

155120	155120	155120	155120	155120
155120	155120	155120	155120	155120
155120	155120	155120	155120	155120
155121	155121	155121	155121	155121
155121	155121	155121	155121	155121
155121	155121	155121	155121	155121
155121	155121	155121	155121	155121
155122	155122	155122	155122	155122
155122	155122	155122	155122	155122
155122	155122	155122	155122	155122



3.5.3 Temperaturschichtung und Wärmeinhalt 2018 & 2019

<•> H. Klein, K. Latarius und M. Köllner • • • • •

In diesem Abschnitt wird die saisonale Temperaturschichtung anhand der Daten der Nordsee-Gesamtaufnahme im Sommer und der Jahresgang der Temperatur an der MARNET-Station *Deutsche Bucht* dargestellt. Ferner wird der Gesamt-Wärmeinhalt der Nordsee zur Zeit des Temperaturmaximums der Nordsee diskutiert.

Weite Gebiete der Nordsee mit Wassertiefen größer als etwa 30 m sind im Sommerhalbjahr thermisch geschichtet. Diese saisonale vertikale Temperaturschichtung bildet sich in jenen Seegebieten aus, in denen sich die am Meeresboden erzeugte Gezeitenstromturbulenz nicht bis in die winddurchmischte Oberflächenschicht auswirkt. In der als Thermokline bezeichneten Temperatursprungschicht zwischen warmer Deckschicht und kälterer Bodenschicht können bei voll entwickelter Schichtung regional Temperaturgradienten von mehr als drei Kelvin pro Meter gemessen werden. Da sich mit der Temperatur auch die Dichte ändert, stellt die Thermokline eine Dichte-Barriere dar, die den vertikale Stoff- und Gasaustausch deutlich behindert. In den flacheren Gebieten, wo sich die gezeitenstrom- und windinduzierten Turbulenzzonen überlappen, tritt allenfalls kurzzeitig ein thermischer Gradient in Oberflächennähe auf, der aber durch Prozesse wie Seegang, nächtliche Abkühlung und Konvektion schnell wieder abgebaut wird. Vertikale Temperaturgradienten können zusätzlich durch starke vertikale Salzgehaltsgradienten forciert werden, die z.B. in Flussmündungen oder im Bereich des Baltischen Ausstroms auftreten. Abhängig vom Wechselspiel zwischen thermischem Energieeintrag (Solarstrahlung, fühlbarer Wärmestrom) und kinetischer Energiezufuhr (Windsee, Dünung) können sich eine oder auch mehrere thermische Sprungschichten ausbilden, deren Tiefen von Jahr zu Jahr variieren.

Die beiden folgenden Unterkapitel über Temperaturschichtung und Gesamt-Wärmeinhalt der Nordsee im Sommer beruhen auf den Daten der jährlichen BSH Nordsee-Sommernaufnahmen, die seit 1998 möglichst zur Zeit des Temperaturmaximums durchgeführt werden. Für diese Daten wurde eine 10-jährige Referenzperiode (RP) über den Zeitraum 2000-2010, aber ohne 2002, definiert. In 2002 wurde die Aufnahme deutlich zu früh, d.h. weit vor dem Erreichen des Temperaturmaximums der Nordsee durchgeführt.

3.5.3.1 Saisonale Temperaturschichtung in den Sommern 2018 und 2019

Aus logistischen Gründen konnte die Nordsee-Sommernautnahme 2018 (*Celtic Explorer*, Reise CE18019) erst vier Wochen nach Erreichen des saisonalen SST-Maximums (17.4 °C in der Woche 25.—31.7.) begonnen werden. Bei Beginn der Messungen am 29.8. lag das Flächenmittel der Nordsee-SST bei 15.9 °C und zum Ende der Reise Mitte September bei 15.4 °C.

Im Vergleich zur Klimatologie zeigten die Oberflächentemperaturen in der südlichen Nordsee leicht positive Anomalien, die in Küstennähe bis zu +1.5 K betrugen (Abb. 1a). Entlang der englischen Küste und vor Südnorwegen erreichten die negativen Anomalien -1.5 K. Deutlich ausgeprägte Anomalien zeigten sich in der Bodenschicht. Die positiven Anomalien in der südlichen Nordsee zwischen der Küste und der Doggerbank erreichten Werte von +2.5 K. Auch im nördlichen Einstrombereich aus dem Atlantik, westlich von Kinnaird Head, zeigte sich eine positive Anomalie von etwa +1 K. In einem Bereich, der sich in NW-SE-Richtung weit über die Doggerbank hinaus erstreckte ergaben sich Anomalien von -1.5 K, am Ausgang des Skagerraks wurden lokal -2.0 K erreicht.

Auf dem zonalen 54°N-Schnitt war der Wasserkörper vertikal thermisch homogen durchmischt, ebenso auf dem flacheren östlichen Ende des 55°N-Schnitts, etwa östlich von 6° E. Der westliche Abschnitt dieses Schnitts und alle nördlicheren Schnitte zeigte eine etwa 30 m mächtige durchmischte Deckschicht, die sich infolge der starken Gezeitenströme zur englischen Küste hin abschwächte.

Die Tiefe der Thermokline variierte zwischen 8 m auf dem 55°N-Schnitt und 76 m auf dem 59°N-Schnitt über der Norwegischen Rinne (Tabelle 1 und Abb. 2a-c), mit der typischen Abschwächung des maximalen vertikalen Gradienten von Süd nach Nord. Der maximale vertikale Temperaturgradient in der Thermokline wurde mit 2.6 K/m auf dem 55°N-Schnitt am östlichen Rand der Doggerbank gemessen. Aufgrund der ungewöhnlich kühlen Bodentemperaturen überstieg die Differenz zwischen Oberflächen- und Bodentemperatur 10 K in der zentralen Nordsee und über der Norwegischen Rinne (Abb. 3).

Im Sommer 2019 traten nördlich von 56°N in der oberflächennahen Schicht negative Anomalien auf, die an der Grenze zum Atlantik lokal -2.5 K erreichten. Im südlichen Teil der Nordsee waren die Anomalien positiv mit Werten von +2 K vor der deutschen und niederländischen Küste (Abb. 1b). Mit der Ausnahme weniger kleiner Gebiete waren die Anomalien in der Bodenschicht positiv mit Werten bis zu +4 K in der südöstlichen Nordsee und westlich der Doggerbank. Auf gleicher Breite wurde vor der englischen Küste ein schmales Gebiet mit negativer Anomalie (-1 K) beobachtet. Die Differenz zwischen Oberflächen- und Bodentemperatur betrug 8 K in der zentralen Nordsee und über der Norwegischen Rinne (Abb. 3).

Infolge der warmen Lufttemperaturen vor Beginn der Reise wurde in 2019 erstmalig auf 54°N eine deutliche thermische Schichtung mit vertikalen Gradienten zwischen 0.6 und 1.5 K/m beobachtet, der sich von 002°W bis etwa 007°W erstreckte. In der Regel ist dieser Schnitt thermisch vertikal durchmischt. Alle nördlicheren Schnitte bis einschließlich 60°N zeigten eine scharf ausgeprägte Thermokline, die auf 58°N über der Norwegischen Rinne eine maximale Tiefe von 101 m erreichte. Auf 56 und 57°N wurden maximale Gradienten von 3.0, bzw. 2.9 K/m gemessen. Für weitere Details siehe Tabelle 1.

section	vertical gradient (>0.5 K/m)		depth of thermocline [m]	
	min	max	min	max
2018				
60° N	0.8	1.2	35	43
59° N	0.6	1.2	18	76
58° N	0.7	1.3	19	64
57° N	0.8	1.9	25	37
56° N	0.9	2.3	21	34
55° N	0.5	2.6	8	29
54° N	—	—	—	—
2019				
60° N	0.6	0.7	30	42
59° N	0.7	1.5	22	42
58° N	0.7	2.2	25	101
57° N	1.1	2.9	28	39
56° N	0.5	3.0	20	39
55° N	1.1	2.6	9	29
54° N	0.6	1.5	6	34

Tabelle 1: Extremwerte des vertikalen Temperaturgradienten und Tiefe der Thermokline (Tiefe des maximalen vertikalen Gradienten).

Table 1: Extremes of vertical temperature gradients and thermocline depths (depths of maximum gradients) along the zonal sections.

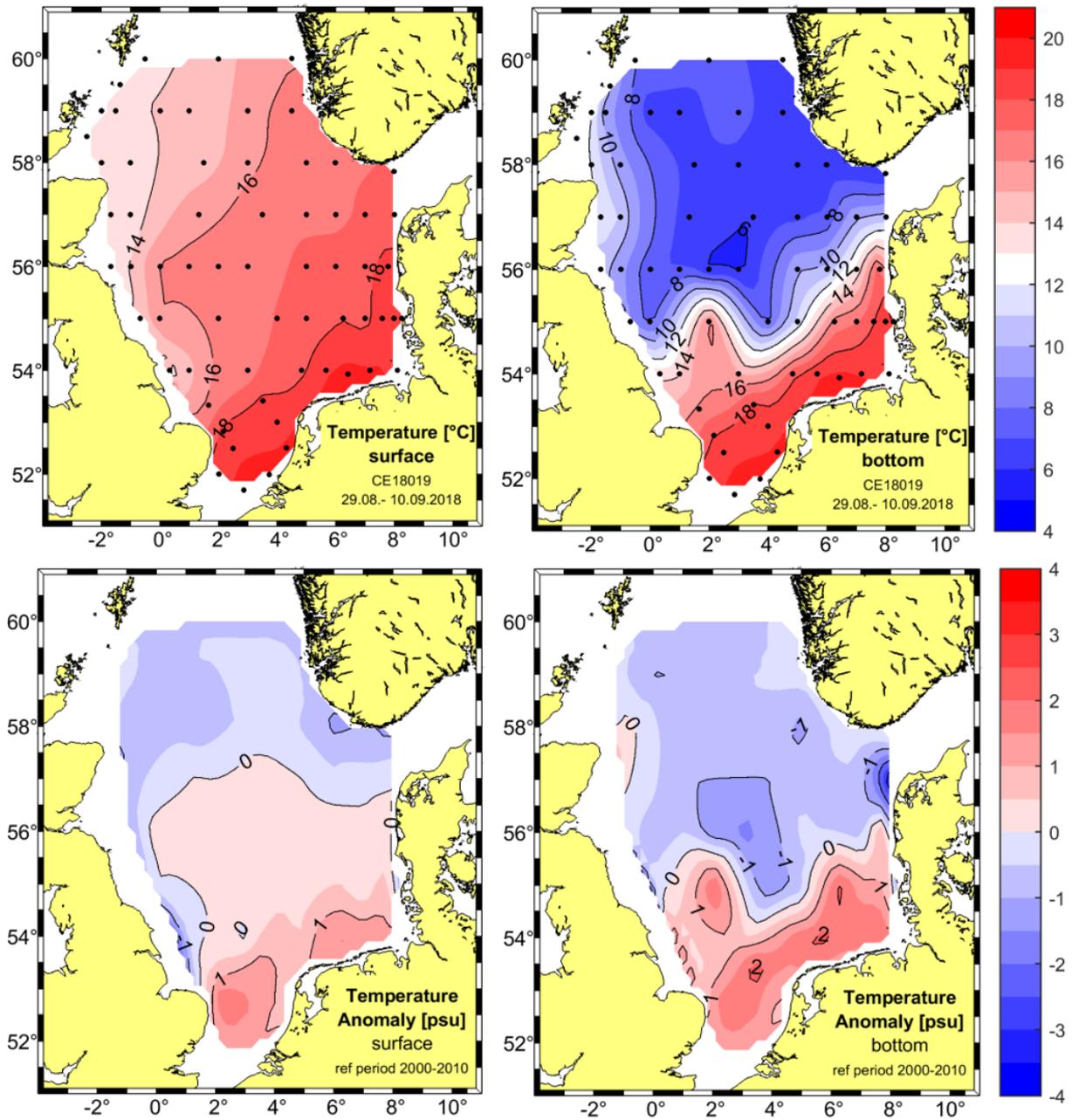


Abb. 1a, oben: Temperaturverteilung in der Oberflächen- und Bodenschicht in °C im Sommer 2018. Unten: Anomalien bzgl. der Referenzperiode 2000-2010 in K in der Oberflächen- und Bodenschicht.

Fig. 1a, top: Horizontal surface and bottom temperature distribution in °C, summer 2018. Bottom: Surface and bottom anomalies w.r.t. the reference period 2000-2010 in K.

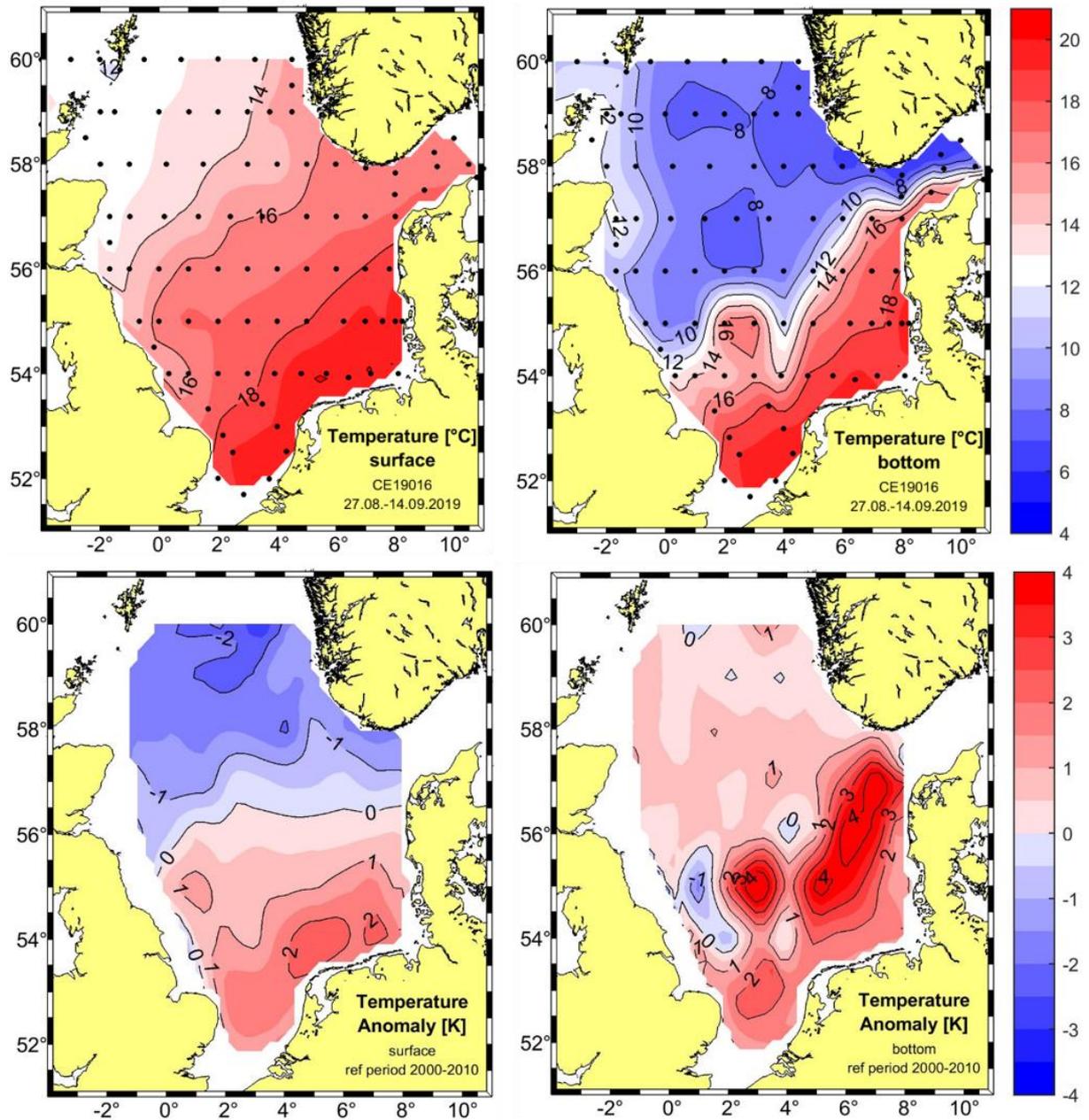


Abb. 1b, oben: Temperaturverteilung in der Oberflächen- und Bodenschicht in °C im Sommer 2019. Unten: Anomalien bzgl. der Referenzperiode 2000-2010 in K in der Oberflächen- und Bodenschicht.

Fig. 1b, top: Horizontal surface and bottom temperature distribution in °C, summer 2019. Bottom: Surface and bottom anomalies w.r.t. the reference period 2000-2010 in K.

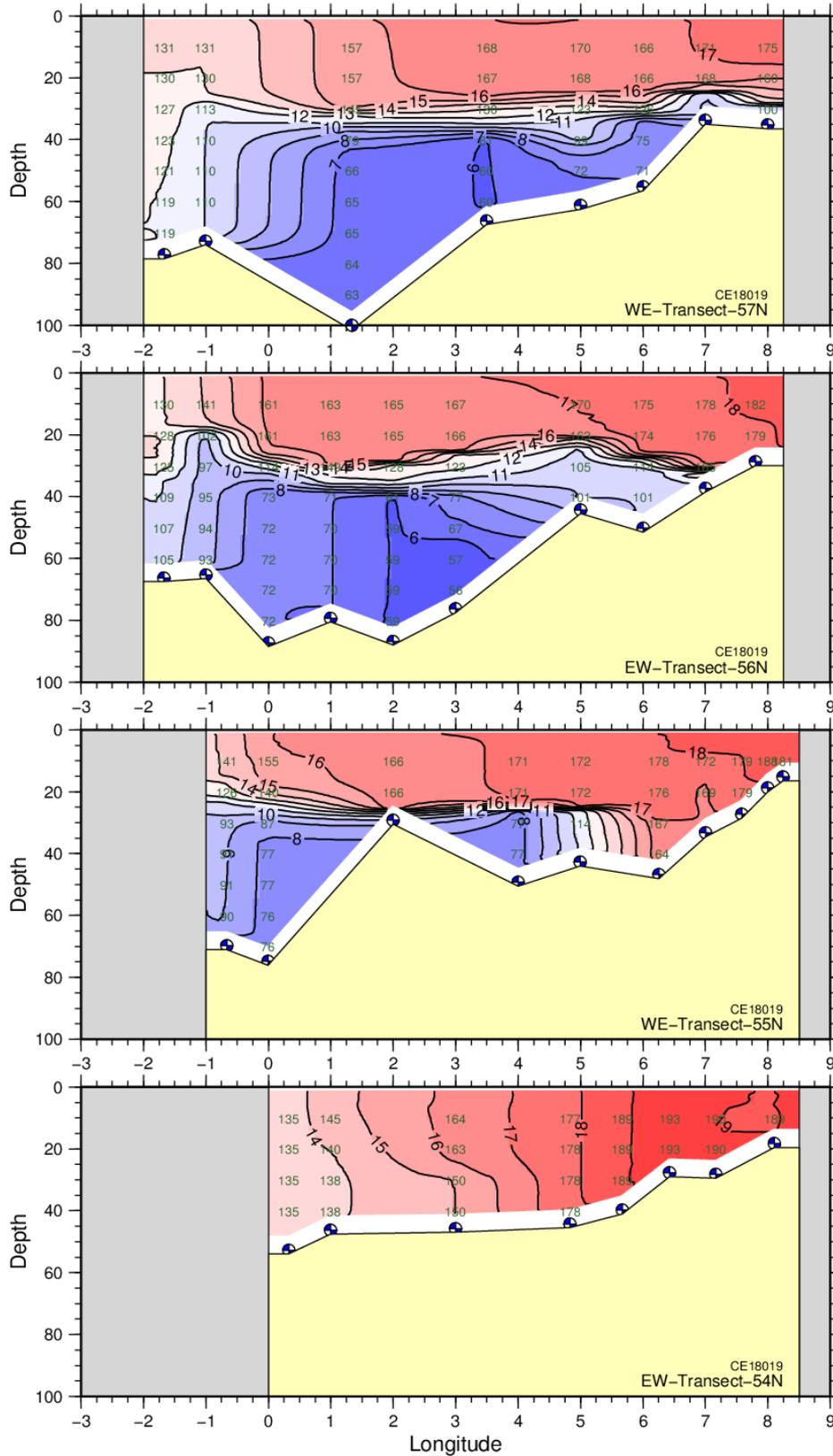


Abb. 2a: Vertikale Temperaturverteilung (°C) entlang des 54°, 55°, 56° und 57°N Schnittes im Sommer 2018. Die vertikalen Zahlenreihen zeigen die Temperatur $\times 10$ für ausgewählte Datenpunkte.

Fig. 2a: Vertical temperature distribution (°C) along the 54°, 55°, 56°, and 57°N sections, summer 2018. The vertical number columns in the section give temperatures $\times 10$ for selected data points.

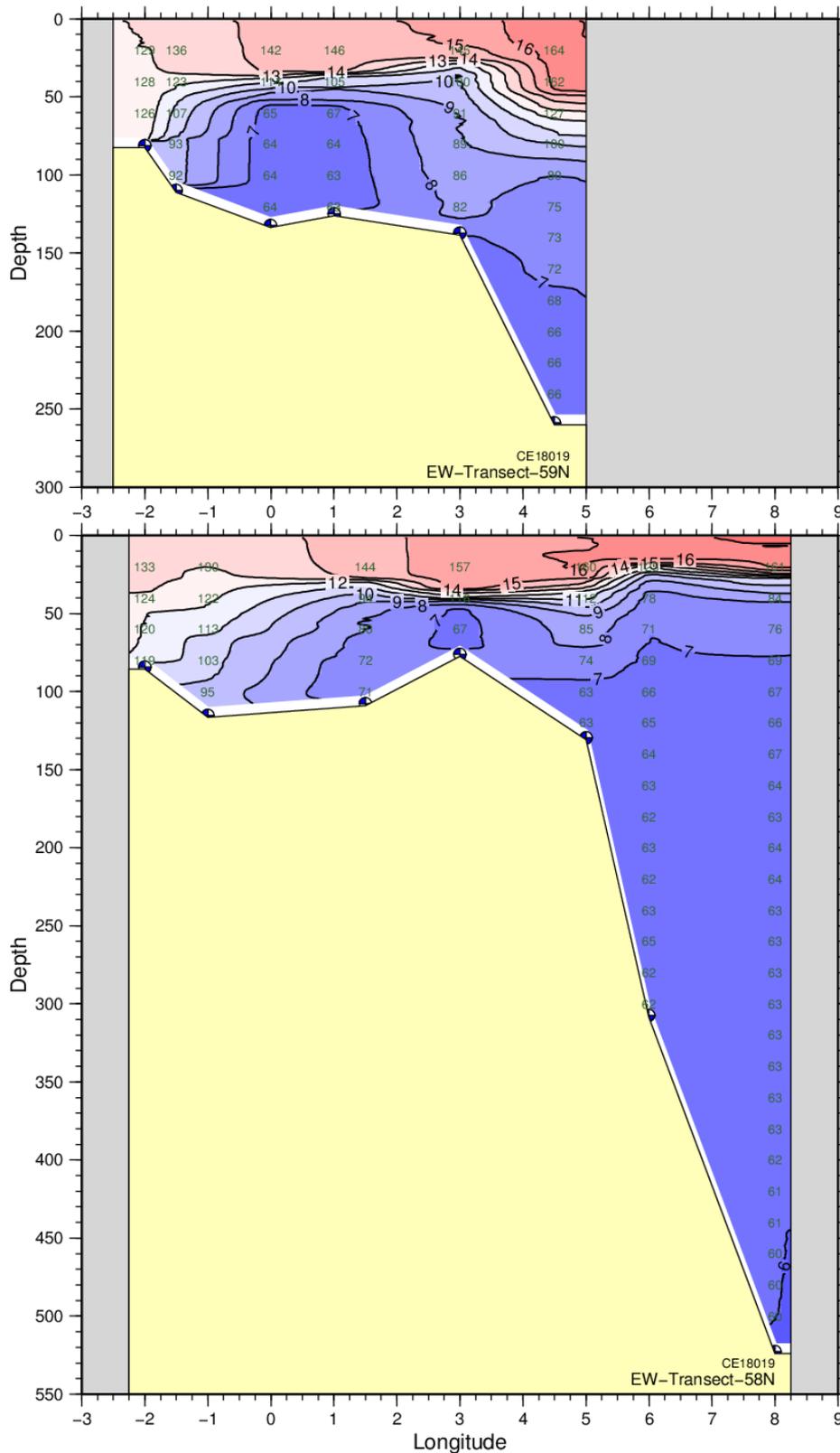


Abb. 2b: Vertikale Temperaturverteilung (°C) entlang des 58° und 59°N Schnittes im Sommer 2018. Die vertikalen Zahlenreihen zeigen die Temperatur $\times 10$ für ausgewählte Datenpunkte.

Fig. 2b: Vertical temperature distribution (°C) along the 58° and 59°N sections, summer 2018. The vertical number columns in the section give temperatures $\times 10$ for selected data points.

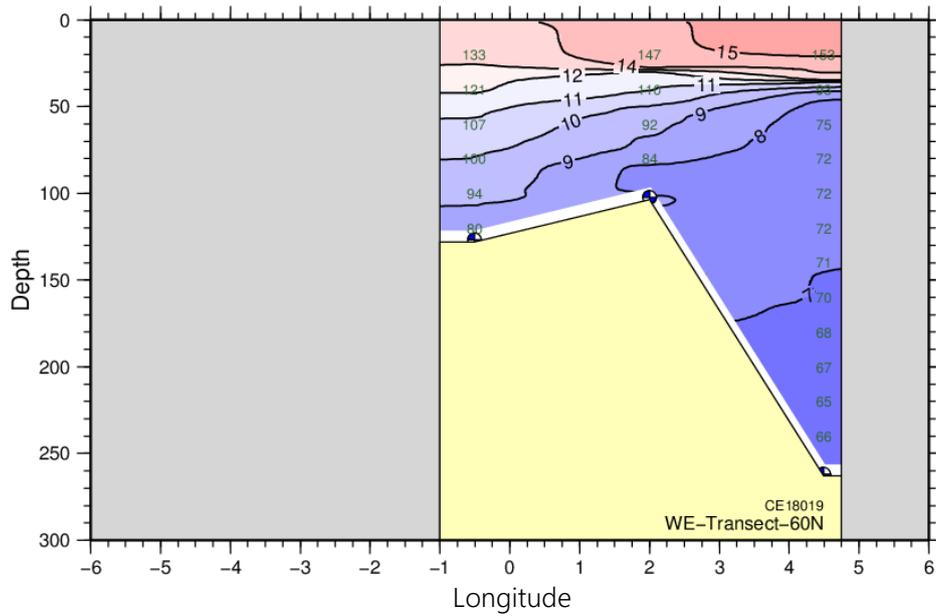


Abb. 2c: Vertikale Temperaturverteilung ($^{\circ}\text{C}$) entlang des 60°N Schnittes im Sommer 2018. Die vertikalen Zahlenreihen zeigen die Temperatur $\times 10$ für ausgewählte Datenpunkte.

Fig. 2c: Vertical temperature distribution ($^{\circ}\text{C}$) along the 60°N sections, summer 2018. The vertical number columns in the section give temperatures $\times 10$ for selected data points.

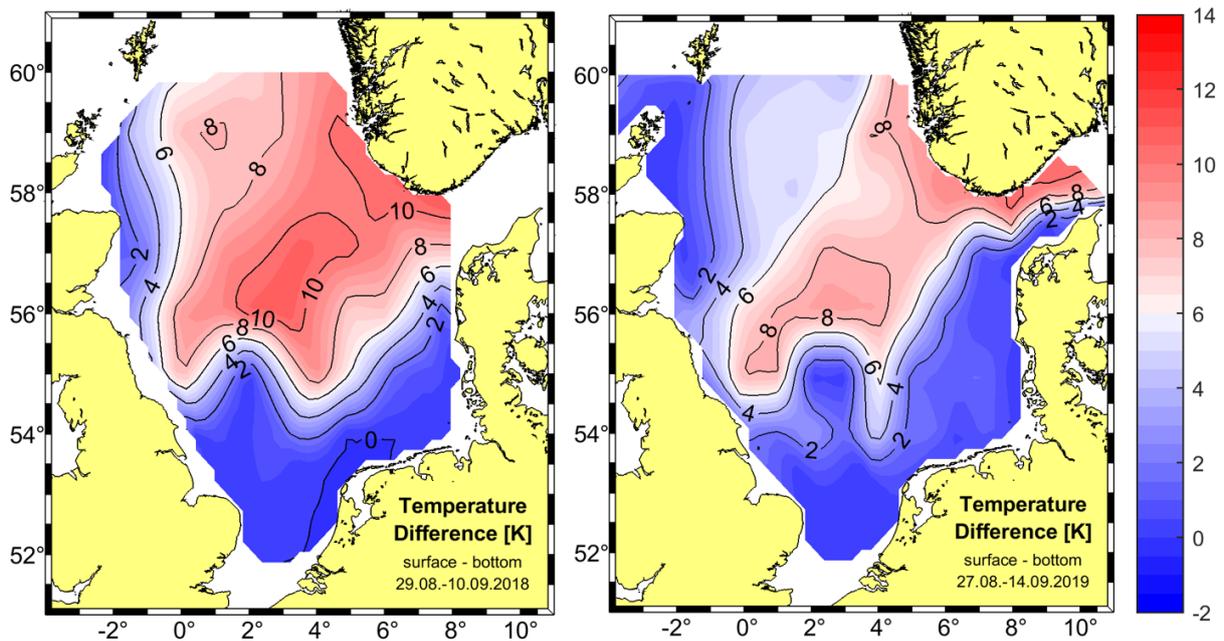


Abb. 3: Differenz Oberflächen- minus Bodentemperatur in K im Sommer 2018 (links) und 2019 (rechts).

Fig. 3: Difference surface minus bottom temperature in K, summer 2018 (left) and 2019 (right).

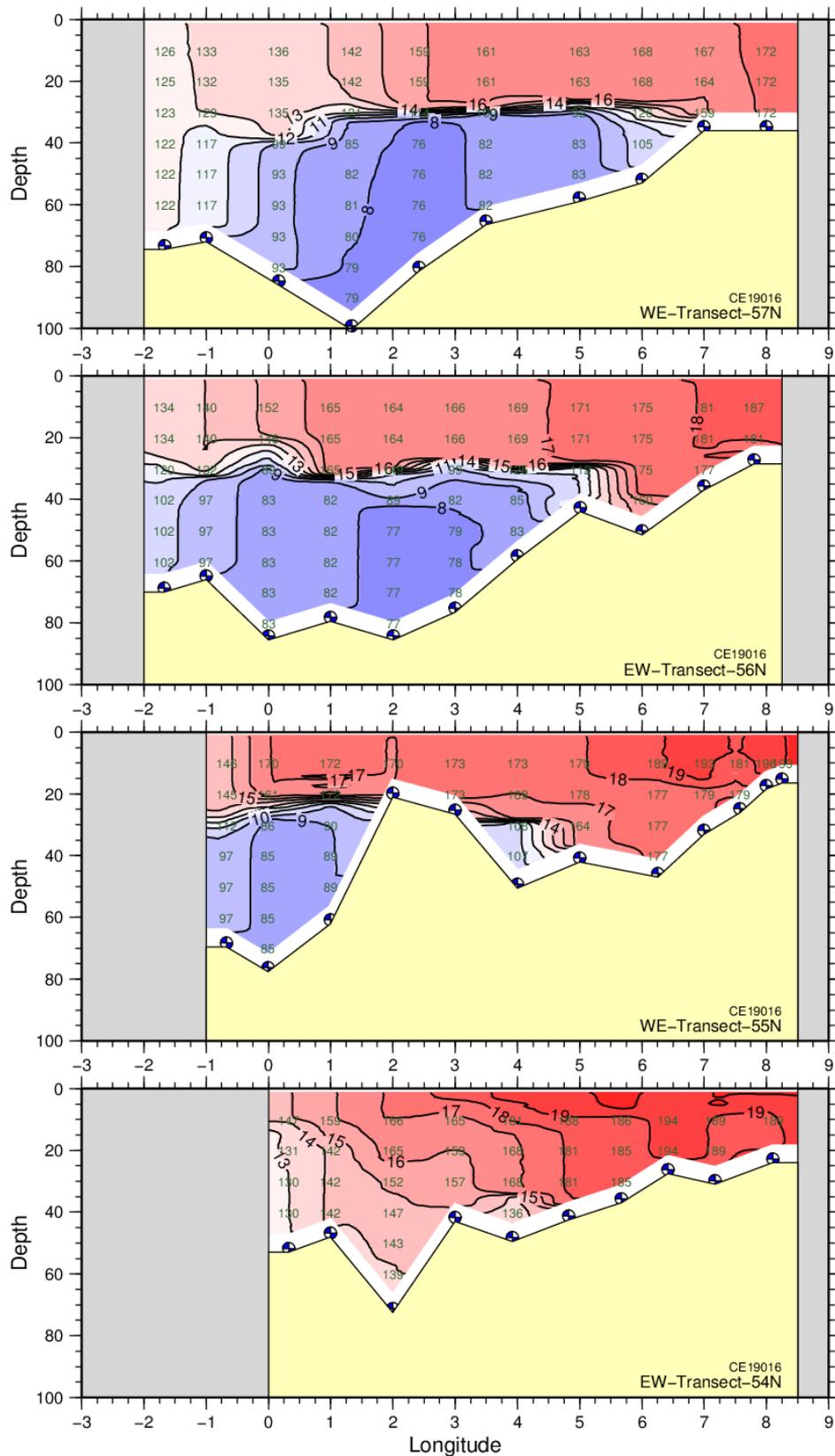


Abb. 4a: Vertikale Temperaturverteilung (°C) entlang des 54°, 55°, 56° und 57°N Schnittes im Sommer 2019. Die vertikalen Zahlenreihen zeigen die Temperatur $\times 10$ für ausgewählte Datenpunkte.

Fig. 4a: Vertical temperature distribution (°C) along the 54°, 55°, 56°, and 57°N sections, summer 2019. The vertical number columns in the section give temperatures $\times 10$ for selected data points.

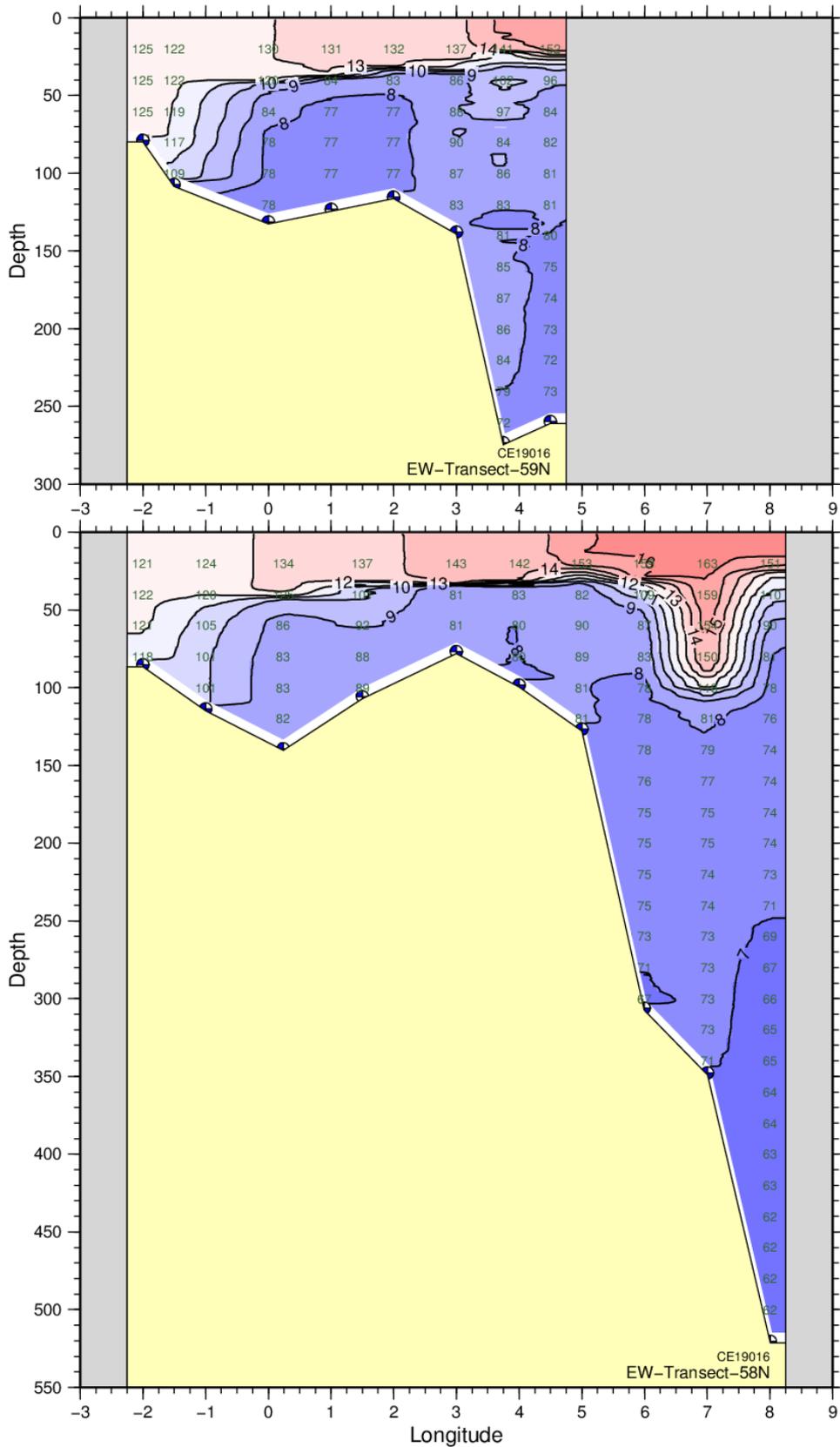


Abb. 4b: Vertikale Temperaturverteilung ($^{\circ}\text{C}$) entlang des 58° und 59°N Schnittes im Sommer 2019. Die vertikalen Zahlenreihen zeigen die Temperatur $\times 10$ für ausgewählte Datenpunkte.

Fig. 4b: Vertical temperature distribution ($^{\circ}\text{C}$) along the 58° and 59°N sections, summer 2019. The vertical number columns in the section give temperatures $\times 10$ for selected data points.

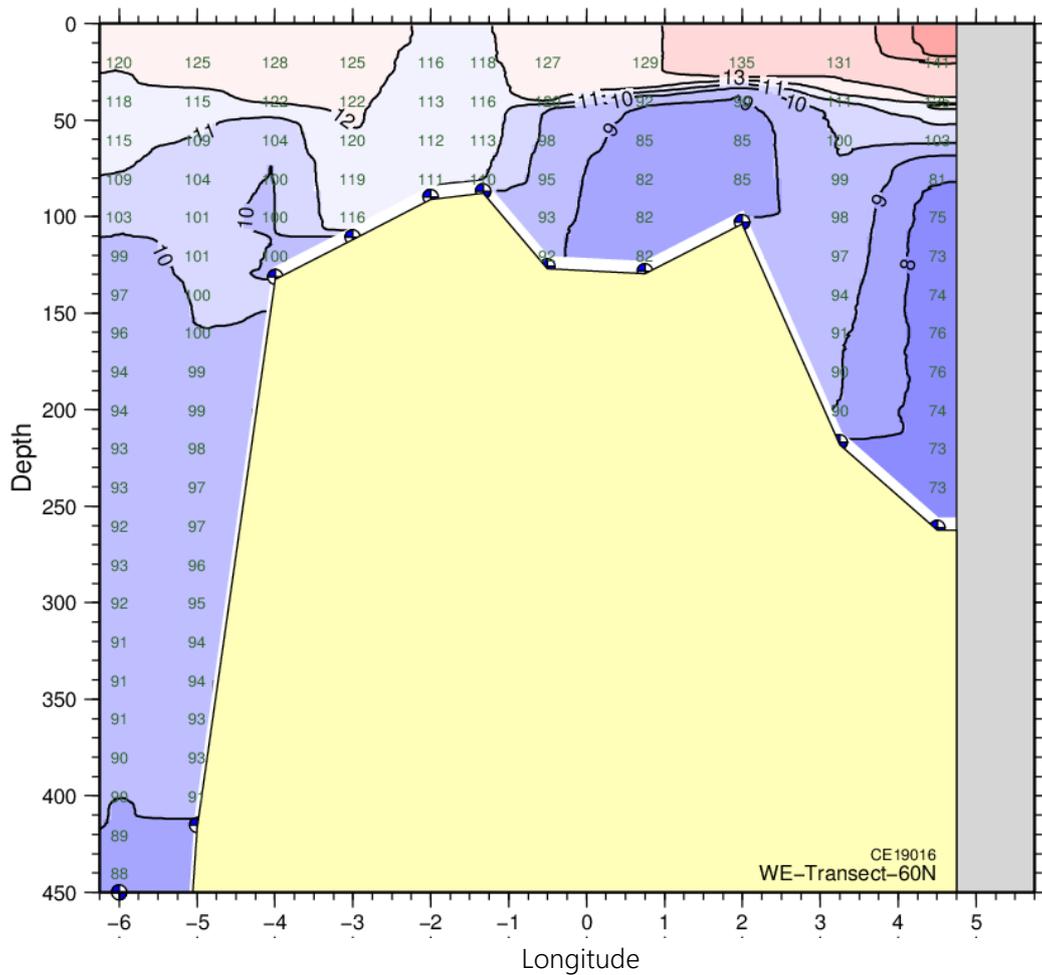


Abb. 4c: Vertikale Temperaturverteilung (°C) entlang des 60°N Schnittes im Sommer 2019. Die Die vertikalen Zahlenreihen zeigen die Temperatur × 10 für ausgewählte Datenpunkte.

Fig. 4c: Vertical temperature distribution (°C) along the 60°N sections, summer 2019. The vertical number columns in the section give temperatures × 10 for selected data points.

3.5.3.2 Gesamt-Wärmeinhalt der Nordsee im den Sommern 2018 und 2019

Die Tabelle 2 und Abb. 5 zeigen den Gesamt-Wärmeinhalt (THC, Total Heat Content) der Nordsee für die Jahre 1999-2019. Die Tabelle zeigt zusätzlich die bzgl. der Referenzperiode normierten Anomalien des THC. Dabei ist zu beachten, dass einige Reisen vor dem Erreichen des Wärmemaximums durchgeführt wurden, insbesondere die Jahre 1999 und 2002. In 2018 fiel der THC gegenüber dem Vorjahr geringfügig ab und lag mit 1.650×10^{21} J 0.2 Standardabweichungen über dem Mittelwert der Referenzperiode (1.631×10^{21} J). In 2019 stieg der Wärmeinhalt wieder an und lag mit 1.707×10^{21} J knapp 0.9 Standardabweichungen über dem Referenzwert.

date of cruise	mid-term of survey	THC [$\times 10^{21}$ J]	ΔH [std dev]	VT [$^{\circ}$ C]	summer SST [$^{\circ}$ C]
02.07.1999 - 22.07.1999	09.07.1999	1.427	-2.38	9.4	15.8
09.08.2000 - 23.08.2000	06.08.2000	1.603	-0.33	10.5	14.4
11.07.2001 - 02.08.2001	27.07.2001	1.438	-2.25	9.4	15.2
16.07.2002 - 31.07.2002	25.07.2002	1.587	-0.52	10.4	16.2
28.07.2003 - 13.08.2003	04.08.2003	1.707	0.88	11.2	16.4
05.08.2004 - 20.08.2004	12.08.2004	1.692	0.71	11.1	15.6
10.08.2005 - 29.08.2005	20.08.2005	1.624	0.08	10.7	14.9
02.08.2006 - 20.08.2006	11.08.2006	1.619	-0.14	10.6	16.4
03.08.2007 - 17.08.2007	10.08.2007	1.659	0.32	10.9	14.9
21.07.2008 - 05.08.2008	29.07.2008	1.583	-0.56	10.4	15.4
20.08.2009 - 09.09.2009	29.08.2009	1.755	1.44	11.5	15.6
04.08.2010 - 24.08.2010	13.08.2010	1.632	0.01	10.7	15.2
08.08.2011 - 28.08.2011	17.08.2011	1.669	0.44	11.0	14.9
07.08.2012 - 26.08.2012	16.08.2012	1.695	0.47	11.1	15.0
10.08.2013 - 31.08.2013	21.08.2013	1.627	-0.05	10.7	15.3
02.08.2014 - 21.08.2014	12.08.2014	1.740	1.27	11.4	16.1
08.08.2015 - 26.08.2015	18.08.2015	1.663	0.37	10.9	14.8
04.08.2015 - 23.08.2016	14.08.2016	1.652	0.24	10.9	15.8
12.08.2017 - 30.08.2017	20.08.2017	1.677	0.53	11.0	15.4
29.08.2018 - 10.09.2018	05.09.2018	1.650	0.22	10.6	16.1
27.08.2019 - 14.09.2019	04.09.2019	1.707	0.88	11.2	15.5
10 year average 2000-2010 (without 2002) ± standard deviation		1.631±0.086	-	10.70±0.57	15.4±0.64

Tabelle 2: Gesamt-Wärmeinhalt (THC) und mittlere Volumentemperatur (VT) der Nordsee basierend auf den Daten der Sommeraufnahmen, sowie Nordsee Sommer SST (JAS). ΔH = Normierte Anomalie (Differenz zur Referenzperiode in Standardabweichungen).

Table 2: Total heat content (THC) and mean volume temperature (VT) of the North Sea, data from summer cruises and North Sea summer SST (JAS). ΔH = normalized anomaly (difference to reference period in standard deviations).

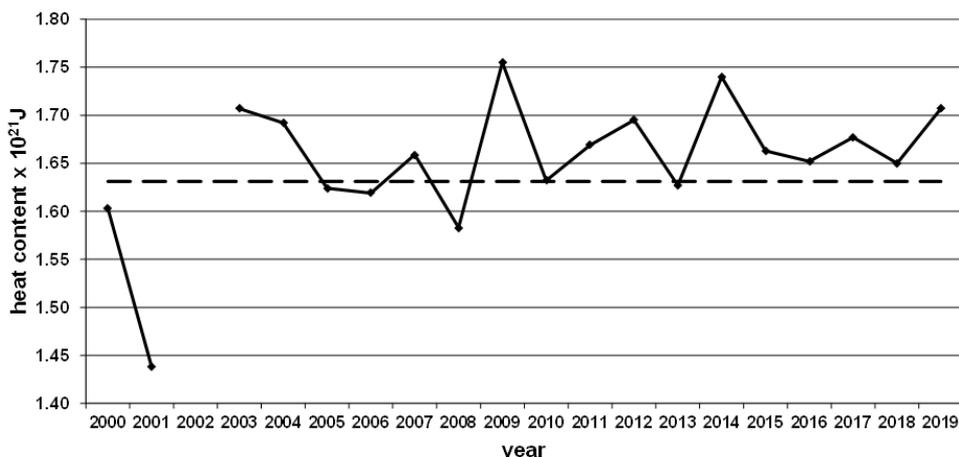


Abb. 5: Gesamt Wärmeinhalt der Nordsee im Sommer in 10^{21} J von 2000 bis 2019 (ohne 2002). Gestrichelte Linie: Mittelwert der Referenzperiode 2000-2010 ($1.631 \pm 0.086 \times 10^{21}$ J) basierend auf den Daten der Sommeraufnahmen.

Fig. 5: Total heat content in 10^{21} J from 2000 to 2019 (without 2002). Broken line: mean of reference period 2000-2010 ($1.631 \pm 0.086 \times 10^{21}$ J) based on summer cruise data.

3.5.3.3 Der Jahresgang der Temperatur am Feuerschiff Deutsche Bucht

Die Temperaturbedingungen in der Deutschen Bucht werden exemplarisch anhand der Aufzeichnungen der MARNET-Station auf dem unbemannten Feuerschiff *Deutsche Bucht* (UFS DB, 54° 10' N; 7° 27' E, Wassertiefe 38 m) in 3 – 30 m Messtiefe dokumentiert. Lücken in den Aufzeichnungen entstehen u.a. durch technische Probleme, Bewuchs der Sensoren (Biofouling) oder Instandhaltungsarbeiten (Wertzeiten). Die horizontalen getrichelten Linien in der Abbildung markieren das klimatologische saisonale Mini- und Maximum der Oberflächentemperatur, basierend auf der Klimatologie von Janssen et al. (1999) mit einer Spannweite des Jahresgangs von etwa 13.5 K. Generell baut sich die thermische Schichtung zwischen Ende März und Anfang Mai auf und dauert bis Ende August oder Mitte September, wenn die Schichtung durch die Herbst- und Winterstürme bis zum nächsten Frühjahr aufgebrochen wird.

Das saisonale Temperaturminimum trat in 2018 Mitte März auf und erreichte infolge der starken Abkühlung Ende Februar/Anfang März erstmalig nach dem Winter 2012/2013 wieder das klimatologische saisonale Minimum (Abb.6). Etwa zwei Monate nach Beginn der saisonalen Erwärmung wurde das Feuerschiff für zwei Monate zu Wartungsarbeiten eingezogen. Das auf gleicher Breite ca. 40 sm westlich liegende Feuerschiff Ems zeigte Mitte Mai eine kurzzeitige thermische Schichtung mit einer Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Boden von 5 K. Dann brach die Schichtung zusammen, baute sich aber anschließend sofort wieder auf und erreichte Anfang Juni eine Temperaturdifferenz von 8 K. Anfang Juli nahm das Feuerschiff Deutsche Bucht seine Messungen wieder auf. Zu diesem Zeitpunkt hatte sich bereits eine stabile Schichtung aufgebaut, die Anfang August mit einer Temperaturdifferenz von 9 K und mit Oberflächentemperaturen von über 22 °C ihr Maximum erreichte. Etwa ab der zweiten Septemberwoche war die Nordsee am Feuerschiff Deutsche Bucht wieder thermisch homogen durchmischt.

Das Winterminimum 2018/2019 lag mit 1.5 K wieder deutlich über dem klimatologischen saisonalen Minimum. Der Aufbau der thermischen Schichtung begann Ende April und endete in der letzten Augustwoche. Die Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Boden erreichte mit 5 K Anfang Juni ihr Maximum. Zwischenzeitlich kam es infolge von Starkwindereignissen zu kurzzeitigen Zusammenbrüchen der thermischen Schichtung. Von Anfang September an war die Nordsee am Feuerschiff Deutsche Bucht wieder thermisch homogen durchmischt.

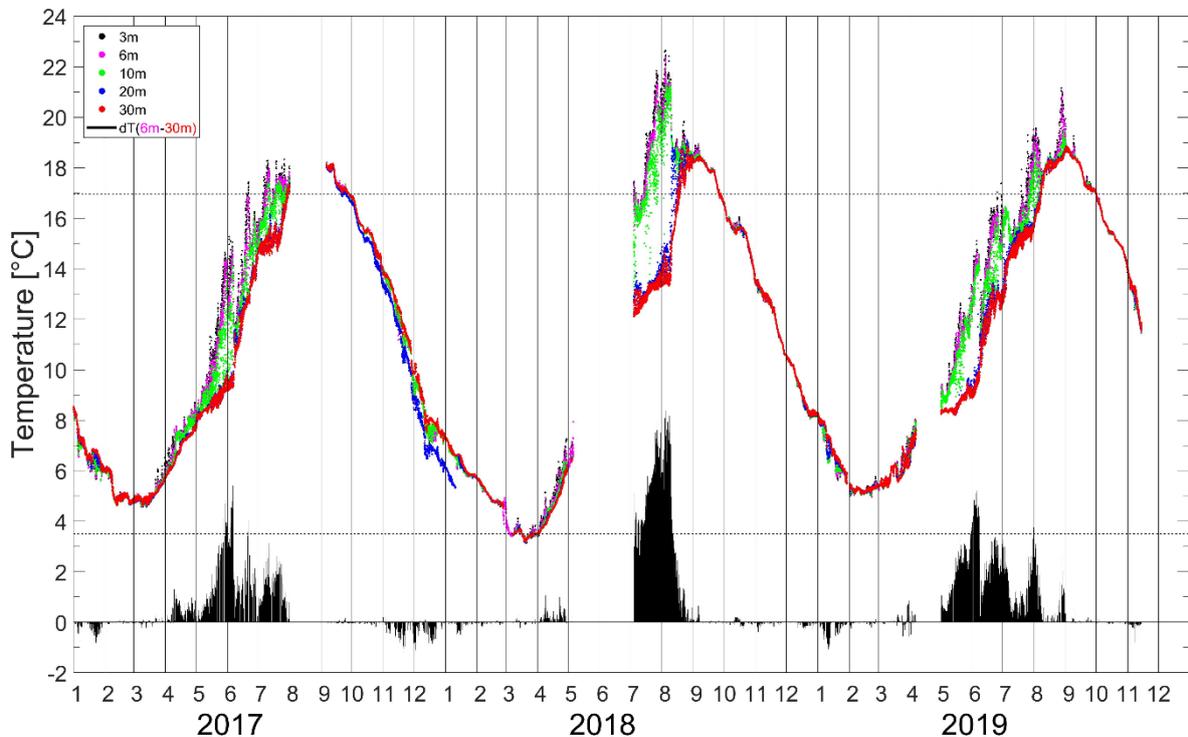


Abb. 6: Temperaturverlauf am an der MARNET-Station Deutsche Bucht in 3, 6, 10, 20 und 30 m Tiefe. In unteren Bereich ist die Temperaturdifferenz ΔT Oberfläche minus Boden dargestellt. Die gestrichelten Linien markieren die Lage des saisonalen klimatologischen Mini- und Maximums in der Oberflächenschicht nach Janssen et al., 1999.

Fig. 6: Temperature time series at MARNET station German Bight in 3, 6, 10, 20 and 30 m depth. The lower part of the diagram shows the temperature difference ΔT surface minus bottom. The broken lines give the climatological seasonal mini- and maximum for the surface layer according to Janssen et al., 1999.

Literatur

Janssen F., C. Schrum and J.O. Backhaus, 1999: A Climatological Data Set of Temperature and Salinity for the Baltic Sea and the North Sea, *German Journal of Hydrography*, Supplement 9, 245pp.

Weitere Informationen zu diesem Thema finden sich unter:

https://www.bsh.de/DE/DATEN/Meerestemperaturen/meerestemperaturen_node.html

Aktuelle Werte zu dem Messungen am Feuerschiff Deutsche Bucht finden sich unter:

https://www.bsh.de/DE/DATEN/Meeresumweltsmessnetz/_Module/Stationen_mit_Frame/debu_extern_node.html

Bei Fragen oder Datenanforderungen wenden Sie sich bitte an **Holger Klein**, Telefon 040 3190 – 3220; holger.klein@bsh.de

Stand: 08.05.2020, Datei: 3-5-3-T-Schichtung&Waerme-2018&2019.docx