

Sabrina SEEBAUER*

* Aquatische Ökologie, Institut für Biowissenschaften, Universität Rostock, 18059 Rostock
sabrina.seebauer@uni-rostock.de

Vergleich von PAM Photosystem Effizienzmessungen am Seegras *Zostera marina*

Abstract

Seagrass meadows are important marine ecosystems. They provide habitat and food for many species, protect coastlines from erosion, and can act as carbon sinks, contributing to the mitigation of climate change.

The photosynthetic performance of seagrasses is crucial for their ecological functioning. This can be measured through light curve measurements using Pulse-Amplitude-Modulated (PAM) chlorophyll fluorometry. However, different devices and measurement methods could influence the photosynthetic parameters.

Therefore, this study conducted a comparison of methods between the Diving and Junior PAM devices from WALZ. Both devices have advantages and disadvantages depending on the object. The Diving PAM allows in situ measurements without the need for sample collection, while the Junior PAM provides more stable measurements under controlled conditions but requires plant removal. A comparison of photosynthetic parameters between the Diving and Junior PAM showed significant differences, highlighting the importance of device choice and the need to consider this when interpreting results.

Keywords: Dual PAM, Junior PAM, Pulse Amplitude Modulation, PAM, Photosynthese, *Zostera marina*, Seegras, Modellvergleich

1 Einleitung

Seegraswiesen fungieren als Habitate, die zahlreichen Tierarten Schutz vor Prädation und Verdriftung bieten sowie als Brut- und Laichgebiete dienen (COLES & SHORT, 2001). Dabei stellen sie auch die Nahrungsgrundlage für viele Makrozoobenthos-Arten dar, sowohl direkt durch ihre Blätter als auch indirekt über Epiphyten und Detritus (COLES & SHORT, 2001). Des Weiteren wirken Seegraswiesen als natürlicher Küstenschutz, indem ihre Blätter Strömungsgeschwindigkeiten und Wellenhöhen reduzieren (GRACIA et al., 2017), und ihre Rhizome die Sedimente stabilisieren (BOS et al., 2007; CHRISTIANSEN et al., 1981; GRACIA et al., 2017). Zusätzlich fördert die Sedimentstabilisierung die Kohlenstoffspeicherung, indem organisches Material, das Kohlenstoff enthält im Meeresboden eingeschlossen wird (DUARTE et al., 2005).

Die ökologischen Funktionen von Seegraswiesen basieren auf ihrer Produktivität, die wiederum mit der Effizienz ihrer Photosynthese verknüpft ist. Während der Photosynthese binden sie mithilfe von Lichtenergie atmosphärisches Kohlendioxid und setzen Sauerstoff frei. Zur Messung der photosynthetischen Leistung stellen Lichtkurvenmessungen mittels Puls-Amplituden-Modulierter (PAM) Chlorophyll-Fluorometrie eine etablierte Methode dar (SCHREIBER, 2004). Abb. 1 präsentiert hierzu exemplarisch eine mit dem Junior PAM gemessene Lichtkurve.

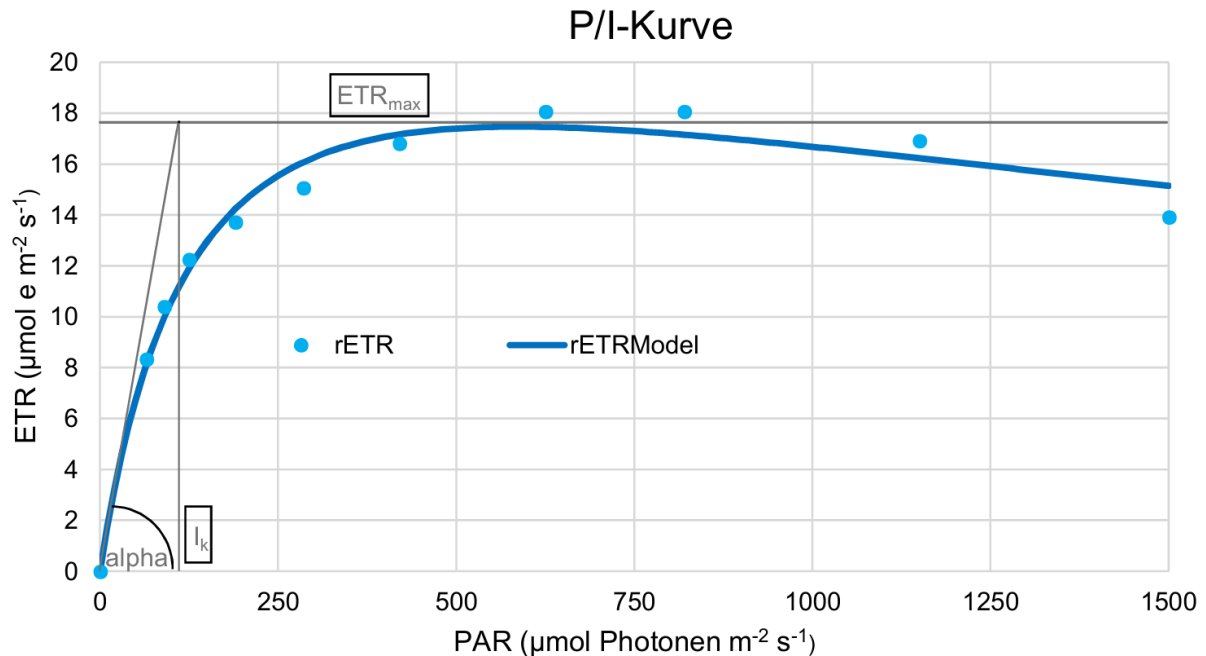


Abb. 1 Beispiel einer mit dem Junior PAM gemessenen Lichtkurve. Die Elektronentransportrate (ETR) ist in blau dargestellt. Die photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) ist als Lichtparameter angegeben, wobei I_k den Lichtsättigungspunkt, α das Maß für die Lichtaffinität und $ETR_{\max}$ die maximale Elektronentransportrate repräsentieren. Die Anpassung basiert auf dem Modell von EILERS & PEETERS (1988). (angepasste Vorlage von Dr. Christian Porsche)

Im Rahmen dieser Messungen liefern die Lichtkurven Informationen über die Photosyntheseparameter unter steigenden Lichtintensitäten. Zu Beginn einer Lichtkurve kommt es zu einem Anstieg der Elektronentransportrate (ETR) in einem Winkel, der durch den Parameter α charakterisiert wird, welcher die anfängliche Lichtaffinität der Photosynthese widerspiegelt. Mit zunehmender photosynthetisch aktiver Strahlung erhöht sich die ETR, bis die Kurve in den Bereich der Lichtsättigung (I_k) übergeht (Übergangspunkt von Lichtlimitierung zu Lichtsättigung). Im Anschluss erreicht die Photosynthese in einem Plateau ihre maximale Elektronentransportrate ($ETR_{\max}$). Bei einem weiteren Anstieg der Lichtintensität bleibt die Photosyntheserate konstant, wobei überschüssige Energie entweder als Wärme abgegeben oder durch Fluoreszenz emittiert wird. Zu hohe Lichtintensitäten können schließlich eine Photoinhibition verursachen, was sich in einem Abfall der ETR zeigt (RALPH & GADEMANN, 2005). Des Weiteren veranschaulicht der Yield als Maß für die Quantenausbeute, wie effektiv Photonen von den Photosystemen absorbiert und zur Erzeugung energiereicher Moleküle (wie ATP und NADPH) genutzt werden. In diesem Kontext gibt der Dark Yield Einblicke in die Grundeffizienz der Photosynthese nach einer Dunkelperiode. Eine hohe Quantenausbeute steht für eine effiziente Nutzung des

absorbierten Lichts, während eine niedrige Ausbeute auf suboptimale Bedingungen hinweist (KROON et al., 1992).

Ziel dieser Studie ist es, am Beispiel vom Seegras *Zostera marina* ein besseres Verständnis für die Messmethoden und deren Auswirkungen auf die photosynthetischen Parameter zu gewinnen und zu einer wissenschaftlichen Grundlage für zukünftige Forschung beizutragen.

Hierfür wird ein Methodenvergleich zwischen dem Diving und Junior PAM durchgeführt und folgende Hypothesen überprüft:

- 1) Es gibt signifikante Messunterschiede zwischen dem Diving und Junior PAM.
- 2) Es gibt PAM-Geräte abhängige Unterschiede, die unabhängig von den Untersuchungsgebieten sind.

2 Material und Methoden

2.1 Untersuchungsstandorte

Die Untersuchungen fanden vom 17.06.2024 bis zum 24.07.2024 in der südwestlichen Ostsee an den Standorten Stoltera und Hohen Düne statt (Tab. 1, Abb. 2). Zur besseren Übersicht werden im Folgenden die in Tab. 1 aufgeführten ID-Bezeichnungen für die jeweiligen Standorte verwendet.

Tab. 1 Koordinaten der Untersuchungsstandorte in Stoltera und der Hohen Düne nach Datum und ID-Bezeichnung

Ort	Datum	ID	Koordinaten
Hohe Düne	14.06.2024	HD_1	N 54°11,194' E 12°05,698'
Hohe Düne	19.06.2024	HD_2	N 54°10,885' E 12°06,321'
Hohe Düne	19.07.2024	HD_3	N 54°10,774' E 12°06,310'
Stoltera	17.06.2024	St_1	N 54°10,828' E 12°02,303'
Stoltera	27.06.2024	St_2	N 54°10,814' E 12°02,299'

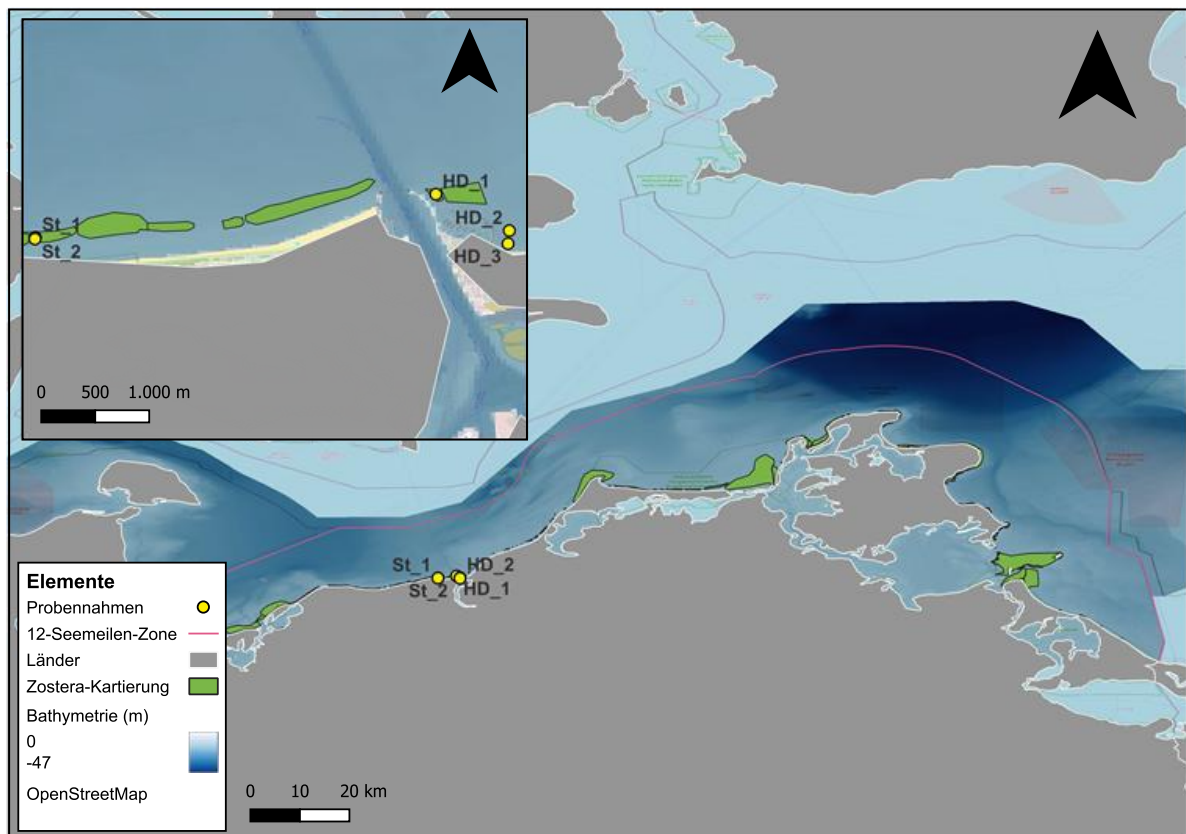


Abb. 2 Untersuchungsgebiete bei Stoltera und Hohe Düne entlang der MV-Küste. Gelbe Kreise markieren die Probenahmestellen; die 12-Seemeilen-Zone ist als rote Linie dargestellt. Landflächen sind in grau und das Meer ist in hellblau abgebildet. Die Bathymetrie nach TAUBER (2012) (weiß bis dunkelblau) und die ZOSINF *Zostera*-Kartierung (SCHUBERT & SCHYGULLA, 2017) entlang der MV-Küste wird in grün gezeigt (erstellt mit der QGIS-Version 3.38.0).

Die Untersuchungen wurden größtenteils während Forschungstaucheinsätzen vom Forschungsschiff Limanda aus durchgeführt. Eine Ausnahme ist die Untersuchung an HD_3, die vom Strand aus im Schwimmbereich erfolgte.

Zusätzlich wurden am 16.07.2024 Seegrassproben für Messungen mit dem Junior PAM schnorchelnd vom Strand aus an der Hohen Düne entnommen. Diese Probenahme fand im Koordinatenbereich von HD_3 statt und werden daher zu HD_3 gezählt, unabhängig vom abweichenden Datum.

2.2 Pulse-Amplituden-Modulations-Fluorometrie

In den nachfolgenden Abschnitten werden die zwei verwendeten PAM-Messgeräte vorgestellt, die zur Analyse der Photosynthese Aktivität der Seegräser genutzt wurden.

2.2.1 Diving PAM

Zunächst wurde das Diving PAM I (Heinz Walz GmbH, Effeltrich, Deutschland) eingesetzt, um an jedem Standort 12-13 Lichtkurvenmessungen *in situ* unter Wasser durchzuführen (Abb. 3).

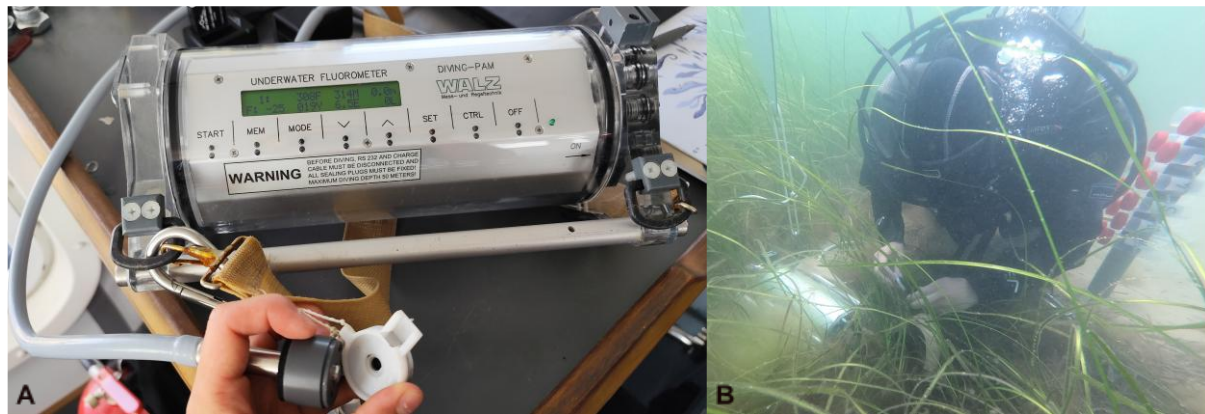


Abb. 3 Diving PAM (A) mit Fiber Adapter und (B) im Taucheinsatz mit Tube-Halterung

Die Seegräser wurden für 15 min dunkel adaptiert. Hierfür wurde ein Fiber-Adapter (DIVING_DA Adapter, WALZ) verwendet, der konsistente Messbedingungen und Positionierung ermöglicht. Die Messungen der Lichtkurven erfolgten unter Anwendung von Lichtintensitäten in den Stufen 0, 31, 71, 123, 188, 260, 387, 546 und 824 $\mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Die Photosyntheseparameter wurden mittels Regressionsmodel nach WALSBY (1997) ermittelt.

Die in Tab. 2 aufgeführten Parameter-Einstellungen wurden vor den Untersuchungen mit Seegras im Labor getestet und anschließend für alle Messungen verwendet.

Tab. 2 Parametereinstellungen für das Diving PAM

Parameter	Einstellung
Gain	3
Damp	2
Measuring Light	8
Intensity	2
Light-Width	30 sec

2.2.2 Junior PAM

Weiterhin wurden an drei der Standorte jeweils 12-13 Lichtkurvenmessungen mit dem Junior PAM (Heinz Walz GmbH, Effeltrich, Deutschland, Abb. 4) durchgeführt. Hierfür wurden ganze Seegräser, jedoch ohne Rhizome, entnommen.



Abb. 4 Junior PAM

Die Messungen erfolgten entweder abgedunkelt vor Ort auf dem Forschungsschiff oder im Dunkellabor der Universität Rostock. Die Seegräser wurden mindestens 15 min lang dunkeladaptiert. Anschließend wurden sie mithilfe von Magneten am Lichtleiterkabel des Junior PAMs befestigt, sodass der Abstand zum Lichtleiterkabel konstant blieb. Die Lichtkurven wurden unter Belichtung mit Lichtintensitäten von 0, 65, 90, 125, 190, 285, 420, 625, 820 $\mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$ erfasst. Die Faktoren der Lichtkurven wurden nach WALSBY (1997) ermittelt.

Die in Tab. 3 gelisteten Einstellungen des Junior PAMs wurden für alle Messungen verwendet.

Tab. 3 Parametereinstellungen für das Junior PAM

Parameter	Einstellung
Gain	1
Damp	2
Measuring Light	4
Intensity	3
Light-Width	30 sec

2.2.3 Statistische Analyse

Die Daten wurden zu Beginn geprüft und dabei wurden einige Messungen aufgrund technischer Probleme und auffälliger Abweichungen ausgeschlossen. Außerdem waren die Einstellungen des Diving PAMs bei St_1 verstellt, sodass die Lichtkurvenmessungen nicht genutzt werden konnten.

Die statistischen Analysen erfolgten mit der R Version 4.4.1 (R CORE TEAM, 2024). Zur Überprüfung der Normalverteilung der Daten wurde der Shapiro-Wilk-Test (shapiro.test) verwendet. Anschließend wurde mit dem t-Test (t.test) auf einen Mittelwertunterschied geprüft.

Zur Untersuchung multivariater Zusammenhänge wurde die Hauptkomponentenanalyse (prcomp) und die Multidimensionale Skalierung

(metaMDS) basierend auf der Bray-Curtis-Dissimilarität (bray) angewendet. Die PCA wurde durchgeführt, um die Hauptkomponenten der Variation in den Daten zu identifizieren und zu visualisieren. Dafür wurde die Funktion prcomp verwendet und die Daten durch eine Z-Transformation standardisiert (scale. = TRUE), um unterschiedliche Messgrößen der Variablen zu berücksichtigen. Die MDS-Analyse wurde mit der Funktion metaMDS aus dem vegan-Paket (OKSANEN et al., 2024) durchgeführt, um die Bray-Curtis-Dissimilaritäten zwischen den Proben zu visualisieren.

Die Ergebnisse wurden bei $p < 0,05$ als signifikant betrachtet. Bei der MDS wurde eine Stressbewertung $< 0,05$ als gute Anpassung angesehen. Die grafische Darstellung der Ergebnisse erfolgte durch Balkendiagramme und Scatterplots, erstellt mit dem ggplot2 Paket (WICKHAM, 2016).

3 Ergebnisse

Die Tab. 4 präsentiert die Ergebnisse der Parameter ETR_{max} , α , I_k und Dark Yield der sowohl mit dem Junior PAM als auch mit dem Diving PAM durchgeführten Lichtkurvenmessungen. Es muss berücksichtigt werden, dass für HD_1 keine Lichtkurvenmessungen mit dem Junior PAM erfolgten. Außerdem stammen die Proben des Junior PAMs bei HD_3 zwar vom gleichen Standort, wurden jedoch an einem anderen Tag entnommen.

Tab. 4 Ergebnisse vom Junior- und Diving PAM pro ID, dargestellt sind die Mittelwerte und Standardabweichungen von den maximalen Elektronentransportraten (ETR_{max}), α , I_k und Dark Yield

PAM	ID	ETR_{max} ($\mu\text{mol e m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	α (e Photonen $^{-1}$)	I_k ($\mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Dark Yield
Junior PAM	HD_2	35,28 $\pm$ 7,53	0,44 $\pm$ 0,07	79,99 $\pm$ 7,45	0,75 $\pm$ 0,02
	HD_3	41,43 $\pm$ 7,90	0,54 $\pm$ 0,09	77,70 $\pm$ 16,92	0,73 $\pm$ 0,03
	St_2	46,55 $\pm$ 11,19	0,56 $\pm$ 0,10	84,12 $\pm$ 16,19	0,68 $\pm$ 0,07
Diving PAM	HD_1	16,72 $\pm$ 2,10	0,78 $\pm$ 0,13	21,98 $\pm$ 4,10	0,78 $\pm$ 0,06
	HD_2	17,06 $\pm$ 4,44	1,15 $\pm$ 0,34	15,91 $\pm$ 6,02	0,77 $\pm$ 0,01
	HD_3	29,61 $\pm$ 4,91	0,71 $\pm$ 0,21	44,22 $\pm$ 10,78	0,72 $\pm$ 4,91
	St_2	24,69 $\pm$ 4,77	0,48 $\pm$ 0,18	30,64 $\pm$ 8,89	0,74 $\pm$ 0,06

Abb. 5 stellt den Unterschied zwischen dem Diving und dem Junior PAM dar.

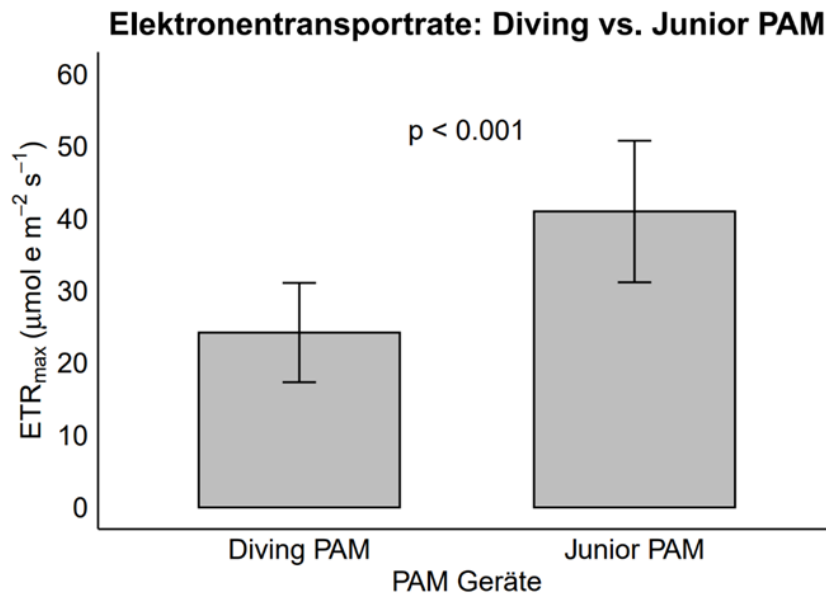


Abb. 5 Vergleich der ETR_{max} zwischen dem Diving und Junior PAM. Die Balken geben den Mittelwert der ETR_{max} für jedes Gerät an, wobei die schwarzen Linien die Standardabweichungen darstellen. Der Unterschied zwischen den beiden Geräten ist statistisch signifikant ($p < 0,001$).

Der Vergleich (ohne HD_1) verdeutlichte einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Geräten (t-Test; $t(68) = -8,25$; $p < 0,001$; $n = 45$; Abb. 5). Der Mittelwert der ETR_{max} des Diving PAMs ($24,03 \mu\text{mol e m}^{-2} \text{s}^{-1} \pm 7,00 \mu\text{mol e m}^{-2} \text{s}^{-1}$) war signifikant niedriger als vom Junior PAM ($40,33 \mu\text{mol e m}^{-2} \text{s}^{-1} \pm 9,73 \mu\text{mol e m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Das 95%-Konfidenzintervall für die Differenz der Mittelwerte lag zwischen -20,82 und -12,70.

Anschließend wird untersucht, ob es PAM-Geräte abhängige Unterschiede gibt, die unabhängig von den Untersuchungsgebieten sind. Sowohl die PAM-Geräte als auch die Standorte werden dabei als Einflussfaktoren betrachtet. Dies wird in Abb. 6 mithilfe einer Hauptkomponentenanalyse (A, B) und Multidimensionalen Skalierung (C, D) dargestellt.

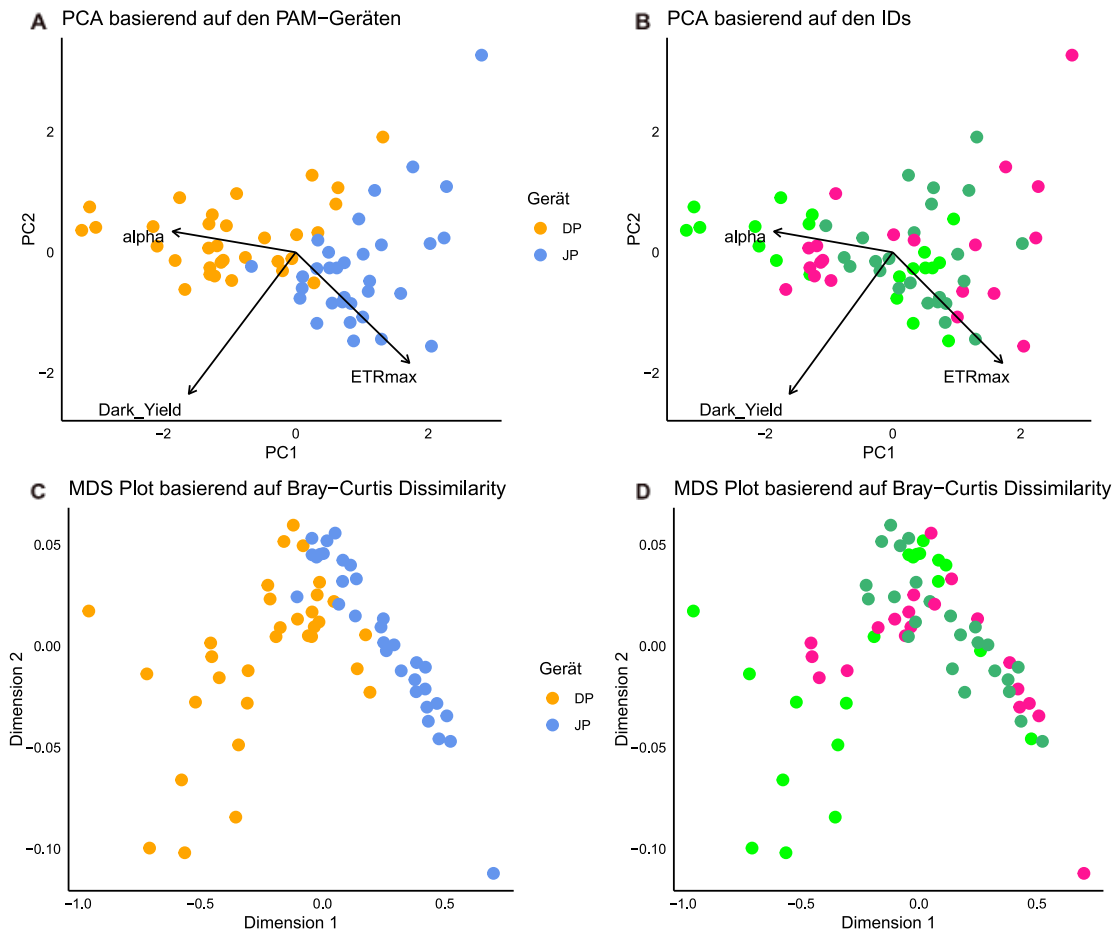


Abb. 6 Eine Hauptkomponentenanalyse (PCA) mit den Variablen (Pfeilen) alpha, Dark_Yield und ETR_{max} ist in (A) mit den PAM-Geräten und in (B) mit den Standorten (IDs) als Faktoren dargestellt. Eine Multidimensionale Skalierung (MDS) basierend auf der Bray-Curtis-Dissimilarität ist zur Unterscheidung der Messungen zwischen den PAM-Geräten in C und zwischen den IDs in D gezeigt. Die Messungen des Diving PAMs (DP) sind orange und die des Junior PAMs (JP) in blau. Die IDs sind für HD_2 in hellgrün, HD_3 in dunkelgrün und St_2 in pink präsentiert.

Zur Durchführung der Hauptkomponentenanalysen (PCA) wurden die Variablen alpha, Dark_Yield und ETR_{max} mit einer Z-Transformation standardisiert. Die Abb. 6 A und B stellen die PCAs dar, welche die Daten auf zwei Hauptkomponenten reduzierten, die zusammen 84,1 % der Gesamtvarianz erklären. Die erste Hauptkomponente (PC1) erklärt 61,1 % der Varianz, während die Zweite (PC2) 23,0 % der Varianz ausmacht. Die Variablen tragen zu den Hauptkomponenten wie folgt bei: ETR_{max} weist eine positive Ladung auf PC1 (0,572) und eine negative Ladung auf PC2 (-0,614) auf, während Dark_Yield und alpha auf PC1 mit -0,538 bzw. -0,619 und auf PC2 mit -0,783 bzw. 0,115 geladen sind. Abb. 6 A präsentiert die Ergebnisse der PCA, bei der die PAM-Geräte (DP und JP) als Faktoren betrachtet wurden. Obwohl es leichte Überlappungen gibt, sind die meisten Datenpunkte des Diving PAMs auf der linken Seite und die des Junior PAMs auf der rechten Seite konzentriert. Diese Trennung zeigt, dass die Messungen basierend auf den verwendeten PAM-Geräten unterschieden werden können. Im Gegensatz dazu zeigt die Abb. 6 B die PCA, bei welcher die Standorte (HD_2, HD_3 und St_2) als Faktoren verwendet wurden. Die

Ergebnisse zeigen eine deutliche Überlappung der Messungen von den verschiedenen Standorten, während die Daten der Diving- und Junior PAM-Geräte voneinander getrennt sind. Dies verdeutlicht, dass die Unterschiede in den Photosyntheseparametern überwiegend durch die verwendeten Geräte und nicht durch die Untersuchungsstandorte bedingt sind.

Komplementär wurden Multidimensionale Skalierungen (MDS) verwendet, um die Ähnlichkeiten und Unterschiede der Messungen zwischen den PAM-Geräten oder Untersuchungsgebieten basierend auf der Bray-Curtis-Distanzmatrix zu visualisieren. Die MDS-Modelle wurden in zwei Dimensionen ($k = 2$) dargestellt. Die MDS zur Unterscheidung der Messungen zwischen den PAM-Geräten (Abb. 6 C), weist mit einer Stressbewertung von 0,0076 auf eine gute Anpassung des Modells hin. Die Messungen des Diving PAMs gruppieren sich auf der linken Seite, während sich die Messungen des Junior PAMs auf der rechten Seite konzentrieren, mit nur einer geringen Überlappung in der Mitte des Diagramms. Dies deutet auf Unterschiede in den Messungen zwischen den beiden Geräten hin. Abb. 6 D präsentiert die MDS zur Unterscheidung der Messungen zwischen den Untersuchungsgebieten und weist ebenfalls eine gute Anpassung mit einer Stressbewertung von 0,0076 auf. Im Gegensatz zu den Ergebnissen bei den PAM-Geräten als Faktoren überschneiden sich die Messungen, die den verschiedenen Standorten zugeordnet sind, deutlich.

Dies deutet zusammen mit den Ergebnissen der PCA darauf hin, dass die Variabilität der Photosynthese Parameter primär auf Unterschiede zwischen den Geräten, unabhängig von den Untersuchungsgebieten, zurückzuführen ist.

4 Diskussion

Um die Photosyntheseaktivität umfassend bewerten zu können sind präzise Bestimmungen der Photosyntheseparameter erforderlich. Allerdings war der Mittelwert der ETR_{max} des Diving PAMs signifikant niedriger im Vergleich zum Junior PAM.

Die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse (PCA) und der Multidimensionalen Skalierung (MDS) veranschaulichen, dass die Unterschiede in den Photosyntheseparametern hauptsächlich durch die unterschiedlichen PAM-Geräte (Diving PAM und Junior PAM) bedingt waren, unabhängig von den Untersuchungsstandorten (HD_2, HD_3 und St_2).

Es ist wahrscheinlich, dass die Geräte unterschiedliche Sensitivitäten und Unterschiede in der Kalibrierung oder Fluoreszenzerfassung aufweisen. Darüber hinaus könnten die unterschiedlichen Messbedingungen eine Rolle spielen. Während das Diving PAM für *in situ* Messungen verwendet wurde, wurden die Seegrassproben für das Junior PAM aus den Seegrasswiesen entnommen und anschließend im Dunkellabor oder unter abgedunkelten Bedingungen analysiert.

Hierbei ist zu beachten, dass für das Diving PAM aufgrund der Umgebungsbedingungen unter Wasser andere Parametereinstellungen notwendig waren. Aber die Erfassung der Lichtkurven erfolgte mit beiden PAM Geräten unter ähnlichen Lichtintensitätsstufen.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Junior PAM Messungen am Standort HD_3 probenahmebedingt drei Tage vor denen des Diving PAMs durchgeführt wurden. Diese zeitliche Variation könnte die Ergebnisse beeinflusst haben, da sich sowohl die Umweltbedingungen als auch die physiologische Verfassung der Seegräser in der Zwischenzeit verändert haben könnten. Dies könnte erklären, warum

HD_3 mit dem Diving PAM höhere ETR_{max} aufwies, während bei den Messungen mit dem Junior PAM St_2 die höchsten ETR_{max} zeigte. Um einen zeitlichen Faktor ausschließen zu können, sollten deshalb Proben am besten zur gleichen Zeit gemessen werden.

Die Diskrepanz in den Messungen zwischen den Geräten schränkt die Vergleichbarkeit von Daten aus verschiedenen Studien oder Untersuchungen ein, wenn unterschiedliche PAM-Systeme verwendet werden. Deshalb ist es erforderlich, dass die Ergebnisse immer im Kontext mit den eingesetzten Geräten und der verwendeten Methodik interpretiert werden. Es ist jedoch möglich, dass die relativen Veränderungen der ETR in Abhängigkeit von Umweltparametern, wie der photosynthetisch aktiven Strahlung, dennoch aufschlussreich sind. Denn die absoluten Werte unterliegen in der Praxis häufig Unsicherheiten, während jedoch die relativen Veränderungen unter ähnlichen Bedingungen vergleichbar sein können (SCHREIBER, 2004).

Zusammenfassend konnten die Hypothesen bestätigt werden:

- 1) Es gibt signifikante Messunterschiede zwischen dem Diving und Junior PAM.
- 2) Es gibt PAM-Geräte abhängige Unterschiede, die unabhängig von den Untersuchungsgebieten sind.

Dementsprechend ist es notwendig, bei der Wahl des Messgeräts ihre Vor- und Nachteile zu berücksichtigen und bei der anschließenden Analyse und Interpretation sowohl die Geräteauswahl als auch die jeweiligen Messbedingungen zu beachten.

Zusammenfassung

Seegraswiesen sind bedeutende marine Ökosysteme. Sie bieten vielen Arten Lebensraum und Nahrung, schützen die Küsten vor Erosion und können als Kohlenstoffsinken zur Minderung des Klimawandels beitragen.

Für ihre ökologischen Funktionsfähigkeiten ist die Photosyntheseleistung der Seegräser elementar. Diese kann durch Lichtkurvenmessungen mittels Puls-Amplituden-Modulierter (PAM) Chlorophyll-Fluorometrie bestimmt werden. Jedoch könnten unterschiedliche Geräte und Messmethoden Auswirkungen auf die photosynthetischen Parameter haben.

Dementsprechend wurde in dieser Studie ein Methodenvergleich zwischen dem Diving und Junior PAM von WALZ durchgeführt. Beide Geräte haben je nach Zielstellungen Vor- und Nachteile. Das Diving PAM ermöglicht *in situ* Messungen ohne Proben entnehmen zu müssen. Demgegenüber bietet das Junior PAM stabilere Messungen unter kontrollierten Bedingungen, erfordert jedoch eine Pflanzenentnahme. Ein Vergleich der Photosyntheseparameter zwischen Diving- und Junior PAM zeigte signifikante Unterschiede und verdeutlicht die Bedeutung der Gerätewahl und die Notwendigkeit diese bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meiner Erstbetreuerin, Dr. Anne Herbst, für ihre umfassende Betreuung, die eine motivierende und vertrauensvolle Atmosphäre geschaffen hat. Ebenso danke ich meinem Zweitbetreuer, Prof. Dr. Hendrick Schubert, für seine Unterstützung. Für die Erweiterung meiner Daten möchte ich besonders der Forschungstauchausbildung 2024 danken, sowie Leonhard Paschold, Max Stünkel und Pauline Beckmann. Außerdem danke ich Alena-Maria Maidel, Carolin Magdalene Heise und Daniela Glück für ihre Erklärungen und Zeit.

Literatur

- Bos, A. R., Bouma, T. J., de Kort, G. L. J., & van Katwijk, M. M. (2007). Ecosystem engineering by annual intertidal seagrass beds: Sediment accretion and modification. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 74, 344–348.
- Christiansen, C., Christoffersen, H., Dalsgaard, J., & Nørnberg, P. (1981). Coastal and near-shore changes correlated with die-back in eelgrass (*ZOSTERA MARINA*, L.). *Sedimentary Geology*, 28, 163–173.
- Coles, R. G., & Short, F. T. (2001). *Global Seagrass Research Methods* (Bd. 33). Elsevier, Amsterdam.
- Duarte, C. M., Middelburg, J. J., & Caraco, N. (2005). Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle. *Biogeosciences*, 2, 1–8.
- Duarte, C. M. (2017). Reviews and syntheses: Hidden forests, the role of vegetated coastal habitats in the ocean carbon budget. *Biogeosciences*, 14, 301–310.
- Eilers, P. H. C., & Peeters, J. C. H. (1988). A model for the relationship between light intensity and the rate of photosynthesis in phytoplankton. *Ecological Modelling*, 42, 199–215.
- Gracia, A. C., Rangel-Buitrago, N., Oakley, J. A., & Williams, A. T. (2017). Use of ecosystems in coastal erosion management. *Ocean & Coastal Management*, 1, 1–13.
- Kroon, B. M. A., van Hes, U. M., & Mur, L. R. (1992). An algal cyclostat with computer-controlled dynamic light regime. *Hydrobiologia*, 238, 63–70.
- Oksanen, J., Simpson, G. L., Blanchet, F. G., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P. R., O'Hara, R. B., Solymos, P., Stevens, M. H. H., Szoecs, E., Wagner, H., Barbour, M., Bedward, M., Bolker, B., Borcard, D., Borman, T., Carvalho, G., Chirico, M., De Caceres, M., Durand, S., Evangelista, H. B. A., FitzJohn, R., Friendly, M., Furneaux, B., Hannigan, G., Hill, M. O., Lahti, L., McGlinn, D., Ouellette, M.-H., Ribeiro Cunha, E., Smith, T., Stier, A., Ter Braak, C. J. F., & Weedon, J. (2024). *vegan: Community Ecology Package*. R package version 2.6-8.
- Ralph, P. J., & Gademann, R. (2005). Rapid light curves: A powerful tool to assess photosynthetic activity. *Aquatic Botany*, 82, 222–237.
- R Core Team (2024). *_R: A Language and Environment for Statistical Computing_*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Schreiber, U. (2004). Chapter 11 Pulse-Amplitude-Modulation (PAM) Fluorometry and Saturation Pulse Method: An Overview. In G. C. Papageorgiou & Govindjee (Hrsg.), *Chlorophyll a Fluorescence: A Signature of Photosynthesis* (S. 280–319). Springer, Berlin.
- Schubert, H., & Schygulla, C. (2017). Abschlussbericht des Fachprojektes: „Die Erfassung rezenter *Zostera*-Bestände und weiterer Makrophyten in den Küstengewässern MV“ (ZOSINF).
- Tauber, F. (2012). Meeresbodensedimente und Meeresbodenrelief in der Deutschen Ostsee: Datenpositionen und Blattschnitt, Karte Nr. 2930. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie.
- Walsby, A. E. (1997). Modelling the daily integral of photosynthesis by phytoplankton: its dependence on the mean depth of the population. *Hydrobiologia*, 349, 65–74.
- Wickham, H. (2016) *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York.