

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

ODDZIAŁYWANIA TERMICZNE

Obiekt: Infrastruktura przyłączeniowa morskich farm wiatrowych
MFW Bałtyk II i MFW Bałtyk III

Zlecniodawca: EKO-KONSULT Spółka z o.o.
ul. Narwicka 6
80-557 Gdańsk

Jednostka projektowania: TD ENERGO sp. z o.o.
al. Adolfa Dygasińskiego 29
30-820 Kraków

Autorzy opracowania:

mgr inż. Tomasz Andruszko

mgr inż. Mateusz Worwa

mgr inż. Tomasz Musiał

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

Spis treści

1. Wstęp	3
2. Podstawa opracowania	3
3. Infrastruktura przyłączeniowa MFW	3
4. Ułożenie kabla w dnie morskim – możliwe oddziaływania	5
4.1 Parametry otoczenia	5
4.1.1 Temperatura wody	5
4.1.2 Przewodność cieplna, przepuszczalność i porowatość dna morskiego	7
4.1.3 Temperatura na powierzchni kabla	9
4.1.4 Profil obciążenia morskich linii kablowych dla MFW	11
4.1.5 Sposób ułożenia kabli w morzu	16
4.1.6 Kondukcja i konwekcja naturalna	20
4.1.7 Dynamika dna morskiego południowego Bałtyku	23
4.2 Kryterium 2K	23
4.2.1 Wnioski dla części morskiej	25
5 Oddziaływanie termiczne kabli eksportowych w części lądowej	27
5.1 Wprowadzenie	27
5.2 Założenia do obliczeń	27
5.3 Wyniki analizy	30
5.3.1 Przykład obliczeniowy nr 1A – wyniki	32
5.3.2 Przykład obliczeniowy nr 1B – wyniki	33
5.3.3 Przykład obliczeniowy nr 2A – wyniki	34
5.3.4 Przykład obliczeniowy nr 2B – wyniki	35
5.3.5 Przykład obliczeniowy nr 3A – wyniki	36
5.3.6 Przykład obliczeniowy nr 3B – wyniki	37
5.3.7 Przykład obliczeniowy nr 4A – wyniki	38
5.3.8 Przykład obliczeniowy nr 4B – wyniki	39
5.3.9 Przykład obliczeniowy nr 5A – wyniki	40
5.3.10 Przykład obliczeniowy nr 5B – wyniki	41

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

5.4	Wnioski dla części lądowej	42
6	Bibliografia.....	42

1. Wstęp

Niniejsze opracowanie stanowi przegląd dostępnej literatury technicznej w zakresie oddziaływania kabli morskich ułożonych na dnie lub w dnie morza mających na celu wyprowadzenie mocy z morskich farm wiatrowych. W opracowaniu przedstawiono również raport z obliczeń wokół kabli elektroenergetycznych (kablów eksportowych) możliwych do zastosowania do wyprowadzenia mocy z morskiej farmy wiatrowej MFW Bałtyk II i MFW Bałtyk III ułożonych w odcinku lądowym.

Zlecniodawcą opracowania jest:

Eko-Konsult Sp. z o.o.

ul. Narwicka 6

80-557 Gdańsk

Wykonawcą opracowania jest biuro projektowe:

TD ENERGO Sp. z o.o.

Al. Adolfa Dygasińskiego 29

30-820 Kraków

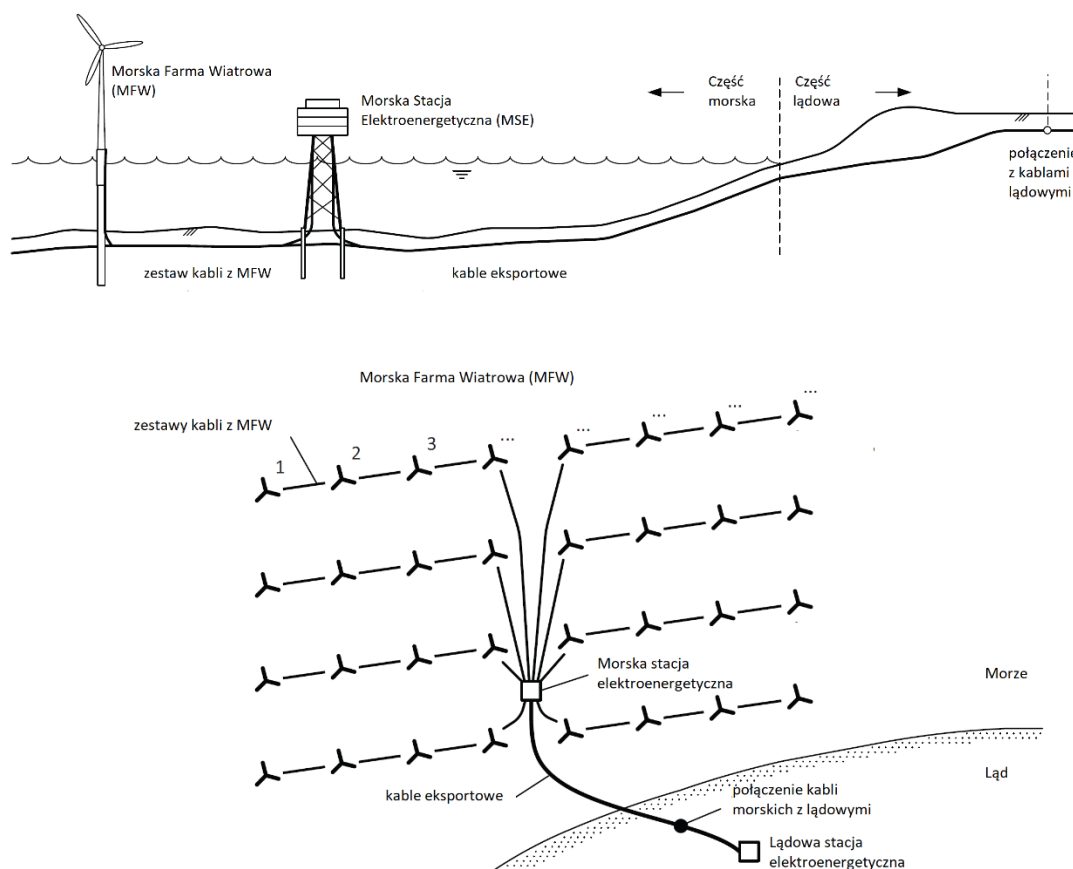
2. Podstawa opracowania

Opracowanie zostało wykonane zgodnie ze zleceniem nr 582.22/TDENERGO/2022 z dnia 06.06.2022 r.

3. Infrastruktura przyłączeniowa MFW

W związku z dynamicznym rozwojem energetyki odnawialnej na świecie i w Polsce coraz częściej mówi się o instalowaniu morskich farm wiatrowych (MFW) w strefach ekonomicznych poszczególnych krajów w tym również Polski. Budowa MFW niesie za sobą również konieczność wyprowadzenia mocy tj. budowę infrastruktury przyłączeniowej łączącej MFW z Krajowym Systemem Elektroenergetycznym (KSE). Najpierw moc generowana przez poszczególne turbiny przesyłana jest do morskiej stacji elektroenergetycznej (MSE), następnie morska stacja połączona jest z siecią przesyłową na lądzie za pośrednictwem tzw. morskich kabli eksportowych prądu stałego lub przemiennego oraz poprzez lądową stację elektroenergetyczną (LSE).

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00



Rys. 1. Przykładowe schematy połączeń MFW z częścią lądową [15]

Zakresem niniejszego opracowania jest określenie oddziaływań termicznych wywoływanych przez przesyłające energię morskie kable eksportowe w zależności od sposobu ułożenia kabli na dnie lub w dnie morskim. Połączenie pomiędzy MSE a LSE można podzielić na trzy podstawowe odcinki: sprowadzenie kabla ze stacji MSE na dno morza, część morska czyli prowadzenie kabla w dnie lub na dnie morza i część dotycząca prowadzenia kabli na lądzie.

W poniższej tabeli przedstawiono korzyści oraz zagrożenia dla instalacji i eksploatacji kabli eksportowych na poszczególnych odcinkach w zależności od sposobu ułożenia.

Tabela 1. Ogólne korzyści i zagrożenia dla instalacji i eksploatacji kabli w morzu w zależności od sposobu ułożenia.

Lp.	Odcinek	Sposób prowadzenia	Korzyści	Zagrożenia
1.	Zejsście z MSE w kierunku dna morskiego	w rurach osłonowych	– kable nie będą narażone na uszkodzenia mechaniczne	– prowadzenie kabli w rurach osłonowych powoduje gorszą wymianę generowanego ciepła z otoczeniem
2.	Trasa w morzu	Układanie na dnie	– łatwość instalacji (kable są po prostu kładzione na wstępnie oczyszczonym dnie morskim) – ruchy prądów morskich skutecznie podnoszą	– kable są narażone na uszkodzenia mechaniczne (kotwice, sieci itp.) – kable mogą zostać pokryte grubą warstwą organizmów dennych (bentosowych) co

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

			obciążalność kabli przez lepsze odbieranie ciepła z powierzchni kabli	może powodować przegrzewanie się kabla w tych miejscach
		Układanie na dnie wraz z zabezpieczeniem od uszkodzeń mechanicznych (nasyp skalny, materace betonowe)	– nasypy skalne mogą charakteryzować się bardzo wysoką przepuszczalnością wody – odprowadzanie ciepła z powierzchni kabli może być podobne jak ułożenie na dnie morza bez nasypu.	– Instalacja materacy betonowych i/lub nasypu skalnego komplikuje i wydłuża czas montażu
		Układanie pod dnem morza	– kable nie są narażone na uszkodzenia mechaniczne – rezerwa termiczna gruntu otoczenia zakopanego kabla powoduje, że kabel lepiej znosi krótkotrwałe przeciążenia	– podgrzewanie dna morskiego może powodować szybszy wzrost warstwy materiału organicznego tworzący efekt izolacji termicznej i pogorszenie właściwości cieplnych dla kabli
3.	Wejście na ląd (landfall)	Układanie w wykopie	– łatwiejsze wykonanie w porównaniu z prowadzeniem przewiertu	– prądy przybrzeżne mogą w krótkim okresie zmieniać grubość warstwy dna nad ułożonym kablem (np. dla kabla zakopanego na głębokości ok. 3 m, w niedługim czasie jego odległość do powierzchni dna może wynosić np. 9 m, lub też może on być całkowicie odkopany
		Przewiert sterowany	– trajektoria/głębokość może zabezpieczyć kabel przed przypadkowym odkryciem przez prądy przybrzeżne.	– znaczące pogorszenie warunków cieplnych kabla z uwagi na głębokość ułożenia pod dnem morza

4. Ułożenie kabla w dnie morskim – możliwe oddziaływania

4.1 Parametry otoczenia

Limitującymi parametrami dla projektowania podmorskiej linii kablowej i doboru typu kabla są:

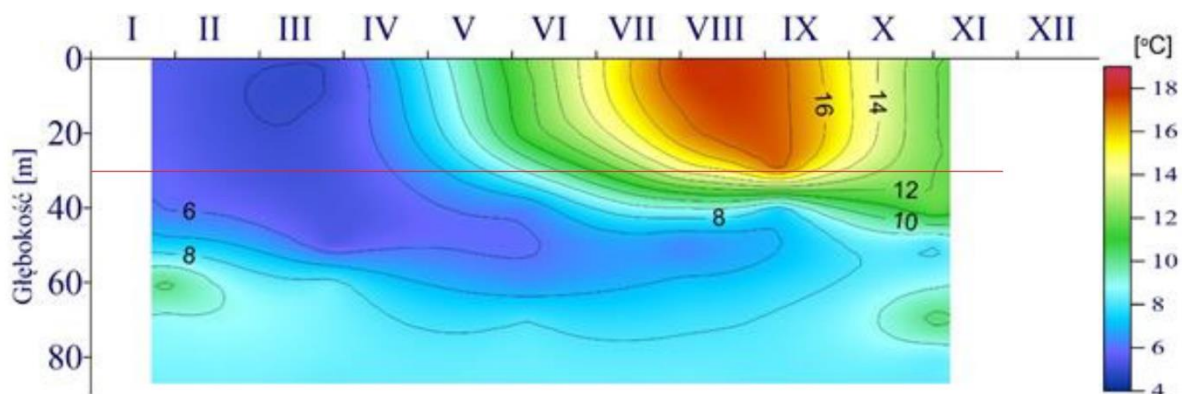
- rezystywność cieplna środowiska otoczenia (woda morska, grunt/osad morski),
- przepuszczalność i porowatość dna morskiego,
- ruch wody (prądów morskich),
- głębokość penetracji temperatury w gruncie morskim (zależna od dyfuzji termicznej),
- temperatura wody.

4.1.1 Temperatura wody

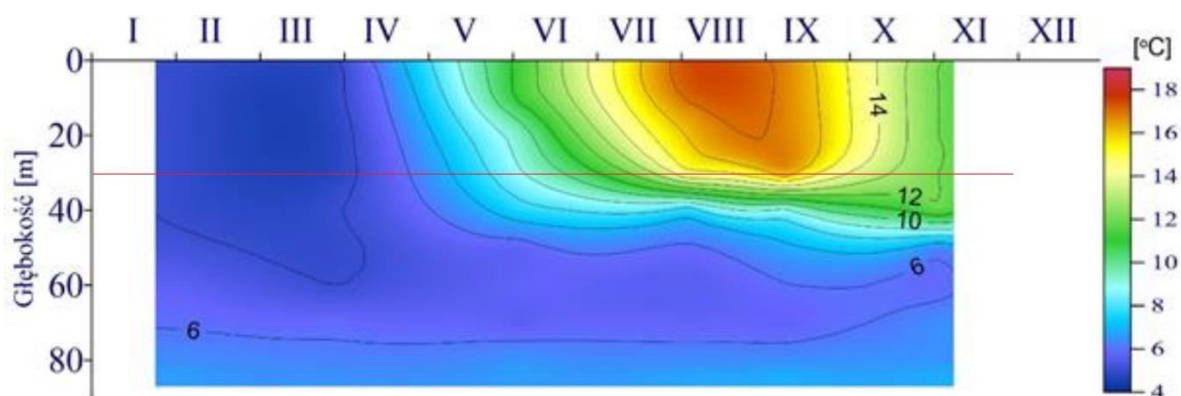
Temperatura wody w morzu waha się na przestrzeni całego roku od kilku do kilkunastu stopni. Większe wahania dotyczą wód powierzchniowych, znacznie mniejsze są na większych głębokościach. Poniżej kilka przykładów.

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

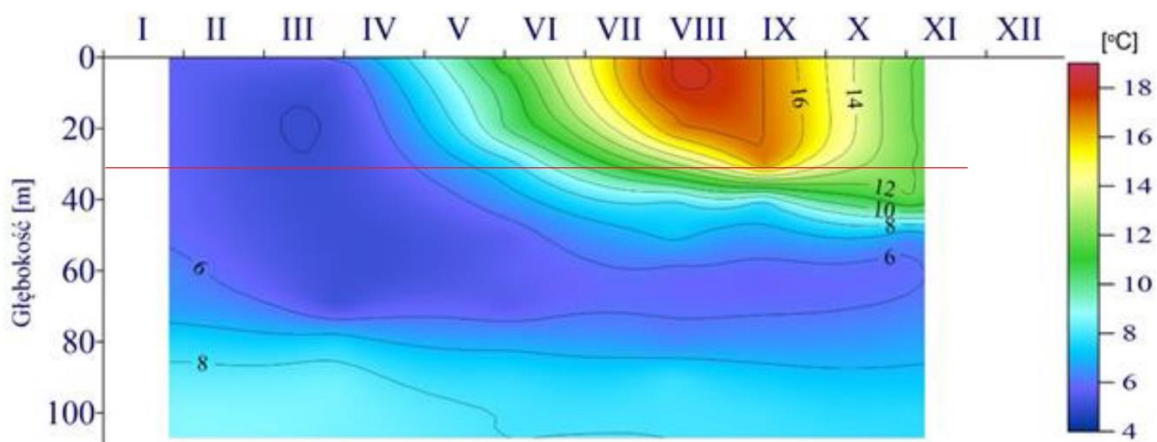
Zgodnie z [14] średnia temperatura wody w poszczególnych częściach Morza Bałtyckiego w 2020 roku na głębokości ok. 30 m wahała się od 5°C do 16°C.



Rys. 2. Temperatura wody w profilu pionowym w Głębi Bornholmskiej (st. P5C) w poszczególnych miesiącach w 2020 r. [14]



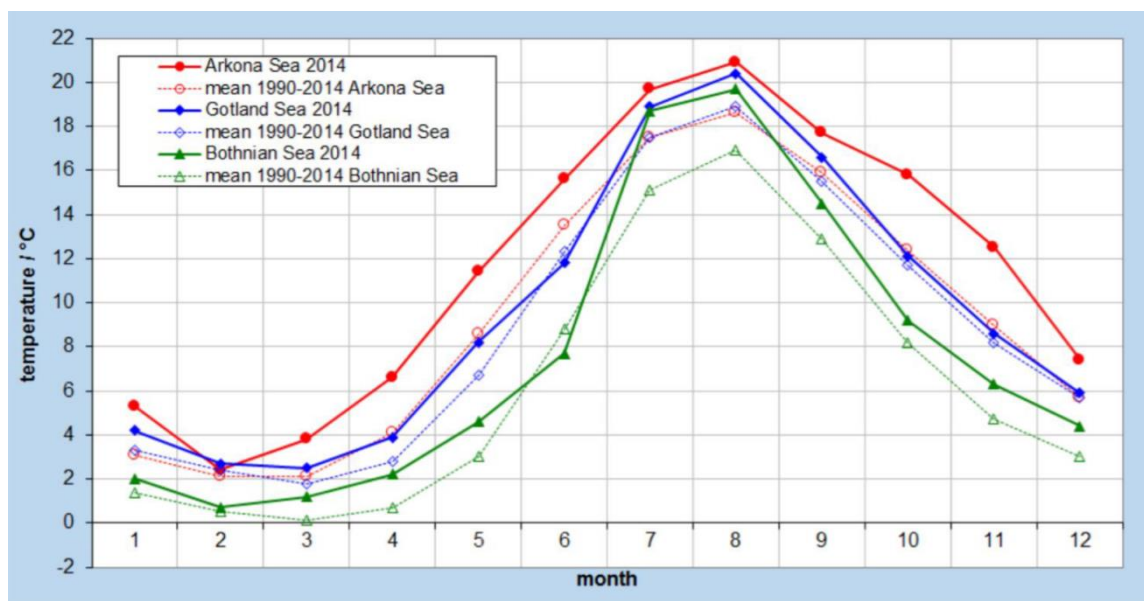
Rys. 3. Temperatura wody w profilu pionowym we wschodnim Basenie Gotlandzkim (st. P140) w poszczególnych miesiącach w 2020 r. [14]



Rys. 4. Temperatura wody w profilu pionowym w Basenie Gdańskim (st. P1) w poszczególnych miesiącach w 2020 r. [14]

Natomiast poniższy wykres przedstawia rozkład temperatury wody przy powierzchni Morza Bałtyckiego w przeciągu 2014 roku oraz średnią z lat 1990-2014 [10].

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00



Rys. 5. Roczna zmiana temperatury Morza Bałtyckiego [10]

Zgodnie z [11], temperatura wody oraz osadu na trasie potencjalnego ułożenia kabli dla MFW Bałtyk II i MFW Bałtyk III nie przekracza $+10^{\circ}\text{C}$. Średnia głębokość morza na trasie ułożenia kabli będzie wynosić ok. 20 m, maksymalna głębokość morza na trasie będzie wynosić ok. 33 m (według danych batymetrycznych).

Dla Morza Bałtyckiego w 2018 roku został opracowany raport dotyczący m.in. warunków termicznych wód panujących w morzu w tym na większych głębokościach [13]. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, że w maju, czerwcu i sierpniu średnia temperatura spadała wraz z głębokością w całej kolumnie wody. Do głębokości 30 m woda ochładzała się około trzykrotnie w stosunku do temperatury warstwy powierzchniowej, osiągając w maju i czerwcu ok. 4°C , a w sierpniu 7°C w chłodniejszych miesiącach (wrzesień, listopad) woda w warstwie 10-30 m była cieplejsza od wody powierzchniowej, przy czym wzrost temperatury wraz z głębokością obserwowano do głębokości 15 m we wrześniu i do 20 m w listopadzie. [13].

4.1.2 Przewodność cieplna, przepuszczalność i porowatość dna morskiego

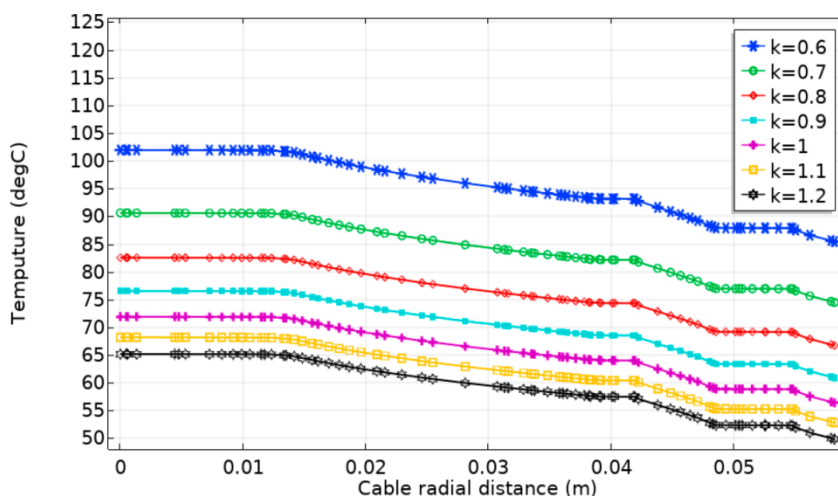
Układanie kabli morskich w większości przypadków polega na ich zakopaniu w dnie morskim na około 1 do 3 metrów głębokości. W większości opisywanych w literaturze analiz, zakłada się uproszczony model, że przewodność cieplna osadu dna morskiego przyjmuje się na stałym poziomie i np. według [10] wynosi ona $2,0 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$. Niektóre analizy uwzględniają różną wartość przewodności cieplnej np. w [5] przyjęto, że przewodność cieplna osadu dna morskiego waha się w przedziale od 0,58 do $1,94 \text{ W/(m}^{\circ}\text{K)}$ (powołując się na: Tae-Wan Kim, Yang-Ki Cho, Edward P. Dever *An evaluation of the thermal properties and albedo of a macrotidal flat*). Dla porównania przewodność cieplna wody morskiej (Bałtyk) wynosi $0,563 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ [10] lub $0,6 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ w temperaturze 25°C [12]. Przewodność cieplna wody morskiej maleje wraz ze wzrostem zasolenia i wzrasta wraz ze wzrostem temperatury.

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

Zgodnie z wynikami badań [11] dla trasy podwodnych linii kablowych dla planowanych morskich farm wiatrowych Bałtyk II i Bałtyk III zlokalizowanych na Morzu Bałtyckim, przewodność cieplna waha się od 0,837 W/m*K do 3,366 W/m*K. Zgodnie z normą DNV-RP-J301 Subsea Power Cables in Shallow Water Renewable Energy Applications przyjęto, że najkorzystniejsze warunki termiczne dla położenia kabla w płytkiej (do 50 m) strefie morskiej to przewodność termiczna na poziomie 1,4 W/(K·m) dla temperatury osadu +15°C. Z uwagi na to, że temperatura wody, a więc i osadu w obszarze MIP nie przekracza +10°C, współczynnik ten obniżono do 0,8 W/(K·m) [11].

W artykule [5], gdzie badano wpływ temperatury wody morskiej, ruchów wody, głębokość zakopania czy przewodność cieplną na temperaturę żyły roboczej kabla morskiego o napięciu 220 kV dla różnych metod ułożenia: ułożenie w rurach, zakopanie w dnie morskim czy też ułożenie kabla na dnie morza, analizowano również wpływ przewodności cieplnej na temperaturę żyły roboczej kabla.

Zgodnie z wynikami obliczeń zmiana przewodności cieplnej w zakresie od 0,6 do 1,2 znacząco wpływa na temperaturę żyły roboczej i samego kabla. Na poniższym wykresie pokazano zmianę temperatury wewnątrz kabla (od warstwy środka do warstw zewnętrznych), przy założeniu tego samego obciążenia prądowego i zmiennej wartości przewodności cieplnej.



Rys. 6. Wpływ przewodności cieplnej na temperaturę kabla zakopanego w dnie morskim przy takim samym stałym obciążeniu [5]

W przywołanym opracowaniu [8] w symulowanym środowisku, przeprowadzono bardzo dokładną analizę wpływu parametrów osadu dna morskiego na rozkład temperatury wokół kabli wraz ze skutecznym porównaniem wyników i opracowanym modelem obliczeniowym. W badaniu zidentyfikowano reżimy termiczne generowane w typowych nieskonsolidowanych osadach szelfowych – pyłu grubego (średnia średnica ziaren 0,045 mm), piasku drobnego (średnia średnica ziaren 0,20 mm) i piasku bardzo grubego (średnia średnica ziaren 1,23 mm). Wyniki pokazują, że wymiana ciepła, a tym samym pola temperatur generowane przez podmorskie kable WN zakopane w różnych osadach są bardzo zmienne. Wykazano, że pyły grube są wyłącznie przewodzące (kondukcja), powodując wzrost temperatury o >10 °C do 40 cm od źródła o temperaturze 60 °C powyżej temperatury otoczenia;

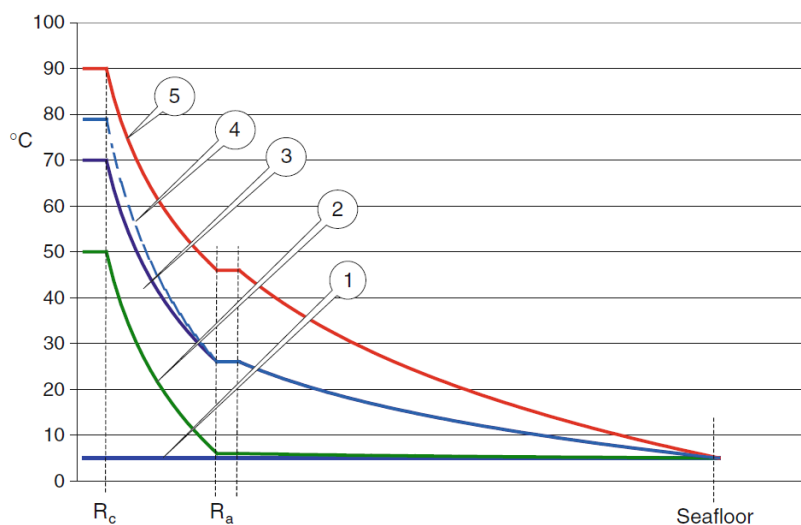
Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

piaski drobne wykazują przejście z przewodzenia na konwekcyjne przenoszenie ciepła pomiędzy 20 a 36 °C powyżej temperatury otoczenia, przy czym wzrost temperatury o >10 °C następuje już na odcinku aż jednego metra od źródła o temperaturze 55 °C powyżej temperatury otoczenia; a piaski bardzo grube wykazują dominację konwekcji przenoszenie ciepła nawet przy bardzo niskich (7 °C) temperaturach roboczych źródła, nawet do 18 °C powyżej temperatury otoczenia w odległości metra od źródła ciepła (kabla), przy temperaturze powierzchni źródła wynoszącej zaledwie 18 °C powyżej temperatury otoczenia. Odkrycia te są ważne dla otaczających środowisk przypowierzchniowych, w których występują tak wysokie temperatury i mogą mieć znaczący wpływ na przebieg procesów chemicznych i fizycznych działających w skali ziarna i pod ziarnem; aktywność biologiczną zarówno na poziomie mikro-, jak i makrofauny, a także na wydajność operacyjną samych kabli, ponieważ konwekcyjny transport ciepła zwiększyłby obciążalność prądową kabli, co nie zostało uwzględnione w obowiązujących normach. Wyniki i wykresy analiz zawartych w [8] oraz w [7] opisano w dalszej części opracowania.

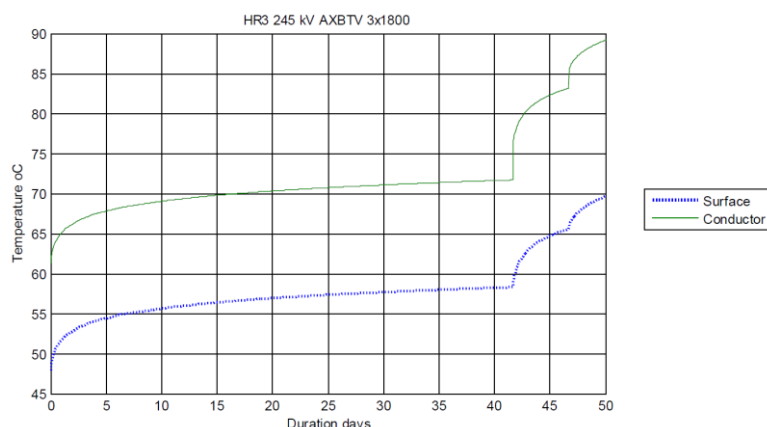
4.1.3 Temperatura na powierzchni kabla

W związku z przesyłem mocy w kablach elektroenergetycznych w wyniku strat (na rezystancji kabla) kable zwiększają swoją temperaturę. W zależności od budowy kabli i zastosowanych materiałów izolacyjnych bezpieczna (graniczna) temperatura pracy żyły roboczej kabli wynosi 90 °C. Biorąc pod uwagę budowę większości kabli, grubość materiału izolacyjnego i innych warstw wzmacniających i uszczelniających, powoduje to, iż na zewnętrznej powierzchni kabli temperatura jest znacznie niższa niż w żyły roboczej. Na poniższym wykresie, zaczerpniętym z opracowania [1] przedstawiono zmianę temperatury w samym kablu (odcinek osi X pomiędzy R_c a R_a) oraz w odcinku od R_a do powierzchni dna morskiego. Z wykresu dość jasno wynika, że temperatura na powierzchni kabla jest o ok. 44°C niższa niż w samym środku kabla. Zewnętrzna temperatura badanego kabla (obciążonego długotrwale maksymalną mocą) wynosi maksymalnie 46 °C.

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00



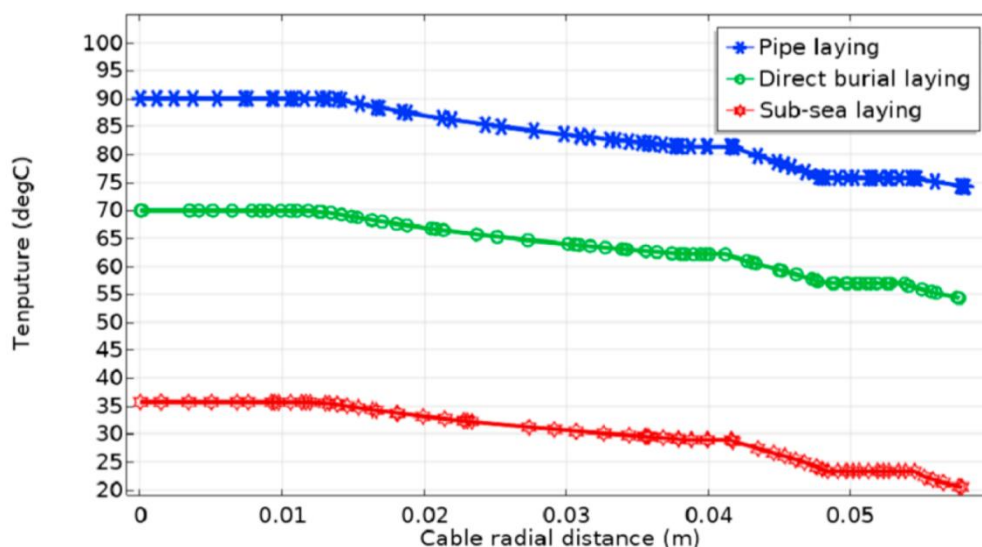
Rys. 7. Zmiana temperatury kabla i dna morskiego w funkcji odległości od środka kabla. Krzywa 1 obrazuje początek badania przed zadaniem obciążenia kabla, kolejne krzywe 2-4, obrazują rozkład temperatury w kablu w zależności od osiągniętej temperatury żyły roboczej, aż do osiągnięcia maksymalnego dopuszczalnego obciążenia kabla i osiągnięcia temp. 90°C – krzywa 5 [1]



Rys. 8. Temperatury przykładowego kabla – na powierzchni żyły roboczej (linia zielona) i na powierzchni samego kabla (linia niebieska) dla różnych warunków obciążenia [2]

Badania temperatury w kablu oraz jego otoczeniu opisano również w [5], gdzie do analizy przyjęto 3-żyłowy kabel morski o napięciu 220 kV ułożony na 3 różne sposoby: w rurach, zakopanego w dnie morskim na głębokości 2 m oraz ułożonego bezpośrednio na dnie morza. Kabel jest w izolacji XLPE w związku z tym przyjęto, że jego graniczna temperatura (wewnątrz kabla) nie może przekroczyć 90°C. Na poniższym wykresie pokazano rozkład temperatury wewnątrz kabla, z której wynika, iż niezależnie od metody ułożenia kabla, temperatura na jego powierzchni spada o ok. 10°C względem temperatury na powierzchni przewodnika w samym kablu.

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00



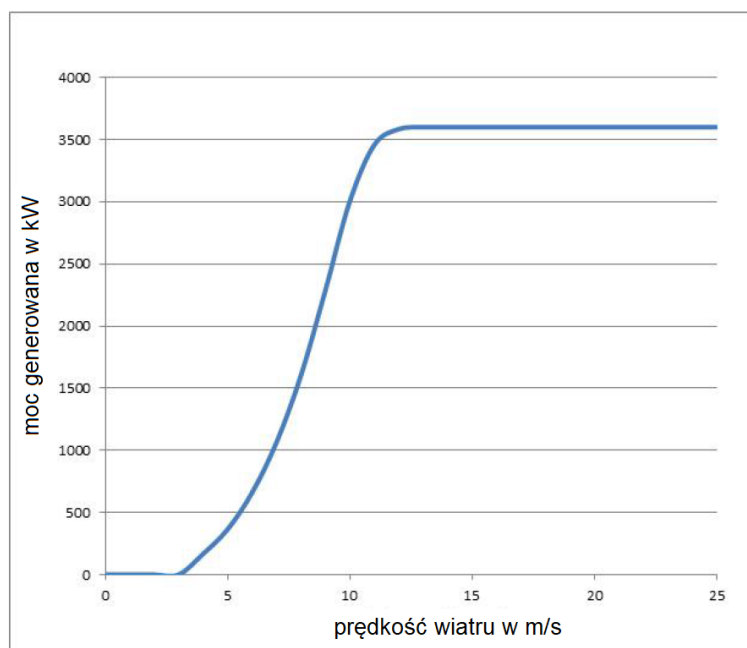
Rys. 9. Rozkład temperatury w 3-żyłowym kablu 220 kV ułożonym w rurach (kolor niebieski), w dnie morskim na głębokości 2m (kolor zielony) oraz bezpośrednio na dnie morza (kolor czerwony), przy założeniu jednakowego, stałego obciążenia [5].

Natomiast autorzy przytoczonego artykułu [8] na początku podkreślają, że temperatura wszystkich „pracujących” kabli w dynamicznie rozwijającej się morskiej energetyce wiatrowej, nie przekracza na swojej powierzchni temperatury 70 °C.

4.1.4 Profil obciążenia morskich linii kablowych dla MFW

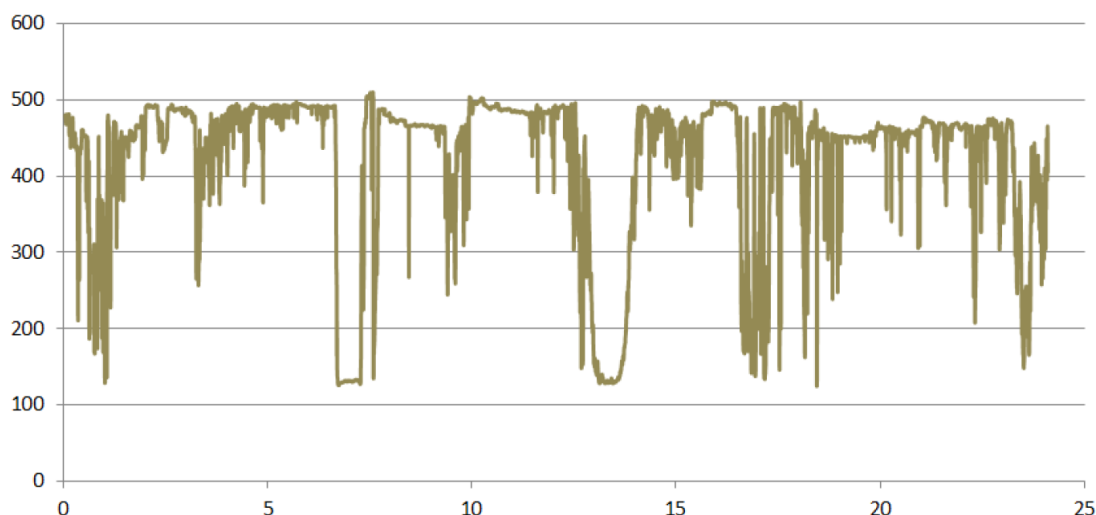
Generacja mocy z odnawialnych źródeł energii jest mniej przewidywalna niż w elektrowniach konwencjonalnych (węglowych, gazowych).. Lokalizowanie farm wiatrowych na otwartych akwenach (morze, ocean) podnosi znacząco skuteczność i stałość generacji, w porównaniu z produkcją energii na lądzie. Powołując się na [2] turbiny wiatrowe o wielkości 3-5 MW są uruchamiane, jeśli prędkość wiatru osiągnie pewną wartość minimalną (np. 3-5 m/s), a wyłączane, jeśli prędkość wiatru jest zbyt duża (np. >25-30 m/s). Optymalna praca wspomnianej turbiny odbywa się przy stałej prędkości wiatru 12-15 m/s. Przy osiągnięciu wartości nominalnej prędkości wiatru, wraz ze zwiększeniem tej prędkości moc generowana nie wzrasta.

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00



Rys. 10. Charakterystyka generowanej mocy dla przykładowej turbiny wiatrowej [2]

Na poniższym wykresie przedstawiono wartość natężenia prądu z przykładowej farmy wiatrowej na Morzu Północnym w funkcji czasu [2]. Dla poniższego wykresu wybrano okres ze stosunkowo stałą i mocną siłą wiatru, gdzie generacja mocy farmy wiatrowej była najbardziej efektywna.

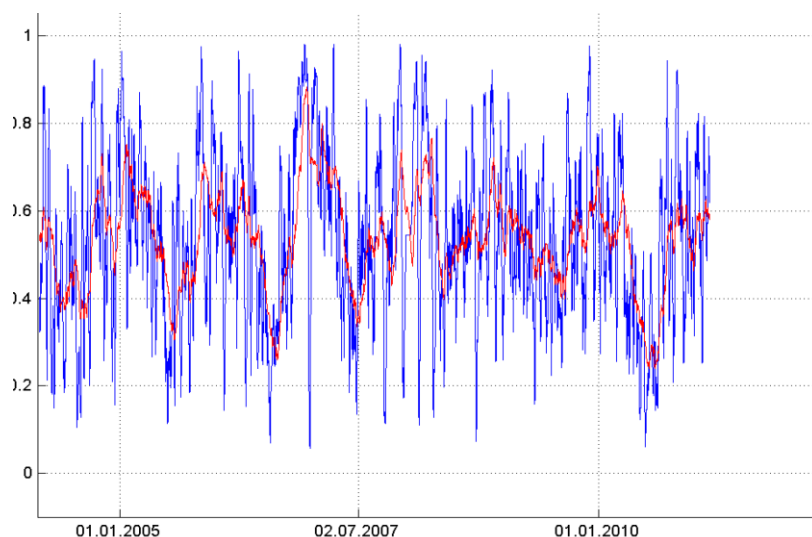


Rys. 11. Prąd [A] farmy wiatrowej na Morzu Północnym w ciągu 25 dni (w okresie o najbardziej stabilnej sile wiatru) [2]

Stała termiczna materiału dna morskiego jest bardzo duża, co generuje długi czas nagrzewania się dna. Zatem może upłynąć kilka dni, tygodni lub miesięcy, zanim osiągnie się stan docelowy. Dzięki temu kable mogą być przeciążane znacznie wyżej niż prąd znamionowy przez krótszy okres i możliwe jest zmniejszenie przekroju żył roboczych projektowanych kabli w przypadku, gdy mamy do czynienia ze zmiennym obciążeniem jakim zdecydowanie jest wyprowadzenie mocy z MFW.

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

Współczynnik wykorzystania mocy z generacji pojedynczej turbiny można rozpatrywać jako wartość średnią z zadanych przedziałów czasowych. W opracowaniu przyjęto 7-dniowy oraz 45-dniowy okres uśredniania obciążenia. Na poniższym wykresie z badań z 7 lat działania turbiny, wskaźnik 7-dniowy oznaczono kolorem niebieskim a 45-dniowy czerwonym. Wykres pokazuje, iż wskaźnik mocy długoterminowy przekroczył tylko raz wartość 0.8, a jego średnia wartość waha się w okolicach 0.5 – 0.6, a jak wspomniano powyżej dopiero oddziaływanie długoterminowe powoduje odpowiednie nagrzanie się powierzchni kabla a następnie przekazywanie tego ciepła do otoczenia (natomiast przekazywanie ciepła do otoczenia w warunkach morskich to bardzo istotny element omówiony w dalszej części opracowania) [2].



Rys. 12. Współczynnik mocy (load factor) generowanej przez przykładową turbinę wiatrową z danych z 7 lat. Wskaźnik 7-dniowy oznaczono kolorem niebieskim a 45-dniowy czerwonym [2].

Bardzo dobrą analizę doboru kabla eksportowego o napięciu 245 kV dla rzeczywistej farmy wiatrowej Horns Rev III (HR3) o mocy 400 MW opisano w [2].



Rys. 13. Lokalizacja MFW Horns Rev III (HR3) [źródło: Mapy google]

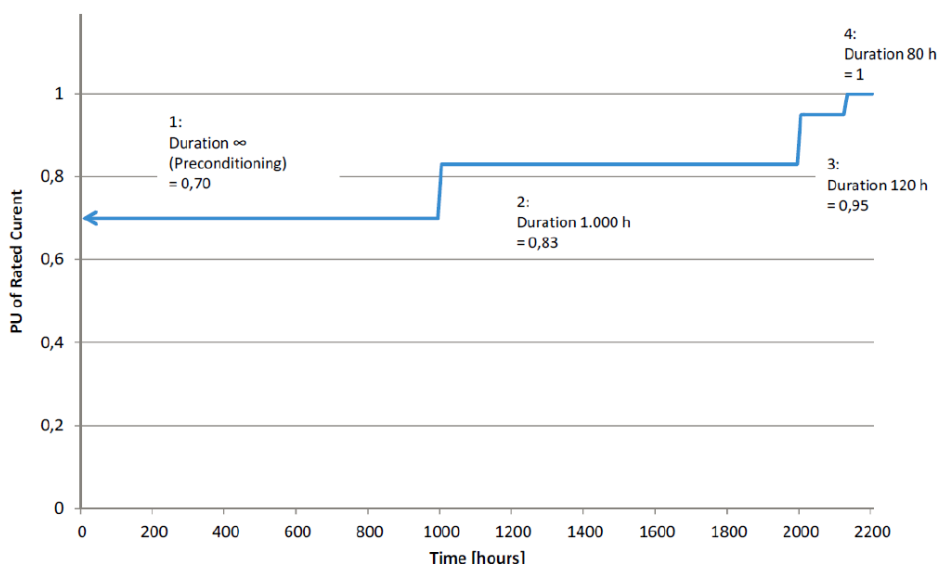
Analiza była istotna z uwagi na możliwość znacznych oszczędności przy budowie infrastruktury wyprowadzenia mocy z MFW Horns RevIII poprzez możliwość ułożenia tylko jednego kabla

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

eksportowego zamiast dwóch ze względu na profil mocy generowanej z bliźniaczej farmy wiatrowej Horns Rev 2. Przyjęcie do celów projektowych i później do budowy kabli eksportowych nominalnej (stałej) mocy generowanej przez projektowaną MFW Rev III skutkowałaby koniecznością zastosowania dwóch kabli eksportowych co znacząco zwiększyłoby koszty inwestycji.

Dane użyte w przykładzie opierają się na danych produkcyjnych z pobliskiej farmy wiatrowej (Horns Reef 2, HR2) dostosowanych do późniejszego rozwoju turbin wiatrowych, ale sprawdzonych z historycznymi danymi wiatrowymi i modelami danych wiatrowych dla rzeczywistego obszaru w połączeniu z "krzywymi mocy" dla najnowocześniejszych turbin wiatrowych.

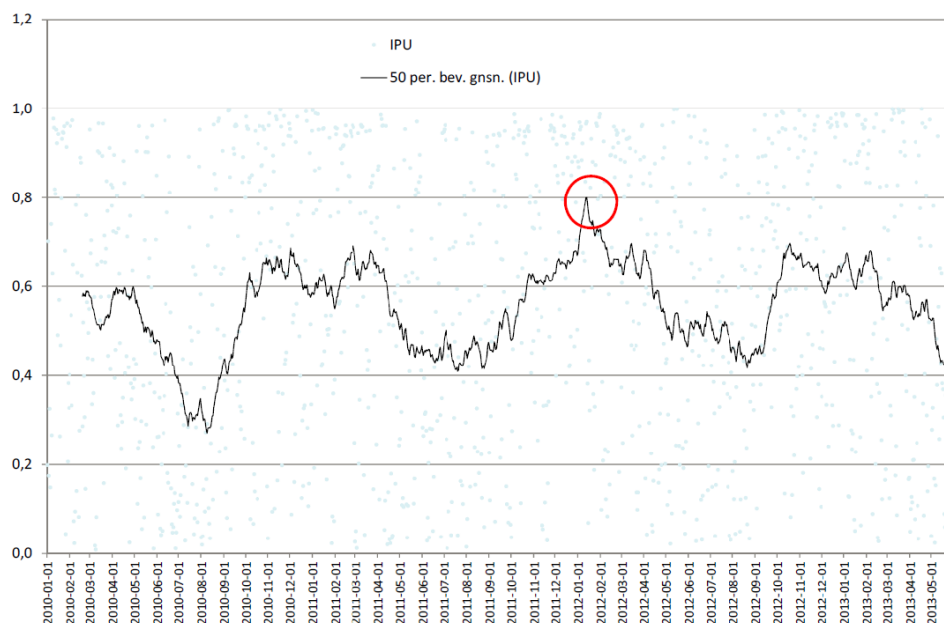
Wynikowa krzywa obciążenia dla "najgorszego przypadku wystąpienia obciążenia" została uwzględniona w zaproszeniu do składania ofert i wyglądała następująco:



Rys. 14. Najgorszy przypadek wystąpienia obciążenia zawarty w SIWZ dla HR3 [2]

Na powyższym wykresie liczba płaskowyzów w najgorszym przypadku obciążenia powinna być rozpatrywana dla poszczególnych przypadków MFW, w zależności od znalezionych wzorców obciążenia i stałych czasowych temperatury otoczenia, (czyli osiągnięcie stanu ustalonego temperatury otoczenia w wyniku umiejscowienia w tym otoczeniu źródła ciepła o określonej temperaturze, w analizowanych przypadkach źródłem ciepła jest obciążony kabel elektroenergetyczny). Zwykle uważa się, że stała czasowa temperatury dla samego kabla i jego najbliższego otoczenia mierzona jest w godzinach, stała czasowa temperatury otoczenia kabla zakopanego do 1 metra mierzona jest w dniach lub nawet tygodniach, a ostateczna stała czasowa temperatury głęboko zakopanego kabla byłaby mierzona w miesiącach lub nawet latach.

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

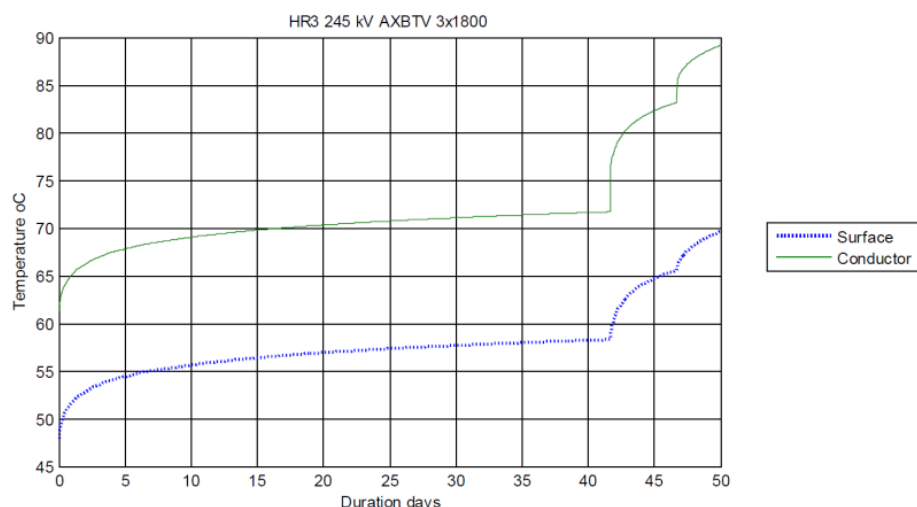


Rys. 15. 50-dniowa średnia produkcji energii na przestrzeni 3.5 roku pomiarów dla MFW HR2. Największy współczynnik produkcji wyniósł 0.8.

Do dalszych analiz wybrano trzy najgorsze płaskowyzę, ponieważ zawierają okres ogólnie wysokiej produkcji energii (wiatr), a także zawierają okresy z maksymalną lub prawie maksymalną produkcją. W wyniku analizy, szerzej opisanej w załączniku D w [2], wywnioskowano, że dla budowy stacji HR3, przy głębokości zakopania kabla eksportowego do 5 metrów w odcinku w pobliżu wybrzeża, 25% redukcja przekroju przewodu dała oszczędność materiału około 10-15%, ale również umożliwiła zastosowanie mniejszego statku instalacyjnego, z możliwą oszczędnością na kosztach instalacji w wysokości 25-50%.

Na etapie przetargu dla MFW Horn Rev III temperatura przewodu została obliczona przez producenta kabla dla *najgorszego przypadku wystąpienia obciążenia*, jak pokazano na Rys. 16. Analiza ta pozwoliła zastosować tylko jeden kabel eksportowy, gdyż widać, że temperatura wewnątrz kabla utrzymuje się poniżej 90°C. Jednocześnie pokazano, że w większości wykresu przebiegu obciążenia w kablach nie płynie maksymalny prąd, który mógłby wynikać z maksymalnej stałej i ciągłej produkcji.

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00



Rys. 16. Temperatury w oferowanym dla HR3 podmorskim kablu 245 kV 3x1800 mm² (aluminium), obliczone przez producenta na podstawie najgorszego przypadku wystąpienia obciążenia.

Podobną tematykę poruszono w [4], gdzie badano przepływ prądu w kablach morskich wyprowadzających moc z morskich farm falowych (wave farm). Stwierdzono, że przy wahającej generacji mocy badanej farmy falowej, wystarczające jest projektowanie kabli morskich dobieranych do 50% potencjalnej maksymalnej mocy generowanej w rozważanej farmie. Jest to mocno uzasadnione ekonomicznie i znacząco może obniżyć koszty inwestycji.

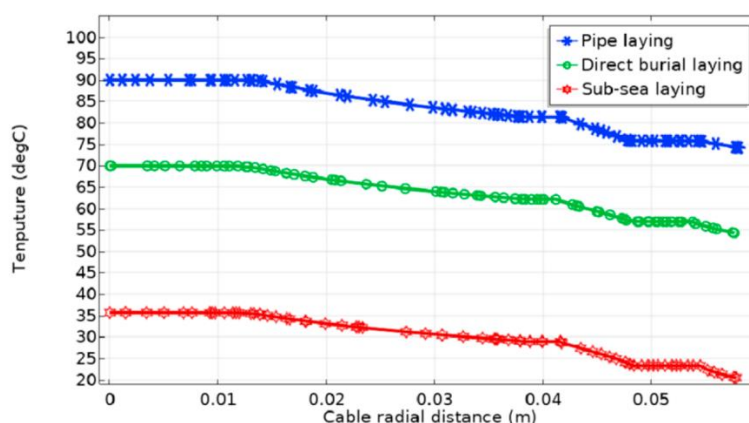
W morskich farmach wiatrowych, gdzie z reguły instalowana jest duża ilość turbin, nie wszystkie jednostki pracują jednocześnie, z uwagi na planowane prace serwisowe lub zdarzające się awarie. Przymusowe przerwy powodują ograniczenie mocy przesyłanej kablami eksportowymi, gdyż przy odstawieniu nawet tylko jednej jednostki, nominalna moc MFW nie zostanie osiągnięta nawet przy sprzyjających warunkach pogodowych. W związku z tym, rzeczywisty profil pracy MFW a przez to profil obciążenia kabli eksportowych zawsze będzie niższy od zakładanego obciążenia obliczonego w oparciu o nominalną moc zainstalowanej MFW.

4.1.5 Sposób ułożenia kabli w morzu

Kable (głównie przekrój poprzeczny żyły roboczej) dobierane są do najgorszych warunków terenowych jakie mogą wystąpić na trasie linii kablowej. Na podstawie wieloletniego doświadczenia budowania linii kablowych najgorsze warunki ułożenia kabli to te, w których kable ułożone są w rurach i jeśli chodzi o ląd, to te miejsca, gdzie kable ułożone są stosunkowo głęboko (np. przewiertu sterowane pod torami kolejowymi). Ułożenie kabli morskich w rurach, szczególnie chodzi tutaj o odcinek przejścia granicy morze-ląd (landfall), determinuje dobór ich przekroju do warunków obciążenia. Różna głębokość ułożenia kabli w dnie morskim nie wpływa na obciążenie linii kablowych, aż tak bardzo jakby to miało miejsce dla kabli ułożonych na lądzie, z uwagi na naturalną konwekcję i nasycenie dna morskiego wodą [6].

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

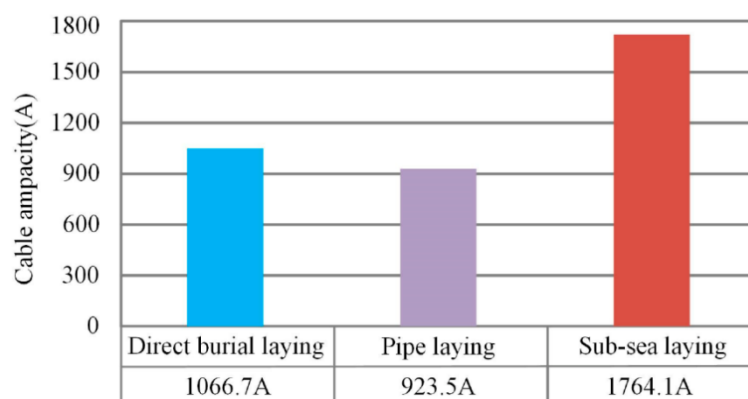
Wpływ sposobu ułożenia 3-żyłowego kabla morskiego o napięciu 220kV przeanalizowano w [5], gdzie rozważaniom poddano 3 sposoby ułożenia: w rurach, zakopanie w dnie morskim na głębokości 2 m oraz ułożonego bezpośrednio na dnie morza. W związku z tym, że badany kabel jest w izolacji XLPE temperatura żyły roboczej (wewnątrz kabla) nie może przekroczyć 90°C. Na Rys. 17, pokazano rozkład temperatury wewnątrz kabla, z której wynika, iż w zależności od metody ułożenia kabla o jednakowym obciążeniu, temperatura wewnątrz kabla oraz na jego powierzchni jest dużo niższa dla tego samego kabla zakopanego w dnie morskim na głębokości 2 m (przewodność cieplną gruntu przyjęto na poziomie 1,05 W/m*K) i znacząco niższa dla kabla ułożonego bezpośrednio na dnie morskim. Z poniższego wykresu wynika też, że kabel ułożony na dnie morza ma temperaturę na powierzchni kabla ok. 20°C, a biorąc pod uwagę, że w badaniu jednym z założeń było, że woda morska ma również temperaturę 20°C, udowadnia to jak kolosalne znaczenie ma woda morska na odbiór ciepła generowanego przez kable z powierzchni kablów. Należy tutaj również zaznaczyć, że do badań przyjęto założenie, że prędkość wody morskiej będzie na poziomie 1 m/s.



Rys. 17. Rozkład temperatury w 3-żyłowym kablu 220 kV ułożonym w rurach (kolor niebieski), w dnie morskim na głębokości 2m (kolor zielony) oraz bezpośrednio na dnie morza (kolor czerwony), przy założeniu jednakowego, stałego obciążenia 926,3 A, temperatura wody 20°C [5].

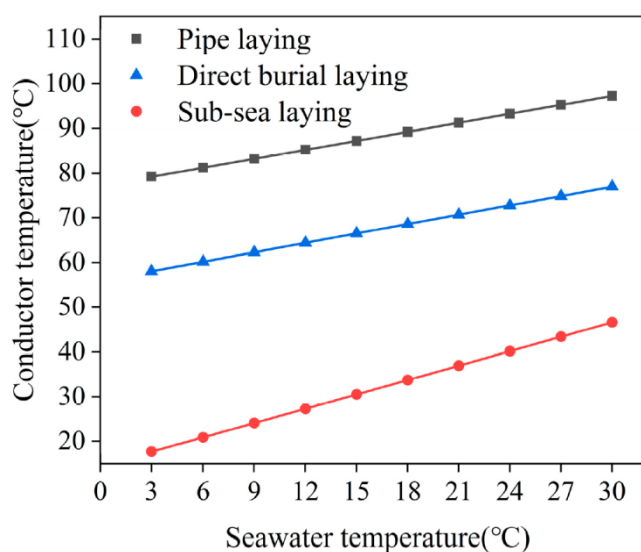
Ta sama analiza pokazuje również, że przy zastosowaniu takiego samego kabla w różnych odcinkach o różnym sposobie ułożenia, w przypadku kabli ułożonych na dnie morza mogły być one obciążone o ok. 48% większą mocą i nie dochodziłoby do przegrzewania się kabla w jego wnętrzu. Porównanie obciążalności prądowej kabla w zależności od sposobu ułożenia przedstawiono na Rys. 18. Granicę obciążenia wyznacza odcinek kabla ułożonego w rurach, ułożenie tego samego kabla w dnie morskim (bez rur) pozwala zwiększyć obciążalność o ok. 39%, natomiast ułożenie na dnie morza aż o 48 %.

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00



Rys. 18. Porównanie obciążalności prądowej kabla morskiego 220 kV w zależności od sposobu ułożenia [5].

Dalszy ciąg badań [5] pokazuje zmiany temperatury żył roboczych kabla 220 kV, przy tym samym, zakładanym obciążeniu, ale w funkcji zmieniającej się temperatury wody. Wyniki obliczeń przedstawiono na poniższym Rys. 19.



Rys. 19. Zmiana temperatury żyły roboczej kabla morskiego w zależności od temperatury wody morskiej w trzech różnych metodach ułożenia [5].

W tym samym opracowaniu [5] przeprowadzono również analizę wpływu ruchu wody na temperaturę żyły roboczej kabla w zależności od sposobu ułożenia. Autorzy analizy przyjęli jako założenie, że ruchy wody morskiej nie przekraczają wartości 1 m/s (powołując się na: Melchers, R.E.; Jeffrey, R. *Influence of Water Velocity on Marine Immersion Corrosion of Mild Steel*). W związku z tym do badań przyjęto, że prędkość ruchu wody zmienia się od 0 do 1 m/s. Wyniki badań przedstawiono w tabeli poniżej, z której jednoznacznie wynika, że najmniejszy ruch wody (0,0001 m/s) znacząco obniża temperaturę żyły roboczej badanego kabla a co za tym idzie również temperaturę na powierzchni kabla i w jego otoczeniu. Dla kabla ułożonego na dnie morza temperatura jego żyły roboczej zmniejsza się o połowę. Wiadomym jest, że dla kabli ułożonych w rurach i zakopanych w dnie morskim, ruch wody nie będzie miał tak dużego wpływu, ale w nawiązaniu do przedstawionej analizy,

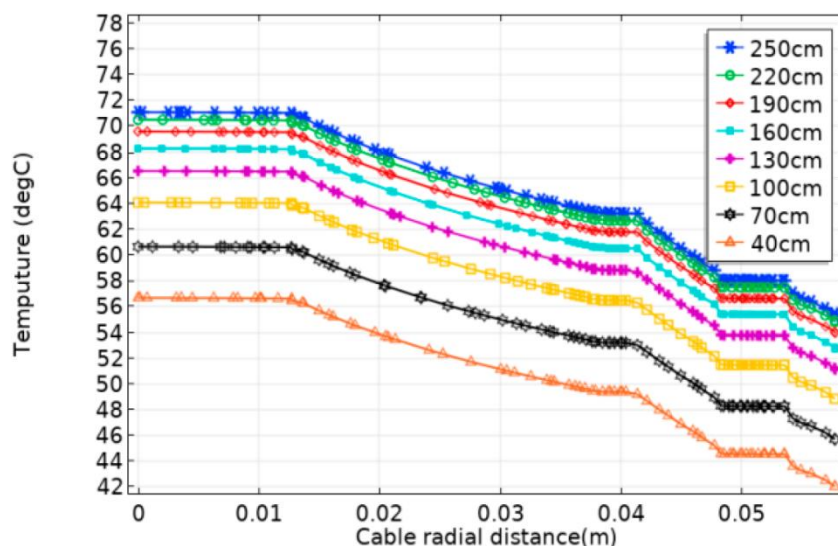
Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

temperatura żyły roboczej kabla zakopanego na głębokości 2,0 m w dnie morskim potrafi zmniejszyć się o 6 stopni już przy minimalnym ruchu wody. Tabela pokazuje również, że większa prędkość ruchów wody ($>0,005$ m/s) nie wpływa już na zmniejszenie temperatury badanego kabla.

Laying Method	Seawater Velocity (m/s)	Conductor Temperature (°C)	Cable Ampacity (A)
Sub-sea laying	0	79.98	984.7
	0.0001	48.70	1352.0
	0.0005	43.63	1469.7
	0.005	39.69	1598.2
	0.010	38.83	1629.9
	0.100	35.78	1759.3
	1.000	35.67	1764.1
Direct burial laying	0	76.52	1008.8
	0.0001	70.27	1058.5
	0.0005	69.97	1061.5
	0.005	69.95	1061.3
	0.010	69.95	1061.2
	0.100	69.95	1061.2
	1.000	69.95	1061.2
Pipe laying	0	96.15	896.6
	0.0001	90.81	922.1
	0.0005	90.58	923.4
	0.005	90.55	923.5
	0.010	90.55	923.5
	0.100	90.55	923.5
	1.000	90.55	923.5

Rys. 20. Wpływ ruchów wody morskiej na temperaturę żyły roboczej kabla i jego obciążalność

Zgodnie z badaniami opisanymi w powyższej analizie [5], przy założeniu stałego obciążenia kabla 220 kV i stałej przewodności cieplnej osadu dna morskiego pokazano zmianę temperatury żyły roboczej kabla w zależności od głębokości zakopania. Analiza pokazuje, że zmniejszenie obciążalności kabla (wzrost temperatury żyły roboczej) pomiędzy kablem zakopanym na głębokości 1,5 m w stosunku do tego zakopanego na głębokości 2,5 m nie jest już tak znaczące (zysk ok. 2-3 °C, 10-13 A).

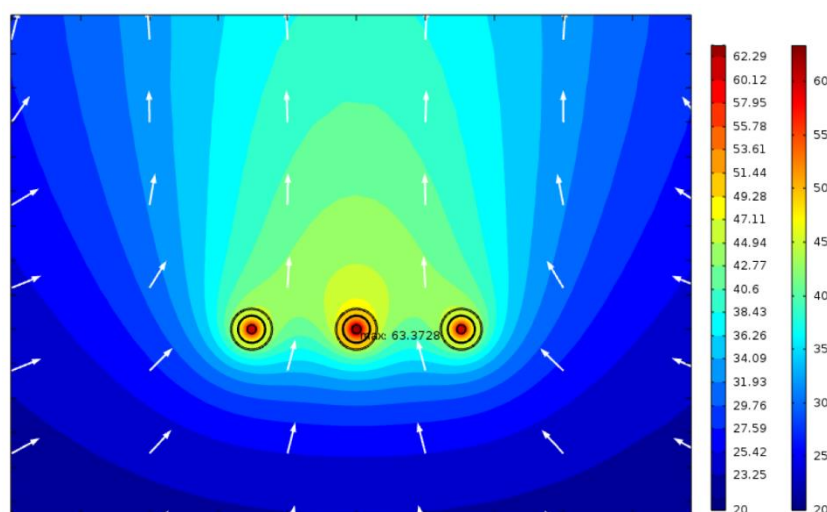


Rys. 21. Wpływ głębokości zakapania kabla w dnie morskim na jego temperaturę. Oś pozioma to dystans od środka kabla do jego warstwy zewnętrznej.

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

4.1.6 Kondukcja i konwekcja naturalna

W podsumowaniu analizy przeprowadzonej w [6], jednoznacznie stwierdzono, że obciążalność kabli w warunkach morskich nie może być modelowana według standardowego podejścia jak dla warunków lądowych. W warunkach morskich należy uwzględniać konwekcję naturalną, na której skuteczność wpływa przepuszczalność, porowatość oraz przewodność termiczna dna morskiego. Na poniższym rysunku przedstawiono rozkład temperatury wokół kabla w porowatym, mocno nasyconym wodą otoczeniu. Migracja wilgoci przedstawia rozkład ciepła wokół kabla, a „utracona” wilgoć w osadzie jest zastępowana wodą znajdującą się powyżej. Białe strzałki wskazują ruch wody wewnątrz domen porowatych. Analiza udowodniła również, że maksymalna temperatura przewodnika powstała w wyniku strat Joula (czyli ilość ciepła generowanego przez przewodnik zależna od rezystancji, natężenia prądu i czasu przepływu) wynosi $63,3^{\circ}\text{C}$ w wyniku wpływu większego odbioru generowanego ciepła przez otoczenie. Dla porównania przy klasycznym podejściu wynosiłaby 90°C . Pokazuje to łączny efekt wymiany ciepła na przewód i daje możliwość poprawy obciążalności prądowej [6].



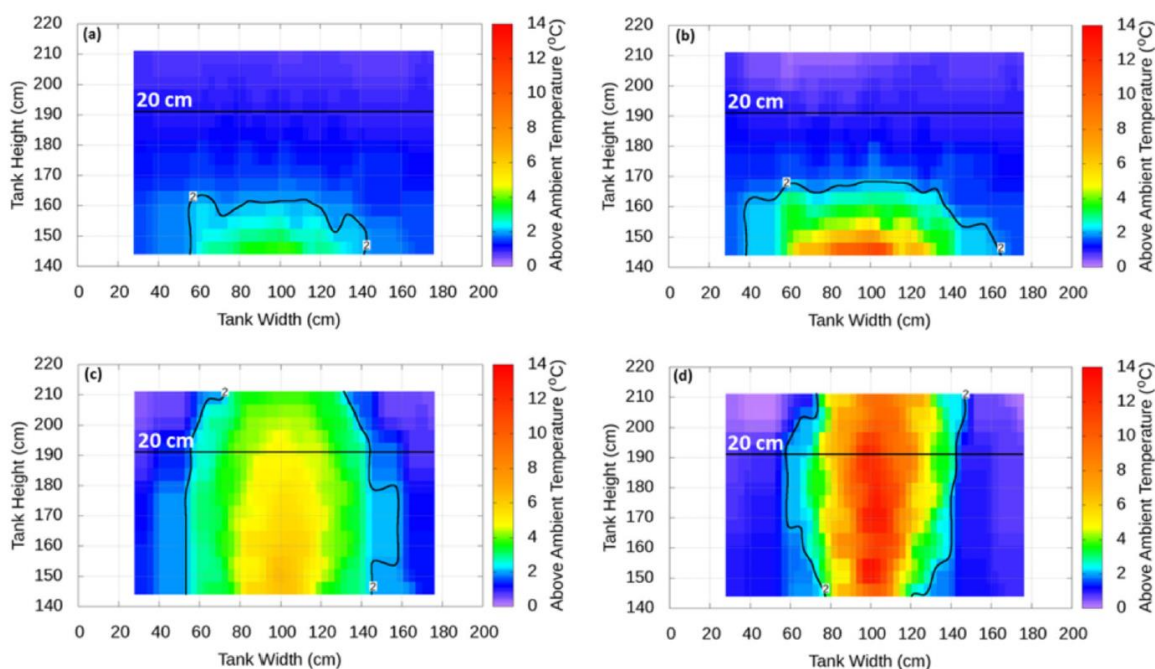
Rys. 22. Rozkład temperatury dla kabla otoczonego osadem o dużym nasyceniu wodą [6]

Kolejne badania wykazują wpływ przepuszczalności osadu dna morskiego na rozchodzenie się temperatury w tym osadzie. Na poniższym zestawieniu wyników badań dla gruntów w różnej przepuszczalności stwierdzono, że grunty o średniej i wysokiej przepuszczalności przenoszą ciepło z otoczenia kabla w górne warstwy osadu dna morskiego. Natomiast badanie było wykonywane w zamkniętym zbiorniku ($2 \times 2,5 \times 0,11$ m), gdzie źródło ciepła było zlokalizowane ok. 1,0 m poniżej dna [8].

Jednak naszym zdaniem, jak większość dotychczas przeprowadzonych badań, nie zostały w tym przypadku uwzględnione wszystkie zjawiska jakie mogą zachodzić w osadach dna morskiego, jeśli uwzględnia się większą lub mniejszą przepuszczalność. Jak wcześniej wykazano, najmniejszy ruch wody morskiej powoduje, że temperatura wokół kabli znacząco spada. Należy się tu pokusić o stwierdzenie, że w rzeczywistych warunkach, dla gruntów przepuszczalnych, ogromne znaczenie dla

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

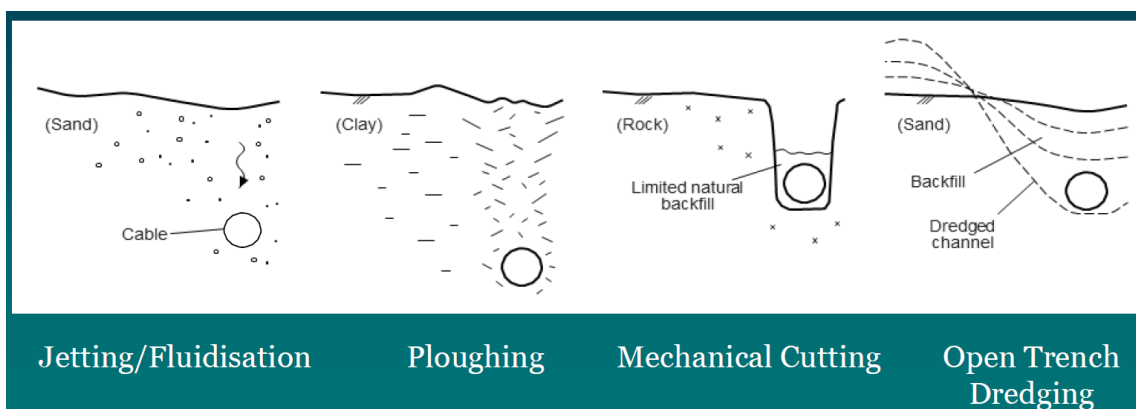
temperatury osadu dna morskiego będzie miała wpływ przemieszczająca się ogromna masa wody o ustalonej temperaturze tuż nad dnem, jak również w osadach dna morskiego, i będzie to zjawisko tym intensywniejsze, im większa wartość przepuszczalności gruntu będzie uwzględniona. Natomiast według nas to badanie (jak również inne obserwacje przytoczone w niniejszym opracowaniu), nie uwzględniają wszystkich efektów mogących zachodzić na dnie morza. Przykładowo jak weźmiemy pod uwagę chociażby ostatni wykres na poniższym rysunku, na którym założono grunt mocno przepuszczalny to obrazowano na nim rozproszenie temperatury pochodzące od źródła. Jednak, należy zauważyć, że jeżeli grunt jest mocno przepuszczalny, to również ogrom wody morskiej działający jak chłodnica wnika w dno morza i z bardzo dużym prawdopodobieństwem należy stwierdzić, że takiego (jak pokazano na wykresie) wzrostu temperatury na głębokości ok. 20 cm, nie zaobserwujemy. Dodając do tego nawet najmniejszy ruch wody (opisany w innej części opracowania) efekt chłodzenia dna oraz kabla będzie mocno spotęgowany. Dla przypomnienia, opisane badanie przeprowadzono w szklanym zbiorniku o ograniczonej ilości wody.



Rys. 23. Rozkład różnicy temperatury powyżej temperatury otoczenia nad kablem morskim w zależności od przepuszczalności osadów dna morskiego. Rozkład temperatury dla stanu ustalonego dla osadów dna morskiego (~80 cm powyżej źródła ciepła) – na wykresach oznaczono znak głębokości 20 cm oraz kontur 2°C. Wykresy (a,b) dla osadów o niskiej przepuszczalności ($1,41 \times 10^{-13} \text{ m}^2$) przewodzących reżimów termicznych o temperaturze źródła (powierzchni kabla) odpowiednio 18 i 60 °C powyżej otoczenia; oraz (c, d) wysokiej przepuszczalności ($1,49 \times 10^{-9} \text{ m}^2$) konwekcyjnych reżimów termicznych o temperaturze źródła (powierzchni kabla) odpowiednio 9 i 18 °C powyżej otoczenia.) [8]

W tym samym opracowaniu [8] i [7] zwrócono również uwagę na technikę zakopania kabli wraz z efektem końcowym tzn. czy i w jaki sposób kable zostaną pokryte osadem, co obrazuje poniższa grafika:

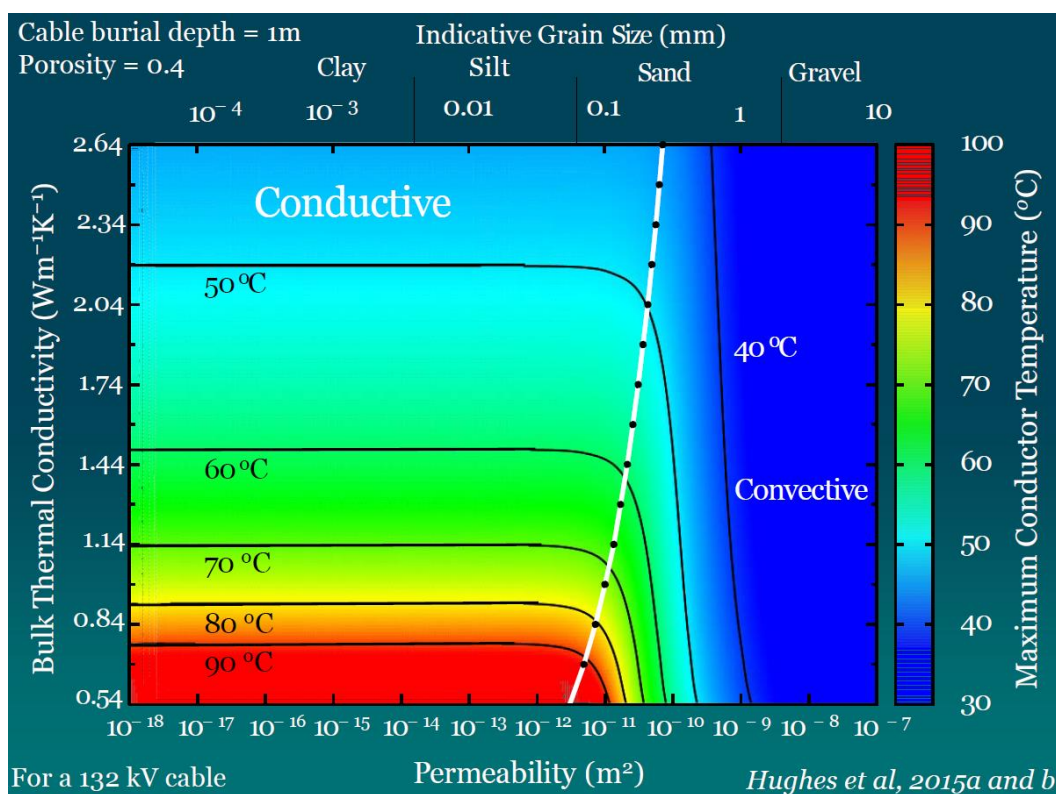
Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00



Rys. 24. Metoda zakopania kabla w dnie morskim i jego przykrycie osadem rodzimym.

We wnioskach Autorzy opracowania [7] i [8] jednoznacznie stwierdzają, że dopiero dokładne analizy na przestrzeni nadchodzących lat, z wykorzystaniem systemu DTS (distributed temperature sensing) przy dokładnym rozpoznaniu składu i parametrów osadów dna morskiego, pozwolą określić wpływ wszystkich zjawisk na temperaturę kabli i osadu dna morskiego występującą na głębokości 20-30 cm poniżej dna.

Biorąc pod uwagę analizy opisane powyżej (według [6]) jak również poniższy wykres zaczerpnięty z opracowania [7], niebagatelny wpływ na temperaturę żyły roboczej kabla (poprzez zjawiska odbierania ciepła z jego powierzchni) ma właśnie parametr określany jako przepuszczalność gruntu.



Rys. 25. Wpływ rodzaju osadu dna morskiego (granulacja, przepuszczalność i przewodność cieplna) na temperaturę żyły roboczej kabla [7]

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

Kolejnym wnioskiem nasuwającym się z przeanalizowanych opracowań jest to, że w większości symulacji i badań, gdzie uwzględnia się przewodność cieplną gruntu oraz w niektórych również przepuszczalność dna morskiego, nie uwzględnia się zjawisk równoległe zachodzących. Symulacje wprowadzają nowe parametry do otoczenia pozostawiając temperaturę badanego ośrodka na tym samym poziomie. Natomiast, jak wynikałoby z powyższego wykresu, dla kabla dobranego do „złych” warunków ułożenia (w dnie o bardzo niskiej przepuszczalności wody i przewodności cieplnej), żyła robocza kabla miałaby $\sim 90^{\circ}\text{C}$, a przy zwiększających się wartościach przewodności cieplnej lub przepuszczalności, temperatura żyły roboczej kabla jest znacząco niższa (przy założeniu braku zwiększania obciążania). Te zjawiska znowu prowadzą do wniosków, że w tych „dobrych” warunkach kable są przewymiarowane (zaprojektowane ze zbyt dużą rezerwą), ale z korzyścią dla ich oddziaływań cieplnych na otoczenie.

W wynikach przeprowadzonych badań z modelowania ogrzewania dna morskiego [17] zamieszczono ocenę oddziaływania cieplnego od różnych typów kabli zainstalowanych pod dnem Morza Północnego. W opracowaniu stwierdzono, że nawet w najgorszym przypadku wzrost temperatury będzie ograniczony do bardzo wąskiego pasma nad zainstalowanym kablem o znikomym bocznym przenoszeniu ciepła. Szerokość takiego efektu będzie bardzo wąska, będzie to pas terenu mniejszy niż 1 m nad linią kablową.

4.1.7 Dynamika dna morskiego południowego Bałtyku

W opracowanym raporcie z badań odbudowy dna morskiego po wydobyciu piasku stwierdzono, że dynamika dna morskiego [16] z uwagi na prądy morskie pochodzenia wiatrowego i od fal sztormowych, jest na stosunkowo wysokim poziomie. Badania dna morskiego przeprowadzono dla obszaru oddalonego ok. 5 km od brzegu i głębokości dna morskiego do 20 m. Skanowanie dna wykonano podczas trzech rejsów statku badawczego: marzec 2009, maj 2009 oraz kwiecień 2010. W opublikowanym w 2014 roku raporcie [16] stwierdzono, że grubość obecnie ruchomej warstwy piasku na podstawie pomiarów wynosi od 0.4 do 0.8 m i zależy od rozkładu wielkości ziaren piasku.

Dynamikę dna morskiego również potwierdza opracowanie Pani Dr Magdaleny Stella z Instytutu Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku [17]. W opracowaniu stwierdzono, że synergia prądu wiatrowego z falowaniem sztormowym jest w stanie stworzyć warunki do intensywniejszego transportu osadów generując tzw. fale piaskowe na dnie morza nawet do głębokości 20m. Według przeprowadzonych obserwacji, na badanym obszarze o głębokości od 16 do 20 m stwierdzono zmarszczki denne o wysokości rzędu kilkunastu do dwudziestu centymetrów.

4.2 Kryterium 2K

Biorąc pod uwagę dostępne artykuły poświęcone oddziaływaniu kabli morskich na środowisko w większości przywoływane jest tzw. *Kryterium 2 K*, które stanowi pewnego rodzaju wytyczne opracowane przez niemiecką Federalną Agencję Ochrony Przyrody (German Federal Agency of Nature

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

Conservation – BfN). Kryterium określa, iż przekrój kabli morskich oraz głębokości zakopania powinny być tak dobrane, aby temperatura gruntu morskiego, bezpośrednio nad zakopanym kablem na głębokości ok. 20-30 cm licząc od powierzchni dna morskiego, wzrosła maksymalnie o 2°C względem temperatury, którą posiadałby ten sam grunt bez zainstalowanego kabla. Wartość ta została ustalona w celu ochrony organizmów dennych i siedlisk bentosowych przed zmianami spowodowanymi wzrostem temperatury.

Zgodnie z teorią, Kryterium 2K może zostać spełnione dzięki:

- zmniejszeniu strat generowanych w kablach poprzez zwiększenie przekroju żyły roboczej instalowanych kabli,
- zwiększenie głębokości zakopania kabli energetycznych w dnie morskim/osadzie.

Natomiast powołując się na opinię Pana Thomasa Worzyka, autora książki *Submarine Power Cables, Design, Installation, Repair, Enviromental Aspects*, [1], powyższe rozwiązania mające na celu spełnienie wytycznych BfN, wymagają rozważenia z uwzględnieniem szerszej perspektywy.

W rozważanych przypadkach pierwotnie zakopano kabel na głębokości ok. 1,0 m, co nie pozwoliło spełnić ww. kryterium. Zwiększenie zakopania kabla w dnie morskim do 1,6 m pozwala zachować wymagania kryterium 2K. Głębsze zakopanie kabla powoduje natomiast dalsze negatywne skutki takie jak:

- wydłużenie czasu instalacji kabla (ruch statków, hałas, większe zużycie paliwa);
- poszerzenie wykopu a przez to naruszenie bentosu w szerszym i większym zakresie;
- pogorszenie warunków cieplnych kabli a co za tym idzie konieczność zwiększenia przekroju żyły roboczej kabla (jeśli dla przypadku zakopania na głębokości 1,0 m spełniał graniczne kryterium obciążalności);
- wydłużony czas demontażu kabla po okresie eksploatacji.

Drugim narzędziem zaradczym, również rozważanym w tym samym punkcie książki Thomasa Worzyka, jest pozostawienie zakładanej głębokości zakopania kabla 1,0 m przy równoczesnym zwiększeniu przekroju żyły roboczej kabla. W książce podano, iż celem spełnienia kryterium 2K, przekrój żyły roboczej kabla należałoby zwiększyć o ok. 61%. Zwiększenie przekroju żyły roboczej kabla niesie za sobą następujące skutki:

- znaczące zwiększenie śladu ekologicznego (wydłużenie czasu i kosztu produkcji kabla, zwiększenie ilości potrzebnego materiału dla żyły roboczej i materiału izolacyjnego kabla);
- wydłużenie czasu instalacji kabla w dnie morskim (zwiększenie grubości kabla powoduje zwiększenie masy kabla oraz skrócenie odcinków montażowych możliwych do załadowania na statki (CLV) co przekłada się też na konieczność instalowania większej liczby muf łączących kable).

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

Biorąc pod uwagę powyższe należy zauważyć, że dążenie do spełnienia kryterium 2K mogłoby potencjalnie spowodować większe oddziaływanie na środowisko.

Z przeprowadzonych badań zawartych w opracowaniu [10], dla których założono, że symulowane kable są obciążone stałą wartością prądu (stała maksymalna generacja mocy z MFW), nagrzewają dno morskie z prędkością zależną od przewodności cieplnej dna morskiego. Badanie pokazało, że nagrzanie gruntu dna morskiego do założonej w obliczeniach temperatury maksymalnej przebiega bardzo długo (kilkadziesiąt dni) i tylko w przypadku kabli obciążonych stałą, maksymalną mocą (dla której są dobierane).

4.2.1 Wnioski dla części morskiej

- 1) W prawodawstwie polskim obecnie nie ma jednoznacznie określonych wartości dopuszczalnych przyrostu temperatury dna morskiego, w którym zostały ułożone kable elektroenergetyczne wyprowadzające moc z morskich farm wiatrowych.

W uregulowaniach zagranicznych, na przykład w wytycznych opracowanych przez niemiecką Federalną Agencję Ochrony Przyrody (German Federal Agency of Nature Conservation – BfN), przywołane jest tak zwane „Kryterium 2K”. Kryterium określa, iż przekrój kabli morskich oraz głębokość zakopania powinny być tak dobrane, aby temperatura gruntu morskiego, bezpośrednio nad zakopanym kablem na głębokości około 20-30 cm licząc od powierzchni dna morskiego, wzrosła maksymalnie o 2 stopnie względem temperatury, którą posiadałby ten sam grunt bez zainstalowanego kabla. Wartość ta została ustalona w celu ochrony organizmów dennych i siedlisk bentosowych przed zmianami spowodowanymi wzrostem temperatury. Uwzględnianie ww. kryterium, gdy weźmiemy pod uwagę badania i analizy [16] oraz [17] opisane w rozdziale 4.1.7, nie wydaje się uzasadnione, zważywszy, że na dnie Morza Bałtyckiego, głównie w jego południowej części, dochodzi do dużych ruchów osadów dennych (piasków) sięgających nawet do 80 cm. Analiza hipotetycznego przypadku zmiany temperatury osadu poniżej dna na głębokości 20-30 cm oraz określenie wpływu tych zmian temperatury na bentos znajdujący się nad kablami jest praktycznie niemożliwe, gdyż warstwa osadu dna morskiego wraz z bentosem ulega cyklicznemu przemieszczaniu.

- 2) W literaturze można spotkać różne przykłady podejścia do modelowania termicznego elektroenergetycznych kabli morskich wysokiego napięcia. W przeanalizowanych materiałach, nie znaleziono badań uwzględniających sumy wszystkich zjawisk zachodzących na dnie morza mających wpływ na temperaturę dna morskiego jak i samego kabla. W większości opracowań autorzy przedstawiają modele oparte na analizie elementów skończonych. Są też opracowania oparte na normie IEC 60287. Część autorów porównuje wyniki z tych dwóch metod i wykazuje dużą ich zbieżność w zakresie rozkładu temperatury wokół kabli zagłębionych w dnie morskim przy przyjęciu pewnych uproszeń do

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

modelu cieplnego w zakresie warunku brzegowego obliczeń jakim jest temperatura dna morskiego.

W prowadzonych obliczeniach wszyscy autorzy wprowadzają pewne uproszczenia do stosowanych metod, większość z nich w obliczeniach zakłada: stałą temperaturę dna morskiego (warunek brzegowy) w miejscu posadowienia kabli w dnie morskim i jednorodną przewodność cieplną gruntu dna lub jej odwrotność czyli rezystywność cieplnej gruntu przy pominięciu zjawiska wnikania wody morskiej w grunty dna oraz przemieszczania się mas wody przy dnie, czyli wystąpienia tak zwanego zjawiska konwekcji (zjawisko wymiany ciepła w cieczach) oraz migracji wilgoci w gruncie.

- 3) Z wszystkich przytoczonych opracowań wynika, że gdy kable w dnie morskim są zagłębiane w materiałach o wyższej rezystywności cieplnej właściwej (gliny i piaski drobne) obszar oddziaływania termicznego kabla praktycznie przestaje występować już w odległości 0,4-0,5 m od zewnętrznej powłoki kabla. Natomiast w materiałach o niższej rezystywności cieplnej właściwej (piaski grube i żwiry) sam kabel jest lepiej chłodzony, ale przemieszczenie się ogrzanych warstw wilgoci sięga wyższych poziomów.
- 4) Na zakres oddziaływania cieplnego elektroenergetycznych kabli morskich bardzo duży wpływ ma rzeczywista charakterystyka obciążeniowa kabli. Z doświadczeń z rozpoznanych instalacji wynika, że obciążenia kabli tylko w krótkich odcinkach czasowych są bliskie obciążalności maksymalnej wynoszącej 100% wartości założonych. Średnie wartości obciążenia takich kabli wahają się pomiędzy 60%-80% wartości maksymalnych co ma istotny wpływ na temperaturę żył roboczych kabli a co jest z tym związane na ilość emitowanego ciepła do otoczenia.
- 5) Należy również mieć na uwadze, że jeżeli w celu dochowania warunku „2K” konieczne będzie zagłębianie kabli na coraz większą głębokość (np. do głębokości 3,0 m poniżej dna), to sam proces instalacji kabla w dnie morskim, będzie miał znacznie większy wpływ na środowisko przyrodnicze dna morskiego, niż ewentualne lokalne oddziaływanie na głębokości 20 cm pod poziomem dna, pochodzące od przekroczenia umownej temperatury dwóch stopni Kelwina (kryterium 2K) w stosunku do temperatury wody, zważywszy na to, że sama temperatura wody przy dnie na głębokości ok. 30 m zmienia się w przeciągu roku w znacznie większym zakresie (od kilku do kilkunastu stopni).
- 6) Na bazie przeprowadzonej kwerendy literaturowej można stwierdzić, że w literaturze nie ma jednego przyjętego modelu pozwalającego na określenie oddziaływania cieplnego kabli zakopanych w dnie morskim. Istotne jest określenie jak zostały dobrane typy kabli (przekroje żył roboczych) w stosunku do charakterystyki ich dopuszczalnych obciążeń, czyli jakie wartości wyjściowe temperatury osiągną zewnętrzne warstwy kabli. Również duży wpływ na ostateczne oddziaływanie termiczne kabli mają parametry gruntu w jakim kable

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

mają być zakopane takie jak rezystywność cieplna i przepuszczalność oraz czy występują w danym obszarze nawet minimalne przemieszczenia mas wody ponad kablami.

5 Oddziaływanie termiczne kabli eksportowych w części lądowej

5.1 Wprowadzenie

Przepływ energii elektrycznej kablowymi liniami elektroenergetycznymi nie jest procesem bezstratnym, straty energii generowane są w postaci wydzielanego ciepła, w szczególności w żyłce roboczej kabla (związane są one z przepływem prądu i rezystancją żyły) i izolacji głównej kabla (straty dielektryczne). Występowanie strat energii w kablach elektroenergetycznych skutkuje nagrzewaniem się kabli i występowaniem zjawiska oddziaływania termicznego na otoczenie z chwilą wzrostu temperatury kabla (jego zewnętrznej powłoki) powyżej temperatury otoczenia.

Wielkość oddziaływania termicznego zależy od wielu czynników, z których najistotniejsze stanowią: parametry techniczne zastosowanych kabli, wartość przepływającego prądu, sposób i głębokość ułożenia linii kablowych w gruncie, obecność innych źródeł ciepła (np. innych linii kablowych), parametry gruntu (np. rezystywność cieplna, wilgotność, stopień zagęszczenia, temperatura gruntu, itp.), w którym linie kablowe zostały ułożone.

W niniejszym dokumencie, przedstawiono przykładowy rozkład temperatury wokół podziemnych linii kablowych dla założeń zdefiniowanych w punkcie 5.2 niniejszego opracowania.

5.2 Założenia do obliczeń

Na podstawie materiałów otrzymanych od Zamawiającego, w szczególności dokumentu nr C256-EP-Z-RZ-00001_C2 – *Appendix 10 pt. „Cable technical specification”*, który jest załącznikiem do studium wykonalności wyprowadzenia mocy z morskich farm wiatrowych MFW Bałtyk II i MFW Bałtyk III na odcinku lądowym, informacji w zakresie wartości obciążenia linii kablowych i minimalnej głębokości ułożenia, do obliczeń rozkładu temperatury wokół podziemnych linii kablowych przyjęto następujące założenia:

- a) wyprowadzenie mocy ze stacji morskiej do lądowych stacji elektroenergetycznych (LSE) będzie następowało na napięciu 220 kV dla 3-fazowego prądu przemiennego o częstotliwości 50 Hz:
- liczba linii (torów) kablowych 220 kV: 4 (2 tory MFW Bałtyk II i 2 tory MFW Bałtyk III)
 - sposób ułożenia kabli w torze: trójkątny (kable poszczególnych faz stykają się)
 - odległość między osiami torów: 2,5 m
 - głębokość ułożenia: 1,3 m (minimalna głębokość ułożenia)
 - prąd obciążenia każdego toru: 1000 A
 - współczynnik obciążenia linii kablowych: 1 *)
 - obciążenie torów i kabli: symetryczne
 - typ izolacji kabli: XLPE

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

- materiał żyły roboczej kabli: miedź / aluminium
- dopuszczalna długotrwała temperatura żył roboczych kabli: 90°C
- temperatura na powierzchni gruntu: 20°C (warunek brzegowy)
- średnia rezystywność termiczna gruntu: 1 m*K/W

b) wyprowadzenie mocy z lądowych stacji elektroenergetycznych (LSE) do Krajowego Systemu Elektroenergetycznego będzie następowało na napięciu 400 kV 3-fazowego prądu przemiennego o częstotliwości 50 Hz:

- liczba linii (torów) kablowych 400 kV: 2 (1 tor MFW Bałtyk II i 1 tor MFW Bałtyk III)
- sposób ułożenia kabli w torze: trójkątny (kable poszczególnych faz stykają się)
- odległość między osiami torów: 5,0 m
- głębokość ułożenia: 1,3 m (minimalna głębokość ułożenia)
- prąd obciążenia każdego toru: 1250 A
- współczynnik obciążenia linii kablowych: 1 *)
- obciążenie torów i kabli: symetryczne
- typ izolacji kabli: XLPE
- materiał żyły roboczej kabli: miedź / aluminium
- dopuszczalna długotrwała temperatura żył roboczych kabli: 90°C
- temperatura na powierzchni gruntu: 20°C (warunek brzegowy)
- średnia rezystywność cieplna gruntu: 1 m*K/W

**) Współczynnik obciążenia (LF load factor) - jest to stosunek średniej wartości prądu obciążenia do wartości maksymalnej występującej w danym okresie czasu. Obciążalność prądowa dopuszczalna długotrwałe przy współczynniku LF=1 oznacza stałą wartość średnia prądu obciążenia w danym przedziale czasu, która jest równa wartości maksymalnej prądu obciążenia.*

Do obliczeń rozkładu temperatury wokół podziemnych linii kablowych przyjęto warunki gruntowe (temperatura i średnia rezystywność cieplna gruntu) zgodne z normą IEC 60287-3-1 dla terytorium Polski. Rezystywność cieplna gruntu uzależniona jest w znacznym stopniu od wilgotności, gęstości i typu samej frakcji danego typu gruntu. Wilgotność gruntu podobnie jak temperatura ulegają okresowym zmianom w ciągu roku. Na trasie planowanych linii kablowych mogą występować różne frakcje gruntu o różnym stopniu zagęszczenia oraz o różnej miąższości. Warunki gruntowe występujące na trasie linii mogą być zróżnicowane.

Wobec powyższego, w przypadku linii kablowych na etapie przygotowania dokumentacji projektu budowlanego oraz wykonawczego zaleca się wykonanie badania rezystywności cieplnej gruntu w celu

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

poznania jej rzeczywistej wartości w miejscu ułożenia kabli. Rezystywność cieplna gruntu ma znaczący wpływ na dobór przekroju żyły roboczej kabli. Natomiast niezależnie od warunków gruntowych, czy przekroju zastosowanej żyły roboczej kabli, maksymalna dopuszczalna długotrwale temperatura żył roboczych w kablach z izolacją XLPE nie może przekroczyć 90°C, a żyły powrotnej tego kabla około 80°C.

Modele obliczeniowe

Modele obliczeniowe zastosowane na potrzeby niniejszej analizy wykonano w oparciu o normę IEC 60287, a rozkład temperatury w opracowaniu wykonano w oparciu o tzw. metodę odbić zwierciadlanych, która zakłada istnienie dwóch liniowych źródeł ciepła: źródła rzeczywistego będącego odwzorowaniem strat mocy na rezystancji żyły roboczej i strat dielektrycznych w izolacji podstawowej linii kablowej oraz jego symetrycznego odwzorowania względem powierzchni ziemi o identycznej wartości mocy jak źródło rzeczywiste, ale z ujemnym znakiem. W metodzie tej, zakłada się również, że dla ośrodka jednorodnego rezystancja termiczna gruntu jest stała i nie zależy od samego rozkładu pola temperaturowego w gruncie. W celu określenia oddziaływania cieplnego skumulowanego dla rozpatrywanego układu ułożenia linii kablowych, zastosowano zasadę superpozycji dla pól termicznych pochodzących od poszczególnych linii kablowych.

W obliczeniach, na podstawie dokumentacji nr C256-EP-Z-RZ-00001_C2 – *Appendix 10 pt. „Cable technical specification”*, dla wyprowadzeń kablowych 220 kV zamodelowano kable jednofazowe o żyły roboczej miedzianej typu XRUHKXS-WTC-2T4FS 1x1600RMS 127/220 (245) kV oraz aluminiowej typu XRUHAKXS-WTC-2T4FS 1x2500 RMS/125 127/220(245) kV, a dla linii 400 kV zamodelowano kable jednofazowe o żyły roboczej miedzianej typu XRUHKXS-WTC-2T4FS 1x2000RMS/215 220/400 (420) kV oraz aluminiowej XRUHAKXS-WTC-2T4FS 1x3000 RMS/215 220/400(420) kV. Są to kable o najmniejszym przekroju żył roboczych (miedzianych lub aluminiowych) dla poszczególnych poziomów napięć, które na obecnym wczesnym etapie prac projektowych przewiduje się, że będą źródłem maksymalnego oddziaływania cieplnego kabli na otoczenie. W celu określenia maksymalnych oddziaływań termicznych kabli na warstwę biologicznie czynną gruntu (warstwę gleby) przewiduje się ułożenie kabli na minimalnej głębokości w gruncie, tj. na głębokości 1,3 m.

Na etapie wykonywania projektów budowlanych lub projektów wykonawczych zostaną dobrane ostateczne przekroje kabli. Na trasie linii kablowych będzie zastosowanych kilka typów kabli w izolacji XLPE, które na poszczególnych odcinkach linii, będą się różnić przekrojem żyły roboczej. Natomiast maksymalna długotrwała temperatura żył roboczych w tych kablach nie przekroczy 90°C.

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

5.3 Wyniki analizy

Obliczenia rozkładu temperatury wokół linii (torów) kablowych 220 kV i 400 kV wykonano dla następujących konfiguracji geometrycznych układu kablowego:

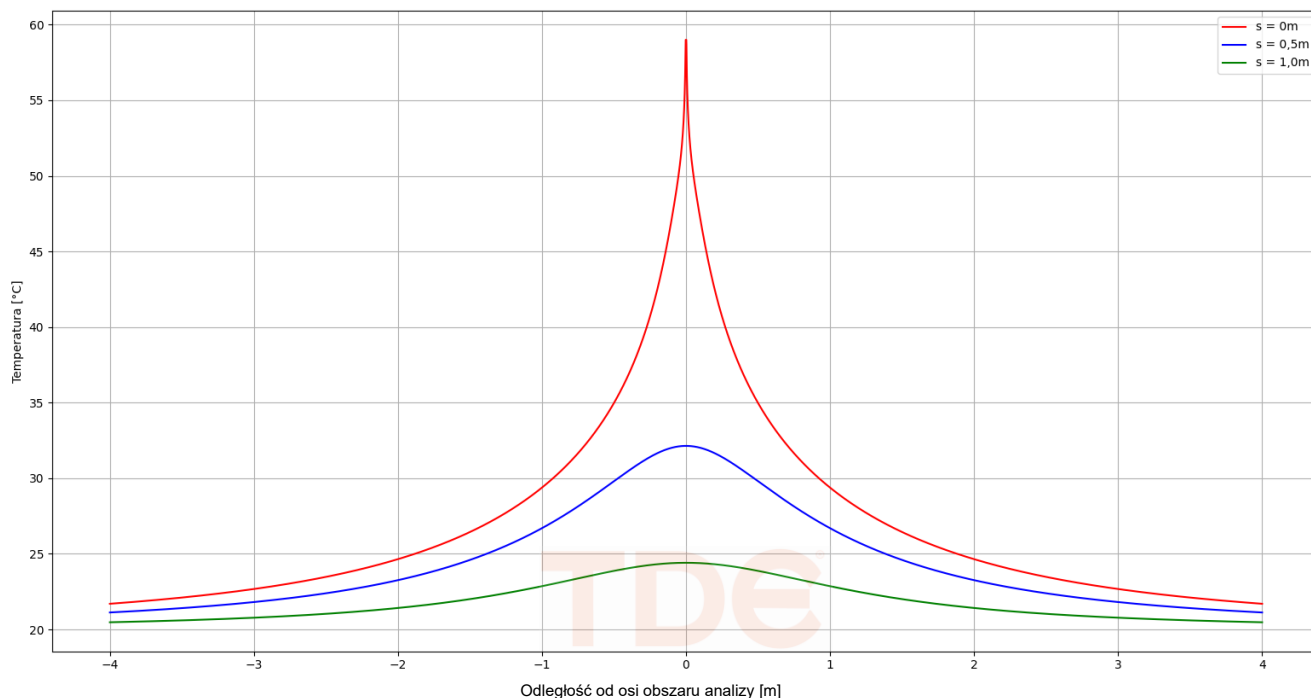
- **Przykład nr 1A.** Ułożenie kabli bezpośrednio w gruncie na minimalnej głębokości 1,3 m
– 1 tor kablowy 220 kV, kable jednożyłowe w izolacji XLPE z żyłą roboczą 1600 mm² Cu, prąd 1000 A;
- **Przykład nr 1B.** Ułożenie kabli bezpośrednio w gruncie na minimalnej głębokości 1,3 m
– 1 tor kablowy 220 kV, kable jednożyłowe w izolacji XLPE z żyłą roboczą 2500 mm² Al, prąd 1000 A;
- **Przykład nr 2A.** Ułożenie kabli bezpośrednio w gruncie na minimalnej głębokości 1,3 m
– 2 tory kablowe 220 kV, kable jednożyłowe w izolacji XLPE z żyłą roboczą 1600 mm² Cu, prąd 1000 A;
- **Przykład nr 2B.** Ułożenie kabli bezpośrednio w gruncie na minimalnej głębokości 1,3 m
– 2 tory kablowe 220 kV, kable jednożyłowe w izolacji XLPE z żyłą roboczą 2500 mm² Al, prąd 1000 A;
- **Przykład nr 3A.** Ułożenie kabli bezpośrednio w gruncie na minimalnej głębokości 1,3 m
– 4 tory kablowe 220 kV, kable jednożyłowe w izolacji XLPE z żyłą roboczą 1600 mm² Cu, prąd 1000 A. Przykład ten odzwierciedla planowaną inwestycję w zakresie wyprowadzenia mocy z farmy wiatrowej Bałtyk II i Bałtyk III przy pełnej generacji mocy w farmach;
- **Przykład nr 3B.** Ułożenie kabli bezpośrednio w gruncie na minimalnej głębokości 1,3 m
– 4 tory kablowe 220 kV, kable jednożyłowe w izolacji XLPE z żyłą roboczą 2500 mm² Al, prąd 1000 A. Przykład ten odzwierciedla planowaną inwestycję w zakresie wyprowadzenia mocy z farmy wiatrowej Bałtyk II i Bałtyk III przy pełnej generacji mocy w farmach;
- **Przykład nr 4A.** Ułożenie kabli bezpośrednio w gruncie na minimalnej głębokości 1,3 m
– 1 tor kablowy 400 kV, kable jednożyłowe w izolacji XLPE z żyłą roboczą 2000 mm² Cu, prąd 1250 A;

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

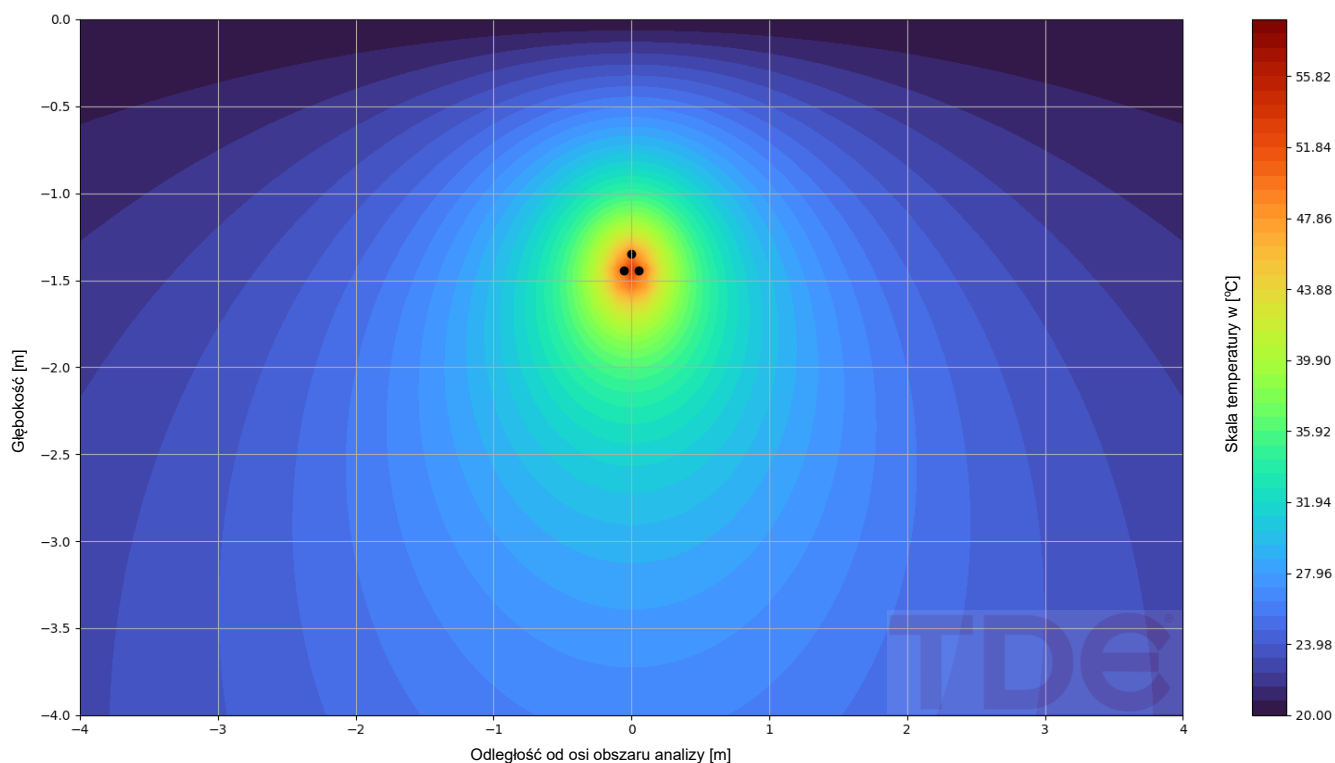
-
- **Przykład nr 4B.** Ułożenie kabli bezpośrednio w gruncie na minimalnej głębokości 2,0 m
 - 1 tor kablowy 400 kV, kable jednożyłowe w izolacji XLPE z żyłą roboczą 3000 mm² Al, prąd 1250 A;
 - **Przykład nr 5A.** Ułożenie kabli bezpośrednio w gruncie na minimalnej głębokości 1,3 m
 - 2 tory kablowe 400 kV, kable jednożyłowe w izolacji XLPE z żyłą roboczą 2000 mm² Cu, prąd 1250 A. Przykład ten odzwierciedla planowaną inwestycję w zakresie wyprowadzenia mocy z lądowych stacji elektroenergetycznych Bałtyk II i Bałtyk III a stacją elektroenergetyczną Polskich Sieci Elektroenergetycznych (PSE);
 - **Przykład nr 5B.** Ułożenie kabli bezpośrednio w gruncie na minimalnej głębokości 1,3 m
 - 2 tory kablowe 400 kV, kable jednożyłowe w izolacji XLPE z żyłą roboczą 3000 mm² Al., prąd 1250 A. Przykład ten odzwierciedla planowaną inwestycję w zakresie wyprowadzenia mocy z lądowych stacji elektroenergetycznych Bałtyk II i Bałtyk III do stacji elektroenergetycznej Polskich Sieci Elektroenergetycznych (PSE).

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

5.3.1 Przykład obliczeniowy nr 1A – wyniki



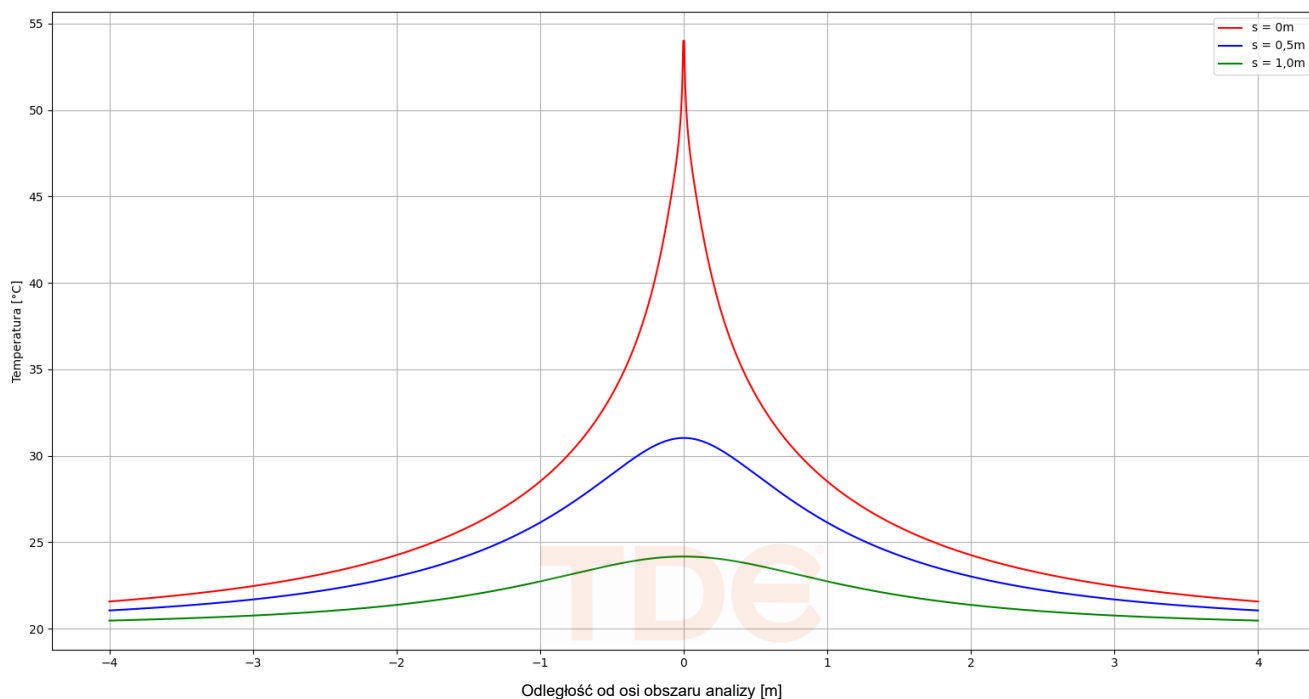
Rys. 26. Rozkład pola temperaturowego gruntu dla wybranych odległości (ozn. „s”) nad układem kablowym dla przykładu obliczeniowego nr 1A (1 tor kablowy 220 kV, kable jednożyłowe w izolacji XLPE z żyłą roboczą 1600 mm² Cu, prąd 1000 A), gdzie „s” oznaczono odległość płaszczyzny poziomej od osi kabla, na której określone są wartości temperatury gruntu.



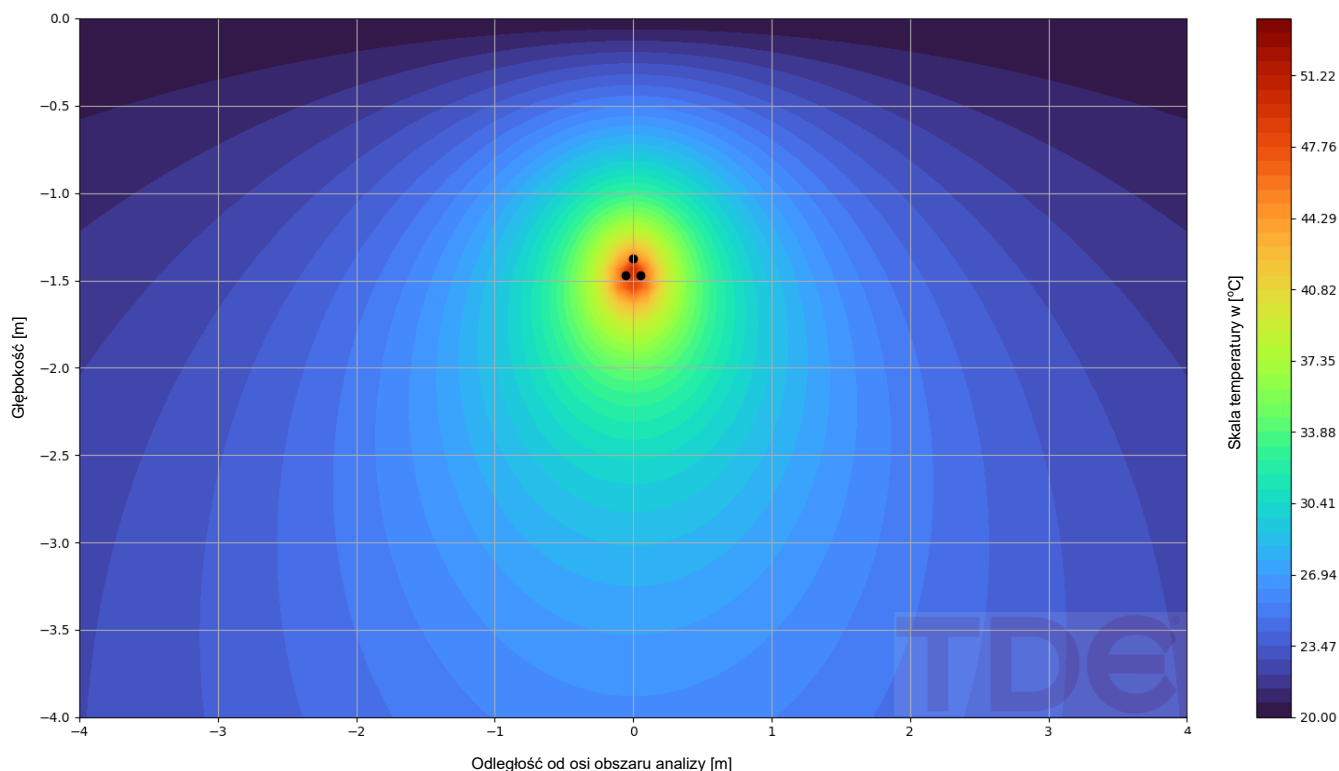
Rys. 27. Rozkład przestrzenny pola temperaturowego w gruncie wokół układu kablowego dla przykładu obliczeniowego nr 1A (1 tor kablowy 220 kV, kable jednożyłowe w izolacji XLPE z żyłą roboczą 1600 mm² Cu, prąd 1000 A).

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

5.3.2 Przykład obliczeniowy nr 1B – wyniki



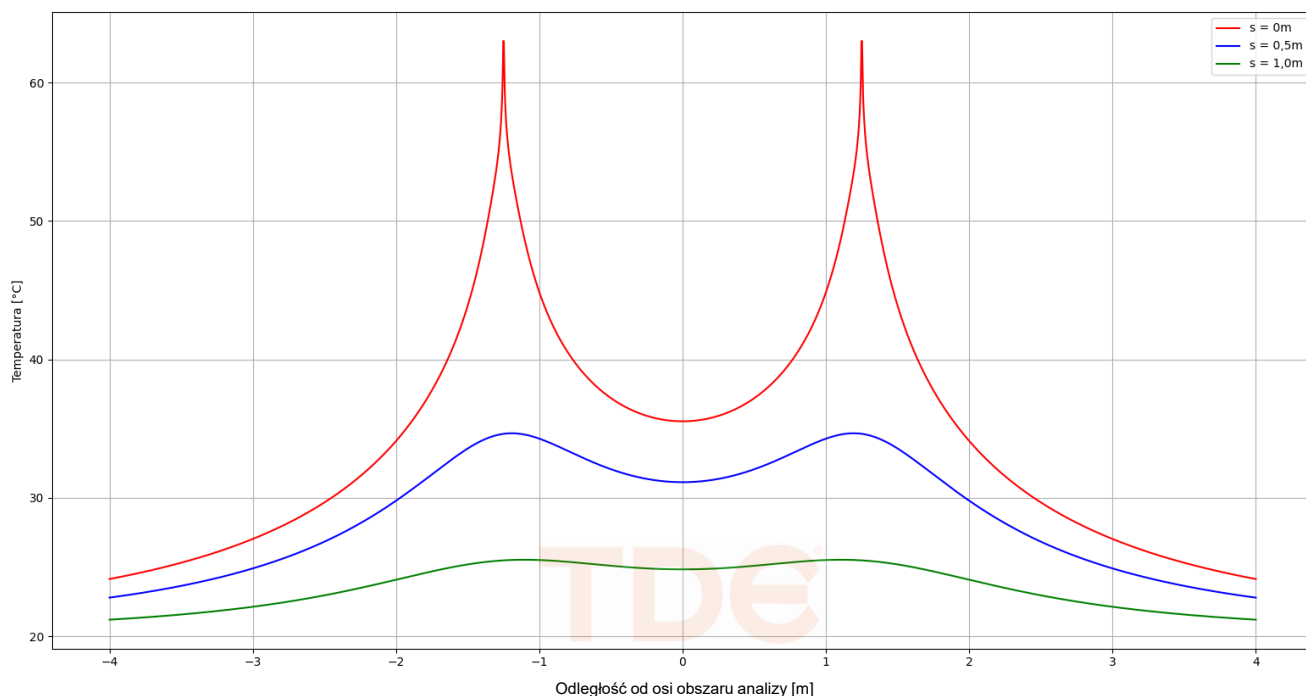
Rys. 28. Rozkład pola temperaturowego gruntu dla wybranych odległości (ozn. „s”) nad układem kablowym dla przykładu obliczeniowego nr 1B (1 tor kablowy 220 kV, kable jednożyłowe w izolacji XLPE z żyłą roboczą 2500 mm² Al, prąd 1000 A), gdzie „s” oznaczono odległość płaszczyzny poziomej od osi kabla, na której określone są wartości temperatury gruntu.



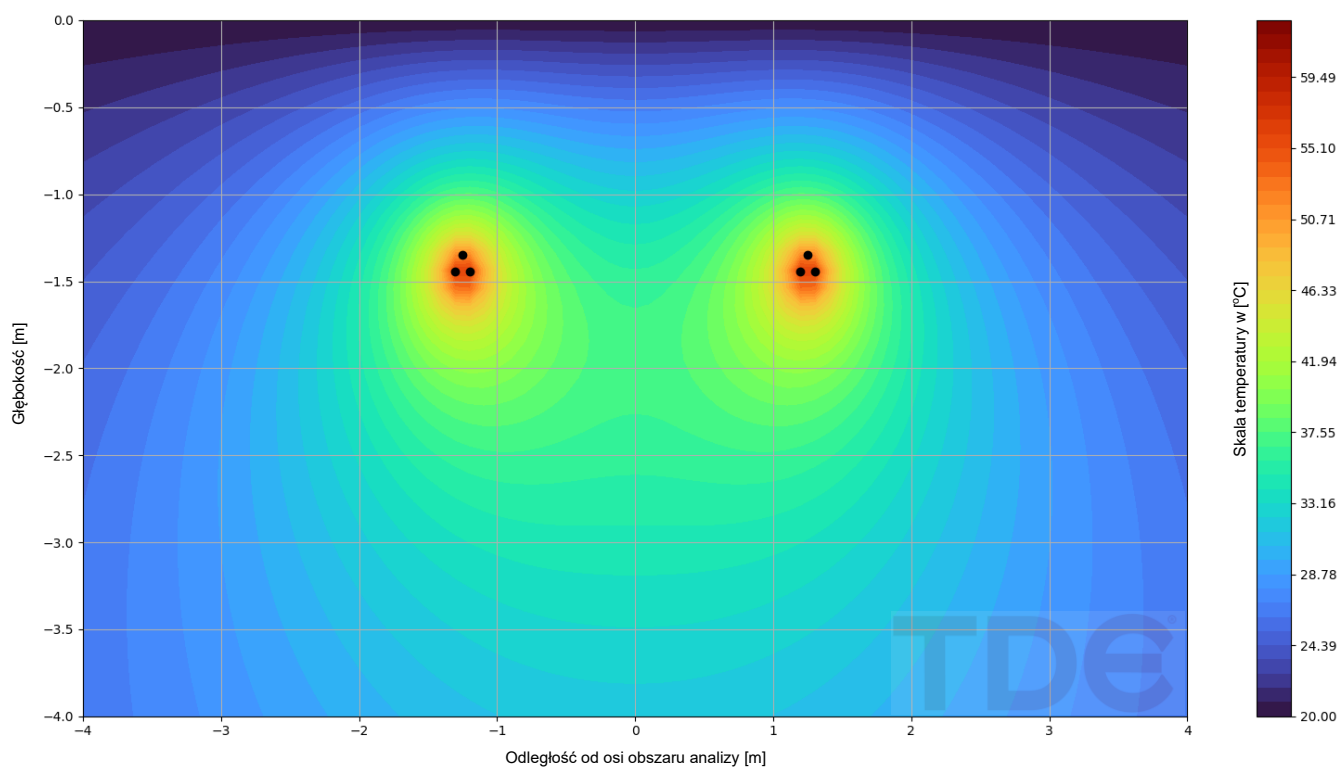
Rys. 29. Rozkład przestrzenny pola temperaturowego w gruncie wokół układu kablowego dla przykładu obliczeniowego nr 1B (1 tor kablowy 220 kV, kable jednożyłowe w izolacji XLPE z żyłą roboczą 2500 mm² Al, prąd 1000 A).

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

5.3.3 Przykład obliczeniowy nr 2A – wyniki



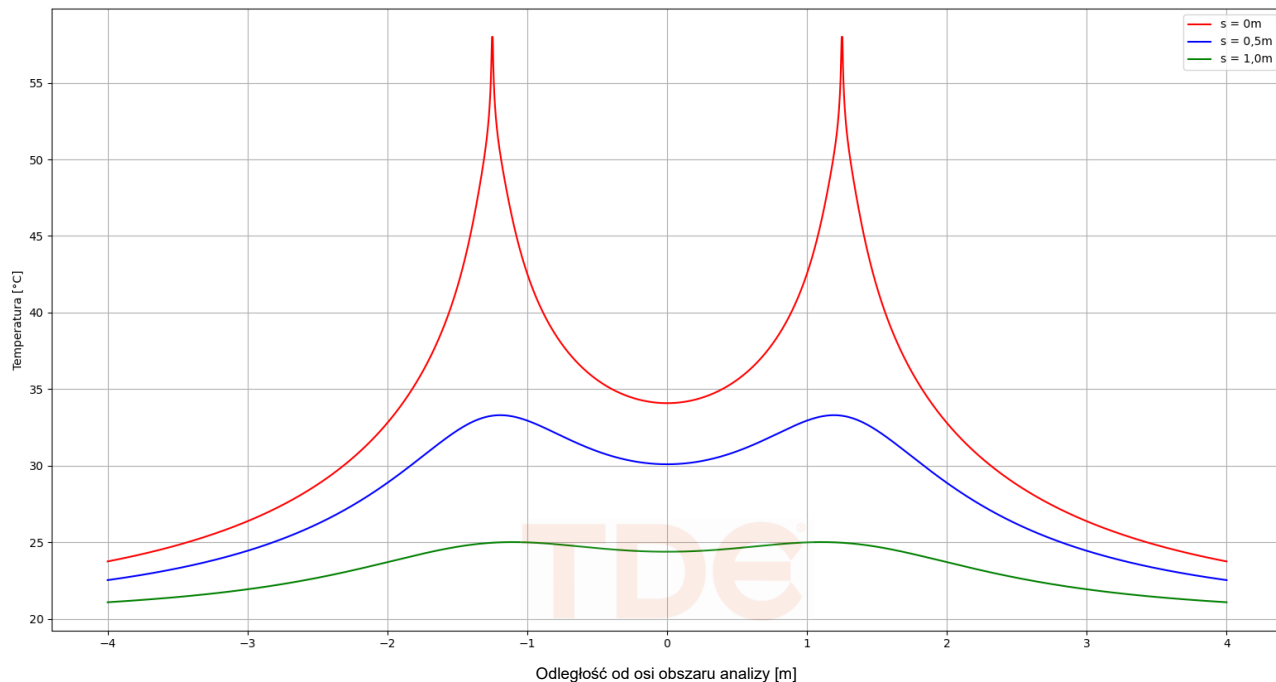
Rys. 30. Rozkład pola temperaturowego gruntu dla wybranych odległości (ozn. „s”) nad układem kablowym dla przykładu obliczeniowego nr 2A (2 tory kablowe 220 kV, kable jednożyłowe w izolacji XLPE z żyłą roboczą 1600 mm² Cu, prąd 1000 A), gdzie „s” oznaczono odległość płaszczyzny poziomej od osi kabla, na której określone są wartości temperatury gruntu.



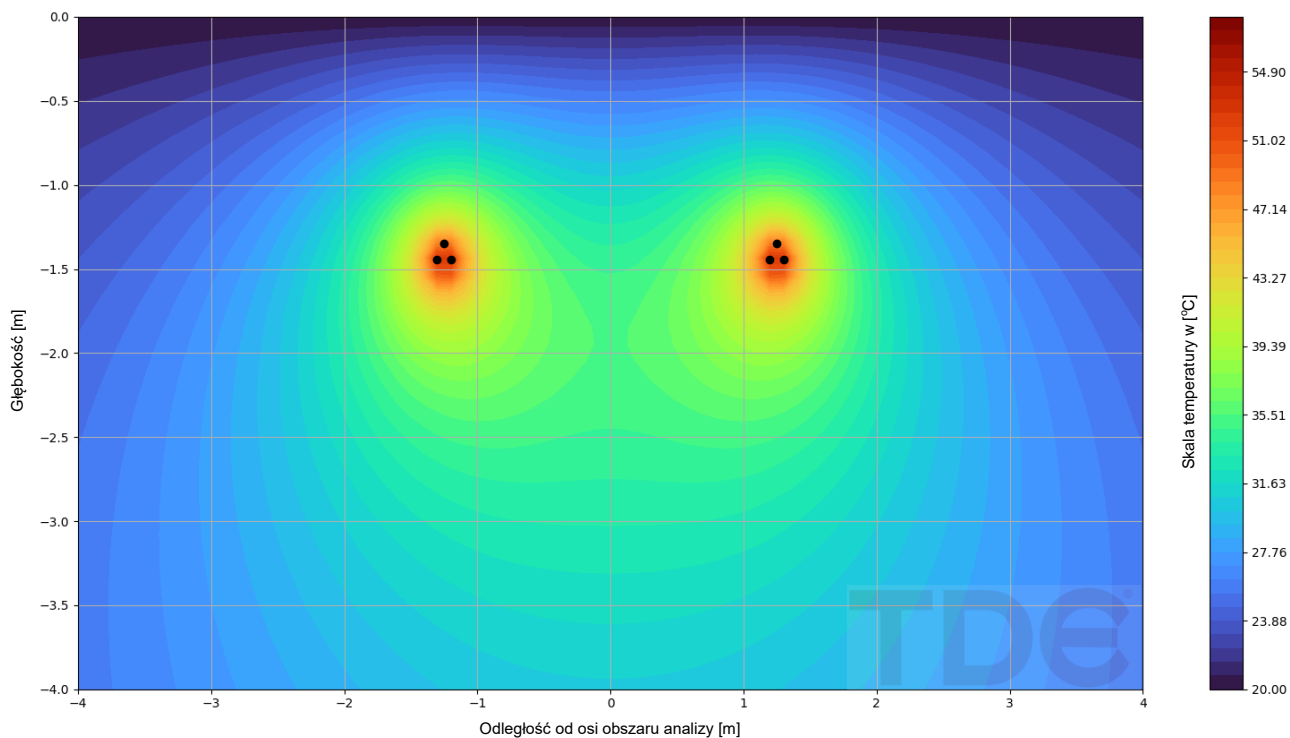
Rys. 31. Rozkład przestrzenny pola temperaturowego w gruncie wokół układu kablowego dla przykładu obliczeniowego nr 2A (2 tory kablowe 220 kV, kable jednożyłowe w izolacji XLPE z żyłą roboczą 1600 mm² Cu, prąd 1000 A).

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

5.3.4 Przykład obliczeniowy nr 2B – wyniki



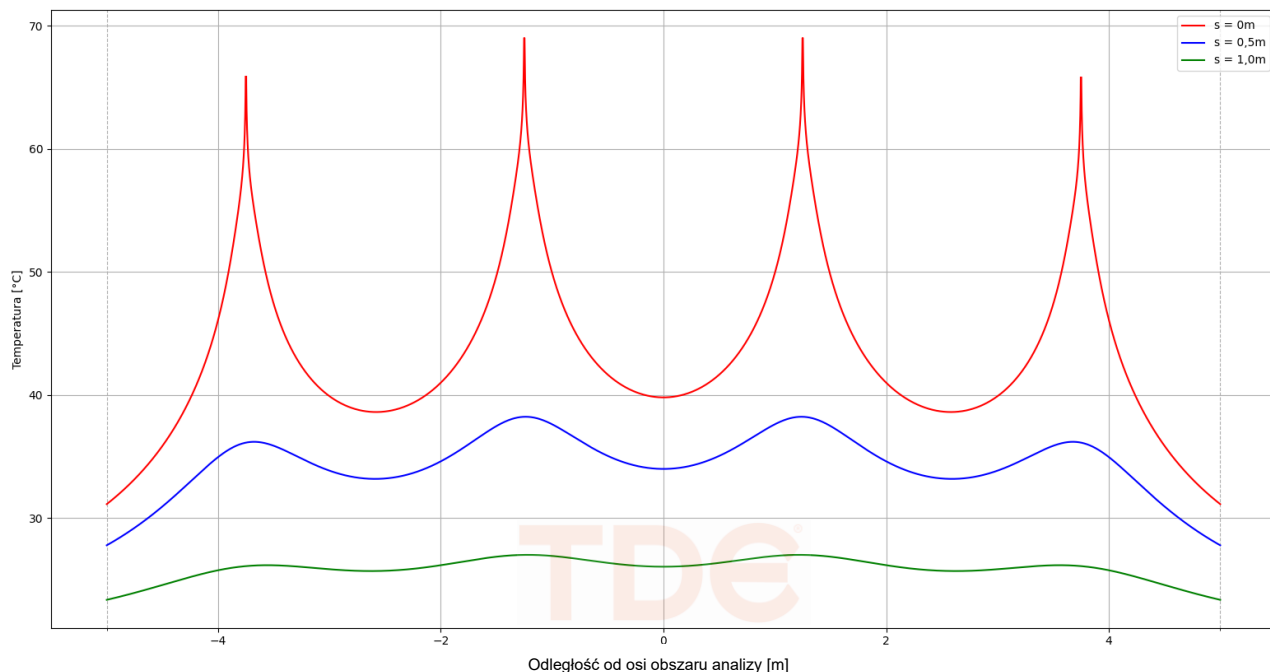
Rys. 32. Rozkład pola temperaturowego gruntu dla wybranych odległości (ozn. „s”) nad układem kablowym dla przykładu obliczeniowego nr 2B (2 tory kablowe 220 kV, kable jednożyłowe w izolacji XLPE z żyłą roboczą 2500 mm² Al, prąd 1000 A), gdzie „s” oznaczono odległość płaszczyzny poziomej od osi kabla, na której określone są wartości temperatury gruntu.



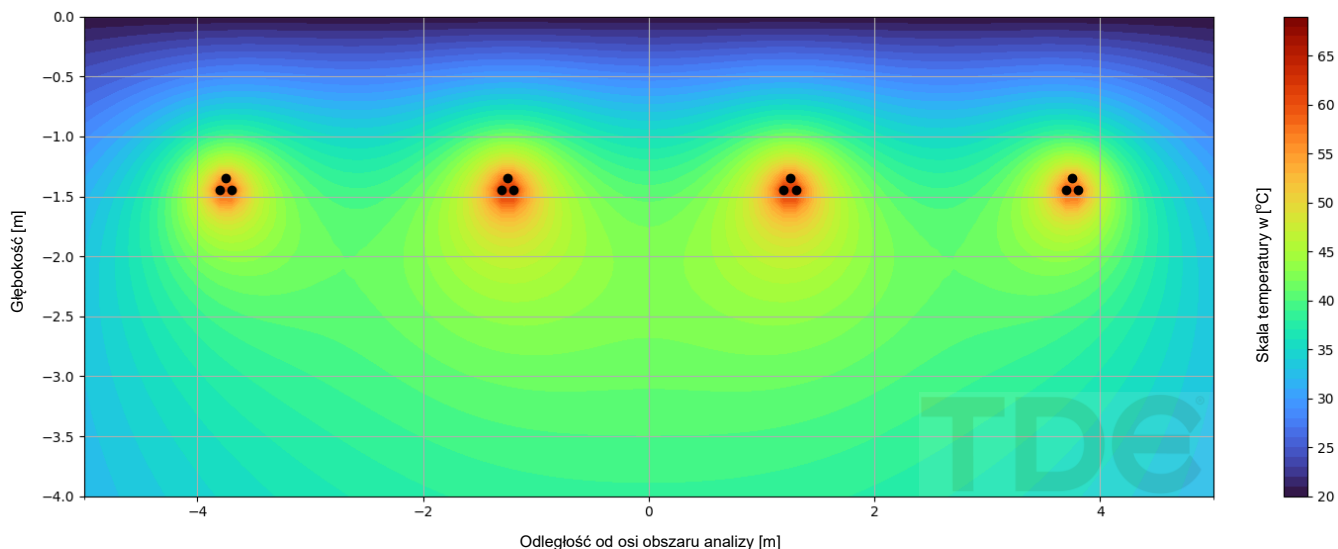
Rys. 33. Rozkład przestrzenny pola temperaturowego w gruncie wokół układu kablowego dla przykładu obliczeniowego nr 2B (2 tory kablowe 220 kV, kable jednożyłowe w izolacji XLPE z żyłą roboczą 2500 mm² Al, prąd 1000 A).

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

5.3.5 Przykład obliczeniowy nr 3A – wyniki



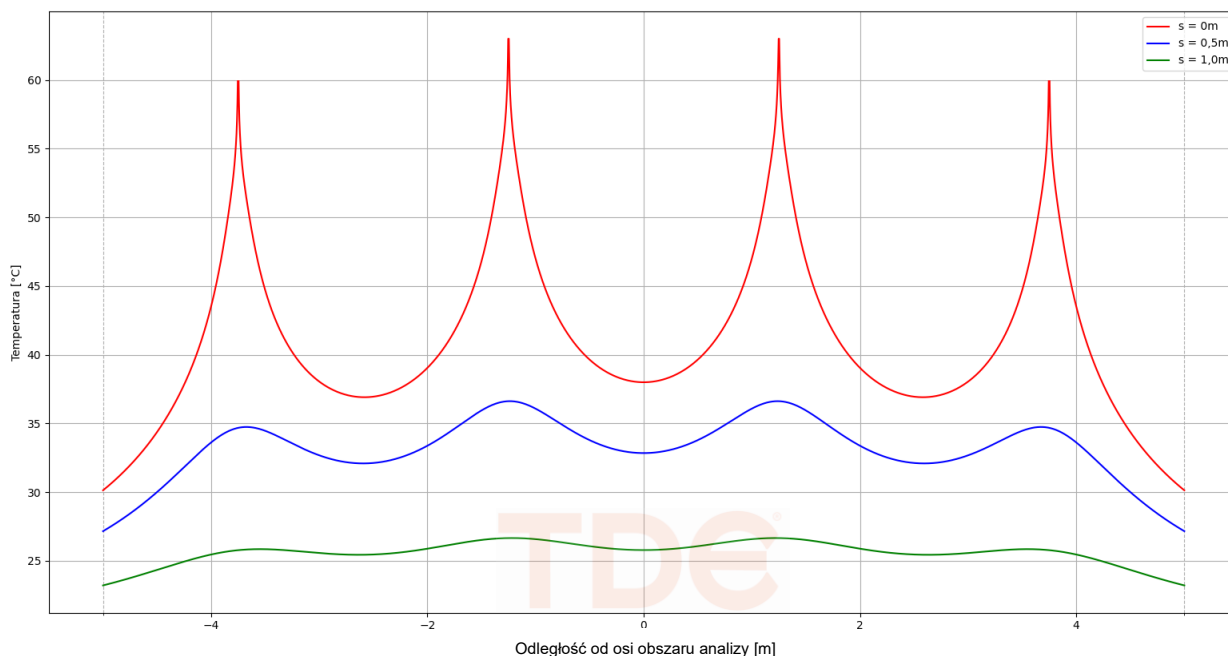
Rys. 34. Rozkład pola temperaturowego gruntu dla wybranych odległości (ozn. „s”) nad układem kablowym dla przykładu obliczeniowego nr 3A (4 tory kablowe 220 kV, kable jednożyłowe w izolacji XLPE z żyłą roboczą 1600 mm² Cu, prąd 1000 A), gdzie „s” oznaczono odległość płaszczyzny poziomej od osi kabla, na której określone są wartości temperatury gruntu. Wyprowadzenie mocy z MFW Bałtyk II i MFW Bałtyk III.



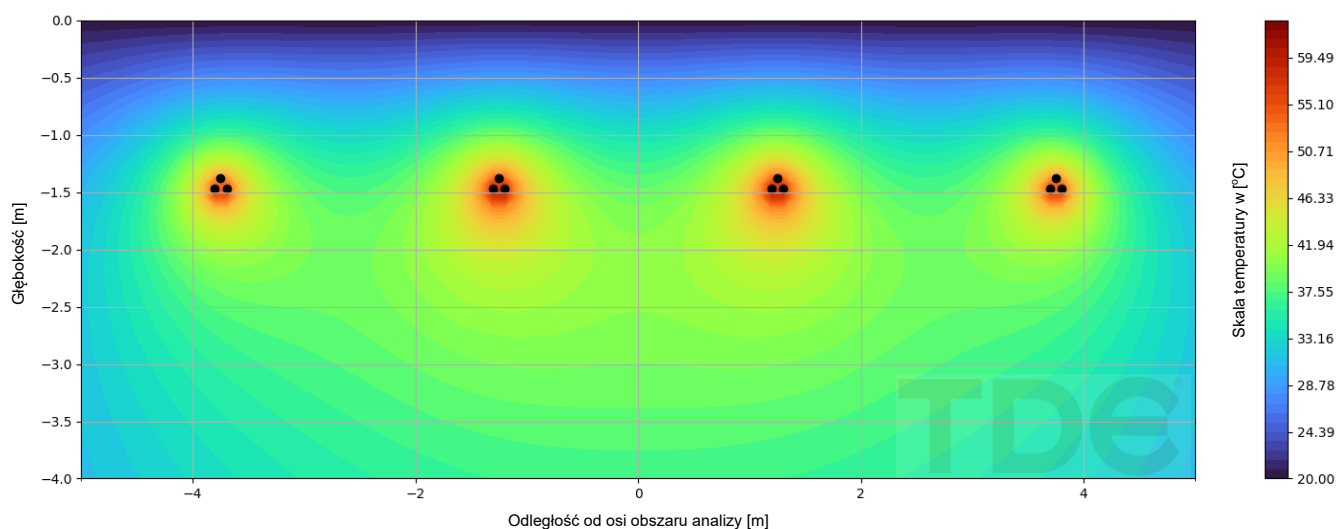
Rys. 35. Rozkład przestrzenny pola temperaturowego w gruncie wokół układu kablowego dla przykładu obliczeniowego nr 3A (4 tory kablowe 220 kV, kable jednożyłowe w izolacji XLPE z żyłą roboczą 1600 mm² Cu, prąd 1000 A). Wyprowadzenie mocy z MFW Bałtyk II i MFW Bałtyk III.

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

5.3.6 Przykład obliczeniowy nr 3B – wyniki



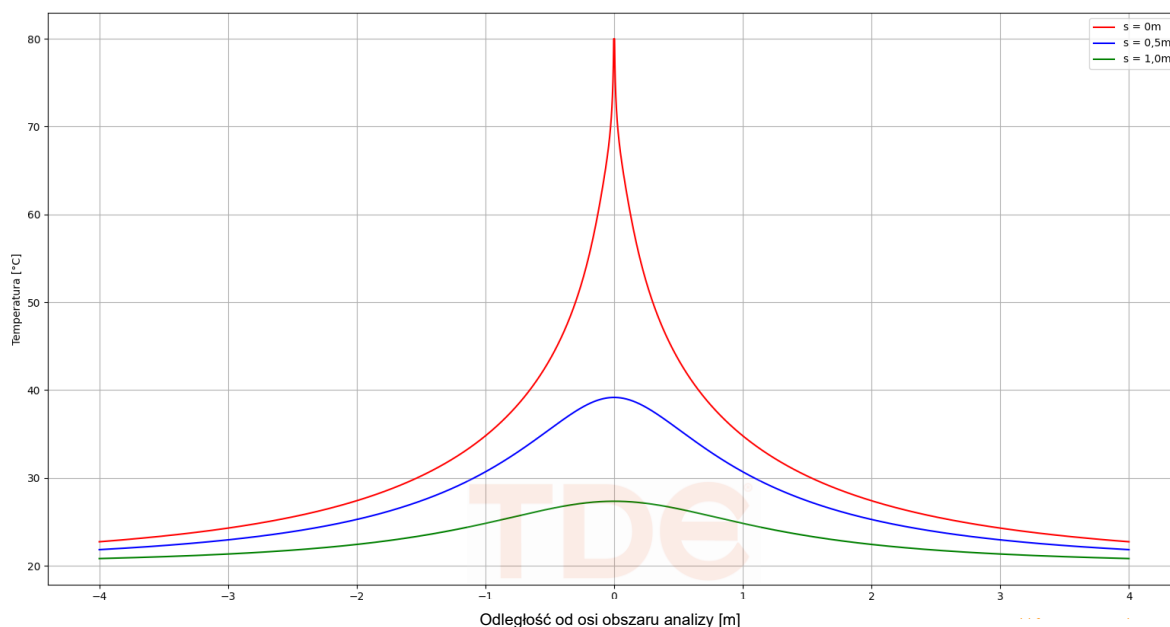
Rys. 36. Rozkład pola temperaturowego gruntu dla wybranych odległości (ozn. „s”) nad układem kablowym dla przykładu obliczeniowego nr 3B (4 tory kablowe 220 kV, kable jednożyłowe w izolacji XLPE z żyłą roboczą 2500 mm² Al, prąd 1000 A), gdzie „s” oznaczono odległość płaszczyzny poziomej od osi kabla, na której określone są wartości temperatury gruntu. Wyprowadzenie mocy z MFW Bałtyk II i MFW Bałtyk III.



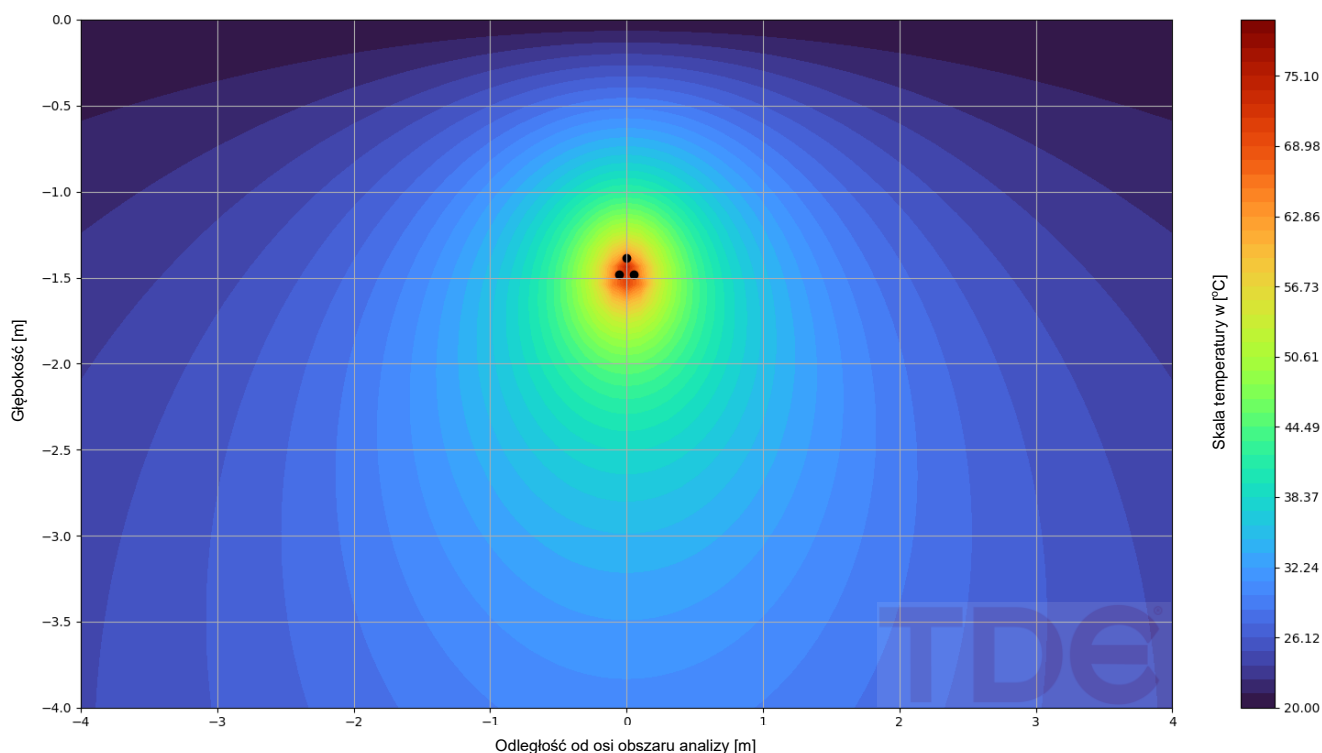
Rys. 37. Rozkład przestrzenny pola temperaturowego w gruncie wokół układu kablowego dla przykładu obliczeniowego nr 3B (4 tory kablowe 220 kV, kable jednożyłowe w izolacji XLPE z żyłą roboczą 2500 mm² Al, prąd 1000 A). Wyprowadzenie mocy z MFW Bałtyk II i MFW Bałtyk III.

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

5.3.7 Przykład obliczeniowy nr 4A – wyniki



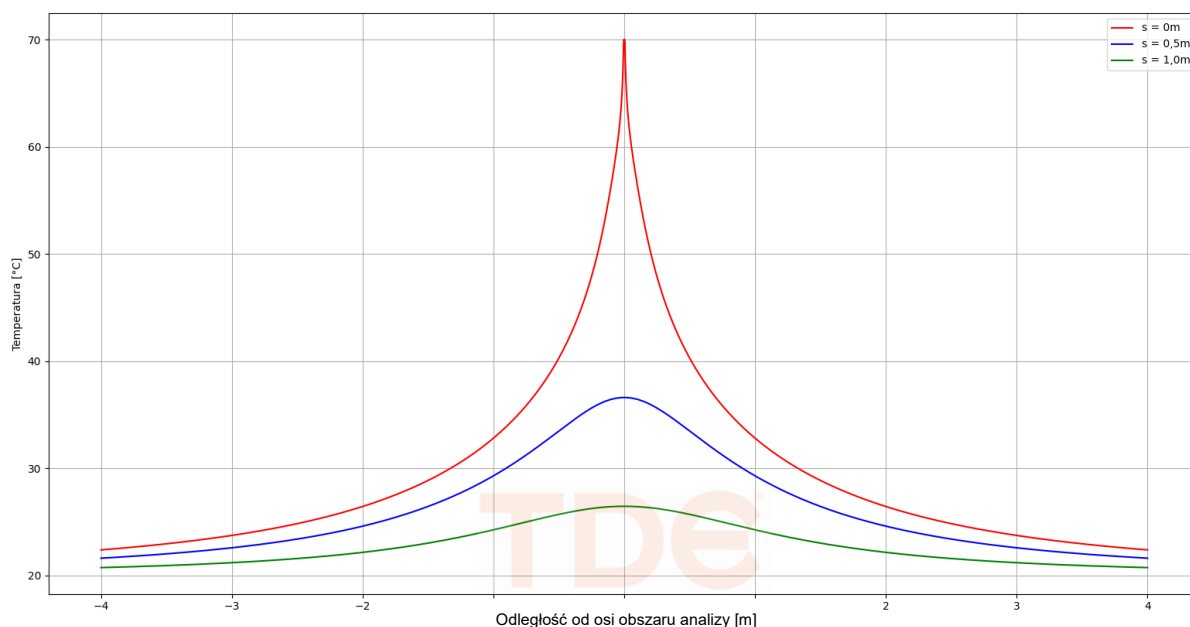
Rys. 38. Rozkład pola temperaturowego gruntu dla wybranych odległości (ozn. „s”) nad układem kablowym dla przykładu obliczeniowego nr 4A (1 tor kablowy 400 kV, kable jednożyłowe w izolacji XLPE z żyłą roboczą 2000 mm² Cu, prąd 1250A), gdzie „s” oznaczono odległość płaszczyzny poziomej od osi kabla, na której określone są wartości temperatury gruntu.



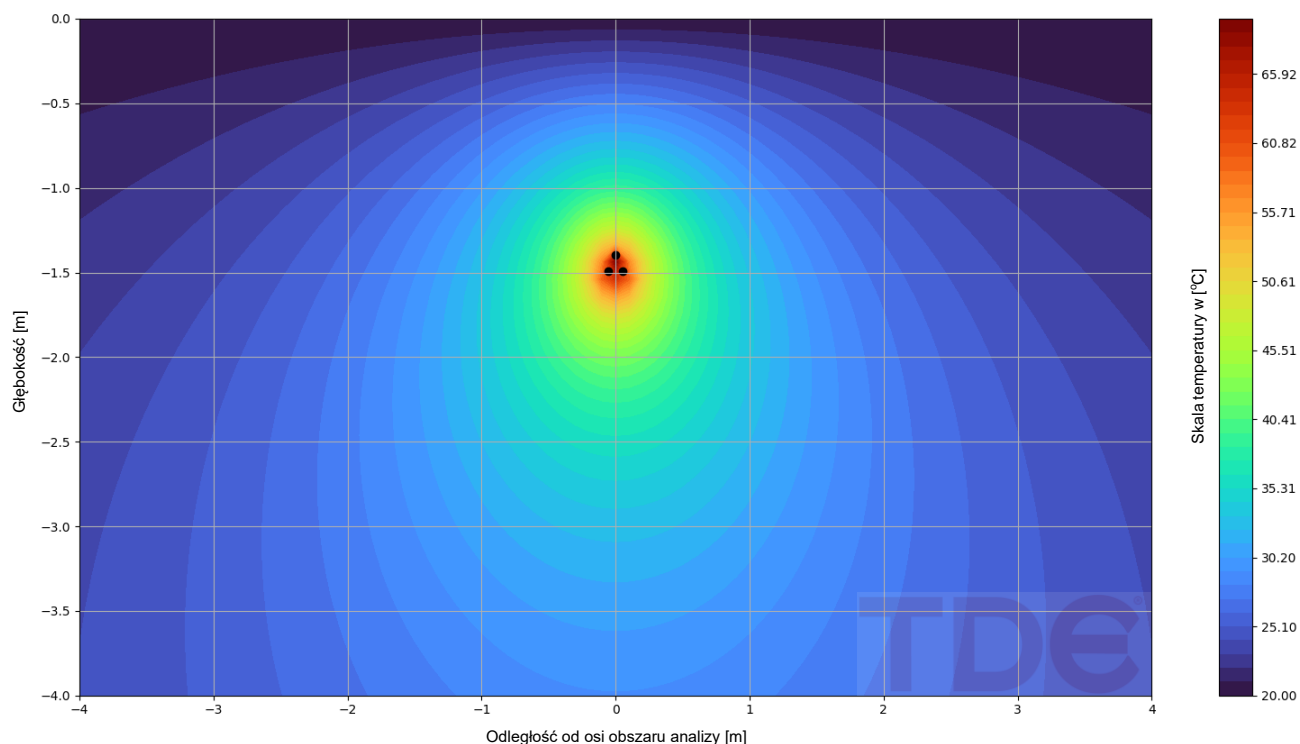
Rys. 39. Rozkład przestrzenny pola temperaturowego w gruncie wokół układu kablowego dla przykładu obliczeniowego nr 4A (1 tor kablowy 400 kV, kable jednożyłowe w izolacji XLPE z żyłą roboczą 2000 mm² Cu, prąd 1250 A).

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

5.3.8 Przykład obliczeniowy nr 4B – wyniki



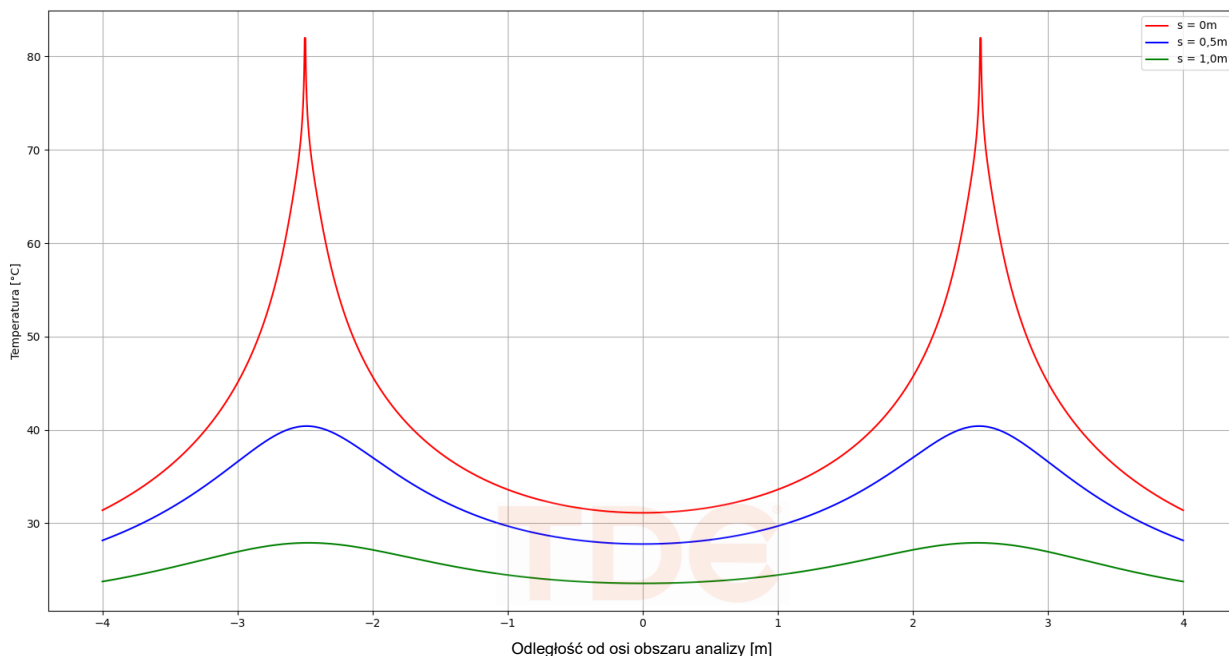
Rys. 40. Rozkład pola temperaturowego gruntu dla wybranych odległości (ozn. „s”) nad układem kablowym dla przykładu obliczeniowego nr 4B (1 tor kablowy 400 kV, kable jednożyłowe w izolacji XLPE z żyłą roboczą 3000 mm² Al, prąd 1250A), gdzie „s” oznaczono odległość płaszczyzny poziomej od osi kabla, na której określone są wartości temperatury gruntu.



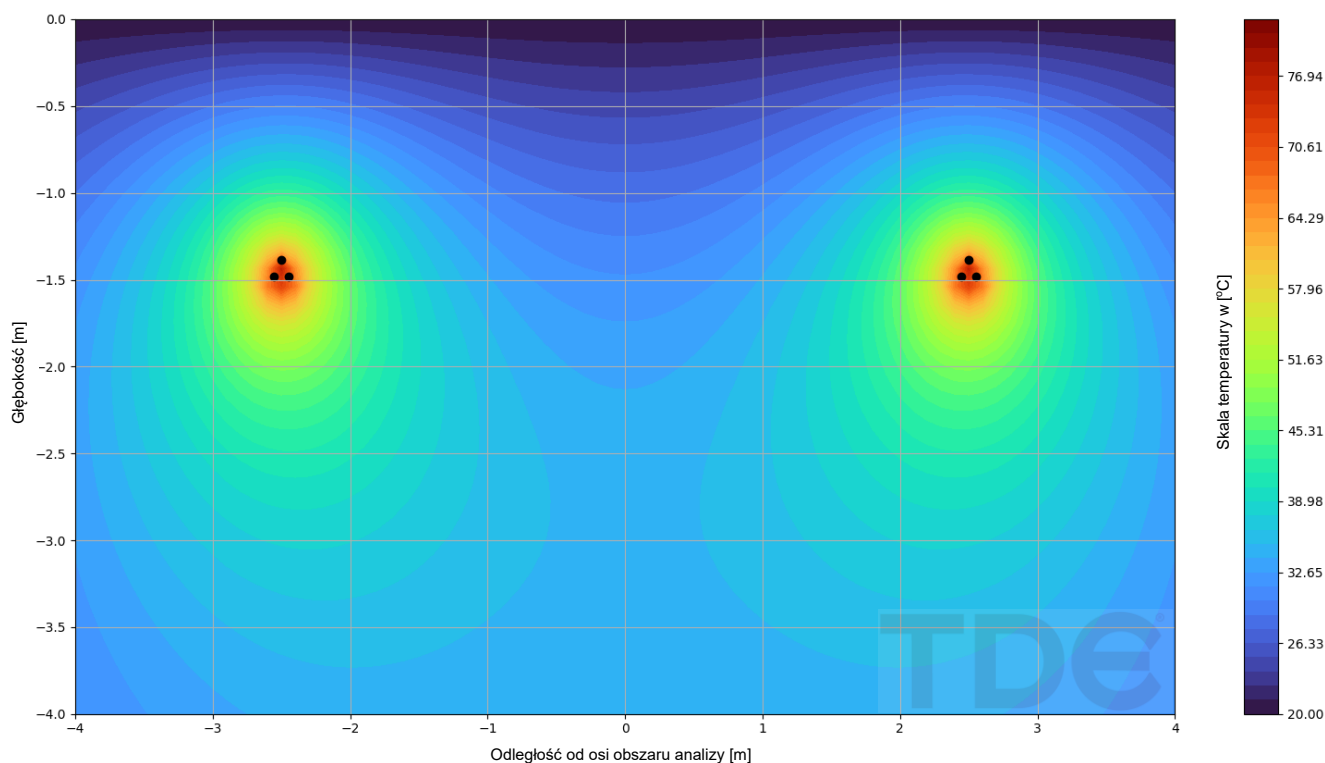
Rys. 41. Rozkład przestrzenny pola temperaturowego w gruncie wokół układu kablowego dla przykładu obliczeniowego nr 4B (1 tor kablowy 400 kV, kable jednożyłowe w izolacji XLPE z żyłą roboczą 3000 mm² Al, prąd 1250 A).

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

5.3.9 Przykład obliczeniowy nr 5A – wyniki



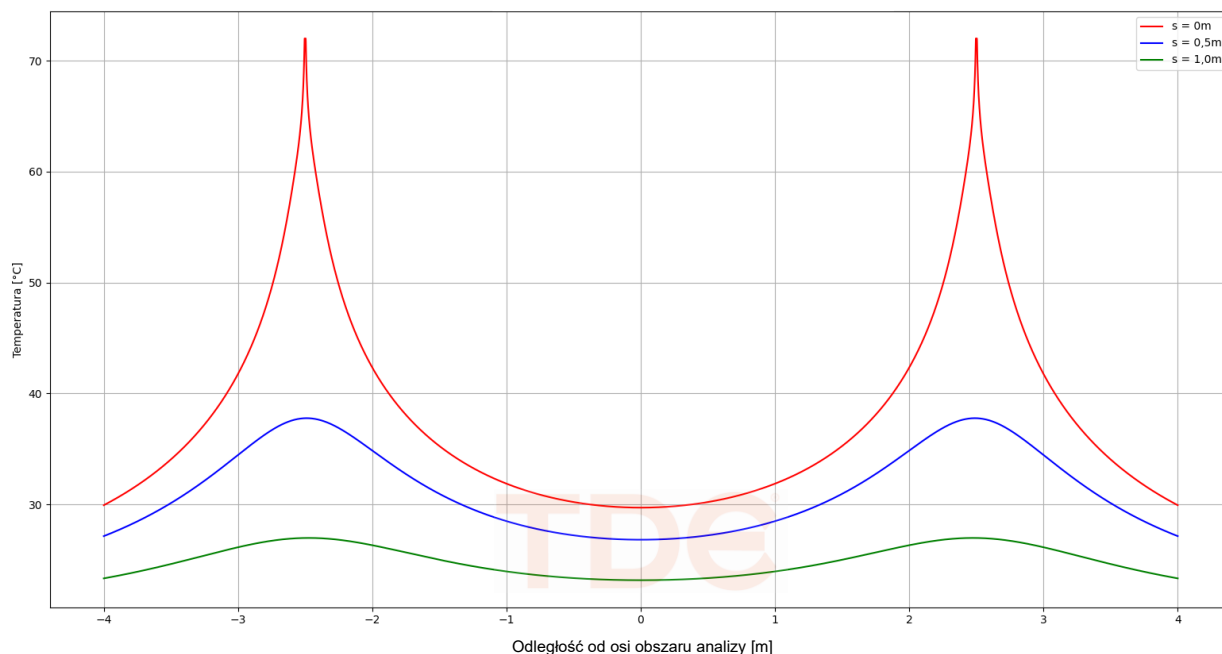
Rys. 42. Rozkład pola temperaturowego gruntu dla wybranych odległości (ozn. "s") nad układem kablowym dla przykładu obliczeniowego nr 5A (2 torry kablowe 400 kV, kable jednożyłowe w izolacji XLPE z żyłą roboczą 2000 mm² Cu, prąd 1250 A). Połączenie między stacjami lądowymi Bałtyk II i Bałtyk III a stacją Polskich Sieci Przesyłowych.



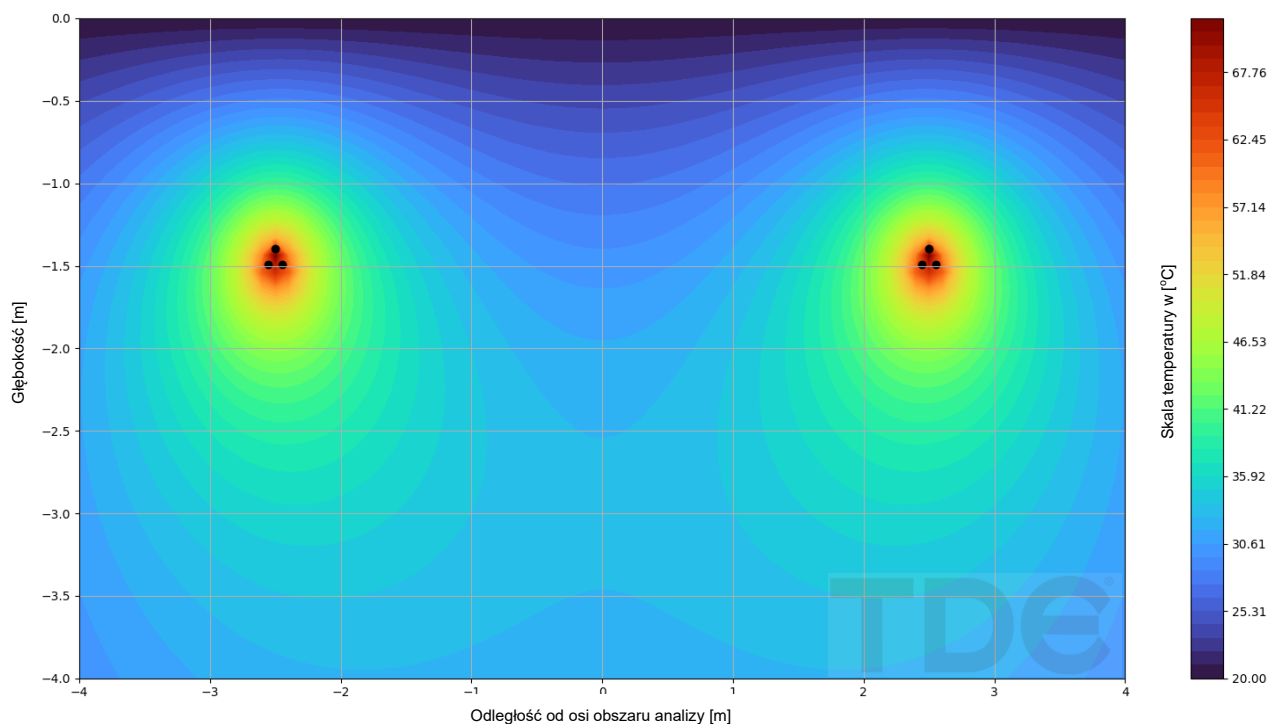
Rys. 43. Rozkład przestrzenny pola temperaturowego w gruncie wokół układu kablowego dla przykładu obliczeniowego nr 5A (2 torry kablowe 400 kV, kable jednożyłowe w izolacji XLPE z żyłą roboczą 2000 mm² Cu, prąd 1250 A), gdzie „s” oznaczono odległość płaszczyzny poziomej od osi kabla, na której określone są wartości temperatury gruntu. Połączenie między stacjami lądowymi Bałtyk II i Bałtyk III a stacją Polskich Sieci Przesyłowych.

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

5.3.10 Przykład obliczeniowy nr 5B – wyniki



Rys. 44. Rozkład pola temperaturowego gruntu dla wybranych odległości (ozn. „s”) nad układem kablowym dla przykładu obliczeniowego nr 5B (2 tory kablowe 400 kV, kable jednożyłowe w izolacji XLPE z żyłą roboczą 3000 mm² Al, prąd 1250 A). Połączenie między stacjami lądowymi Bałtyk II i Bałtyk III a stacją Polskich Sieci Przesyłowych.



Rys. 45. Rozkład przestrzenny pola temperaturowego w gruncie wokół układu kablowego dla przykładu obliczeniowego nr 5B (2 tory kablowe 400 kV, kable jednożyłowe w izolacji XLPE z żyłą roboczą 3000 mm² Al, prąd 1250 A), gdzie „s” oznaczono odległość płaszczyzny poziomej od osi kabla, na której określone są wartości temperatury gruntu. Połączenie między stacjami lądowymi Bałtyk II i Bałtyk III a stacją Polskich Sieci Przesyłowych.

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

5.4 Wnioski dla części lądowej

Przeprowadzone obliczenia dla założonych warunków ułożenia linii kablowych o napięciu 220 kV i 400 kV, pokazują, że oddziaływanie cieplne kabli wprowadza nieznaczne zmiany temperatury przy powierzchni gruntu w obszarze nad ułożonym kablami. Biorąc pod uwagę, że przeprowadzone obliczenia zostały wykonane dla maksymalnego współczynnika obciążenia wynoszącego 1, który zakłada ciągły przesył maksymalnej mocy przez projektowane linie kablowe, można stwierdzić, że rzeczywiste oddziaływanie cieplne projektowanych linii kablowych będzie mniejsze, gdyż rzeczywista generacja mocy farmy wiatrowej jest ściśle powiązana z warunkami pogodowymi (uzależniona od prędkości wiatru) i tylko w krótkich okresach czasu w ciągu roku osiąga maksymalną generację.

6 Bibliografia

- [1] T. Worzyk, *Submarine Power Cables*, Power Systems, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009.
- [2] Working group B1.40, *Offshore generation cable connections*, CIGRE 2015.
- [3] Gerhard Gerdes, Andreas Hansen, Dr. Knut Rehfeldt, Sven Teske, *Offshore Wind Energy – Implementing a New Powerhouse for Europe*, Greenpeace International 2005.
- [4] Abdelghani Matine, Charles-Henri Bonnard, Anee Blavette, Salvy Bourguet, Francois Rongere, Thibaut Kovaltchouk, Emmanuel Schaeffer, *Optimal sizing of submarine cables from an electro-thermal perspective*, HAL Open science, 2018.
- [5] Yiyi Zhang, Xiaoming Chen, Heng Zhang, Jiefeng Liu, Chaohai Zhang and Jian Jiao, *Analysis on the Temperature Field and the Ampacity of XLPE Submarine HV Cable Based on Electro-Thermal-Flow Multiphysics Coupling Simulation*, Polymers MDPI, 2020.
- [6] Nishanthi Duraisamy, H.B. Gooi, Abhisek Ukil, *Ampacity Estimation for HV Submarine Power Cables Installed in Saturated Seabed*,
- [7] Justin K.Dix, James Pilgrim, Timothy J. Henstock, Tom Gernon, Charli Thompson, Tim Hughes, John Emeana, *Sediment (Soil) Controls on Lifetime HV Cable Performace*, University of Southampton,
- [8] C.J. Emeana, T.J. Hughes, J.K. Dix, T.M. Gernon, T.J. Henstock, C.E.L. Thompson and J.A. Pilgrmi, *The thermal regime around buried submarine high-voltage cables*, Oxford University Press, 2016.
- [9] Ilya T. Jollyn, Manly Callewaert, Jasper Nonneman, Johan Van de Wauw, Bern Ameel, Michel de Paepe, *Combined Conduction and Natrual Convection Cooling of Offshore Power Cables in Porous Sea Soil*, 18th IEEE ITherm Conference 2019.
- [10] Zarghaam Rizvi, Yasir Karim, Katrin Sembdner, Ravindra Gautam, *Thermal Analysis of Submarine Power Cable Considering Natural Convection*, JETIR June 2019.
- [11] Instytut Morski w Gdańsku, *Badania przewodności termicznej osadów na obszarze morskiej infrastruktury przesyłowej (MIP), Raport końcowy z wynikami badań*, Warszawa, 2015 r.
- [12] <https://wblog.wiki.pl/Seawater>
- [13] Tamara Zalewska, Ewa Jakusik, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowy Instytut Badawczy, *Warunki meteorologiczne i hydrologiczne oraz charakterystyka elementów fizycznych, chemicznych i biologicznych południowego Bałtyku w 2018 roku*, Warszawa, 2020 r.
- [14] GIOŚ, *Ocena stanu środowiska polskich obszarów morskich Bałtyku na podstawie danych monitoringowych z roku 2020 na tel dziesięciolecia 2010-2019*, Warszawa, 2021.
- [15] Recommended practice, DNV-RP-J301, *Subsea Power Cables in Shallow Water Renewable Energy Applications*, Det Norske Veritas AS, February 2014.

Nr elementu	100101S.AN001.Z00-00-05
Wydanie	00

-
- [16] Szymon Uścińowicz, Wojciech Jegliński, Grażyna Miotk-Szpiganowicz, Jarosław Nowak, Urszula Pączek, Pitor Przewdziecki, Kazimierz Szeffler, Grzegorz Poręba, *Impact of sand extraction from the bottom of the southern Baltic Sea on the relief and sediments of the seabed*, 2014.
 - [17] Dr Magdalena Stella, *Hydrodynamiczne i litodynamiczne przydenne procesy dalekiego przybrzeża morza bezpływowego, Część 1*, Instytut Budownictwa Wodnego PAN w Grańsku, Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 4/2020.
 - [18] H. Brakelmann, J. Stammen, *Study: Thermal Emissions of the Submarine Cable Installation Viking Link in the German AWZ, Rheineberg und Neukirchen-Vluyn*, January 2017.