. Die sichtbaren Folgen waren die Zunahme der Phytoplanktonbiomasse und der epiphytischen Algen sowie die Veränderung der Artenzusammensetzung des Phytoplanktons (SCHIEWER 1998). Dieses bewirkte durch die dadurch verursachte Verringerung des Lichtes einen Rückgang des Phytobenthos, so dass aus den durch Makrophyten dominierten Gewässern planktondominierte Gewässer wurden. Ein gutes Beispiel für den Rückgang der submersen Makrophyten sind die Veränderungen der Characeenbestände. So wurde noch bis zur Mitte des 20ten Jahrhunderts zum Teil Massenvorkommen von Characeen (YOUSEF 1999) in den Bodden- und Haffgewässern beschrieben. Am Ende des 20ten Jahrhunderts sind diese Bestände teilweise in solch starkem Maße zurückgegangen (TEUBNER 1989), dass einige Characeenarten in die Liste der gefährdeten Arten aufgenommen wurden (SCHMIDT et al. 1994). Als Grund für diesen Rückgang wird in erster Linie die anthropogene Eutrophierung verantwortlich gemacht (YOUSEF 1999). Der Rückgang der externen Nährstoffeinträge hat bisher noch nicht zu der erhofften Verbesserung der trophischen Situation in den Küstengewässern geführt (SCHLUNGBAUM & BAUDLER 1996; DAHLKE 1994; in YOUSEF 1999). Die Gewässer werden weiterhin stark vom Phytoplankton dominiert. Jedoch wird das erneute Vorfinden von Characeen in diesen Gewässern aber als erstes Anzeichen dafür

gedeutet, dass langsam eine Veränderung des trophischen Gefüges zwischen Benthos und Plankton einsetzt (YOUSSEF 1999, SCHUMANN et al. 2006). Die hohe natürliche Variabilität als auch das natürlich bedingte Auftreten bistabiler¹ Zustände in Flachgewässern (SCHEFFER 1998) ermöglichen zurzeit keine gesicherten Aussagen darüber, ob bereits eine Verbesserung des Gewässerzustandes erfolgte. Dies ist aber für die Umsetzung der Europäischen Wasser-Rahmen-Richtlinie (EU-WRRL) notwendig. Darin wird verlangt, dass bis zum Jahr 2015 mindestens der „gute ökologische Zustand“ für alle Oberflächengewässer der Europäischen Gemeinschaft erreicht wird. Dieser „gute ökologische Zustand“ ist beschrieben als Zustand mit geringen anthropogen verursachten Abweichungen vom Referenzzustand. Der Referenzzustand wird allgemein mit einer „sehr guten Gewässerqualität“ oder dem weitgehend natürlichen Zustand gleichgesetzt (VON WEBER 2002). Für die Ermittlung des Gewässerzustandes gewannen die submersen Makrophyten als Indikatororganismen in der letzten Zeit immer mehr an Bedeutung. Ein Hauptgrund dabei ist wohl die rasche Bestimmbarkeit der Makrophyten, wodurch der Aufwand für die Zustandsbeschreibung der Gewässer gering gehalten wird (GLÄNZER 1975). Somit ist die Beschreibung basierend auf die submersen Makrophyten eine effektive Methode zur Gewässergütebestimmung.

1.2. Stand der Forschung

Als Küstengewässer bezeichnet man Oberflächengewässer, die Teil des offenen Meeres sind und unmittelbar an der Landfläche liegen. Die inneren Küstengewässer sind ein typisches Landschaftselement der Küstenregionen der südlichen Ostsee. Da es sich bei den inneren Küstengewässern um historisch gewachsene Strukturen handelt sind diese in ihrer Morphologie zum Teil sehr verschieden. Das bedeutet auch, dass das Einzugsgebiet der einzelnen inneren Küstengewässer hinsichtlich der Größe und Struktur sehr divers ist. Neben dieser morphometrischen Vielfalt sind diese Gewässer durch eine hohe zeitliche und räumliche Variabilität der abiotischen Parameter gekennzeichnet (SAGERT & DAHLKE 2002), die zum einen durch landseitige Einflüsse zum anderen durch die angrenzende Ostsee bedingt ist. Insbesondere die Variabilität der Salinität erschwert die Identifikation der Faktoren, die das Auftreten und die Dominanzverhältnisse sowohl benthischer als auch planktischer Organismen steuern (SCHUMANN et al. 2006).

¹ Bistabilität ist die Eigenschaft von Systemen, zwei mögliche Zustände einnehmen zu können. Ein Wechsel vom einen in den anderen Zustand ist aber nur durch einen äußeren Impuls möglich.

Als Übergangsbereich zwischen den limnischen Gewässern und den marinen Systemen sind die inneren Küstengewässer sowohl ein Puffersystem als auch ein empfindliches Ökosystem zwischen Land und Meer. Die Pufferkapazität der inneren Küstengewässer wird wesentlich durch die submersen Makrophyten beeinflusst. Sie entziehen und binden die Nährstoffe im Wasser, sorgen für eine Stabilisierung des Sediments und bilden die Grundlage für verschiedene Biozönosen (LINDNER 1972). Demnach sind die submersen Makrophyten ein wichtiger Bestandteil für die Beurteilung der Gewässerqualität. Die Ausbreitungsgrenzen der submersen Vegetation werden durch viele (a)biotische Umweltfaktoren beeinflusst bzw. gesteuert, wie zum Beispiel durch die Lichtintensität, Salinität, Temperatur, pH-Wert, Substratbeschaffenheit, Nährstoffverfügbarkeit, Exposition und Strömung (YOUSEF 1999). Dabei sind alle Umweltfaktoren natürlichen Schwankungen unterworfen, an die sich die Pflanzen angepasst haben bzw. anpassen müssen. Jede Pflanzenart kann in bestimmten Toleranzbereichen der sie umgebenden Umweltfaktoren existieren. Der optimale Bereich eines Umweltfaktors ist dabei der Bereich, der für die Pflanze die günstigsten Lebensbedingungen bietet. Bei Unter- oder Überschreitung des optimalen Bereiches sind die Pflanzen Stress ausgesetzt. Dieser Stress ist ein Belastungszustand der aufgrund einer Abweichung vom Lebensoptimum auftritt und zunächst reversible Veränderungen und Reaktionen auf allen Funktionsebenen des Organismus bewirkt (LARCHER 1994). Andauernder oder sehr großer Stress kann aber auch irreversible Schädigungen der Pflanze hervorrufen. Um den Stressereignissen entgegen zu wirken haben die Pflanzen im Laufe der Zeit unterschiedliche Widerstandsfähigkeiten („tolerance“) erlangt und abpuffernde Schutzmaßnahmen („avoidance“) entwickelt. Pflanzen unter Stress reagieren dabei auf gleichzeitig oder nachfolgend einwirkende Belastungen anders als Pflanzen ohne Stress. Sie können darauf u.a. durch Verstärkung, Milderung, Überdeckung oder Umkehrung ihrer Reizantwort reagieren (LARCHER 1994). Die natürlichen und zum Teil lebensnotwendigen Umweltfaktoren können also Stress auslösen und so die Funktions- und Lebensfähigkeit der Pflanzen einschränken. Da Stress sich auf alle Bereiche der Pflanze auswirkt, ist es möglich den optimalen Bereich eines Umweltfaktors zu ermitteln. Der optimale Bereich ist somit der Bereich, der die negativsten bzw. die positivsten Auswirkungen auf die Pflanze hat. Durch das Testen verschiedener Intensitäten des Stressors lässt sich dieser Bereich des Optimums relativ gut ermitteln. Dabei können Pflanzen einer Art aber unterschiedlicher Herkunft bzw. unterschiedlicher Reife durchaus in ihrem Optimum abweichen. Eine Abweichung der

Umweltfaktoren vom Optimum einer Art zeigt sich in erster Linie durch eine Wachstumsdepression der einzelnen Individuen dieser Art (GLÄNZER 1975). Demzufolge werden verschiedene Arten durch Umweltfaktoren unterschiedlich stark behindert bzw. gefördert, was eine von Art zu Art verschiedene Ausbreitung zur Folge hat. Zwei der wesentlichen Umweltfaktoren für die Ausbreitung der submersen Vegetation in den inneren Küstengewässern sind die Salinität und die photosynthetisch aktive Strahlung (PAR).

Salinitätsstress entsteht durch Ionenungleichgewichte zwischen dem Protoplasma der Pflanze und dem umgebenden Medium, sowie durch ionenspezifische Wirkungen auf Enzyme und Membraneigenschaften. Dieser Stress äußert sich in unzureichender Energieausbeute bei der Photo- und Atmungskettenphosphorylierung sowie in gestörter Stickstoffassimilation und in abnormalen Proteinstoffwechselwegen. Sowohl die Photosyntheseintensität als auch die Wachstumsvorgänge der Pflanzen werden durch Salinitätsstress stark beeinflusst (SCHWENKE 1960). Verschiedene Pflanzenarten können auf teils unterschiedliche Weise auf Salinitätsstress reagieren. Dabei kann zwischen Salztoleranz und Salzregulation unterschieden werden (Abb. 1).

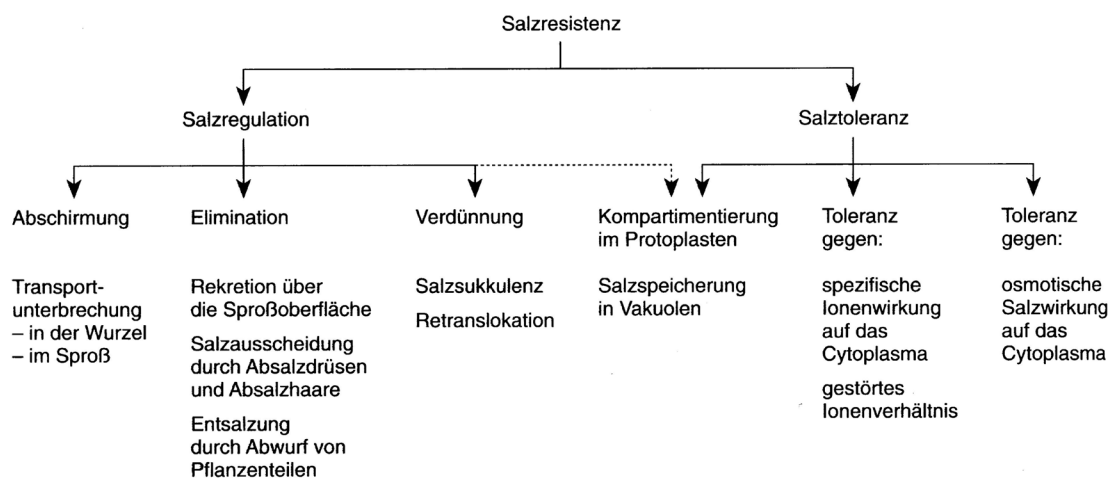


Abb. 1: Komponenten der Widerstandsfähigkeit gegen Salzbelastung. Nach STEINER (1934), WASEL (1972), KREB (1974) und FLOWERS et al. (1977). Aus LARCHER (1994)

Die Schutzmaßnahmen der Salzregulation umfassen dabei die Abschirmung, Elimination, Verdünnung und Kompartimentierung. Die Toleranz hingegen beruht auf der Verträglichkeit von spezifischen Ionenwirkungen und osmotischen Wirkungen auf das Cytoplasma (LARCHER 1994). Die Salinität ist einer der wirksamsten Umweltfaktoren auf die in den Küstengewässern lebenden Arten. So beschreibt REMANE (1940) die Verbreitung von Arten der benthischen Makrofauna im Brackwasser, wobei er einen Punkt der geringsten Artenzahlen entdeckt (DOMIN et al.

2002). Dieser Punkt befindet sich bei Salinitäten zwischen 5 und 8 PSU und nennt sich Horohalinikum (HEERKLOß & SCHNEESE 1994). Für das Phytobenthos ist diese Regel nicht ohne weiteres zutreffend. Die Arbeit von FEUERPFEL (2003) zeigte ein kontinuierliches Absinken der Artenzahl von auf Hartsubstrat wachsenden Makrophyten mit sinkender Salinität. Zwar konnte im Bereich des Horohalinikums kein Artenminimum festgestellt werden, aber es konnte dennoch gezeigt werden, dass in diesem Lebensraum sehr unterschiedliche Dominanzverhältnisse existieren. Dies beruht vermutlich auf der Lage der Toleranzgrenze vieler Makrophyten in diesem Salinitätsbereich, was die Wirkung anderer Faktoren verstärken mag und so über Vorkommen oder nicht Vorkommen entscheidet (FEUERPFEL 2003). Einer dieser Faktoren ist die Strahlung, also die Lichtverfügbarkeit.

Strahlungsstress entsteht unter anderem durch ein Über- bzw. Unterangebot an photosynthetisch aktiver Strahlung. Der Photosyntheseapparat ist für eine möglichst effektive Nutzung des sichtbaren Lichtes ausgestattet. Hohe Strahlungsdosen liefern dem Photosyntheseapparat jedoch mehr Energie als benötigt. Dieser Überschuss an photochemischer Energie bewirkt eine reversible Photoinhibition, was eine Verringerung der Quantennutzung und Assimilationsleistung durch Herabsetzen der Elektronentransferrate (ETR) bedeutet (HÄDER 2001). Bei sehr starkem Strahlungsüberschuss kann es zur Photodestruktion kommen, also die Zerstörung der Photosynthesepigmente und Thylakoidstrukturen (MURPHY & VU 1996 in HÄDER 2001). Um der Photoinhibition und -destruktion zu entgehen, haben auch die phytobenthischen und die phytoplanktischen Organismen verschiedene Möglichkeiten entwickelt. So reagiert das Phytoplankton auf Starklicht u.a. durch Vertikalwanderung in größere Wassertiefen. Aber auch die Makrophyten sind in der Lage auf zu hohe Lichtintensitäten zu reagieren. Sie können bei einem Überangebot an Lichtenergie die Antennenpigmente der Lichtsammelkomplexe (LHC) wie z.B. das Chlorophyll a, b und auch das Lutein zu reduzieren. Umgekehrt wird bei Lichtmangelsituationen die Konzentration dieser Antennenpigmente und damit die Anzahl der LHC erhöht, um die effektive Energieausbeute zu erhöhen (YOUSEF 1999). Ebenfalls gegen Strahlungsstress wirksam ist die Veränderung der Konzentration von Schutzpigmenten, wie α - und β -Carotin sowie der Xanthophyllmetaboliten (Zea-, Anthera- und Violaxanthin). Anthera- und Violaxanthin dienen dabei als akzessorische Pigmente, welche die Strahlungsenergie vor Erreichen der Photosyntheseapparate abfangen (DEMMIG-ADAMS 1992). Eine andere Möglichkeit ist die überschüssige Strahlungsenergie direkt von den

Photosystemen über Fluoreszenz und vor allem in Form von Wärme abzugeben. Um die destruktiven freien Sauerstoffradikale, welche aufgrund des Starklichtes entstehen, unschädlich zu machen, werden diese durch Oxidoreduktasen abgefangen. Ein weiterer energieableitender Schutzmechanismus ist der Kreisprozess des Glykolatstoffwechsels (LARCHER 1994). Die Makrophyten haben also die verschiedensten Strategien entwickelt, um die natürlich gegebenen Schwankungen der Umweltbedingungen in den inneren Küstengewässern zu tolerieren. Außer den natürlichen Variabilitäten der Umweltfaktoren, sind die Pflanzen in jüngerer Zeit auch direkten und indirekten anthropogenen Belastungen ausgesetzt. Die Hauptursache dieser Belastungen ist in den hohen (Nähr-)Stoffeinträgen zu sehen. So gelangt der größte Teil aller Stoffeinträge über die Flusseinzugsgebiete in die Küstengewässer, in denen dann eine Stoffretention bzw. Stoffakkumulation² erfolgt. So erfolgte z.B. eine Kalkulation der Stoffeinträge für die Darß – Zingster –Boddenkette (DZBK) von 1700 t N a^{-1} und 57 t P a^{-1} , wobei der natürliche Stoffeintrag auf 296 t N a^{-1} und 16 t P a^{-1} kalkuliert wurde (SELIG et al. 2006). Nur ein Teil der eingetragenen Stoffe wird in gelöster oder partikulärer Form in die Meere weiter transportiert. Erst wenn die Pufferkapazität der Gewässer ausgelastet ist, werden die Meere mit Nähr- und Schadstoffen belastet. So kommt insbesondere den inneren Küstengewässern eine große Bedeutung für den Meeresschutz zu (SCHUBERT et al. 2004). Vor allem das Phytoplankton profitiert von den starken Nährstoffeinträgen in die inneren Küstengewässer. Die damit verbundene hohe Abundanz des Phytoplanktons hat einen großen Einfluss auf das Lichtklima im Wasserkörper. Zusätzlich zu der durch das Phytoplankton induzierten Absorption des Lichtes wirken die natürlichen Gelbstoffeinträge ebenfalls reduzierend auf das Lichtklima (DOMIN et al. 2004). Die Lichteindringtiefen verringerten sich also mit zunehmender Eutrophierung und die in den tieferen Zonen der Gewässer lebenden Makrophyten wurden nun durch das weniger vorhandene Licht limitiert. Somit wurde dann auch die Artenzusammensetzung und -verbreitung des Makrophytobenthos verändert. Der anthropogene Einfluss veränderte aber nicht nur das Lichtklima. Durch wasserbauliche Maßnahmen, wie z.B. Vertiefungen als Fahrrinnen für die Schifffahrt, Schleusen, Dämme usw., wurden unter anderem auch die Salinitätsverhältnisse im Gewässer verändert. Da die Salinität den Gelbstoffgehalt im Wasser beeinflusst³ und dieser das Lichtklima des Gewässers ändert, bewirkten diese baulichen Maßnahmen also indirekt auch eine Veränderung des

² Festsetzung und Anreicherung von Stoffen

³ Eine erhöhte Durchmischung der gelbstoffhaltigeren Küstengewässer mit der Ostsee ergibt sowohl einen Anstieg der Salinität als auch eine Verdünnung der Gelbstoffe in den Küstengewässern

Unterwasserlichtklimas (DOMIN et al. 2004). So kann davon ausgegangen werden, dass Arten die nur bei niedrigen Salinitäten wachsen, sich auf die flacheren exponierten Gewässerabschnitte beschränken müssen.

Aufgrund der anthropogen veränderten Lebensbedingungen haben sich somit auch die Artenzusammensetzungen geändert. Aufgrund unterschiedlicher ökophysiologischer Ansprüche, lassen sich die Makrophyten in Bezug zu den pflanzensoziologischen Vegetationsgesellschaften als Zeiger für die Qualität und Quantität verschiedener Umweltfaktoren und damit auch der Wasserqualität benutzen (GLÄNZER 1975). Somit wäre die Kenntnis der ökophysiologischen Ansprüche von Arten insbesondere von Leitarten der verschiedenen Pflanzengesellschaften eine gute Möglichkeit Rückschlüsse auf die Standortbedingungen und damit die Wasserqualität zu ziehen.

Aufgrund der Zielsetzung der EU-WRRL wurden für die inneren Küstengewässer Mecklenburg-Vorpommerns die Ausbreitungen von Makrophytenbeständen in Abhängigkeit der Salinität und der Lichtverfügbarkeit im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes ELBO untersucht. Ziel dieses Forschungsprojektes war es, entsprechend den Vorgaben der Wasserrahmenrichtlinie der Europäischen Union (EU-WRRL), Klassifizierungssysteme für die biologischen Komponenten „Makrophyten und Phytoplankton“ zu entwickeln, um den Degradationszustand der Gewässer zu charakterisieren (SCHUBERT et al. 2004). Für die biologische Komponente Makrophyten wurde anhand von Herbarbelegen und Literaturstudien ein historisches Leitbild entwickelt. In Freilanduntersuchungen wurde die aktuelle Vegetation in ihrer räumlichen Ausdehnung und Artenzusammensetzung erfasst und die Salinitäts- und Substratabhängigkeit von Pflanzengemeinschaften untersucht. Ergänzend zu diesen Felduntersuchungen wurden Laborversuche zur Salz- und Lichttoleranz einzelner Arten sowie deren Keimungsfähigkeit durchgeführt. Aufbauend auf die durchgeführten Untersuchungen wurde ein Klassifizierungsansatz entwickelt, welcher die Degradation der Gewässer über die Verschiebung der unteren Ausbreitungsgrenzen sowie den Ausfall von Pflanzengemeinschaften charakterisiert. Dabei konnte für die mesohalinen Gewässer ein fünfstufiges Klassifizierungssystem entsprechend der EU-WRRL entwickelt werden. Dabei wurden 11 Pflanzengemeinschaften vorgefunden und untersucht (Tab. 1). (SCHUBERT et al. 2004). So zeigt die Degradationsreihe nach BLÜMEL (unpubliziert) die historisch belegte zeitliche Entwicklung der Pflanzengemeinschaften in verschiedenen Gewässern (Abb. 2).

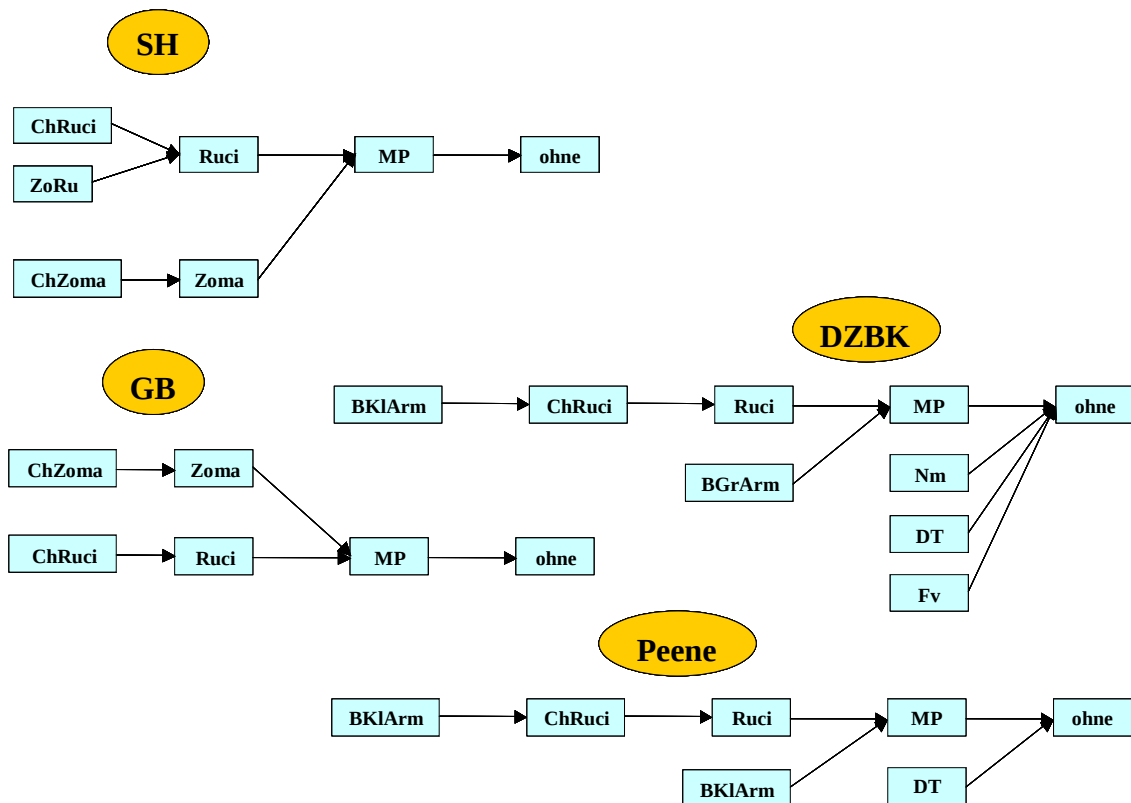


Abb. 2: Degradationsreihe nach BLÜMEL (unpubliziert) Die vollständigen Bezeichnungen sind in Tab. 1 aufgelistet.

Aufgrund dieser aufgestellten Degradationsreihe reagieren die Characeengemeinschaften als erste Pflanzengemeinschaft auf die Erhöhung der Eutrophierung. Über vier Stufen lässt sich anhand der submersen Pflanzengemeinschaften die Auswirkungen der Degradation bis hin zum vegetationslosen Zustand beschreiben. Nach dem vorliegenden Wissensstand müsste *Myriophyllum spicatum* als diagnostische Art der Pflanzengemeinschaft *Myriophyllum spicatum* – *Potamogeton pectinatus* (Tab. 1) und Zeiger eines stark degradierten Gewässerzustandes mit sehr geringen Lichtintensitäten auskommen. Da jedoch verschiedene Umweltfaktoren auf die Organismen einwirken, kann es sowohl zu Verschiebungen des Toleranzbereiches als auch zur Veränderung der Toleranzbreite kommen. So könnten z.B. verschiedene Stressoren für sich alleine genommen die Pflanze bzw. den Organismus latent beeinflussen, während bei einem gleichzeitigen Auftreten der Stressoren eine erhebliche Beeinflussung des gestressten Individuums bis hin zur Lebensunfähigkeit erfolgen kann (LARCHER 1994). Demzufolge sind für jede zu untersuchende Art mehrfaktorielle Analysen zu bevorzugen.

Tab. 1: Abkürzungsverzeichnis der aus SCHUBERT et al. 2004 aufgeführten Pflanzengemeinschaften

Pflanzengemeinschaft	Abkürzung	diagnostische Arten
Bodden -Große Armleuchteralgen Gemeinschaft	BGrArm	<i>Chara tomentosa</i> + <i>C. liljebladii</i>
Bodden -Kleine Armleuchteralgen Gemeinschaft	BKlArm	<i>Chara aspera</i> und/oder <i>C. baltica</i> und/oder <i>C. canescens</i> (mindestens 2 Arten)
Characeen - <i>Ruppia cirrhosa</i> - Gemeinschaft	ChRuci	<i>Chara aspera</i> und/oder <i>C. baltica</i> und/oder <i>C. banescens</i> + <i>Ruppia cirrhosa</i>
Characeen – <i>Zostera marina</i> - Gemeinschaft	ChZoma	<i>Zostera marina</i> + <i>Zannichellia palustris</i> + <i>Tolypella nidifica</i> und/oder <i>Chara aspera</i> , <i>C. baltica</i> , <i>C. canescens</i> , <i>C. liljebladii</i>
<i>Chaetomorpha linum</i> - Driftmatten	Cl	Dominanz von <i>Chaetomorpha linum</i> , nur angegeben, wenn nicht standorttypische Vegetationsformen überlagert werden
Darmtang und Epilithische Großalgen	DT und EG	<i>Enteromorpha</i> und/oder <i>Ulva</i> und/oder <i>Cladophora ssp.</i>
<i>Myriophyllum spicatum</i> - <i>Potamogeton pectinatus</i> Bestände	MP	ausschließlich <i>Myriophyllum spicatum</i> und/oder <i>Potamogeton pectinatus</i>
<i>Najas marina</i> Bestände	Nm	<i>Najas marina</i>
<i>Ruppia cirrhosa</i> - Bestände	Ruci	<i>Ruppia cirrhosa</i> ohne indikatorische Begleiter
<i>Zostera marina</i> Bestände	Zoma	<i>Zostera marina</i> ohne indikatorische Begleiter
<i>Zostera noltii</i> – <i>Ruppia cirrhosa</i> - Gemeinschaft	ZoRu	<i>Ruppia cirrhosa</i> + <i>Zostera noltii</i>

Nach dem heutigen Wissensstand lassen sich aber nicht alle Pflanzengemeinschaften in diese Degradationsreihen integrieren. So lässt sich die Pflanzengemeinschaft *Najadetum marinae* F. FUKAREK 1961 (LINDNER 1972) mit der Kennart *Najas marina* nicht in die aufgestellten Degradationsreihen einbinden. Andere typische Arten der inneren Küstengewässer Mecklenburg Vorpommerns wie *Zannichellia palustris* bilden keine diagnostische Art einer der 11 Pflanzengemeinschaften, treten aber sehr häufig als Begleitart mehrerer Pflanzengemeinschaften auf, insbesondere der Characeen – *Zostera marina* Pflanzengemeinschaften. Zurzeit lassen sich aus den bisherigen Feld- und Laboruntersuchungen nur wenige Aussagen über die Salz- und Lichttoleranz dieser beiden Arten ableiten. Für andere Arten wurden Untersuchungen bezüglich der Salinitäts- und Lichttoleranz bereits durchgeführt. In KÜSTER (1997) erfolgten dementsprechende Arbeiten an verschiedenen Characeenarten. Da es sich bei dieser Arbeit um Freilanduntersuchungen handelt konnten auch die Salinitätstoleranzen und die minimalen Lichtanforderungen auch nur anhand des Vorkommens abgeleitet werden. Eine Aussage über die potentiell mögliche Verbreitung, wie es mit Ergebnissen

aus Laborversuchen möglich wäre, ließe sich demnach nicht treffen. Aus Laboruntersuchungen sind bereits erste Kenntnisse über die Salztoleranz und Lichtansprüche zu einigen Arten bekannt. YOUSEF (1999) hat z.B. in seiner Arbeit die Arten *Chara baltica* und *Chara canescens* unter verschiedenen Lichtbedingungen (sowohl Quantität als auch Qualität) untersucht. In SCHUBERT et al (2004) und EGGERT (2006) wurden bereits *Myriophyllum spicatum*, *Zostera noltii*, *Ceramium rubrum*, *Ceramium diaphanum* und zum Teil auch *Najas marina* und *Zannichellia palustris* mittels zweifaktorieller Laborversuche untersucht. So konnten für diese Arten bereits einige Ergebnisse bezüglich der Salinitätstoleranz und der minimalen Lichtanforderung aufgezeigt werden. Da aber mit teilweise unterschiedlichen Salz- und Lichtstufen für die einzelnen Arten gearbeitet wurde ist ein direkter Vergleich schwierig. Aus diesen Untersuchungen lassen sich aber die Erkenntnisse ableiten inwieweit sich die Verbreitungsgrenzen der einzelnen Arten voneinander unterscheiden und in welchen Küstengewässern sie gedeihen können. Auch die Tiefenzonierung lässt sich aus den Ergebnissen zumindest im Verhältnis der Arten zueinander ableiten. Die Ergebnisse für die Arten *Najas marina* und *Zannichellia palustris* sind aber anders als die der anderen untersuchten Arten nur lückenhaft vorhanden, da bei ihnen nur mit entweder einer Licht- oder Salzstufe (also mit einfaktoriellen Versuchen) gearbeitet wurde. Trotzdem konnten für diese Arten erste Ergebnisse erzielt werden. So zeigte *Najas marina* bei einer getesteten Salinität von 10 PSU geringere Wachstumsraten (ca. 20 %) als bei 0 und 3 PSU. Auch für *Zannichellia palustris* sind Informationen über die Salztoleranz vorhanden. Bei 3 und 10 PSU weist *Zannichellia palustris* gleiche Wachstumsleistungen auf, während sich bei 20-25 PSU die Wachstumsrate um ca. 90% verringert (SCHUBERT et al. 2004).

Trotz der vorliegenden Ergebnisse ist der Wissensstand über die Salztoleranz und Lichtansprüche der submersen Vegetation noch nicht ausreichend. Insbesondere Untersuchungen mit einem multifaktoriellen Ansatz liegen bisher selten vor (BLÜMEL et al. 2002). Für die submerse Vegetation in den Küstengewässern der Ostsee sind vor allem die Abhängigkeiten von der Lichtintensität bisher noch nicht ausreichend untersucht worden.

Zur Beschreibung des ökologischen Zustandes von Oberflächengewässern wurden durch die EU-Kommission Qualitätsmerkmale definiert, die sich aus biologischen, hydromorphologischen sowie physikalisch-chemischen Qualitätskomponenten zusammensetzen. Zur Umsetzung der Richtlinie müssen in den Mitgliedsstaaten

basierend auf den verschiedenen Qualitätskomponenten Bewertungssysteme entwickelt werden, die in der Lage sind, an Hand einer 5-stufigen Skala den aktuellen ökologischen Zustand des Gewässers zu erfassen (VON WEBER 2002). Im Rahmen der nationalen Umsetzung der WRRL für die Ostseeküstengewässer Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig Holsteins wurden in den letzten Jahren Bewertungskonzepte für die Biologischen Komponenten entwickelt (SCHUBERT et al. 2004, SELIG & SCHORIES 2005, RIELING 2004, u.a.).

Aufgrund dieser Arbeiten liegen die von der EU geforderten Bewertungsansätze vor. Allerdings bedarf es weiterhin Forschungsarbeiten, die neues Wissen über die Wiederansiedlungsmöglichkeiten, die rezente Ausbreitung und auch über die natürlichen Verbreitungsspektren (bezüglich der wesentlichen Umweltfaktoren) einzelner Arten und auch von Pflanzengesellschaften erbringen. Diese Arbeiten sind für die Erstellung von Maßnahmeplänen bis 2009 notwendig (VON WEBER 2002). Es ist folglich ein weiterer wichtiger Schritt in Richtung des guten ökologischen Zustandes der inneren Küstengewässer der deutschen Ostseeküste.

1.3. Zielstellung

Da *Zannichellia palustris* häufig als Begleitart verschiedener Pflanzengemeinschaften der inneren Küstengewässer vorgefunden wurde, scheint diese Art einen großen Toleranzbereich hinsichtlich vieler Umweltfaktoren zu besitzen. *Najas marina* dagegen ist als Kennart der Pflanzengemeinschaft Najadetum marinae F. FUKAREK 1961 (LINDNER, A. 1972) in den inneren Küstengewässern zwar nachgewiesen, jedoch ist nur wenig über ihre Lebensbedingungen bekannt. Möglicherweise kommt sie nur selten in den inneren Küstengewässern der Ostsee vor und hat demzufolge einen eingeschränkten Toleranzbereich gegenüber wenigstens einem Umweltfaktor. Folglich kann *Najas marina* als Zeigerpflanze für diesen Faktor genutzt werden. Falls es sich dabei nur um die Salinität handelt, ist die Benutzung als Zeigerpflanze für den Gewässerzustand jedoch nicht sinnvoll. Eine Einordnung von *Najas marina* als Kennart der Pflanzengesellschaft Najadetum marinae F. FUKAREK 1961 (LINDNER 1972) in die Degradationsreihen konnte allerdings aufgrund der fehlenden Informationen noch nicht vollzogen werden.

Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit wurden die folgenden Aufgaben bearbeitet..

- Untersuchung der Verbreitung von *Najas marina* und *Zannichellia palustris* entlang der deutschen Ostseeküste im Zusammenhang mit den Faktoren Salinität und Lichtverfügbarkeit.
- Untersuchung des Wachstums und der photosynthetischen Eigenschaften von *Najas marina* im saisonalen Verlauf.
- Ökophysiologische Laboruntersuchungen von *Najas marina* und *Zannichellia palustris*. Klärung der Toleranzbereiche bezüglich Salinität und Lichtintensität mittels zweifaktorieller Experimente.

Auch muss geprüft werden, ob die gewonnenen Ergebnisse aus den Laborexperimenten auf das Freiland übertragbar sind. Dies kann durch einen Vergleich der rezenten Ausbreitung der untersuchten Arten mit den Ergebnissen der ökophysiologischen Untersuchungen geschehen.

2. Material und Methoden

2.1. Charakterisierung der untersuchten Arten

Im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit wurden zwei Spermatophyten untersucht: *Najas marina* und *Zannichellia palustris*. Beide Arten lassen sich taxonomisch in die Klasse der Monocotyledonen einordnen (Abb. 3) und aus pflanzensoziologischer Sicht dem Verband Potamogetonion pectinati⁴ KOCH (1926) zuordnen.

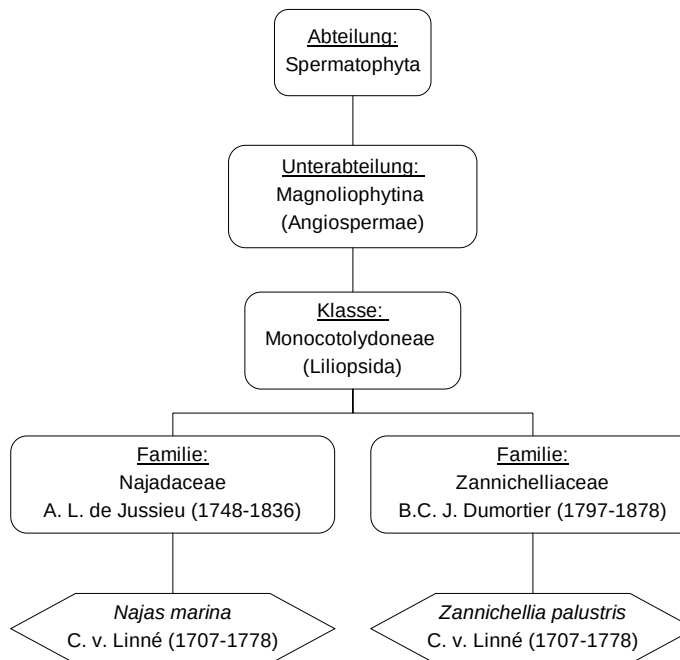


Abb. 3: Systematische Stellung der untersuchten Arten

2.1.1. Kurze Beschreibung von *Najas marina*

Das Große Nixenkraut (*Najas marina* Abb. 4), auch Meeres-Nixenkraut oder Großes Nixkraut genannt, ist eine Unterwasserpflanze und gehört zur Familie der Nixkrautgewächse (Najadaceae). Die Art kommt zirkumpolar in subozeanischen Gebieten der subtropischen und gemäßigten Zonen vor. Dabei besiedelt sie stehende oder langsam fließende mesotrophe Gewässer. Wie alle Nixkrautgewächse gedeiht auch das Große Nixkraut im Süßwasser. Daneben ist es jedoch auch im

⁴ Untergetauchte Laichkraut-Gesellschaft

Brackwasser zu finden. In stärker salzhaltigen Gewässern hingegen, wie z.B. der Nordsee, fehlt das Große Nixkraut. Das Große Nixkraut ist einjährig. Die Wintermonate werden als Samen überdauert (sommerannueller Therophyt).

Die Pflanze wird zwischen 5 und 50 Zentimetern lang und hat starre, zerbrechliche Stängel. Die linealischen, ein bis sechs Millimeter breiten Blätter stehen scheinbar



Abb. 4: *Najas marina*

gegenständig oder scheinquirlich an den Stängeln und sind stachelig gezähnt. Die Stängel und Blattrücken sind meist bestachelt (ROTHMALER et al 1999). Das große Nixkraut ist die Kennart der Assoziation Najadetum marinae F. FUKAREK (1961). Es kommen zwei Unterarten vor: *Najas marina subsp. marina* und *Najas marina subsp. intermedia*. Bei *Najas marina* handelt es sich um eine diözische⁵ Art. Die unter Wasser erscheinenden Blüten sind unauffällig. Die männliche Blüte besteht nur aus einem Staubblatt. Die Bestäubung der Blüten findet unter Wasser statt (Wasserbestäubung). Die Früchte der Pflanzen (Nüsse mit 4 bis 8 mm Länge und 1,5 bis 2,5 mm Breite) werden vor allem mittels Klettausbreitung durch Wasservögel verbreitet. Als weitere Ausbreitungsstrategie nutzt das Große Nixkraut auch die Verdauungsausbreitung. Die Früchte können das Verdauungssystem von Wasservögeln unbeschadet passieren. Zusätzlich zur generativen Vermehrung kann sich *Najas marina* auch vegetativ verbreiten. Dabei bilden sich Wurzeln an den unteren Knoten der Stängel (ROTHMALER et al 1999).

2.1.2. Kurze Beschreibung von *Zannichellia palustris*

Der Sumpf-Teichfaden (*Zannichellia palustris* Abb. 5) ist zirkumpolar in den borealen bis subtropischen Zonen der Nord- und Südhalbkugel verbreitet. Er wächst in meso- bis eutrophen stehenden oder fließenden Gewässern. Er ist salztolerant und kommt daher auch an der Nord- und Ostseeküste vor.

⁵ Diözie: entweder nur m. oder nur w. Blüten auf derselben Pflanze (getrenntgeschlechtlich / zweihäusig)

Der perennierende (mehrjährig ausdauernd) Sumpf-Teichfaden (*Zannichellia palustris*) ist ein submerser (untergetaucht lebend) Hydrophyt aus der Familie der Teichfadengewächse. Die Pflanze wird bis zu 45 cm lang und ist stark verzweigt. Der Stängel wurzelt an den Knoten und ist im oberen Teil flutend. Die linealisch geformten Blätter besitzen am Grund eine offene



Abb. 5: *Zannichellia palustris*

Nebenblattscheide (Axillarstipel), die häufig auch als Ochrea bezeichnet wird. Die fadenförmigen Blätter sind zweizeilig oder fast gegenständig am Stängel angeordnet. Die sehr kleinen Einzelblüten befinden sich stets unter Wasser. Die männlichen Blüten stehen einzeln und weisen oft keine Hülle auf. Sie enthalten ein bis drei verwachsene Staubblätter. Die weiblichen Blüten besitzen ein becherförmiges, glasartiges Perigon, das meist freie Fruchtknoten und schildförmige Narben aufweist. Die geschnäbelten Steinfrüchte befinden sich oft zu zweit oder fünft zusammen und sind kurz gestielt (ROTHMALER et al 1999). *Zannichellia palustris* ist die Kennart der Assoziation Potamogetono - *Zannichellietum palustris*⁶ KOCH (1926) sowie *Ruppium maritima*⁷ LINDNER (1972). Es werden momentan drei Unterarten unterschieden, die sich jedoch sowohl in den Standortbedingungen als auch vegetativ zum Teil sehr schwer auseinander halten lassen. Es handelt sich dabei um *Zannichellia palustris* subsp. *palustris*, *Zannichellia palustris* subsp. *pedicellata* und *Zannichellia palustris* subsp. *polycarpa*. Der Sumpf-Teichfaden ist eine monözische⁸ Pflanze, deren Blüten sich stets unter Wasser befinden. Es erfolgt eine Wasserbestäubung der Blüten und eine Wasserausbreitung der Steinfrüchte. Die Pflanze kann sich auch vegetativ durch Ausläuferbildung oder durch Fragmentation vermehren. Einzelne abgetrennte Abschnitte sind also zum Teil eigenständig überlebensfähig, da die Stängel an den Knoten Wurzeln bilden können (ROTHMALER et al. 1999).

⁶ Sumpfteichfaden - Gesellschaft

⁷ Meersalden - Gesellschaft

⁸ Monözie: sowohl rein m. als auch rein w. Blüten auf derselben Pflanze (einhäusig)

2.2. Datenanalyse zur Verbreitung der untersuchten Arten in den Küstengewässern der deutschen Ostsee

Um die rezente Verbreitung der beiden Arten in den Küstengewässern der deutschen Ostsee (Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein) zu beschreiben, wurden die vorhandenen Felddatensätze aus den Forschungsprojekten der Universität Rostock als auch aus den Überwachungsprogrammen der Länder ausgewertet.

Tab. 2: Abkürzungsverzeichnis der beprobten Gewässer und Zuordnung zu den Messstationen für die (a)biotischen Parameter

Gewässer	Abkürzung	Messstation
Äußere Schlei	AS	S5
Achterwasser	AW	P48
Barther Bodden	BA	DB6
Bodstedter Bodden	BO	DB10
Breetzer Bodden	BR	RB6
Dassower See	DS	-
Flensburger Förde	FF	KFF2
Greifswalder Bodden	GB	GB19
Großer Jasmunder Bodden	GJB	RB9
Grabow	GR	DB2
innere Schlei	IS	S2
Kubitzer Bodden	KB	KB90
Kleines Haff	KH	KHM
mittlere Schlei	MS	S3
Orther Bucht	OB	-
Peenestrom	PS	P42
Saaler Bodden	SB	DB16
Salzhaff	SH	SH2
Strelasund	SS	S66
Untere Trave	UT	Schlutup
Wiecker Bodden	WI	RB2
Wismarbucht	WB	WB3

In Tab. 3 sind die Projekte mit den jeweiligen Untersuchungsgewässern (Abb. 6) und -zeiträumen aufgelistet. Demnach lagen insgesamt 108 Transekte über verschiedene Tiefenstufen für die Kartierungen vor.

Tab. 3: Für die Vegetationsanalyse verwendete Datenbanken mit Projekt- und Gewässerbezeichnung, der Anzahl der untersuchten Transekte und den Untersuchungszeiträumen. Die Zuordnung der Abkürzungen zu den beprobten Gewässern sind in Tab. 2 (S.16) aufgeführt.

Projekt	Gewässer	Transekte	Zeitraum	
			von	bis
ELBO – Universität Rostock Sowie Diplomarbeit von Tim Steinhardt	BA, BO, BR, GB, GJB, PS, SB, SH, WB, WI	36	1999	2003
ÖKOB – Universität Rostock	AW, KH, KW	19	2005	2005
Praxistest der Landesämter – durchgeführt durch MariLim	AS, BA, BO, FF, GB, GR, IS, GJB, KB, MS, OB, PS, SB, SH, SS, UT, WB	40	2004	2005
LAWA- Universität Rostock Sowie Diplomarbeit von MERTENS (2006)	AS, DS, FF, MS, OB, UT	13	2004	2005
gesamt	37	108	2001	2005

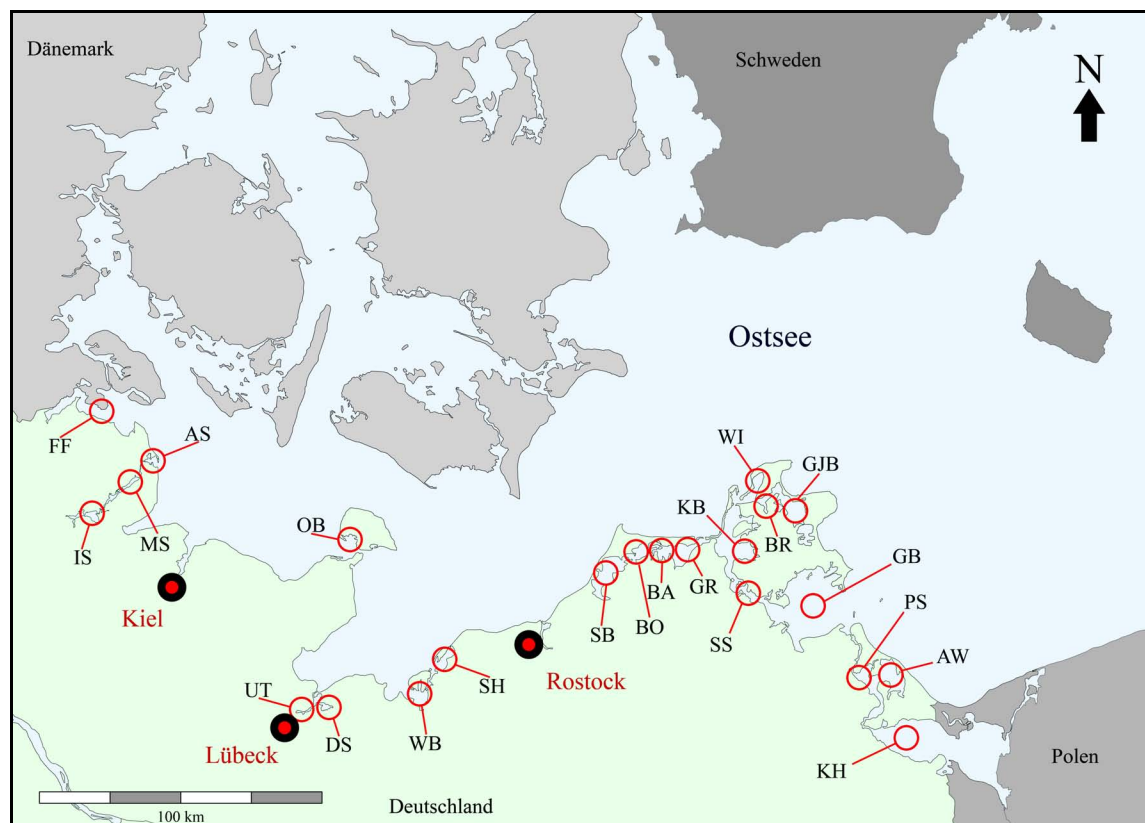


Abb. 6: Beprobte Küstengewässer der deutschen Ostsee. Die zu den Abkürzungen gehörenden Gewässerbezeichnungen sind in Tab. 2 (S.16) aufgelistet.

Während der Beprobungen wurde stets eine einheitliche Beprobungsstrategie nach SCHUBERT et al. (2004) durchgeführt. Dazu wurde die Makrophytenvegetation mittels Transektkartierung in definierten Tiefenstufen (ca.: 0,25; 0,5; 0,75; 1,00; 1,50; 2,00 m sowie jeden weiteren Meter bis zur unteren Verbreitungsgrenze) kartiert. Erfasst wurden

alle submersen sowie unter der Mittelwasserlinie wurzelnden Makrophyten (Chlorophyceae, Charophyceae, Phaeophyceae, Rhodophyceae, Spermatophyta). Im Untersuchungsgebiet wurde ein Transekt vom Ufer bis zur unteren Verbreitungsgrenze gelegt und mittels GPS markiert. Die Anzahl und Größe der Beprobungsflächen variierte leicht innerhalb sowie zwischen den einzelnen Projekten. Die untersuchten Flächen waren dabei aber immer zwischen vier und fünf m² pro Tiefenstufe groß. So wurde z.B. im ELBO Projekt jeweils einmal 4 m² und durch MarLim fünfmal 1 m² pro Tiefenstufe beprobt. Um eine möglichst detaillierte Vorstellung von der Struktur der Vegetation zu bekommen, wurde neben der Gesamtdeckung die Deckung der emersen, submersen, lose im Substrat verankerten, epilithischen, epiphytischen und driftenden Arten sowie das Vorhandensein von Hartsubstrat (Steine) in Prozent der untersuchten Fläche abgeschätzt. Die vorgefundenen Pflanzenarten wurden den einzelnen Kategorien zugeordnet und ihr Anteil an der Gesamtdeckung unter Verwendung der von WILMANNS (1998) auf neun Stufen erweiterten BRAUN-BLANQUET (1964) Skala abgeschätzt (Tab. 4).

Tab. 4: Schätzklassen nach BRAUN-BLANQUET (1951), verändert nach WILMANNS (1993).

Schätzklasse	Deckung
r	1 Exemplar
+	2 – 5 Exemplare
1	< 5 %, weniger als 50 Exemplare
2m	< 5 %, mehr als 50 Exemplare
2a	5 – 15 %
2b	15 – 25 %
3	25 – 50 %
4	50 – 75 %
5	> 75 %

Mit der vorliegenden Beprobungsstrategie wurden alle inneren Küstengewässer von der Flensburger Förde bis zum Oderhaff erfasst. Die Daten wurden in eine einheitliche Datenbank überführt und das Vorkommen beider in der hier vorliegenden Arbeit untersuchter Arten hinsichtlich Salinität und der Tiefenverbreitung dokumentiert. Des Weiteren wurde der Anteil der Deckung der untersuchten Arten an der Gesamtdeckung der beprobten Fläche berechnet und Stetigkeitsklassen zugeordnet. Unter Berücksichtigung der Besonderheiten der Makrophytengemeinschaften der inneren Küstengewässer (Artenarmut, geringer Bedeckungsgrad) wurde dabei von den üblichen Klassengrenzen abgesehen und ein 8-stufiges System (Tab. 5) verwendet (SCHUBERT et al. 2004).

Tab. 5: Einteilung der Stetigkeitsklassen nach dem Anteil der Deckung einer Art an der Gesamtdeckung der beprobten Fläche

Stetigkeits- klasse	Anteil der Deckung einer Art an der Gesamtdeckung [%]
7	> 87
6	> 62
5	> 37
4	> 19
3	> 9
2	> 2
1	> 0,15
0	< 0,15

Neben den Vegetationsaufnahmen wurden außerdem die für diese Arbeit wesentlichen (a)biotischen Parameter aus den Projekten entnommen. Dabei handelte es sich um die Salinität, die Sichttiefe und den Chl *a* -Gehalt. Für jedes untersuchte Gewässer wurde die nächstgelegene Messstation gewählt. Eine Ausnahme stellten dabei die Gewässer Orther Bucht (OB) und Dassower See (DS) dar, da hier keine Messstation und damit auch keine Daten für die (a)biotischen Parameter vorhanden waren. Eine weitere Einschränkung lag für die Untere Trave (UT) vor, da hier ausschließlich die Salinität gemessen wurde. Die den beprobten Gewässern zugeordneten Messstationen sind in Tab. 2 aufgeführt. Es wurden alle vorhandenen Parameter aus den Jahren 2000 bis 2005 mittels der Software SPSS (SPSS Inc., Chicago, Illinois, USA) unter Verwendung der Boxplot-Analyse ausgewertet. Dabei wurden für die Sichttiefe und den Chl *a* -Gehalt nur die Daten aus den Sommermonaten von Mai bis September und für die Salinität alle vorhandenen Daten zur Auswertung herangezogen. Aus den Vegetationsaufnahmen und den zugehörigen (a)biotischen Parametern wurde der Toleranzbereich in Bezug zur Salinität und Lichtintensität für die untersuchten Arten ermittelt.

2.3. Ökophysiologische Untersuchungen

2.3.1. Freilanduntersuchungen an *Najas marina*

Najas marina wurde im Zeitraum vom 13. Juni bis 15. August 2006 dreimal am Standort Preorowstrom (Abb. 7) beprobt. Diesem Standort wurde auch das Pflanzenmaterial für die Laboruntersuchungen hinsichtlich Salz- und Lichtakklimation in Abschnitt 2.3.2 entnommen. Die Pflanzen wurden aus Tiefen von ca. 0,75 m entnommen. Für die Analysen wurden je Beprobung zehn Pflanzen

zufällig aus der Gesamtmenge entnommen. Diese wurden dann in Bezug auf die Wachstums- und Photosyntheseparameter wie in Abschnitt 2.3.3.3 und 2.3.3.4 beschrieben untersucht.

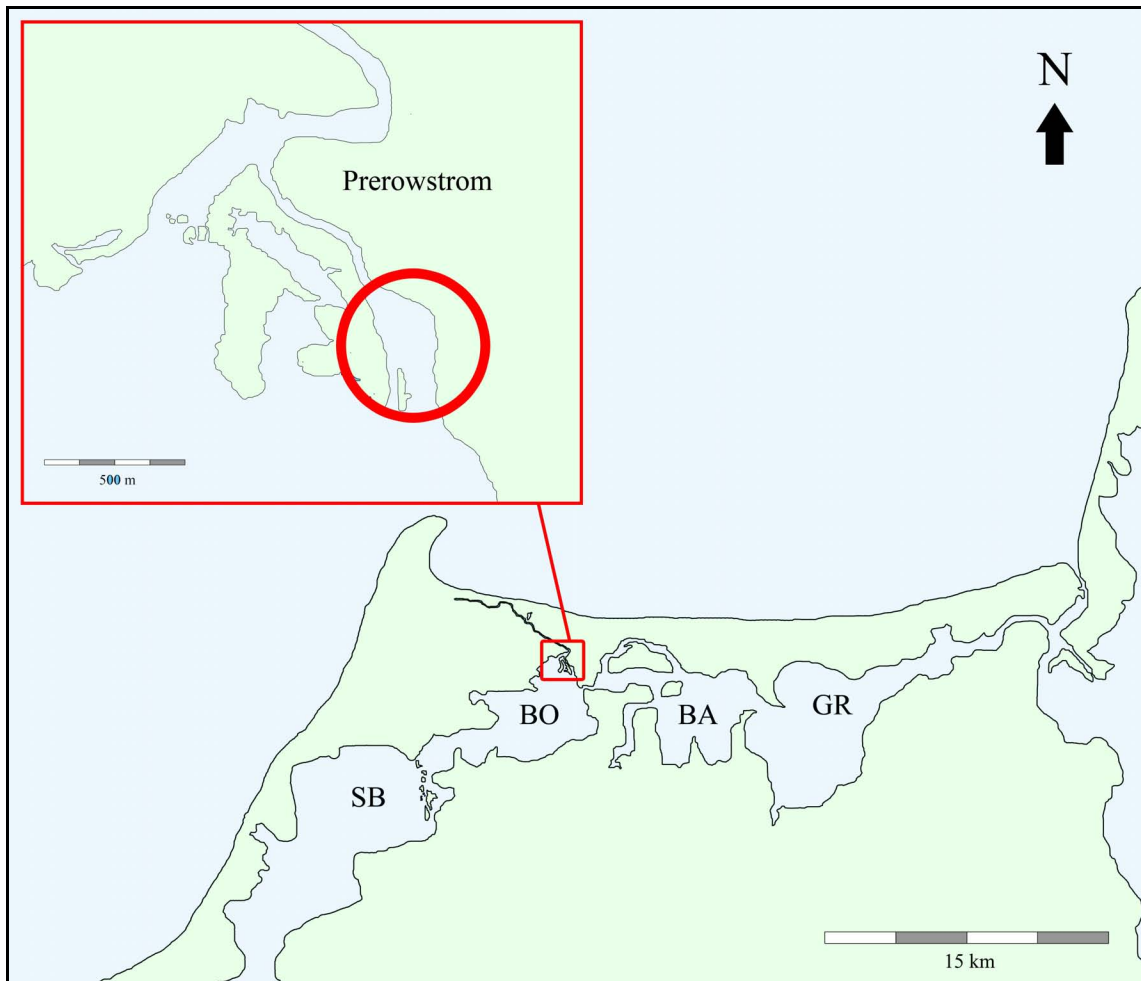


Abb. 7 Entnahmeort (roter Kreis) von *Najas marina* in ca. 0,75 m Tiefe im Bereich des Prerowstroms (Darß – Zingster – Boddenkette)

Um die so ermittelten Parameter in Abhängigkeit zum Unterwasserlichtklima zu betrachten erfolgte neben der Entnahme von Pflanzen aus dem Prerowstrom eine Untersuchung des Unterwasserlichtklimas des Zingster Stroms am 18. Juli an der Meiningenbrücke. Dazu wurden die Lichtintensitäten der globalen photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) parallel zu denen der PAR in verschiedenen Tiefen (ca.: 0; 0,10; 0,20; 0,30; 0,40; 0,50; 0,75; 1,00; 1,20; 1,40; 1,60; 1,80; 2,00 und 2,50 m) aufgezeichnet. Die globalen PAR Werte wurden mit dem Cosinus Sensor und die PAR der Tiefenstufen mit dem 4π Sensor des LI-1000 Datalogger (LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska, USA) gemessen. Aus diesen Daten wurde dann der gewässerspezifische Attenuationskoeffizient (k_{PAR}) mit Hilfe des Lambert-Beerschen Gesetzes durch lineare Regression ermittelt (Gl. 1).

$$E_d = E_{global} \cdot e^{-k_{PAR} \cdot d} \rightarrow \ln\left(\frac{E_d}{E_{global}}\right) = -k_{PAR} \cdot d \rightarrow k_{PAR} = -\frac{\ln\left(\frac{E_d}{E_{global}}\right)}{d}$$

Gl. 1: Umformung des Lambert-Beerschen Gesetzes für die Berechnung des k_{PAR} (d = Tiefe [m])

Da dieser Attenuationskoeffizient jedoch einer gewissen Saisonalität unterliegt und hauptsächlich von Licht absorbierenden Pigmenten abhängt, wurde eine Korrelation zwischen k_{PAR} und Pigmentgehalt ermittelt. Durch Messungen der Konzentration des Chl *a* und Berechnung des k_{PAR} in verschiedenen Gewässern durch SCHOOR et al. (unpubliziert 2001) sowie durch die eigenen Lichtmessungen und der Chl *a* - Konzentrationsmessung der Biologischen Station Zingst konnte eine Korrelationsgleichung ermittelt werden (Gl. 2).

$$k_{PAR} = 0,1223 \cdot \text{Chl } a^{0,7614} \pm \text{Konf.} \quad (\text{Konf.} = 0,6417)$$

Gl. 2: Berechnungsmöglichkeit des k_{PAR} mittels potenzieller Regression und Einbeziehung des Konfidenzintervalles (mit $\alpha = 0,05$)

Neben den eigenen Untersuchungen wurden die Daten der Biologischen Station Zingst in die Auswertung mit einbezogen. Hierfür wurden die Daten des Chl *a* -Gehaltes und der Globalstrahlung vom 1. Juni bis zum 31. August 2006 genutzt.

Mit Hilfe dieser Daten und Methoden konnte das Unterwasserlichtklima innerhalb des Beprobungszeitraumes und für den Beprobungsstandort (Zingster Strom) unter Anwendung von Gl. 1 rekonstruiert werden.

2.3.2. Laboruntersuchungen hinsichtlich der Salz - und Lichtakklimation

Neben den Messungen an Freilandproben von *Najas marina* wurden weitere im Freiland gesammelte Pflanzen von *Najas marina* und *Zannichellia palustris* in einem zweifaktoriellen Ansatz bei verschiedenen Lichtintensitäten und Salinitäten im Labor kultiviert. Für die Durchführung der Versuche wurde ein 100 x 80 cm großes Kunststoffbecken genutzt, in welchem sich jeweils 5

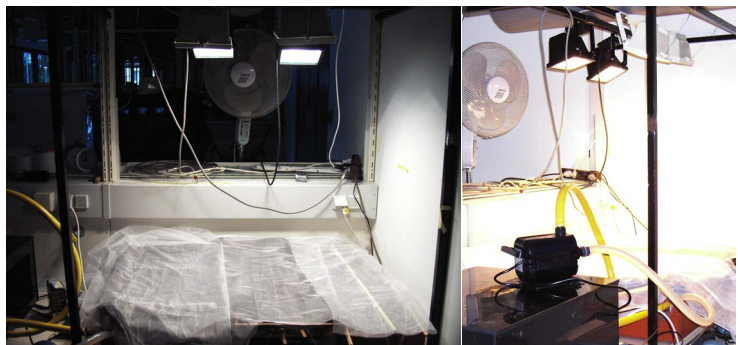


Abb. 8: Versuchsaufbau

Kultivierungsgefäße pro untersuchter Licht- und Salzstufe befanden. Als Licht- und Energiequelle wurden vier Halogenstrahler mit jeweils 500 W verwendet. Montiert wurden sie an einem Eisengestell mit einem Höhenabstand von ca. einem Meter zu den Kultivierungsgefäßen. Mittels diverser Schichten zweier unterschiedlicher Gaze (schwarz und weiß) wurden die Gefäße abgedeckt und so die gewünschten Lichtintensitäten von ca. 10, 55 und 135 μE eingestellt (Abb. 8). Gemessen wurden die Lichtintensitäten mit dem LI-250 (LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska, USA). Für die Lichtstufe mit 10 μE wurden sechs schwarze und zwei weiße, bei 55 μE wurden eine schwarze und vier weiße und bei 135 μE wurden zwei weiße Gazeschichten übereinander gelegt. Die exakte Lichtdosis für jedes Kultivierungsgefäß wurde einmalig am Ende der Versuche ermittelt. Zusätzlich dazu wurden auch noch Spektralmessungen mit dem Cosinus Sensor durch das MACAM SR-9901 (Macam Inc., Livingstone, Schottland) ausgeführt, um den Spektralbereich der verwendeten Halogenlampen zu prüfen und um eventuelle Verzerrungen bzw. Absorptionen von Spektralbereichen durch die Gaze auszuschließen (Abb. 9).

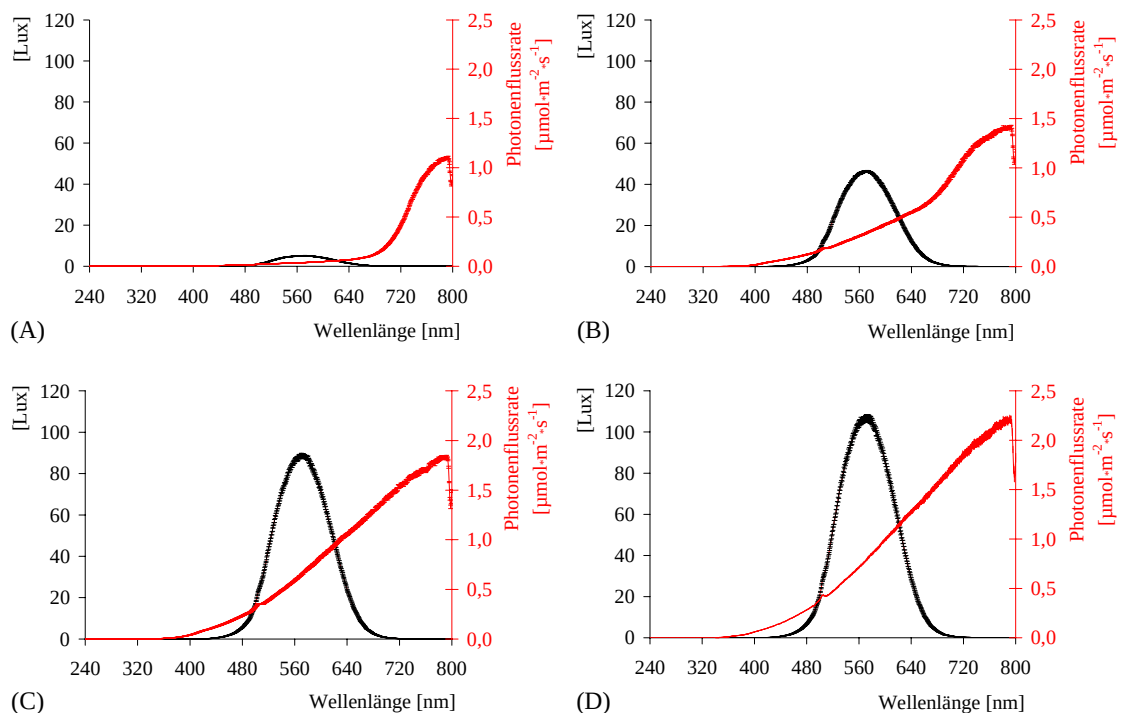


Abb. 9: Messung des sichtbaren Lichtes [Lux] (schwarze Linie) und der Photonenflussrate [$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$] (rote Linie). (A) = niedrigste Lichtstufe; (B) = mittlere Lichtstufe; (C) = höchste Lichtstufe; (D) = ohne Gaze

Als Kultivierungsgefäße für die Versuchspflanzen wurden Bechergläser mit einem Volumen von einem Liter verwendet. Diese wurden mit ca. 200 ml autoklaviertem Sediment befüllt, in das jeweils eine der Versuchspflanzen eingepflanzt wurde

(Abb.10). Die Pflanzen wurden vor dem Einpflanzen in die Kultivierungsgefäße noch mit etwas Papier grob von eventuell vorhandenen Epiphyten befreit. Vor dem Befüllen der Kultivierungsgefäße mit dem Biotopwasser, wurde es durch Filtration über Glasfaser Vorfilter GF92 REF-NO:10421060 (Schleicher & Schuell, Dassel, Deutschland) gereinigt. Um die gewünschten Salinitätsstufen zu erhalten wurde das filtrierte Wasser solange mit hw Meersalz professional (Wiegandt GmbH, Krefeld, Deutschland) versetzt, bis das LF 320 Conductivity Meter (WTW, Weilheim, Deutschland) die gewünschte Salinität anzeigte. Aufgefüllt mit etwa 800 ml des vorher filtrierte und aufgesalzene



Abb.10: befülltes Kultivierungsgefäß

Versuchswassers, wurden sie dann in das 100 x 80 cm große Kunststoffbecken gestellt. Die Eigenschaften der für die einzelnen Versuchsansätze verwendeten Sedimente und des jeweiligen Versuchswassers sind für *Najas marina* in Tab. 8 und für *Zannichellia palustris* in Tab. 9 dargestellt. Die Gewährleistung einer konstanten Temperatur in den Gefäßen erfolgte über einen externen Temperaturregulierungskreislauf. Dazu wurde ein Wasserkreislauf zwischen dem mit Wasser gefüllten Kunststoffbecken und dem Temperaturregulator SK5 (Aqua Medic GmbH, Bissendorf, Deutschland) geschaffen. Als Antrieb für diesen Kreislauf kam die Pumpe Ocean Runner OR3500 (Aqua Medic GmbH, Bissendorf, Deutschland) zum Einsatz. Die Soll-Temperatur wurde auf 20°C eingestellt. Die Belüftung erfolgte mittels diverser Pumpen, die Luft durch Silikonschläuche in die Bechergläser presste. Dies war notwendig um einen anoxischen Zustand in den Bechergläsern zu verhindern (Abb. 11).



Abb. 11: Belüftungsanlage als Element des Versuchsaufbaus

Der Versuch erfolgte über einen Zeitraum von 14 bis 17 Tagen. Am Versuchsende wurden pro Tag die Parameter für die Pflanzen einer Salinitätsstufe gemessen. Dabei wurde nach 14 Tagen mit der niedrigsten Salinitätsstufe begonnen und an jedem weiteren Tag die Pflanzen der nächst höheren Salinitätsstufe zur Messung herangezogen. Die Messungen

begannen innerhalb einer Salinitätsstufe immer bei der höchsten Lichtstufe von 135 μE , gefolgt von 55 μE und endeten mit der niedrigsten Lichtstufe von 10 μE . Es wurde davon ausgegangen, dass es während der 14-tägigen Versuche zu keiner Nährstofflimitation kommt, da das Biotopwasser aus nährstoffreichen Gewässern entnommen wurde. Während des Versuches wurde immer nur der Wasserverlust (aufgrund von Verdunstung) in den Kultivierungsgefäßen mit Biotopwasser aufgefüllt. Allerdings erfolgte bei den Versuchsansätzen eins und zwei mit *Najas marina* nach 8 Tagen ein Wasserwechsel, da aufgrund einer starken Algenentwicklung das Wasser sehr stark getrübt war und die Priorität auf die ausreichende Zufuhr von Lichtenergie gesetzt wurde. Insgesamt wurden drei Versuchsansätze mit *Najas marina* und zwei mit *Zannichellia palustris* durchgeführt. Die Beschreibung der Versuchsbedingungen sind für *Najas marina* in Tab. 6 und Tab. 8 aufgeführt und die für *Zannichellia palustris* in Tab. 7 und Tab. 9. Die Herkunft und Eigenschaften der in den Versuchen verwendeten Sedimente und Wasser sind in Tab. 8 und Tab. 9 beschrieben. Die Parameter für das Biotopwasser wurden durch die Biologische Station Zingst ermittelt. Die Sedimenteigenschaften wurden nach den Methoden in Abschnitt 2.3.3.1 (Seite 26) ermittelt.

Tab. 6: Versuchsdesign der einzelnen Versuche mit den jeweiligen Bedingungen

Versuch:	Najas marina 1	Najas marina 2	Najas marina 3
Versuchsablauf			
Beginn	19.Juni	12.Juli	10.August
Abbruch Start	03.Juli	26.Juli	24.August
Abbruch Ende	03.Juli	29.Juli	27.August
Versuchsbedingungen			
Lichtstärken [μE]	10, 55, 135	10, 55, 135	10, 55, 135
Beleuchtungsdauer [h d^{-1}]	15	15	15
Versuchsdauer [d]	14-17	15-18	14-17
Salzgehalte [PSU]	3, 7, 10, 15	3, 7, 10, 15	1, 3, 10, 15
Pflanzenmaterial			
Entnahmeort	Prerowstrom	Prerowstrom	Prerowstrom
Entnahmedatum	19. Juni	12. Juli	10.August

Tab. 7: Versuchsdesign der einzelnen Versuche mit den jeweiligen Bedingungen

Versuch:	Zannichellia palustris 1	Zannichellia palustris 2
Pflanzenmaterial		
Entnahmeort	Salzhaff	Salzhaff
Entnahmedatum	01.September	21.September
Versuchsablauf		
Beginn	01.September	21.September
Abbruch Start	15.September	05.Oktober
Abbruch Ende	18.September	08.Oktober
Versuchsbedingungen		
Lichtstärken [μE]	10, 55, 135	10, 55, 135
Beleuchtungsdauer [h d^{-1}]	3 Tage:15 danach: 24	15
Versuchsdauer [d]	14-17	14-17
Salzgehalte [PSU]	1, 3, 10, 15	1, 3, 10, 15

Tab. 8: Herkunft und Eigenschaften der für die Versuche verwendeten Sedimente und des benutzten Biotopwassers

Versuch:	Najas marina 1	Najas marina 2	Najas marina 3
Sediment			
Entnahmeort	Salzhaff	Salzhaff	Peenestrom
Entnahmedatum	2. Mai	20. Juni	08.August
mittlere Korngröße [mm]	0,134	0,126	0,178
Sortierungsgrad	1,092	0,972	1,033
TM- Gehalt [% FM]	84,0	79,8	79,4
oTM- Gehalt [% TM]	0,7	0,8	0,3
Kalk-Gehalt [% TM]	0,3	0,4	0,4
Substrattyp	Sand	Sand	Sand
Wasser			
Entnahmeort	Warnow	Warnow	Peenestrom
Entnahmedatum	13.Juni	09.Juli	08.August
PO_4^{3-} [$\mu\text{mol l}^{-1}$]	-	-	0,22
NO_2^- [$\mu\text{mol l}^{-1}$]	-	-	0,22
NO_3^- [$\mu\text{mol l}^{-1}$]	-	-	2,46
NH_4^+ [$\mu\text{mol l}^{-1}$]	-	-	1,11

Tab. 9: Herkunft und Eigenschaften der für die Versuche verwendeten Sedimente und des benutzten Biotopwassers

Versuch:	Zannichellia palustris 1	Zannichellia palustris 2
Sediment		
Entnahmeort	Peenestrom	Peenestrom
Entnahmedatum	08.August	08.August
Mittlere Korngröße [mm]	0,178	0,178
Sortierungsgrad	1,033	1,033
TM- Gehalt [% FM]	79,4	79,4
oTM- Gehalt [% TM]	0,3	0,3
Kalk-Gehalt [% TM]	0,4	0,4
Substrattyp	Sand	Sand
Wasser		
Entnahmeort	Peenestrom	Warnow
Entnahmedatum	22.August	20.September
PO ₄ ³⁻ [μmol l ⁻¹]	1,21	1,41
NO ₂ ⁻ [μmol l ⁻¹]	0	0,29
NO ₃ ⁻ [μmol l ⁻¹]	1,89	32,04
NH ₄ ⁺ [μmol l ⁻¹]	1,21	1,16

2.3.3. Messmethoden

2.3.3.1 Sedimentanalyse

Bestimmung der Korngrößenverteilung

Für die Bestimmung der Korngrößenverteilung wurden ca. 100 g Frischsediment nach Wägung durch Nasssiebung in verschiedene Korngrößenfraktionen (2; 1; 0,8; 0,5; 0,2; 0,1; 0,063 mm) aufgetrennt. Nach der Siebung wurden die einzelnen Siebe mit Alufolie umhüllt und 8 h im Trockenschrank bei 105 °C getrocknet. Parallel dazu wurde der Trockenmasse (TM)-Gehalt der Proben bestimmt (Gl. 3).

$$TM [\%] = 100 \cdot \frac{m_{105} - m_{leer}}{m_{frisch} - m_{leer}}$$

$$oTM [\%] = 100 - 100 \cdot \frac{m_{550} - m_{leer}}{m_{105} - m_{leer}}$$

$$CaCO_3 [\%] = 2,27 \cdot 100 \cdot \frac{m_{550} - m_{900}}{TM}$$

Gl. 3: Physikalisch chemische Analyse von Sedimenten (m₁₀₅ = Masse der befüllten Tiegel nach Trocknung bei 105°C, m₅₅₀ = Masse der befüllten Tiegel nach Verbrennung bei 550°C, m₉₀₀ = Masse der befüllten Tiegel nach Veraschung bei 900°C, m_{leer} = Leergewicht der Tiegel)

Dazu wurde ca. 50 g der Frischmasse gewogen und 8 h bei 105°C getrocknet. Nach dem Abkühlen wurde die TM der Probe sowie jeder Siebfraction bestimmt. Der Anteil der <63 µm-Fraktion wurde aus der Differenz der TM der Einwaage und der Summe der TM der ausgewogenen Siebfractionen bestimmt. Die TM der Einwaage konnte aus der Frischmasse (FM) der Einwaage und dem ermittelten TM-Gehalt berechnet werden. Die <63 µm-Fraktion wurde für die Einteilung der Sedimente als Schlufffraktion definiert. Aus den einzelnen Korngrößenfraktionen wurde dann nach der Formel von SCHLUNGBAUM (1979) die mittlere Korngröße (mKg) errechnet (Gl. 4). Neben der mKg wurde aus den Korngrößenfraktionen der Sortierungsgrad nach der Gl. 5 von SINDOWSKI (1938; in SCHLUNGBAUM (1979)) berechnet. Der Substrattyp wurde nach dem Anteil der Schlufffraktion bestimmt (KOLP, O 1966). Eine Übersicht dazu findet sich in wieder.

$$mKg [mm] = \frac{A \cdot b}{B} + c$$

Gl. 4: Berechnung der mittleren Korngröße (nKg).

A = Betrag der Differenz der beiden Siebgrößen – das Sieb bei dem durch Aufsummieren der Anteile (beginnend mit der geringsten Korngrößenfraktion) der 50%-Anteil überschritten wird und das nächst größere Sieb.

B = Wert der aufsummierten Anteile, bis 50% überschritten sind.

b = 50 – Summe aller Anteile bevor die 50% erreicht sind

c = Siebgröße bei der die aufsummierten Anteile die 50% überschritten

$$\text{Sortierungsgrad} = \frac{3 \cdot H + N - 100}{100}$$

Gl. 5: Berechnung des Sortierungsgrades. H = Anteil der Hauptfraktion; N = Summe der Anteile der Fraktionen, die der Hauptfraktion benachbart sind

Tab. 10: Einteilung der Substrattypen nach dem Anteil der Schlufffraktion (KOLP 1966)

Substrattyp	Anteil der < 0,063 mm [%]
Sand	< 5
Schlickiger Sand	> 5 bis 25
Sandiger Schlick	> 25 bis 45
Schlick	> 45

Chemisch physikalische Analyse der Sedimente

Die Bestimmung des Anteils der TM, organischen TM und des Kalkgehaltes an der FM erfolgte durch Trocknung (8h bei 105 °C), Verbrennung (4h bei 550 °C) und Veraschung (1h bei 900 °C) des Sedimentes nach den Beschreibungen von

SCHLUNGBAUM (1979) und MOTHES (1981). Die verwendeten Formeln sind in Gl. 3 aufgeführt.

2.3.3.2 Pflanzenauswahl

Für die Auswertung der Versuche wurden immer jeweils drei der fünf Pflanzen pro Licht- und Salinitätsstufe für die Messungen herangezogen. Dabei erfolgte die Auswahl anhand optischer Merkmale. Vor allem die Färbung der Pflanzen spielte hier eine Rolle. Die Priorität wurde auf die Pflanzen mit dem höchsten Grünanteil in den Blättern gesetzt. Der zweite Schwerpunkt bezog sich auf die Morphologie der Pflanzen. Bevorzugt wurden hierbei die Pflanzen, welche eine stabile und aufrechte Position im Aufzuchtbehälter einnahmen.

2.3.3.3 Wachstumsparameter

relative Wachstumsrate (RWR)

Die RWR bezieht sich in dieser Arbeit sowohl auf die Biomasse als auch auf die Länge. Für die RWR_{BM} wurden alle Pflanzen am Versuchsanfang und am Versuchsende gewogen. Benutzt wurde hierfür die Waage LA 120S (Sartorius, Göttingen, Deutschland). Um aus den so ermittelten Werten die RWR_{BM} zu berechnen wurde die Formel aus der Gl. 6 verwendet (SCHUBERT et al. 2004).

$$RWR_{BM} \left[\frac{\% FM}{d} \right] = \frac{100\% \cdot \frac{FM_E}{FM_A} - 100\%}{t}$$

Gl. 6: Ermittlung der relativen Wachstumsrate bezogen auf die Änderung der Biomasse.

d = Tag;
FME = Frischmasse am Versuchsende;
FMA = Frischmasse am Versuchsanfang;
t = Versuchsdauer in Tagen

Für die relative Wachstumsrate in Bezug zur Länge (RWR_L) wurden die Sprosse der Pflanzen am Versuchsanfang und am Versuchsende mit einem Lineal (Logarex, ehem. Tschechoslowakai) vermessen. Die Berechnung der RWR_L erfolgte mit Hilfe der Gl. 7.

$$RWR_L \left[\frac{\% l}{d} \right] = \frac{100\% \cdot \frac{l_E}{l_A} - 100\%}{t}$$

Gl. 7: Ermittlung der relativen Wachstumsrate bezogen auf die Änderung der Länge

d = Tag;
l_E = Sprosslänge am Versuchsende;
l_A = Sprosslänge am Versuchsanfang;
t = Versuchsdauer in Tagen

Chlorophyll *a* (Chl *a*)

Die Bestimmung des Chl *a* - Gehaltes der Pflanzen erfolgte nach PORRA, R. J. (1990). Dabei wurde das Stück der Pflanze benutzt, welches für die Messungen der Photosyntheseparameter verwendet wurde. Nach Beendigung der Messungen wurde es in Tubes mit einem Volumen von 15 ml gegeben und mit 3 ml DMF (N,N-Dimethylformamid) versetzt. Nach Inkubation bei mindestens 24 Stunden in Dunkelheit und bei 4°C wurde das Absorptionsspektrum mit Hilfe des Lambda2 UV/VIS Spektrometer (Perkin-Elmer, Überlingen, Deutschland) aufgezeichnet. Um die mit der Gl. 8 ermittelten Konzentration von Chl *a* in der DMF - Extraktionslösung auf eine Konzentration in der Pflanze zu berechnen, wurde die Gl. 9 benutzt. Die Bestimmung des Chl *a* - Gehaltes erfolgte in den Versuchen *Najas marina* 3 sowie in beiden *Zannichellia palustris* Experimenten

$$\text{Chl } a \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{ml}} \right] = 12 \cdot (A_{664} - A_{750}) - 3,11 \cdot (A_{645} - A_{750})$$

Gl. 8: Konzentration von Chl *a* in der DMF - Extraktionslösung

$$\text{Chl } a \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{g}} \right] = \frac{\text{Chl } a \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{ml}} \right] \cdot V [\text{ml}]}{FM [\text{g}]}$$

Gl. 9: Konzentration von Chl *a* in der Pflanze bezogen auf die Frischmasse

Ammonium (NH₄⁺)

Ammoniumionen reagieren in alkalischer Lösung mit Hypochlorit unter Bildung von Monochloramin. Dieses reagiert mit Phenol in Gegenwart eines Hypochlorit Überschusses und unter katalytischer Wirkung von Eisen(III)Ionen (als Nitroprussid) und bewirkt eine Blaufärbung (Indophenolblau) der Lösung. Das Hypochlorit entsteht durch Hydrolyse von Trichlor(1,3,5)triazintron auch Trion genannt (SOLORZANO 1969). Die Eichung erfolgte nach den Versuchsvorschriften von ROHDE & NEHRING (1979) und wurde nach DIN 38406 E5-1 modifiziert. Der aus dieser Eichung ermittelte Faktor wurde für die Berechnung der NH₄⁺ - Konzentration durch die Gl. 10 benötigt. Für die Bestimmung der NH₄⁺ - Konzentration des Probenwassers erfolgte photometrisch mittels Lambda2 UV/VIS Spektrometer (Perkin-Elmer, Überlingen, Deutschland). Das Probenwasser wurde vorher über Glasfaser Vorfilter GF 92 (Schleicher & Schuell, Dassel, Deutschland) filtriert und 17,5 ml davon in ein Reagenzglas gefüllt. Danach

wurde es mit 0,5 ml Phenol und 0,5 ml Trion versetzt und für ca. 20 Stunden dunkel inkubiert. Parallel dazu wurden noch zwei weitere Ansätze für die Blindwertbestimmung gemacht. Dazu wurde destilliertes Wasser (ebenfalls 17,5 ml) einmal (BW1) mit jeweils 0,5 ml Phenol und Trion und beim zweiten Ansatz (BW2) mit jeweils 1,0 ml Phenol und Trion versetzt. Anschließend erfolgte die photometrische Messung (bei 630 nm) der Reagenzienblindwerte, der Trübung und der Probe. Aus den gemessenen Extinktionen lässt sich nach Gl. 10 die NH_4^+ -Konzentration berechnen.

$$c_{\text{NH}_4^+} \left[\frac{\text{mol}}{\text{l}} \right] = \frac{E_{\text{Probe}} - E_{\text{Trübung}} - (E_{\text{BW2}} - E_{\text{BW1}})}{F_{\text{NH}_4^+}}$$

Gl. 10: Berechnung der NH_4^+ -Konzentration. (mit E = Extinktion und F = Eichungsfaktor)

2.3.3.4 Photosyntheseparameter

Am Versuchsende, also nach 14-17 Tagen Kultivierung bei den jeweiligen Salinitäten und Lichtintensitäten, wurde die Photosyntheseleistung mittels O_2 -Polarographie bestimmt. Dazu wurde die Änderung der Konzentration von O_2 im Wasser als Reaktion der Belichtung der Probe gemessen (SCHUBERT et al. 2004).

Für die Ermittlung der Photosyntheseparameter wurde je Probe ein Stück von der Spitze der zu analysierenden Pflanze entnommen und dessen Frischmasse (FM) mit der Waage LA 120S (Sartorius AG, Göttingen, Deutschland) bestimmt. Im Anschluss wurde dieses Stück in eine Küvette, mit einem Volumen von 4,25 ml, gelegt und mit einem weitmaschigen Gitter aus Kunststoff fixiert. Die so präparierte Küvette wurde an einem Messblock (Illuminova, Uppsala, Schweden) befestigt. Dieser enthielt Instrumente zur Bestimmung des pH-Wertes, der verbleibenden Lichtintensität⁹ und der Temperatur. Außerdem enthielt er einen Steckplatz für die Sauerstoffelektrode vom Typ Clark, mit der die Änderung des Sauerstoffpotentials gemessen wurde. Des Weiteren enthielt der Messblock einen Platz für den magnetisch betriebenen Rührer (Agitator) und Anschlüsse für die Temperaturregulierung mittels Kreislauanlage. Die Temperatur innerhalb der Kreislauanlage wurde auf 20°C eingestellt und mit einem Flüssigkeits-Glasthermometer nach TGL 11996 (ehem. DDR) auf Korrektheit überprüft. Für die Kühlung sorgte der Kryostat Haake G bzw Haake K15 (Thermo Fisher Scientific, Inc., Waltham, Massachusetts, USA) und für das Erhitzen wurde der Thermostat Tempette Junior TE-8J (Eijkelkamp Agrisearch Equipment, Gleebeek, Niederlande)

⁹ die Daten der Messung des pH und der Lichtintensität durch die Sensoren im Messblock wurden nicht benötigt

benutzt. Dadurch wurde die Konstanz der Temperatur in der Küvette gewährleistet. Ein Teil des Probenwassers wurde über Glasfaser Vorfilter GF 92 (Schleicher & Schuell, Dassel, Deutschland) filtriert. Das so behandelte Medium wurde zur Befüllung der Küvette verwendet. Der elektromagnetisch angetriebene Rührer sorgte bei einer Geschwindigkeit von 23 Umdrehungen pro Minute für eine gleichmäßige Verteilung des Sauerstoffs im Medium. Um die Photosyntheseleistung in Abhängigkeit der Lichtintensität berechnen zu können musste noch eine Lichtquelle mit definierbaren Lichtintensitäten, für die Bestrahlung der Pflanzenteile in der Küvette, mit dem Messblock verbunden werden. Hierfür wurde der mit Halogenleuchtmittel bestückte Light Dispenser MK2 (Illuminova, Uppsala, Schweden) verwendet. Die Steuerung und Regelung der Komponenten sowie die Datenaufnahme erfolgte über die Software Camp4a¹⁰ von Illuminova (Uppsala, Schweden) mittels der Command Unit MK2. Die Einstellung der für die Messung zu verwendeten Lichtintensitäten erfolgte über die Datei pfcontr.prn (Bestandteil von Camp4a). Dabei wurden die in der Datei enthaltenen Spannungsstärken an das gewünschte Messprogramm angepasst (Tab. 11). Die Lichtintensitäten wurden mit dem Model LI-250 Light Meter (LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska, USA) ermittelt.

Eine Kalibrierung der Clarkelektrode erfolgte am Beginn eines jeden Messtages. Dazu wurde die Küvette bis zur Hälfte mit Wasser gefüllt, wodurch sich die Clarkelektrode in mit Wasser gesättigter Luft befand. Sobald die Elektrode konstant blieb wurde am Spannungsmessgerät das Stellrad für den 100% - Wert gedreht bis die Anzeige am PC einen Sauerstoffgehalt von möglichst 100% anzeigte. Für die folgende 0% Eichung wurde die Küvette mit einer Lösung, welche Natriumdithionid enthielt, befüllt um ein Medium mit 0% Sauerstoffanteil zu erhalten. Sobald die Elektrode konstant blieb wurde am Spannungsmessgerät das Stellrad für den 0% - Wert gedreht bis die Anzeige am PC einen Sauerstoffgehalt von 0% anzeigte. Danach folgte wiederum eine Messung bei 100% Sauerstoffsättigung allerdings ohne die Stellräder zu betätigen. Der angezeigte Gehalt an Sauerstoff diente als Startwert für den ersten Messdurchlauf und für die Ermittlung der Drift der Elektrode. Ein Messdurchlauf dauerte 40 min. Im Anschluss eines jeden Messdurchlaufes folgte ein 10-minütiger Durchgang mit 100% gesättigtem Medium, analog zum zweiten Kalibrierungsdurchlauf mit 100% Sauerstoffgehalt. Der dabei erhaltene Wert für den Sauerstoffgehalt fungierte sowohl als Endwert des

¹⁰ basierend auf der Software: Labtech Notebook professional

vorherigen als auch als Startwert des folgenden Messdurchlaufes. Aus dem Start- und Endwert einer Messung ließ sich die Drift der Elektrode ermitteln.

Die Berechnungen der Photosyntheseparameter beziehen sich auf den Anteil an Chl *a*. Bei den Versuchen eins und zwei von *Najas marina* dagegen beruhen diese Berechnungen auf die verwendete FM.

Tab. 11: Einstellungen der Datei pfcontr.prn, die für die Steuerung der Lichtintensitäten verantwortlich ist

Zeilen	Spannungsstärke [V]	Zeitabschnitte [s]	Lichtintensität [μE]	Dauer [min]
0 – 1500	0,00	0 - 600	0,00	10
1501 - 1950	0,04	601 - 780	15,25	3
1951 - 2400	0,05	781 - 960	24,74	3
2401 - 2850	0,08	961 - 1140	39,20	3
2851 - 3300	0,25	1141 - 1320	132,75	3
3301 - 3750	1,18	1321 - 1500	635,00	3
3751 - 4200	2,19	1501 - 1680	1155,00	3
4201 - 4650	3,48	1681 - 1860	1830,00	3
4651 - 5100	4,30	1861 - 2040	2260,00	3
5101 - 5550	5,00	2041 - 2220	2680,00	3
5551 - 6000	0,00	2221 - 2400	0,00	3

Aus den O_2 -Konzentrationsänderungen wurden unter Kenntnis der eingesetzten Chl *a*-Konzentration, der Temperatur, der Salinität und unter Verwendung der Lichtstufen die so genannten PE - Kurven¹¹ ermittelt. Aus diesen wurden analog zu der von WALSBY (1997) publizierten Methode folgende PE - Parameter berechnet:

Die maximale Photosyntheserate ($P_{\max}$)

$P_{\max}$ lässt sich aus der Differenz der maximalen Nettophotosyntheserate $P_{m(\text{netto})}$ und der Respiration (Resp) bestimmen. Die Resp ist die gemessene Änderung der O_2 -Konzentration unter der Bedingung, dass kein Licht an die Probe gelangt. Die $P_{m(\text{netto})}$ wurde durch die Gl. 11 ermittelt.

$$P_{m(\text{netto})} \left[\frac{\text{mmol}(\text{O}_2)}{h \cdot g(\text{Chl } a)} \right] = P_{m(\text{pot})} + \text{Re sp.} + P_{m(\text{pot})} \cdot \frac{\beta}{\alpha} \cdot \left(1 - \ln \left(-\frac{\beta}{\alpha} \right) \right)$$

Gl. 11: maximale Nettophotosyntheserate

Die Quantenausbeute unter Lichtlimitation (α), der Inhibitionsfaktor (β) und die potentielle maximale Photosyntheserate ($P_{m(\text{pot})}$)

Diese drei Parameter wurden mittels des Solvers in Excel (Microsoft Corporation, Redmond, Washington, USA) bestimmt. Aus der PE-Kurve (Gl. 12) und den

¹¹ P = Nettophotosyntheserate; E = Lichtintensität

gemessenen Nettophotosyntheseraten (P_{netto}) wurden die Abweichungsquadrate gebildet. Diese wurden dann mittels Iteration der drei Parameter (α , β , $P_{m(\text{pot})}$) minimiert, so dass die PE-Kurve möglichst nahe an den gemessenen P_{netto} lag.

$$P_{\text{netto}} \left[\frac{\text{mmol}(O_2)}{h \cdot g(\text{Chl } a)} \right] = P_{m(\text{pot})} \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{\alpha \cdot E}{P_{m(\text{pot})}} \right)} \right) + \beta \cdot E + \text{Resp.}$$

Gl. 12: Berechnung der PE-Kurve

Der Lichtsättigungspunkt (E_k)

E_k ist der Quotient aus P_{max} und α . $E_k = \frac{P_{\text{max}}}{\alpha}$

Der Lichtkompensationspunkt (E_c)

Da E_c die Lichtintensität ist, bei der $P_{\text{netto}} = 0$ ist, wurde E_c durch Null setzen der Gl. 12 berechnet.

Status der Lichtakklimatisation und Berechnung der unteren Verbreitungsgrenze

Der E_k - Wert wird als Indikator des Photoakklimatisationsstatus genutzt. Um den artspezifischen, minimalen E_k - Wert (E_{min}) zu ermitteln, wurde der Quotient E_k/E gegen E aufgetragen und sein Verlauf unter Anwendung der potenziellen Regression (Gl. 13) ermittelt. Der artspezifische E_{min} - Wert ist die Lichtintensität für die $E_k/E = 1$ ist. Da die Werte jedoch um die Regressionskurve gestreut waren, wurden die Konfidenzintervalle berechnet. Dies geschah durch logarithmisches Transformieren der Werte in eine lineare Form, Berechnung der Konfidenzintervalle und Rücktransformierung. Als Ergebnis lag dann ein E_{min} -Bereich vor, der den E_{min} -Wert $\pm$ der Konfidenzintervalle umfasste.

$$\frac{E_k}{E} = a \cdot E^b \quad E_{\text{min}} = \sqrt[b]{\frac{1}{a}}$$

Gl. 13: Ermittlung der E_{min} - Bereiche durch Umformung der Lambert – Beerschen Gleichung
 a , b = artspezifische Konstanten, durch potenzielle Regression berechnet

Zur Veranschaulichung der Auswirkungen von E sowie von E_k auf die O_2 -Produktion wurde diese durch Einsetzen der für jede Pflanze gemessenen Kultivierungslichtintensität in die Gl. 12 berechnet. Aus diesen Werten ergibt sich dann wiederum eine auf E basierende PE-Kurve bzw. eine auf E_k bezogene PE_k-Kurve.

Des Weiteren ist es mithilfe der artspezifischen $E_{\min}$ -Bereiche möglich, die theoretischen unteren Verbreitungsgrenzen (uVg) der Arten in den Gewässern nach dem „pristinen Lichtmodell“ zu berechnen (DOMIN et al. 2004). Dafür wurden die jahreszeitlich abhängigen Globalstrahlungs-Tagesdosen, die zeitlich variablen gewässerspezifischen Attenuationskoeffizienten und die artspezifische minimale Tageslichtdosis benötigt. Die artspezifische minimale Tageslichtdosis wurde mit einer anderen als der in DOMIN (2004) benutzten Methode berechnet. Sie wurde in dieser Arbeit aus dem artspezifischen $E_{\min}$ ($\pm$ Konf.) und der täglichen Bestrahlungsdauer (15h) während des Versuches ermittelt, da es mir als sinnvoller erschien die tatsächlichen Bedingungen in die Berechnung einfließen zu lassen. Um von der Dosis der Globalstrahlung (W m^{-2}) die Dosis der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR in $\mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$) zu ermitteln, wurde ein Umwandlungsfaktor verwendet. Dieser Umwandlungsfaktor entstand 1997 durch SCHUBERT et al. (unpubliziert) mittels stündlicher Parallelmessungen der Globalstrahlung und der PAR. Er ist der Anstieg der linearen Regression ($PAR = 8717,4 \cdot \text{Globalstrahlung}$) der gegeneinander aufgetragenen Wertepaare (mit x, y = Globalstrahlung, PAR). Da sich dieser Faktor auf stündlich gemittelte Werte bezieht, mussten auch die Globalstrahlungsdaten der biologischen Station Zingst stündlich gemittelt werden. Das Ergebnis dieser Berechnung erbrachte die benötigten Globalstrahlungsdosen (PAR_{global}). Die Berechnung der k_{PAR} – Werte erfolgte analog der in Abschnitt 2.3.1 aufgezeigten Methode. Aus diesen drei Parametern wurde dann die Tiefe der uVg nach berechnet.

$$uVg [m] = \frac{\ln(PAR_{\text{global}}) - \ln\left(\frac{E_{\min} \cdot 3600 \cdot 15h}{1000000}\right)}{k_{\text{PAR}}}$$

Gl. 14: Berechnung der unteren Verbreitungsgrenze (uVg) abgewandelt nach DOMIN et al. (2004) Für diese Berechnung werden die globale Strahlendosis im Bereich Spektralbereich der PAR (PAR_{global} [$\mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{d}^{-1}$]), die artspezifischen minimalen Lichtansprüche ($E_{\min}$ [μE]) und der gewässerspezifische Lichtattenuationskoeffizient für den Spektralbereich der PAR (k_{PAR})

2.3.4. Statistische Überprüfung der Ergebnisse

Um die Ergebnisse auf Signifikanz zu testen, wurde eine zweifache Varianzanalyse für zweifaktorielle Experimente nach Modell I mit Wechselwirkungen (RASCH 1987 S.172 ff) durchgeführt. Es wurde für jeden ermittelten Parameter ein F-Test durchgeführt. Dabei waren die abhängigen Variablen zum einen die Lichtstufe, die Salinitätsstufe und die Kombination von Licht- und Salinitätsstufe. Zum Abschluss wurden die so

ermittelten Ergebnisse noch mit Hilfe eines Testverfahrens¹² der Statistiksoftware SPSS (SPSS Inc., Chicago, Illinois, USA) auf Signifikanz (mit $\alpha = 0,05$ - Sidak) überprüft.

¹² Tukey Post Hoc Test

3. Ergebnisse

3.1. Datenanalyse zur Verbreitung der untersuchten Arten in den Küstengewässern der deutschen Ostsee

3.1.1. Charakterisierung der Untersuchungsgewässer anhand von (a)biotischen Parametern

Die Salinität ist ein entscheidender abiotischer Parameter für alle Organismen in den Küstengewässern. In den verschiedenen Küstengewässern sind unterschiedliche Salinitäten mit zum Teil starken Schwankungen vorhanden (Abb. 12 – A). Dabei ist eine Abnahme der Salinität von den westlichen in Richtung der östlichen Küstengebiete zu erkennen. So beträgt die Salinität der Flensburger Förde im Median etwa 19 PSU, während sie im Kleinen Haff im Median bei etwa 1 PSU liegt. Neben diesem Gradienten gibt es noch einen weiteren, der eine Zunahme der Salinität vom Landesinneren in Richtung Ostsee zeigt. So steigt z. B. die Salinität von ca. 7 PSU in der inneren Schlei (IS) auf ca. 14 PSU im Bereich der äußeren Schlei (AS) (Abb. 12 – A). Die Sichttiefen reichen in den untersuchten Gewässern im Mittel von ca. 0,25 m im Saaler und Barther Bodden (SB, BA) bis zu 4,35 m im Salzhaff (SH) (Abb. 12 – B). Im Vergleich mit den Salinitäten zeigt sich eine fast proportionale Übereinstimmung. Bei hohen Salinitäten sind auch die Sichttiefen hoch und umgekehrt sind bei niedrigen Salinitäten die Sichttiefen gering. Dabei sind vor allem in den exponierten Gewässern hohe Schwankungen - zum Teil von mehr als einem Meter - zu beobachten. Die Unterschiede im Chl *a*-Gehalt sind zwischen den untersuchten Gewässern zum Teil sehr groß (Abb. 12 – C). Am niedrigsten ist die mediane Chl *a* -Konzentration mit ca. 2 µg l⁻¹ im Salzhaff. Die höchste mediane Chl *a*-Konzentration von 112 µg l⁻¹ wurde dagegen im Grabow gemessen. Die Chl *a*-Konzentration verhält sich umgekehrt proportional zu Sichttiefe und Salinität.

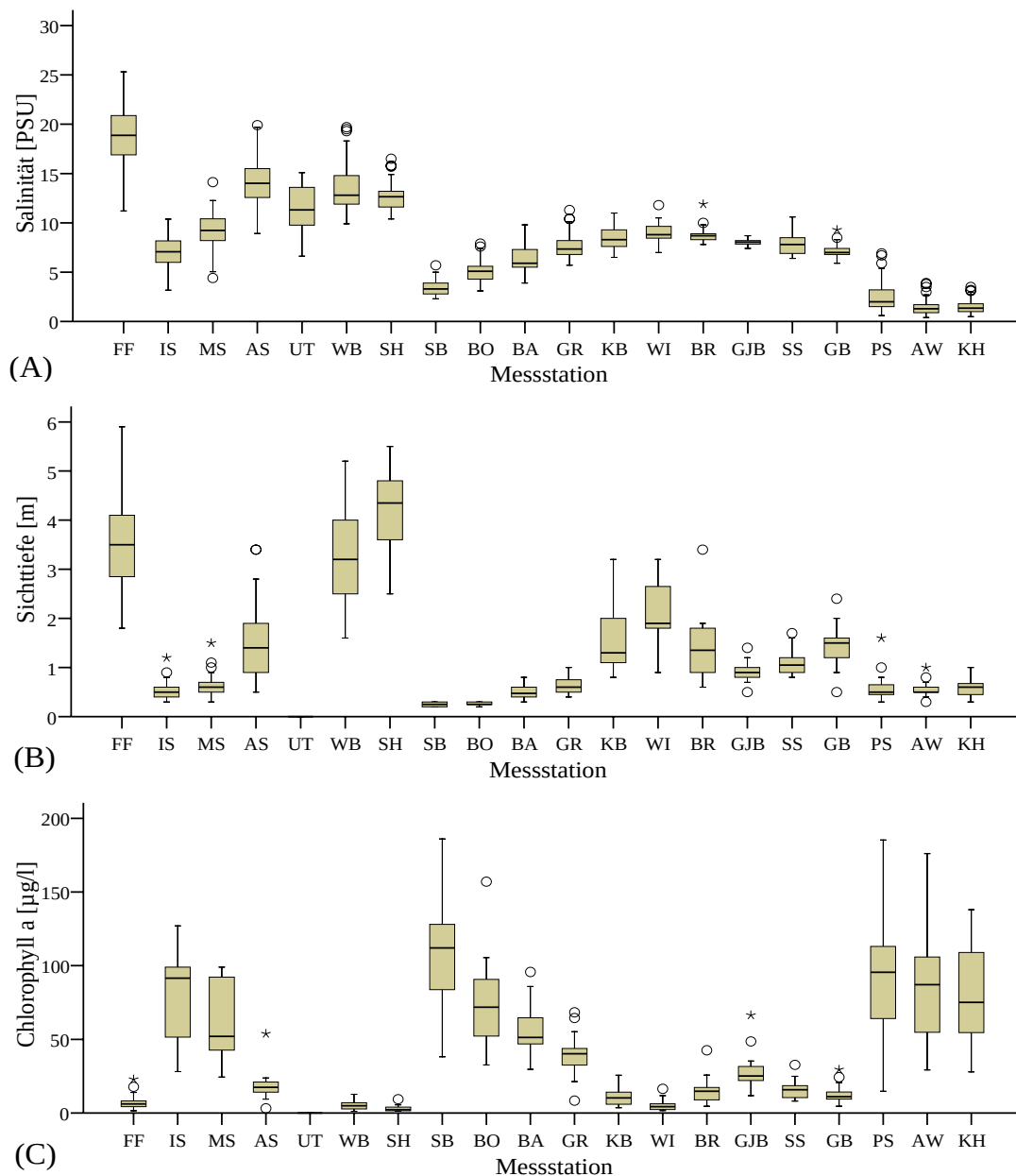


Abb. 12: Salinität (A), Sichttiefe (B) und Chl *a* Gehalt (C) der untersuchten Küstengewässer (Interquartilbereiche (25 bis 75 Perzentilwerte) = gelbe Box, Median = horizontale schwarze Linie; Standardabweichung = senkrechte schwarze Linien; Ausreißer = Kreise; Extremwerte = Sterne) – Abkürzung der Gewässer siehe Tab. 2 in Abschnitt 2.2 auf S.16

3.1.2. Verbreitung von *Najas marina* und *Zannichellia palustris*

Die rezenten Nachweise von *Najas marina* und *Zannichellia palustris* sind für die Küstengewässer Deutschlands in Abb. 13 dargestellt. Daraus geht eine unterschiedliche Verbreitung der beiden Arten hervor. So ist *Zannichellia palustris* über den gesamten Küstenbereich vorzufinden, während das Vorkommen von *Najas marina* auf die Darß – Zingster – Boddenkette und auf den Greifswalder Bodden beschränkt ist.

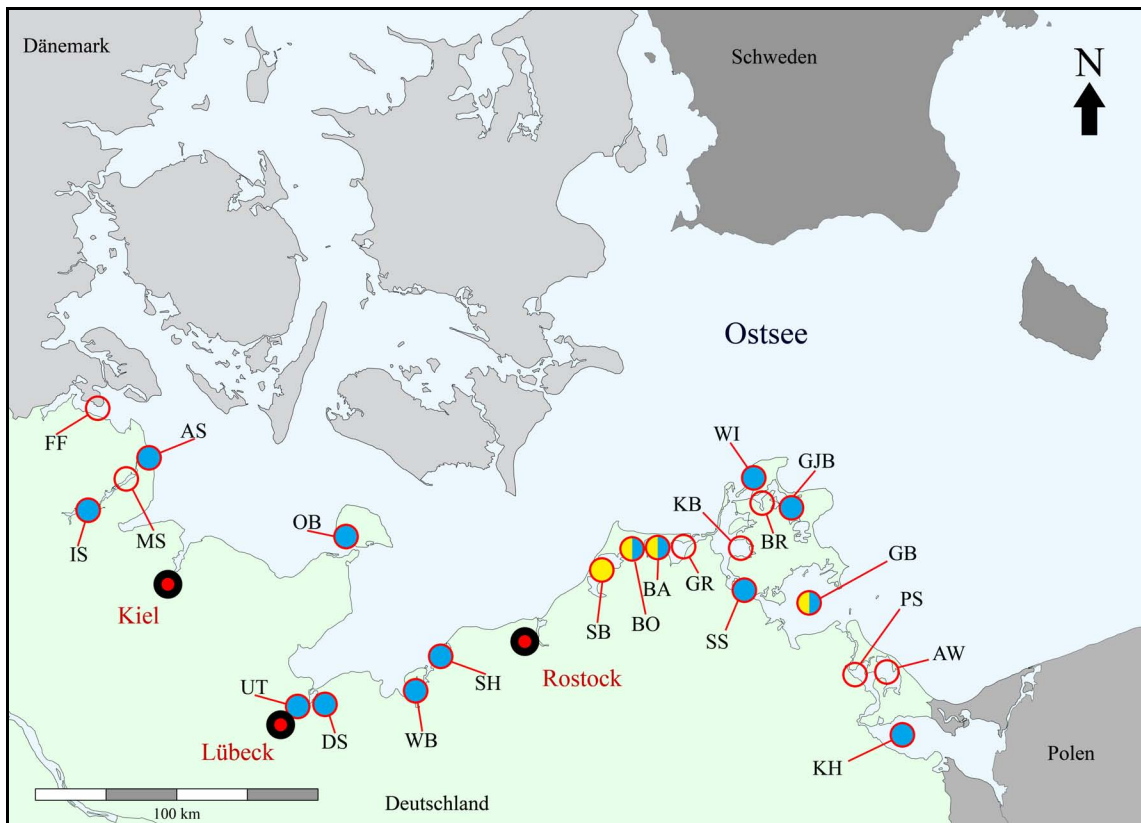


Abb. 13: Rezente Nachweise von *Najas marina* und *Zannichellia palustris* in den Küstengewässern Mecklenburg-Vorpommerns und Schleswig-Holsteins auf Grundlage der Daten aus den in Tab. 3 auf S.17 aufgeführten Beprobungen. (blau = *Zannichellia palustris*; gelb = *Najas marina*; leere Kreise = kein nachgewiesenes Vorkommen der beiden Arten). – Abkürzung der Gewässer siehe Tab. 2 in Abschnitt 2.2 auf S.16

Zannichellia palustris hat nicht nur ein breites Verteilungsspektrum entlang der deutschen Ostseeküste sondern auch über die Gewässertiefen. So kommt sie von den flachsten untersuchten Flächen mit einer Tiefe von 0,25 m bis zu einer Tiefe von 4 m vor. Die tiefsten Untersuchungsflächen wurden im Salzhaff (SH) beprobt und befanden sich bis zu 5 m unter der Wasseroberfläche. In 14 der 22 untersuchten Küstengewässer konnte *Zannichellia palustris* nachgewiesen werden. Ihr Anteil an der Gesamtdeckung reichte von 0,1 % im Salzhaff (SH) bis 19,6 % in der Orther Bucht (OB), was laut Tab. 5 (S.19) den Stetigkeiten von 0 bis 4 entspricht. *Najas marina* wurde dagegen nur in vier der 22 Gewässer nachgewiesen. Die Tiefenverbreitung reichte dabei nur von 0,25 bis 1 m. Der Anteil an der Gesamtdeckung lag im Bereich von etwas mehr als 0 % im Greifswalder Bodden (GB) bis 14 % im Saaler Bodden (SB), was den Stetigkeiten 0 bis 3 entspricht. Eine genaue Auflistung der Daten ist in Tab. 12 für die Gewässer Mecklenburg-Vorpommerns und in Tab. 13 für die Gewässer Schleswig Holsteins gegeben. Außer den Tiefenverbreitungen und den Deckungsdaten sind hier zusätzlich noch die Größen der insgesamt pro Gewässer beprobten Flächen aufgeführt.

Tab. 12: Rezente Nachweise von *Najas marina* und *Zannichellia palustris* in den untersuchten Gewässern Mecklenburg-Vorpommerns (uVg = untere Vegetationsgrenze; Dg = mittlere Gesamtdeckung je Gewässer; D = mittlerer Anteil der Deckung der Art an der Gesamtdeckung aller beprobten Flächen je Gewässer; Vg = Verbreitungsgrenze; S = Stetigkeit; „>“ = Vg bzw. uVg wird in der maximal beprobten Tiefe nicht erreicht; - = kein Vorkommen bzw. Nachweis der jeweiligen Art)

Projekt	Gewässer	Jahr	Fläche [m ²]	gesamt		Zannichellia palustris				Najas marina			
				uVg[m]	D[%]	Vg [m]		D [%]	St	Vg [m]		D [%]	St
						von	bis			von	bis		
Ökobe	AW	2005	29	1	32,5	-	-	-	-	-	-	-	-
ELBO	BA	2001	128	1,5	40,3	0,25	1	4,5	2	0,75	0,75	0,2	1
ELBO	BA	2002	160	1	79,9	-	-	-	-	0,75	0,75	12,5	3
ELBO	BA	2003	24	0,65	62,5	-	-	-	-	0,5	0,5	0,2	1
MariLim	BA	2004	144	1	44,8	-	-	-	-	0,5	0,75	1,5	1
MariLim	BA	2005	95	1	55,8	-	-	-	-	0,5	0,75	1,4	1
ELBO	BO	2001	92	1	28,4	-	-	-	-	0,25	1	8,3	2
ELBO	BO	2002	36	1,5	40,0	-	-	-	-	0,25	0,25	9,7	3
ELBO	BO	2003	68	0,5	33,6	0,25	0,5	1,3	1	0,25	0,5	1,9	1
MariLim	BO	2004	144	0,75	46,1	-	-	-	-	0,5	0,75	4,5	2
MariLim	BO	2005	75	0,75	59,4	-	-	-	-	0,5	0,75	4,4	2
MariLim	BR	2004	228	>2	81,6	-	-	-	-	-	-	-	-
MariLim	GR	2005	60	2	53,2	-	-	-	-	-	-	-	-
ELBO	GB	2001	124	>2	41,5	0,5	1	6,8	2	0,25	0,25	0,0	0
ELBO	GB	2002	80	>1,5	68,8	0,25	>1,5	7,7	2	-	-	-	-
MariLim	GB	2004	372	3	78,2	1	1,5	0,5	1	-	-	-	-
MariLim	GB	2005	145	4	71,0	0,5	3	10,6	3	-	-	-	-
ELBO	GJB	2001	236	>2	51,3	0,5	0,5	0,8	1	-	-	-	-
ELBO	GJB	2002	68	1	37,7	-	-	-	-	-	-	-	-
MariLim	GJB	2004	120	1	60,7	0,25	0,5	1,0	1	-	-	-	-
Ökobe	KH	2005	74	>2,5	33,8	0,5	1,5	1,0	1	-	-	-	-
MariLim	KB	2005	65	>3	81,0	-	-	-	-	-	-	-	-
ELBO	PS	2001	36	0,5	13,6	-	-	-	-	-	-	-	-
MariLim	PS	2004	80	0,75	9,5	-	-	-	-	-	-	-	-
Ökobe	PS	2005	72	>1,5	48,3	-	-	-	-	-	-	-	-
ELBO	SB	2001	76	1	34,2	-	-	-	-	0,5	1	24,4	4
ELBO	SB	2002	76	1	24,0	-	-	-	-	0,3	0,75	9,0	3
MariLim	SB	2004	72	0,75	18,0	-	-	-	-	0,5	0,75	7,1	2
ELBO	SH	2001	552	>4	50,5	0,5	>4	8,3	2	-	-	-	-
ELBO	SH	2002	48	>1,5	77,2	0,5	>1,5	3,9	2	-	-	-	-
MariLim	SH	2004	360	>4	73,2	0,5	>4	25,8	4	-	-	-	-
MariLim	SH	2005	225	4	66,6	0,25	4	17,1	3	-	-	-	-
MariLim	SS	2005	140	2	64,6	0,5	2	9,8	3	-	-	-	-
ELBO	WI	2001	40	>2	72,0			0,0	-1	-	-	-	-
MariLim	WI	2005	70	>3	59,9	0,5	2	4,2	2	-	-	-	-
ELBO	WB	2002	88	>1,5	71,2	0,75	1	4,8	2	-	-	-	-
MariLim	WB	2004	120	>2	73,2	0,75	>2	15,6	3	-	-	-	-

Tab. 13: Rezente Nachweise von *Najas marina* und *Zannichellia palustris* in den untersuchten Gewässern Schleswig-Holsteins (uVg = untere Vegetationsgrenze; Dg = mittlere Gesamtdeckung je Gewässer; D = mittlerer Anteil der Deckung der Art an der Gesamtdeckung aller beprobter Flächen je Gewässer; Vg = Verbreitungsgrenze; S = Stetigkeit; „>“ = Vg bzw. uVg wird in der maximal beprobten Tiefe nicht erreicht; - = kein Vorkommen bzw. Nachweis der jeweiligen Art)

Projekt	Gewässer	Jahr	Fläche [m ²]	gesamt		Zannichellia palustris				Najas marina			
				uVg[m]	D[%]	Vg [m]		D [%]	St	Vg [m]		D [%]	St
LAWA	AS	2004	64	>2	30,9	0,25	1,5	5,5	2	-	-	-	-
MariLim	AS	2005	300	2	30,5	0,25	1	3,0	2	-	-	-	-
LAWA	DS	2005	52	>3	31,4	0,75	1	12,2	3	-	-	-	-
LAWA	FF	2004	36	>1,5	15,9	-	-	-	-	-	-	-	-
MariLim	FF	2005	125	4	29,9	-	-	-	-	-	-	-	-
MariLim	IS	2005	60	0,75	23,6	0,5	0,5	0,1	0	-	-	-	-
MariLim & LAWA	MS	2005	112	1,5	16,2	-	-	-	-	-	-	-	-
LAWA	OB	2004	20	>5	50,8	0,25	2	14,0	3	-	-	-	-
MariLim	OB	2005	95	>3	74,5	0,25	2	20,7	4	-	-	-	-
LAWA	UT	2004	84	>2	18,3	1,5	>2	0,2	1	-	-	-	-
MariLim	UT	2005	175	4	40,3	1,5	3	1,7	1	-	-	-	-

Aus diesen Verbreitungsdaten und den in Abschnitt 3.1.1 ermittelten (a)biotischen Parametern ließ sich der Toleranzbereich für jede der untersuchten Arten hinsichtlich ihres Salinitäts- und Lichtanspruches ermitteln (Abb. 14, S.41). Der Toleranzbereich einer Art entspricht hierbei dem Bereich zwischen den minimalen und den maximalen gemessenen Werten aller Gewässer, in denen ein Vorkommen der jeweiligen Art nachgewiesen wurde.

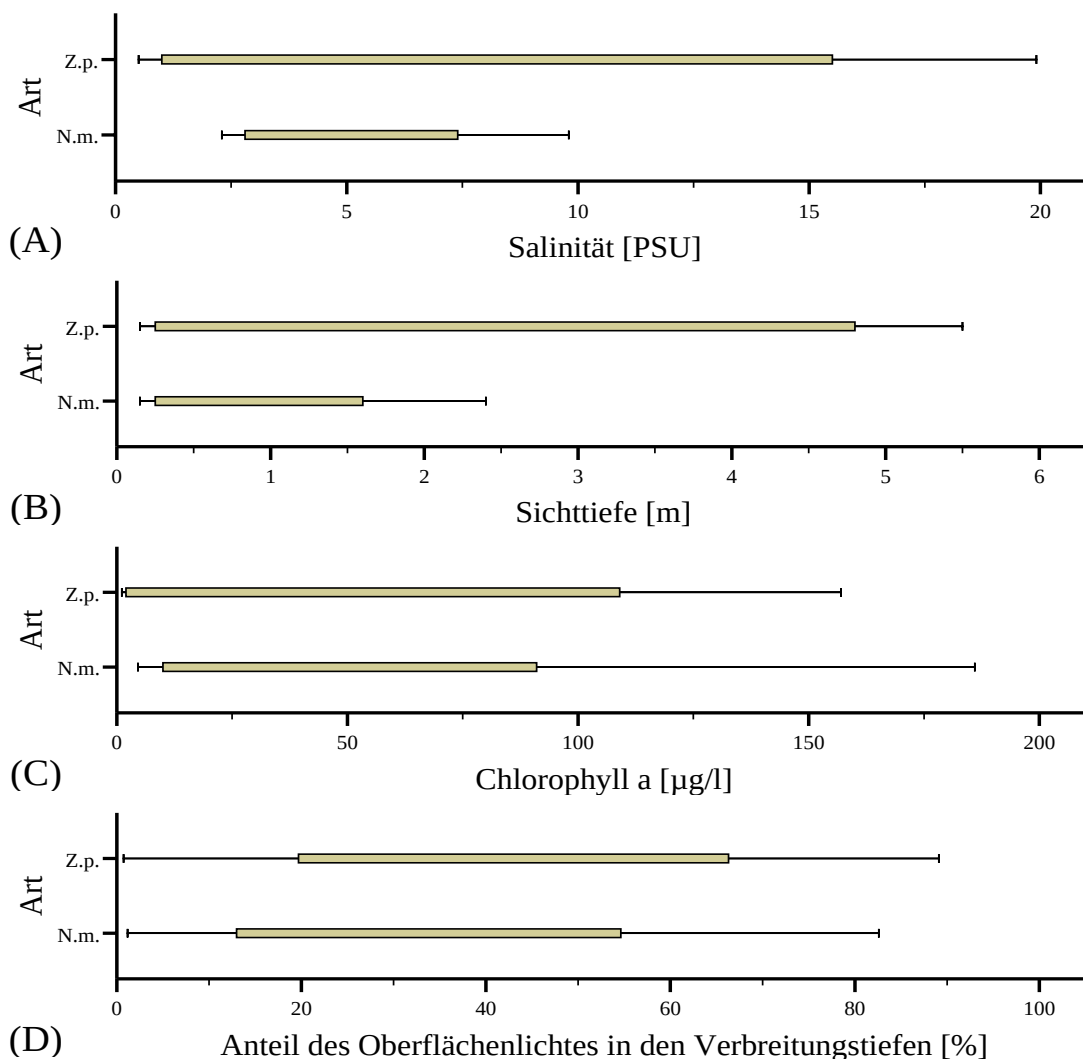


Abb. 14: Dargestellt sind hier die aus der Datenanalyse in Abschnitt 3.1.1 und 3.1.2 ermittelten Toleranzbereiche hinsichtlich der Salinität (A), der Sichttiefe (B) und des Chl *a* Gehaltes (C). In (D) ist der Bereich des Anteils der Oberflächenstrahlung in den Vertiefungen angegeben (N.m. = *Najas marina*; Z.p. = *Zannichellia palustris*; gelber Balken = Bereich der 25 bis 75 Perzentile; schwarze Linie = Bereich außerhalb der 25/75 Perzentile, wobei die senkrechten Endstriche die Minimal- bzw. Maximalwerte angeben)

Beim Vergleich der Toleranzbereiche beider untersuchter Arten zeigten sich vor allem bezüglich der Salinität große Unterschiede. *Zannichellia palustris* gedieh in einem Bereich von 0,5 bis 20 PSU. *Najas marina* hat dagegen einen engen Toleranzbereich und kam nur in den untersuchten Gewässern vor, die Salinitäten von 2 bis 10 PSU aufwiesen (Abb. 14 – A). Bei Betrachtung der Sichttiefen ergab sich ein ähnliches Bild wie bei den Salinitäten. Auch hier hatte *Zannichellia palustris* ein wesentlich breiteres Vorkommen als *Najas marina*. *Zannichellia palustris* wuchs in Gewässern mit Sichttiefen von 0,2 m bis 20 m. *Najas marina* hingegen kam nur in Gewässern mit Sichttiefen zwischen 0,2 und 2,4 m vor (Abb. 14 – B). Beim Chl *a*-Gehalt hat *Najas*

marina einen breiteren Toleranzbereich als *Zannichellia palustris*. *Najas marina* wuchs in Gewässern mit einem Chl *a*-Gehalt von 5 bis 190 $\mu\text{g l}^{-1}$, während *Zannichellia palustris* dagegen nur in Gewässern mit einem Chl *a*-Gehalt von 1 bis 160 $\mu\text{g l}^{-1}$ vorkam (Abb. 14 – C). Durch die Chl *a*-Konzentrationen und die Tiefenbereiche in denen die Arten vorkamen, konnte der benötigte prozentuale Anteil des Oberflächenlichtes berechnet werden. Aufgrund dessen kann vermutet werden, dass *Zannichellia palustris* durchschnittlich mehr Licht benötigt als *Najas marina*. Bei Betrachtung der minimalen Werte zeigt sich jedoch, dass beide Arten mit sehr wenig Licht von ca. 1% des Oberflächenlichtes auskommen können. Des Weiteren verträgt *Zannichellia palustris* höhere Lichtintensitäten als *Najas marina*. Der Toleranzbereich von *Zannichellia palustris* lag zwischen 0,7 und 89,1 % des Oberflächenlichtes und der von *Najas marina* zwischen 1 und 82,6 % (Abb. 14 – D).

Der größte Unterschied zwischen den Toleranzbereichen der beiden untersuchten Arten besteht somit hinsichtlich der Salinität. Dies ist besonders im Hinblick auf die Verbreitung entlang der deutschen Ostseeküste ausschlaggebend.

3.2. Ökophysiologische Untersuchungen

3.2.1. Freilanduntersuchungen an *Najas marina*

Um die Entwicklung von *Najas marina* im saisonalen Verlauf zu untersuchen, wurden die täglichen globalen Strahlendosen (im Bereich der PAR) im Untersuchungszeitraum und am Beprobungsstandort durch die Biologische Station Zingst gemessen. Da für das Unterwasserlichtklima in der Verbreitungstiefe (0,75 m) am Beprobungsstandort keine Langzeitmessungen vorlagen, wurde hierfür eine Berechnung in Abhängigkeit der Globalstrahlung und der Chl *a*-Konzentration laut Abschnitt 2.3.1 (S.21) durchgeführt. Der Verlauf sowohl der Globalstrahlung als auch der in der Verbreitungstiefe ankommenden Reststrahlung ist in Abb. 15 dargestellt. Die globalen Tageslichtdosen reichten dabei im Mittel von maximal 60 mol Photonen d⁻¹ (Ende Juni) bis ca. 20 mol Photonen d⁻¹ (Ende August). Die in 0,75 m ankommende Strahlung von ca. 20 % der Oberflächenstrahlung betrug dagegen im Mittel maximal ca. 10 mol Photonen d⁻¹ (Ende Juni) und minimal ca. 5 mol Photonen d⁻¹ (Ende August).

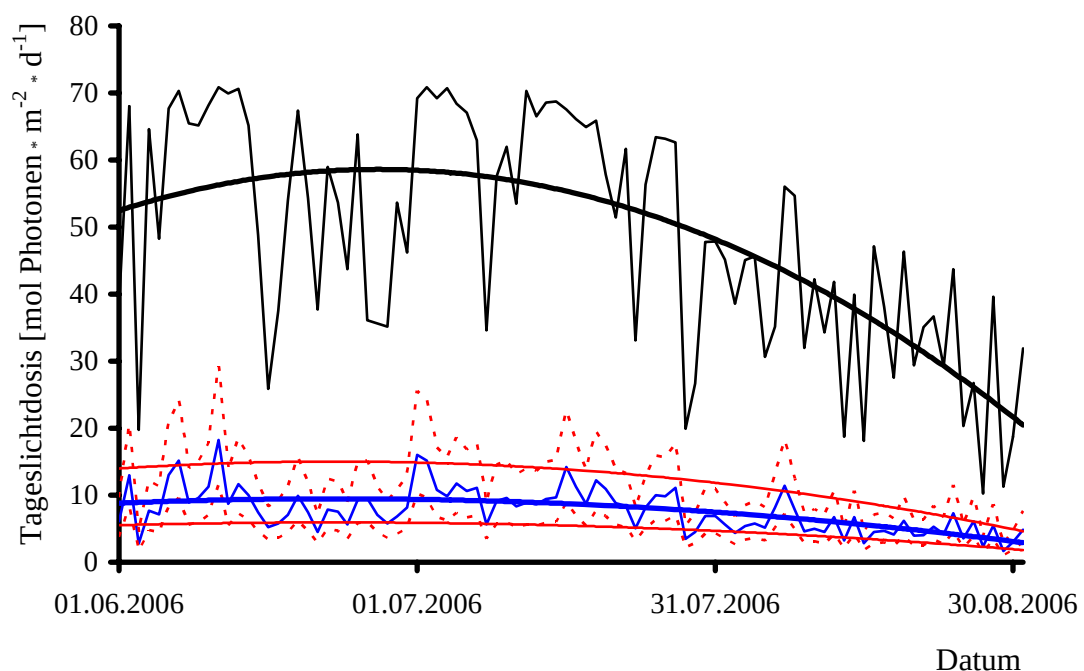


Abb. 15: Dargestellt sind die im Beprobungszeitraum gemessenen täglichen Strahlendosen (im Bereich der PAR) durch die Biologische Station Zingst (schwarz). Aus den Chl *a*-Konzentrationen (täglich gemessen durch die Biologische Station Zingst) wurden die k_{PAR} -Werte berechnet. Aus diesen k_{PAR} -Werten und den täglichen Strahlendosen wurde dann wiederum die tägliche Strahlendosis in 0,75 m Wassertiefe berechnet (blau). Die roten Kurven entstanden bei der Verwendung von $k_{PAR} \pm \text{Konf.}$ anstelle des mittleren k_{PAR} (blaue Kurve).

Da die Pflanzenproben für die Untersuchung von saisonalen Abhängigkeiten in Abständen von ca. einem Monat entnommen wurden, mussten aus den Tageslichtdosen die mittleren monatlichen Tageslichtdosen berechnet werden (Abb. 16). Im ersten Zeitraum von Mitte Juni bis Mitte Juli betrug die mittlere Tageslichtdosis ca. 54 μE . Im Vergleich mit dem zweiten Zeitraum von Mitte Juli bis Mitte August war die mittlere Tageslichtdosis mit 50 μE vernachlässigbar gering. Dies traf auch für die Lichtdosen in 0,75 m Wassertiefe zu. Hier lag die Tageslichtdosis bei etwa 8 μE .

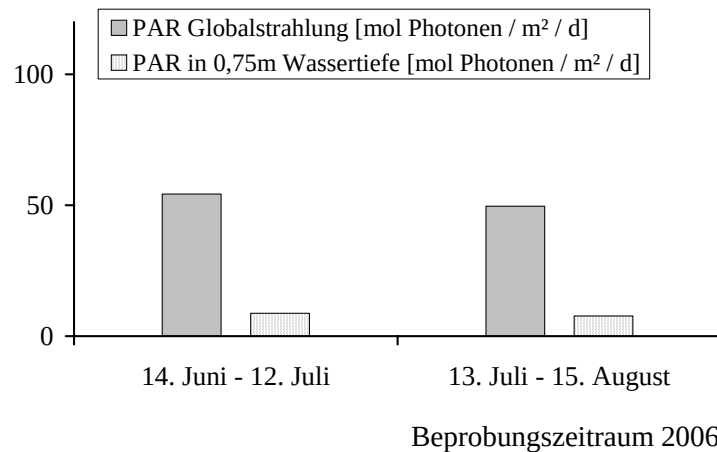


Abb. 16: Mittlere tägliche Strahlendosis (PAR) oberhalb der Wasseroberfläche und in 0,75 m unterhalb der Wasseroberfläche. Dies wurde anhand der Daten der Biologischen Station Zingst (Globalstrahlung und Chl a -Konzentration) berechnet und auf die Tagesdosis gemittelt.

3.2.1.1 Wachstumsparameter

Die von dem Beprobungsstandort entnommenen Pflanzen zeigten zwischen der ersten und der zweiten Entnahme – mit einem zeitlichen Abstand von ca. einem Monat – eine deutliche Zunahme sowohl der Biomasse als auch der Länge. Die RWR_{BM} lag bei 25,2 % d^{-1} und die RWR_{L} bei 25,9 % d^{-1} . Dagegen konnte zwischen der zweiten und dritten Entnahme (zeitlicher Abstand = 1 Monat) nur eine geringe RWR_{BM} von 0,7 % d^{-1} festgestellt werden. Die RWR_{L} war im Vergleich zur RWR_{BM} jedoch mit 7,1 % d^{-1} noch relativ hoch (Abb. 17).

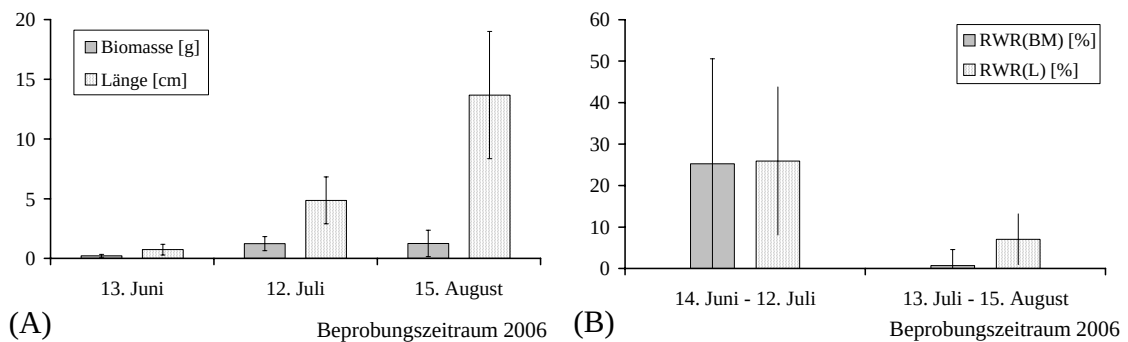


Abb. 17: Dargestellt sind die Wachstumsparemeter der aus dem Freiland entnommenen Pflanzen von *Najas marina*

3.2.1.2 Photosyntheseparameters

Die Photosyntheseparameters zeigten zwischen der zweiten (12. Juli) und dritten (15. August) Entnahme nur geringe Unterschiede. $P_{\max}$ stieg von $11,9 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ kg FM}^{-1}$ am 12. Juli auf $15 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ kg FM}^{-1}$ am 15. August. Alpha verringerte sich dagegen im genannten Zeitraum von 0,49 auf 0,45. E_k stieg von $25 \text{ } \mu\text{E}$ bei der zweiten bis auf $36 \text{ } \mu\text{E}$ bei der dritten Entnahme. E_c erhöhte sich währenddessen von 18 auf $21 \text{ } \mu\text{E}$ (Abb. 18).

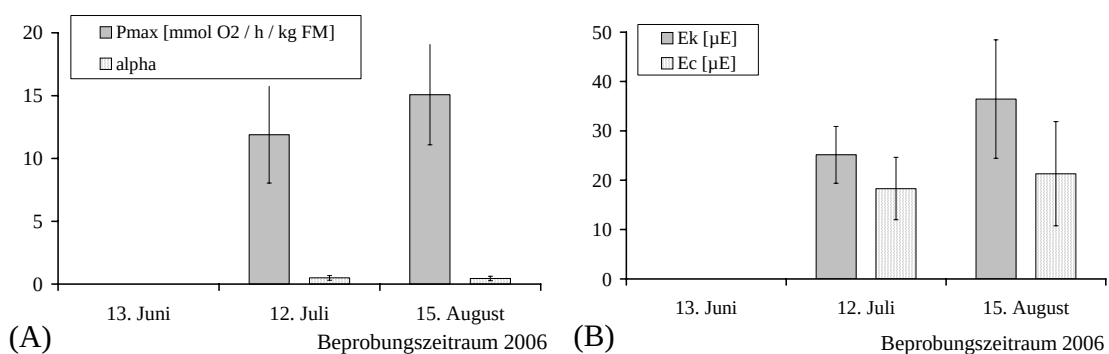


Abb. 18: Darstellung der Photosyntheseparameters der aus dem Freiland entnommenen Pflanzen von *Najas marina*

3.2.2. Laboruntersuchungen hinsichtlich Salz - und Lichtakklimatisation

Die Analyse und Datenauswertung erfolgte, soweit nicht anders angegeben, anhand einer Stichprobengröße von $n = 3$ pro Ansatz unter Berücksichtigung der Prüffaktoren Licht ($a = 3$) und Salinität ($b = 4$). Die Abbildungen in diesem Abschnitt zeigen die Mittelwerte der jeweiligen analysierten Parameter zusammen mit den Standardabweichungen (für $n \geq 2$). Eine genaue Auflistung der verwendeten Individuenanzahl (n) kann Tab. 14 (S.46) entnommen werden.

Für die nachfolgenden Betrachtungen wurde jeweils zuerst mit der einfaktoriellen Analyse der drei unterschiedlichen Lichtstufen begonnen. Die Salinitätsstufen wurden dabei nicht berücksichtigt ($n = 12$). Gefolgt wurde diese von der ebenfalls einfaktoriellen Analyse der verschiedenen Salinitätsstufen. Hier wurden dann wiederum die Lichtstufen nicht berücksichtigt ($n = 9$). Die Daten der einfaktoriellen Analyse werden grafisch nicht dargestellt, sind aber im Anhang einsehbar. Abschließend erfolgte eine zweifaktorielle Analyse der Daten in Bezug zu den Licht- und Salinitätsstufen. Dabei wurden die Daten innerhalb der Lichtstufen noch in die Salinitätsstufen unterteilt ($n = 3$).

Tab. 14: Anzahl (n) der für die Datenauswertung verwendeten Pflanzen aus den jeweiligen Ansätzen. (- = Versuch wurde nicht mit diesen Licht- und Salinitätsstufen durchgeführt, Wp = Wachstumsparameter; Php = Photosyntheseparameter)

Salinität [PSU]	Licht- stufe [μ E]	Najas marina 1		Najas marina 2		Najas marina 3		Zannichellia palustris 1		Zannichellia palustris 2	
		n (Wp)	n (Php)	n (Wp)	n (Php)	n (Wp)	n (Php)	n (Wp)	n (Php)	n (Wp)	n (Php)
1	10	-	-	-	-	3	3	3	2	3	3
1	55	-	-	-	-	3	3	3	2	3	3
1	135	-	-	-	-	3	3	3	2	3	3
3	10	1	0	0	0	3	3	3	2	3	3
3	55	2	0	2	1	3	3	3	3	3	2
3	135	3	0	3	3	3	3	3	3	3	3
7	10	2	0	1	0	-	-	-	-	-	-
7	55	2	0	3	3	-	-	-	-	-	-
7	135	3	0	3	2	-	-	-	-	-	-
10	10	3	3	2	1	3	3	3	1	3	3
10	55	3	3	3	3	3	3	3	2	3	2
10	135	3	3	3	3	3	3	3	1	3	3
15	10	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3
15	55	0	0	0	0	3	3	3	1	3	2
15	135	0	0	0	0	3	3	3	3	3	2

3.2.2.1 *Najas marina*

Da *Najas marina* eine einjährige Pflanze ist und ihr Lebenszyklus sich auf die Sommermonate Juni bis August beschränkt, wurde diese Art als erste untersucht. Die Pflanzen im ersten Versuch wurden kurz nach ihrer Keimung aus dem Freiland entnommen. Sie waren im Mittel 0,7 cm lang und 0,2 g schwer. Zu Beginn des zweiten Versuchs betrug die mittlere Länge 4,9 cm und das Gewicht lag im Mittel bei 1,2 g. Im dritten und letzten Versuch zeigte sich eine weitere deutliche Längenzunahme. Dabei

betrug die Länge im Mittel ca. 12 cm. Die mittlere Biomasse der Pflanzen hingegen lag bei nur 0,8 g.

Najas marina Versuchsansatz 1

Nach einer Inkubation von 14 Tagen bei einer Salinität von 15 PSU waren alle Versuchspflanzen dieses Ansatzes abgestorben, so dass nur Daten der Salzstufen 3, 7 und 10 PSU für die Auswertung zur Verfügung standen.

Wachstumsparameter

Im ersten Versuch mit *Najas marina* erfolgte ein Biomassezuwachs ausschließlich bei der mittleren und der höchsten Lichtstufe. Die einfaktorielle Betrachtung erbrachte eine relative Wachstumsrate in Bezug zur Biomasse (RWR_{BM}) von 2,0 % d^{-1} bei der mittleren Lichtstufe. Bei der höchsten Lichtstufe waren es 3,8 % d^{-1} . Es konnte eine signifikante Abhängigkeit der RWR_{BM} von der Lichtintensität nachgewiesen werden (Tab. 15).

Tab. 15: *Najas marina* Versuch 1: F-Test für die Wachstumsparameter (df = Freiheitsgrade; F = Ergebnis des F – Tests; Sig. = Ergebnis der Signifikanzprüfung (mit $\alpha = 0,05$))

Unabhängiger Parameter	Abhängiger Parameter	df	F	Sig.
Lichtstufe	RWR_{BM}	2	4,8269	0,027

Ausgehend von den Salinitätsstufen wurde die maximale RWR_{BM} von 2,3 % d^{-1} bei 7 PSU erreicht. Bei 3 PSU betrug die RWR_{BM} 0,8 % d^{-1} und bei 10 PSU waren es 0,9 % d^{-1} . Die zweifaktorielle Betrachtung zeigte eine maximale RWR_{BM} von über 5 % d^{-1} bei den Pflanzen der Ansätze 135 μE / 10 PSU sowie 55 μE / 7 PSU (Abb. 19 – A).

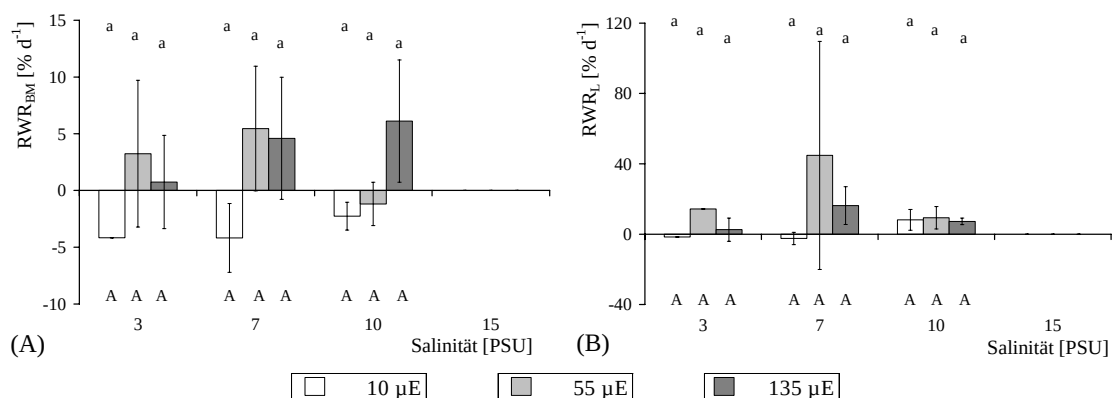


Abb. 19: *Najas marina* Versuch 1: RWR in Bezug auf die Biomasse (A) bzw. die Länge (B) in Abhängigkeit vom Salzgehalt und von der Kultivierungs-Lichtintensität (kleine Buchstaben = Test der Salinitätsstufen auf Signifikanz bei gleicher Lichtstufe; Großbuchstaben = Test der Lichtstufen auf Signifikanz bei gleicher Salinitätsstufe)

Die einfaktorielle Betrachtung für die relative Wachstumsrate in Bezug zur Länge (RWR_L) zeigte bei der niedrigsten Lichtstufe eine RWR_L von 3,0 % d^{-1} . Die mittlere

Lichtstufe bewirkte eine maximale RWR_L von $20,8 \% d^{-1}$. Bei der höchsten Lichtstufe lag die RWR_L bei $8,7 \% d^{-1}$. In Bezug zu den Salinitätsstufen zeigte sich ein ähnliches Bild. Bei der niedrigsten Salinitätsstufe von 3 PSU betrug die RWR_L $5,8 \% d^{-1}$. Das Maximum der RWR_L lag hier mit $19,0 \% d^{-1}$ bei 7 PSU. Bei 10 PSU waren es dann $8,2 \% d^{-1}$. Die zweifaktorielle Analyse erbrachte eine minimale Zunahme der Länge von $2,6 \% d^{-1}$ bei den Ansätzen $135 \mu E / 3 PSU$. Die maximale RWR_L mit $44,8 \% d^{-1}$ erfolgte bei den Ansätzen $55 \mu E / 7 PSU$ (Abb. 19 – B).

Photosyntheseparameter

Die ermittelten Werte der maximalen Photosynthesekapazität (P_{max}) lagen im Mittel bei einer Produktion von 9 bis $10 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ kg FM}^{-1}$ (Abb. 20 – A).

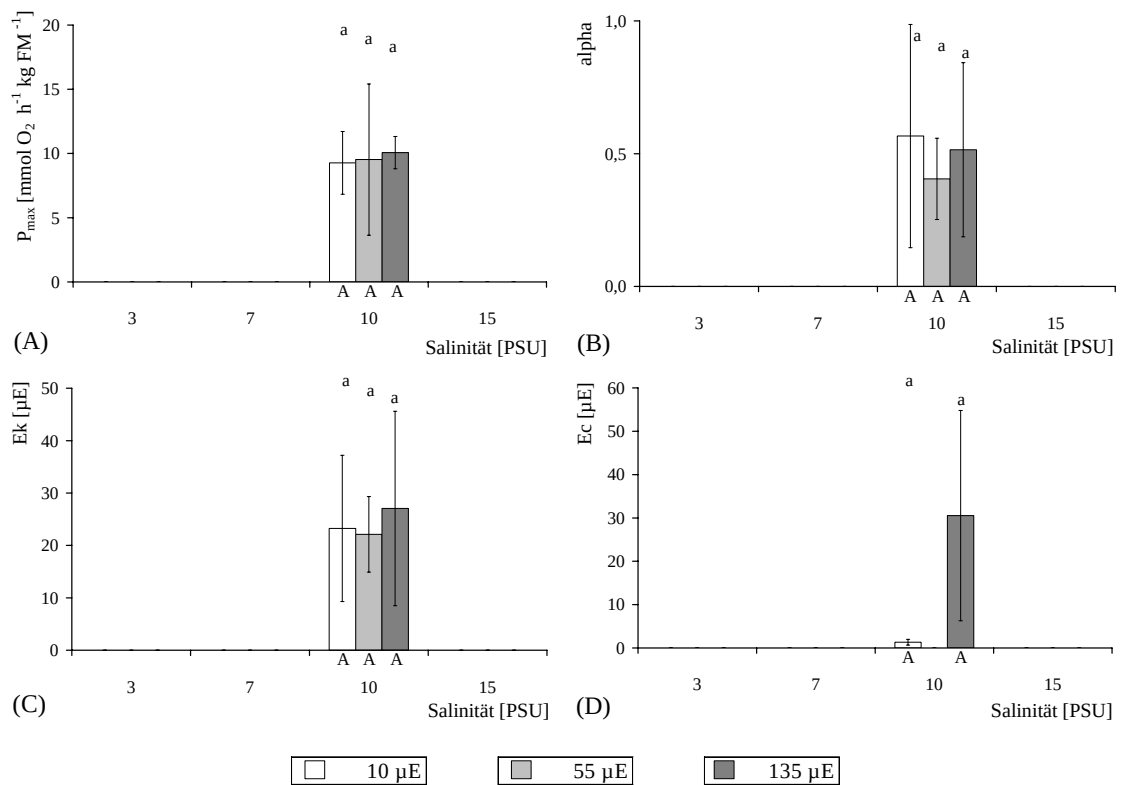


Abb. 20: *Najas marina* Versuch 1: Photosyntheseparameter in Abhängigkeit von Salzgehalt und Kultivierungs-Lichtintensität. (A = Photosynthesekapazität; B = Photosyntheseeffizienz; C = Lichtsättigungspunkt; D = Lichtkompensationspunkt; kleine Buchstaben = Test der Salinitätsstufen auf Signifikanz bei gleicher Lichtstufe; Großbuchstaben = Test der Lichtstufen auf Signifikanz bei gleicher Salinitätsstufe)

Die niedrigste P_{max} von $9 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ kg FM}^{-1}$ trat bei der niedrigsten Lichtstufe auf. Die höchste P_{max} von $10 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ kg FM}^{-1}$ wurde bei der höchsten Lichtstufe erreicht. Es konnte ein signifikanter Unterschied in Bezug auf die verwendete Lichtstufe festgestellt werden (Tab. 16).

Tab. 16: *Najas marina* Versuch 1: F-Test für die Photosyntheseparameter (df = Freiheitsgrade; F = Ergebnis des F – Tests; Sig. = Ergebnis der Signifikanzprüfung (mit $\alpha = 0,05$))

Unabhängiger Parameter	Abhängiger Parameter	df	F	Sig.
Lichtstufe	$P_{\max}$	1	90,6704	0,011

Die Werte der Photosyntheseeffizienz (alpha) lagen im ersten Versuchsansatz zwischen 0,4 und 0,6 (Abb. 20 – B). Den höchsten Wert von 0,6 erreichte alpha bei der niedrigsten Lichtstufe. Am geringsten war alpha mit 0,4 bei der mittleren Lichtstufe.

Der Lichtsättigungspunkt (E_k) lag zwischen 22 μE bei der mittleren Lichtstufe und 27 μE bei der höchsten Lichtstufe (Abb. 20 – C).

Der Lichtkompensationspunkt (E_c) wurde bei der niedrigsten Lichtstufe bereits mit 1 μE erreicht. Für die höchste Lichtstufe betrug er 31 μE und bei der mittleren lagen keine Daten diesbezüglich vor (Abb. 20 – D).

Status der Lichtakklimation

In Abb. 21 ist der Status der Akklimation der Pflanzen an die Lichtintensität, bei der sie kultiviert wurden, dargestellt. Anhand der potenziellen Regressionskurve ließ sich $E_{\min}$ berechnen. $E_{\min}$ liegt hier mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,76$ bei 20 μE . Unter Berücksichtigung der Konfidenzintervalle liegt $E_{\min}$ im Bereich von 8 bis 35 μE .

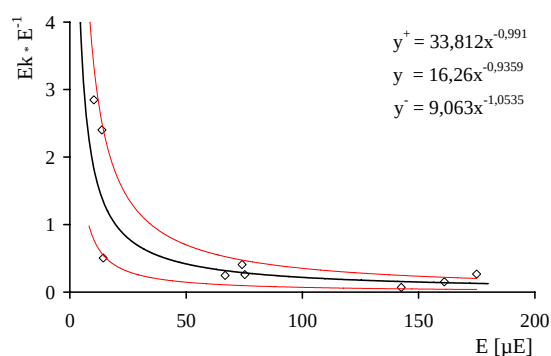


Abb. 21: *Najas marina* Versuch 1: Ermittlung der minimalen Lichtanforderung $E_{\min}$ (A) $\pm$ Konf. (rot). Die angegebenen Gleichungen entsprechen den dargestellten Kurven (mit y = schwarz; y^- und y^+ = rot)

Najas marina Versuchsansatz 2

Bei einem Salzgehalt von 15 PSU sind die Pflanzen wie im vorherigen Versuch komplett abgestorben, weshalb auch im zweiten Versuch keine Daten für diese

Salzstufe zur Verfügung standen. Ebenfalls abgestorben waren einzelne Pflanzen bei den Ansätzen 10 μE / 3 PSU und 10 μE / 7 PSU, weshalb auch hier keine vollständige Daten für eine statistische Betrachtung vorlagen (Details siehe Tab. 17).

Wachstumsparameter

Die einfaktorielle Analyse der Daten ergab eine Abnahme der Biomasse bei der niedrigsten Lichtstufe. Die mittlere Lichtstufe bewirkte ein RWR_{BM} von 0,3 % d^{-1} . Bei der höchsten Lichtstufe lag die RWR_{BM} bei 1,5 % d^{-1} . Auch bei der niedrigsten Salinitätsstufe von 3 PSU nahm die Biomasse ab. Bei 7 PSU betrug die RWR_{BM} 2,1 % d^{-1} und bei 10 PSU waren es 0,4 % d^{-1} . Die RWR_{BM} wurde sowohl durch die Lichtintensität als auch die Salinität signifikant beeinflusst (Tab. 17).

Tab. 17: *Najas marina* Versuch 2: F-Test für die Wachstumsparameter (df = Freiheitsgrade; F = Ergebnis des F – Tests; Sig. = Ergebnis der Signifikanzprüfung (mit $\alpha = 0,05$))

Unabhängiger Parameter	Abhängiger Parameter	df	F	Sig.
PSU	RWR_{BM}	2	4,9500	0,027
Lichtstufe	RWR_{BM}	2	5,7372	0,018

Die zweifaktorielle Analyse ergab eine minimale Zunahme der Biomasse von 0,4 % d^{-1} bei den Pflanzen der Ansätze 135 μE / 10 PSU. Die maximale RWR_{BM} von 5,4 % d^{-1} erreichten die Pflanzen bei den Ansätzen mit 135 μE / 7 PSU (Abb. 22 – A).

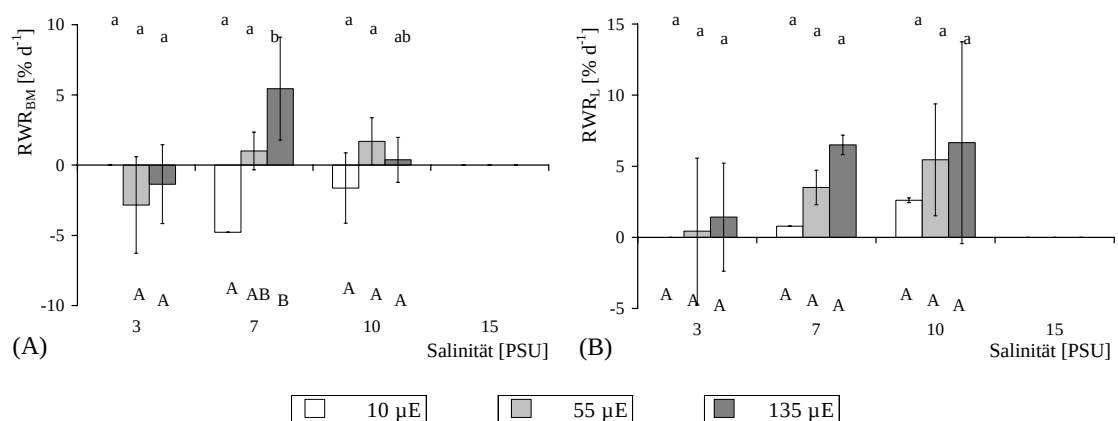


Abb. 22: *Najas marina* Versuch 2: RWR in Bezug auf die Biomasse (A) bzw. die Länge (B) in Abhängigkeit vom Salzgehalt und von der Kultivierungs-Lichtintensität. (kleine Buchstaben = Test der Salinitätsstufen auf Signifikanz bei gleicher Lichtstufe; Großbuchstaben = Test der Lichtstufen auf Signifikanz bei gleicher Salinitätsstufe)

Die RWR_{L} erhöhte sich bei diesem Versuch mit steigender Licht- und Salinitätsstufe. Bei der niedrigsten Lichtstufe betrug die RWR_{L} 2,0 % d^{-1} . Die Pflanzen der mittleren Lichtstufe wiesen eine RWR_{L} von 3,5 % d^{-1} auf. Bei der höchsten Lichtstufe wurde die maximale RWR_{L} mit 4,9 % d^{-1} erreicht. Ausgehend von den Salinitätsstufen lag die geringste RWR_{L} mit 1,0 % d^{-1} bei den Ansätzen der niedrigsten Salinitätsstufe von 3

PSU. Bei 7 PSU betrug die RWR_L bereits $4,4 \% d^{-1}$ und bei 10 PSU erreichte die RWR_L das Maximum von $5,2 \% d^{-1}$. Die zweifaktorielle Analyse ergab eine minimale Längenzunahme von $0,4 \% d^{-1}$ bei den Pflanzen der Ansätze $55 \mu E / 3$ PSU. Die RWR_L erreichte ihr Maximum von $6,7 \% d^{-1}$ bei den Pflanzen der Ansätze $135 \mu E / 10$ PSU (Abb. 22 – B).

Photosyntheseparameter

P_{max} erreichte bei der niedrigsten Lichtstufe eine Produktion von $9 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ kg FM}^{-1}$. Bei der mittleren Lichtstufe betrug P_{max} $13 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ kg FM}^{-1}$. Die höchste Lichtstufe bewirkte eine Verringerung von P_{max} auf $11 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ kg FM}^{-1}$. In Bezug auf die Salinitätsstufen lag P_{max} mit $9 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ kg FM}^{-1}$ bei 3 PSU am niedrigsten. Bei 7 PSU erreichte P_{max} eine Produktion von $12 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ kg FM}^{-1}$ und bei 10 PSU waren es $13 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ kg FM}^{-1}$. Die zweifaktorielle Analyse von P_{max} ergab ein Minimum von $7 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ kg FM}^{-1}$ bei den Pflanzen der Ansätze $135 \mu E / 7$ PSU. Das Maximum wurde mit $15 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ kg FM}^{-1}$ bei den Pflanzen der Ansätze $55 \mu E / 7$ PSU gemessen (Abb. 23 – A).

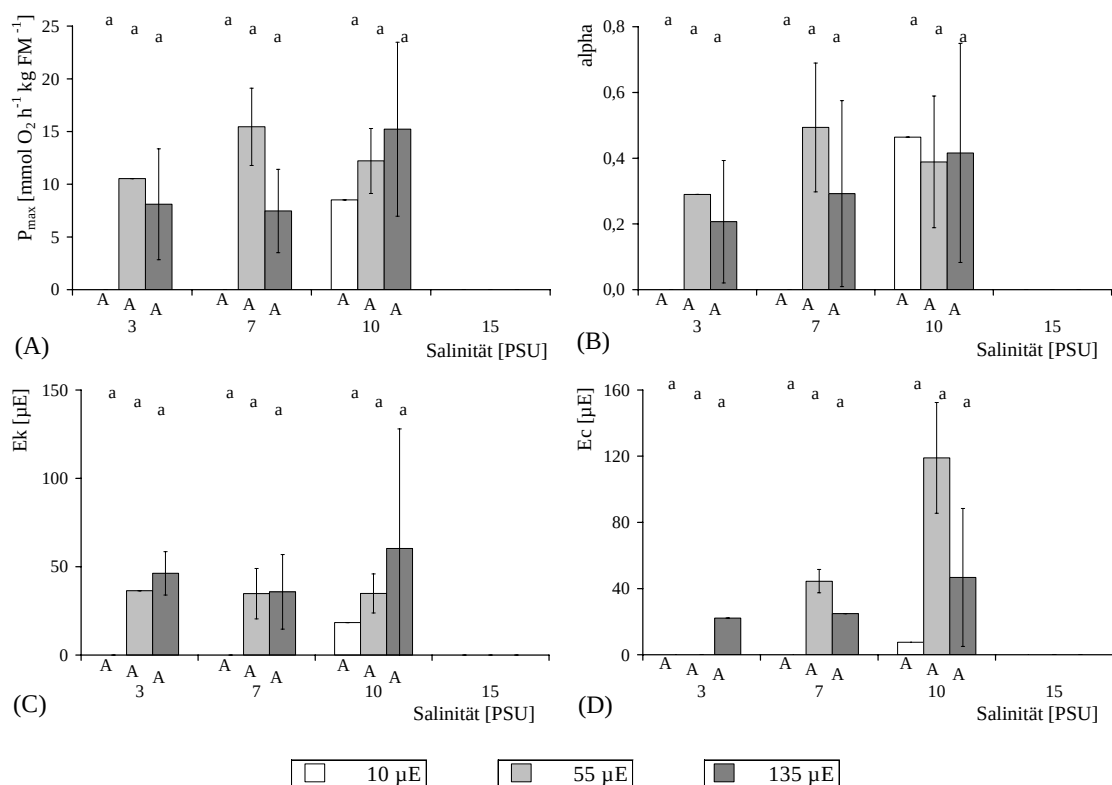


Abb. 23: *Najas marina* Versuch 2: Photosyntheseparameter (Photosynthesekapazität (A); Photosyntheseeffizienz (B); Lichtsättigungspunkt (C); Lichtkompensationspunkt (D)) in Abhängigkeit von Salzgehalt und Kultivierungs- Lichtintensität. (kleine Buchstaben = Test der Salinitätsstufen auf Signifikanz bei gleicher Lichtstufe; Großbuchstaben = Test der Lichtstufen auf Signifikanz bei gleicher Salinitätsstufe)

Alpha nahm mit zunehmender Lichtstufe ab. Bei der niedrigsten Lichtstufe war alpha demnach mit 0,5 am größten. Einen Wert von 0,4 hatte alpha bei der mittleren Lichtstufe. Bei der niedrigsten Lichtstufe erreichte alpha den minimalen Wert von 0,3. Entgegen den Lichtstufen zeigte sich bei den Salinitätsstufen ein anderer Trend. Mit steigender Salinitätsstufe stieg auch alpha an. Bei 3 PSU betrug alpha 0,2. Einen Wert von 0,4 erreichte alpha dann bei der Salinitätsstufe von 7 und 10 PSU. Die zweifaktorielle Analyse von alpha ergab ein Minimum von 0,2 bei den Pflanzen der Ansätze 135 μE / 3 PSU. Der maximale Wert von alpha mit 0,5 wurde von den Pflanzen aus den Ansätzen 55 μE / 7 PSU erreicht (Abb. 23 – B).

Ek wurde bei der niedrigsten Lichtstufe mit einer Lichtintensität von 19 μE erreicht. Danach folgte die mittlere Lichtstufe mit 35 μE . Ek war mit 49 μE bei den Pflanzen aus den Ansätzen mit der höchsten Lichtstufe am größten. In Bezug zu den Salinitätsstufen konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Bei 3 PSU betrug Ek 44 μE . Etwas niedriger war der Ek mit 35 μE bei 7 PSU. Bei 10 PSU lag er dann mit 43 μE wieder etwas höher. Die zweifaktorielle Analyse von Ek ergab ein Minimum von 18 μE bei den Pflanzen der Ansätze 10 μE / 10 PSU. Der maximale Wert von Ek mit 60 μE wurde von den Pflanzen aus den Ansätzen 135 μE / 10 PSU erreicht (Abb. 23 – C).

Beim Vergleich der Werte von Ec zwischen den drei Lichtstufen konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Bei der niedrigsten Lichtstufe benötigten die Pflanzen am wenigsten Licht, genauer gesagt nur 8 μE , für das Erreichen des Ec. Der maximale Ec trat mit 82 μE bei der mittleren Lichtstufe auf. Bei der höchsten Lichtstufe betrug Ec dann 35 μE . Auch in Bezug zu den Salinitätsstufen konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Allerdings zeichnete sich hierbei ein Trend ab. Mit Erhöhung der Salinitätsstufe stieg auch die benötigte Beleuchtungsstärke um den Ec zu erreichen. Somit war auch bei 3 PSU der Ec mit 22 μE am geringsten. Bei der Salinitätsstufe von 7 PSU betrug der Ec 38 μE und bei 10 PSU wurde mit 68 μE der maximale Ec erreicht. Die zweifaktorielle Analyse von Ec ergab ein Minimum von 8 μE bei den Pflanzen der Ansätze 10 μE / 10 PSU. Der maximale Wert von Ec mit 119 μE wurde von den Pflanzen aus den Ansätzen 55 μE / 10 PSU erreicht (Abb. 23 – D).

Status der Lichtakklimation

Der Bereich der optimalen Lichtintensität oder der Bereich der besten Akklimation der Pflanzen an die Lichtintensität ($E_{\min} \pm \text{Konf.}$) liegt bei diesem Versuch zwischen 18

und 33 μE . Der Erwartungswert für $E_{\min}$ liegt hier mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,46$ bei 23 μE .

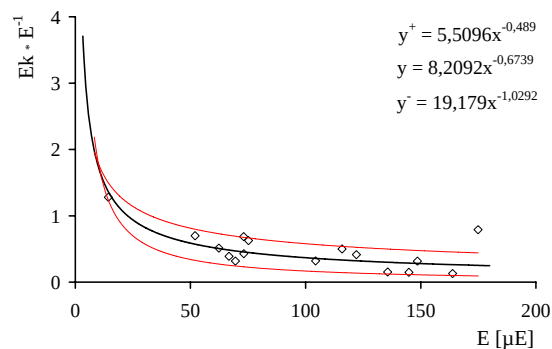


Abb. 24: *Najas marina* Versuch 2: Ermittlung der minimalen Lichtanforderung $E_{\min}$ (A) $\pm$ Konf. (rot). Die angegebenen Gleichungen entsprechen den dargestellten Kurven (mit y = schwarz; y^- und y^+ = rot)

Najas marina Versuchsansatz 3

Im dritten Versuchsansatz mit *Najas marina* konnten auch im Ansatz mit 15 PSU Pflanzen kultiviert werden. Außerdem wurde im Gegensatz zu den ersten beiden Versuchsansätzen der 7 PSU Ansatz durch einen 1 PSU Ansatz ersetzt, so dass Daten für die Salinitätsstufen 1, 3, 10 und 15 PSU vorlagen.

Wachstumsparameter

In diesem Experiment wurden, ausgehend von den Lichtstufen, keine signifikanten Unterschiede ermittelt. Bei der geringsten und der mittleren Lichtstufe wurde eine Abnahme der Biomasse verzeichnet. Nur bei der höchsten Lichtstufe erfolgte ein Biomassewachstum. Die RWR_{BM} betrug in diesem Fall 0,4 % d^{-1} . Auch konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den RWR_{BM} der verschiedenen Salinitätsstufen festgestellt werden (Tab. 18). Bei den Ansätzen mit 1 PSU betrug die RWR_{BM} 0,4 % d^{-1} . Die Pflanzen der Ansätze mit 3 und 15 PSU zeigten keinen Biomassezuwachs. Bei 10 PSU war die RWR_{BM} mit 1,4 % d^{-1} am größten.

Tab. 18: *Najas marina* Versuch 3: F-Test für die Wachstumsparameter (df = Freiheitsgrade; F = Ergebnis des F – Tests; Sig. = Ergebnis der Signifikanzprüfung (mit $\alpha = 0,05$))

Unabhängiger Parameter	Abhängiger Parameter	df	F	Sig.
PSU	NH_4^+	3	21,8933	0,000
Lichtstufe	RWR_L	2	3,4921	0,047
	Chl_a	2	4,5061	0,022
	NH_4^+	2	74,7159	0,000
PSU * Lichtstufe	RWR_{BM}	6	5,9105	0,001
	NH_4^+	6	20,3421	0,000

Die zweifaktorielle Analyse ergab eine gegenseitige signifikante Beeinflussung der RWR_{BM} durch die Licht- und Salinitätsstufen. Dabei zeigte sich bei der niedrigsten Lichtstufe eine Abnahme der RWR_{BM} mit steigender Salinitätsstufe (Abb. 25 – A). Somit lag hierbei die maximale RWR_{BM} mit $6,1 \text{ \% d}^{-1}$ bei den Ansätzen mit 1 PSU. Bei den Salinitätsstufen 3, 10 und 15 PSU kam es zu keiner Zunahme der Biomasse. Bei der mittleren und der höchsten Lichtstufe ergab die Auswertung der Daten eine eingipfelige Verteilung mit einem Maximum bei 10 PSU. Eine Zunahme der Biomasse erfolgte bei der mittleren Lichtstufe ausschließlich bei den Salinitätsstufen von 10 und 15 PSU mit einem Maximum von $1,1 \text{ \% d}^{-1}$ bei 10 PSU. Bei der höchsten Lichtstufe nahm die Biomasse dagegen nur bei den Salinitätsstufen von 3 und 10 PSU zu. Dabei wurde eine maximale RWR_{BM} von $3,7 \text{ \% d}^{-1}$ bei den Ansätzen mit 10 PSU erreicht.

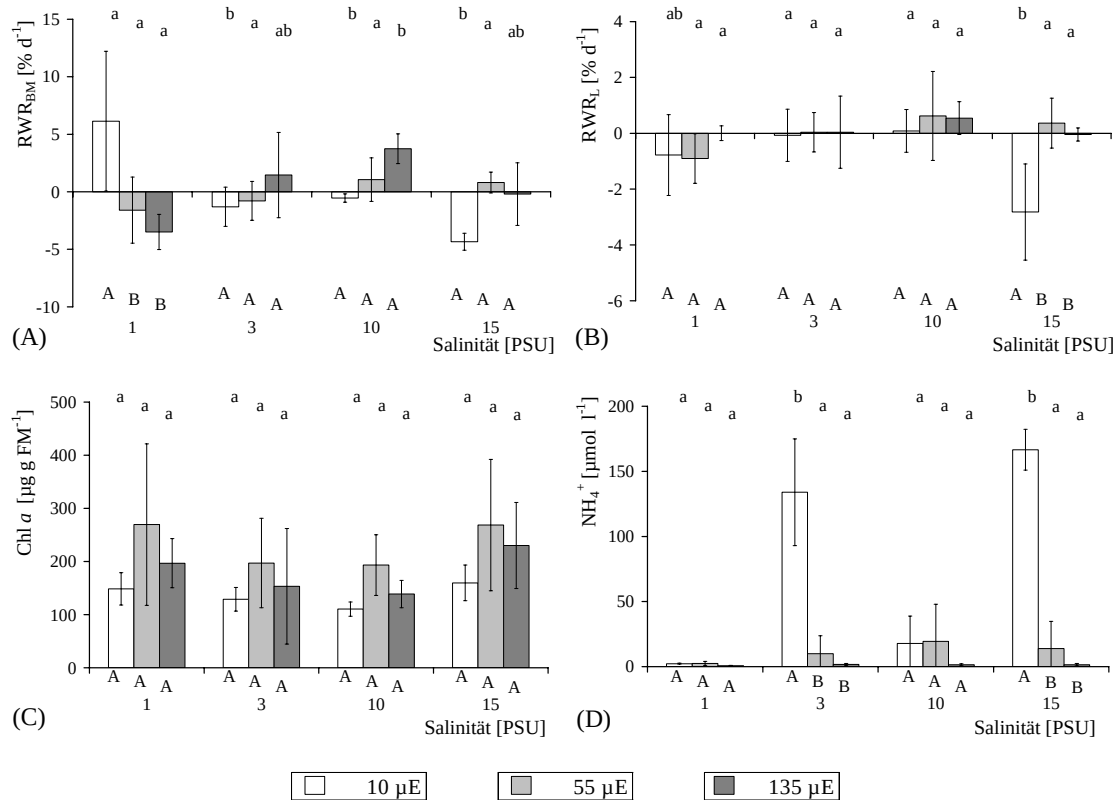


Abb. 25: *Najas marina* Versuch 3: RWR in Bezug auf die Biomasse (A) bzw. die Länge (B) sowie der Gehalt an Chlorophyll a in den Pflanzen (C) und die Ammoniumkonzentration im Versuchswasser (D) in Abhängigkeit vom Salzgehalt und von der Kultivierungs-Lichtintensität. (kleine Buchstaben = Test der Salinitätsstufen auf Signifikanz bei gleicher Lichtstufe; Großbuchstaben = Test der Lichtstufen auf Signifikanz bei gleicher Salinitätsstufe)

Bei der einfaktoriellen Analyse der RWR_L in Abhängigkeit von der Lichtstufe zeigten sich signifikante Unterschiede (Tab. 18). Bei der niedrigsten und der mittleren Lichtstufe erfolgte kein Längenwachstum. Während bei der mittleren Lichtstufe kein Längenwachstum stattfand, kam es bei der niedrigsten Lichtstufe zu einer Abnahme der Länge. Die RWR_L wies nur bei der höchsten Lichtstufe mit $0,1 \% d^{-1}$ eine Längenzunahme auf. In Bezug auf die Salinitätsstufen zeigten sich keine signifikanten Unterschiede der RWR_L . Allerdings konnte ein Trend beobachtet werden. Es kam zu einer eingipfeligen Verteilung mit einem Maximum der RWR_L von $0,4 \% d^{-1}$ bei den Ansätzen mit 10 PSU. Bei den Salinitätsstufen von 1 und 15 PSU nahm die Länge ab, während sie bei 3 PSU stagnierte. Ein Längenwachstum erfolgte also nur bei 10 PSU. Die zweifaktorielle Analyse ergab keine gegenseitige signifikante Beeinflussung der RWR_L durch die Licht- und Salinitätsstufen. Das Maximum lag bei dieser Betrachtungsweise mit $0,6 \% d^{-1}$ bei den Ansätzen 55 µE / 10 PSU (Abb. 25 – B).

Der Chl *a* -Gehalt war mit $137 \mu\text{g g FM}^{-1}$ bei der niedrigsten Lichtstufe am geringsten. Die mittlere Lichtstufe wies mit $232 \mu\text{g g FM}^{-1}$ den höchsten Anteil an Chl *a* auf. Der Gehalt an Chl *a* lag mit $180 \mu\text{g g FM}^{-1}$ bei der höchsten Lichtstufe zwischen denen der anderen beiden Lichtstufen. Bei der kleinsten Salinitätsstufe von 1 PSU lag die Konzentration von Chl *a* bei $205 \mu\text{g g FM}^{-1}$. Mit steigender Salinitätsstufe wurde die Chl *a* -Konzentration geringer. Bei 3 PSU waren es $160 \mu\text{g g FM}^{-1}$ und bei 10 PSU $148 \mu\text{g g FM}^{-1}$. Bei einer Salinität von 15 PSU erreichte das Chl *a* seine maximale Konzentration von $220 \mu\text{g g FM}^{-1}$. Bei der zweifaktoriellen Analyse trat der niedrigste Chl *a* -Gehalt von $111 \mu\text{g g FM}^{-1}$ bei den Pflanzen der Versuchsansätze mit $10 \mu\text{E} / 10 \text{ PSU}$ auf. Die Chl *a*-Maxima von 269 und $270 \mu\text{g g FM}^{-1}$ wurden bei $55 \mu\text{E} / 15 \text{ PSU}$ und $55 \mu\text{E} / 1 \text{ PSU}$ erreicht (Abb. 25 – C).

Der Gehalt an NH_4^+ im Wasser war bei den Ansätzen der geringsten Lichtstufe mit $80 \mu\text{mol l}^{-1}$ am höchsten und unterschied sich sehr stark vom NH_4^+ -Gehalt der anderen beiden Lichtstufen. Bei der mittleren Lichtstufe waren es nur noch $12 \mu\text{mol l}^{-1}$ und bei der höchsten Lichtstufe lag die NH_4^+ -Konzentration sogar nur bei $1 \mu\text{mol l}^{-1}$. Die NH_4^+ -Konzentrationen waren dabei signifikant von den Lichtstufen abhängig (Tab. 18). In den Versuchsansätzen mit der niedrigsten Salinität von 1 PSU lag die Konzentration von NH_4^+ bei $2 \mu\text{mol l}^{-1}$. Bei 3 PSU erreichte die NH_4^+ -Konzentration $49 \mu\text{mol l}^{-1}$. Bei 10 PSU lag sie bei $13 \mu\text{mol l}^{-1}$ und bei 15 PSU waren es $61 \mu\text{mol l}^{-1}$. Auch von den Salinitätsstufen waren die NH_4^+ -Konzentrationen signifikant abhängig (Tab. 18). Bei der zweifaktoriellen Analyse ergab sich der geringste NH_4^+ -Gehalt mit $1 \mu\text{mol l}^{-1}$ bei den Ansätzen mit $135 \mu\text{E} / 1 \text{ PSU}$ (Abb. 25 – D). Die höchste NH_4^+ -Konzentration mit $167 \mu\text{mol l}^{-1}$ wurde bei den Ansätzen mit $10 \mu\text{E} / 15 \text{ PSU}$ ermittelt. Es konnte eine signifikante gegenseitige Beeinflussung der NH_4^+ -Konzentrationen von den Licht- und Salinitätsstufen nachgewiesen werden (Tab. 18).

Photosyntheseparameter

P_{max} war mit $48 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g Chl } a^{-1}$ bei der niedrigsten Lichtstufe am geringsten. Bei der mittleren Lichtstufe war P_{max} mit $85 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g Chl } a^{-1}$ fast doppelt so hoch. Ähnlich hoch lag dieser Wert bei den Pflanzen der höchsten Lichtstufe. Hier betrug P_{max} $84 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g Chl } a^{-1}$. Die Unterschiede der P_{max} zwischen den Lichtstufen sind signifikant (Tab. 19).

Tab. 19: *Najas marina* Versuch 3: F-Test für die Photosyntheseparameter (df = Freiheitsgrade; F = Ergebnis des F – Tests; Sig. = Ergebnis der Signifikanzprüfung (mit $\alpha = 0,05$))

Unabhängiger Parameter	Abhängiger Parameter	df	F	Sig.
Lichtstufe	$P_{\max}$	2	4,7031	0,021
	Alpha	2	5,3095	0,014
	Ek	2	7,1759	0,004

In Bezug zur Salinitätsstufe ist ein eingipfeliger Verlauf der $P_{\max}$ zu erkennen. Bei 1 PSU lag $P_{\max}$ bei $67 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g Chl } a^{-1}$. Den maximalen Wert von $92 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g Chl } a^{-1}$ erreichten die Pflanzen bei 3 PSU. Bei 10 PSU lag $P_{\max}$ bei $71 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g Chl } a^{-1}$ und bei 15 PSU bei $59 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g Chl } a^{-1}$. In der zweifaktoriellen Betrachtung lagen die $P_{\max}$ -Werte zwischen $32 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g Chl } a^{-1}$ bei den Pflanzen der Ansätze $10 \mu\text{E} / 1 \text{ PSU}$ und $119 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g Chl } a^{-1}$ bei denen der Ansätze $55 \mu\text{E} / 3 \text{ PSU}$ (Abb. 26 – A).

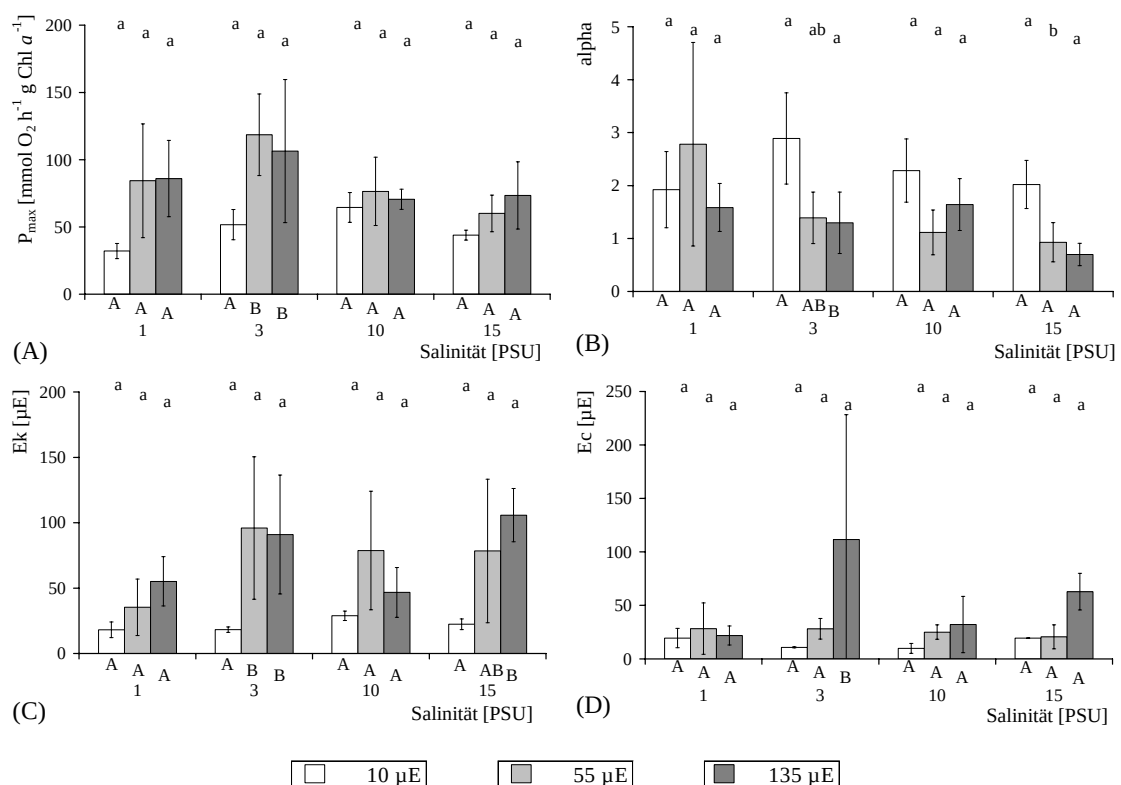


Abb. 26: *Najas marina* Versuch 3: Photosyntheseparameter (Photosynthesekapazität (A); Photosyntheseeffizienz (B); Lichtsättigungspunkt (C); Lichtkompensationspunkt (D)) in Abhängigkeit von Salzgehalt und Kultivierungs- Lichtintensität. (kleine Buchstaben = Test der Salinitätsstufen auf Signifikanz bei gleicher Lichtstufe; Großbuchstaben = Test der Lichtstufen auf Signifikanz bei gleicher Salinitätsstufe)

Alpha nahm mit steigender Lichtstufe ab. Bei der niedrigsten Lichtstufe war demzufolge auch alpha mit 2,3 am größten. Einen Wert von 1,6 erreichte alpha bei der mittleren und 1,3 bei der höchsten Lichtstufe. Alpha war damit laut statistischer Analyse signifikant von der Lichtstufe abhängig (Tab. 19). Mit steigender

Salinitätsstufe verringerte sich alpha ebenfalls. Alpha erreichte dabei Werte von 2,1 bei 1 PSU, 1,9 bei 3 PSU, 1,7 bei 10 PSU und 1,2 bei 15 PSU. Somit ist alpha unter der zweifaktoriellen Analyse mit 0,7 bei den Ansätzen mit 135 μE / 15 PSU am niedrigsten. Das Maximum befindet sich bei den Ansätzen mit 10 μE / 3 PSU (Abb. 26 – B).

Ek war bei der niedrigsten Lichtstufe mit 22 μE am geringsten. Bei der mittleren Lichtstufe war er mit 72 μE mehr als dreimal so hoch. Zwischen der mittleren und der höchsten Lichtstufe ist dagegen kaum ein Unterschied zu erkennen. Ek erreichte bei der höchsten Lichtstufe einen Wert von 75 μE . Der Ek -Wert war signifikant von der Lichtstufe abhängig (Tab. 19). Ausgehend von den Salinitätsstufen war Ek bei den Pflanzen der Versuchsansätze mit 1 PSU mit 36 μE am niedrigsten. Nachdem bei 3 PSU zuerst ein Anstieg des Ek auf 68 μE erfolgte, nahm dieser mit 51 μE bei 10 PSU wieder ab und stieg dann bei 15 PSU wiederum auf 69 μE an. Aus der zweifaktoriellen Analyse ergab sich ein Minimum des Ek -Wertes von 18 μE bei den Ansätzen mit 10 μE / 1 PSU. Am größten war der Ek -Wert mit 106 μE bei den Pflanzen aus den Ansätzen mit 135 μE / 15 PSU (Abb. 26 – C).

Ec war mit 13 μE ebenfalls bei der niedrigsten Lichtstufe am geringsten und stieg mit zunehmender Lichtstufe an. Bei der mittleren Lichtstufe lag der Ec -Wert bereits bei 26 μE und bei weiterer Erhöhung der Lichtstufe wurde Ec erst bei 57 μE erreicht. Bei Vergleich der Daten in Bezug auf die verschiedenen Salinitätsstufen ergab sich ein ähnliches Bild wie bei den Ek -Werten. Bei 1 PSU betrug der Ec 24 μE . Eine Steigerung der Salinitätsstufe auf 3 PSU hatte auch eine Erhöhung des Ec -Wertes auf 50 μE zur Folge. Bei 10 PSU befand sich der Ec nur noch bei 22 μE , während er bei 15 PSU 39 μE erreichte. In der zweifaktoriellen Betrachtung wurde der Ec bereits mit 10 μE bei den Pflanzen der Versuchsansätze mit 10 μE / 10 PSU erreicht. Am größten war der Ec -Wert mit 112 μE bei den Pflanzen aus den Ansätzen mit 135 μE / 3 PSU (Abb. 26 – D).

Status der Lichtakklimatisation

In Abb. 27 (A) ist der Status der Akklimatisation der Pflanzen an die Lichtintensität, bei der sie kultiviert wurden, dargestellt. Der optimale Bereich ($E_{\min} \pm \text{Konf.}$) befand sich dabei zwischen 22 und 98 μE . Anhand der potenziellen Regressionskurve ließ sich der Erwartungswert für $E_{\min}$ berechnen. $E_{\min}$ lag hier mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,57$ bei 41 μE . Zusätzlich dazu wurde die reale Nettophotosyntheserate der Pflanzen

bei der gegebenen Kultivierungslichtintensität (E) berechnet und in Bezug zu E und zu E_k dargestellt (Abb. 27 – B/C).

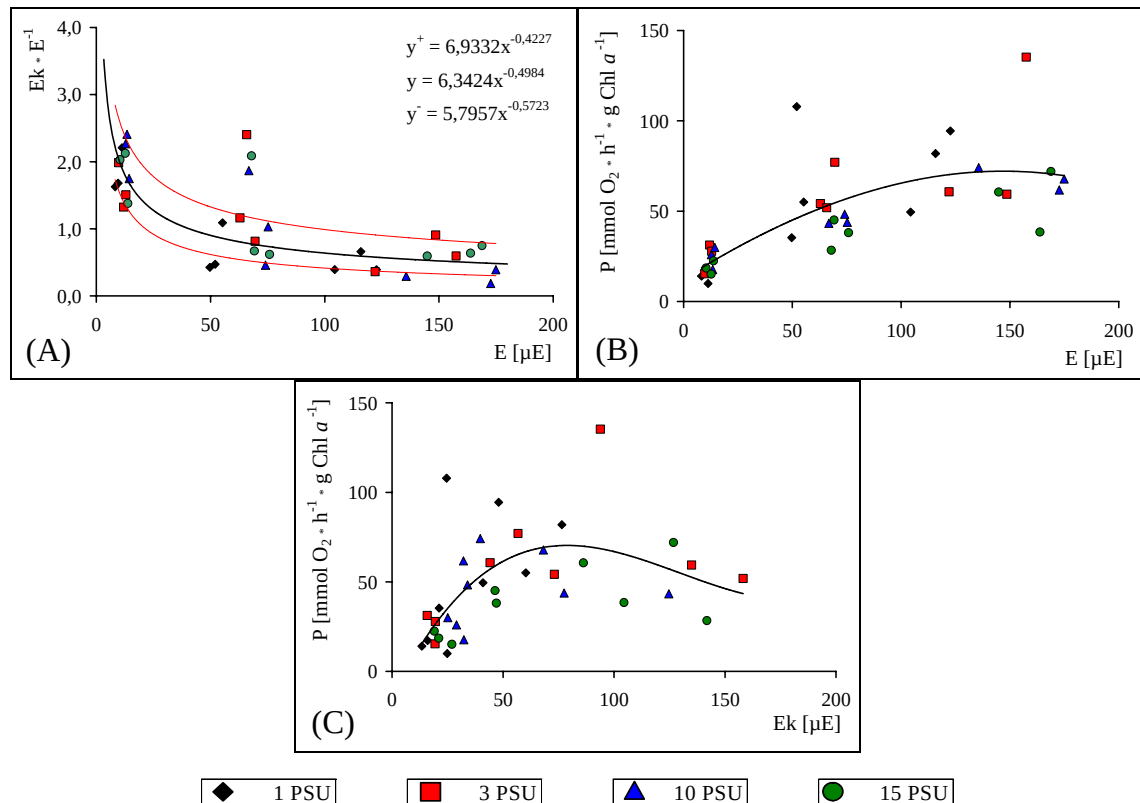


Abb. 27: *Najas marina* Versuch 3: Ermittlung der minimalen Lichtanforderung $E_{\min}$ (A) $\pm$ Konf. (rot). Die angegebenen Gleichungen entsprechen den dargestellten Kurven (mit y = schwarz; y^- und y^+ = rot). Des Weiteren ist die reale O_2 -Produktion in Abhängigkeit zur Kultivierungslichtintensität (B) und zu E_k (C) dargestellt.

Zusammenfassung

Anhand der Versuche zu *Najas marina* kann zusammengefasst werden, dass diese Art am besten bei der mittleren Lichtstufe (55 μE) wuchs. Bei der niedrigsten Lichtstufe wuchsen die Pflanzen nur sehr gering, was auf eine Untersättigung der Photosyntheseapparate hinweist. Eine Übersättigung der Pflanzen durch die hier gegebene höchste Lichtstufe (135 μE) konnte wenn überhaupt nur mit geringen Auswirkungen auf die untersuchten Parameter nachgewiesen werden. Erkennbar ist dies z.B. anhand von E_k , welcher bei den Pflanzen der mittleren Lichtstufe am höchsten lag oder dem Chl a -Gehalt, welcher ebenfalls bei den Pflanzen der mittleren Lichtstufe am höchsten war. Gegenüber den Salinitätsstufen erwiesen sich die Pflanzen als nur gering tolerant. Die meisten Pflanzen starben bei der niedrigsten Salinität von 1 PSU und der höchsten von 15 PSU ab. Somit wuchsen sie bei diesen Versuchen in den Medien mit Salinitäten zwischen 3 und 10 PSU. Die bevorzugte Salinität lag dabei bei 7 PSU. Dieses Ergebnis spiegelte sich auch in den Photosyntheseparametern wider. So lagen

die maximalen Photosyntheseraten ebenfalls in diesen Bereichen, d.h. zwischen 3 und 10 PSU und mittlerer Lichtstufe. Insgesamt sind somit die günstigsten Bedingungen für *Najas marina* bei Lichtintensitäten um die 55 μE und einer Salinität von ca. 7 PSU gegeben. Das wurde auch durch die Berechnung der minimalen Lichtanforderung bestätigt, welche bei 28 μE und mit Berücksichtigung der Konfidenzintervalle in einem Bereich von etwa 10 und 58 μE lag (Abb. 28).

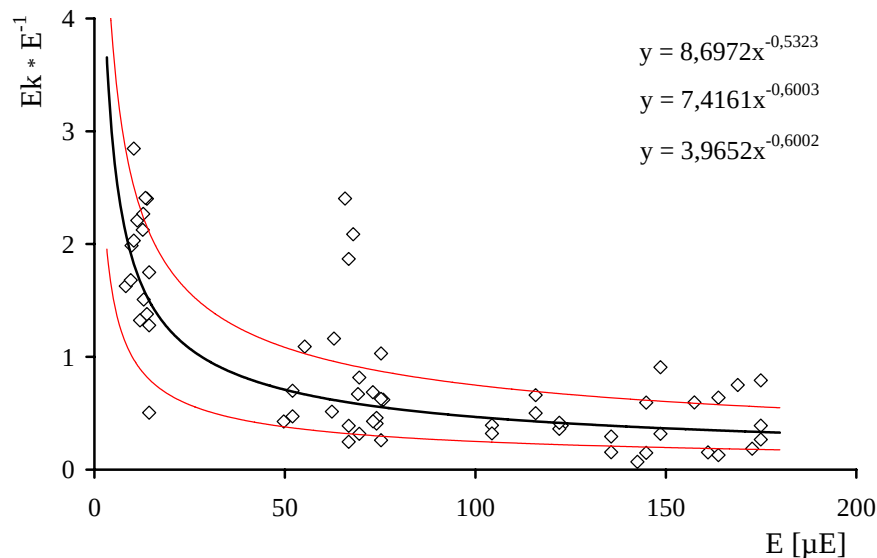


Abb. 28: Ermittlung der minimalen Lichtanforderung von *Najas marina* durch Auftragen des Quotienten aus E_k und E gegenüber E . $E_{\min}$ ist dabei die Lichtintensität (E), bei der der Quotient von E_k und $E = 1$ ist. Grundlage sind die Daten aller drei Versuche mit *Najas marina* (erwartete $E_{\min}$ (schwarz) $\pm$ Konf. (rot)). Die angegebenen Gleichungen entsprechen den dargestellten Kurven mit y = schwarz; y^- und y^+ = rot)

Aus diesen berechneten minimalen Lichtanforderungen für *Najas marina*, den

Globalstrahlungswerten und den Chl *a* -Gehalten eines Gewässers kann die theoretische untere Verbreitungsgrenze (uVg) ermittelt werden. Da sowohl die Globalstrahlungsdaten sowie die Chl *a* -Gehalte, welche beide durch die Biologische Station Zingst gemessen wurden, nur für den Zingster Strom vorlagen, wurde auch die uVg nur für dieses Gewässer berechnet. Für den Zingster Strom ist im Jahr

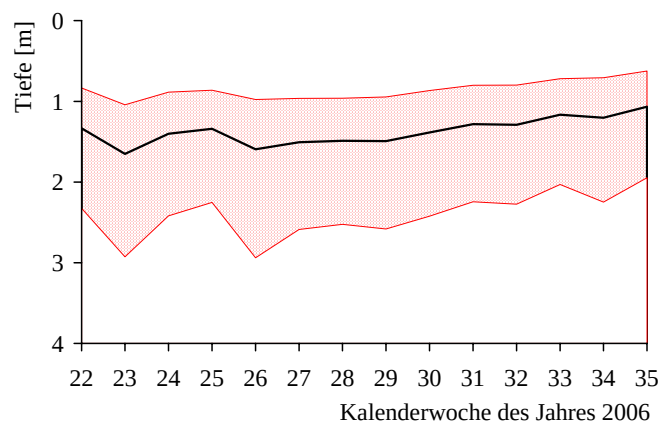


Abb. 29: Theoretische untere Verbreitungsgrenze von *Najas marina* im Zingster Strom. Die schwarze Linie gibt die erwartete Tiefe der unteren Verbreitung an. Mit rot ist der Bereich der uVg gekennzeichnet, der auf den berechneten Konfidenzintervallen (95 %) sowohl der $E_{\min}$ - als auch der k_{PAR} -Werte beruht.

2006 laut der Berechnung eine theoretische untere Verbreitungsgrenze von *Najas marina* bei ca. 1,5 m erreicht. Durch Einbeziehung der Konfidenzintervalle der $E_{\min}$ - und k_{PAR} -Berechnung lag diese Grenze zwischen ca. 0,9 und 2,4 m (Abb. 29).

3.2.2.2 *Zannichellia palustris*

Einleitung

Die Versuche mit *Zannichellia palustris* erfolgten im Anschluss an die Versuche mit *Najas marina*. Da *Zannichellia palustris* eine ausdauernde mehrjährige Pflanze ist, konnte die Entnahme der Pflanzen aus dem Freiland demzufolge auch ohne Probleme zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen.

Zannichellia palustris Versuchsansatz 1

Der erste Versuch mit *Zannichellia palustris* sollte analog zu den Versuchsansätzen mit *Najas marina* erfolgen. Aufgrund eines Ausfalles der Zeitschaltuhr erfolgte jedoch eine zehntägige durchgängige Beleuchtung ohne Dunkelphase. Somit erhöhte sich die Gesamtlichtdosis für die Versuche von den geplanten 210 bis 255 Stunden Licht auf 300 bis 372 Stunden Licht innerhalb des gesamten Versuchszeitraumes.

Wachstumsparameter

Die RWR_{BM} zeigte eine signifikante Abhängigkeit von der für die Kultivierung verwendeten Lichtstufe (Tab. 20).

Tab. 20: *Zannichellia palustris* Versuch 1: F-Test für die Wachstumsparameter (df = Freiheitsgrade; F = Ergebnis des F – Tests; Sig. = Ergebnis der Signifikanzprüfung (mit $\alpha = 0,05$))

Unabhängiger Parameter	Abhängiger Parameter	df	F	Sig.
Salinität	Chl a	3	4,0904	0,021
	NH_4^+	3	10,1504	0,000
Lichtstufe	RWR_{BM}	2	28,9534	0,000
	Chl a	2	4,6152	0,023
	NH_4^+	2	13,5894	0,000
Salinität * Lichtstufe	RWR_{BM}	6	2,7695	0,042
	NH_4^+	6	2,8790	0,036

Dabei war bei der niedrigsten Lichtstufe die RWR_{BM} mit $2,0 \% \text{ d}^{-1}$ am geringsten. Mit steigender Lichtstufe erhöhte sich auch die RWR_{BM} . Bei der mittleren Lichtstufe war die RWR_{BM} mit $5,8 \% \text{ d}^{-1}$ bereits mehr als doppelt so hoch. Die höchste RWR_{BM} wurde demnach mit $16,3 \% \text{ d}^{-1}$ bei der höchsten Lichtstufe erreicht. Die Salinitätsstufen hatten dagegen keinen signifikanten Einfluss auf die RWR_{BM} . Es konnte hier aber eine

zweigipfelige Abfolge der Werte festgestellt werden. Die RWR_{BM} bei 1 PSU betrug 6,5 % d^{-1} , was dem Minimum entsprach. Bei 3 PSU waren es 8,5 % d^{-1} und bei 10 PSU 7,6 % d^{-1} . Die maximale RWR_{BM} wurde mit 9,6 % d^{-1} bei der höchsten Salinitätsstufe von 15 PSU erreicht. Ausgehend von der zweifaktoriellen Betrachtung ergab sich eine signifikante Abhängigkeit in der Kombination von Licht- und Salinitätsstufe (Tab. 20). Die minimale RWR_{BM} von 1,3 % d^{-1} lag bei den Ansätzen 10 μE / 10 PSU. Die maximale RWR_{BM} wurde mit 22,7 % d^{-1} bei den Ansätzen 135 μE / 15 PSU erreicht (Abb. 30 – A).

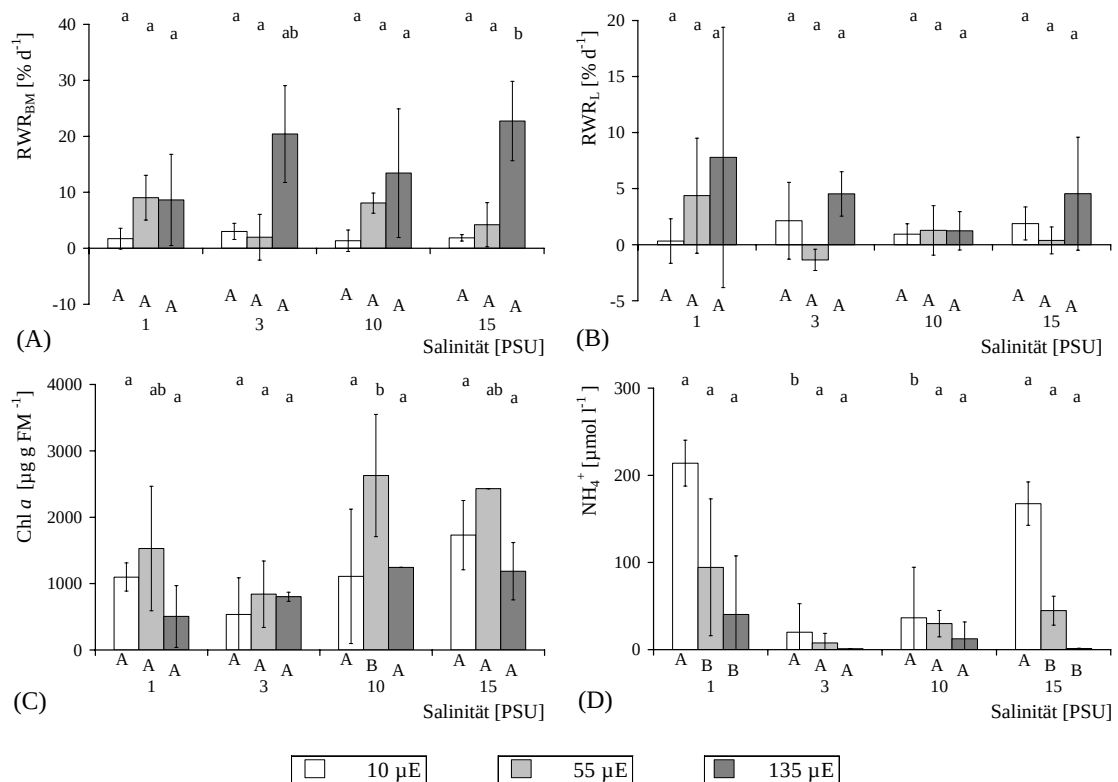


Abb. 30: *Zannichellia palustris* Versuch 1: RWR in Bezug auf die Biomasse (A) bzw. die Länge (B) sowie der Gehalt an Chlorophyll a in den Pflanzen (C) und die Ammoniumkonzentration im Versuchswasser (D) in Abhängigkeit vom Salzgehalt und von der Kultivierungs-Lichtintensität. (kleine Buchstaben = Test der Salinitätsstufen auf Signifikanz bei gleicher Lichtstufe; Großbuchstaben = Test der Lichtstufen auf Signifikanz bei gleicher Salinitätsstufe)

Die RWR_L war ebenfalls signifikant von der Lichtstufe abhängig. Anders als bei der RWR_{BM} lag die RWR_L bei der niedrigsten Lichtstufe mit 1,3 % d^{-1} und der mittleren Lichtstufe mit 1,2 % d^{-1} eng beieinander. Die höchste RWR_L wurde mit 4,5 % d^{-1} bei der höchsten Lichtstufe erreicht. Eine signifikante Abhängigkeit der RWR_L von der Salinität konnte nicht festgestellt werden. Trotzdem entstand bei der Auswertung eine umgekehrt eingipfelige Verteilung der Daten. Die RWR_L verringerte sich von 4,2 % d^{-1} bei 1 PSU über 1,8 % d^{-1} bei 3 PSU bis 1,2 % d^{-1} bei 10 PSU. Bei 15 PSU war die RWR_L mit 2,3 % d^{-1} dann wieder größer. Die zweifaktorielle Analyse ergab eine

minimale RWR_L von $0,3 \% d^{-1}$ bei den Ansätzen $10 \mu E / 1 PSU$. Die maximale RWR_L wurde mit $7,8 \% d^{-1}$ bei den Ansätzen $135 \mu E / 1 PSU$ erreicht. Die einzige Ausnahme, bei der kein Längenwachstum erfolgte, bildeten die Pflanzen der Ansätze $55 \mu E / 3 PSU$ (Abb. 30 – B).

Bei der niedrigsten Lichtstufe betrug der Chl *a*-Gehalt $1119 \mu g FM^{-1}$. Der höchste Gehalt an Chl *a* mit $1858 \mu g FM^{-1}$ wurde in den Versuchsansätzen der mittleren Lichtstufe erreicht. Am geringsten war er mit $935 \mu g FM^{-1}$ bei der höchsten Lichtstufe. Der Gehalt an Chl *a* in den Pflanzen wurde signifikant von der Lichtstufe beeinflusst. Im Hinblick auf die unterschiedlichen Salinitätsstufen konnte ebenfalls eine signifikante Beeinflussung auf den Chl *a*-Gehalt nachgewiesen werden (Tab. 20). Bei 1 PSU lag der Gehalt an Chl *a* bei $1044 \mu g FM^{-1}$. Den geringsten Chl *a*-Gehalt von $727 \mu g FM^{-1}$ enthielten die Pflanzen bei den Versuchsansätzen der Salinitätsstufe 3 PSU. Im Vergleich dazu war bei den Salinitätsstufen 10 und 15 PSU der Gehalt an Chl *a* mehr als doppelt so hoch. Bei 10 PSU waren es $1662 \mu g FM^{-1}$ und bei 15 PSU $1783 \mu g FM^{-1}$. Durch eine zweifaktorielle Betrachtung des Chl *a*-Gehaltes konnte ein Minimum von $505 \mu g FM^{-1}$ bei dem Ansatz $135 \mu E / 1 PSU$ und ein Maximum von $2629 \mu g FM^{-1}$ bei dem Ansatz $55 \mu E / 10 PSU$ ermittelt werden (Abb. 30 – C).

Die NH_4^+ -Konzentration im Wasser war mit $109 \mu mol l^{-1}$ bei der niedrigsten Lichtstufe am höchsten und nahm mit Erhöhung der Lichtstufe ab. Bei der mittleren Lichtstufe lag der Gehalt an NH_4^+ bei $44 \mu mol l^{-1}$. Am niedrigsten war er bei der höchsten Lichtstufe mit einem Gehalt von $14 \mu mol l^{-1}$. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Lichtstufen waren hierbei signifikant (Tab. 20). Die NH_4^+ -Konzentration lag mit $116 \mu mol l^{-1}$ bei der niedrigsten Salinitätsstufe am höchsten. Sie betrug bei 3 PSU nur noch $10 \mu mol l^{-1}$, was weniger als ein Zehntel der Konzentration bei 1 PSU ist. Mit weiter steigender Salinitätsstufe erhöhte sich die NH_4^+ -Konzentration wieder. So lag sie bei 10 PSU bereits bei $26 \mu mol l^{-1}$ und bei 15 PSU bei $71 \mu mol l^{-1}$. Die NH_4^+ -Konzentration zeigte dabei signifikante Unterschiede zwischen den Salinitätsstufen. Auch waren die Unterschiede in Hinblick einer zweifaktoriellen Betrachtung signifikant (Tab. 20). Die minimale NH_4^+ -Konzentration mit $1 \mu mol l^{-1}$ trat bei dem Ansatz $135 \mu E / 3 PSU$ auf. Wohingegen sich die maximale NH_4^+ -Konzentration mit $214 \mu mol l^{-1}$ bei dem Ansatz $10 \mu E / 1 PSU$ befand (Abb. 30 – D).

Photosyntheseparameter

$P_{\max}$ erreichte bei der niedrigsten Lichtstufe einen Wert von $73 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g Chl } a^{-1}$. Sowohl bei der mittleren als auch bei der höchsten Lichtstufe war $P_{\max}$ ähnlich hoch. Bei $55 \mu\text{E}$ lag $P_{\max}$ bei $70 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g Chl } a^{-1}$ und bei $135 \mu\text{E}$ bei $75 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g Chl } a^{-1}$. In Bezug auf die Salinitätsstufen konnte ein Abwärtstrend bei steigender Salinität beobachtet werden. Demzufolge war bei 1 PSU $P_{\max}$ mit $113 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g Chl } a^{-1}$ am größten. Bei 3 PSU lag $P_{\max}$ bereits bei $89 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g Chl } a^{-1}$ und bei 10 PSU hatte $P_{\max}$ nur noch einen Wert von $50 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g Chl } a^{-1}$. Am geringsten jedoch war $P_{\max}$ mit $33 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g Chl } a^{-1}$ bei den Pflanzen aus den Ansätzen mit 15 PSU. Aus der zweifaktoriellen Betrachtungsweise ergab sich ein minimaler $P_{\max}$ -Wert von $29 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g Chl } a^{-1}$ bei den Pflanzen der Ansätze mit $55 \mu\text{E} / 15 \text{ PSU}$. Der maximale Wert von $P_{\max}$ konnte mit $149 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g Chl } a^{-1}$ bei $10 \mu\text{E} / 1 \text{ PSU}$ ermittelt werden (Abb. 31 – A).

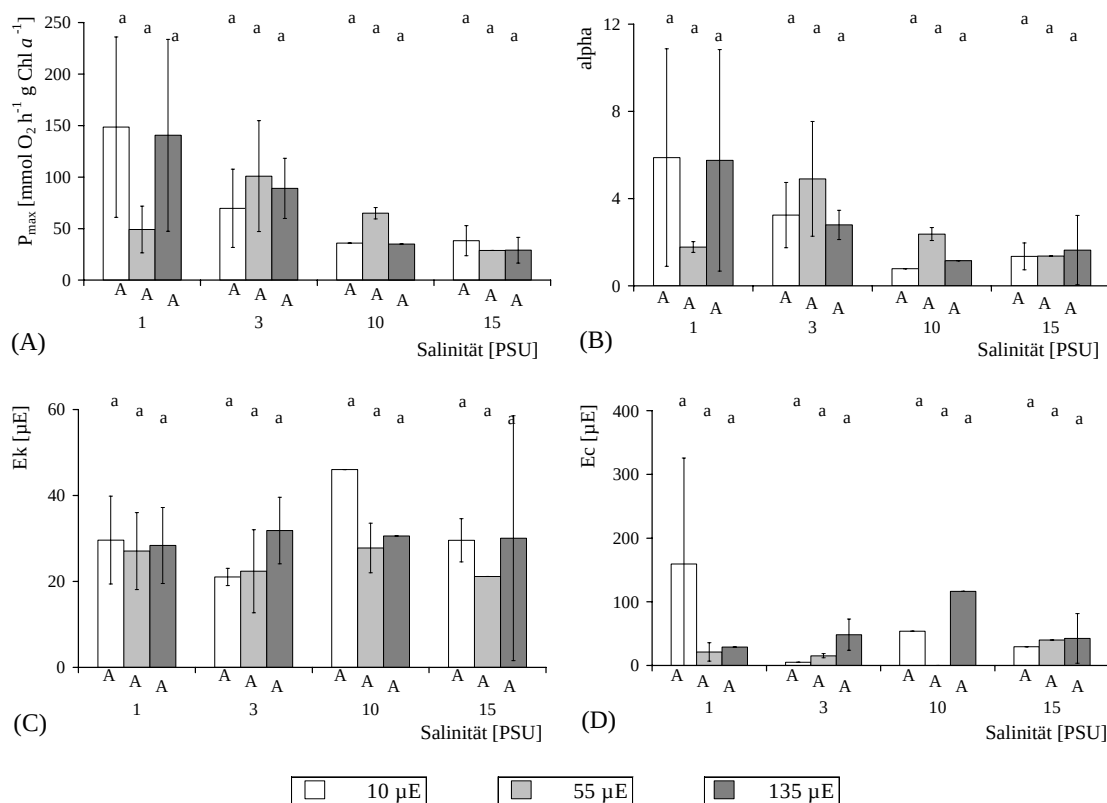


Abb. 31: *Zannichellia palustris* Versuch 1: Photosyntheseparameter (Photosynthesekapazität (A); Photosyntheseeffizienz (B); Lichtsättigungspunkt (C); Lichtkompensationspunkt (D)) in Abhängigkeit von Salzgehalt und Kultivierungs- Lichtintensität. (kleine Buchstaben = Test der Salinitätsstufen auf Signifikanz bei gleicher Lichtstufe; Großbuchstaben = Test der Lichtstufen auf Signifikanz bei gleicher Salinitätsstufe)

Alpha verhielt sich ganz ähnlich wie $P_{\max}$. Auch hier lagen die Werte der verschiedenen Lichtstufen eng beieinander. Bei der niedrigsten Lichtstufe betrug der Wert für alpha 2,9. Bei der mittleren Lichtstufe waren es 3,0 und bei der höchsten Lichtstufe wieder

2,9. Auch in Bezug zu den Salinitätsstufen verhielt sich α wie $P_{\max}$. Mit steigender Salinität verringerte sich der Wert von α . Bei 1 PSU betrug der Wert von α 4,5. Bei 3 PSU lag er bereits bei 3,7 und bei 10 PSU bei 1,7. Am geringsten war α mit 1,5 bei 15 PSU. Die zweifaktorielle Analyse ergab einen minimalen α -Wert von 0,8 bei den Pflanzen der Ansätze mit 10 μE / 10 PSU. Der maximale Wert von α konnte mit 5,9 bei 10 μE / 1 PSU ermittelt werden (Abb. 31 – B).

E_k wurde bei den Ansätzen mit der niedrigsten Lichtstufe bei 30 μE erreicht. Bei der mittleren Lichtstufe lag der E_k -Wert mit 25 μE etwas niedriger und bei der höchsten Lichtstufe lag er wieder bei 30 μE . In Bezug auf die Salinitätsstufen schwankte der E_k -Wert zwischen 26 und 33 μE . Bei 1 PSU lag E_k bei 28 μE . Der minimale Wert für E_k befand sich mit 26 μE bei 3 PSU. Bei 10 PSU betrug E_k 33 μE und bei 15 PSU waren es 29 μE . Aus der zweifaktoriellen Betrachtungsweise ergab sich ein minimaler E_k -Wert von 21 μE bei den Pflanzen der Ansätze mit 10 μE / 3 PSU. Der maximale Wert von E_k konnte mit 46 μE bei 10 μE / 10 PSU ermittelt werden (Abb. 31 – C).

Bei den E_c -Werten kam es zu größeren Schwankungen als bei den Werten für E_k . E_c wurde bei den Ansätzen mit der niedrigsten Lichtstufe bei 33 μE erreicht. Bei der mittleren Lichtstufe lag der E_c -Wert mit 21 μE etwas niedriger und bei der höchsten Lichtstufe erreichte er sein Maximum bei 52 μE . In Bezug auf die Salinitätsstufen schwankte der E_c -Wert zwischen 28 μE (1 und 3 PSU) und 85 μE (10 PSU). Bei 15 PSU wurden 39 μE errechnet. Die zweifaktorielle Analyse ergab einen minimalen E_c -Wert von 5 μE bei den Pflanzen der Ansätze mit 10 μE / 3 PSU. Der maximale Wert von E_c konnte mit 116 μE bei den Ansätzen mit 135 μE / 10 PSU ermittelt werden (Abb. 31 – D).

Status der Lichtakklimatisation

In Abb. 32 (A) ist der Status der Anpassung der Pflanzen an die Lichtintensität, bei der sie kultiviert wurden, dargestellt. $E_{\min}$ betrug dabei 27 μE bei einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,90$. Unter Berücksichtigung der Konfidenzintervalle lag $E_{\min}$ im Bereich von 19 bis 37 μE . Die reale O_2 -Produktion der Pflanzen bei der gegebenen Kultivierungslichtintensität wurde berechnet und in Bezug zu E und E_k dargestellt (Abb. 32 – B/C).

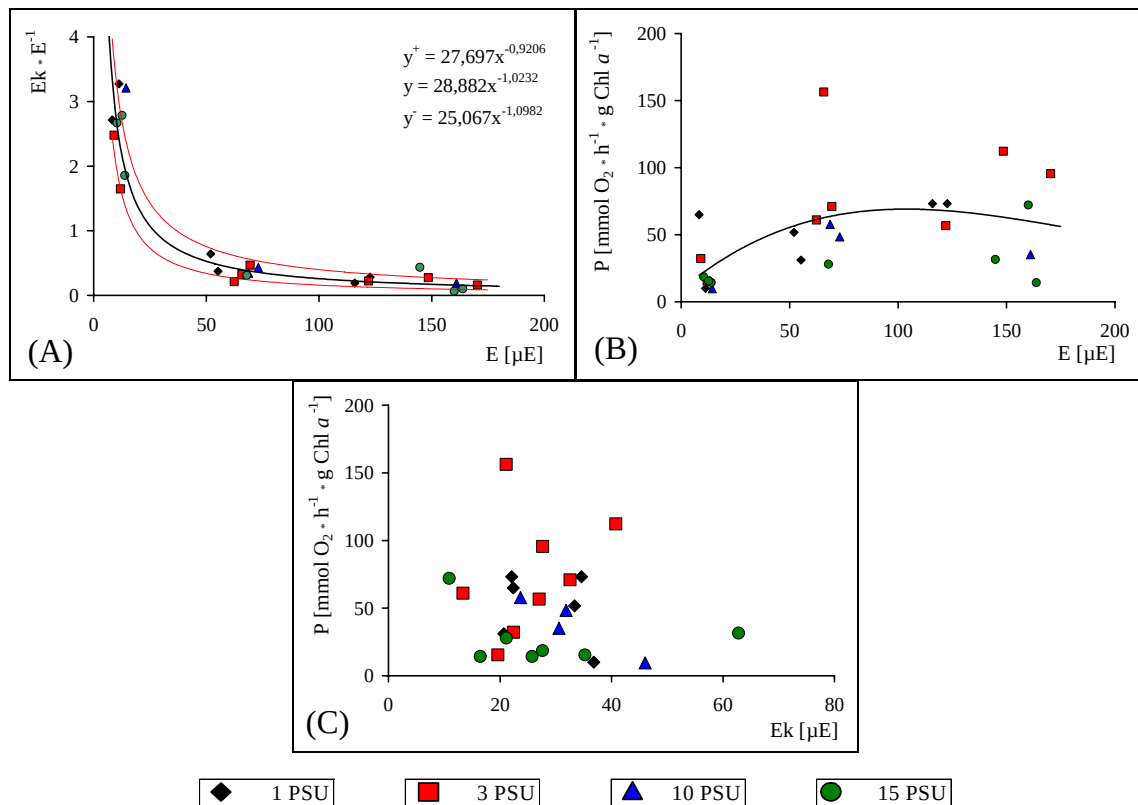


Abb. 32: *Zannichellia palustris* Versuch 1: Ermittlung der minimalen Lichtanforderung $E_{\min}$ (A) $\pm$ Konf. (rot). Die angegebenen Gleichungen entsprechen den dargestellten Kurven (mit y = schwarz; y^- und y^+ = rot). Des Weiteren ist die reale O_2 -Produktion in Abhängigkeit zu E (B) und zu E_k (C) dargestellt.

Zannichellia palustris Versuchsansatz 2

In diesem zweiten Versuchsansatz wurde - analog wie für alle Versuche geplant - eine Lichtdosis von 15 Stunden d^{-1} über den gesamten Versuchszeitraum gegeben. Damit wurden wieder die eigentlichen vorher definierten Versuchsbedingungen erfüllt.

Wachstumsparameter

Die RWR_{BM} zeigte eine signifikante Abhängigkeit von der für die Kultivierung verwendeten Beleuchtungsstärke (Tab. 21).

Tab. 21: *Zannichellia palustris* Versuch 2: F-Test für die Wachstumsparameter (df = Freiheitsgrade; F = Ergebnis des F – Tests; Sig. = Ergebnis der Signifikanzprüfung (mit $\alpha = 0,05$))

Unabhängiger Parameter	Abhängiger Parameter	df	F	Sig.
Lichtstufe	RWR_{BM}	2	32,1313	0,000
	RWR_L	2	4,0312	0,033
	NH_4^+	2	3,5399	0,047

Dabei war bei der niedrigsten Lichtstufe die RWR_{BM} mit 0,2 % d^{-1} am geringsten. Mit steigender Lichtstufe erhöhte sich auch die RWR_{BM} . Bei 55 μE war die RWR_{BM} mit 4,1

% d⁻¹ bereits fast dreimal so hoch. Somit wurde die maximale RWR_{BM} mit 11,3 % d⁻¹ bei der höchsten Lichtstufe von 135 µE erreicht. Die Salinitätsstufen hatten dagegen keinen signifikanten Einfluss auf die RWR_{BM}. Bei 1 PSU lag die RWR_{BM} bei 5,3 % d⁻¹. Mit einer RWR_{BM} von 7,2 % d⁻¹ wurde das Maximum bei den Pflanzen der Ansätze mit 3 PSU erreicht. Bei weiterer Steigerung der Salinitätsstufen verringerte sich die RWR_{BM}. Bei 10 PSU lag sie nur noch bei 5,9 % d⁻¹ und bei 15 PSU waren es nur noch 2,6 % d⁻¹. Eine zweifaktorielle Betrachtung ergab ein Minimum der RWR_{BM} von -1,3 % d⁻¹ bei den Pflanzen der Ansätze mit 10 µE / 10 PSU und ein Maximum von 14,7 % d⁻¹ bei 135 µE / 10 PSU (Abb. 33 – A).

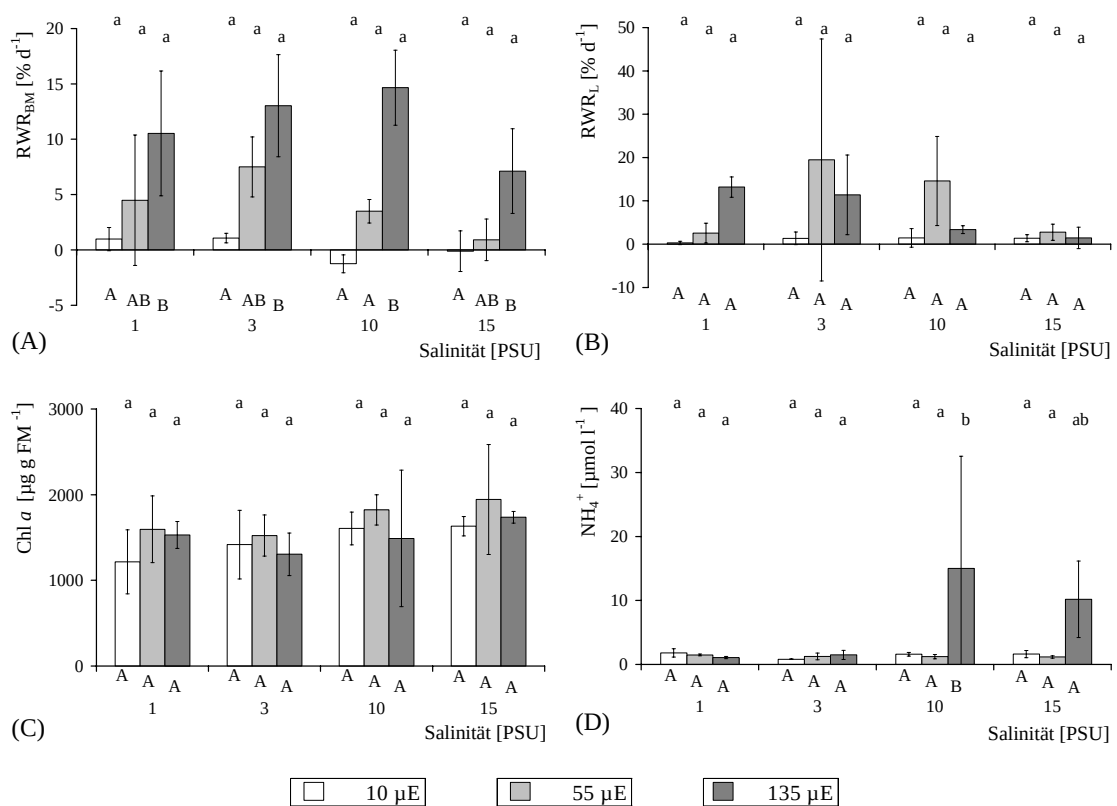


Abb. 33: *Zannichellia palustris* Versuch 2: RWR in Bezug auf die Biomasse (A) bzw. die Länge (B) sowie der Gehalt an Chlorophyll a in den Pflanzen (C) und die Ammoniumkonzentration im Versuchswasser (D) in Abhängigkeit vom Salzgehalt und von der Kultivierungs-Lichtintensität. (kleine Buchstaben = Test der Salinitätsstufen auf Signifikanz bei gleicher Lichtstufe; Großbuchstaben = Test der Lichtstufen auf Signifikanz bei gleicher Salinitätsstufe)

Für die RWR_L konnte ebenfalls eine signifikante Beeinflussung durch die Lichtstufen ermittelt werden (Tab. 21). Im Vergleich der RWR_L der verschiedenen Lichtstufen lag die minimale RWR_L mit 1,1 % d⁻¹ bei der niedrigsten Lichtstufe. Die maximale RWR_L befand sich mit 9,4 % d⁻¹ bei der mittleren Lichtstufe. Unter den Bedingungen der höchsten Lichtstufe lag die RWR_L bei 7,3 % d⁻¹. Eine signifikante Abhängigkeit der RWR_L von der Salinität konnte nicht festgestellt werden. Bei 1 PSU betrug die RWR_L

5,3 % d⁻¹. Das Maximum der RWR_L von 10,7 % d⁻¹ befand sich bei den Pflanzen der Ansätze mit 3 PSU. Bei 10 PSU lag die RWR_L bei 5,4 % d⁻¹ und bei 15 PSU nur noch bei 1,9 % d⁻¹. Mit Hilfe der zweifaktoriellen Analyse ergab sich ein Minimum von 0,3 % d⁻¹ bei den Pflanzen der Ansätze mit 10 µE / 1 PSU und ein Maximum von 19,5 % d⁻¹ bei 55 µE / 3 PSU (Abb. 33 – B).

Ausgehend von den Lichtstufen unterschieden sich die Chl *a*-Konzentrationen nicht signifikant. Die Konzentration bei der niedrigsten Lichtstufe war mit 1468 µg g FM⁻¹ am geringsten. Bei der mittleren Lichtstufe erreichte sie das Maximum von 1707 µg g FM⁻¹. Während der Gehalt an Chl *a* bei der höchsten Lichtstufe auf 1515 µg g FM⁻¹ fiel. Bei Vergleich der Chl *a*-Konzentrationen zwischen den verschiedenen Salinitätsstufen konnten ebenfalls keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Bei 1 PSU lag sie bei 1447 µg g FM⁻¹. Die Konzentration bei 3 PSU fiel mit 1401 µg g FM⁻¹ noch etwas geringer aus, während sie dann mit steigender Salinitätsstufe immer höher lag. Bei 10 PSU waren es 1616 µg g FM⁻¹ und bei 15 PSU dann bereits 1749 µg g FM⁻¹. Die zweifaktorielle Betrachtung ergab ein Minimum von 1216 µg g FM⁻¹ bei den Pflanzen der Ansätze mit 10 µE / 1 PSU und ein Maximum von 1944 µg g FM⁻¹ bei 55 µE / 15 PSU (Abb. 33 – C).

Die NH₄⁺-Konzentration des Versuchswassers war signifikant von der Lichtstufe abhängig (Tab. 21). Dabei lagen die Werte der niedrigsten Lichtstufe mit 1,3 µmol l⁻¹ und der mittleren Lichtstufe mit 2 µmol l⁻¹ dicht beieinander. Dagegen waren die NH₄⁺-Konzentration der Ansätze bei der höchsten Lichtstufe mit 7 µmol l⁻¹ etwa dreimal so hoch. Ausgehend von den Salinitätsstufen waren keine signifikanten Unterschiede in Bezug zur NH₄⁺-Konzentration vorhanden. Bei 1 PSU lag sie bei 2 µmol l⁻¹. Der niedrigste Gehalt an NH₄⁺ lag mit 1 µmol l⁻¹ bei 3 PSU. Der maximale Wert wurde mit 7 µmol l⁻¹ bei 10 PSU erreicht. Bei 15 PSU lag die NH₄⁺-Konzentration bei 5 µmol l⁻¹. Durch die zweifaktorielle Analyse ergab sich ein Minimum von 1 µmol l⁻¹ bei den Pflanzen der Ansätze mit 10 µE / 3 PSU und ein Maximum von 15 µmol l⁻¹ bei 135 µE / 10 PSU (Abb. 33 – D).

Photosyntheseparameter

P_{max} erreichte bei der niedrigsten Lichtstufe einen Wert von 48 mmol O₂ h⁻¹ g Chl *a*⁻¹. Bei der mittleren Lichtstufe lag P_{max} bei 41 mmol O₂ h⁻¹ g Chl *a*⁻¹ und bei der höchsten

Lichtstufe bei $45 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g Chl } a^{-1}$. In Bezug auf die Salinitätsstufen konnte eine signifikante Abhängigkeit zu $P_{\max}$ nachgewiesen werden (Tab. 22).

Tab. 22: *Zannichellia palustris* Versuch 2: F-Test für die Photosyntheseparameter (df = Freiheitsgrade; F = Ergebnis des F – Tests; Sig. = Ergebnis der Signifikanzprüfung (mit $\alpha = 0,05$))

Unabhängiger Parameter	Abhängiger Parameter	df	F	Sig.
Salinität	$P_{\max}$	3	5,8037	0,010
	alpha	3	3,5069	0,046
Lichtstufe	Ek	2	7,0736	0,008
	Ec	2	6,9652	0,009

Bei 1 PSU war $P_{\max}$ mit $58 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g Chl } a^{-1}$ am größten. Am geringsten war $P_{\max}$ mit $34 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g Chl } a^{-1}$ bei 3 PSU. Bei 10 PSU hatte $P_{\max}$ einen Wert von $42 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g Chl } a^{-1}$ und bei 15 PSU $43 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g Chl } a^{-1}$. Aus der zweifaktoriellen Betrachtungsweise ergab sich ein minimaler $P_{\max}$ -Wert von $18 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g Chl } a^{-1}$ bei den Pflanzen der Ansätze mit $55 \mu\text{E} / 10 \text{ PSU}$. Der maximale Wert von $P_{\max}$ konnte mit $77 \text{ mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g Chl } a^{-1}$ bei $135 \mu\text{E} / 10 \text{ PSU}$ ermittelt werden (Abb. 34 – A).

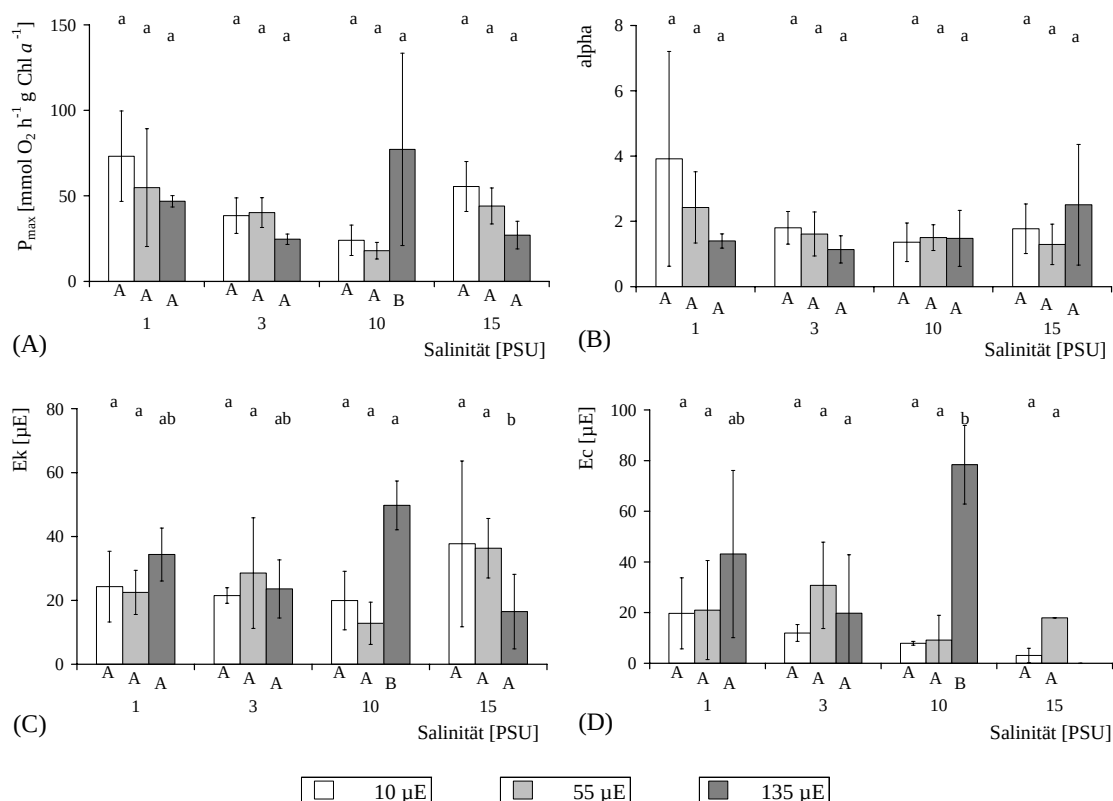


Abb. 34: *Zannichellia palustris* Versuch 2: Photosyntheseparameter (Photosynthesekapazität (A); Photosyntheseeffizienz (B); Lichtsättigungspunkt (C); Lichtkompensationspunkt (D)) in Abhängigkeit von Salzgehalt und Kultivierungs- Lichtintensität. (kleine Buchstaben = Test der Salinitätsstufen auf Signifikanz bei gleicher Lichtstufe; Großbuchstaben = Test der Lichtstufen auf Signifikanz bei gleicher Salinitätsstufe)

Alpha nahm mit steigender Lichtstufe ab. Der Wert von alpha betrug bei der niedrigsten Lichtstufe 2,2. Bei der mittleren Lichtstufe waren es 1,8 und bei der höchsten Lichtstufe 1,6. Bei diesem Versuch konnte eine signifikante Beeinflussung von alpha durch die Salinität festgestellt werden (Tab. 22). Mit steigender Salinität verringerte sich der Wert von alpha bis zu einem Minimum bei 10 PSU. Alpha betrug bei 1 PSU 2,6. Bei 3 PSU lag alpha bereits bei 1,5 und bei 10 PSU bei 1,4. Mit 1,9 lag der Wert von alpha bei 15 PSU etwas höher als bei den beiden vorherigen Salinitätsstufen von 3 und 10 PSU. Aus der zweifaktoriellen Betrachtungsweise ergab sich ein minimaler alpha -Wert von 1,1 bei den Pflanzen der Ansätze mit 135 μE / 3 PSU. Der maximale Wert von alpha konnte mit 3,9 bei 10 μE / 1 PSU ermittelt werden (Abb. 34 – B).

Ek wurde signifikant von der Lichtstufe beeinflusst (Tab. 22). Bei den Ansätzen mit der niedrigsten Lichtstufe wurde der Ek bei 26 μE erreicht. Bei der mittleren Lichtstufe lag der Ek -Wert mit 25 μE etwas niedriger und bei der höchsten Lichtstufe lag er bei 32 μE . In Bezug auf die Salinitätsstufen schwankte der Ek -Wert zwischen 24 und 31 μE . Bei 1 PSU lag Ek bei 27 μE . Der minimale Wert für Ek befand sich mit 24 μE bei 3 PSU. Bei 10 PSU betrug Ek 29 μE und bei 15 PSU waren es 31 μE . Die zweifaktorielle Analyse ergab einen minimalen Ek -Wert von 13 μE bei den Pflanzen der Ansätze mit 55 μE / 10 PSU. Der maximale Wert von Ek konnte mit 50 bei 135 μE / 10 PSU ermittelt werden (Abb. 34 – C).

Bei den Ec -Werten kam es zu größeren Schwankungen als bei den Werten für Ek. In Bezug zu den Lichtstufen zeigte sich ebenfalls eine signifikante Beeinflussung des Ec (Tab. 22). Mit zunehmender Lichtstufe erhöhte sich auch der Ec. Ec wurde bei den Ansätzen mit der niedrigsten Lichtstufe bei 11 μE erreicht. Bei der mittleren Lichtstufe lag Ec mit 20 μE etwas höher und bei der höchsten Lichtstufe erreichte er mit 43 μE das Maximum. In Bezug auf die Salinitätsstufen schwankte der Ec -Wert zwischen 8 und 32 μE . Bei 1 PSU lag Ec bei 30 μE . Einen Wert von 20 μE erreichte Ec bei der Salinitätsstufe von 3 PSU. Bei 10 PSU betrug Ec 32 μE und bei 15 PSU waren es 8 μE . Durch die zweifaktorielle Betrachtungsweise ergab sich ein minimaler Ec -Wert von 3 μE bei den Pflanzen der Ansätze 10 μE / 15 PSU. Der maximale Wert von Ec konnte mit 78 μE bei 135 μE / 10 PSU ermittelt werden (Abb. 34 –D).

Status der Lichtakklimation

Dieser Versuch erbrachte einen minimalen Lichtintensitätsbereich von 13 bis 36 μE für die Pflanzen. Der Erwartungswert für die minimale Lichtintensität lag dabei mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,78$ bei 23 μE (Abb. 35 – A). Die reale O_2 -Produktion der Pflanzen bei der vorhandenen Kultivierungslichtintensität wurde ebenfalls für diesen Versuch berechnet und in Bezug zu E und E_k dargestellt (Abb. 32 – B/C).

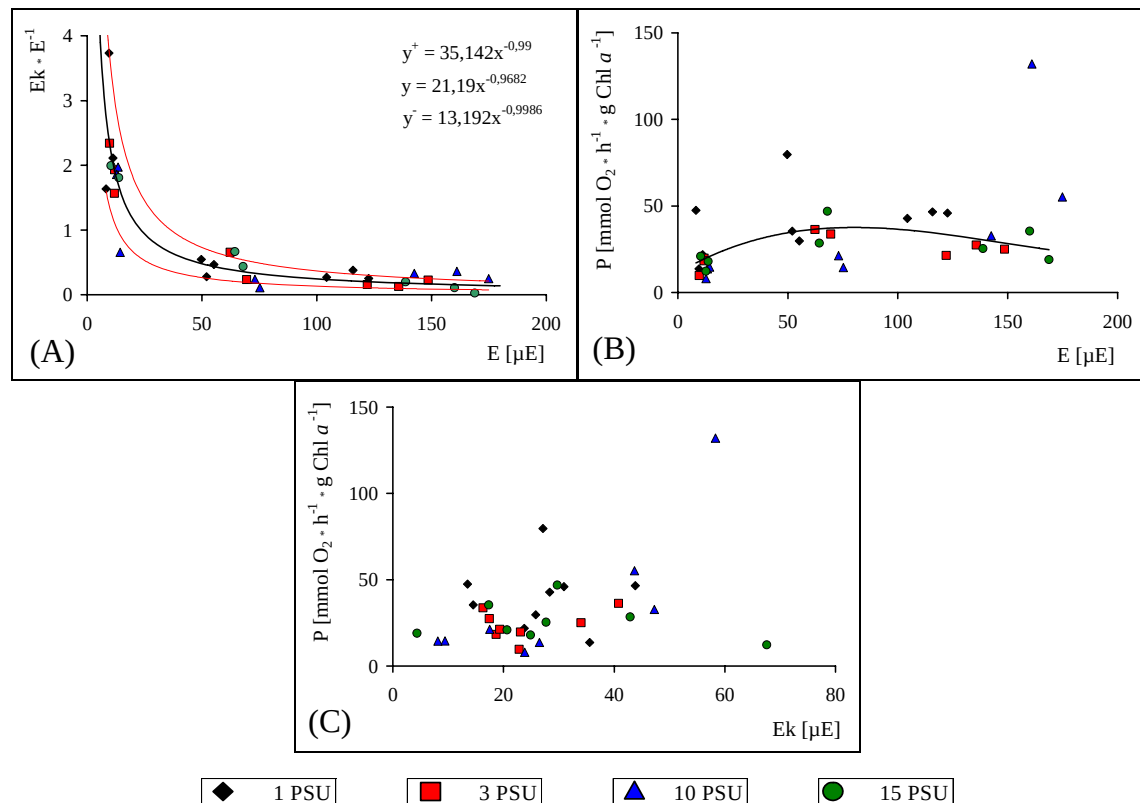


Abb. 35: *Zannichellia palustris* Versuch 2: Ermittlung der minimalen Lichtanforderung $E_{\min}$ (A) $\pm$ Konf. (rot). Die angegebenen Gleichungen entsprechen den dargestellten Kurven (mit y = schwarz; y^- und y^+ = rot). Des Weiteren ist die reale O_2 -Produktion in Abhängigkeit zu E (C) und zu E_k (D) dargestellt.

Zusammenfassung

Zannichellia palustris wuchs bei der höchsten Lichtstufe (135 μE) am stärksten. Selbst bei der niedrigsten Lichtstufe (10 μE) nahmen die Pflanzen an Biomasse und Länge zu, wenngleich dieses Wachstum nahezu bei null lag. Zu einer Übersättigung der Pflanzen durch die hier gegebene höchste Lichtstufe ist es demnach nicht gekommen. *Zannichellia palustris* wuchs bei allen angesetzten Salinitätsstufen ähnlich gut und zeigte sowohl in Bezug zu den Lichtstufen als auch zu den Salinitätsstufen eine breite Toleranz. Allerdings ergibt sich bei Betrachtung der Photosyntheseparameter ein etwas anderes Bild. So waren die $P_{\max}$ -Werte der niedrigsten Lichtstufe ähnlich hoch oder

höher als die der höchsten Lichtstufe. Somit waren die günstigsten Bedingungen bei den Ansätzen mit der höchsten Lichtstufe gegeben. Die Berechnung der minimalen Lichtanforderung ergab einen Bereich von ca. 13 bis 37 μE (Abb. 36).

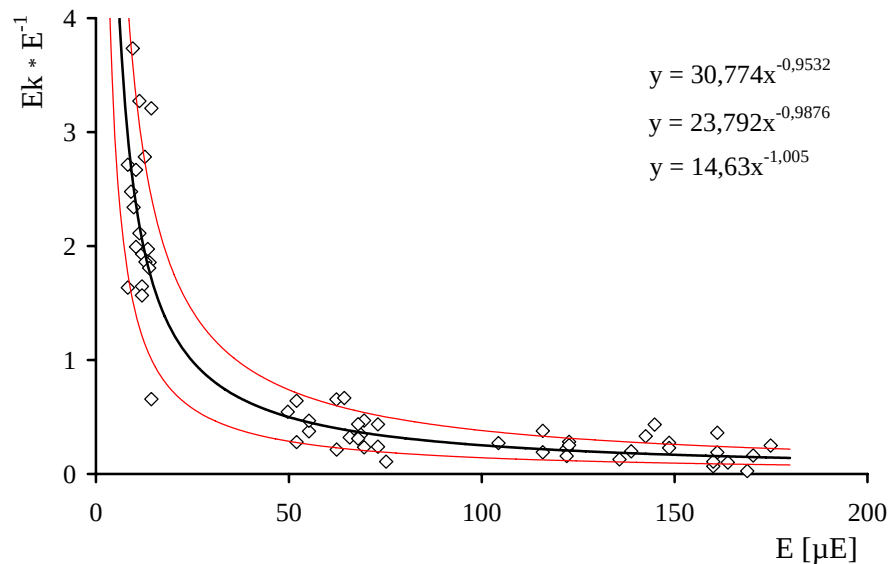


Abb. 36: *Zannichellia palustris*: Ermittlung der minimalen Lichtanforderung von *Zannichellia palustris* durch Auftragen des Quotienten aus E_k und E gegenüber E . $E_{\min}$ ist dabei die Lichtintensität (E), bei der der Quotient von E_k und $E = 1$ ist. Grundlage sind die Daten aller drei Versuche mit *Najas marina* (erwartete $E_{\min}$ (schwarz) $\pm$ Konf. (rot)). Die angegebenen Gleichungen entsprechen den dargestellten Kurven mit y = schwarz; y^- und y^+ = rot)

Aus den berechneten minimalen Lichtanforderungen ($E_{\min}$) für *Zannichellia palustris*, den Globalstrahlungswerten und den Chl a -Gehalten eines Gewässers kann die theoretische untere Verbreitungsgrenze (uVg) ermittelt werden.

Da sowohl die Globalstrahlungsdaten sowie die Chl a -Gehalte nur für den Zingster Strom vorlagen, wurde auch die uVg nur für dieses Gewässer berechnet. Sowohl die Globalstrahlungsdaten als auch die Chl a -Konzentrationen wurden für den Zingster Strom durch die Biologische Station

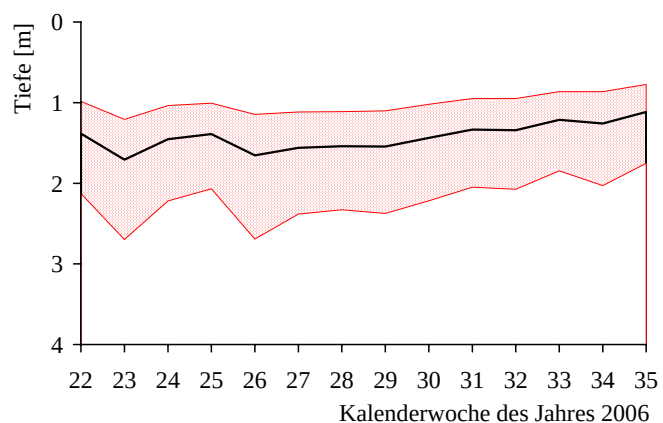


Abb. 37: Theoretische untere Verbreitungsgrenze von *Najas marina* im Zingster Strom. Die schwarze Linie gibt die erwartete Tiefe der unteren Verbreitung an. Mit rot ist der Bereich der uVg gekennzeichnet, der auf den berechneten Konfidenzintervallen (95 %) sowohl der $E_{\min}$ - als auch der k_{PAR} -Werte beruht.

Zingst gemessen. Für den Zingster Strom ist im Jahr 2006 laut der Berechnung eine

theoretische untere Verbreitungsgrenze von *Zannichellia palustris* bei 1,3 m erreicht. Durch Einbeziehung der Konfidenzintervalle der $E_{\min}$ - und k_{PAR} -Berechnung lag diese Grenze zwischen ca. 1 und 2,2 m (Abb. 37).

4. Diskussion

Die Salinität ist ein entscheidender abiotischer Parameter für alle Organismen in den inneren Küstengewässern der deutschen Ostsee. In den verschiedenen Küstengewässern sind unterschiedliche Salinitäten mit zum Teil starken Schwankungen vorhanden. Dabei ist eine Abnahme der Salinität in den Küstengewässern von den westlichen Küstengebieten in Richtung der östlichen Küstengebiete zu erkennen. Außer diesem Gradienten gibt es noch einen weiteren, der eine Zunahme der Salinität vom Landesinneren in Richtung Ostsee zeigt. Bei der Untersuchung der Vegetation der Küstengewässer wurden große Unterschiede hinsichtlich der Morphologie und Salinitätstoleranz zwischen Arten deren Ursprung die limnischen Gebiete sind und Arten die ursprünglich aus dem maritimen Bereich stammen beobachtet (RUSSEL & THOMAS 1988; THOMAS 1990). Demnach sind Arten mit maritimem Ursprung deutlich toleranter gegenüber hohen Salinitäten. Die Salinität beeinflusst den Turgordruck in den Pflanzenzellen und da der Turgordruck die treibende Kraft für das Zellwachstum ist (WINTER & KIRST 1992) demnach auch das Wachstumsvermögen der Pflanze. Dabei sind die Pflanzen in der Lage den Turgordruck mehr oder weniger konstant zu regulieren. Dies erfolgt durch Akkumulation von Na^+ , K^+ , Cl^- und Saccharose (WINTER & KIRST 1992; WINTER et al 1996). Diese von Art zu Art verschiedene Regulationsfähigkeit ist demnach der entscheidende Grund für die unterschiedlichen Salinitätstoleranzen der Arten. Um den Einfluss der verschiedenen Salinitäten auf die Verbreitung der untersuchten Arten entlang der Ostseeküste zu untersuchen, wurden sowohl *Najas marina* als auch *Zannichellia palustris* bei verschiedenen Salinitäten in Laboranlagen kultiviert. Die gewonnenen Ergebnisse wurden im Anschluss daran mit den im Freiland vorgefundenen Verbreitungsspektren verglichen.

Bei den Versuchen mit *Najas marina* nahmen die Pflanzen bei den Versuchsansätzen der Salinitätsstufen von 3 bis 10 PSU an Biomasse zu, während die Pflanzen der Versuchsansätze mit 1 und 15 PSU keinen Biomassezuwachs aufwiesen und sich demnach außerhalb ihres Toleranzbereiches hinsichtlich der Salinität befanden. Die untere Toleranzgrenze lag also zwischen 1 und 3 PSU und die obere zwischen 10 und 15 PSU. Die größte RWR_{BM} erfolgte bei den Versuchsansätzen mit 7 PSU. Somit kann davon ausgegangen werden, dass diese Salinitätsstufe der optimalen Salinität am

nächsten war. Dies wurde auch durch die Messung der RWR_L bestätigt. Beim Vergleich der Pflanzen zwischen den Salinitätsstufen nahm die Länge annähernd proportional der Biomasse zu. Die Auswirkungen der Salinität auf den Chl a –Gehalt ist relativ gering. Allerdings ist aus den Ergebnissen eine leichte Zunahme des Chl a -Gehaltes bei den Pflanzen gemessen worden, die außerhalb des Toleranzbereiches wuchsen. So war die Chl a –Konzentration der Pflanzen, die bei 1 und 15 PSU kultiviert wurden höher als bei den Pflanzen aus den 3 und 10 PSU Ansätzen. Die Photosynthesekapazität war dagegen bei den Pflanzen, der Ansätze mit 3 und 10 PSU höher als die der Ansätze mit 1 und 15 PSU. Die Pflanzen außerhalb des Toleranzbereiches benötigen somit eine größere Anzahl an Lichtpigmenten um die verringerte Photosynthesekapazität abzufangen und auszugleichen, was sich wiederum mit den Ergebnissen aus den Chl a –Konzentrationsmessungen deckt. Diese verminderte Effizienz der Pflanzen aus den Ansätzen mit 1 und 15 PSU bestätigen damit auch den aus den RWR abgeleiteten Toleranzbereich. Die Messung der Lichtsättigungspunkte zeigte keine relevante Beeinflussung durch die Salinität. Die hier aufgezeigten Ergebnisse konnten jedoch nicht mittels statistischer Berechnungen als signifikant bestätigt werden und gelten demzufolge auch als nicht bewiesen. Unterstützt werden die Ergebnisse durch ähnliche Arbeiten an andere Arten. So wurde z.B. *Chara aspera* durch BLINDOW (2003) untersucht, was im Ergebnis ebenfalls eine erhöhte Biomasse und P_{max} im mittleren Bereich (5 - 10 PSU) der Salinitätstoleranz (0 - 20 PSU) von *Chara aspera* ergab.

Auch für *Zannichellia palustris* erfolgte die Untersuchung der Verbreitung hinsichtlich der Salinität anhand von Laborversuchen mit verschiedenen Salinitäten. Die Biomasse der Pflanzen nahm hier bei allen Salinitätsstufen zu. Allerdings war die RWR_{BM} sowohl bei den Pflanzen der Ansätze der höchsten Salinitätsstufe von 15 PSU als auch bei denen der niedrigsten Salinitätsstufe von 1 PSU geringer als es bei den Pflanzen der dazwischen liegenden Salinitäten von 3 und 10 PSU. Dies spricht analog zu den Ergebnissen von *Najas marina* für ein Optimumsbereich bei diesen Salinitäten. Die Pflanzen aller Salinitätsstufen wuchsen demnach in Medien, deren Salinitäten innerhalb des Toleranzbereiches von *Zannichellia palustris* lagen. Somit ist davon auszugehen, dass die untere Toleranzgrenze bei einer Salinität von weniger als 1 PSU erreicht sein würde und die obere Toleranzgrenze bei etwas über 15 PSU liegt. Der optimale Bereich für ein Biomassewachstum lag bei Salinitäten von 3 bis 10 PSU. Dass die für die Versuche verwendeten Salinitätsstufen innerhalb des Toleranzbereiches von *Zannichellia palustris* lagen wurde zusätzlich auch durch die RWR_L bestätigt, da auch

die Länge der Pflanzen bei allen benutzten Salinitätsstufen zunahm. Der Gehalt an Chl *a* in den Pflanzen war bei den Versuchsansätzen mit 3 PSU am niedrigsten. Die Chl *a* – Konzentration der übrigen Ansätze waren nur geringfügig und nicht signifikant höher. Dies lässt vermuten, dass die Pflanzen der Ansätze mit 3 PSU unter nahezu optimalen Bedingungen kultiviert wurden. Denn sie hatten die geringste Menge an Chl *a* und brauchten demzufolge auch die geringste Energiemenge für den Aufbau von Biomasse, da im Vergleich mit den Pflanzen der anderen Salinitätsstufen die RWR_{BM} und die RWR_L teilweise annähernd gleich hoch war. Daraus lässt sich schließen, dass die Pflanzen die gewonnene Energie effizienter in Biomasse umsetzten. Die P_{max} –Werte verhielten sich nahezu proportional der Chl *a* -Konzentrationen. Somit war bei 3 PSU ebenfalls die P_{max} am niedrigsten. Das widerspricht jedoch der Vermutung, dass bei 3 PSU das Optimum liegt. Denn obwohl die RWR im Vergleich mit den anderen Pflanzen fast am höchsten war, bedeutet eine niedrige P_{max} eine verminderte Photosyntheserate und damit ein verringertes Wachstum. So wurde durch BLINDOW (2003) die höchste P_{max} bei den Pflanzen (*Chara aspera*), die unter optimalen Salinitätsbedingungen kultiviert wurden, gemessen. Das Ergebnis aus den Laborversuchen mit *Zannichellia palustris* könnte aber auch so gedeutet werden, dass die Pflanzen bei 3 PSU dem geringsten Stress ausgesetzt waren und die Photosynthese besonders effektiv für das Wachstum genutzt wurde. Die Pflanzen der Ansätze mit den Salinitäten 1, 10 und 15 PSU befanden sich abseits ihres optimalen Bereiches und mussten einen Teil der aus der Photosynthese gewonnenen Energie in die Stressbewältigung investieren. Somit verblieb dann auch weniger Energie für das Wachstum. Das P_{max} von der Salinität beeinflusst wird, konnte in diesen Versuchen sogar anhand statistischer Analysen signifikant belegt werden. Zusammenfassend ist für *Zannichellia palustris* zu sagen, dass die Salinitätsstufen der Laborversuche nicht die Toleranzgrenzen umfassten, sondern innerhalb des Toleranzbereiches lagen. Für eine exaktere Ermittlung des Toleranzbereiches müssten demnach weitere Versuche mit Salinitäten unter 1 und über 15 PSU erfolgen.

Da die Laborversuche mit *Najas marina* und *Zannichellia palustris* jeweils mit dem gleichen Versuchsaufbau durchgeführt wurden, können die Ergebnisse auch ohne weiteres miteinander verglichen werden. Wenn man nun die Toleranzbereiche von *Najas marina* mit denen von *Zannichellia palustris* vergleicht, wird deutlich, dass *Zannichellia palustris* ein wesentlich breiteres Spektrum im Toleranzbereich bezüglich der Salinität besitzt als *Najas marina*. Somit ist *Zannichellia palustris* also eine

euryhaline und *Najas marina* eine stenohaline Art. Demzufolge sollte *Zannichellia palustris* auch an mehr Standorten der deutschen Ostseeküste vorzufinden sein. Nun wäre es aber möglich, dass sich die Pflanzen bereits an die Bedingungen der Standorte, an denen sie entnommen wurden, angepasst haben und demzufolge eine Verschiebung bzw. Veränderung des Toleranzbereiches nicht auszuschließen ist. In BLINDOW (2003) konnten ökophysiologische Unterschiede hinsichtlich der Salinitätstoleranz und des Lichtbedarfs zwischen Populationen von *Chara aspera* aus Frischwasserhabitaten und solchen aus Brackwasserhabitaten festgestellt werden. In RITZL (2000) werden anhand von *Chara tomentosa* ebenfalls ökotypische Differenzen zwischen Frisch- und Brackwasserformen aufgezeigt. Dabei wurden die gefundenen Unterschiede aufgrund von mehrwöchigen Inkubationszeiten nicht alleine auf Akklimatisationsvorgänge sondern auch auf genetische Differenzierungen zurückgeführt. Um die Hypothese zu untermauern, dass *Zannichellia palustris* entlang der Ostseeküste aufgrund des unterschiedlichen und vor allem breiteren Toleranzbereiches weiter verbreitet ist als *Najas marina*, wurden auf Grundlage der aus den Laborversuchen festgestellten Toleranzbereiche und der an den jeweiligen Küstengewässern gemessenen Salinitäten die potentiellen Vorkommen in diesen Gewässern ermittelt und mit den rezenten Vorkommen verglichen (Tab. 23). Des Weiteren diente dieser Vergleich der Überprüfung, ob die Salinität der entscheidende Umweltfaktor für die Verbreitung entlang der deutschen Ostseeküste ist.

Tab. 23: Vergleich von potentieller und rezenter Verbreitung von *Najas marina* und *Zannichellia palustris* in Abhängigkeit der Salinität. Wobei das potentielle Vorkommen unter Berücksichtigung der 25 und 75 Perzentilwerte der in den jeweiligen Gewässern gemessenen Salinitäten und den aus den Laborversuchen ermittelten artspezifischen Toleranzbereichen hinsichtlich der Salinität bestimmt wurde. Die Daten für die rezenten Vorkommen stammen aus den in Tab. 3 (S.17) erhobenen Vegetationsaufnahmen (min = Minimum; max = Maximum; 25 Perc = 25 Perzentil; 75 Perc = 75 Perzentil; pV = potentielles Vorkommen; rV = rezentes Vorkommen; „x“ / „X“ = positiv; „-“ = negativ). Das Abkürzungsverzeichnis für die untersuchten Gewässer befindet sich in Tab. 2 (S.16)

Gewässer	gemessene Salinitäten [PSU]				Zannichellia palustris		Najas marina	
	min	25 Perc.	75 Perc.	max	pV	rV	pV	rV
FF	11,20	16,90	20,88	25,30	-	-	-	-
IS	3,17	6,01	8,18	10,38	x	x	-	-
MS	4,41	8,24	10,40	14,13	X	-	-	-
AS	8,92	12,59	15,50	19,91	x	x	-	-
UT	6,63	9,91	13,49	15,08	x	x	-	-
WB	9,90	11,90	14,80	19,70	x	x	-	-
SH	10,40	11,65	13,20	16,50	x	x	-	-
SB	2,30	2,83	3,90	5,70	X	-	x	x
BO	3,10	4,33	5,58	7,90	x	x	x	x
BA	3,90	5,50	7,30	9,80	x	x	x	x
GR	5,70	6,80	8,20	11,30	X	-	-	-
KB	6,50	7,63	9,30	11,00	X	-	-	-
WI	7,00	8,48	9,63	11,80	x	x	-	-
BR	7,80	8,30	8,90	11,90	X	-	-	-
GJB	7,40	7,88	8,20	8,70	x	x	-	-
SS	6,40	6,90	8,50	10,60	x	x	-	-
GB	5,90	6,80	7,40	9,30	x	x	x	x
PS	0,60	1,50	3,20	6,90	X	-	-	-
AW	0,40	0,90	1,70	3,90	-	-	-	-
KH	0,50	1,03	1,80	3,50	x	x	-	-

Für *Najas marina* erbrachte dieser Vergleich eine 100 %ige Übereinstimmung der aus den Laborversuchen ermittelten potentiellen mit denen der rezent nachgewiesenen Vorkommen. Die Verbreitung von *Najas marina* ist auf vier Gewässer beschränkt. Das sind innerhalb der Darß-Zingster-Boddenkette (DZBK) der Saaler Bodden (SB), der Bodstedter Bodden (BO) und der Barther Bodden (BA). Bei dem vierten Gewässer, auf das *Najas marina* bezüglich der Verbreitung beschränkt ist, handelt es sich um den Greifswalder Bodden (GB). Diese Verbreitung wurde auch durch historische Belege bestätigt. So wurde *Najas marina* seit 1851 nur in den Gewässern der Darß – Zingster – Boddenkette (DZBK) und des Greifswalder Bodden vorgefunden (Tab. 24). Für weiter zurückreichende Zeiträume können aufgrund von fehlenden Daten keine Aussagen gemacht werden.

Tab. 24: Historische Nachweise von *Najas marina* erstellt aus Daten von BLÜMEL 2002

Gewässer	Zeitraum
Darß-Zingster-Boddenkette (DZBK) (bis 5 PSU)	1851-1900 >1951
Darß-Zingster-Boddenkette (DZBK) (5-8 PSU)	1851-1900 >1951
Greifswalder Bodden (GB)	1851-1901 >1951

Aufgrund der guten Übereinstimmung der potentiellen mit den rezenten und den historischen Vorkommen, ist der aus den Laborversuchen ermittelte Toleranzbereich für *Najas marina* durchaus als Maß für die Verbreitungsgrenzen anzusehen. Dieses bestätigt damit den aus den Laborversuchen ermittelten Toleranzbereich und zeigt, dass *Najas marina* nur in den Gewässern vorkommen kann, die mit ihrer Salinität innerhalb dieses Toleranzbereiches liegen.

Beim Vergleich der potentiellen mit den rezent nachgewiesenen Vorkommen (Tab. 23) für *Zannichellia palustris* wurden alle rezenten Nachweise auch als potentiell möglich ausgewiesen. Die einzigen Gewässer in denen laut der ermittelten potentiellen Vorkommen *Zannichellia palustris* nicht wachsen sollte sind die Flensburger Förde und das Achterwasser. In allen anderen Gewässern ist ein Vorkommen zumindest aufgrund der Salinität nicht auszuschließen. Jedoch wurden in sechs Fällen auch potentiell mögliche Vorkommen aufgezeigt, die rezent nicht nachgewiesen wurden. Dabei handelt es sich im Einzelnen um die Gewässer mittlere Schlei (MS), Saaler Bodden (SB), Grabow (GR), Kubitzer Bodden (KB), Breetzer Bodden (BR) und Peenestrom (PS). Historische Nachweise (Tab. 25) erlauben bezüglich dieser sechs Gewässer leider keine Aussagen, ob *Zannichellia palustris* in der Vergangenheit dort vorhanden war.

Tab. 25: Historische Nachweise von *Zannichellia palustris* erstellt aus Daten von MERTENS 2006

Gewässer	Zeitraum
Orther Bucht (OB)	>1950
Äußere Schlei (AS)	1851-1900 1901-1950
Wismarbucht (WB) & Salzhaff (SH)	1851-1900 >1951
Darß-Zingster-Boddenkette (DZBK) (bis 5 PSU)	>1951
Darß-Zingster-Boddenkette (DZBK) (5-8 PSU)	>1951
Greifswalder Bodden (GB)	>1951

Das *Zannichellia palustris* in diesen sechs Gewässern vorkommen sollte, dort aber nicht nachgewiesen wurde kann verschiedene Ursachen haben. Ein Grund dafür wäre z.B. die sehr unterschiedliche und teilweise geringe Beprobungshäufigkeit oder aber eine allgemein geringe Deckung (Tab. 12 und Tab. 13 auf S.39/40). Allerdings ist im Vergleich der Beprobungshäufigkeit sowie der Gesamtdeckung dieser Gewässer mit denen der übrigen Gewässer kein erheblicher Unterschied feststellbar, der das Fehlen von *Zannichellia palustris* erklären würde. Ein Vergleich der Salinitäten, Sichttiefen und Chl *a* -Gehalte (Abb. 12 auf S.37) dieser Gewässer mit den Gewässern, in denen *Zannichellia palustris* auch rezent nachgewiesen wurde, erbrachte ebenfalls keine erheblichen Unterschiede, welche das fehlende Vorkommen erklären könnten. Eine somit wahrscheinlichere Möglichkeit, die die Unterschiede zwischen potentiellen und rezenten Vorkommen begründen könnte, ist der Einfluss eines oder mehrerer weiterer Umweltfaktoren.

Aufgrund der Übereinstimmung der potentiellen mit den rezenten und auch den historischen Vorkommen kann der aus den Laborversuchen ermittelte Toleranzbereich bezüglich der Salinität für *Zannichellia palustris* ebenfalls als Maß für die Verbreitungsgrenzen genutzt werden. Somit ist auch *Zannichellia palustris* an Verbreitungsgrenzen bezüglich der Salinität gebunden und kann demnach auch nicht in Gewässern die außerhalb dieser Verbreitungsgrenzen liegen vorkommen. Anders als bei *Najas marina* gilt hierbei jedoch die Einschränkung, dass ein Teil des Toleranzbereiches ermittelt wurde, jedoch der Bereich der außerhalb dieses Toleranzbereiches liegt nicht erfasst werden konnte. Des Weiteren scheint für *Zannichellia palustris* noch wenigstens ein weiterer Faktor einen wesentlichen Einfluss auf die rezente Verbreitung in den Küstengewässern auszuüben. Einer dieser Umweltfaktoren, denen ein großer Einfluss bezüglich der Verbreitung der Makrophyten nachgesagt wird ist die Lichtverfügbarkeit.

Die Lichtverfügbarkeit begrenzt das Vorkommen einer Art auf einen bestimmten Tiefenbereich. Bei geringer Lichtverfügbarkeit, d.h. bei geringer Intensität der PAR und/oder einem hohen Anteil Licht absorbierender Bestandteile (u.a. Gelbstoffe, Phytoplankton) im Wasser, wird die untere Vegetationsgrenze in Richtung Wasseroberfläche verschoben. Damit steht den Arten ein kleineres Areal zur Besiedlung zur Verfügung und der inter- und intraspezifische Konkurrenzdruck wird erhöht. Der Vergleich der Toleranzbereiche hinsichtlich der Lichtanforderungen zwischen den aus den Verbreitungsanalysen und den aus den Laborversuchen erbrachten Ergebnissen

gestaltet sich schwieriger als der Vergleich bezüglich der Salinität. Der Grund dafür sind fehlende Messdaten der Globalstrahlung für die jeweiligen Untersuchungszeiträume, also die Zeiträume an denen die Vegetationsaufnahmen erfolgten. Bei den Verbreitungsanalysen war nur die Angabe von Anteilen der Lichtintensität in Vertiefungstiefe an der Lichtintensität auf der Wasseroberfläche möglich. In den Laborversuchen war es dagegen nur möglich die absoluten Lichtintensitäten für die Ermittlung der artspezifischen Lichtanforderungen zu bestimmen. Um die Verbreitung der untersuchten Arten anhand der artspezifischen minimalen Lichtansprüche erklären zu können, wurden Laborversuche mit drei unterschiedlichen Lichtintensitäten (10, 55, 135 μE) für die Kultivierung durchgeführt. Eine andere Möglichkeit zur Bestimmung der minimalen Lichtanforderung erfolgte mittels Berechnung über die Lichtsättigungspunkte (E_k) und den Kultivierungslichtintensitäten (E). Der Lichtsättigungspunkt E_k wird als die Lichtintensität definiert, bei der eine Balance zwischen der Rate der Lichtabsorption und der photochemischen Elektronentransportrate besteht. E_k wird daher von verschiedenen Autoren als ein zweckmäßiger Indikator für die Beschreibung der Photoakklimatisation angesehen (SAKSHAUG et al. 1997; HAMMER et al., 2002). Zwar werden deshalb in vielen Forschungsberichten die E_k –Werte und teilweise auch die E_c –Werte angegeben, doch aufgrund der starken Abhängigkeit der E_k –Werte von den Lichtintensitäten als auch der E_c –Werte von den sehr variablen Respirationsraten wurde in dieser Arbeit die durch Einbeziehung der Kultivierungslichtintensität unabhängigeren $E_{\min}$ -Werte gewählt. Dabei entsprechen die $E_{\min}$ -Werte den Lichtintensitäten, an die sich die Pflanzen vollständig akklimatisiert hatten (SCHUBERT et al. 2004). Bei diesen Lichtintensitäten waren also die Photosynthesezentren der Pflanzen gesättigt und dadurch konnte die Sonnenenergie mit einer hohen Effizienz für das Wachstum genutzt werden. Demzufolge waren sie auch keinem energetisch ungünstigen Zustand ausgesetzt bzw. konnten diesen kompensieren und waren somit auch in der Lage den Einfluss anderer Faktoren zu mindern. Eine erhöhte Effizienz der Energienutzung bedeutet auch eine erhöhte Fitness und Konkurrenzfähigkeit (SCHUBERT et al. 2004). Der Begriff der minimalen Lichtanforderung ist in diesem Fall ungünstig gewählt, da es sich ja eher um die optimale Lichtanforderung handelt. Eine Abweichung der gegebenen Lichtintensitäten von dieser minimalen Lichtanforderung ist gleichbedeutend mit einer Erhöhung des Stresses. Dabei ist zu beachten, dass Pflanzen in der Lage sind erhöhte Lichtintensitäten durch Schutzmechanismen zu

kompensieren. Dies geschieht z.B. durch die Verlagerung der Chloroplasten von hoch absorbierenden zu gering absorbierenden Positionen (HANELT & NULTSCH 1991). Auch die Produktion von Lichtschutzpigmenten (u.a. α - / β - Carotin), der Xanthophyllzyklus, die Umwandlung und Abgabe der Energie in Form von Wärme oder die Mechanismen des nonphotochemischen Quenchings bewirken den Schutz vor zu hoher Strahlungs- / Lichtintensität und damit vor der Photoinhibition (DEMMIG-ADAMS & ADAMS 1992; HANELT et al. 1994). Die Photoinhibition beeinflusst dabei sowohl P_{max} als auch α . Dies kann sowohl durch Abkopplung der Reaktionszentren von der Elektronentransportkette, durch vermehrte Inaktivierung der Reaktionszentren als auch durch die Limitation von Prozessen des Calvin Zyklus hervorgerufen werden (HANELT et al. 1996). Lichtintensitäten unterhalb von E_{min} hingegen können nur durch erhöhte Produktion von Lichtsammelpigmenten (u.a. Chlorophyll a / b; Lutein) und Photosyntheseapparaten kompensiert werden, was allerdings auch einen erhöhten Energieaufwand bedeutet (IHNKEN 2004). Der erhöhte Energieaufwand wirkt sich dementsprechend auf das Wachstum und damit auf die Lebensfähigkeit der Pflanzen aus. Aufgrund dessen können die Pflanzen Lichtintensitäten die höher sind als E_{min} besser ertragen als Lichtintensitäten die geringer sind als E_{min} .

Für *Najas marina* ergaben die Laborversuche eine Zunahme der Biomasse ausschließlich bei der mittleren und der höchsten Lichtstufe. Die höchste RWR_{BM} erfolgte bei den Pflanzen, die unter den höchsten Lichtintensitäten kultiviert wurden. Dagegen zeigten die Pflanzen der niedrigsten Lichtstufe in fast allen Fällen keine Biomassezunahme. Die niedrigste Lichtstufe lag demnach unterhalb der minimalen Lichtanforderung. Eine Beeinträchtigung durch zu hohe Lichtintensitäten konnte nicht festgestellt werden, da die RWR_{BM} ja bei der höchsten Lichtstufe auch am größten war. Allerdings waren die Chl a –Konzentrationen bei den Pflanzen der höchsten Lichtstufe etwas geringer als bei denen der mittleren Lichtstufe, aber größer als bei den Pflanzen der niedrigsten Lichtstufe. Das kann daran liegen, dass die Pflanzen bei der höchsten Lichtstufe effizienter arbeiteten und überschüssiges Material abgebaut haben. Es ist jedoch wahrscheinlicher, dass es sich dabei bereits um die ersten Schutzmechanismen gegen eine energetische Überlastung handelt. Denn durch den Abbau von Antennenpigmenten wird die Energieaufnahme der Photosyntheseapparate reduziert und dadurch verhindert, dass diese geschädigt werden. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass sich die Pflanzen der höchsten Lichtstufe bereits im Bereich der Übersättigung befanden, wobei es aufgrund der Schutzmechanismen (siehe S.81) zu

keine Schädigungen der Pflanzen gekommen ist. Dies wurde auch durch $P_{\max}$ und α bestätigt. Bei der niedrigsten Lichtstufe betrug $P_{\max}$ teilweise nur 50% der Werte, die bei den Pflanzen der anderen Lichtstufen gemessen wurden, während die Werte der mittleren und der höchsten Lichtstufe sich trotz der verschieden starken Lichtintensitäten kaum unterschieden. Da $P_{\max}$ sich eigentlich proportional zur Lichtintensität verhält, ist es hier zu einer Photoinhibition gekommen (LIBBERT & WALTER 1985). Dabei waren die Auswirkungen der Photoinhibition nicht sehr groß, da die Pflanzen der höchsten Lichtstufe trotzdem eine höhere RWR_{BM} hatten als die Pflanzen der mittleren Lichtstufe. Ein α war bei den Pflanzen der niedrigsten Lichtstufe zum Teil doppelt so hoch wie die α -Werte der Pflanzen, die bei den anderen beiden Lichtstufen ermittelt wurden. Auch dabei waren die α -Werte der mittleren und der höchsten Lichtstufe relativ gleich groß. Demnach lagen die Lichtintensitäten der Versuchsansätze der mittleren als auch die der höchsten Lichtstufe (trotz Photoinhibition) innerhalb des Toleranzbereiches bezüglich der Lichtintensität. Die Pflanzen der niedrigsten Lichtstufe befanden sich dagegen unterhalb dieses Toleranzbereiches. Somit kann daraus geschlossen werden, dass die untere Toleranzgrenze hinsichtlich der minimalen Lichtanforderung im Bereich zwischen 10 und 55 μE liegen muss. Die minimale Lichtanforderung wurde wie bereits erwähnt auch mittels E_k und E berechnet. Diese Berechnung ergab eine minimale Lichtanforderung ($E_{\min}$) zwischen 10 und 58 μE mit einer mittleren minimalen Lichtanforderung von 28 μE (Abb. 28 auf S.60). Die absolute untere Grenze liegt demnach bei 10 μE . Dies bedeutet auch, dass *Najas marina* im Verbreitungsgebiet bis in Tiefen vordringen kann, in denen noch eine Lichtintensität von ca. 10 μE vorhanden ist.

Die Versuche mit *Zannichellia palustris* erbrachten Ergebnisse, die denen aus den Versuchen mit *Najas marina* ähnelten. Ein wesentlicher Unterschied ergaben die RWR_{BM} . So erfolgte zwar auch hier bei der höchsten Lichtstufe die größte Zunahme der Biomasse, jedoch nahm sie auch bei der niedrigsten Lichtstufe zu. Die RWR_{BM} erreichte bei den Pflanzen der niedrigsten Lichtstufe nur etwa 10% des Wertes, den die Pflanzen der höchsten Lichtstufe hatten. Die zugeführte Strahlungsenergie der niedrigsten Lichtstufe reichte demnach für ein Wachstum der Pflanzen aus. Da die Pflanzen der Ansätze mit der geringsten Lichtstufe nur eine geringe Zunahme der Biomasse zeigten, kann aber davon ausgegangen werden, dass die untere Toleranzgrenze hinsichtlich der minimalen Lichtanforderung nur geringfügig unterhalb von 10 μE liegt. Der Chl *a* -Gehalt und $P_{\max}$ waren bei den Versuchsansätzen mit der

mittleren Lichtstufe am höchsten. Dies bedeutet eine Abnahme dieser beiden Parameter bei der höchsten Lichtstufe und wie schon bei den Versuchen mit *Najas marina* eine mögliche Übersättigung der Photosyntheseapparate durch zu hohe Lichtintensitäten. Auch bei den Versuchen mit *Zannichellia palustris* wies diese wahrscheinliche Übersättigung keine negative Wirkung auf das Wachstum auf. Deshalb mussten auch in diesen Versuchen Schutzmechanismen gegriffen haben. Diese Schutzmechanismen wurden bereits analog hierfür bei den Versuchen mit *Najas marina* diskutiert (siehe S.81). Für *Zannichellia palustris* lagen alle in den Versuchen benutzten Lichtstufen (10, 55, 135 μE) innerhalb des Toleranzbereiches. Die Berechnung der minimalen Lichtanforderung (Abb. 36, S.72) zeigten keine besonders großen Abweichungen von den Ergebnissen der Laborversuche. Die berechnete minimale Lichtanforderung reichte von 14 bis 36 μE , wobei sich der mittlere Wert für $E_{\min}$ bei ca. 25 μE befand. Die untere Toleranzgrenze bezüglich der minimalen Lichtanforderung wurde durch die Laborversuche auf eine Lichtintensität unterhalb von 10 μE festgelegt und bei der Berechnung von $E_{\min}$ betrug die absolut untere Grenze 14 μE . Auch wenn sich diese Ergebnisse oberflächlich gesehen zu widersprechen scheinen, ist dem nicht so. Denn es ist dabei zu berücksichtigen, dass die Berechnung von $E_{\min}$ den Bereich der optimalen Akklimatisation und Lichtausnutzung widerspiegelt (SCHUBERT et al. 2004). Dies bedeutet jedoch nicht, dass bei geringeren Lichtintensitäten kein Wachstum möglich ist, sondern, dass die Effizienz der Energiegewinnung und –nutzung verringert ist. Dies hat dann eine verminderte Fitness und Konkurrenzfähigkeit der Individuen einer Art zur Folge (SCHUBERT et al. 2004). Demnach sind die minimalen Lichtanforderungen, die durch Berechnung aus den E_k und E Werten entstanden, denen aus den Laborversuchen vorzuziehen, wenn man die Werte auf die Verbreitung im Freiland anwenden möchte. Im Freiland sind die Pflanzen schließlich keinen optimalen und konstanten Bedingungen ausgesetzt und eine verminderte Fitness und Konkurrenzfähigkeit verhindert eine erfolgreiche Besiedlung.

Wenn man nun *Najas marina* mit *Zannichellia palustris* vergleicht, zeigen sich nur geringe Unterschiede im Verlauf der Reaktion auf die beiden untersuchten Umweltfaktoren Salinität und Lichtintensität. Mit Sicherheit konnte durch die Laborversuche gezeigt werden, dass *Zannichellia palustris* einen breiteren Toleranzbereich hinsichtlich der Salinität besitzt als *Najas marina*. Während *Najas marina* bei 1 und 15 PSU nicht wachsen konnte, wies *Zannichellia palustris* hingegen bei allen getesteten Salinitätsstufen von 1 bis 15 PSU eine Zunahme der Biomasse auf.

Auch benötigte *Zannichellia palustris* etwas geringere Lichtintensitäten um eine Zunahme der Biomasse zu bewirken. So nahm die Biomasse der Pflanzen von *Zannichellia palustris* im Labor auch bei Lichtintensitäten von 10 μE zu, während dagegen bei den Pflanzen von *Najas marina* keine Zunahme der Biomasse beobachtet wurde. Beim Vergleich der berechneten mittleren minimalen Lichtanforderungen erwies *Zannichellia palustris* mit 25 μE einen um 3 μE geringeren Bedarf an Lichtintensität als *Najas marina*. Dies spiegelt sich auch in den medianen E_k -Werten wider (Abb. 38 – A). So liegt der Median des E_k von *Zannichellia palustris* mit 25 μE unter dem Median von *Najas marina* mit 43 μE . Der Vergleich der Medianwerte von $P_{\max}$ zeigt ebenfalls nur geringe Unterschiede. Bei *Najas marina* waren es ca. 44 $\text{mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g Chl a}^{-1}$ und bei *Zannichellia palustris* 36 $\text{mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g Chl a}^{-1}$ (Abb. 38 – B). Aber letztendlich sind diese Unterschiede nur gering. Hinsichtlich der Lichtintensität können demnach beide untersuchte Arten die gleichen Gebiete besiedeln und sind somit direkte Konkurrenten um das Licht, auch wenn *Zannichellia palustris* mit etwas weniger Licht auskommt und demnach auch in etwas größere Tiefen wachsen kann.

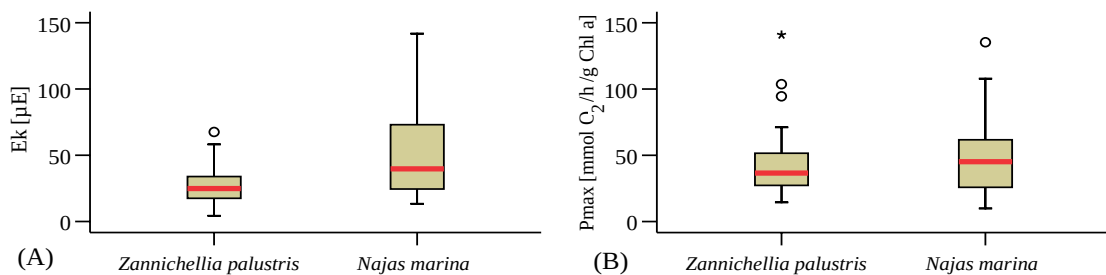


Abb. 38: Aus den Laborversuchen (*Najas marina* 3 und *Zannichellia palustris* 2) ermittelte Lichtsättigungspunkte (A) und Photosynthesekapazität (B). (gelbe Box = 25 bis 75 Perzentile; Kreise = Ausreißer)

Die Lichtverfügbarkeit ist demzufolge keine Erklärung für die unterschiedliche Verbreitung der beiden Arten entlang der deutschen Ostseeküste und auch nicht für die Unterschiede zwischen den potentiellen und den rezent nachgewiesenen Vorkommen aus Tab. 23 (S.78). Sie schränkt jedoch die Arten auf bestimmte Tiefenbereiche der Gewässer ein (HANELT 1997) und nimmt somit Einfluss auf die besiedelbare Fläche in den Küstengewässern. Allerdings ist die Tiefenausbreitung einer Art nicht alleine von der Lichtverfügbarkeit abhängig. So nehmen noch weitere Faktoren, wie z.B. die Temperatur, Salinität, Nährstoffkonzentration (dazu zählt auch die CO_2 Konzentration) und die Wasserturbulenz, ebenfalls Einfluss auf diese Tiefenverbreitung solange ein gewisser Gradient bezüglich der Tiefe vorhanden ist (DRING & BROWN 1982). Im Vergleich mit Arten aus anderen Arbeiten (Tab. 26) zeigen sich zum Teil deutliche

Unterschiede. Besonders bei Betrachtung der E_k –Werte sind große Differenzen zwischen den einzelnen Arten gegeben. So reichen die E_k -Werte von minimal 10 μE bei *Zostera noltii* bis maximal 465 μE bei *Ulva curvata*. Ebenso sind große Schwankungen bei den Werten von $P_{\max}$ zu erkennen, die dabei sowohl innerhalb einer Art, wie es z. B. bei *Zostera noltii* der Fall ist, als auch zwischen den Arten vorhanden sind. Sie bei *Zostera noltii* von 20 bis 100 $\text{mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g Chl a}^{-1}$. Eine Vergleichbarkeit dieser Daten ist daher nur eingeschränkt möglich. Die Gründe sind zum einen die durch die Autoren verwendeten recht unterschiedlichen Versuchsmethoden und zum anderen ist vor allem der Einfluss der (Kultivierungs-) Lichtintensität auf die E_k - und $P_{\max}$ –Werte sehr groß. Das wird auch sehr gut durch die hohen Schwankungsbreiten der Werte verdeutlicht (Tab. 26).

Tab. 26: Vergleich der aus dem Labor gewonnenen Ergebnisse mit Daten anderer Arten (aus der Literatur). (Zahl in Klammern geben den Median an; - = keine Daten vorhanden)

Autor	Art	Salinität [PSU]	E_k [μE]	$E_{\min}$ [μE]	$P_{\max}$ [$\text{mmol O}_2 \text{ h}^{-1} \text{ g Chl a}^{-1}$]
SORELL 2001	<i>Chara fibrosa</i>	-	23,5 $\pm$ 2,3	-	35 $\pm$ 2,6
SORELL 2001	<i>Chara globularis</i>	-	24,1 $\pm$ 4,3	-	55 $\pm$ 4,8
SORELL 2001	<i>Chara corallina</i>	-	22,3 $\pm$ 4,9	-	61,9 $\pm$ 5,4
EGGERT 2006	<i>Najas marina</i>	0 - 8	36 bis 64	-	20 bis 39
EGGERT 2006	<i>Myriophyllum spicatum</i>	3 - 15	31 bis 106	52 bis 134 (93)	44 bis 102
EGGERT 2006	<i>Zostera noltii</i>	3 - 33	18 bis 123	40 bis 134 (56)	20 bis 100
FORTES & LÜNING 1980	<i>Ulva lactuca</i>	-	70	-	-
ROSENBERG & RAMUS 1982	<i>Ulva curvata</i>	-	465	-	-
YOUSEF 1999	<i>Chara canescens</i>	-	111	-	-
YOUSEF 1999	<i>Chara baltica</i>	-	135	-	-
VERMAAT & VERHAGEN 1996	<i>Zostera noltii</i>	-	220	-	-
MENENDEZ & SANCHEZ 1998	<i>Potamogeton pectinatus</i>	-	200	-	-
Laborversuche:	<i>Najas marina</i>	3 - 10	25 bis 77 (43)	10 bis 58 (28)	27 bis 61
	<i>Zannichellia palustris</i>	1 - 15	18 bis 34 (25)	14 bis 36 (25)	27 bis 52

Um trotzdem ein Vergleich mit den aus den Laborversuchen gewonnenen Ergebnisse zu vollziehen, sind dafür die Daten von EGGERT 2006 die am ehesten geeigneten. Denn der Versuchsaufbau und –ablauf stimmte zu einem großen Teil überein. Wenn dabei die E_k -Werte in Bezug mit den unteren Verbreitungsgrenzen gebracht werden, ergibt sich eine Tiefenzonierung der untersuchten Arten. Dabei würde *Zostera noltii* und *Zannichellia palustris* mit einem E_k von 18 (der minimale Wert für E_k aus Tab. 26) am weitesten in

die Tiefe vordringen. Mit etwas Abstand würde dann *Najas marina* wachsen mit einem Ek von 25 und die geringste Verbreitungstiefe hätte *Myriophyllum spicatum* mit einem Ek von 31. Eine andere Tiefenzonierung zeigt der Vergleich der mittleren $E_{\min}$ -Werte. Die tiefste Verbreitung hätte demzufolge *Zannichellia palustris* gefolgt von *Najas marina*. Erst dann würde *Zostera noltii* kommen und die geringste untere Verbreitungstiefe hätte wieder *Myriophyllum spicatum*. Im Hinblick auf die Salinitäten überschneiden sich die Toleranzbereiche dieser Arten bei Salinitäten von 3 bis 8 PSU. Somit wäre es theoretisch möglich, dass eine solche Tiefenzonierung mit diesen Arten vorkommt. Die berechneten Tiefenzonierungen können als Hilfsmittel für Einordnung der Arten in die Degradationsreihen dienen. Denn da ja die Eutrophierung einen maßgeblichen Einfluss auf die Lichteindringtiefe hat, können in stark eutrophierten Gewässern demnach nur Arten mit einem geringen Lichtbedarf existieren. Allerdings würden dabei die anderen wichtigen Faktoren wie Salinität, Substrat, Temperatur usw. unberücksichtigt bleiben. Deshalb ist es nur möglich Aussagen über den Gewässerzustand mit Hilfe der submersen Vegetation zu machen, wenn diese hinreichend auf alle entscheidenden Faktoren untersucht wurden. Die Lichtverfügbarkeit schränkt im Wesentlichen nur die Tiefenausbreitung ein, was unter Umständen zu einem Verschwinden von Arten in bestimmten Gewässern führen kann. So hat sowohl das Lichtklima als auch die Salinität einen großen Einfluss auf die Verbreitung der untersuchten Arten in den Küstengewässern der deutschen Ostseeküste. Dieses wurde anhand der durchgeführten Untersuchungen belegt. Eine weitere Schlussfolgerung, die aus den Ergebnissen dieser Arbeit gezogen werden kann, ist die Tatsache, dass sowohl die Salinität als auch die Lichtintensität nicht die einzigen Faktoren sind, die die Verbreitung der untersuchten Arten beeinflussen. Jedoch sind sie entscheidenden Umweltfaktoren für die Verbreitung. Welche weiteren Umweltfaktoren dabei ebenfalls auf die Verbreitung einwirken, lässt sich nur anhand weiterer Versuche feststellen. Für den Peenestrom könnten es z.B. die durch wasserbaulichen Maßnahmen eingeschränkten besiedelbaren Areale oder vielleicht auch eine erhöhte Strömung sein. Sehr wahrscheinlich nehmen auch verschiedene Substrateigenschaften und Nährstoffkonzentrationen starken Einfluss auf die Verbreitung. Die hier vorliegende Arbeit kann sozusagen als Teil eines Ganzen betrachtet werden und mit Daten weiterer Arbeiten verknüpft werden. Nur so ist es letztendlich möglich den Gewässerzustand zu ermitteln und die notwendigen Maßnahmen für das Erreichen des durch die EU-WRRL geforderten guten ökologischen Zustandes der Gewässer.

Für zukünftige Forschungsarbeiten sollten diesbezüglich die im folgenden Abschnitt aufgezeigten Probleme der hier vorliegenden Arbeit beachtet und gegebenenfalls Lösungen ausgearbeitet werden.

Sowohl für die einfaktoriellen als auch für die zweifaktoriellen Betrachtungen konnten zwar oft Unterschiede aufgezeigt werden, aber meistens nicht signifikant belegt werden. Die Ursache hierfür war die große Variabilität der Daten, was auch an den Standardabweichungen zu erkennen ist. Diese Variabilitäten traten sowohl innerhalb als auch zwischen den Versuchen auf. Als Grund für die Variabilität zwischen den einzelnen Versuchen können vor allem materielle Unterschiede verantwortlich gemacht werden. So wurden u.a. für die verschiedenen Versuche Sedimente und Versuchswasser unterschiedlicher Standorte benutzt. Sedimente verschiedener Standorte (Salzhaff und Peenestrom) können dabei neben dem Besitz unterschiedlicher Nährstoffkonzentrationen auch verschiedene physikalisch-chemische Eigenschaften aufweisen. Aufgrund dessen wurden im Vorfeld der Versuche diese Daten bestimmt und in Tab. 8 und Tab. 9 (S.25) aufgeführt. Die gemessenen Werte zeigten keine nennenswerten Unterschiede in Hinblick auf die Sedimenteigenschaften. Dagegen waren die Nährstoffkonzentrationen der Versuchswasser jedoch sehr unterschiedlich, was durchaus einen Anteil an der Variabilität der Daten gehabt haben könnte. Auch ist dabei der Stoffwechsel der Mikroorganismen zu beachten. Es ist nämlich durchaus denkbar, dass diese im Zuge ihres Stoffwechsels für die Pflanzen toxische Substanzen gebildet haben. Oder sie könnten Substanzen, wie z.B. NH_4^+ -Verbindungen dermaßen im Medium (Sediment, Wasser) angereichert haben, dass diese die Pflanzen im Wachstum behinderten. So wurden von GLÄNZER (1975) einige Versuche zur Toleranz von submersen Makrophyten hinsichtlich diverser Substanzen (darunter auch Stickstoffhaltige Substanzen) durchgeführt und im Ergebnis verschiedene Toleranzen bei den untersuchten Makrophyten festgestellt. Als weitere Ursache für die Variabilitäten der Ergebnisse könnten auch unterschiedliche Salinitäten im Interstitialwasser der Sedimente die Ergebnisse beeinflusst haben. Dies wurde jedoch nicht nachgeprüft. Ein weiterer Faktor für die Variabilität der Ergebnisse besteht in der zeitlich unterschiedlichen Entnahme der Pflanzen und auch in der zeitlich versetzten Versuchsdurchführung der einzelnen Versuche. Die Klärung dieses zeitlichen Aspektes erfolgte teilweise für *Najas marina* in Abschnitt 3.2.1 (S.43). Die Pflanzen zeigten dabei sehr unterschiedliche Wachstumsraten bezüglich der Biomasse. Während im

Zeitraum von Juni bis Juli noch Wachstumsraten über 10 % erreicht wurden, lagen diese im Zeitraum Juli bis August trotz ähnlich hoher Strahlungsdosen bei nahezu 0 %. Dies ist durch die annuelle Lebensweise der Pflanzen erklärbar, da sie am Ende ihrer Vegetationsperiode die gewonnene Energie zu einem großen Teil für die Produktion der Geschlechtsorgane und später für die Entwicklung der Samen verbrauchen. Demzufolge stagniert das Wachstum der Biomasse. Dass sich dabei das Längenwachstum kaum verringerte, hat vermutlich mit der Lichtverfügbarkeit zu tun. So wurde z.B. im Prerowstrom beobachtet, dass im Juni *Najas marina* fast als Reinbestand auftrat. Bei der Entnahme der Pflanzen im August am gleichen Standort zeigte sich jedoch eine Dominanz von *Chara tomentosa*, welche *Najas marina* überwuchs und damit deren Lichtverfügbarkeit einschränkte. Als Antwort darauf kann somit das fast gleich bleibende Längenwachstum angesehen werden. Diese Unterschiede im saisonalen Verlauf spiegeln sich kaum in den Laborversuchen wider. Denn demnach müssten die Werte der RWR_{BM} im dritten Versuch deutlich unterhalb der Werte aus den ersten beiden Versuchen gelegen haben und dies war nicht der Fall. Somit kann dieser zeitlich saisonale Aspekt als nichtig angesehen werden, da er keinen nennenswerten Einfluss auf die Laborversuche genommen hatte.

Außer der durch das Material entstandenen Variabilität der Ergebnisse könnten diese auch durch die Methodik beeinflusst worden sein. Bedeutsam dafür war wohl vor allem die Realisierung der Lichtstufen für die Kultivierung. Dabei sind Abweichungen von bis zu ca. 25 % von den jeweiligen Lichtstufen aufgetreten. Die Lichtintensität veränderte sich zum Teil auch im Laufe der einzelnen Versuche aufgrund einer mehr oder weniger starken Vermehrung von phytoplanktischen und epiphytischen Lebensformen. Ein weiterer wichtiger Punkt stellt die CO_2 -Verfügbarkeit dar, da das CO_2 einen direkten Einfluss auf die Photosyntheserate und damit auf das Wachstum nimmt. So wurde den Pflanzen in den Versuchen Luft und damit auch CO_2 zugeführt, jedoch konnte nicht sichergestellt werden, dass jede Pflanze auch die gleiche Menge bekommen hat bzw. dass in jedem Versuchsansatz der gleiche CO_2 Partialdruck herrschte. All dieses in Kombination mit der Variabilität der Messungen kann auch die Variabilität und Schwankungen bzw. die geringe statistische Beweisbarkeit der Ergebnisse erklären.

Für zukünftige Untersuchungen wäre es sinnvoll die bereits durchgeführten Korrelationen zwischen dem Chl a -Gehalt eines Gewässers und dessen Attenuationskoeffizienten mit mehr Daten zu erweitern. Dies würde die Genauigkeit dieser Korrelation erhöhen und damit die Aussagekraft der E_{min} -Werte verbessern.

Interessant wären auch Untersuchungen hinsichtlich der Berechnung der artspezifischen minimalen Tageslichtdosis und demnach auch der uVg. Diese wurden in dieser Arbeit ja über die $E_{\min}$ Werte und der Bestrahlungsdauer (hier 15 h) pro Tag ermittelt. Daraus ergibt sich die Frage nach dem Einfluss der Bestrahlungsdauer auf die Wachstums- und Photosyntheseparameter. Wären z.B. diese Parameter bei halber Bestrahlungsdauer mit doppelter Lichtintensität aufgrund der gleichen Tageslichtdosis auch gleich groß. Voraussetzung dafür wäre natürlich, dass die Lichtintensität im Bereich der artspezifischen minimalen Lichtintensität ($E_{\min} \pm \text{Konf.}$) liegt. Oder eine andere Möglichkeit wäre der Vergleich der Parameter bei Versuchen mit gleicher Lichtintensität aber verschiedener Bestrahlungsdauer zu untersuchen.

5. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden die Spermatophyten *Najas marina* und *Zannichellia palustris* hinsichtlich ihrer Salinitätstoleranz und ihrer Lichtanforderungen untersucht. Dazu wurden sowohl Vegetationsanalysen auf Basis von Daten externer Quellen der Jahre 1999 bis 2005 ausgewertet als auch Freilandarbeiten und vor allem Laborversuche durchgeführt. Die Auswertung der externen Daten (Abschnitt 3.1) diente der Feststellung der rezenten Ausbreitung beider Arten in den Küstengewässern der deutschen Ostsee (Abb. 13, S.38). Die Datenerhebung erfasste dabei 22 Küstengewässer von der Flensburger Förde bis hin zum Kleinen Haff. Außer den Vegetationsaufnahmen wurden des Weiteren die (a)biotischen Faktoren Salinität, Sichttiefe und die Konzentration von Chlorophyll *a* genutzt¹³. Dadurch war es möglich die Verbreitungsgrenzen der untersuchten Arten hinsichtlich dieser Faktoren zu ermitteln (Abb. 14, S.41). Dabei konnte *Najas marina* nur in Gewässern mit einer Salinität von ca. 2,5 bis 7,5 PSU festgestellt werden. *Zannichellia palustris* hingegen kam in Gewässern vor deren Salinität von etwa ein bis 15 PSU reichte. Aus den Chlorophyll *a* –Konzentrationen wurden die relativen Lichteindringtiefen für die jeweiligen Küstengewässer ermittelt und mit den Vegetationsaufnahmen abgeglichen. Als Ergebnis zeigte sich, dass *Najas marina* im Durchschnitt etwa 10 % weniger Licht zur Verfügung steht als *Zannichellia palustris*.

Die Freilandarbeiten (Abschnitt 3.2.1) wurden an *Najas marina* durchgeführt und dienten in erster Linie der Überprüfung von saisonalen Abhängigkeiten. Dabei kam es im Laufe der Vegetationsperiode von Juni bis August zu Veränderung einiger Wachstums- und Photosyntheseparameter. Besonders deutlich war dies anhand der RWR_{BM} und an den Ek –Werten zu erkennen. So stieg die RWR_{BM} bis etwa zur Mitte des Untersuchungszeitraumes stark an. Im Zeitraum danach sank sie bis zum Ende des Untersuchungszeitraumes auf nahezu null herunter, während Ek im genannten Zeitraum anstieg. Der zweite Grund für diese Messungen war die Schaffung von grundlegenden Daten die einen Vergleich mit den folgenden Laborversuchen zuließen. Es konnten

¹³ dazu wurden die 25 und 75 Percentile der Faktoren für die einzelnen Gewässer ermittelt

dabei keine so großen Unterschiede festgestellt werden, weshalb die Ergebnisse der Laborversuche diesbezüglich durchaus auf das Freiland übertragbar sind.

Die bereits erwähnten Laborversuche (Abschnitt 3.2.2) fanden aus logistischen Gründen hintereinander statt. Dabei wurden insgesamt fünf dieser Versuche durchgeführt (drei mit *Najas marina* und zwei mit *Zannichellia palustris*). Die Ergebnisse zeigten hinsichtlich der Salinitäten gute Übereinstimmungen mit den aus den Verbreitungsanalysen ermittelten Toleranzbereichen. So konnte für *Najas marina* ein Wachstum bei Salinitäten von 3, 7 und 10 PSU nachgewiesen werden. Für *Zannichellia palustris* konnte ein Wachstum in einem breiteren Bereich, nämlich bei Salinitäten von 1, 3, 10 und 15 PSU festgestellt werden. Bei den Ergebnissen ergab sich im Vergleich zu den Vegetationsanalysen ein umgekehrtes Bild. Hier konnte *Zannichellia palustris* mit weniger Licht ($10 \mu\text{E}$ bei 15 h d^{-1}) wachsen, während für *Najas marina* bei dieser Lichtstufe keine Zunahme der Biomasse verzeichnet werden konnte. Aus den Daten der Laborversuche wurden des Weiteren die artspezifischen minimalen Lichtansprüche bei einer vollständigen Akklimatisation an das Lichtklima der Laboranlage ($E_{\min}$) berechnet. Diese ergaben für *Najas marina* eine mittlere benötigte Lichtintensität von ca. $28 \mu\text{E}$. *Zannichellia palustris* genügte mit ca. $25 \mu\text{E}$ eine etwas geringere Lichtintensität. Auch wenn sich die Ergebnisse bezüglich des artspezifischen Lichtbedarfs zwischen den Laborversuchen und den Vegetationsanalysen widersprechen, so ist dies auf die relativ hohen Schwankungsbreiten der Einzelwerte zurückzuführen. Aber aufgrund der geringen Unterschiede des minimalen Lichtanspruches beider Arten kann dieser Widerspruch vernachlässigt werden.

Die hier vorliegende Arbeit muss demzufolge als Teil eines größeren Forschungskomplexes angesehen werden und mit Ergebnissen bereits vorhandener und auch zukünftiger Forschungsarbeiten verknüpft werden.

Literaturverzeichnis

- Blindow, I., Dietrich, J., Mollmann, N., & Schubert, H. 2003, "Growth, photosynthesis and fertility of *Chara aspera* under different light and salinity conditions", *Aquatic Botany*.
- Bluemel, C., Domin, A., Krause, J. C., Schubert, M., Schiewer, U., & Schubert, H. 2002, "(Historical macrophyte records of surface waters at the German Baltic coast)
- Der historische Makrophytenbewuchs der inneren Gewässer der deutschen Ostseeküste", *Rostock.Meeresbiol.Beitr.*, vol. 10, pp. 5-111.
- Braun-Blanquet, J. 1964, *Pflanzensoziologie. Grundzüge der Vegetationskunde*, 2. Aufl. edn, Springer, Wien.
- Dahlke, S. 1994, "Die Entwicklung der Gewässerbeschaffenheit der Nordrügischen Boddengewässer seit 1989", *Bodden*, vol. 1, pp. 51-68.
- Demmig-Adams, B. & Adams, W. W. 1992, "Photoprotection and other responses of plants to high light stress", *Ann.Rev.Plant Physiol.Plant Mol.Biol.*, vol. 43, pp. 599-626.
- Domin, A., Schubert, H., & Schiewer, U. 2002, "Berechnungen der Besiedlungspotenziale ausgesuchter Makrophytenarten anhand historischer Belege und ökophysiologischer Literaturdaten", *Bodden*, vol. 12, pp. 49-69.
- Domin, A., Schubert, H., Krause, J. C., & Schiewer, U. 2004, "Modelling of pristine depth limits for macrophyte growth in the southern Baltic Sea", *Hydrobiologia*, vol. 514, no. 1-3, pp. 29-39.
- Dring, M. J. & Brown, F. A. 1982, "Photosynthesis of intertidal brown algae during and after periods of emersion: A renewed search for physiological causes of zonation", *Br.Phycol.J.*, vol. 17, pp. 227-232.

- Eggert, A., Ihnken, S., Selig, U., Karsten, U., & Schubert, H. 2006, "Distribution of three submersed macrophytes in coastal lagoons of the German Baltic Sea: comparison of laboratory and field data", *Botanica marina*, vol. 49, pp. 386-395.
- Feuerpfeil, P. & Schubert, H. 2003, Biodiversität entlang eines Salinitätsgradienten - Phytobenthos-.
- Fukarek, F. 1961, "Beiträge zur Flora des Darß/Zingst und des Fischlandes", *Arch.Nat.Meckl.*, vol. 7, pp. 165-206.
- Glänzer, U. 1975, Experimentelle Untersuchungen über den Zeigerwert submerser Makrophyten als Indikator der Fließgewässerbelastung, Dissertation, TU München.
- Hammer, A., Schumann, R., & Schubert, H. 2002, "Light and temperature acclimation of *Rhodomonas salina* (Cryptophyceae): photosynthetic performance", *Aquatic Microbial Ecology*, vol. 29, no. 3, pp. 287-296.
- Hanelt, D. & Nultsch, W. 1991, "The role of chromatophore arrangement in protecting the chromatophores of the brown alga *Dictyota dichotoma* against photodamage", *Journal of Plant Physiology*, vol. 138, pp. 470-475.
- Hanelt, D., Jaramillo, M., Nultsch, W., Senger, S., & Westermeier, R. 1994, "Photoinhibition as a regulative mechanism of photosynthesis in marine algae of Antarctica", *Ser.Cient.Inst.Antart.Chil.* pp. 67-77.
- Hanelt, D. 1996, "Photoinhibition of photosynthesis in marine macroalgae", *Sci.Mar.Barç.*, vol. 60, pp. 243-248.
- Hanelt, D., Melchersmann, B., Wiencke, C., & Nultsch, W. 1997, "Effects of high light stress on photosynthesis of polar macroalgae in relation to depth distribution", *MARINE ECOLOGY-PROGRESS SERIES*, vol. 149, pp. 255-266.
- Häder, D. P., Porst, M., & Lebert, M. 2001, "Photoinhibition in common atlantic macroalgae measured on site in Gran Canaria", *Helgoland Marine Research*, vol. 55, pp. 67-76.

- Heerkloss, R. & Schnese, W. 1994, "Seasonal variability and long-term development of the metazooplankton of the central part of the Darss-Zingst estuary
- Jahreszeitliche Variabilität und Langzeitentwicklung des Metazooplanktons im zentralen Teil der Darss-Zingster Boddengewässer", Rostock.Meeresbiol.Beitr. no. 2, pp. 85-92.
- Ihnken, S. 2004, Photoacclimation in the red alga *Furcellaria lumbricalis* (Hudson) Lamouroux.
- Koch, W. 1926, "Die Vegetationseinheiten der Linthebene", Jb.St.Gall.Naturw.Ges., vol. 61, pp. 1-144.
- Kolp, O. 1965, Die Sedimente der westlichen und südlichen Ostsee und ihre Darstellung, Hab.Schr.v.18.März 1965, Leipzig, Math.-naturwiss.F.
- Küster, A. 1997, Ökophysiologische Charakterisierung der Characeenbestände an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns, Diplomarbeit, Univ.Rostock.
- Larcher, W. 1994, Ökophysiologie der Pflanzen, 5 edn, Verlag Eugen Ulmer Stuttgart.
- Libbert, E. & Walter, T. 1985, "Photosynthetic production of a brackishwater community of *Chara tomentosa* L. and its dependence on environmental conditions", Int.Rev.Gesamt.Hydrobiol., vol. 70, no. 3, pp. 359-368.
- Lindner, A. 1972, Soziologisch-ökologische Untersuchungen an der submersen Vegetation der Boddenkette südlich des Darß und des Zingst Universität Rostock, Rostock.
- Mertens, M. 2006, Landschaftsökologische Untersuchungen zu Makrophyten (einschließlich Makroalgen) in ausgewählten inneren Küstengewässern Schleswig - Holsteins.
- Mothes, G. 1981, "Sedimentation and Nutrient Cycles in the Lakes of the Stechlin Lake District", Limnologica, vol. 13, pp. 147-194.

- Murphy, T. M. & Vu, H. 1996, "Photoinactivation of superoxide synthases of the plasma membrane from rose (*Rosa damascena* Mill.) cells.", *Photocem Photobiol*, vol. 64, pp. 106-109.
- Nehring, D., Rohde, K. H., & Berge, H. 1967, "Bedeutung und Arbeitsmethodik der Chemie in der Meeresforschung", *Wissenschaftliche Zeitschrift der Universität Rostock*, vol. 9/10, pp. 1085-1097.
- Porra, R. J. 1990, "A simple method for extracting chlorophylls from the recalcitrant alga, *Nannochloris atomus*, without formation of spectroscopically-different magnesium-rhodochlorin derivatives", *Biochemica et Biophysica Acta*, vol. 1019, pp. 137-141.
- Rasch, D., Bock, J., Dörfel, H., Herrendörfer, G., Thomas, E., & Willer, H. 1987, *Einführung in die Biostatistik*, 2., verbesserte Auflage edn, VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag.
- Remane, A. 1940. *Tierwelt der Nord- und Ostsee*. [34]. Akad. Verlagsges. Leipzig. *Einführung in die zoologische Ökologie der Nord- und Ostsee*.
- Rieling, T., Schubert, M., & Schubert, H. 2004, *Entwicklung eines Monitoringschemas für die Aussenbereiche der deutschen Ostsee-Küste - Makrophytobenthos*, Abt. Aquatische Ökologie, Universität Rostock, Rostock.
- Ritzl, C. 2000, *Salt tolerance in freshwater and brackish-water Chara tomentosa and Chara aspera*, Examensarbeit.
- Rothmaler, W., Bäßler, M., Jäger, E. J., & Werner, K. 1999, *Exkursionsflora von Deutschland Gefäßpflanzen: Grundband*, 17 edn, Spektrum Akademischer Verlag.
- Russell, G. & Thomas, D. N. 1988, "The Baltic Sea : a cradle of plant evolution", *Plants Today*.

- Sagert, S. & Dahlke, S. 2002, "Hintergrundwerte und natürliche Variabilität von abiotischen und biotischen Kriterien zur Beurteilung des ökologischen Zustands von Küstengewässern der Ostsee", *Bodden*, vol. 12, pp. 15-31.
- Sakshaug, E., BRICAUD, A., Dandonneau, Y., Falkowski, P. G., Kiefer, D. A., Legendre, L., MOREL, A., Parslow, J., & Takahashi, M. 1997, "parameters of photosynthesis: definitions, theory and interpretation of results", *Journal Of Plankton Research*, vol. 19, pp. 1637-1670.
- Scheffer, M. 1998, ecology of shallow lakes.
- Schiewer, U. 1998, "30 Years' eutrophication in shallow brackish waters - lessons to be learned", *Hydrobiologia*, vol. 363, pp. 73-79.
- Schlunbaum, G. 1979, Untersuchungen über die Sedimentqualität in den Gewässern der Darß-Zingster Boddenkette unter besonderer Berücksichtigung der Stoffaustauschprozesse zwischen Wasser und Sediment.
- Schlunbaum, G. & Baudler, H. 1996, "Sanierungskonzepte für Bodden und Haffe an der Küste Mecklenburg-Vorpommern - eine wichtige Voraussetzung für einen wirksamen Ostseeschutz.", *Bodden*, vol. 3, pp. 1-19.
- Schmidt, D. 1994, "Rote Liste der gefährdeten Armleuchteralgen (Charophyten) Mecklenburg-Vorpommerns", Umweltministerium des Landes M/V, vol. 1. Fassung, Stand Nov. 1993, pp. 1-32.
- Schnese, W. & Hübel, H. 1975, "Über den Verlauf und die Größe der Phyto-und Zooplanktonproduktion in Brackwässern mit abgestuftem Salzgehalt", *Limnologica*, vol. 10, no. 2, pp. 459-465.
- Schories, D., Selig, U., Jegzentis, K., & Schubert, H. 2005, "Klassifizierung der äußeren Küstengewässer an der deutschen Ostseeküste nach der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie anhand von Makrophyten - Eine Zwischenbilanz", *Rostock.Meeresbiol.Beitr.*, vol. 14, pp. 135-150.

- Schubert, H., Eggert, A., Rieling, T., Schubert, M., & Selig, U. 2004, Forschungsbericht zum BMBF Projekt ELBO: Entwicklung von leibildorientierten Bewertungsgrundlagen für innere Küstengewässer der deutschen Ostseeküste nach der EU-WRRL sowie zum LUNG Projekt: Analyse von Langzeitdatenreihen des Phytoplanktons aus Küstengewässern Mecklenburg-Vorpommerns im Hinblick auf die Erfordernisse der EU-WRRL.
- Schumann, R., Baudler, H., Glass, A., Dümcke, K., & Karsten, U. 2006, "Long-term observations on salinity dynamics in a tideless shallow coastal lagoon of the Southern Baltic Sea coast and their biological relevance", *Journal of Marine Systems*, vol. 60, no. 3-4, pp. 330-344.
- Schwenke, H. 1960, "Neue Erkenntnisse über die Beziehung zwischen den Lebensfunktionen mariner Pflanzen und dem Salzgehalt des Meer- und Brackwassers", *Kieler Meeresforschung*, vol. 16, pp. 28-47.
- Selig, U., Baudler, H., Krech, M., & Nausch, G. 2006, "Nutrient accumulation and nutrient retention in coastal waters - 30 years investigation in the Darß-Zingst Bodden chain", *ACTA HYDROCHIMICA ET HYDROBIOLOGICA*, vol. 34, no. 1-2, pp. 9-19.
- Sindowski, K.-H. 1938, Untersuchungen über die Sedimentqualität in den Gewässern der Darß-Zingster-Boddenkette unter besonderer Berücksichtigung der Stoffaustauschprozesse zwischen Wasser und Sediment.
- Solorzano, L. 1969, "Determination of ammonia in natural water by the phenolhypochlorite method", *Limnology and Oceanography*, vol. 14, pp. 799-801.
- Teubner, J. 1989, Quantitative und qualitative Erfassung submerser Makrophyten 1986/87- Luftbildanalyse, Diplomarbeit, Sektion Biologie der W.-Pieck-Universität, Rostock.
- Thomas, D. N., Collins, J. C., & Russell, G. 1990, "Interpopulation differences in the salt tolerance of two *Cladophora* species", *Estuar., Coast.Shelf Sci.*, vol. 30, pp. 201-206.

- von Weber, M. 2002, "Die EU-Wasserrahmenrichtlinie - Überlegungen zur Umsetzung in Mecklenburg-Vorpommern", *Bodden*, vol. 12, pp. 3-14.
- Walsby, A. E. 1997, "Numerical integration of phytoplankton photosynthesis through time and depth in a water column", *NEW PHYTOLOGIST*, vol. 136, no. 2, pp. 189-209.
- Wilmanns, O. 1998, *Ökologische Pflanzensoziologie*, 6. Aufl. edn, Quelle & Meyer, Heidelberg, Wiesbaden.
- Winter, U. & Kirst, G. O. 1992, "Turgor pressure regulation in *Chara aspera* (Charophyta): the role of sucrose accumulation in fertile and sterile plants", *Phycologia*, vol. 31, no. 3/4, pp. 240-245.
- Winter, U., SoulieMarsche, I., & Kirst, G. O. 1996, "Effects of salinity on turgor pressure and fertility in *Tolypella* (Characeae)", *Plant Cell & Environment*, vol. 19, no. 7, pp. 869-879.
- Yousef, M. A. M. 1999, *Ökophysiologie von Makrophyten und Epiphyten in Flachwasserökosystemen*.

Anhang

Der Anhang befindet sich auf der beigelegten CD-ROM.

Inhalt der CD-ROM:

- Diplomarbeit im pdf und word Format
- Datenanalyse zur Verbreitung der untersuchten Arten
 - o Charakterisierung der Untersuchungsgewässer anhand abiotischer Parameter
 - o Verbreitung der untersuchten Arten
- Ökophysiologische Untersuchungen
 - o Freilanduntersuchungen an *Najas marina*
 - Chlorophyll *a* – k_{PAR} –Korrelation
 - Globalstrahlungsdaten 2006
 - *Najas marina* FL 1
 - *Najas marina* FL 2
 - o Laboruntersuchungen hinsichtlich der Salz- und Lichtakklimatisation
 - *Najas marina* 1
 - *Najas marina* 2
 - *Najas marina* 3
 - *Zannichellia palustris* 1
 - *Zannichellia palustris* 2
 - o Minimale Lichtanforderung der Arten und deren untere Verbreitungsgrenze für den Zingster Strom

Danksagung

Mein Dank gilt in erster Linie Herrn Dr. Uwe Selig für die Bereitstellung dieses Themas sowie für die umfassende Betreuung während der Anfertigung meiner Diplomarbeit und den sich dabei zahlreich ergebenden Diskussionsrunden.

Frau Dr. Sigrid Sagert danke ich für die bereitwillige Hilfe bei den zahlreichen theoretischen und praktischen Fragen und Problemen.

Für die Unterstützung bei der Durchführung der Messungen, ebenso für die technische Unterstützung danke ich Frau Birgit Martin sowie Frau Claudia Lott.

Bei Herrn Dr. Ralf Schaible möchte ich mich ebenso für die technische Unterstützung bei der Lichtpipette bedanken.

Weiterhin möchte ich Constanze Gehling und Ronny Marquardt für die vielen guten Anmerkungen und Ratschläge danken.

Für die Unterstützung meiner Arbeit möchte ich des Weiteren Herrn Dr. Henning Baudler sowie Herrn Volker Reiff von der Biologischen Station in Zingst danken.

Außerdem bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern der Arbeitsgruppe „Ökologie“ für ihre Unterstützung.

Ein besonderes Dankeschön gilt meinen Freunden, die mich die gesamte Studienzeit über begleitet und unterstützt haben.

Meiner gesamten Familie und besonders meinen Eltern schulde ich großen Dank für die Geduld und für die seelische und finanzielle Unterstützung in den vielen Jahren, wodurch mein Studium erst ermöglicht wurde.

Ich danke hiermit auch Herrn Wenzl (meinem Biologie- und Chemielehrer) für den interessanten Unterricht, da ich mich unter anderem auch deshalb für diese Studienrichtung entschieden habe.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei all denen bedanken die hier aus Platzgründen nicht erwähnt wurden.

VIELEN DANK!

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen (siehe § 25, Abs. 7 der Diplomprüfungsordnung Biologie 2000) und Hilfsmittel verwendet habe.

Mir ist bekannt, dass gemäß § 8, Abs. 3 der Diplomprüfungsordnung Biologie 2000 die Prüfung wegen einer Pflichtwidrigkeit (Täuschung u.ä.) für nicht bestanden erklärt werden kann.

Rostock, den 31.01.2007

Christian Porsche