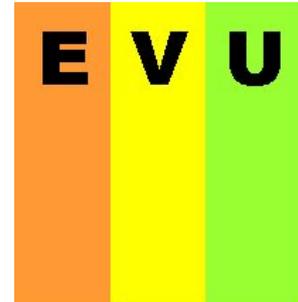




Studienort Wilhelmshaven



Institut für Energie-
Verfahrens- und
Umwelttechnik

**Beitrag zur Bewertung der Freistrahlanlagen im Banter See Wilhelmshaven
im Zusammenhang mit dem Wettergeschehen,
Jahre 2007 bis 2011**

Inhalt:

	Seite
1. Einleitung	2
2. Der Freistrah	3
3. Phänomenologische Gegebenheiten	6
4. Gewässer- und Wetterdaten im Zusammenhang	11
5. Zusammenfassung	50
6. Symbolverzeichnis	52
7. Literatur	53

Erstellt von: Prof. Dr.-Ing. Bernhard Winter
Jade Hochschule, Studienort Wilhelmshaven
Fachbereich Ingenieurwissenschaften
Institut Energie- Verfahrens- und Umwelttechnik (EVU)

Friedrich-Paffrath-Str. 101
26389 Wilhelmshaven

E-Mail.: bernhard.winter@jade-hs.de
Internet.: <http://www.jade-hs.de/?d=8326>

1. Einleitung

Freistrahlanlagen zur Gewässerbelüftung können verwendet werden, um sauerstoffreiches Oberflächenwasser in tiefere Ebenen des Gewässers zu transportieren. Mit diesem sauerstoffreichen Wasser werden dort aerobe chemisch-biologische Prozesse unterstützt. Der Freistrahl wirkt demnach für ein Gewässer mittels einer erzwungenen Konvektion durchmischungsfördernd, d.h. er ist in der Lage vertikale Schichtungen zu reduzieren.

Das Prinzip der Freistrahntechnik basiert auf dem geringen Energieeinsatz für diesen Wassertransport, weil die Freistrahlausbreitung nicht mit hoher Intensität stattfinden muss. Die Konsequenz ist allerdings, dass sich schnelle, bzw. kurzfristige Wirkungen von Freistrahlanlagen auf ein Gewässer ausschließen.

Im Auftrag der Stadt Wilhelmshaven werden auf dem Banter See unter der Projektleitung von LÜCKING seit dem Jahr 2008 eine und seit 2009 zwei Freistrahlanlagen betrieben, um in einer 5-jährigen Langzeituntersuchung einen Beitrag zur "Bekämpfung der Blaualgenproblematik im Banter See" /1/ zu leisten.

Ein Gewässer kann mit seinen Zustandsgrößen sowohl durch Wettereinflüsse wie z.B. durch Sturmereignisse oder die Sonneneinstrahlung als auch durch ablaufende chemisch-biologische Prozesse im jahreszeitlichen Verlauf ein unterschiedliches Verhalten einnehmen. Dieses Verhalten reicht von der Gradientenfreiheit für diese Zustandsgrößen, d.h. der so genannten "idealen Durchmischung" bis hin zur mehr oder weniger starken vertikalen Gradientenbildung, die auch als vertikale Schichtung bezeichnet wird. Bei solchen Schichtungen kann es in der Tiefe häufig zu einer Sauerstoffverarmung kommen, wobei dann häufig schädliche anaeroben Prozesse ablaufen, die das ökologische Gleichgewicht im Gewässer empfindlich stören. Wird die Gradientenfreiheit für die Zustandsgrößen in einem Gewässer mit einer intensiven Wasserdurchmischung (freie oder erzwungene Konvektion) erreicht, dann ist die Versorgung des Wassers mit Sauerstoff für ein ökologisch intaktes Gewässer im Allgemeinen gewährleistet.

An dieser Stelle muss allerdings betont werden, dass z.B. beim Ausbleiben von Temperaturgradienten in Folge fehlender Sonneneinstrahlung der Gewässerzustand zwar auch mit einer "idealen Durchmischung" beschrieben werden kann, dass dabei aber keinerlei Konvektionen eine Rolle gespielt haben müssen. In solchen Fällen der Gradientenfreiheit ist nicht auszuschließen, dass es trotz des Zustandes der "idealen Durchmischung" in der Tiefe des Gewässers zu einer Sauerstoffverarmung mit den beschriebenen negativen Folgen kommt.

Beim Betreiben von Freistrahlanlagen muss geklärt werden, wie groß der eigene Beitrag zum Abbau von Gradienten, also der Veränderung des Durchmischungszustandes im Gewässer im Vergleich zum Wettergeschehen ist. Bezüglich der Temperatur als betrachtete Zustandsgröße können sich im Gewässer prinzipiell isotherme Bedingungen oder sehr unterschiedlich starke vertikale Temperaturschichtungen ausbilden.

Für die Bewertung der Blaualgenproblematik spielen neben der Temperatur ca. **25** weitere chemisch-biologischen Zustandsgrößen /2/ und deren jahreszeitliches Verhalten im Gewässer eine große Rolle, deren gesamte Analyse im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgenommen werden soll.

In dieser Arbeit werden neben der Temperatur auch noch die Sauerstoffsättigung als Parameter des Gewässers betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass das jahreszeitliche Temperatur- und das Sauerstoffsättigungsverhalten nicht im unmittelbaren Zusammenhang stehen muss.

Beispielsweise können trotz isothermer Bedingungen in einem Gewässer sehr große Gradienten z.B. für die Sauerstoffsättigung auftreten, wenn besonders hohe biologische Aktivitäten zu verzeichnen sind.

Für die Betreiber von Freistrahlanlagen ist von großer Wichtigkeit, wie die Wirkung von solchen Anlagen im Gewässer in Verbindung mit dem Wettergeschehen ist und welche Effizienz sie dabei entwickeln.

Da keine direkte Messdaten, z.B. zur Freistrahlausbreitung oder zur windbedingten erzwungenen Konvektion im Gewässer zur Verfügung stehen, kann nur mit der aufwendigen Analyse von indirekten globalen Gewässer- und meteorologische Daten diesbezügliche Aussagen erbracht werden.

Bei der Bewertung von Anlagen sollten Kostenbetrachtungen eine große Rolle spielen, um die Effektivität unter Wirtschaftlichkeitsaspekten beurteilen zu können. In dieser Arbeit muss jedoch darauf verzichtet werden, weil vor allem für die variablen Kosten der Freistrahlanlagen zu wenige Positionen bekannt sind.

2. Der Freistrah

Die Freistrahlanlage **BANT 1** ist im Jahr 2008 und die Anlage **BANT 2** im Jahr 2009 in Betrieb gegangen. Beide Anlagen laufen jährlich von Anfang April bis Mitte Oktober. In den Jahren 2008 und 2009 traten an den Anlagen jedoch noch havariebedingten Unterbrechungen auf /3/. Ab dem Jahr 2010 laufen beide Anlagen erwartungsgemäß ohne Ausfälle und sie sind auch jetzt im Jahr 2012 in Betrieb.

In einer vorhergehenden theoretischen Arbeit konnte nachgewiesen werden, dass die Ausbreitung des Freistrahls in einem Gewässer sehr stark von seinem Durchmischungs-/Schichtungsverhalten abhängt /4/. Bei isothermen Bedingungen, wenn also für die Temperatur Gradientenfreiheit vorliegt, kann sich ein schräg nach unten gerichteter Freistrahler geradlinig ausbreiten, bis in tiefste Lagen des Gewässers gelangen und somit zur Belüftung des Tiefenwassers beitragen.

Treten dagegen vertikale Temperaturgradienten auf, so vollzieht dieser Freistrahler auftriebsbedingt eine mehr oder weniger große Bahnkurve, die von dieser Temperaturschichtung abhängt. Die Freistrahlausbreitung ist dann von der Tiefe und von der horizontalen Weite her stark eingeschränkt und die durchmischungsfördernde, bzw. die gradientenabbauende Wirkung des Freistrahls reicht nicht in größere Tiefen. Im Bild 1 ist eine gemessene vertikale Temperaturfunktion für den Banter See aus dem Jahr 2002 zu sehen /5/.

Diese vertikale Temperaturfunktion im Bild 1 stellt ein Momentaufnahme während einer Schönwetterperiode dar und sie kann je nach Wetterbedingungen, z.B. nach Starkwindereignissen oder bei kühler Witterung, auch wesentlich flacher verlaufen.

Die Temperaturdifferenz von der Wasseroberfläche bis zur Tiefe von **-9 m** (im Folgenden als vertikale Temperaturdifferenz bezeichnet) im Bild 1, liegt mit ca. **5 K** in der gleichen Größenordnung, wie sie verschiedentlich auch in den Jahren 2007 bis 2011 gemessen worden ist (siehe Bild 6).

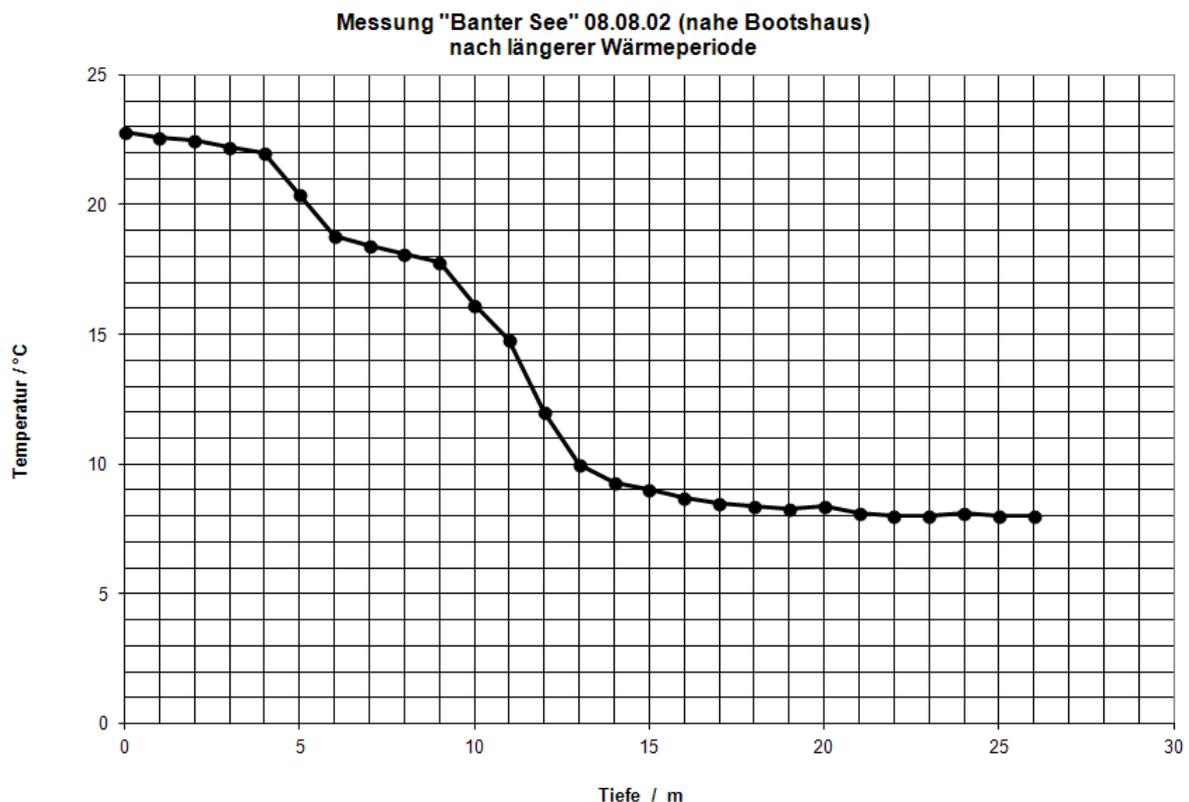


Bild 1 Vertikale Temperaturfunktion für den Banter See am 08.08.2002 /5/

Auch wenn die vertikale Temperaturdifferenz im Gewässer mit geringer ausfällt, kann diese verhindern, dass der Freistrahl in größere Tiefen des Gewässers reicht, um dort einen Beitrag zur Gewässerbelüftung zu leisten.

In der genannten theoretischen Arbeit /4/ wurden prinzipielle Bahnkurven des Freistrahls für verschiedene Bedingungen berechnet, die sich grundsätzlich bei Temperaturschichtungen im Gewässer ergeben.

Im Bild 2 sind zwei prinzipielle Bahnen des Freistrahls zu sehen. Die Funktion **12** zeigt den Fall für eine angenommene vertikale Temperaturdifferenz von **5 K**, für einen Anstellwinkel des Leitrohres der Freistrahlanlage von **30 °** zur Senkrechten und für eine elektrische Leistung von **1,9 kW**.

Die sich dabei einstellende Bahnkurve reicht bis zu einer maximalen Tiefe von nur ca. **-8 m** und bis zu einer horizontalen Weite von nur ca. **12 m**. Außerdem erreicht der Freistrah wieder die Wasseroberfläche.

Die Funktion **13** repräsentiert bei sonst gleichen Bedingungen den isothermen Fall und der Freistrah gelangt wegen der linearen Ausbreitung erwartungsgemäß bis in größte Tiefen des Gewässers.

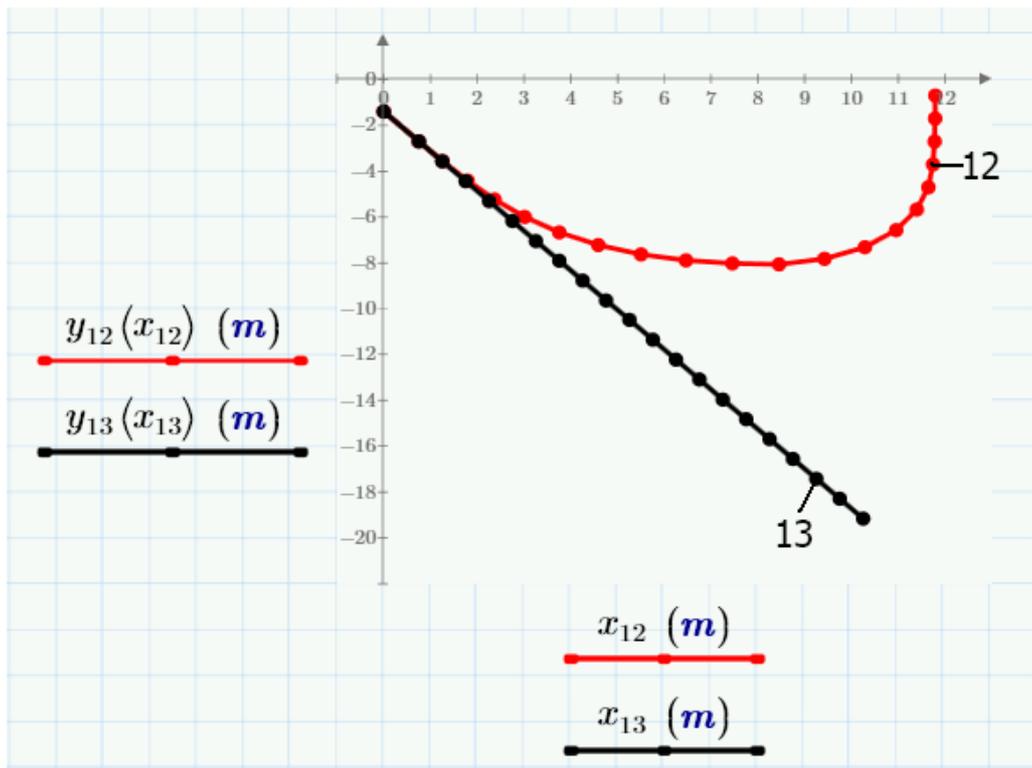


Bild 2 Freistrahlanlagen für den Fall der Temperaturschichtung (12) und für isothermen Bedingungen (13) /4/

Das Bild 3 zeigt bei sonst gleichen Bedingungen den wesentlich flacheren Verlauf der Bahnkurve **12-60** mit zwei Umkehrpunkten, wenn der Anstellwinkel des Leitrohres der Anlage von **30 °** auf **60 °** (zur Senkrechten) vergrößert wird. Dieser Anstellwinkel von **60 °** zur Senkrechten wurde bei den Freistrahlanlagen **BANT 1** und **2** realisiert.

Die Bahnkurve **12-60** verläuft allerdings noch flacher, wenn der Anstellwinkel des Leitrohres auf **70 °** zur Senkrechten vergrößert wird, wie es offensichtlich im Jahr 2011 im Fall der Anlage BANT 2 geschehen ist.

Die Schlussfolgerung ist, dass der Anstellwinkel des Leitrohres der Freistrahlanlage möglichst steil sein sollte, um mit dem Freistrah auch tiefere Bereiche des Gewässers erreichen zu können.

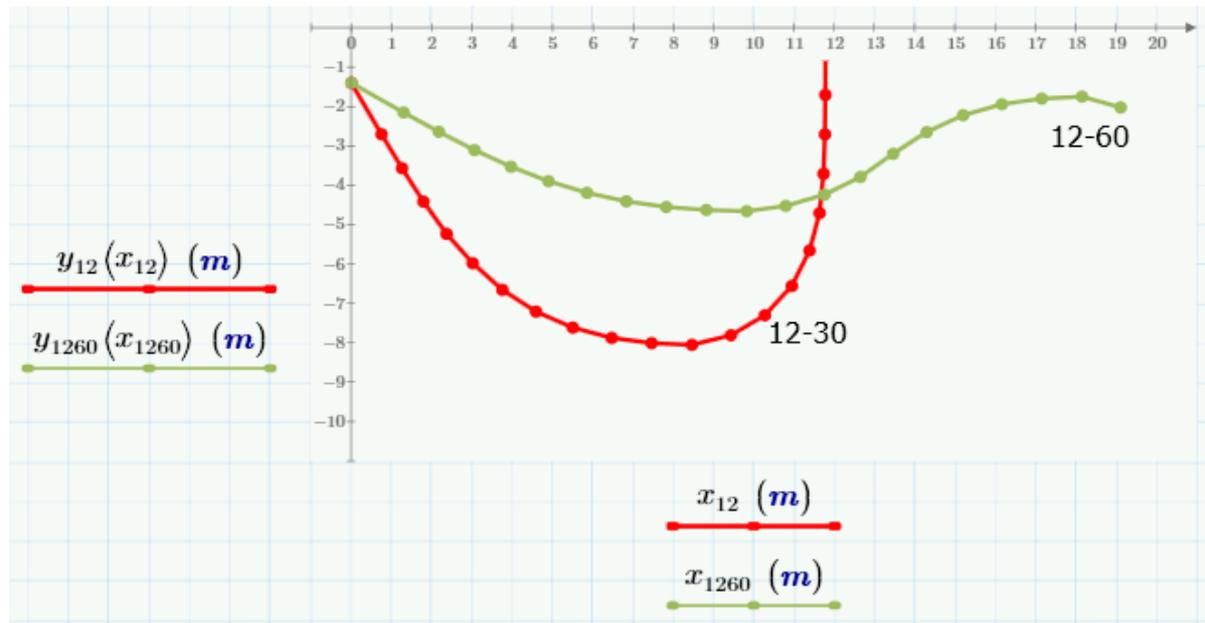


Bild 3 Bahnkurven bei verschiedenen Anstellwinkeln zur Senkrechten /4/,
Funktion 12-30: **30 °**
Funktion 12-60: **60 °** (wie BANT 1 und 2)

3. Phänomenologische Gegebenheiten

- Sonneneinstrahlung

Die Erwärmung eines Gewässers während einer Schönwetterperiode durch die Sonneneinstrahlung geschieht selbstverständlich von der Wasseroberfläche aus und deshalb ist die vertikale Temperaturdifferenz eine wichtige Größe zur Beurteilung der Intensität dieses Energieeintrages (Strahlungsstärke).

Es soll durch eine überschlägliche Berechnung zur Statik der Wärmeübertragung abgeschätzt werden, in welcher Zeit sich die vertikale Temperaturdifferenz ausbilden kann. Diese Zeit steht dann im unmittelbaren Zusammenhang zu der Zeit, in der sich diese vertikale Temperaturdifferenz durch die Freistrahlanlagen eventuell wieder reduzieren lässt.

Für die globale Strahlungsstärke, die auf eine waagerechten Fläche auftrifft, wird für die Sommermonate zur Mittagszeit in Norddeutschland bei klarem bis leicht diffussem Himmel der Bereich von **700 bis 1000 W/m²** (spezifische Leistung) angegeben /6/. Für die folgende Berechnung wird der Mittelwert **850 W/m²** verwendet.

Die Erwärmung einer Wassersäule mit der Grundfläche von **1 m²** durch die Sonneneinstrahlung, bei einer angenommenen linearen Temperaturabnahme von der Wasseroberfläche bis zu einer Tiefe von **-9 m** um **5 K**, lässt sich mit folgendem Bild 4 durch den Tiefenverlauf der vertikalen Temperaturdifferenz verdeutlichen.

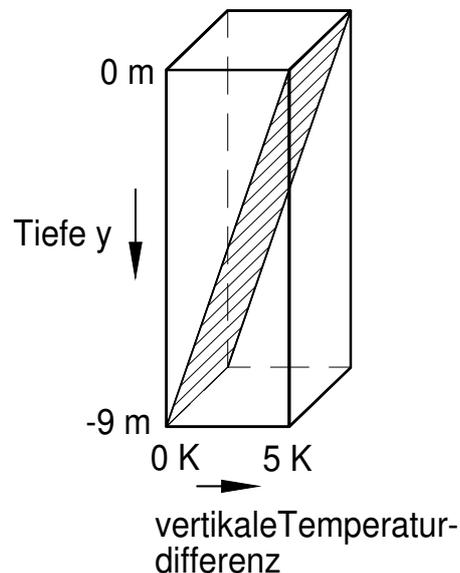


Bild 4 Angenommener linearer Verlauf der vertikalen Temperaturdifferenz von **5** bis auf **0 K** von der Oberfläche bis zur Tiefe von **-9 m** eines Gewässers

Nach Bild 4 ergibt sich für die gesamte Wassersäule ein arithmetischer Mittelwert der vertikalen Temperaturdifferenz von **2,5 K**.

Für die durch die Sonneneinstrahlung aufgenommene Wärme der Wassersäule gilt folgende Gl(1):

$$Q_{12} = m c_p \Delta T \quad (1)$$

Hierin bedeutet ΔT die Temperaturdifferenz für die Erwärmung der gesamten Flüssigkeitssäule als Mittelwert und ist im Beispiel entsprechend Bild 4 mit **2,5 K** anzunehmen.

Mit

$$\frac{Q_{12}}{A} = \dot{q}_{12} \quad \dot{q}_{12} = \frac{q_{12}}{t} \quad \rho_w = \frac{m}{V} = \frac{m}{A y} \quad (2)$$

folgt für die Zeit t der Erwärmung:

$$t = \frac{\rho_w y c_p \Delta T}{\dot{q}_{12}} \quad (3)$$

y Tiefe, **9 m** (als Positivwert)
 c_p spezifische Wärmekapazität des Wassers, **4187 W/(kg K)**
 ρ_w Dichte es Wassers, **1000 kg/m³**

Es folgt:

$$t = \frac{1000 \cdot 9 \cdot 4187 \cdot 2,5}{850}$$

$$t = 1,108 \cdot 10^5 \text{ s} = \underline{30,8\text{h}}$$

Diese erforderliche Erwärmungszeit der Wassersäule von **ca. 31 h** durch die Sonneneinstrahlung verteilt sich selbstverständlich auf mehrere Tage und es wird angenommen, dass in den Sommermonaten nach **ca. 1 Woche** diese Erwärmung des Gewässers erfolgt sein kann, d.h. dass sich nach dieser Zeit die vertikale Temperaturdifferenz von **5 K** bis zu einer Tiefe von **-9 m** aufgebaut hat.

In /4/ wurde die Wirkungszeit der beiden Freistrahlanlagen bei isothermen Bedingungen für den gesamten Banter See mit **19 bis 44,3 Tagen** ermittelt.

Wegen dieser großen Wirkungszeit ist ausgeschlossen, dass die Freistrahlanlagen, in den Sommermonaten den viel schnelleren Prozess des Aufbaues der vertikalen Temperaturdifferenz durch die Sonneneinstrahlung verhindern kann. Die Leistungen der beiden Freistrahlanlagen mit jeweils **1,9 kW** sind dazu viel zu klein.

- Aerobe Stoffumsetzung als exothermer Prozess

In dieser Arbeit wird noch festgestellt werden, dass in den Sommermonaten in der Tiefe des Gewässers aerob-biologische Prozesse ablaufen können, bei denen der Sauerstoffverbrauch die Sauerstoffsättigung im Wasser mitunter bis auf Werte von **20 bis 0 %** zurückgehen lässt. Da bekanntlich aerob-biologische Prozesse exotherm ablaufen, soll mittels einer Überschlagsberechnung abgeschätzt werden, wie groß die Temperaturzunahme im Gewässer ausfallen würde und ob diese Temperaturzunahme die vertikale Temperaturdifferenz von unten her, also von der Tiefe des Gewässers nennenswert verringern könnte.

Zur Vereinfachung wird von einer exothermen Kohlenstoffoxidation ausgegangen, wobei die Menge des gelösten Sauerstoffs im Gewässer den stofflichen und damit auch den energetischen Umsatz begrenzt.

Der energetische Umsatz für aerob-biologische Prozesse würde allerdings wegen der Biomasseerzeugung noch geringer als bei einer rein chemischen Oxidation ausfallen.

Für die Oxidation von Kohlenstoff gilt folgende stöchiometrische Gleichung /7/:



Hierin bedeuten Δh_R die Reaktionsenthalpie und das Minuszeichen, dass es sich um eine exotherme Reaktion handelt.

Bei einer Sauerstoffsättigung im Wasser von **10 g/m³ (14 °C)** /8/ und der Molmasse des Sauerstoffs von **32 g/mol** folgt, dass sich maximal folgende Molmenge Sauerstoff **n_{O₂}** pro **1 m³** umsetzt, wenn sämtlicher Sauerstoff verbraucht wird:

$$n_{O_2} = \frac{m}{M} = \frac{10 \text{ g / m}^3}{32 \text{ g / mol}} \quad (5)$$

$$n_{O_2} = \mathbf{0,313 \text{ mol / m}^3}$$

Daraus folgt für die Wärme pro **1 m³**, wobei sich das Minuszeichen durch die exotherme Reaktion ergibt:

$$\frac{Q_{12}}{V} = -\Delta h_R n_{O_2} \quad (6)$$

$$= \mathbf{394 \text{ kJ / mol} \cdot \mathbf{0,313 \text{ mol / m}^3}$$

$$\frac{Q_{12}}{V} = \mathbf{123,1 \text{ kJ / m}^3}$$

In Verbindung mit den Gln(1) und (2) folgt eine Temperaturerhöhung von:

$$\begin{aligned} \Delta T &= \frac{Q_{12} / V}{c_p \rho_w} \\ &= \frac{\mathbf{123,1 \text{ kJ / m}^3}}{\mathbf{4,189 \text{ kJ / (kg K)} \cdot \mathbf{1000 \text{ kg / m}^3}} \\ \Delta T &= \mathbf{0,03 \text{ K}} \end{aligned}$$

Die Temperaturerhöhung **ΔT = 0,03 K** durch die Kohlenstoffoxidation im Wasser ist damit so gering, dass diese praktisch keine Rolle für die vertikale Temperaturdifferenz spielen würde. Beim aerob-biologischen Prozess fällt diese Temperaturerhöhung wegen der Biomassenerzeugung dann noch deutlich kleiner aus.

- Eisbildung auf dem Gewässer

MICHELE /9/ führt das Ausbleiben von Eisbildungen auf dem Banter See während einer längeren Kälteperiode auch auf das Wirken der Freistrahlanlagen zurück. Der Freistrahler würde in einer vorangegangenen Warmphase mit dem Oberflächenwasser höherer Temperatur auch Energie in größere Gewässertiefen befördern, so dass nicht nur oberflächennahe Schichten des Sees, sondern das gesamte Seevolumen als Energiespeicher dient. Der See ließe sich energetisch "aufgeladen", was in einer folgenden Kälteperiode der Eisbildung auf der Gewässeroberfläche entgegen wirkt.

In den Herbst- bis Wintermonaten eines Jahres kühlt sich bei entsprechender Lufttemperatur das Oberflächenwasser des Gewässers zunächst bis auf die Temperatur von **4 °C** ab, bei der das Wasser auf Grund seiner Dichteanomalie die größte Dichte einnimmt (**3,98 °C /10/**). Mittels freier Konvektion sinkt dann dieses Wasser von der Oberfläche zum Gewässergrund und das Tiefenwasser höherer Temperatur steigt wegen seiner kleineren Dichte nach oben auf.

Eine Auswirkung dieser freien Konvektion ist, dass der energetische Zustand des Gewässers entsprechend der Temperatur am Grund von **4 °C** auf einen jahreszeitlich typischen Wert zurückgeht, unabhängig davon wie hoch dieser Zustand eventuell auch vorher war (vergl. Bild 1).

Es ist daher nicht verständlich, warum der energetische Zustand eines Gewässers in einer vorangegangenen Warmphase durch die geringfügige erzwungene Konvektion mittels Freistrahlanlagen (geringe Leistung) noch weiter erhöht werden sollte, wenn dieser in den genannten Herbst- bis Wintermonaten naturgemäß ohnehin wieder zurückgeht.

Hat sich nun in einer folgenden Kälteperiode eine Temperaturschichtung mit ca. **4 °C** am Gewässergrund und mit **4 bis 0 °C** (strenggenommen von **8 bis 0 °C**, da die Dichte des Wassers bei diesen Temperaturen annähernd gleich ist) an der Wasseroberfläche eingestellt, findet wegen der Dichteanomalie keine weitere freie Konvektion statt und es ist bei entsprechender Lufttemperatur im Frostbereich mit einer frühzeitigen Eisbildung zu rechnen. Die vertikale Temperaturdifferenz würde in diesem Falle Werte zwischen **0 bis -4 K** annehmen.

Es wird als Ausnahme angesehen, wenn vor einer Kälteperiode keine Abkühlphase mittels freier Konvektion stattfinden kann, weil die Luft- und damit auch die Wassertemperatur an der Oberfläche deutlich höher als **4 °C** liegt. In solch einem Fall geht das Gewässer mit einem außerordentlich hohen energetischen Zustand in die Kälteperiode und die Eisbildung kann sich dadurch entsprechend verzögern.

Durch die freie Konvektion im Gewässer wird neben dem Energietransport auch sauerstoffreiches Wasser von der Oberfläche in die Tiefe befördert, was ein wichtiger Beitrag für die natürliche Gewässerbelüftung ist, der durch Freistrahlanlagen nicht noch weiter unterstützt werden muss.

Bei Starkwindereignissen tritt im Gewässer eine erzwungene Konvektion auf, die im Allgemeinen wesentlich intensiver als die freie Konvektion ist und es kommt zu einer mehr oder weniger starken Durchmischung, die auch in einer Abkühlphase die genannte Temperaturschichtung abbauen kann. Während einer Kälteperioden wird durch die windbedingte Durchmischung Energie von der Gewässertiefe zur Wasseroberfläche transportiert, welche die Eisbildung dort wesentlich verzögern kann, aber auch die Temperatur am Gewässergrund auf Werte **<4 °C** absinken lässt. Nach den Windereignissen stellen sich dann mittels freier Konvektion immer wieder die üblichen Dichte- und Temperaturschichtung mit der Temperatur von **4 °C** am Gewässergrund ein.

Selbstverständlich muss auch davon ausgegangen werden, dass windbedingte Wellen auf einem Gewässer die Eisbildung erschweren, so dass sich sehr häufig feststellen lässt, dass bei Westwind die Westseite eines Gewässers eine ruhigere Wasseroberfläche aufweist und daher eher zur Eisbildung neigt, als die Ostseite, an der sich Wellen bilden, siehe auch /13/.

Nach meteorologischer Definition werden die Tage eventueller Eisbildung auf einem Gewässer in Frosttage und in Eistage unterschieden. Frosttage sind Tage, deren minimale Lufttemperatur im Bereich $<0\text{ °C}$ liegt. Bei Eistagen dagegen ist die maximale Tageslufttemperatur im Bereich $<0\text{ °C}$.

4. Gewässer- und Wetterdaten im Zusammenhang

Zum umfassenden Nachweis der Wirksamkeit der Freistrahlanlagen hinsichtlich der Blaualgenproblematik im Banter See wurden eine Vielzahl von Parametern untersucht als auch umfangreiche Aufzeichnungen von Wetterdaten vorgenommen. Diese Ergebnisse fasste LIEBEZEIT (Fa. MarChemConsult, Varel) in jährlichen Berichten mit dem Titel "Ökologische Begleituntersuchungen zum Einsatz eines Freistrahilverfahrens im Banter See" für die einzelnen Jahre von 2007 bis 2011 (wird auch für das Jahr 2012 fortgesetzt)" zusammen /11/.

Aus diesen Berichten sollen die Ergebnisse allerdings nur in so weit verwendet werden, wie diese für die Interpretation von eigenen Ergebnissen zur Freistrahlausbreitung im Gewässer wichtig und sinnvoll sind.

Aus den Berichten wurden als meteorologische Tagesdaten im jährlichen Verlauf die mittlere Windgeschwindigkeit (als Einzeldaten auch die maximale Windgeschwindigkeit) und die mittlere Lufttemperatur sowie als Gewässerdaten die mittlere Wassertemperaturen an der Oberfläche von zwei Messstellen und die vertikale Temperaturdifferenz verwendet. Als einziger chemisch-biologischer Parameter kam noch die Sauerstoffkonzentration/Sauerstoffsättigung des Wassers zur Anwendung. Angaben zur Windrichtung lagen allerdings nicht vor.

Die mittlere Lufttemperatur soll hierbei sowohl für die Sonnenscheindauer in Verbindung mit der Strahlungsintensität stehen und sie kann dadurch den Energieeintrag in ein Gewässer gut charakterisieren. Auf die Auswertung der tägliche gemessenen Sonnenscheindauer wird deshalb verzichtet, weil in diesen Daten keine Aussagen zur Intensität enthalten sind.

Der Energieeintrag durch die Sonneneinstrahlung auf die Gewässeroberfläche wirkt sich zunächst auf die Wassertemperatur an der Oberfläche aus, ehe sich die Temperatur in den tieferliegenden Wasserschichten ebenfalls erhöht. Nach Tagen der Sonneneinstrahlung ist die Erhöhung der vertikalen Temperaturdifferenz messbar, siehe Abschnitt 3.

Folgt einem Schönwettergebiet schlechtes Wetter mit deutlicher Luftabkühlung, dann geht auch die Wassertemperatur an der Oberfläche zurück und die vertikale Temperaturdifferenz sinkt ebenfalls.

Auch die Reduktion der vertikalen Temperaturdifferenz infolge von Starkwind und der damit verbundenen Durchmischung geschieht von der Wasseroberfläche aus.

Es kann also festgestellt werden, dass das Wettergeschehen auf die vertikalen Temperaturdifferenz ausschließlich von der Wasseroberfläche her einwirkt.

Eine Temperaturerhöhung in größeren Wassertiefen durch exotherme aerobe Prozesse würde ebenfalls die vertikale Temperaturdifferenz reduzieren, allerdings von unten her. Wie im Abschnitt 3. festgestellt wurde, ist dieser Einfluss allerdings vernachlässigbar klein.

Die Wirkungsrichtung einer Freistrahlanlage in einem Gewässer ist wie folgt:

Oberflächenwasser mit höherer Temperatur wird in die Tiefe transportiert und lässt dabei die vertikale Temperaturdifferenz von unten, also von der Tiefe des Gewässers her reduzieren.

Die Kenntnis der beiden verschiedenen und entgegengesetzten Wirkungsrichtungen des Wettergeschehen und der Freistrahlanlagen auf die vertikale Temperaturdifferenz in einem Gewässer ist die Voraussetzung für die sachgerechte Interpretation von globalen Gewässerdaten im Hinblick auf die Wirkung der Freistrahlanlagen.

Das Bild 5 zeigt im Banter See die beiden Positionen der Freistrahlanlagen **BANT 1** und **2** (Sterne) /1/, die von LIEBEZEIT nachträglich eingezeichneten Positionen der Stationen **A** und **B** zur Messung von Wasserqualitätsparametern (rote Punkte) sowie die Messstellen für die Wassertemperaturen an der Oberfläche am Grodendamm und am Campingplatz (gelbe Punkte) /2/.

Somit arbeitet je eine Freistrahlanlage in der Ost- und in der Westhälfte des Gewässers.

Die beiden Pfeile an den Freistrahlanlagen zeigen die jeweiligen Strahlrichtungen an und es wird davon ausgegangen, dass sich die Messstationen nicht im direkten Einflussbereich der entsprechenden Strahlbereiche befinden.

Ob jeweils ein indirekter Einfluss vorhanden ist, d.h. ob im Ost- oder im Westgewässerteil eine globale Wirkung durch die jeweilige Freistrahlanlage zu verzeichnen ist, soll in dieser Arbeit geklärt werden.

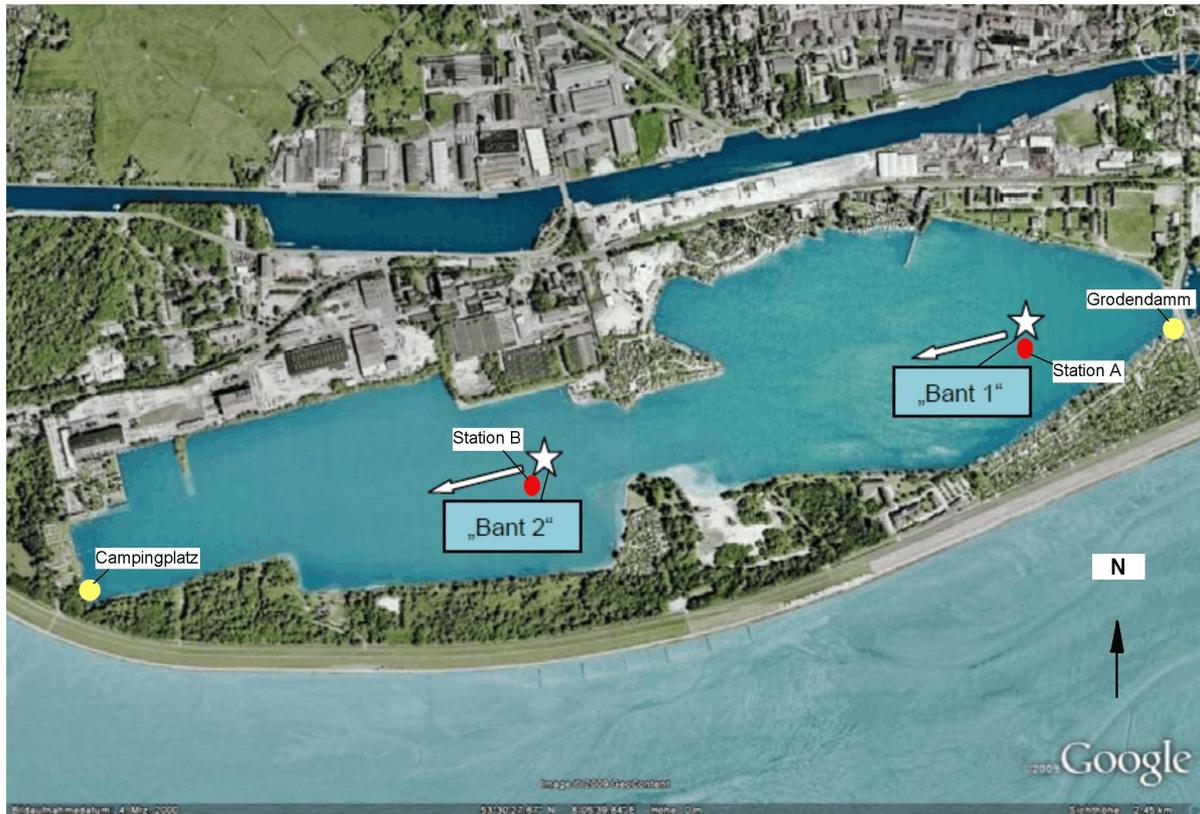


Bild 5 Banter See Wilhelmshaven mit den Freistrahlanlagen BANT 1 und 2 (Sterne) /1/, den Stationen A und B zur Messung von Wasserqualitätsparametern (rote Punkte) sowie den Temperaturmessstellen für die Wassertemperatur Grodendamm und Campingplatz (gelbe Punkte) /2/

Das Bild 6 zeigt aus dem Bericht des Jahres 2011 Messwerte der vertikalen Temperaturdifferenz für den Banter See Wilhelmshaven, Station A im zeitlichen Jahresverlauf ab 2006 bis 2011 /11/. Die Messpunkte verdeutlichen, dass diese Momentanwerte sehr starken und abrupten Schwankungen im Bereich bis zu **8 K** unterliegen, die in jedem Jahr gleichermaßen zu verzeichnen sind. Es wird davon ausgegangen, dass die Messwerte der Station A für das gesamte Gewässer repräsentativ sind. Diese Messwerte der vertikalen Temperaturdifferenz verdeutlichen sehr eindrucksvoll, wie sich der Durchmischungszustand des Gewässers im Bereich von einer ausgeprägten Schichtung bis zur idealen Durchmischung (isotherme Bedingungen) ändern kann. In dieser vorliegenden Arbeit soll nachgewiesen werden, dass vor allem das Wettergeschehen für diese Veränderung verantwortlich ist.

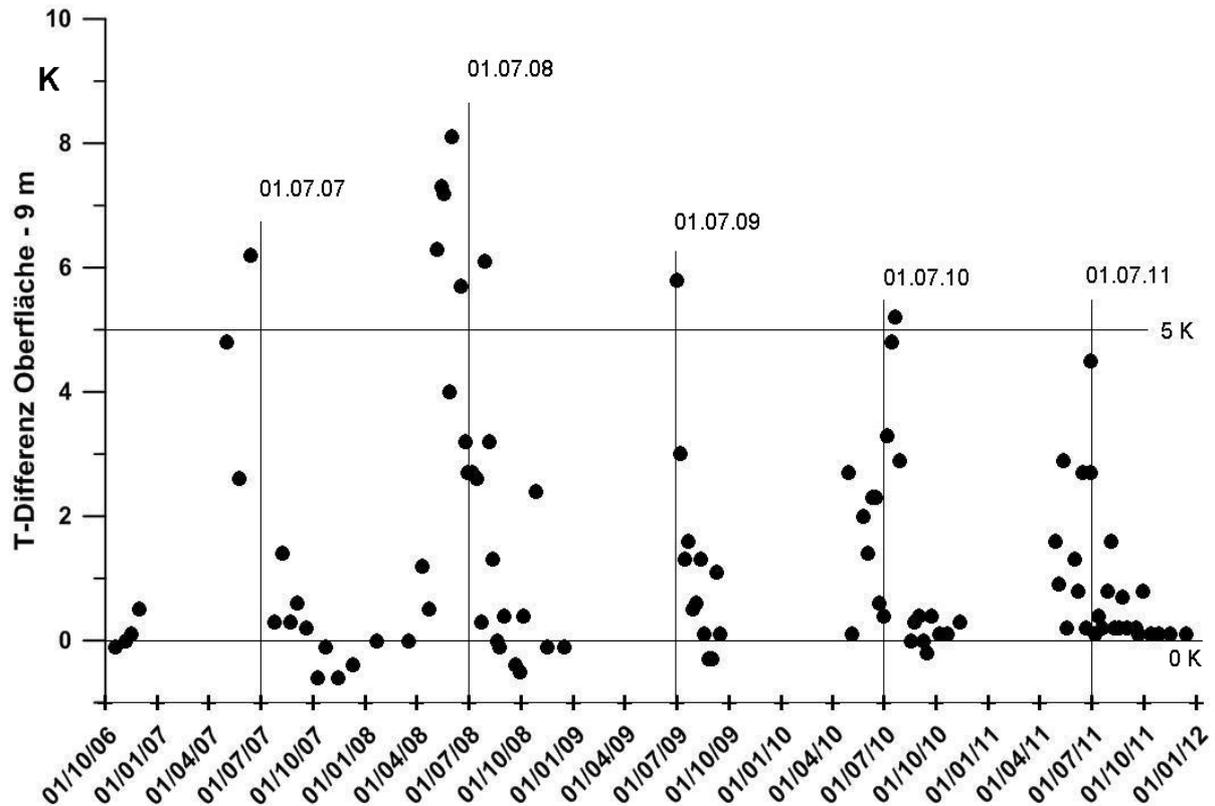


Bild 6 Vertikale Temperaturdifferenz, Banter See, Station A in den Jahren von 2006 bis 1011 /11/

Zusätzlich werden ab dem Jahr 2009 in den Berichten /11/ Diagramme zu Temperaturprofilen von der Wasseroberfläche bis zur Tiefe **-9 m** als Darstellung mit farblichen Temperaturabstufungen angegeben, die allerdings viel zu ungenau sind, um für eine Auswertung in dieser Arbeit herangezogen zu werden. Im Bild 7 ist beispielhaft für das Jahr 2011 solch ein Diagramm zu sehen und es wird deutlich, dass die vielen Schwankungen der vertikalen Temperaturdifferenzen im Jahresverlauf vom Bild 6 nicht mit erfasst werden. Solche Diagramme zum Temperaturprofil wie im Bild 7 sind daher nicht geeignet, um Aussagen zur Temperaturschichtung im Gewässer zu treffen und sie bleiben deshalb für diese Arbeit unberücksichtigt.

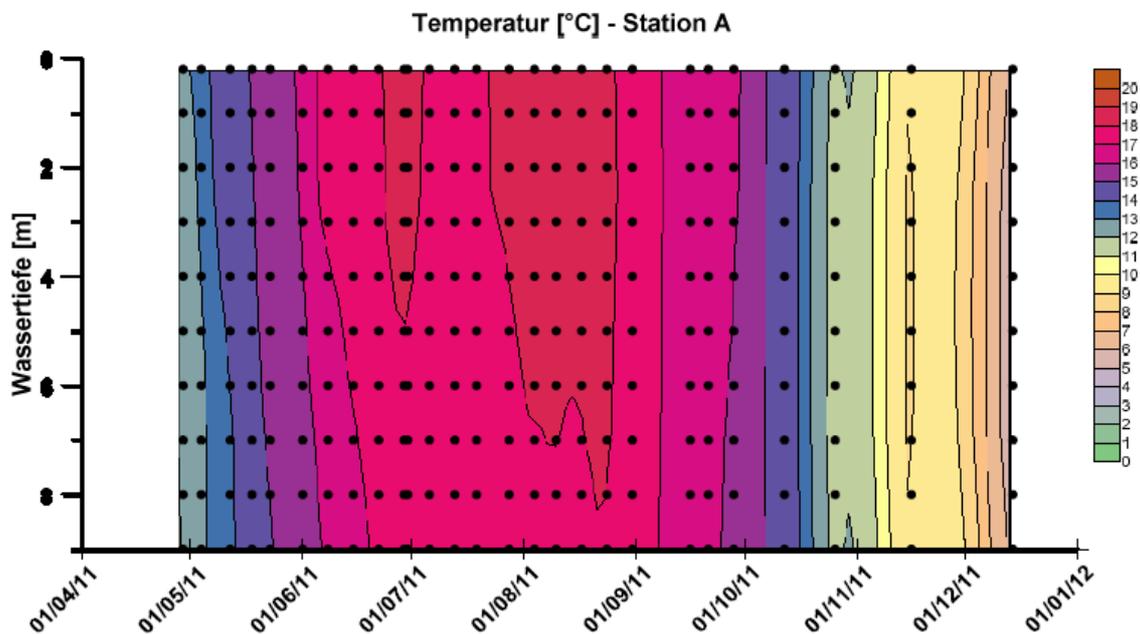


Bild 7 Temperaturprofil von der Wasseroberfläche bis zur Tiefe -9 m, Station A

Da die Anwendung der Freistrahlschicht im Banter See erst im Jahr 2008 mit einer Anlage, bzw. im Jahr 2009 mit zwei Anlagen begann und in diesen beiden Jahren noch havariebedingte Ausfälle auftraten, wird an Hand des Bildes 6 deutlich, dass wegen dieses ähnlichen Verhaltens der vertikalen Temperaturdifferenz in jedem Jahr, auch im Vergleich zum Jahr 2007, die Freistrahlanlagen offenbar keinen erkennbaren Einfluss auf diese vertikale Temperaturdifferenz hatten.

Das Bild 6 zeigt ferner, dass ab dem Jahr 2007 in den Monaten Mai bis Juli die vertikale Temperaturdifferenz an einzelnen Tagen im Bereich von 5 bis 8 K lag, sich aber auch unmittelbar Zeiten ohne nennenswerter vertikaler Temperaturdifferenz anschlossen. Demnach erfolgt der Wechsel von einer sehr ausgeprägten Temperaturschichtung im Gewässer (große vertikale Temperaturdifferenz) bis hin zu isothermen Bedingungen (vertikale Temperaturdifferenz = 0) in kürzester Zeit.

Da Freistrahlanlagen wegen ihrer geringen Leistung im Gewässer keine kurzzeitigen Wirkungen erzielen können, ist offensichtlich, dass für diese abrupten Änderungen der vertikalen Temperaturdifferenz im Bild 6 nur Wetterereignisse in Frage kommen können, was auch schon in /4/ festgestellt wurde.

Solche Wetterereignisse wie z.B. der Wechsel von einer Flaute zum Sturm als auch der Wechsel von einer intensiver Sonneneinstrahlung zur Ausbildung von einer geschlossenen Wolkendecke können in beide Richtungen gleichermaßen auftreten. Häufigen Änderungen im Wettergeschehen werden sich daher auch in entsprechend häufigen Änderungen der vertikalen Temperaturdifferenz widerspiegeln.

Außerdem wird in den Sommermonaten die Temperatur des Tiefenwassers nach und nach um einige Kelvin ansteigen, so dass die vertikale Temperaturdifferenz nicht mehr so hohe Werte annehmen kann, was auch im Bild 6 erkennbar ist.

Negativwerte der vertikalen Temperaturdifferenz ergeben sich dann, wenn in den Herbst- und Wintermonaten starke Abkühlungen von der Wasseroberfläche her auftreten und in der Tiefe eine höhere Wassertemperatur vorliegt.

Zur Beurteilung der Windstärken wird die Einteilung nach BEAUFORT verwendet /12/:

Windstärke	Bezeichnung	Windgeschwindigkeit km/h
5	frische Brise	29 - 38
6	starker Wind	39 - 49
7	steifer Wind	50 - 61
8	stürmischer Wind	62 - 74
9	Sturm	75 - 88
10	schwerer Sturm	89 - 102

Tabelle 1 Windstärken nach BEAUFORT, (Auszug) /12/

Zur Beurteilung des Wettergeschehen auf die Gewässerbedingungen des Banter Sees werden nun die Daten der einzelnen Jahre separat betrachtet und zwar in der Reihenfolge, wie sie bearbeitet worden sind. Es wird mit dem Jahr 2010 begonnen, weil ab diesem Jahr erstmals beide Anlagen im gesamten Zeitraum von Anfang April bis Mitte Oktober ohne Ausfallzeiten in Betrieb waren. Es folgen die Jahre 2011 und 2012 (soweit schon Messergebnisse vorliegen). Die Jahre 2008 und 2009 sind für eine Auswertung nur bedingt geeignet, weil die Freistrahlanlagen nur teilweise im Einsatz waren. Daher wird in dieser Arbeit nur das Jahr 2009 betrachtet.

Auf das Jahr 2007 wird allerdings auch Bezug genommen, weil in diesem Jahr noch keine Freistrahlanlagen im Gewässer arbeiteten und daher nur das Wettergeschehen einwirken konnte.

Das Jahr 2010:

Aus dem Jahresbericht 2010 der Fa. MarChemConsult wurden die Daten mittlere Windgeschwindigkeit (Bild 8), mittlere Lufttemperatur (Bild 9) sowie die mittleren Wassertemperaturen (Bild 10) verwendet und jeweils gemeinsam mit der vertikalen Temperaturdifferenz aus Bild 6 graphisch dargestellt /11/. Außerdem sind den Berichten noch die maximale Windgeschwindigkeit entnommen worden. Die Wetterdaten wurden an der Station des Instituts für Chemie und Biologie des Meeres Wilhelmshaven (ICBM-Wilhelmshaven), die Wassertemperaturen an der Wasseroberfläche für die beiden Messstellen Grodendamm und Campingplatz sowie die vertikale Temperaturdifferenz an der Station A gemessen (siehe Bild 6).

Entsprechend des Berichtes aus dem Jahr 2008 /11/ wird davon ausgegangen, dass die Wassertemperaturen der ufernahen (Grodendam und Campingplatz) und der uferfernen (Stationen A und B) Messstellen sich nicht wesentlich unterscheiden.

Das Bild 7 verdeutlicht, dass das Jahr 2010 bezüglich der Windereignisse im Wesentlichen zweigeteilt war.

Von Beginn der Aufzeichnungen bis Ende August (22.08.2010) traten nur zwei Windereignisse mit mittlerer Windgeschwindigkeit bis **30 km/h**, d.h. mit der Windstärke **5** auf (19.05.2010 und 15.07.2010). Die maximale Windgeschwindigkeit betrug dabei nur **61 km/h** (19.05.2010), bzw. **65 km/h** (15.07.2010).

Diese zwei Windereignisse führten offensichtlich nicht zu einer Durchmischung des Gewässers, wie im Folgenden noch gezeigt wird. Ab Ende August (24.08.2010) bis zum Jahresende waren dagegen relativ viele Starkwindereignisse mit einer mittleren Windgeschwindigkeit um die **40 km/h**, d.h. Windstärke **6** zu verzeichnen.

Es wird davon ausgegangen, dass Starkwind in der Lage ist das Gewässer zu durchmischen und isotherme Bedingungen herzustellen, was auch die nachfolgenden Ergebnisse belegen sollen.

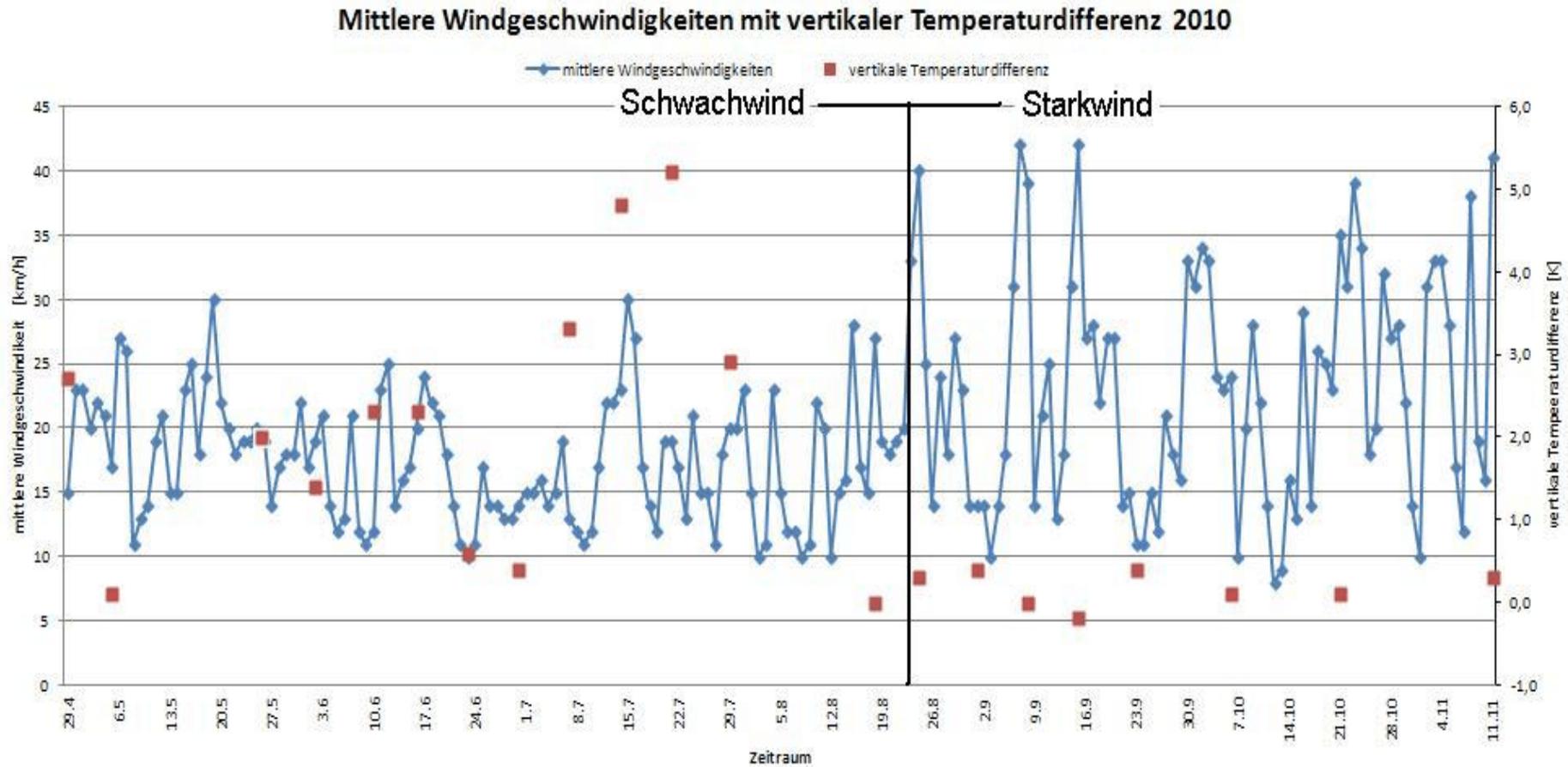


Bild 8 Mittlere Windgeschwindigkeiten als Tageswerte an der Wetterstation ICBM Wilhelmshaven und vertikale Temperaturdifferenz Station A im Jahresverlauf 2010 /11/, Schwachwind- und Starkwindphase

Mittlere Lufttemperatur mit vertikaler Temperaturdifferenz 2010

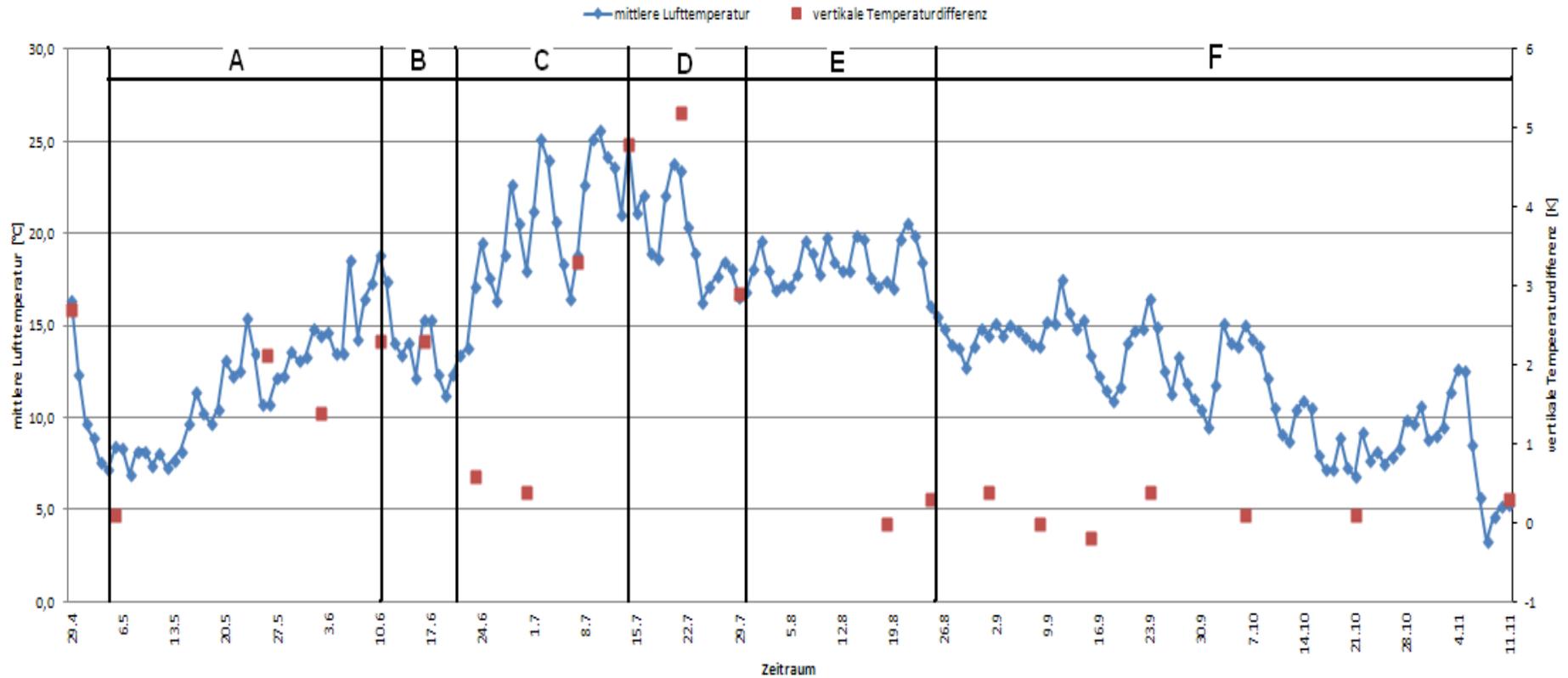


Bild 9 Mittlere Lufttemperatur als Tageswerte an der Station ICBM Wilhelmshaven und vertikale Temperaturdifferenz, Station A im Jahresverlauf 2010 /11/, Bereiche A bis F

Beitrag zur Bewertung der Freistrahlanlagen

Wassertemperatur Campingplatz/Grodendamms mit vertikaler Temperaturdifferenz 2010

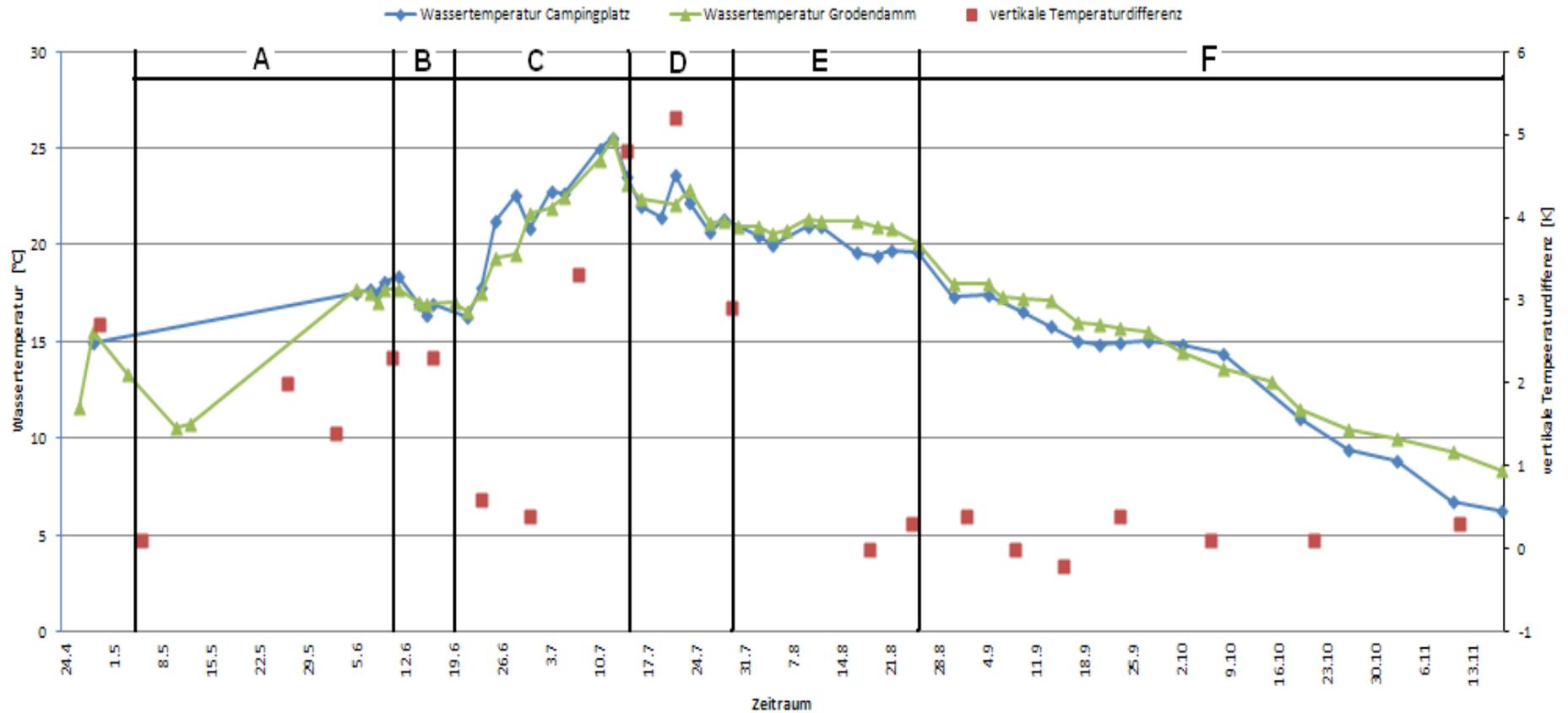


Bild 10 Mittlere Wassertemperaturen an den Messstellen Campingplatz und Grodendamms sowie vertikale Temperaturdifferenz, Station A im Jahresverlauf 2010 /11/ Bereiche A bis F

Um das Verhalten der vertikalen Temperaturdifferenz im Bild 6 richtig beurteilen zu können, müssen die graphischen Darstellungen der mittleren Lufttemperatur Bild 9 und der mittleren Wassertemperaturen Bild 10 mit einbezogen werden. Diese Bilder verdeutlichen im Vergleich zu den anderen Jahren, dass das Jahr 2010 das bisher "Wärmste" seit 2007 war. Es traten im Monat Juli mehrereremale maximale mittlere Lufttemperaturen von über **25 °C** (02.+09.+10.07.2010) und maximale Lufttemperaturen von über **30 °C** (02.+03.+09.+12.+21.07.2012) auf.

In den genannten Bildern werden nun einzelne Bereiche **A** bis **F** zusammengefasst, für die sich für die mittlere Luft und die mittleren Wassertemperaturen markante Trends ergeben.

Bereich A (05.05. bis 10.06.2010 = 36 Tage):

Die mittlere Lufttemperatur stieg bei einer maximalen Schwankungsbreite von ca. **5 K** von **8,4 °C** (05.05.2010) bis auf **18,8 °C** (10.06.2010) und daraus folgt, dass auch die mittlere Wassertemperaturen an der Wasseroberfläche für die Messstelle Grodendam von **10,6 °C** (10.05.2010) bis auf **17,7 °C** (11.06.2010), bzw. für die Messstelle Campingplatz von **14,9 °C** (28.04.2010) bis auf **18,4 °C** (11.06.2010) ebenfalls anstiegen. Diese Anstiege der Wassertemperaturen ließ auch die vertikale Temperaturdifferenz von **0,1 K** (05.05.2010) über **2 K** (26.05.2010) sowie über **1,4 K** (02.06.2010) auf **2,3 K** (10.06.2010) ansteigen und zwar unabhängig davon, dass das Windereignis mit einer mittleren Windgeschwindigkeit bis **30 km/h** (19.05.2010) auftrat. Die maximale Windgeschwindigkeit für dieses Windereignis wurde mit **61 km/h** gemessen. Dieses Windereignis hatte demnach für das Gewässer keine durchmischende Wirkung.

Daraus folgt: Die mittleren Wassertemperaturen an der Oberfläche und die vertikale Temperaturdifferenz verhielten sich während der Phase des Anstieges proportional zueinander.

*Das Windereignis mit einer mittleren Windgeschwindigkeit bis **30 km/h** führte zu keiner Durchmischung des Gewässers, da die maximale Windgeschwindigkeit nicht höher als **61 km/h** lag.*

Bereich B (10.06. bis 19.06.2010 = 9 Tage):

Die mittlere Lufttemperatur fiel bei einer mittleren Schwankungsbreite von ca. **3 K** von **18,6 °C** (10.06.2010) bis auf **11,2 °C** (19.06.2010) und ließ in dieser relativ kurzen Zeit die mittleren Wassertemperaturen an der Oberfläche nur geringfügig absinken. Für die Messstelle Grodendam wurde diese Absenkung von **17,7 °C** (11.06.2010) bis auf **17 °C** (19.06.2010), bzw. für die Messstelle Campingplatz von **18,4 °C** (11.06.2010) bis auf **16,9 °C** (19.06.2010) gemessen. Diese geringen Temperaturerniedrigungen des Oberflächenwassers um **0,7 K**, bzw. um **1,5 K** hatten auf die vertikale Temperaturdifferenz keinen erkennbaren Einfluss, denn diese blieb mit **2,3 K** (10. und 16.06.2010) konstant.

Daraus folgt: Die mittleren Wassertemperaturen an der Oberfläche und die vertikale Temperaturdifferenz verhielten sich konstant.

Bereich C (19.06. bis 14.07.2010 = 25 Tage):

Die mittlere Lufttemperatur stieg bei einer mittleren Schwankungsbreite um **6 K** von **11,2 °C** (19.06.2010) auf Werte von über **25 °C** (02.07. und 09./10.07.2010), bzw. auf **24,9 °C** (14.07.2010). Die mittleren Wassertemperaturen an der Oberfläche stiegen dabei ebenfalls für die Messstelle Grodendam von **17 °C** (19.06.2010) auf den Maximalwert von **25,5 °C** (12.07.2010), bzw. für die Messstelle Campingplatz von **16,9 °C** (19.06.2010) ebenfalls auf den Maximalwert von **25,5 °C** (12.07.2010).

Dadurch stieg auch die vertikale Temperaturdifferenz relativ schnell von **2,3 K** (16.06.2010), über **3,3 K** (07.07.10) bis auf **4,8 K** (14.07.2010) und der hohe Wert von **5,2 K** (21.07.2010) ist diesem Zeitintervall mit dazuzurechnen. Das Windereignis mit einer mittleren Windgeschwindigkeit bis **30 km/h**, d.h. Windstärke **5** (15.07.2010) hat auf diese vertikale Temperaturdifferenz keinen Einfluss gehabt, obwohl die maximale Windgeschwindigkeit mit **65 km/h** gemessen wurde.

Daraus folgt: Die mittleren Wassertemperaturen an der Oberfläche und die vertikale Temperaturdifferenz verhielten sich während der Phase des Anstieges proportional zueinander.

*Das Windereignis mit einer mittleren Windgeschwindigkeit bis **30 km/h** führte zu keiner Durchmischung des Gewässers, da die maximale Windgeschwindigkeit nicht höher als **65 km/h** lag.*

Die sehr geringen Werte der vertikalen Temperaturdifferenz von **0,6 K** (23.06.2010) und von **0,4 K** (30.06.2010) lassen sich nicht unmittelbar durch ein wetterbedingtes Temperaturverhalten erklären.

An dieser Stelle soll aber betont werden, dass diese geringen Werte der vertikalen Temperaturdifferenz nicht als Beweis für das Wirken der Freistrahlanlagen angesehen werden können. Die Reduktion der vertikalen Temperaturdifferenz von **2,3 K** (16.06.2010) bis auf **0,6 K** (23.06.2010) von der Tiefe des Gewässers her innerhalb von **7** Tagen konnten die Freistrahlanlagen wegen ihrer geringen Leistungen nicht erzielen.

Bereich D (14.07.2010 bis 30.07.2010 = 16 Tage):

Die Abnahme der mittleren Lufttemperatur von **24,9 °C** (14.07.2010) auf Temperaturen im Bereich um **17 °C** (ab 24.07.2010 bis 30.07.2010) ließ auch die mittleren Wassertemperaturen an der Oberfläche für die Messstelle Grodendam von **25,5 °C** (12.07.2010) auf **21 °C** (30.07.2010) und für die Messstelle Campingplatz von **25,5 °C** (12.07.2010) auf **20,5 °C** (02.08.2010) absinken. Damit fielen diese Temperaturabnahmen an der Wasseroberfläche mit **4,5 K**, bzw. mit **5 K** relativ groß aus und diese Temperaturabnahmen spiegeln auch die entsprechende Abnahme der vertikalen Temperaturdifferenz wider. Diese Abnahme der vertikalen Temperaturdifferenz von **4,8 K** (14.07.2010) bis auf **2,9 K** (29.07.2010) fiel deutlich aus. Wie schon erwähnt, wird dabei dem Windereignis mit der mittleren Windgeschwindigkeit bis **30 km/h** (15.07.2010) für die Durchmischung des Gewässers keine Bedeutung gegeben, da auch bei diesem Ereignis die maximale Windgeschwindigkeit nicht höher als **65 km/h** lag.

Daraus folgt: Die mittleren Wassertemperaturen und die vertikale Temperaturdifferenz verhielten sich während der Phase des Abstieges proportional zueinander.

Bereich E (30.07. bis 24.08.2010 = 25 Tage):

Die mittlere Lufttemperatur blieb mit einer mittleren Schwankungsbreite von ca. **2 K** bei ca. **18 °C** konstant. Auch die Wassertemperaturen an der Oberfläche für die beiden Messstellen Grodendamm und Campingplatz waren mit ca. **21 °C**, bzw. mit ca. **20,5 °C** weitestgehend konstant.

Daraus folgt: Die mittlere Luft- und die mittleren Wassertemperaturen an der Oberfläche sowie die vertikale Temperaturdifferenz verhielten sich konstant.

Die sich eingestellten isothermen Bedingungen im Gewässer, d.h. die vertikale Temperaturdifferenz von **0 K** (18.08.2010) kann mit dem erläuterten wetterbedingten Temperaturverhalten ebenfalls nicht erklärt werden, zumal in dieser Zeit keine Starkwindereignisse auftraten.

Dass die Freistrahlanlagen den totalen Abbau der vertikalen Temperaturdifferenz von **2,9 K** (29.07.2010) auf **0 K** (18.08.2010) innerhalb von **20** Tagen herbeigeführt haben, ist wegen ihrer geringen Leistungen ebenfalls unwahrscheinlich und wird daher ausgeschlossen.

Bereich F (24.08. bis 31.12.2010 = 129 Tage):

Die mittlere Lufttemperatur sank in einer mittleren Schwankungsbreite von ca. **5 K** von **16,1 °C** (24.08.2010) bis auf ca. **0 °C** (31.12.2010) und die Wassertemperaturen an der Oberfläche sanken ebenfalls für die Messstelle Grodendamm von **20,1 °C** (25.08.2010) bis auf **0 °C** (29.12.2010) und für die Messstelle Campingplatz von **19,6 °C** (25.08.2010) bis zur Eisbildung (29.12.2010).

Dass die vertikale Temperaturdifferenz über mehr als **3 Monate** bei kleinen Werten um **0,3 K** (ab 24.08.2010 bis 11.11.2010) verharrte, ist auf die schon erwähnten relativ häufigen Starkwindereignisse bei mittleren Windgeschwindigkeiten von ca. **40 km/h**, d.h. der Windstärke **6** (ab 24.08.2010 bis) zurückzuführen. Diese Starkwindereignisse haben den Abbau der Temperaturschichtung verursacht und es haben sich über den Zeitraum von mehr als **4 Monate** im Gewässer wegen der intensiven Durchmischung isotherme Bedingungen eingestellt.

*Daraus folgt: Starkwindscheinungen mit mittleren Windgeschwindigkeiten um **40 km/h** (Windstärke **6**) sind in der Lage das Gewässer zu durchmischen.*

In den untersuchten Bereichen **A** bis **F** sind somit für die vertikale Temperaturdifferenz von **20** Messpunkten **17** Messpunkte direkt mit Wetterereignissen erklärbar. Daher wird der Schluss gezogen, dass die Freistrahlanlagen diese vertikale Temperaturdifferenz nicht beeinflusst haben können.

Die Messungen der Sauerstoffsättigung in verschiedenen Tiefenlagen des Gewässers zeigen für 2010 folgende Ergebnisse, Bild 11 /11/. In den relativ eng begrenzten Zeiten Mitte Juni (Bereich **B**) sowie Mitte bis Ende Juli (Bereich **D**) traten im Tiefenwasser zwei sehr starke Sauerstoffverarmungen bis auf Werte von **20 bis 0 %** Sauerstoffsättigung auf, deren Ursache in den intensiven aeroben Vorgänge der Biomasse (Algen) zu sehen ist. Gleichzeitig lagen aber die vertikalen Temperaturdifferenzen mit Werten von **2,3 K** (16.06.2010), **4,8 K** (14.07.2010) und mit **5,2 K** (21.07.2010) hoch, bzw. sehr hoch.

Begünstigt wurde dieser Sachverhalt, dass in den genannten Zeiten keine stärkeren Windereignisse mit einer durchmischenden Wirkung auf das Gewässer auftraten.

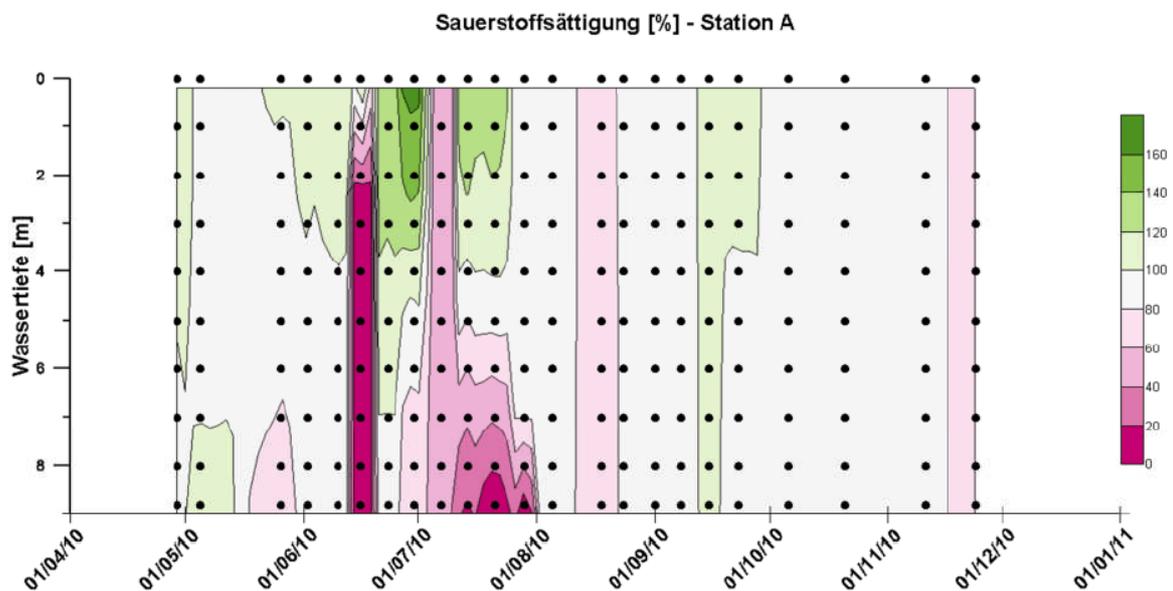


Bild 11 Sauerstoffsättigung im Jahresverlauf 2010 für verschiedene Wassertiefen, Station A /11/

Ein direkter Zusammenhang dieser exothermen aeroben Vorgänge auf die vertikale Temperaturdifferenz wird nicht gesehen, was bereits im Abschnitt 3. durch die Berechnung des energetischen Umsatzes ausgeschlossen wurde.

Für das Jahr 2010 kann zusammengefasst werden, dass der gesamte Wetterverlauf (Bereiche **A** bis **F**), der durch die untersuchte mittlere Windgeschwindigkeit, die mittlere Luft- und die mittleren Wassertemperaturen an der Oberfläche repräsentiert wird, keine Anhaltspunkte ergaben, dass die Freistrahlanlagen einen erkennbaren Einfluss auf die vertikale Temperaturdifferenz im Banter See genommen hätten. Eine durchmischungsfördernde Wirkung der Freistrahlanlagen im Gewässer war also nicht feststellbar. Das war auch nicht zu erwarten, da die Leistungen der beiden Anlagen mit jeweils **1,9 kW** viel zu gering sind und sich dadurch kurzzeitige Wirkungen ausschließen.

Es konnte dagegen nachgewiesen werden, dass das Wettergeschehen, gerade wie es in der Region um Wilhelmshaven im Jahr 2010 auftrat, einen unmittelbaren Einfluss auf die Durchmischung eines Gewässers wie der Banter See hatte.

Eine positive Wirkung der Freistrahlanlagen auf die Gewässerbelüftung könnte sich dennoch ergeben haben, wenn der Freistrahle gerade während der isothermen Phasen sauerstoffreiches Wasser in tiefe Bereiche des Gewässers befördert hat, um dortige aerobe Prozesse zu unterstützen.

Solch nahezu isotherme Phasen (vertikale Temperaturdifferenz $<1\text{ K}$) gab es nur relativ eng begrenzt von Ende Juni bis Anfang Juli (Bereich **C**) und dann in einer sehr langen Phase ab Ende August bis zum Jahresende (Ende Bereich **E** und Bereich **F**). Gerade Ende Juni konnten die Freistrahlanlagen lokal im Gewässer für das Ende der Sauerstoffverarmung gesorgt haben, siehe Bild 11.

Allerdings ist es auch möglich, dass die zeitliche Begrenzung einer biologischen Aktivität (z.B. Algenblüte) von sich aus für das Ende der Sauerstoffverarmung in Frage kam, was durch die Analysen von biologischen Gewässerparametern weiter abgeklärt werden sollte.

Die Beendigung der zweiten starken Sauerstoffverarmung von Mitte bis Ende Juli (Bereich **D**) kann aber auf keinen Fall der Freistrahlanlagen zugeschrieben werden, weil die dazugehörige vertikale Temperaturdifferenz um 5 K viel zu groß war, um sauerstoffreiches Oberflächenwasser in die Gewässertiefe befördern zu können. Die ausgeprägten Bahnkurven haben das höchstwahrscheinlich verhindert, worauf im Abschnitt 2. hingewiesen wurde.

Eine Belüftung des Gewässers mittels der Freistrahlanlagen ab der Mitte des Bereiches **E** (24.08.2010) bis zum Ende des Bereiches **F** war allerdings überflüssig, weil der Starkwind ohnehin für die Durchmischung gesorgt hat.

Zusammenfassend wird weiterhin eingeschätzt, dass allein die mögliche positive Wirkung der Freistrahlanlagen auf die Gewässerbelüftung innerhalb weniger Tage im Juni des Jahres 2010 den Einsatz der Anlagen nicht gerechtfertigt hat.

Eine Kälteperiode, bei der es auf dem Banter See zur Eisbildung gekommen war, trat im Jahr 2010 in der Zeit von November bis Dezember (26.11. bis 31.12.2010 = **36 Tage**) auf. Dabei wurden **35** Frosttage (minimale Lufttemperatur $<0\text{ °C}$) und **19** Eistage (maximale Temperatur der Luft $<0\text{ °C}$) verzeichnet /11/. Die tiefste minimale Lufttemperatur wurde mit $-10,3\text{ °C}$ (19.12.2010) gemessen. Die mittlere Lufttemperatur lag für die gesamte Kälteperiode bei $-5,1\text{ °C}$.

An der Messstelle Campingplatz kam es zur Eisbildung, so dass am 20.12. und am 29.12.2010 keine Wasserbeprobungen erfolgen konnten. An der Messstelle Grodendam war dagegen keine Eisbildung festgestellt worden. Diese Eisbildung an der Messstelle Campingplatz trat somit **25 Tage** nach Beginn der Kälteperiode auf, was im Vergleich zu anderen Jahren als eine relativ lange Zeit angesehen wird.

Vor der Kälteperiode lag die mittlere Lufttemperatur im Oktober mit $10,1\text{ °C}$ und bis zum Beginn der Kälteperiode im November (bis 25.11.2010) mit $6,7\text{ °C}$ außergewöhnlich hoch.

Wie schon erwähnt, traten ab dem 24.08.2010 bis zum Jahresende relativ häufig Starkwindereignisse auf. Nach dem Ergebnis zum Bereich **F** können Windereignisse mit einer mittleren Windgeschwindigkeit um **40 km/h** das Gewässer durchmischen. Die Auswertung des Jahres 2011 wird allerdings zeigen, dass dazu auch schon Windereignisse mit einer mittleren Windgeschwindigkeit um **35 km/h** in der Lage sind. In der folgenden Tabelle 2 sind daher Windereignisse der Monate September bis November (bis zum Einsetzen der Kälteperiode) zusammengestellt worden, die das Gewässer durchmischt haben.

Zeit	mittlere Windgeschwindigkeit km/h
07./08.09.2010	42/39
15.09.2010	42
02.10.2010	34
21.10.2010	35
08.11.2010	38
11./12.11.2010	41/47

Tabelle 2 Mittlere Windgeschwindigkeit von Windereignissen in der Zeit von September bis November 2010 (bis zum Beginn der Kälteperiode), die das Gewässer durchmischt haben /11/

Da die Freistrahlanlagen nur bis Mitte Oktober im Einsatz waren, kann deren Wirkung gegenüber der Durchmischung infolge der Windereignisse als vernachlässigbar klein angesehen werden, bzw. ab Mitte Oktober war eine Wirkung gar nicht mehr möglich. In Verbindung mit den genannten relativ hohen mittleren Luft- und Wassertemperaturen **>4 °C** kam es bis zum Einsetzen der Kälteperiode offenbar zu keiner freien Konvektion und damit nicht zu einer natürlichen Abkühlung des gesamten Gewässers, so dass der energetische Zustand des Gewässers zu Beginn der Kälteperiode außergewöhnlich hoch war.

Durch die weiteren Windereignisse während der Kälteperiode (ab 26.11.2010) (siehe Tabelle 3) fand offenbar immer wieder ein Energietransport von der Gewässertiefe zur Wasseroberfläche mittels erzwungener Konvektion statt, der die Eisbildung bis Mitte Dezember verzögerte (vergl. Abschnitt 3.), so dass erst nach **25 Tagen** die Eisbildung auftrat.

Zeit	mittlere Windgeschwindigkeit km/h
01.12.2010	41
04.12.2010	35
24.12.2010	39

Tabelle 3 Mittlere Windgeschwindigkeiten von Windereignissen während der Kälteperiode im November/Dezember 2010, die das Gewässer durchmischt haben /11/

Warum die Eisbildung nur an der Messstelle Campingplatz (Westseite des Sees) und nicht an der Messstelle Grodendamm (Ostseite des Sees) auftrat, lässt sich bei Unterstellung der bevorzugten Windrichtung aus Westen durch die geringere Wellenbildung im Westteil erklären, siehe Abschnitt 3.

Das Jahr 2011:

Das Zusammenspiel des Wettergeschehen mit dem zeitlichen Verhalten der Gewässerparameter verlief im Jahr 2011 völlig anders als im Jahr 2010. In den folgenden Bildern 12 bis 14 sind die mittlere Windgeschwindigkeit, die mittlere Lufttemperatur und die mittleren Wassertemperaturen an der Oberfläche für die beiden Messstellen Grodendamm und Campingplatz im Zusammenhang mit der vertikalen Temperaturdifferenz, Station A (siehe Bild 6) graphisch dargestellt worden.

Im Bild 12 ist zu sehen, dass die größten Starkwindereignisse mit mittleren Windgeschwindigkeiten von **40 bis 45 km/h**, d.h. Windstärke **6** im Vergleich zum Jahr 2010 erst ab Anfang September (ab 06.09.2011) bis zum Jahresende (nicht mehr im Bild 12 dargestellt) stattfanden. Von Ende April bis Ende August 2011 waren die Windereignisse mit der maximalen mittleren Geschwindigkeit um **35 km/h**, d.h. Windstärke **5** schwächer als im September, traten dafür aber als monatliche Ereignisse relativ häufig auf.

Es kann daher festgestellt werden, dass das gesamte Jahr 2011 sehr windreich war. Wie im Folgenden noch gezeigt wird, haben die Windereignisse von April bis Ende August mit mittlerer Geschwindigkeit um **35 km/h** zu einer Durchmischung des Gewässers geführt. Außerdem herrschte vorwiegend kühles Wetter vor, denn die mittlere Lufttemperatur überschritt nur relativ selten, und dann auch nur für wenige Tage, die **20 °C**-Marke.

Mittlere Windgeschwindigkeiten mit vertikaler Temperaturdifferenz 2011

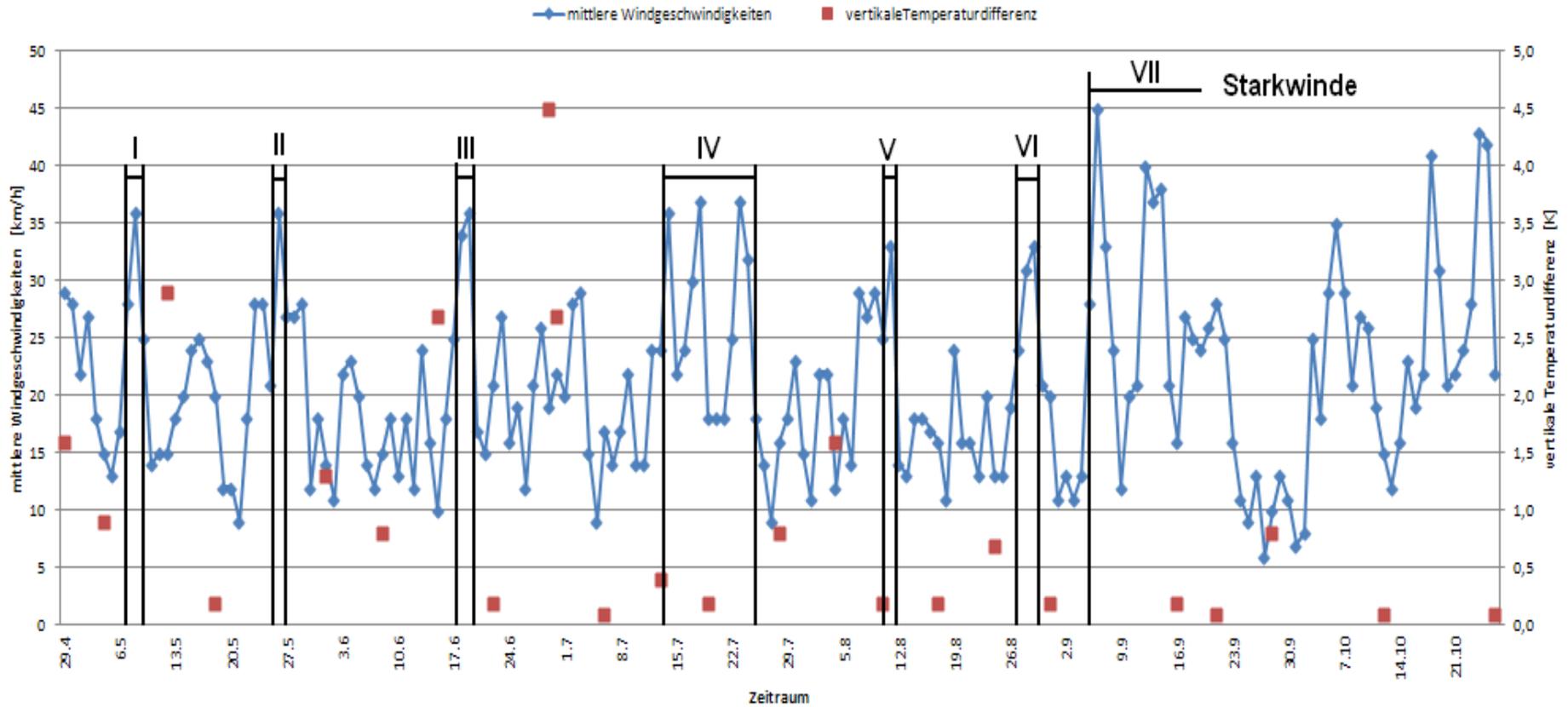


Bild 12 Mittlere Windgeschwindigkeiten als Tageswerte an der Wetterstation ICBM Wilhelmshaven und vertikale Temperaturdifferenz, Station A im Jahresverlauf 2011 /11/, Windphasen von I bis VII

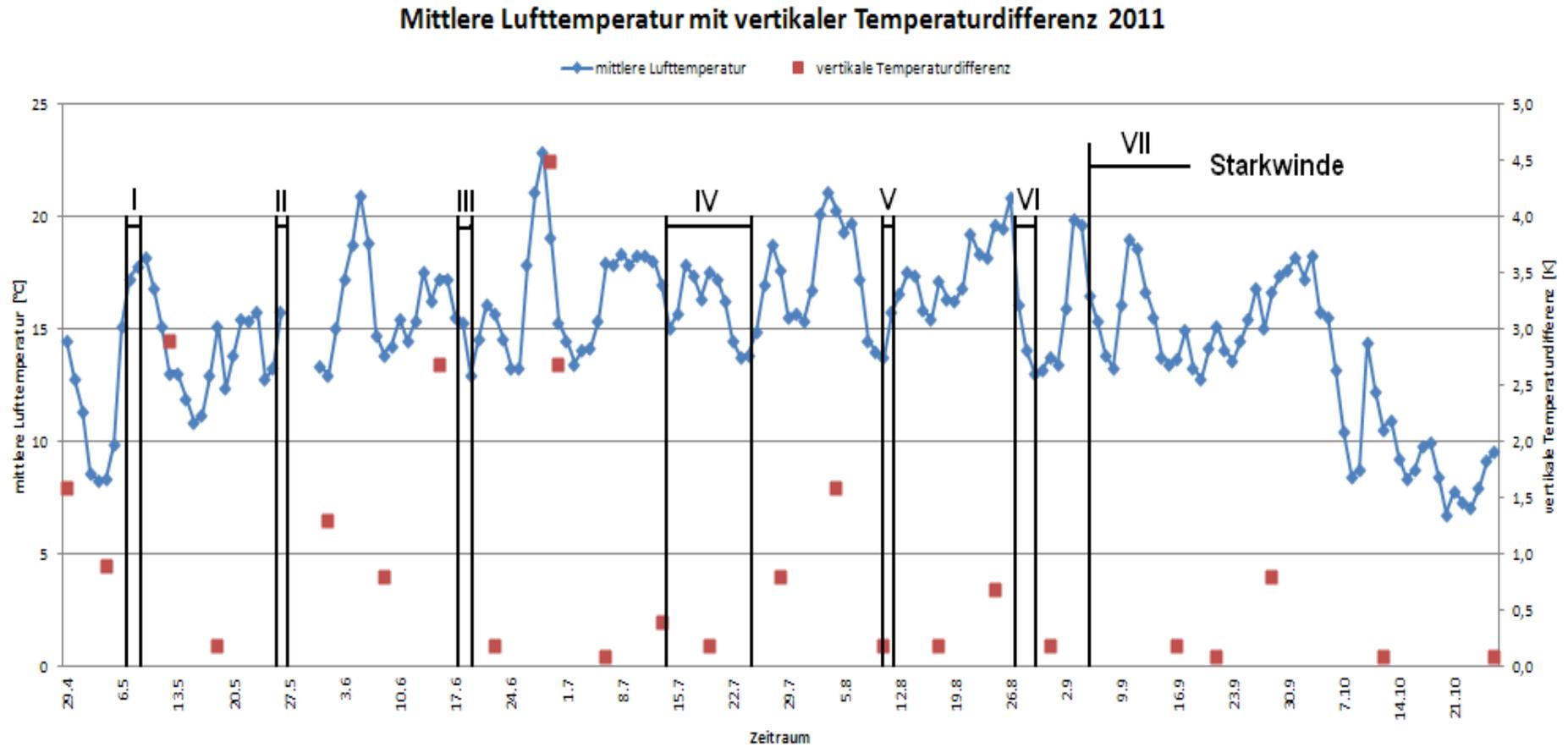


Bild 13 Mittlere Lufttemperatur als Tageswerte an der Station ICBM Wilhelmshaven und vertikale Temperaturdifferenz, Station A im Jahresverlauf 2011 /11/, Windphasen I bis VII

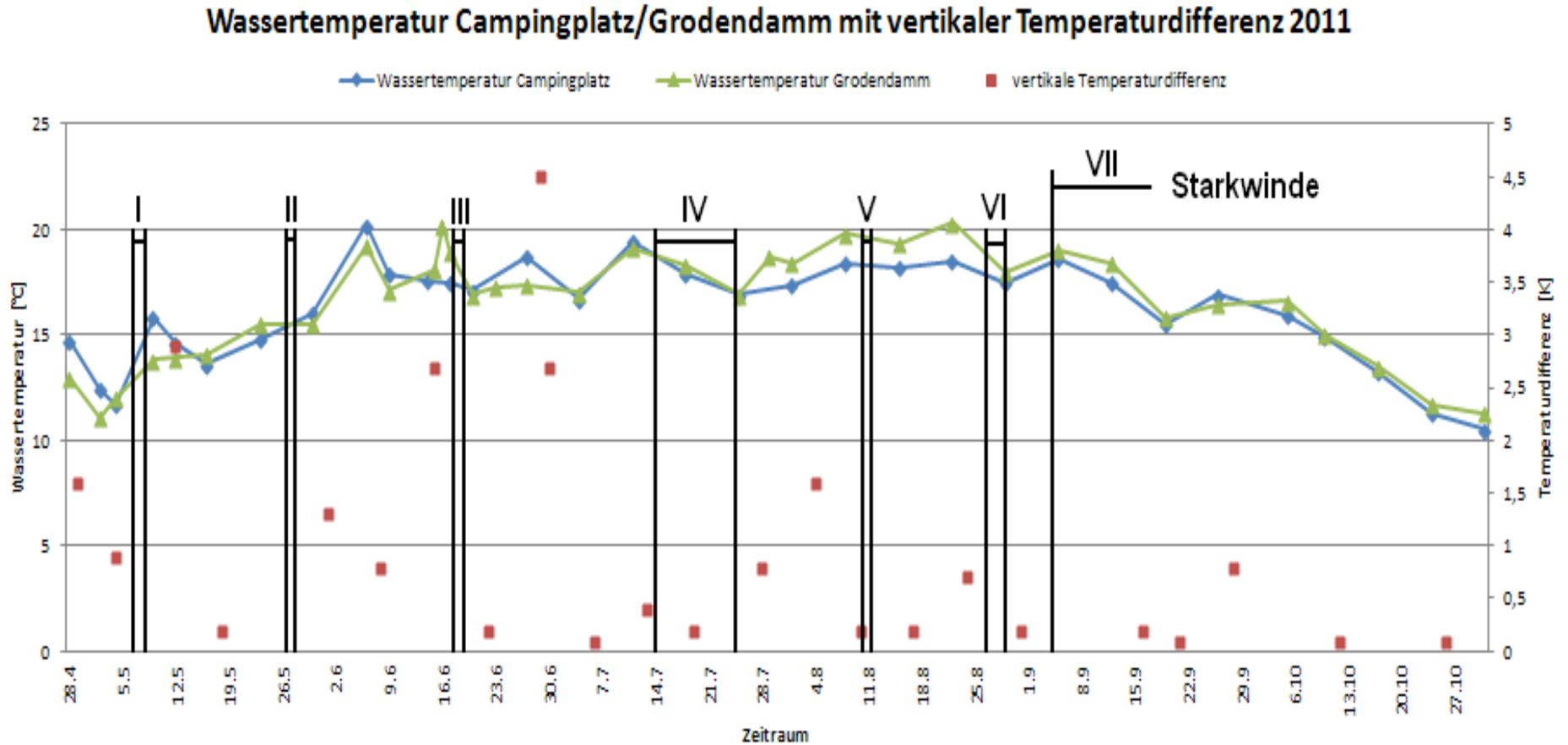


Bild 14 Mittlere Wassertemperaturen an den Messstellen Campingplatz und Grodendamms sowie vertikale Temperaturdifferenz, Station A im Jahresverlauf 2011 /11/, Windphasen I bis VII

Im Bild 12 sind die einzelnen Windereignisse in die Windphasen I bis VII zusammengefasst worden. Während und auch unmittelbar nach den Windphasen III bis VII vergrößerte sich der Durchmischungsgrad des Gewässers, denn der Abfall der vertikalen Temperaturdifferenz auf sehr kleine Werte im Bereich $<1\text{ K}$ ist offensichtlich:

Phase III (17.06. bis 20.06.2011):	0,2 K	(22.06.2011)
Phase IV (14.07. bis 25.07.2011):	0,4/0,2/0,8 K	(13./19./28.07.2011)
Phase V (10.08. bis 11.08.2011):	0,2/0,2 K	(10./17.08.2011)
Phase VI (27.08. bis 30.08.2011):	0,2 K	(31.08.2011)
Phase VII (06.09. bis 31.12.2011):	0,1 bis 0,8 K	(16./21./28.09.+ 12./26.10.+16.11. +14.12.2011)
nur bis zum 26.10.2011 graphisch dargestellt		

*Daraus folgt: Winderscheinungen mit mittleren Windgeschwindigkeiten um **35 km/h** (Windstärke 5) sind in der Lage das Gewässer zu durchmischen.*

Während der Phasen III bis VII (bis Mitte Oktober) herrschte stets kühles Wetter mit mittleren Lufttemperaturen um **15 °C** (Schwankungsbreite um **2 K**, siehe Bild 13) vor und es ergaben sich mittleren Wassertemperaturen an der Oberfläche für die beiden Messstellen Grodendam und Campingplatz um **17 °C** (Schwankungsbreite um **1 K**, siehe Bild 14).

Nach den Windphasen I und II stellten sich allerdings für die vertikale Temperaturdifferenz höhere Werte ein:

Phase I (07.05. bis 09.05.2011):	2,9 K	(12.05.2011)
Phase II (26.05. bis 27.05.2011):	1,3 K	(01.06.2011)

Diese erhöhten Werte der vertikalen Temperaturdifferenz unmittelbar nach den Windphasen I und II sind die Folge der Zunahme der mittleren Luft- und der mittleren Wassertemperaturen in den betreffenden Zeiten durch die Sonneneinstrahlung (siehe Bilder 13 und 14):

Phase I:

- Erhöhung der mittleren Lufttemperatur von **8,4 °C** (04.05.2011) auf **18,2 °C** (09.05.2011).
- Erhöhung der mittleren Wassertemperatur für die Messstelle Grodendam von **11,1 °C** (02.05.2011) auf **13,9 °C** (12.05.2011), d.h. um **2,8 K**.
- Erhöhung der mittleren Wassertemperatur für die Messstelle Campingplatz von **12,4 °C** (02.05.2011) auf **14,6 °C** (12.05.2011), d.h. um **2,2 K**

*Daraus folgt: Die Erhöhung der mittleren Wassertemperatur an der Oberfläche um ca. **2,5 K** ließ nach der Windphase I die vertikale Temperaturdifferenz von **0,9 K** (04.05.2011) auf **2,9 K** (12.05.2011) ansteigen.*

Phase II :

- mittlere Lufttemperatur, keine Messungen.
- Gleichbleibende mittlere Wassertemperatur für die Messstelle Grodendamm bei **15,5 °C** (23./30.05.2011).
- Erhöhung der mittleren Wassertemperatur für die Messstelle Campingplatz von **14,8 °C** (23.05.2011) auf **16 °C** (30.05.2011), d.h. um **1,2 K**.

*Daraus folgt: Die Erhöhung der mittleren Wassertemperatur an der Oberfläche für die Messstelle Campingplatz um **1,2 K** ließ die vertikale Temperaturdifferenz von **0,2 K** (18.05.2011) auf **1,3 K** (01.06.2011) ansteigen.*

Somit kann festgestellt werden, dass unmittelbar nach den Windphasen **I** und **II** die ansteigenden Wassertemperaturen an der Oberfläche den Anstieg der vertikalen Temperaturdifferenz verursacht haben.

Zwischen den einzelnen Windphasen, d.h. in den windarmen Zeiten herrschte heiteres Wetter vor, so dass sich die mittlere Luft- und die mittleren Wassertemperaturen für die beiden Messstellen Grodendamm und Campingplatz (gemittelt) auf folgende Werte erhöht haben, was auch die Erhöhung der vertikalen Temperaturdifferenz mit sich brachte (Tabelle 4):

windarme Zeit zwischen den Phasen	mittlere Lufttemperatur °C	mittlere Wassertemperatur °C	vertikale Temperaturdifferenz K
III → IV (21.06. → 13.07.2011)	16,1 → 22,9 (21.06. → 28.06.2011)	17 → 18,1 (20.06. → 27.06.2011)	0,2 → 4,5 (22.06. → 29.06.2011)
IV → V (26.07. → 09.08.2011)	17 → 21,1 (26.07. → 03.08.2011)	16,9 → 19,1 (27.07. → 08.08.2011)	0,8 → 1,6 (28.07. → 04.08.2011)
V → VI (12.08. → 26.08.2011)	16,6 → 20,9 (12.08 → 26.08.2011)	18,8 → 19,4 (15.08. → 22.08.2011)	0,2 → 0,7 (17.08. → 24.08.2011)

Tabelle 4 Erhöhungen der mittleren Luft- und der mittleren Wassertemperaturen in der windarmen Zeit sowie der dazugehörigen vertikalen Temperaturdifferenz in den Monaten Juni, Juli und August 2011 /11/

Ab der Windphase **I** bis zum Jahresende existieren für die vertikale Temperaturdifferenz insgesamt **24** Messpunkte (Bilder 12 bis 14 nur bis zum 26.10.2010). Von diesen Messpunkten lassen sich **19** mit dem Wettergeschehen erklären. Für die restlichen **5** Messpunkte ist wegen der schnellen Wetterfolge eine eindeutige Interpretation nicht möglich.

Es handelt sich um folgende:

18.05.2011: **0,2 K** (vom Messpunkt 12.05.2011 gefallen)
08.06.2011: **0,8 K** (vom Messpunkt 01.06.2011 gefallen)
15.06.2011: **2,7 K** (vom Messpunkt 08.06.2011 gestiegen)
30.06.2011: **2,7 K** (vom Messpunkt 29.06.2011 gefallen)
06.07.2011: **0,1 K** (vom Messpunkt 30.06.2011 gefallen)

Bei diesen Messwerten der vertikalen Temperaturdifferenz ist gekennzeichnet worden, ob diese vom vorhergehenden Messwert gefallen oder gestiegen sind.

Die Freistrahlanlagen würde nur die gefallenen Werte der vertikalen Temperaturdifferenz begründen können. Wie schon mehrfach erwähnt wurde, sind Freistrahlanlagen nicht innerhalb so kurzer Zeit von einigen Tagen in der Lage Temperaturgradienten abzubauen. Dass die Freistrahlanlagen beim ansteigenden Wert der vertikalen Temperaturdifferenz einen noch größeren Werte verhindert haben, ist abwegig, da die auftretende Bahnkurve des Freistrahls die durchmischungsfördernde Wirkung stark einschränkt.

Zusammenfassend ergibt sich auch für das Jahr 2011, wie schon bereits für das Jahr 2010 festgestellt wurde, dass der gesamte Wetterverlauf, der durch die untersuchte mittlere Windgeschwindigkeit, die mittlere Luft- und die mittleren Wassertemperaturen an der Oberfläche repräsentiert wird, keine Anhaltspunkte ergaben, dass die Freistrahlanlagen einen erkennbaren Einfluss auf die vertikale Temperaturdifferenz im Banter See genommen hätten. Die Freistrahlanlagen konnten also nicht die vertikale Temperaturdifferenz reduzieren und damit den Durchmischungszustand des Gewässers erhöhen. Diese Aussage ist nicht zu relativieren, nur weil **5** von **24** Messwerten der vertikalen Temperaturdifferenz dem Wettergeschehen nicht eindeutig zugeordnet werden konnten.

Durch die häufigen Windereignissen und durch die kühle Witterung im Jahr 2011, gerade auch in den Sommermonaten, traten im Gewässer entsprechend oft isotherme Bedingungen (vertikale Temperaturdifferenz **<1 K**) auf, während derer die Freistrahlanlagen Gelegenheit hatten, sauerstoffreiches Wasser in größere Gewässertiefen zu transportieren. Ab der Windphase **I** bis zum Jahresende ergaben **17** Messungen der vertikalen Temperaturdifferenz Werte im Bereich **<1 K** und es herrschten demnach in den dazugehörigen Zeitabschnitten günstige Bedingungen für die künstliche Gewässerbelüftung. Ob allerdings die Freistrahlanlagen wirklich nennenswert zur Belüftung des Tiefenwassers beigetragen haben, kann angesichts der **13** dominanten Windereignissen mit mittleren Windgeschwindigkeiten um **35 km/h** (Windstärke **5**) im Jahr (bis 26.10.2011) nicht behauptet werden.

Das folgenden Bild 15 zeigt die Sauerstoffsättigung an der Station A in verschiedenen Tiefenlagen des Gewässers /11/.

Die Sauerstoffverarmung in der Tiefe <-8 m auf Sättigungswerte von **80 bis 70 %** (um den 30.06. und um den 10.07.2011) fiel geringer als im Jahr 2010 aus, was sich auf die deutlich geringere mittlere Wassertemperatur im Jahr 2011 und die damit verbundenen Verlangsamung aerober biologischer Prozesse zurückführen lässt. Diese Zeiten der Sauerstoffverarmung lagen in einer windarmen Zeit und zwar in der Zeit zwischen den Windphasen **III** und **IV**.

Dabei nahm die vertikale Temperaturdifferenz mit **4,5/2,7 K** (29./30.06.2011) relativ hohe Werte aber auch mit **0,4 K** (13.07.2011) einen sehr kleinen Wert an.

Während der Zeit der großen vertikalen Temperaturdifferenz erreicht der Freistrahler wegen der auftretenden Bahnkurven keine größere Gewässertiefen. Die Freistrahlanlagen haben daher nur in dem relativ engen Zeitbereich der kleinen vertikalen Temperaturdifferenz (06. bis 28.07.2011) die Möglichkeit zur Gewässerbelüftung auch für das Tiefenwasser und die Freistrahlanlagen konnten nur in dieser Zeit einer weiteren Verschärfung des Sauerstoffmangels entgegenwirken.

Dieser mögliche Nutzen der Freistrahlanlagen für die Gewässerbelüftung in einer Zeitspanne von **3 Wochen** wird daher als gering eingeschätzt.

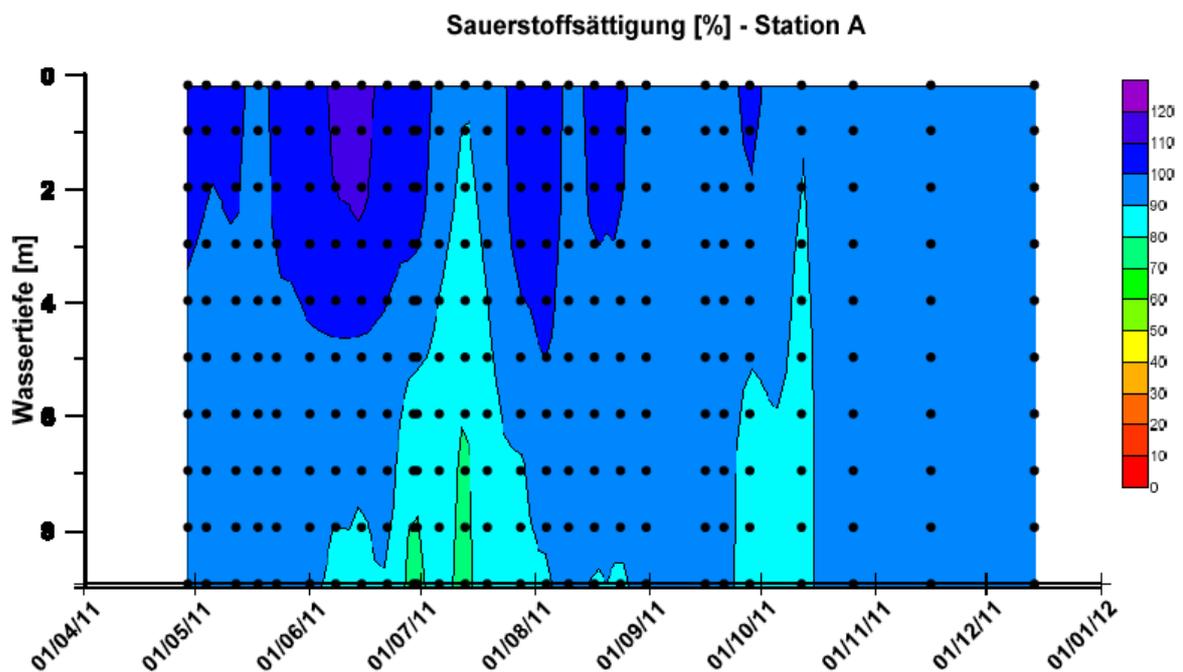


Bild 15 Sauerstoffsättigung für verschiedene Wassertiefen im Jahresverlauf 2011, Station A /11/

Im gesamten Jahr 2011 gab es auf dem Banter See keine Kälteperiode mit Eisbildung. Da aber im Januar/Februar 2012 eine solche zu verzeichnen war, soll an dieser Stelle die mittlere Lufttemperatur im November und Dezember 2011 aufgeführt werden. Sie betragen **6,3** und **5,3 °C** und sie lagen damit relativ hoch.

Im Zeitraum von November bis Dezember 2011 waren daher freie Konvektionen sicherlich nur eingeschränkt möglich oder sogar auch ganz auszuschließen, aber es traten sehr häufig Starkwindereignisse (erzwungene Konvektionen) mit mittleren Windgeschwindigkeiten **>40 km/h** (Windstärke **6**) auf, die für eine Durchmischung des Gewässers gesorgt haben, siehe Phase **VII** im Bild 12, Tabelle 5.

Fünf weitere Windereignisse mit mittleren Windgeschwindigkeiten **>35 km/h** sollen hier nicht aufgeführt werden, die aber ebenfalls zur Durchmischung beitrugen.

Zeit	mittlere Windgeschwindigkeit km/h
11.11.2011	42
27.11.2011	46
03.12.2011	41
09.12.2011	42
13.12.2011	49

Tabelle 5 Mittlere Windgeschwindigkeiten von Starkwindereignissen im November und im Dezember 2011 /11/

In Verbindung mit den genannten relativ hohen mittleren Lufttemperatur in dieser Zeit kam es daher zu keiner wesentlichen Abkühlung des Gewässers und der energetische Zustand des Gewässers wird als relativ hoch eingeschätzt.

Das Jahr 2012:

Die Kälteperiode im Januar/Februar (28.01. bis 12.02.2012 = **16 Tage**) ergab, dass am 09.02.2012 an der Messstelle Campingplatz wegen Eisbildung keine Beprobung durchgeführt werden konnte, während an der Messstelle Grodendamm eisfreies Wasser vorlag. Die Eisbildung setzte **13 Tage** nach Beginn der Kälteperiode ein. Somit ergaben sich ähnliche Verhältnisse wie in der Kälteperiode im November/Dezember 2010, wenn auch die Kälteperiode im Januar/Februar 2012 mit **16 Tagen** deutlich kürzer ausfiel und die Eisbildung bereits nach **13 Tagen**, also wesentlich früher einsetzte.

Bis zum Beginn der Kälteperiode lag die mittlere Lufttemperatur im Januar mit **4,9 °C** (bis 27.01.2012) immer noch relativ hoch, wobei aber **3** Frosttage auftraten. Es wird davon ausgegangen, dass die freie Konvektion wegen der größeren mittleren Temperatur als **4 °C** nur zeitweise auftrat, die dann aber im Vergleich zur starkwindbedingten erzwungenen Konvektion vernachlässigbar klein war. Die häufigen Starkwindereignissen vor der Kälteperiode mit mittleren Windgeschwindigkeiten von **>40 km/h**, siehe Tabelle 6, ließen die Wassertemperatur des Gewässers nur geringfügig absinken.

Zeit	mittlere Windgeschwindigkeit km/h
04./05.01.2012	42/48
12.01.2012	41
26.01.2012	44

Tabelle 6 Mittlere Windgeschwindigkeiten von Starkwindereignissen vor der Kälteperiode im Januar 2012 /11/

D.h. in der Zeit von November 2011 bis zum Einsetzen der Kälteperiode Ende Januar 2012 wird sich das Gewässer nicht wesentlich abgekühlt haben und der energetische Zustand kann als jahreszeitlich normal eingeschätzt werden. Dieser energetische Zustand war daher im Monat vor dem Einsetzen der Kälteperiode wesentlich kleiner als im Jahr 2010, weil auch schon die mittlere Lufttemperatur in diesem Zeitraum mit **4,9 °C** geringer als mit **6,7 °C** im Jahr 2010 ausfiel.

In der gesamten Kälteperiode im Januar/Februar 2012 traten **16** Frosttage (minimale Temperatur der Luft **<0 °C**) und **13** Eistage (maximale Temperatur der Luft **<0 °C**) auf. Die tiefste minimale Lufttemperatur wurden mit **-13,5 °C** (03.02.2012) und mit **-17 °C** (07.02.2012) gemessen. Die mittlere Lufttemperatur lag für die gesamte Kälteperiode bei **-4,7 °C**. In dieser Kälteperiode (ab 28.01.2012) traten relativ wenige Windereignisse auf, so dass der Energietransport von der Gewässertiefe bis zur Wasseroberfläche entsprechend gering war (Daten werden noch ergänzt). Dadurch kam es auf der Wasseroberfläche zu keiner Verzögerung der Eisbildung, wodurch sich die relativ kurze Zeit bis zur Eisbildung mit den genannten **13 Tage** begründet.

MICHELE /9,14/ veröffentlichte in einem Zeitungsbericht Fotos (05.02.2012) während der Kälteperiode im Januar/Februar 2012 zur Eissituation auf dem Ostteil des Banter Sees (eisfrei) sowie auf dem daneben liegenden, nur durch den Grodendamm getrennten, Westteil des Hafenbeckens (Vereisung). Diese Fotos entstanden demnach **9 Tage** nach dem Beginn der Kälteperiode. Im Zeitungsbericht wird das eisfreie Wasser im Ostteil des Banter Sees mit dem Wirken der Freistrahlanlagen in Zusammenhang gebracht. Gleichzeitig wird aber eingeräumt, dass im Westteil des Banter Sees zur gleichen Zeit ebenfalls Vereisungen auftraten. Auf diese Situation an den beiden Probenahmestellen des Banter Sees Campingplatz (Westteil) und Grodendamm (Ostteil) ist schon im Abschnitt 3. eingegangen worden und das eisfreie Wasser im Ostteil konnte mit der Wellenbildung erklärt werden, wenn die bevorzugte Windrichtung aus Westen unterstellt wird. Somit ergaben sich mit dieser teilweise Vereisung des Banter Sees ähnliche Verhältnisse, so wie diese schon in der Kälteperiode im November/Dezember 2010 auftraten.

In diesem Zusammenhang verweist LIEBEZEIT /2/ auf eine frühere Beobachtung aus dem Jahr 2006, als der Banter See ebenfalls nur teilweise zugefroren war. Außerdem erfolgt der Hinweis, dass solche teilweise Vereisungen auch schon auf anderen Gewässern beobachtet worden sind und nennt einen Artikel zur Eissituation auf der Müritz (Mecklenburg-Vorpommern) /13/. Im Artikel wird festgestellt, dass durch Wind und der damit verbundenen Wellenbildung entsprechende Stellen auf dem Gewässer nicht zugefroren waren.

Die weitere Auswertung der Wetterdaten für das Jahr 2012 wird zur gegebenen Zeit an dieser Stelle eingefügt.

Im Folgenden werden rückläufig das Jahre 2009 und danach das Jahr 2007 betrachtet.

Das Jahr 2009:

Das Jahr 2009 begann mit einer Kälteperiode (26.12.2008 bis 11.01.2009 = **17 Tage**) in der sich an der Messstelle Campingplatz Eis gebildet hat (09.01.2009), was eine Probenahme ausschloss. An der Messstelle Grodendamm lag eisfreies Wasser vor und somit ergab sich wieder eine ähnliche Situation wie in den Jahren 2010 und 2012. Die Eisbildung setzte **15 Tage** nach Beginn der Kälteperiode ein.

In dieser Kälteperiode traten **16** Frosttage (minimale Temperatur der Luft **<0 °C**) und **6** Eistage (maximale Temperatur der Luft **<0 °C**) auf und die mittlere Lufttemperatur lag in der gesamten Kälteperiode bei **-1,1 °C**. Diese mittlere Lufttemperatur war damit deutlich höher als in den Kälteperioden der Jahre 2010 und 2012. Die tiefste Lufttemperatur erreichte mit **-6,8 °C** (06.01.2009) bei weitem nicht so tiefe Werte wie in den Jahren 2010 und 2012.

Vor der Kälteperiode des Jahres 2009 traten in den beiden letzten Monaten des Jahres 2008 folgende Windereignisse auf, die auf Grund der Höhe der mittleren Windgeschwindigkeit zur Durchmischung des Gewässers geführt haben.

Zeit	mittlere Windgeschwindigkeit km/h
09./10.11.2008	40/47
14.11.2008	34
27.11.2008	34
13.12.2008	35

Tabelle 7 Mittlere Windgeschwindigkeiten im November und im Dezember 2008 /11/

Die mittlere Lufttemperatur lag im November und im Dezember des Jahres 2008 (bis zum Beginn der Kälteperiode) bei **6,6** und bei **3,5 °C** und diese Werte waren damit relativ niedrig. In Verbindung mit den Windereignissen von Tabelle 7 kam es bis zum Einsetzen der Kälteperiode zwar zu keiner wesentlichen Abkühlung des Gewässers, aber der energetische Zustand ist als deutlich kleiner als im Jahr 2010 und kleiner als im Jahr 2012 einzuschätzen.

Während der Kälteperiode traten keine nennenswerten Windereignisse auf (<**30 km/h**). Durch den fehlenden Wind kam es zu keiner Durchmischung und damit nicht zum erzwungenen konvektiven Wärmetransport von der Tiefe des Gewässers bis zur Wasseroberfläche. Die Wasseroberfläche konnte sich deshalb relativ schnell bis zur Eisbildung abkühlen, so dass sich nach nur **15 Tagen** die Eisbildung einstellte.

In der Kälteperiode des Jahres 2010 waren es noch **25 Tage**, weil sehr viele Windereignisse stattfanden und somit immer wieder Energie von der Tiefe des Gewässers bis zur Wasseroberfläche transportiert wurde, obwohl die mittlere Lufttemperatur in dieser Kälteperiode 2010 mit **-5,1 °C** deutlich tiefer als im Jahr 2009 lag.

Die Eisbildung nach **15 Tagen** liegt somit in der gleichen Größenordnung wie im Jahr 2012, weil die Kälteperiode ebenfalls als windarm zu bezeichnen ist.

Im Jahr 2009 waren die beiden Freistrahlanlagen BANT 1 und 2 nicht im gesamten vorgesehenen Zeitraum von Anfang April bis Mitte Oktober, sondern havariebedingt nur zu folgenden Zeiten in Betrieb /3/:

BANT 1	BANT 2
24.04. bis 07.05.2009 29.05. bis 29.08.2009	15.04. bis 20.04.2009 29.04. bis 08.10.2009 12.06.2009 Unterbrechung 07.08.2009 Unterbrechung

Tabelle 8 Betriebszeiten der Freistrahlanlagen im Jahr 2009 /3/

In den Bildern 16 bis 18 sind diese Betriebszeiten von Tabelle 8 mit eingezeichnet worden. Diese Bilder zeigen wieder, wie schon in den Auswertungen der Jahre 2010 und 2011 zuvor, die mittlere Windgeschwindigkeit, die mittlere Lufttemperatur und die mittleren Wassertemperaturen an der Oberfläche für die beiden Messstellen Grodendam und Campingplatz, jeweils im Zusammenhang mit der vertikalen Temperaturdifferenz, Station A (siehe Bild 6).

Im Bild 16 ist zu sehen, dass ein Starkwindereignis mit der mittleren Windgeschwindigkeit von **39 km/h** (15.05.2009), d.h. mit Windstärke **6** und mehrere Starkwindereignisse von Anfang September bis zum Jahresende 2009 mit der mittleren Geschwindigkeit von **40 bis 44 km/h**, d.h. ebenfalls Windstärke **6** (04.09., 03.10., 16.10., 21.10., 18.11., 25./26.11.2009) auftraten.

Weitere Windereignisse in der Zeit von Anfang September bis zum Jahresende mit einer mittleren Windgeschwindigkeit um **35 km/h** werden hier nicht aufgeführt. Da bei der Datenanalyse des Jahres 2011 festgestellt wurde, dass Windereignisse mit der mittleren Windgeschwindigkeit um **35 km/h** in der Lage sind das Gewässer zu durchmischen, werden die genannten Windereignisse ebenfalls den See durchmischt haben. Diese Durchmischung bestätigt sich in der gemessenen kleinen vertikalen Temperaturdifferenz (siehe Bild 6) in dieser Zeit, die im Bereich bis maximal **1,1 K** liegt:

-0,3 K (02.09.2009), **1,1 K** (09.09.2009) und **0,1 K** (16.09.2009)

Außerdem war zu diesen Zeiten die Anlage Bant 1 (Ostteil des Sees) nicht mehr in Betrieb, so dass sowieso nur der Wind für die Durchmischung in Frage kam.

Mehrere schwächere Windereignisse mit mittlerer Windgeschwindigkeit im Bereich von **30 bis 33 km/h**, d.h. der Windstärke **5**, (27.05., 03.06., 11.06., 10.07. 30.07., 28./29.08.2009), bei denen vergleichsweise im Jahr 2010 kein Einfluss auf die Durchmischung des Gewässers festgestellt wurde, hatten im Jahr 2009 offenbar doch ein Durchmischungspotenzial. Die Ursache dafür ist, dass bei den einzelnen Windereignissen jeweils die maximale Windgeschwindigkeit wesentlich größer als im Jahr 2010 war. Diese maximale Windgeschwindigkeit lagen im Bereich von **76 bis 87 km/h** (26.05., 03.06., 11./12.06., 07.07., 27.07., 28.08.2009), was der Windstärken **9** entspricht.

Zu diesen Windereignissen lassen sich folgende vertikale Temperaturdifferenz im Bereich **<1 K** zuordnen:

0,5 K (29.07.2009), **0,6 K** (05.08.2009), **-0,3 K** (26.08.2009)

Die mittlere Lufttemperatur erreichte im gesamten Jahresverlauf nur am 03.07.2009 den maximalen Wert von **23,8 °C**, was ein vergleichsweise niedriger Wert darstellt, so dass das Jahr 2009 eher zu den kühlen Jahren gezählt werden muss.

Die sehr hohe vertikale Temperaturdifferenz von **5,8 K** (01.07.2009) und danach der Abfall auf **3 K** (08.07.2009) fällt genau in die Zeit der relativ hohen mittleren Lufttemperatur von **21,5 °C** (01.07.2009), bzw. deren Abfall auf **15,7 °C** (08.07.2009) sowie der relativ hohen mittleren Wassertemperatur für die Messstelle Grodendamm von **20,3 °C** (01.07.2009) und für die Messstelle Campingplatz von **21,8 °C** (01.07.2009), bzw. deren Abfall für die Messstelle Grodendamm auf **19,9 °C** (09.07.2009) und für die Messstelle Campingplatz auf **16,1 °C** (09.07.2009), Bilder 17 und 18.

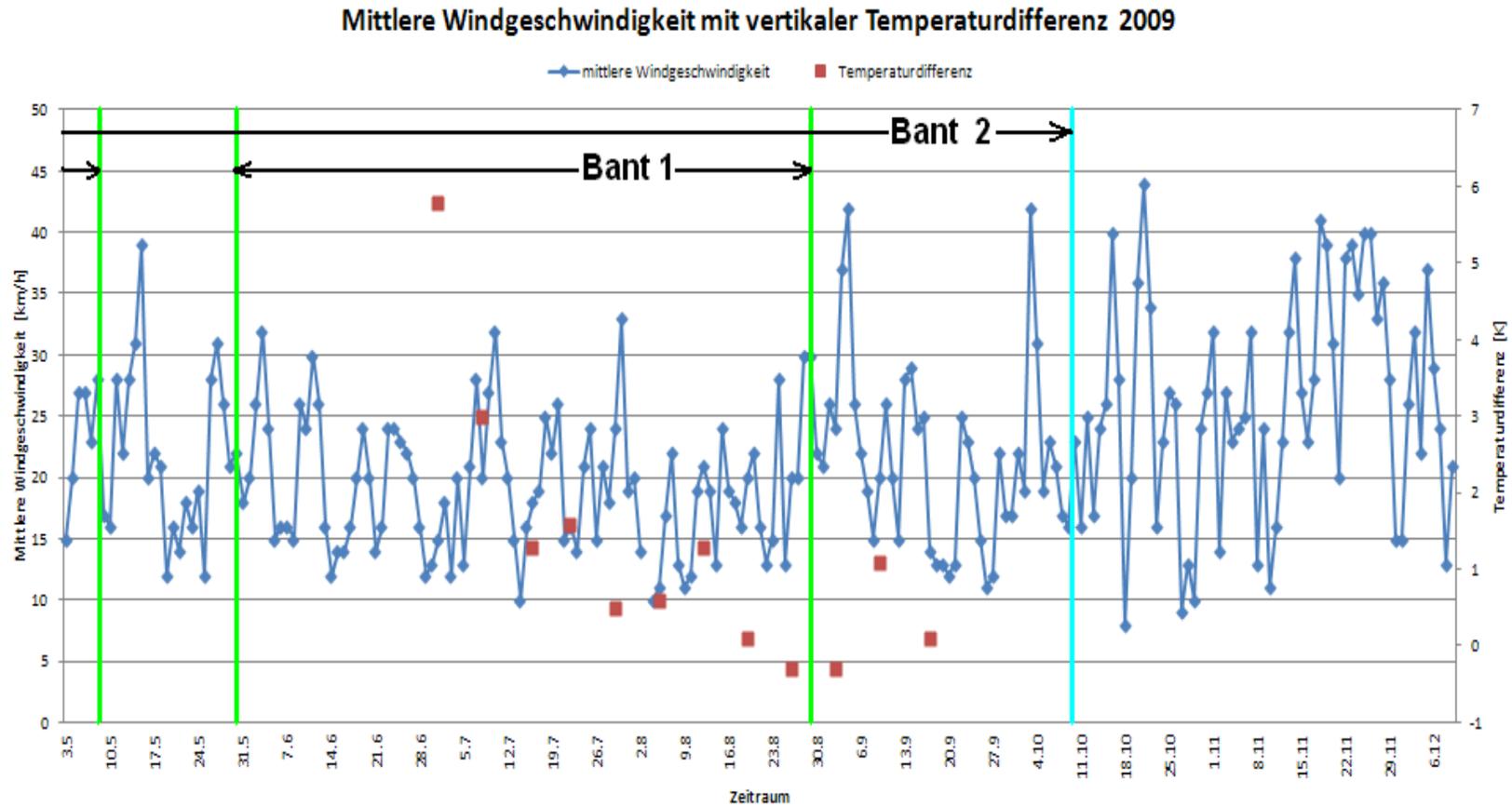


Bild 16 Mittlere Windgeschwindigkeiten als Tageswerte an der Wetterstation ICBM Wilhelmshaven und vertikale Temperaturdifferenz, Station A im Jahresverlauf 2009 /11/

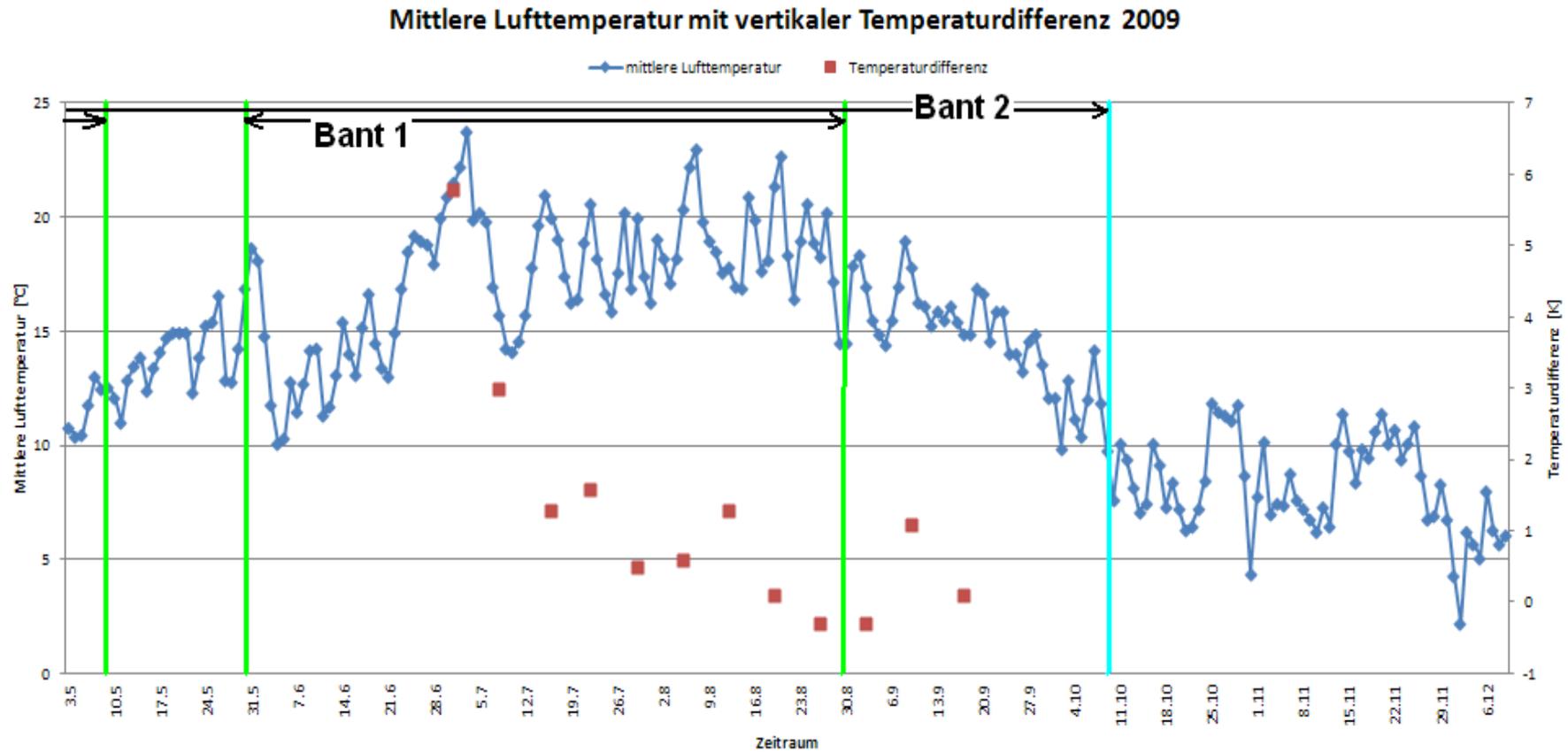


Bild 17 Mittlere Lufttemperatur als Tageswerte an der Station ICBM Wilhelmshaven und vertikale Temperaturdifferenz, Station A im Jahresverlauf 2009 /11/

Beitrag zur Bewertung der Freistrahlanlagen

Wassertemperatur Campingplatz/Grodendamms mit vertikaler Temperaturdifferenz 2009

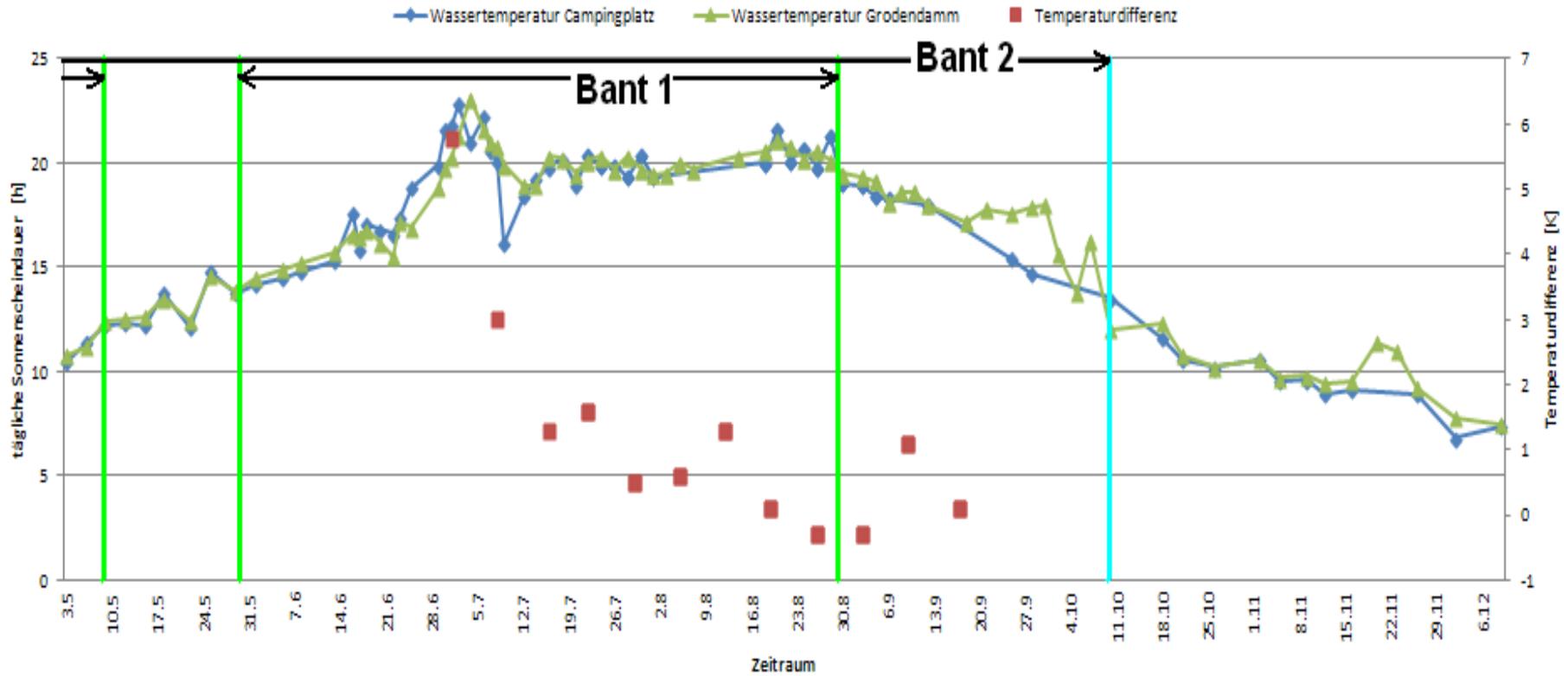


Bild 18 Mittlere Wassertemperaturen an den Messstellen Campingplatz und Grodendamms sowie vertikale Temperaturdifferenz, Station A im Jahresverlauf 2009 /11/

Auch die etwas erhöhte vertikale Temperaturdifferenz in Tabelle 9 können einer Erhöhung der mittleren Lufttemperatur zugeordnet werden:

mittlere Lufttemperatur °C	vertikale Temperaturdifferenz K
von 14,1 auf 21 (10. bis 15.07.2009)	1,3 K (16.07.2009)
von 16,3 auf 29,6 (19. bis 22.07.2009)	1,6 K (22.07.2009)

Tabelle 9 Mittlere Lufttemperatur und vertikale Temperaturdifferenz im Juli 2009 /11/

Nur der Abfall der vertikalen Temperaturdifferenz von **1,3 K** (12.08.2009) auf **0,1 K** (19.08.2009) lässt sich wegen der schnellen Wetterfolge nicht eindeutig einem markanten Wettergeschehen zuordnen, Bilder 16 bis 18.

Somit lassen sich für die vertikale Temperaturdifferenz von **12** Messwerten **10** eindeutig mit dem Wettergeschehen erklären.

Auch wenn in den Zeiträumen um Mitte Mai sowie von Anfang September bis zum Jahresende keine Messwerte zur vertikalen Temperaturdifferenz vorliegen, wird davon ausgegangen, dass im Gewässer windbedingte isotherme Bedingungen vorgeherrscht haben.

Aus der Analyse der Wetterdaten ergibt sich für das Jahr 2009 zusammenfassend, dass nur Anfang Juli größere Werte für die vertikale Temperaturdifferenz (zwei Messungen) und danach nur noch relativ kleine Werte festgestellt wurden, die sich wieder mit dem Wettergeschehen erklären lassen. Die Freistrahlanlagen hatten auf die vertikale Temperaturdifferenz und damit auch auf den Durchmischungszustand des Gewässers offenbar keinen Einfluss, weil deren zeitlicher Wechsel innerhalb von nur wenigen Tagen viel zu schnell erfolgte.

Das Bild 19 zeigt die Sauerstoffkonzentration in verschiedenen Tiefenlagen des Gewässers an der Station A /11/. Es ist festzustellen, dass um den 10.08.2009 herum in einem relativ enger Zeitraum von wenigen Tagen ein sehr starkes Sauerstoffdefizit auftrat (**20 bis 0 µmol/l**).

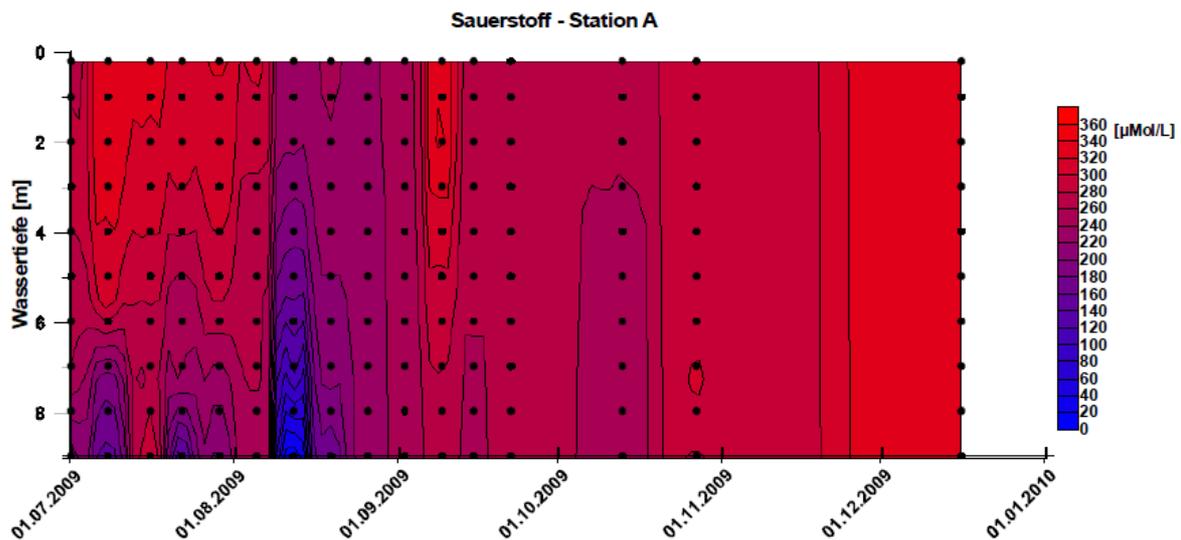


Bild 19 Sauerstoffkonzentration für verschiedene Wassertiefen für die Monate Juli bis Dezember 2009, Station A /11/

Zu dieser Zeit lagen nahezu isotherme Bedingungen vor und es wurde schon festgestellt, dass bezüglich einer höheren mittleren Windgeschwindigkeit oder einer höheren mittleren Lufttemperatur kein markantes Wettergeschehen vorherrschte. Es wird deshalb der Schluss gezogen, dass diese Sauerstoffzehrung allein auf eine zeitlich eng begrenzte hohe biologische Aktivität der Algenmasse im Gewässer zurückzuführen ist.

Während dieser Zeit konnten die Freistrahlanlagen zwar einen Beitrag zur Gewässerbelüftung leisten, aber das starke Sauerstoffdefizit zu verhindern waren sie nicht in der Lage. Der mögliche Nutzen der Freistrahlanlagen für die Gewässerbelüftung innerhalb von wenigen Tagen wird daher als sehr gering eingeschätzt.

Das Jahr 2007:

Das Jahr 2007 war das Jahr vor der Inbetriebnahme der Freistrahlanlagen. Dieses Jahr ist für die Auswertungen mit verwendet worden, denn nur das Wettergeschehen konnte einen Einfluss auf die vertikale Temperaturdifferenz genommen haben.

Auch für dieses Jahr 2007 werden die mittlere Windgeschwindigkeit, die mittlere Lufttemperatur und die mittleren Wassertemperaturen an der Oberfläche für die beiden Messstellen Grodendamm und Campingplatz jeweils im Zusammenhang mit der vertikalen Temperaturdifferenz, Station A (siehe Bild 6) ausgewertet, Bilder 20 bis 22.

Mittlere Windgeschwindigkeiten mit vertikaler Temperaturdifferenz 2007

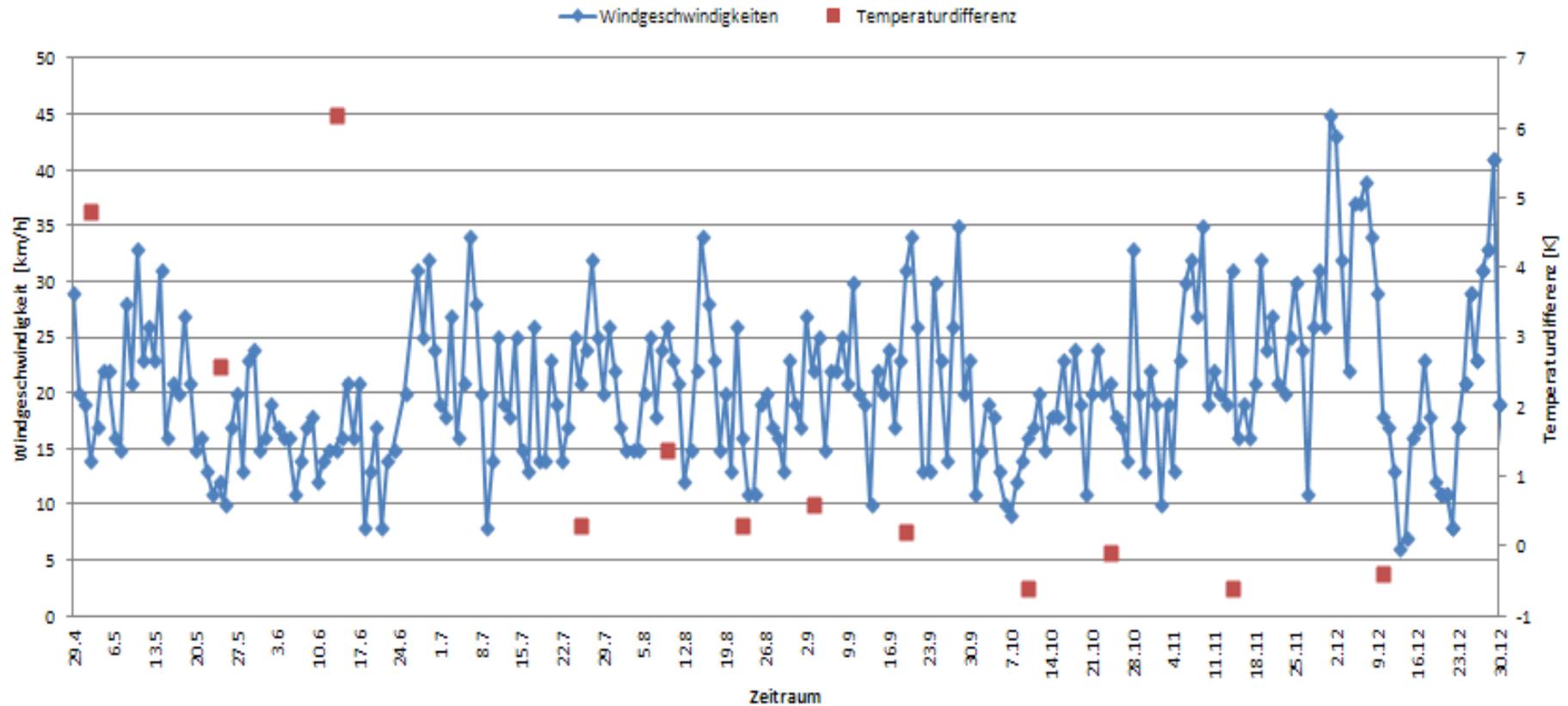


Bild 20 Mittlere Windgeschwindigkeiten als Tageswerte an der Wetterstation ICBM Wilhelmshaven und vertikale Temperaturdifferenz, Station A im Jahresverlauf 2007 /11/

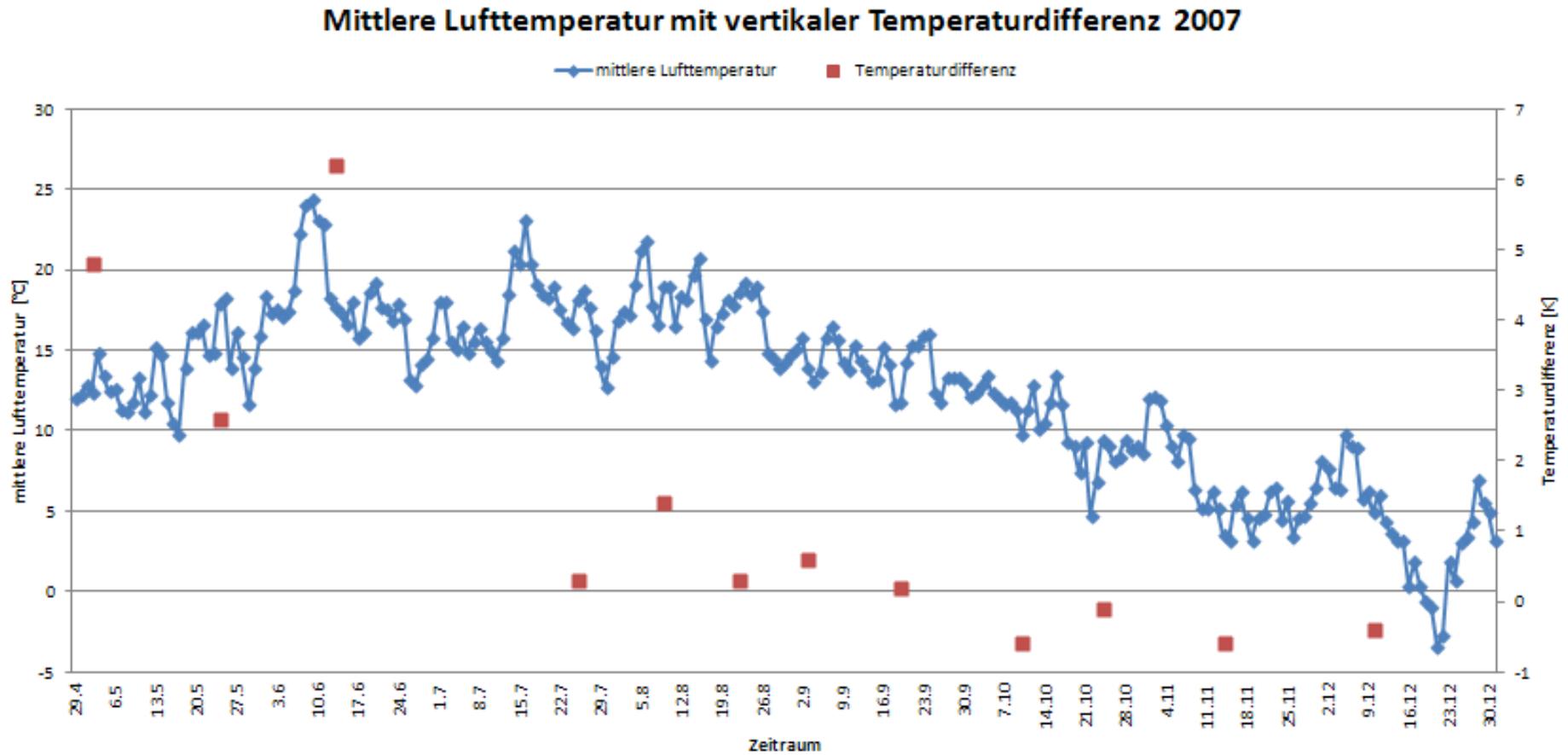


Bild 21 Mittlere Lufttemperatur als Tageswerte an der Station ICBM Wilhelmshaven und vertikale Temperaturdifferenz, Station A im Jahresverlauf 2007 /11/

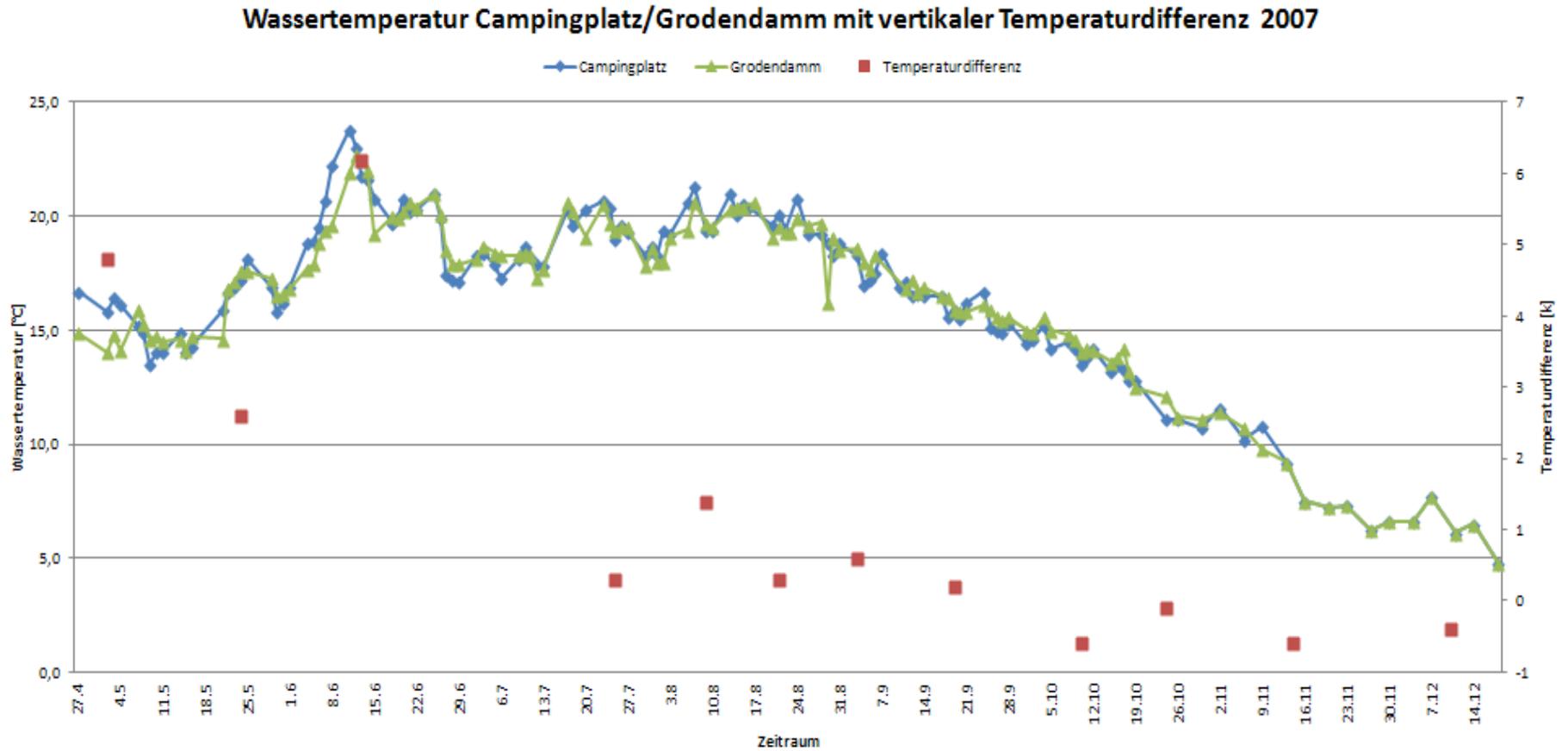


Bild 22

Mittlere Wassertemperaturen an den Messstellen Campingplatz und Grodendamms sowie vertikale Temperaturdifferenz, Station A im Jahresverlauf 2007 /11/

Auch für das Jahr 2007 ist festzustellen, dass ganzjährig sehr viele Windereignisse mit mittleren Windgeschwindigkeiten **>34 km/h** stattgefunden haben, die zu einer Durchmischung des Gewässers führten. Speziell lassen sich in der Tabelle 10 in der Zeit von August bis Dezember 2007 folgende Windereignisse den Werten der vertikalen Temperaturdifferenz zuordnen:

mittlere Windgeschwindigkeit km/h	vertikale Temperaturdifferenz K
50 (18.03.2007)	
39/35 (22./23.03.2007)	
34 (06.07.2007)	
34 (15.08.2007)	0,3 K (22.08.2007)
34 (20.09.2007)	0,2 K (19.09.2007)
35 (28.09.2007)	-0,6 K (10.10.2007)
35 (11.11.2007)	-0,6 K (14.11.2007)
45/43 (01./02.12.2007)	
37/37/39/34 (05.-08.12.2007)	-0,4 K (10.12.2007)
41 (29.12.2007)	

Tabelle 10 Windereignisse mit mittleren Windgeschwindigkeiten **>34 km/h** des Jahres 2007 mit zuordenbarer vertikalen Temperaturdifferenz /11/

Das Windereignis mit der mittleren Windgeschwindigkeit von **32 km/h** (27.07.2007) (Bild 20) wird zwar nicht selbst zur sehr kleinen vertikalen Temperaturdifferenz von **0,3 K** (25.07.2007) geführt haben, aber bei den etwas schwächeren Windereignissen in den Tagen zuvor trat die maximale Windgeschwindigkeit bis zu **83 km/h** (24.07.2007) auf, die offenbar eine Durchmischung des Gewässers ergaben. Solch eine vergleichbare Situation ließ sich bereits im Jahr 2009 feststellen, da bei mittlerer Windgeschwindigkeit von **30 bis 33 km/h** keine Durchmischung zu erwarten war, aber die maximale Windgeschwindigkeit **> 76 km/h** sehr hoch lag und sich dadurch die Durchmischung des Gewässers einstellte.

Die nicht mit den Windereignissen im Zusammenhang stehenden sehr kleinen Werte der vertikalen Temperaturdifferenz in dieser Zeit lassen sich durch eine kühle Wetterperiode erklären, bei der es zu keiner Erwärmung der Wasseroberfläche durch die Sonneneinstrahlung kam, Tabelle 11.

mittlere Lufttemperatur °C	vertikale Temperaturdifferenz K
13,9 (03.09.2007)	0,6 K (03.09.2007)
9,4 (24.10.2007)	0,1 K (24.10.2007)

Tabelle 11 Mittlere Lufttemperatur und vertikale Temperaturdifferenz während der kühlen Wetterperiode im September und im Oktober 2007 /11/

Die sehr hohe vertikale Temperaturdifferenz im Juni 2007 von **6,2 K** (13.06.2007) steht mit einer windarmen Zeit und der Erhöhung der mittleren Lufttemperatur von **11,6** auf **18,2 °C** (29.05. bis 12.06.2007) sowie der Erhöhung der mittleren Wassertemperaturen an der Wasseroberfläche für die Messstellen Grodendam und Campingplatz (Mittelwerte) von **15,8** auf **22,2 °C** (30.05. bis 13.06.2007) im Zusammenhang.

Für die Reduktion der vertikalen Temperaturdifferenz von **4,8 K** (02.05.2007) auf **2,6 K** (24.05.2007) ist wieder ein Windereignis mit der mittleren Windgeschwindigkeit von **33 km/h** (10.05.2007) verantwortlich, bei dem die maximale Windgeschwindigkeit **80 km/h** betrug.

Für das Jahres 2007 ist festzustellen, dass das Verhalten der vertikalen Temperaturdifferenz ausschließlich dem Wettergeschehen zuzuordnen ist, weil Freistrahlanlagen nicht in Betrieb waren. Die Durchmischung des Gewässers konnten nur die Windereignisse verursacht haben.

Es ergeben sich grundsätzlich die gleichen Interpretationen im Verhaltens von mittlerer Windgeschwindigkeit und mittlerer Lufttemperatur auf die vertikale Temperaturdifferenz wie auch in den Folgejahren mit den Freistrahlanlagen.

Somit lässt sich keine signifikante Wirkung der Freistrahlanlagen auf das Durchmischungsverhalten im Gewässer nachweisen.

Im Jahr 2007 trat keine Kälteperiode auf, die mit einer Eisbildung auf dem Banter See gekennzeichnet war.

5. Zusammenfassung

Messergebnisse der vertikalen Temperaturdifferenz (Differenz der Wassertemperatur an der Wasseroberfläche und der Tiefe **-9m**) in einem Gewässer wie dem Banter See Wilhelmshaven zeigen, dass sich in Folge des jahreszeitlichen Wettergeschehen abrupt und sehr schnell wechselnde Werte im Bereich von **0** bis **8 K** einstellen können. Hohe Werte der vertikalen Temperaturdifferenz stehen für ausgeprägte Temperaturschichtungen während **0 K** isotherme Bedingungen repräsentieren. In dieser Arbeit war daher zu klären, ob neben der durchmischenden Wirkung des Windes auch die beiden Freistrahlanlagen dazu einen Beitrag leisten können.

Über phänomenologische Betrachtungen u.a. auch zur Sonneneinstrahlung auf ein Gewässer konnte zunächst nachgewiesen werden, dass sich in den Sommermonaten innerhalb von ca. einer Woche die vertikale Temperaturdifferenz von **5 K** aufgebaut kann und dass Freistrahlanlagen wegen ihrer geringen Leistung nicht in der Lage sind, diese Temperaturschichtung zu verhindern.

In einer vorhergehenden Arbeit zur Theorie der Freistrahlausbreitung ist bereits festgestellt worden, dass solche Freistrahlanlagen nur bei isothermen Bedingungen im Gewässer sauerstoffreiches Oberflächenwasser zur Belüftung in die Tiefe leiten können. Treten dagegen Temperaturschichtungen auf, begrenzen Bahnkurven die Freistrahlausbreitung hinsichtlich der erreichbaren Tiefe und horizontalen Weite sehr stark.

Die detaillierte Analyse der Wetterdaten mittlere Windgeschwindigkeit und mittlere Lufttemperatur sowie die mittlere Wassertemperatur an der Wasseroberfläche wurden dahingehend vorgenommen, dass diese jahreszeitlichen Verläufe jeweils zusammen mit der vertikalen Temperaturdifferenz graphisch dargestellt wurden, um die Zusammenhänge aufdecken zu können.

Begonnen wurde mit den Jahren 2010 und 2011, weil in diesen Jahren die Freistrahlanlagen ohne Ausfallzeiten in Betrieb waren. Danach folgte das Jahr 2009, in dem die Freistrahlanlagen nur teilweise arbeiteten. Zum Schluss wurde noch auf das Jahr 2007, als das Jahr ohne Freistrahlanlagen, Bezug genommen.

Zusammenfassend konnte der Schluss gezogen werden, dass ausschließlich das Wettergeschehen, so wie es im Raum Wilhelmshaven auftrat, diese vertikale Temperaturdifferenz im Banter See beeinflusst hat. Die Durchmischung des Gewässers erfolgte in jedem einzelnen Jahr ausschließlich durch die häufigen und starken Windereignisse und es konnte nicht nachgewiesen werden, dass dazu auch die Freistrahlanlagen in der Lage wären.

Folgende Wetterereignisse haben auf die vertikale Temperaturdifferenz einen Einfluss:
- Windereignisse mit mittlerer Windgeschwindigkeit **>35 km/h**, bzw. im Bereich von **30** bis **33 km/h**, wenn die maximale Windgeschwindigkeit **>76 km/h** auftritt, lassen die vertikale Temperaturdifferenz auf Werte **<1K** zurückgehen. Bei solch geringer vertikalen Temperaturdifferenz liegen im Gewässer nahezu isotherme Bedingungen vor.

- Die Erhöhung/Abnahme der mittleren Luft- und der mittleren Wassertemperatur während windarmer Zeiten haben die Erhöhung/Abnahme der vertikalen Temperaturdifferenz zur Folge, was zwischen diesen Größen ein proportionales Verhalten ausweist.

In den Jahren 2010, 2011 und 2009 traten während sommerlicher windarmer Zeiten innerhalb sehr enger Zeiträumen Sauerstoffverarmungen im Tiefenwasser auf, die im Zusammenhang mit intensiven aeroben Vorgängen in der Biomasse (Algen) stehen. Die Freistrahlanalgen können dabei nur dann zur Gewässerbelüftung beitragen, wenn durch fehlende Sonneneinstrahlung die vertikale Temperaturdifferenz sehr klein ist. Es betrifft meist nur die Zeit von **1 bis 3 Wochen** pro Jahr, die als nicht ausreichend angesehen wird, um den Einsatz der Freistrahlanlagen zu begründen.

Weitere phänomenologische Betrachtungen zur Eisbildung auf dem Gewässer zeigen, dass bei der frühwinterlichen Abkühlung des Gewässers wegen der Dichteanomalie des Wassers sich mittels freier Konvektion am Gewässergrund die Temperatur von **4 °C** einstellt, unabhängig davon, wie hoch die Wassertemperatur vorher war. D.h. die energetische Aufladung eines Gewässers im Spätsommer durch die Freistrahlanalgen, sofern sie wegen ihrer geringen Leistungen überhaupt nennenswert stattfindet, ist meist nutzlos und führt nicht zu einer Verzögerung der Eisbildung.

Es konnte nachgewiesen werden, dass allein durch die durchmischende Wirkung von Windereignissen ein Energietransport von der Tiefe des Gewässers zur Wasseroberfläche stattfindet, der in der Lage ist die Eisbildung zu verzögern.

6. Symbolverzeichnis

Symbole

A	Fläche	m ²
c _p	spezifische Wärmekapazität	J/(kg K)
Δh _R	Reaktionsenthalpie	kJ/mol
m	Masse	kg
M	molare Masse	g/mol
n	spezifische Molmenge	mol/m ³
Q ₁₂	Wärme	J
q ₁₂	spezifische Wärme	J/m ²
q̇ ₁₂	spezifischer Wärmestrom	W/m ²
t	Zeit	s, h
T	Temperatur	°C
ΔT	Temperaturdifferenz	K
V	Volumen	m ³
x, y	Koordinaten des Freistrahls, Horizontale, Vertikale	m
y	Tiefe	m
ρ	Dichte	kg/m ³

Indices

W	Wasser
O ₂	Sauerstoff

7. Literatur

- /1/ Lücking, P.: Vortrag zum Tag der offenen Tür an der Fachhochschule in Wilhelmshaven, 18.11.2009
<http://evu.jade-hs.de/content/projekt-freistrahlanlagen-im-banter-see-wilhelmshaven>
Artikel "Veranlassung, technisch-biologische Wirkungsweise" vom 30.01.2007
Anhang: Vortrag Lücking.pdf
"Freistrahlen zur besseren Durchmischung stehender Gewässer am Beispiel Banter See"
Auftrag der Stadt Wilhelmshaven "Bekämpfung der Blaualgenproblematik im Banter See"
- /2/ Liebezeit, G.: Mails vom 11.03.+13.03.+ 16.05.2012,
- /3/ Lücking, P.;
Scheltwort, J.;
Liesegang, R.: Blaualgenproblematik Banter See
Jahresabschlussbericht 2009
<http://evu.jade-hs.de/system/files/Freistrahl%20Technik%20Abschluss%202009.pdf>
- /4/ Winter, B.: "Beitrag zur mathematisch-physikalischen Modellierung von Freistrahlanlagen für die Gewässerbelüftung (Teil 1)", persönliche Homepage, Jade Hochschule, Publikationen
<http://www.jade-hs.de?id=8326>
- /5/ Michele, J.: Vertikale Temperaturmesswerte 08.08.2002, unveröffentlicht
- /6/ Umweltdatenbank: Globalstrahlung
<http://www.umweltdatenbank.de/lexikon/globalstrahlung.htm>
- /7/ Atkins, P.W.: Physikalische Chemie
VCH Verlagsgesellschaft mbH Weinheim, 1992
2. Auflage
- /8/ Wikipedia
die freie Enzyklopedie: Sauerstoffsättigung
[http://de.wikipedia.org/wiki/Sauerstoffs%C3%A4ttigung_\(Umwelt\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Sauerstoffs%C3%A4ttigung_(Umwelt))
- /9/ Michele, J.: Leserbrief "Und sie wirken doch ..."
Wilhelmshavener Zeitung Februar 2012
<http://evu.jade-hs.de/content/projekt-freistrahlanlagen-im-banter-see-wilhelmshaven>
Veranlassung, technisch-biologische Wirkungsweise/
Anhang: Und sie wirken doch.pdf

-
- /10/ Wikipedia
die freie Enzyk-
lopädie: Dichteanomalie - Wasser
<http://de.wikipedia.org/wiki/Dichteanomalie>
- /11/ Liebezeit, G.: MarChemConsult, Varel
Jahresberichte "Ökologische Begleituntersuchungen zum
Einsatz eines Freistrahilverfahrens im Banter See" für die
Jahre 2007 bis 2011"
Internet:
[http://evu.jade-hs.de/content/projekt-freistrahlanlagen,
Veranlassung, technisch-biologische Wirkungsweise/
Anhang: BS_Bericht_2008.pdf](http://evu.jade-hs.de/content/projekt-freistrahlanlagen,Veranlassung,technisch-biologischeWirkungsweise/Anhang:BS_Bericht_2008.pdf) (und folgende Jahre bis
2011)
- /12/ Wikipedia
die freie Enzyk-
lopädie: Beaufortskala
<http://de.wikipedia.org/wiki/Beaufortskala>
- /13/ FOCUS FOCUS Magazin-Verlag GmbH München
"Seen frieren trotz minus elf Grad nicht zu" 31.01.2012
[http://www.focus.de/panorama/vermishtes/
grund-ist-der-eisige-ostwind-seen-frieren-trotz-minus-elf-
grad-nicht-zu_aid_708881.html](http://www.focus.de/panorama/vermishtes/grund-ist-der-eisige-ostwind-seen-frieren-trotz-minus-elf-grad-nicht-zu_aid_708881.html)
- /14/ Czyc, N.: Wilhelmshavener Zeitung, 13.04.2012
Interview: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Michele
Offensichtlich hat die Stadt ...