

Sopot, 28 lutego 2024 r.

Prof. dr hab. Jacek Piskozub
Instytut Oceanologii PAN w Sopocie
ul. Powstańców Warszawy 55
81-712 Sopot Poland

**Opinia dotycząca efektów zastosowania obiegu otwartego i wynikającego z tego zrzutu wód
pochłodniczych do morza w planowanej Elektrowni Jądrowej o mocy elektrycznej do
3 750 MWe, na obszarze gminy Choczewo.**

Niniejsza opinia oparta jest na moim doświadczeniu zawodowym wieloletniego pracownika i kierownika Pracowni Wzajemnego Oddziaływania Morza i Atmosfery oraz kierownika Zakładu Dynamiki Morza w Instytucie Oceanologii PAN w Sopocie. Byłem autorem i współautorem szeregu prac na temat tegoż oddziaływania (którego częścią jest właśnie transfer ciepła przez powierzchnię morza, w tym także rozdziału przeglądowego obejmującą stan wiedzy na ten temat (Garbe i inni 2014)¹. Na temat wpływu zrzutu do morza wód pochłodniczych przez planowaną elektrownię jądrową wypowiadałem się już wcześniej w mowie i piśmie. Niniejsza opinia jest rozszerzeniem wcześniejszych moich wypowiedzi, wykorzystująca algorytm obliczeń strumieni ciepła przez powierzchnię morza, jednak dla większego strumienia ciepła bardziej zgodnego z wartością używaną w Raporcie o oddziaływaniu na środowisko przedsięwzięcia polegającego na budowie i eksploatacji pierwszej w Polsce Elektrowni Jądrowej o mocy elektrycznej do 3 750 MWe, na obszarze gmin: Choczewo lub Gniewino i Krokowa wraz z aneksami dalej Raport). (większym).

Planowana elektrownia jądrowa, według Raportu, ma mieć elektryczną moc nominalną 3.750 MWe. Wydajność energetyczna (stosunek mocy cieplnej do produkowanej mocy elektrycznej to według strony producenta 32% dla reaktora AP1000². Oznaczałoby to konieczność zrzutu do 5.500 MW ciepła ($3.750 \text{ MW} / (1 - 0.32)$). Jednak Raport wymienia też większą ilość ciepła na sekundę, nawet

-
- 1 Garbe C.S., Rutgersson A., Boutin J., de Leeuw G., Delille B., Fairall C.W., Gruber N., Hare J., Ho D.T., Johnson M.T., Nightingale P.D., Pettersson H. Piskozub J., Sahlee E., Tsai W.T., Ward B., Woolf D.K., Zappa C.J., Transfer Across the Air-Sea Interface, 2014, in Ocean-Atmosphere Interactions of Gases and Particles, ed. By Liss P.S and Johnson M.T, Springer, pages 55-112, https://doi.org/10.1007/978-3-642-25643-1_2
 - 2 <https://www.westinghousenuclear.com/energy-systems/ap1000-pwr/overview> (strona ta podaje moc elektryczną 1.100 Mwe przy mocy termicznej 3.415 Mwt co odpowiada właśnie 32% wydajności)

ponad 7.000 MW. Ponieważ wg różnych dostępnych mi informacji inwestora maksymalny zrzut ma obejmować 150 do 200 m³/s wody podgrzanej o nie więcej niż 10 °C, co wobec pojemności cieplnej wody wynoszącej 4,18 kJ/kgK jest w pełni wykonalne gdyż moc termiczna konieczna do jej podgrzania o 10 °C to od 6.270 do 8.360 MW (iloczyn pojemności cieplnej, objętości wody i różnicy temperatur). Ze względu na to, że prawdziwa moc elektrowni jest mniejsza niż nominalna, oraz ciepło może być tracone w innych częściach elektrowni, w niniejszej ekspertyzie przyjmę okrągłą wartość mocy (strumienia ciepła) 7.000 MW (czyli 7 GW) jako strumień ciepła odprowadzanego do morza³. Jeśli powyższe zgrubne szacunki wymagają korekty (nie wiem jaką dokładnie wartość zakłada inwestor), fakt że strumień ciepła przez powierzchnię morza jest prawie liniowo zależny od temperatury (wyjątkiem są strumienie radiacyjne), powoduje, że łatwo można przeliczyć uzyskane przeze mnie wyniki do innej mocy termicznej.

Wymiana ciepła przez powierzchnię morza ma kluczowe znaczenie dla rozprzestrzeniania się ciepła pochłodniczego (odpadowego) produkowanego przez elektrownię i odprowadzanego do morza w obiegu otwartym, gdy reaktor elektrowni chłodzony jest wodą morską (niezależnie od typu stosowanie wymienników ciepła). Model cyrkulacji użyty w Raporcie obliczał rozprzestrzenianie się ciepła w morzu i zapewne jego transfer przez powierzchni morza (nie dysponuję kluczowymi szczegółami o parametrach użytych w modelowaniu, w tym dotyczących powierzchni morza). Jednak niezależnie od tego jak ciepło rozprzestrzenia się w wodzie, w wypadku długotrwałej (czyli normalnej) pracy elektrowni, tyle samo ciepła ile dostarczane jest przez nią do wód morskich, musi przeniknąć do atmosfery (założenie o stanie stacjonarnym). Ponieważ efektywność tego transferu zależy od różnicy temperatur woda-powietrze (dla strumieni turbulentnych) i temperatury wody (dla radiacyjnych), wielkość i temperatura „plamy” ciepła na powierzchni morza spowodowanej zrzutem ciepłej wody musi być zgodna z tym założeniem, czyli musi pozwalać na oddanie atmosferze ilości ciepła dostarczonej przez elektrownię do wód morskich. Innymi słowy przekazywanie ciepła przez powierzchnię morza jest warunkiem brzegowym tego problemu, co umożliwia oszacowanie realności wyników uzyskanych przy pomocy modelu cyrkulacji bez konieczności powtarzania modelowania (tzw. „sanity check”⁴). Niniejsza ekspertyza jest właśnie tego typu sprawdzeniem wyników modelowania zawartych w Raporcie (Rys. 1).

3 W ekspertyzie sporządzonej wcześniej dla urzędu Marszałkowskiego przyjąłem bardziej konserwatywną wartość 5 GW ale późniejsze rozmowy z wykonawcami modelowania z IBW PAN przekonały mnie, że oni także stosowali wartość rzędu 7 GW.

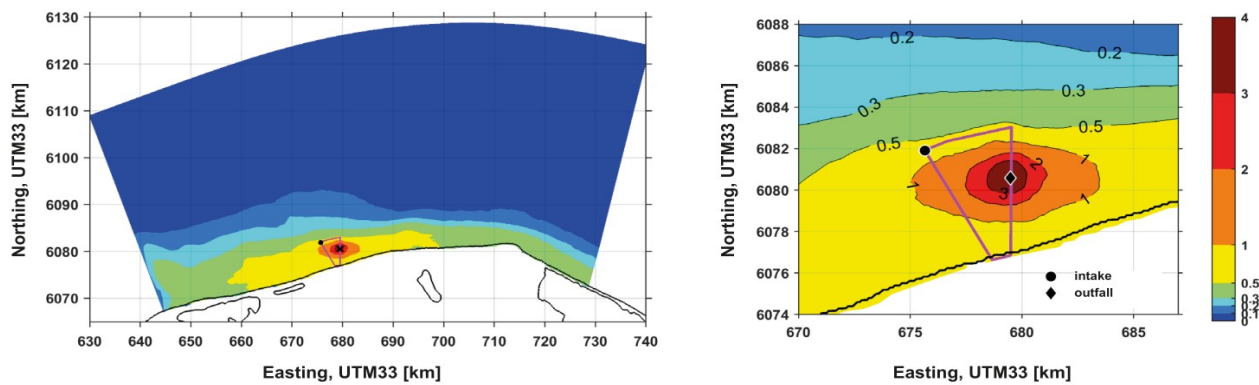
4 https://pl.wikipedia.org/wiki/Sanity_test

Wymiana ciepła przez powierzchnię morza jest skomplikowanym procesem, obejmującym wymianę ciepła wyczuwalnego (związanym z różnicą temperatur między powierzchnią morza i najniższą (przypowierzchniową) warstwą atmosfery, ciepła utajonego (czyli praktycznie ciepła związanego z parowaniem powierzchni morza) oraz procesami radiacyjnymi (absorbpcją i emisją promieniowania elektromagnetycznego, głównie w zakresie widzialnym i w podczerwieni, przez powierzchnię morza). Dwa pierwsze procesy nazywane są strumieniami turbulentnymi, gdyż napędzane są ruchami turbulentnymi w atmosferze i wodach morskich. Te trzy procesy w pełni opisują wymianę ciepła przez powierzchnię morza, w tym sensie że wszystkie inne (np. dyfuzyjna wymiana ciepła) są do zaniedbania praktycznie w każdych warunkach występujących na morzu.

a)

FIGURE 6.

Temperature anomaly (°C) on the sea surface, 98th percentile - summer

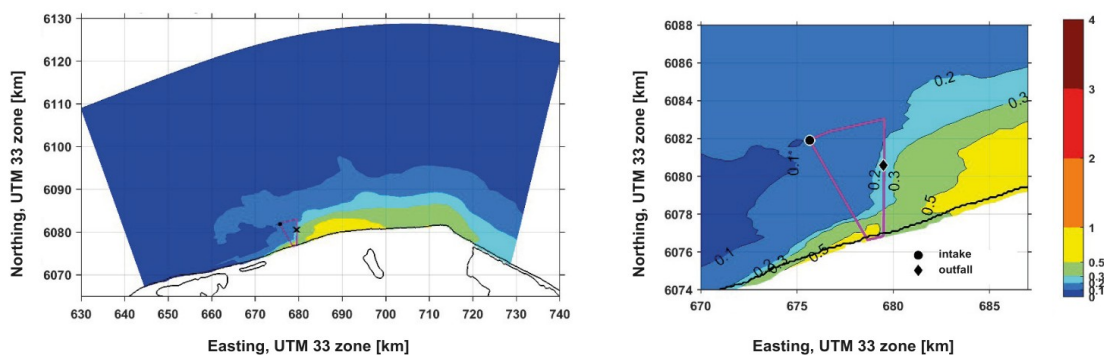


Source: Marine Hydrodynamics and Water Quality, Jacobs Clean Energy Limited (2021).

b)

FIGURE 16.

Temperature anomaly (°C) on the sea surface, 98th percentile - winter



Source: Marine Hydrodynamics and Water Quality, Jacobs Clean Energy Limited (2021).

Rys 1. Największe letnie (a) oraz zimowe (b) anomalie temperatury spowodowane przez chłodzenie elektrowni wodą z Bałtyku (dokładniej wartości anomalii jakie nie są przekroczone 98% czasu w badanym okresie).

Strumienie turbulentne ciepła poprzez powierzchnię są niezwykle skomplikowanymi zjawiskami, zależnymi od wielu parametrów takich jak fale powierzchniowe, stabilność atmosfery i słupa wody itp. Dlatego w praktyce używa się przybliżonych wzorów („*bulk formulas*”), zwykle parametryzowane prędkością wiatru na wysokości 10 metrów nad powierzchnią morza U_{10} , wartością znacznie łatwiej mierzalną niż parametry falowania. Uzasadnione jest to tym iż wiatr stanowi źródło energii tegoż falowania, a także turbulencji w przypowierzchniowych warstwach atmosfery i morza. Najczęściej stosuje się wersję wzorów pochodzących z eksperymentu COARE (Fairall i inni, 1996⁵), z jedynie niewielkimi poprawkami wartości parametrów w nich stosowanych. W tym podejściu strumienie ciepła wyczuwalnego Q_S i utajonego Q_E parametryzuje się następująco:

$$Q_S = \rho c_p C_S U_{10} (T_w - T_a) \quad (1)$$

$$Q_E = \rho l C_E U_{10} (q_s - q_a) \quad (2)$$

gdzie ρ to gęstość powietrza (zależna od zawartości pary wodnej i ciśnienia, tu przyjęto⁶ 1.29 kg/m^3), c_p to ciepło właściwe powietrza ($1,005 \cdot 10^3 \text{ J / kg K}$), l to ciepło parowania wody ($2,45 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$), natomiast C_S i C_E to współczynniki transferu, będące wolno zmiennymi funkcjami prędkości wiatru, w związku z tym używane w niniejszej ekspertyzie jako stałe o wartości 0.00175 (podobnie jak np. w pracy Faulkner i inni⁷, 2021 przedstawiającej podobną analizę dla plamy ciepła produkowanej przez elektrownie Heysham w Wielkiej Brytanii). Zmienne T_s i q_s oznaczają temperaturę powierzchniową morza i wilgotność właściwą (stosunek masy pary wodnej do masy powietrza) tuż nad powierzchnią, natomiast T_a i q_a na wysokości 10 m nad poziomem morza. Wilgotności względne przy powierzchni morza przyjmuje się zwykle jako 98% wartości nasycenia parą wodną dla danej temperatury powierzchni morza. Ciśnienie nasycenia pary wodnej liczone było z wzoru na ciśnienie nasycenia pary wodnej z pracy Huang (2018)⁸, uwzględniając fakt, że masa molowa pary wodnej to 0,622 średniej masy molowej suchej atmosfery.

5 Fairall C.W., Bradley E.F., Rogers D.P., Edson J.P., Young G.C., 1996, Bulk parameterization of air-sea fluxes for Tropical Ocean-Global Atmosphere Coupled-Ocean Atmosphere Response Experiment, JGR, 101 (C2), 3747-3764

6 W przypadku gdy parametry obliczeń charakteryzują się pewną zmiennością w zakresie istotnym dla ekspertyzy, przyjmowałem wartość, która raczej minimalnie zawyży, niż zaniży obliczone wartości strumieni.

7 Faulkner A., Bulgin C.E., Merchant C.J, 2021, Characterising industrial thermal plumes in coastal regions using 3-D numerical simulations, Environ. Res. Commun. 3, 045003, <https://doi.org/10.1088/2515-7620/abf62e>

8 Huang J., 2018, A Simple Accurate Formula for Calculating Saturation Vapor Pressure of Water and Ice, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1265-1272, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0334.1>

Ponieważ wzory (1) i (2) są liniowe względem temperatury, dodatkowe turbulентne strumienie ciepła przez powierzchnię morza dla podwyższonej temperatury wody T_w i spowodowanej tym wilgotności względnej przy powierzchni q_w ma wartości:

$$\Delta Q_S = \rho c_p C_S U_{10} (T_w - T_a) - \rho c_p C_S U_{10} (T_s - T_a) = \rho c_p C_S U_{10} (T_w - T_s) \quad (3)$$

oraz

$$\Delta Q_E = \rho l C_E U_{10} (q_w - q_a) - \rho l C_E U_{10} (q_s - q_a) = \rho l C_E U_{10} (q_w - q_s) \quad (4)$$

czyli nie zależą od temperatury i wilgotności względnej atmosfery T_a i q_a .

Podobnie w przypadku strumienia energii radiacyjnej, podgrzanie wody morskiej nie zmienia padającego na powierzchnię strumienia promieniowania krótkofalowego (pochodzącego ze słońca, głównie w paśmie widzialnym), ani też padającego na powierzchnię strumienia długofalowego (promieniowania termicznego atmosfery, głównie w dalekiej podczerwieni). Jedynym strumieniem ulegającym zmianie jest ciepło termiczne wypromieniowywane przez morze. Jego wartość dla powierzchni o temperaturze T oblicza się z prawa Stefana-Boltzmann'a:

$$Q_R = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (5)$$

gdzie ϵ to efektywna emisyjność danego ciała (dla powierzchni morza w zakresie długofalowym zbliżona do ciała doskonale czarnego, dla którego prawdziwe jest $\epsilon = 1$), zaś σ to stała Stefana Boltzmana, równa $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W / m}^2 \text{ K}^4$. Podgrzanie temperatury powierzchni morza od temperatury T_s do temperatury T_w powoduje zatem wzrost strumienia emisji długofalowej ΔQ_R :

$$\Delta Q_R = \epsilon \sigma (T_w^4 - T_s^4) \quad (6)$$

Równania 3, 4 i 6 pozwalają na obliczenie dodatkowego strumienia ciepła z morza do atmosfery spowodowanego ogrzaniem wód morskich przez wody pochłonicze z elektrowni ΔQ , dla danej wartości temperatury powierzchniowej wody T_s , przed jej podgrzaniem, różnicy temperatur $\Delta T = T_w - T_s$ spowodowanej obecnością wód pochłoniczych oraz prędkości wiatru U_{10} :

$$\Delta Q = \Delta Q_S + \Delta Q_E + \Delta Q_R \quad (7)$$

Należy przy tym pamiętać, że wzory (1) i (2) to formuły pół-empiryczne, opracowane na podstawie danych z pełnego morza, zatem w pobliżu brzegu, przy wietrze od lądu, będą one zawyżały prawdziwe strumienie, gdyż pole fal powodujących turbulencję w toni wodnej nie zdąży się jeszcze rozwinąć. Celem niniejszej ekspertyzy jest oszacowanie maksymalnego dodatkowego strumienia ciepła do atmosfery spowodowanego istnieniem plamy wód pochłódniczych, zatem pewne zawyżenie strumieni nie jest tu problemem.

Analogicznie do sytuacji letniej i zimowej w wynikach modelowania z Raportu (Rys. 1), przedstawiam wyniki obliczeń ΔQ dla dla dwóch temperatur powierzchni morza 20 °C (Tabela I) oraz 0 °C (Tabela II), w funkcji różnicy (anomalia) temperatur ΔT i prędkości wiatru U_{10} .

Tabela I. Wartości anomalii strumienia ciepła morze-atmosfera ΔQ [W/m²] dla temperatury powierzchni morza 20 °C w funkcji prędkości wiatru U_{10} oraz anomalii temperatury powierzchniowej ΔT .

	0 m/s	2,5 m/s	5 m/s	7.5 m/s	10 m/s	15 m/s	20 m/s	30 m/s
0,1 °C	0,39	2,24	4,10	5,95	7,81	11,5	15,2	22,7
0,3 °C	1,16	6,75	12,3	17,9	23,5	34,7	45,9	68,2
1 °C	3,88	22,8	41,7	60,6	79,5	117	155	231
2 °C	7,80	46,3	84,9	124	162	239	316	471
5 °C	19,8	122	225	328	430	636	841	1250
10 °C	40,9	270	449	729	958	1420	1870	2790

Tabela II. Wartości anomalii strumienia ciepła morze-atmosfera ΔQ [W/m²] dla temperatury powierzchni morza 0 °C w funkcji prędkości wiatru U_{10} oraz anomalii temperatury powierzchniowej ΔT .

	0 m/s	2,5 m/s	5 m/s	7.5 m/s	10 m/s	15 m/s	20 m/s	30 m/s
0,1 °C	0,30	1,25	2,20	3,15	4,10	6,00	7,89	11,7
0,3 °C	0,91	3,76	6,62	9,47	12,3	18,0	23,7	35,2
1 °C	3,04	12,6	22,2	31,9	41,4	60,7	79,9	118
2 °C	6,12	25,6	45,1	64,5	84,0	123	162	240
5 °C	15,6	66,4	117	168	219	320	422	625
10 °C	32,2	142	252	362	472	692	911	1350

Wartość turbulentnego strumienia ciepła przez powierzchnię morza jest liniowo zależna od prędkości wiatru (z dokładnością do przybliżenia zawartego w „*bulk formulas*”), a strumienia radiacyjnego jest niezależna od siły wiatru. Oznacza to, że do oceny średniej wartości tego strumienia w danym miesiącu można stosować średnie miesięczne prędkości wiatru. Nie udało mi się znaleźć ich wartości dla stacji typowo morskich bliższych niż Hel. Jednak różnica nie powinna być duża. Na Helu średnia wartość tej prędkości dla stycznia i lipca⁹ to odpowiednio 7,58 m/s oraz 5,00 m/s, co odpowiada prawie dokładnie czwartej i trzeciej kolumnie w Tabeli I i II.

W celu sprawdzenia czy wyniki modelowania przedstawione w Raporcie są fizycznie realistyczne, przeprowadziłem obliczenia dla smugi termicznej („*thermal plume*”) odpowiadającej wynikom pokazanych na Rys. 1. Ponieważ rysunek ten przedstawia 98% percentyl anomalii temperatury powierzchni morza, tylko w 2% przypadków smugi mogą być dłuższe i intensywniejsze niż wskazują linie jednakowej temperatury na rysunku. Jest on rezultatem porównania wszystkich wymodelowanych smug, jednak rzeczywista smuga w danym momencie rozprzestrzenia się zazwyczaj w jednym kierunku, w wyniku działania wiatru i prądu morskiego. W badanym rejonie jest to zazwyczaj ruch w kierunku wschodnim, szczególnie zimą gdy wiatry są silniejsze (widać to doskonale w wynikach Raportu z Rys. 1).

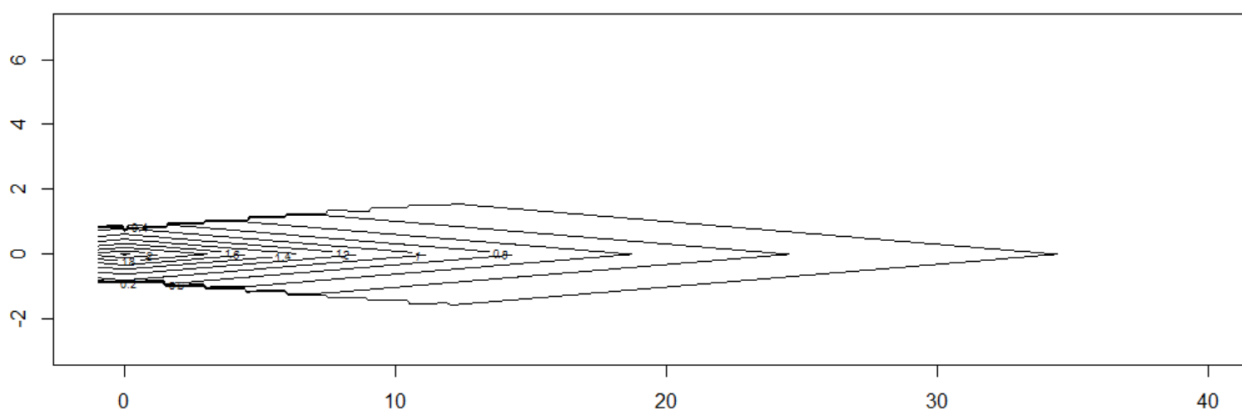
Przyjąłem zatem że największa pod względem rozległości i intensywności smuga powinna mieć wartość anomalii 2 °C w odległości 800 m od punktu emisji oraz 0,3 °C w odległości 30 km. Większe smugi nie byłyby zgodne z wynikami Raportu (zimą nawet ta jest zbyt intensywna – patrz Rys 1b¹⁰). Smuga jaką modelowałem jest iloczynem dwóch funkcji wykładniczych:

$$\Delta T(x, y) = 2.25 \exp(-0.07|x|) \exp(-1.0|y|) \quad (8)$$

przyciętych dodatkowo warunkiem granicznym aby smuga nie była szersza niż 1,6 km w miejscu emisji i 5.6 km 30 km w dół prądu. Smuga rozciąga się również kilometr pod prąd dla uwzględnienia możliwych efektów rozprzestrzeniania się wpompowywanych 150 m³ wody wokół miejsca emisji. Rysunek 2 przedstawia kształt i intensywność tej modelowej smugi termicznej.

9 Dane za stroną <https://pl.weatherspark.com/y/84132/%C5%9Arednie-warunki-pogodowe-w:-Hel-Polska-w-ci-%C4%85gu-roku>

10 Porównanie samego Raportu i jego angielskiego streszczenia zdaje się świadczyć, że Rys 1a i 1b są pomyłone w angielskim streszczeniu. Jest to prawdopodobne, gdyż moje wyniki pokazują, że smuga powinna być bardziej rozległa i intensywna zimą, lecz nie wpływa w żaden sposób na konkluzje niniejszego raportu (obliczone przeze mnie wartości wynikają jedynie z wartości wiatrów i temperatur typowych dla zimy i lata, a kształt smugi jaki przyjąłem pasuje do tej pory roku, dla której w wynikach Raportu jest ona rozleglejsza – w celu znalezienia górnego ograniczenia wyliczanej przeze mnie wartości.



Rys2. Kształt i intensywność modelowej smugi termicznej. Odległości na osiach to wartości w kilometrach. Izolinie przedstawiają wielkość anomalii termicznej co 0,2 °C.

Smuga ta ma kształt typowych smug rozprzestrzenianiu się zanieczyszczeń w morzu, początkowo rozszerzająca się w wyniku mieszania turbulentnego, a następnie „optycznie” zwężająca się w wyniku coraz mniejszego stężenia zanieczyszczenia (w tym wypadku reprezentowanego przez anomalię temperatury). Podobnie jak w przypadku prawdziwej smugi, po prawej stronie wykresu jej szerokość jest coraz większa ale tak jak w wypadku rzeczywistych smug, w pewnej odległości od źródła stają się one niewidoczne (niemierzalne) z powodu spadku wartości anomalii poniżej naturalną wielkość zmienności przestrzennej danego parametru.

Dla smugi z Rys. 2 przyjąłem wartości temperatury 20 °C dla lata i 0 °C dla zimy oraz wartości wiatru odpowiednio 5 m/s i 7,58 m/s. Strumień ciepła przez powierzchnię liczony był zgodnie z wzorem (7) i sumowany w ramach domeny przedstawionej na Rys 2. (jej powiększanie w kierunku rozprzestrzeniania się smugi powodowało zmianę sumarycznego strumienia zaledwie o kilka procent, co świadczy o tym, że jej kształt nie wpływał na wynik w znaczącym stopniu). W przypadku lata sumaryczny strumień ciepła przepływający z morza do atmosfery w wyniku istnienia smugi termicznej wyniósł 2.0 GW, a wypadku zimy 1.5 GW. Oznacza to, że modelowana przeze mnie smuga, zgodna z wynikami modelowania z Raportu, jest w stanie oddać do atmosfery jedynie ok. 30% ilości ciepła (dla założonej jej wartości 7 GW) zrucanej do morza w warunkach letnich i ok. 20% w warunkach zimowych¹¹. W praktyce należy spodziewać się, że część energii cieplnej dostarczonej morzu rozprzestrzeni się poza obszar wykrywalnej smugi, jednak fakt, że anomalia temperatury poza „widzialną” smugą jest z definicji bardzo mała, efektywność oddawania ciepła poza nią jest niewielka. Fakt słabej zależności otrzymanego przeze mnie wyniku od wielkości domeny potwierdza ten wniosek.

¹¹ Dla wartości strumienia ciepła odpadowego wynoszącej 5 GW, byłyby to odpowiednio ok. 40% i 30%.

Zatem należy konkludować, że wyniki przedstawione w Raporcie są fizycznie niemożliwe. W celu oddania do atmosfery 5-7 GW ciepła, smuga musi być albo znacznie rozleglejsza albo mieć znacznie większą anomalię temperatury w pobliżu miejsca zrzutu.

Dodatkowego potwierdzenia tego wniosku dostarcza literatura. Rzeczywiste mierzalne smugi są rozleglejsze i bardziej intensywne nawet dla elektrowni o mniejszej mocy niż planowana w lokalizacji Lubiato-Kopalino. Na przykład praca Laguna-Zarate i inni (2021)¹², pokazuje, że zarówno obserwowane jak i modelowane smugi dla elektrowni Laguna Verde w Meksyku, o mocy 1620 Mwe, czyli ponad dwukrotnie mniejszej (dokładniej 43%) są znacznie intensywniejsze i anomalie temperatur wynoszą ponad 5 °C w odległości ponad kilometra od miejsca zrzutu i to pomimo, że różnica temperatury wody pobieranej i oddawanej wynosi tam, według danych z tej pracy, jedynie 7 °C. Autorzy tej pracy w konkluzjach zwracają uwagę, na to że jest to bardzo niekorzystnie i ujemnie wpływa na wydajność elektrowni (*This fact is highly undesirable because the power plant's performance is compromised.*).

Co istotne, sam inwestor przyznaje w „Wyjaśnieniach do raportu o oddziaływaniu na środowisko”, odpowiedzi na pismo Marszałka Województwa Pomorskiego z dnia 10 lipca 2023 r. znak: PBPR(G).7030.003.2023/ABS.312 iż (cytuje) „W przypadku fińskiej elektrowni Loviisa w okresie wegetacyjnym stwierdzono w odległości 1–2 km wynosił on 1-2,5°C (jako wzrost temperatury autor przyjmuje różnicę pomiędzy średnimi wartościami notowanymi na tych samych stacjach pomiarowych przed uruchomieniem elektrowni a stwierdzanymi w trakcie jej eksploatacji)”. Oznacza to, że średnia anomalia temperatury w przypadku fińskiej elektrowni jest większy niż prawie największe anomalie (percentyl 98%) wymodelowane dla planowanej elektrowni w Choczewie, która ma mieć moc ok. 3 razy większą. Uważam to za potwierdzenie mojej oceny że wymodelowana plama ciepła dla Choczewa jest co najmniej 3-4 razy za mała w sensie wartości anomalii scałkowanej po jej obszarze. Nie bez znaczenia jest fakt, że badania naukowe (Ilus i Keskitaklo, 2008)¹³ wykazały znaczący wzrost biomasy fitoplanktonu (w tym sinic) w rejonie elektrowni Loviisa, przypisany przez ich autorów głównie wzrostowi temperatury wywołanym zrzutem ciepła odpadowego tej elektrowni. Innymi słowy ta znacznie mniejsza elektrownia

12 Laguna-Zarate L., Barrios-Pina H., Ramirez-Leon H., Garcia-Diaz R., Becerril-Pina R., 2021, Analysis of Thermal Plume Dispersion into the Sea by Remote Sensing and Numerical Modeling, J. Mar. Sci. Eng., 9, 1437, <https://doi.org/10.3390/jmse9121437>

13 Ilus E., Keskitaklo J., 2008, the response of phytoplankton to increased temperature in the loviisa archipelago, Gulf of Finland, Boreal Environment Research, 13, 503-516.

nadbałtycka ma znaczący wpływ na środowisko okolicznych wód morskich¹⁴. Wypada tu też dodać, że elektrowni Loviisa, położonej znacznie bardziej na północ niż Choczewo, a zatem zrzucającej wody pochłonicze do średnio znacznie zimniejszych wód bałtyckich, zdarzył się wg informacji prasowych już co najmniej jeden epizod koniecznego zmniejszenia mocy ze względu na tzw. morską falę upałów w lipcu 2018¹⁵. W tym czasie najwyższa temperatura wody w Zatoce Fińskiej wynosiła 21,3 °C (Goebeler i inni, 2022)¹⁶, podczas gdy w rejonie południowego Bałtyku notowano już temperatury nawet 27 °C (Rutgersson i inni, 2022)¹⁷. Wystąpienie w badanym rejonie wody o temperaturze większej niż 25 °C może spowodować, konieczność zmniejszenia mocy elektrowni aby wody pochłonicze nie stały się cieplejsze niż 35 °C. Morskie fale upałów (okresy z temperaturą wody morskiej niespotykanej wysoką w porównaniu z typowymi wartościami) są coraz częstsze, również na Bałtyku, ze względu na postępujące globalne ocieplenie i należy spodziewać się, że w przyszłości ten problem będzie się nadal pogłębiał, ze szkodą nie tylko dla środowiska ale także braku możliwości legalnego zrzutu wód pochłoniętych w czasie ich występowania latem. Kwestia ta nie została wprost poruszona w raporcie wykonanym dla celów oceny środowiskowej, a moim zdaniem wymaga ona przeanalizowania

W tym miejscu pozwolę sobie na wysunięcie pewnych hipotez na temat przyczyn niezgodności wyników modelowania z Raportu z ograniczeniami fizycznymi związanymi z warunkami brzegowymi. W chwili pisania tego raportu nie znam szczegółowych parametrów używanych przy modelowaniu. Wiem jednak, że bardzo dużo zależy od założonych parametrów turbulentnego mieszania w morzu¹⁸. W ogólności są one bardzo zmienne w morzu, w czasie i przestrzeni, o ponad trzy rzędy wielkości, czyli ponad 1000 razy (patrz np. Rys 1 w pracy Moum, 2021)¹⁹, co powoduje dobrze znaną trudność z właściwym ustawieniem ich wartości w modelach cyrkulacji. W praktyce stosuje się tzw. *model tuning*, czyli ustawianie wartości tego typu parametrów tak długo aż wyniki modelowania zaczną wydajawać się ich autorom rozsądne fizycznie (w rozmowie z modelarzami z IBW PAN w sierpniu br. przyznali mi, że stosowali tuning tego rodzaju w modelowaniu plamy

14 Ocena wpływu wód pochłoniczych na ekosystem nie jest celem niniejszego raportu, jednak bogata literatura wsazuje na istotny wpływ temperatury na przykład na zakwity cyanobakterii (sinic), w ogólności ale także w szczególności w rejonie zrzutów wód pochłoniczych z elektrowni.

15 <https://phys.org/news/2018-07-algae-blooms-poland-baltic-sea.html>

16 Goebelker N., Norkko A., Norkko J., 2022, Ninety years of coastal monitoring reveals baseline and extreme ocean temperatures are increasing off the Finnish coast, *Communications Earth & Environment*, 3, art. no. 215, <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00545-z>

17 Rutgersson A., Kjellström E., Haapala J., Stendel M., Danilovich I., Drews M., Jylhä K., Kujala P., Larsén X. G., Halsnæs K., Lehtonen I., Luomaranta A., Nilsson E., Olsson T., Särkkä J., Tuomi L., Wasmund N., 2022, Natural hazards and extreme events in the Baltic Sea region, *Earth Syst. Dynam.*, 13, 251–301, <https://doi.org/10.5194/esd-13-251-2022>

18 Szczególnie współczynnika dyssypacji energii kinetycznej turbulencji, oznaczanego zwykle ϵ (epsilon).

19 Moum J.N., 2021, Variations in Ocean Mixing from Seconds to Years, *Annual Reviews*, 13, 201-226, <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-031920-122846>

ciepła planowanej elektrowni. Oznacza to brak gwarancji poprawności wyniku, nawet przy jak największych staraniach autorów modelowania, gdyż wynik ten będzie bardziej miarą ich oczekiwań niż rzeczywistości fizycznej. Badacze z IBW PAN znali wyniki modelowania wykonane wcześniej przez zagraniczną firmę na zamówienie inwestora i nie jestem zdziwiony, że zdołali uzyskać podobne wartości, których po prostu oczekiwali (taki jest w sumie cel „tuningu”). Jak wykazałem wyżej, są one prawdopodobnie co najmniej 3-4 razy za małe (w sensie skumulowanej po powierzchni wartości anomalii). Przy tak dużej niepewności co do wartości parametrów wejściowych modelu (współczynników mieszania), sądzę że niepewność wyniku wynosi co najmniej kilkaset procent (możliwy błąd modelowania jest kilka razy większy niż uzyskana wartość). Należy tu bardzo mocno podkreślić, że wartość tej niepewności nie została podana w raporcie i moim zdaniem nie mogła zostać podana bo rzetelne jej oszacowanie stawiałoby pod znakiem zapytania sensowność podawania jakiegokolwiek wartości. Trudność ta jest możliwa do pokonania przez lepsze poznanie wartości współczynników mieszania w rejonie badań poprzez pomiary oceanograficzne, jednak inwestor nie podjął tego typu prac.

Po rozmowach z autorami modelowania wiem też, że nie uwzględnili sprzężenia zwrotnego dodatniego związane z tym, że w warunkach małych wiatrów i prądów (albo wiatrów wschodnich) elektrownia może pobierać wodę już ogrzaną przez siebie. W takich warunkach anomalia temperatury będzie wyraźnie większa niż podana w wynikach modelowania, gdyż ogrzana woda nie będzie mogła opuścić rejonu zrzutu wód pochłodniczych. Wybrany sposób modelowania z definicji nie jest w stanie oddać realistycznie takiego procesu.

Dodatkowo trzeba tu jasno stwierdzić, że modelowanie zostało wykonane przy pomocy modelu nie nadającego się z samej swojej konstrukcji do modelowania przepływów ciepła w morzu. Jest ono w nim traktowane jako tzw. pasywny traser (ang. *passive tracer*), czyli składnik wody morskiej przemieszczający się i mieszający razem z nią. Jest to prawidłowe podejście przy modelowaniu zawartości w morzu soli czy innych związków nie ulegających rozkładowi, koagulacji, opadaniu na dno, parowaniu na powierzchni itp. (czyli w sumie jedynie niektórych). Na pewno jednak to podejście nie nadaje się do modelowania transportu ciepła w morzu, gdyż jest ono w stanie przekraczać granicę morze-atmosfera (powierzchnię morza), co zresztą jest głównym tematem analizy jaka powyżej przeprowadziłem. Ciepło w użytym modelu nie jest w stanie opuścić morza, przez co wymodelowana plama ciepła powinna być większa niż w rzeczywistości. To, że w wynikach modelowania jest mniejsza niż obserwowana w elektrowniach o znacznie mniejszej mocy

jeszcze dobitniej pokazuje, że wyniki te powinny być traktowane z bardzo dużą ostrożnością (w mojej opinii są one po prostu błędne).

Niestety nie jest to problem modelowania tylko w tym jednym wypadku, gdyż tego typu modelowania (pasywnego trasera) używano niestety do modelowania dla innych elektrowni. Na przykład cytowana wyżej praca Faulkner i inni (2021) przedstawia wyniki modelowania podobnym modelem dla elektrowni położonej w ujściu rzeki, w dodatku w lokalizacji z silnymi pływami. Autorzy tej pracy dowodzą, że w tych warunkach wymiana ciepła przez powierzchnię nie ma wielkiego znaczenia. Nawet jeśli w tym konkretnym przypadku jest to prawdą, co do czego mam wątpliwości, dla lokalizacji na Bałtyku, gdzie nie ma pływów ani prądu rzeki nie musi to być prawdą i zresztą nie jest co pokazałem wyżej (strumień ciepła oddawany do atmosfery na pewno nie jest zaniedbywalny). Pokazuje to jednak, że niestety nadal do modelowania smug termicznych stosuje się kompletnie нефизyczne modele, w których ciepło pochodzące z elektrowni w ogóle nie jest oddawane atmosferze i emitowane termicznie. Jeśli mimo to modele te produkują smugi chociaż w przybliżeniu zbliżone do rzeczywistych, parametry mieszania turbulentnego założone w nich muszą być w nich nierealistycznie wysokie.

Na koniec chciałbym zwrócić uwagę na jeszcze jeden brak modelowania przeprowadzonego w ramach procesu oceny wpływu elektrowni na środowisko morskie. Morze Bałtyckie ma coraz większe obszary beztlenowe przy swoim dnie. Do niedawna za przyczyny tego uważano nadmierne użyznianie Bałtyku azotem i fosforem (tzw. eutrofizacja) i brak intensywnych wpływów natlenionych wód z Morza Północnego do głębi bałtyckich. Niedawno zauważono jednak, że wody bałtyckie stają się coraz bardziej stratyfikowane - tzn. rośnie różnica gęstości między wodami powierzchniowymi i głębinowymi, utrudniając ich mieszanie (Liblik i Lips, 2019)²⁰. Przyczyną tego jest przede wszystkim globalne ocieplenie ogrzewające wody morskie od strony atmosfery (od góry), powodując zwiększoną różnicę temperatur w pionowym profilu, a zatem z konieczności i większą różnicę gęstości wód (cieplejsza woda morska jest mniej gęsta). Dodawanie dodatkowej ciepłej wody do wód powierzchniowych (w sensie górnych kilkudziesięciu metrów) może tę sytuację jedynie pogorszyć. Czy pogorszyć w istotny sposób, tego nie wiemy. O ile się orientuję nikt wcześniej nie zwrócił uwagi na ten aspekt. Gdy dokonywano oceny środowiskowej elektrowni atomowych obecnie zrzucających wody pochłonicze do Bałtyku, problem zwiększającej stratyfikacji nie był znany, co jednak nie oznacza iż nie przyczyniają się one także do pogorszenia

20 Liblik T., Lips U., 2019, Stratification Has Strengthened in the Baltic Sea – An Analysis of 35 Years of Observational Data, *Frontiers in Earth Science*, 7, 174, <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00174>

problemy stref beztlenowych na Bałtyku. Jednak odkąd o nim wiemy i zdajemy sobie sprawę, że wpływ dodawania ciepłej wody do wód powierzchniowych może go jedynie pogorszyć należy moim zdaniem i ten aspekt brać pod uwagę przy ocenie środowiskowej.

Ma to szczególne znaczenie wobec lokalizacji planowanej elektrowni w rejonie częstych upwellingów - wypływania na powierzchnię wód głębinowych w wyniku odpychania od brzegu wód powierzchniowych przez wiatr (Kowalewski i Ostrowski, 2005)²¹. Samo zjawisko upwellingu zostało odkryte przez von Humboldta w 1834 roku właśnie w rejonie Bałtyku objętego opisywanym tu modelowaniem, podczas letniego rejsu ze Szczecina do Królewca (Lehmann i Myrberg, 2008)²². Ma to znaczenie, gdyż pokrywanie morza podgrzaną wodą zwiększy lokalną stratyfikację utrudniając powstanie upwellingu, a zatem także gdzie indziej na Bałtyku odwrotnego zjawiska downwellingu (co wynika wprost z zasady zachowania masy). Określenie na ile jest to istotne dla cyrkulacji Morza Bałtyckiego jest niemożliwe bez użycia modelu całego Bałtyku (a nie jedynie małej domeny w pobliżu elektrowni) gdyż są to zjawiska o zasięgu całego basenu. Uważam, że powinno to zostać wykonane w ramach oceny wpływu zrzutu wód pochłodniczych do morza.

Podsumowanie:

1. Przeprowadzona analiza warunków brzegowych oraz porównanie z obserwowanymi plamami ciepła dla innych elektrowni zrzucających wody pochłodnicze do morza wskazuje na to iż wyniki modelowania przedstawione w raporcie oceny środowiskowej zaniżają wielkość i intensywność oczekiwanej plamy ciepła kilkakrotnie. Jest to spowodowane prawdopodobnie przyjęciem w modelowaniu niewłaściwych parametrów mieszania. Poprawienie tego problemu wymaga dodatkowych obserwacji oceanograficznych, gdyż obecnie ich wartości dla badanego rejonu znane są bardzo słabo, powodując dużą niepewność wyników modelowania.
2. Prawidłowe modelowanie powinno być przeprowadzone modelem traktującym ciepło w sposób zgodny ze znanymi prawami fizyki, a nie jako pasywny traser.
3. Domena modelu jest moim zdaniem stanowczo za mała. Powinna ona obejmować całe Morze Bałtyckie gdyż lokalne zmiany stratyfikacji spowodowane dodaniem ciepłej wody mogą wpływać na cyrkulację (i mieszanie wód) w skali całego basenu morskiego. Konieczność sprawdzenia wpływu wód zrzutowych wynika z niedawnego odkrycia, że

21 Kowalewski M., Ostrowski M., 2005, Coastal up- and downwelling in the southern Baltic, *Oceanologia*, 47, 453-475.

22 Lehmann A., Myrberg K., 2008, Upwelling in the Baltic Sea — A review, *Journal of Marine Science*, 74, S3-S13.

stratyfikacja Bałtyku pogłębia się z szkodliwymi skutkami dla środowiska co może zostać pogłębione w wyniku zrzutu wód pochłodniczych z planowanej elektrowni.

4. Modelowanie powinno uwzględnić fakt coraz częstszych „morskich fal upałów” notowanych coraz częściej na Bałtyku, mających negatywny wpływ na operacje elektrowni atomowych z obiegiem otwartym nawet na chłodniejszych wodach Zatoki Fińskiej.