

Wpływ zjawiska wysuszenia gruntu na obciążalność prądową długotrwałą linii kablowych

XXX Konferencja Szkoleniowo-Techniczna KABEL 2025

Marcin Kocik

Kierownik Zespołu Technologicznego ds. Systemów WN

Brighter Future
in Energy

TFKgroup



Zagadnienia

- 1 Obciążalność prądowa
- 2 Przesuszanie gruntu
- 3 IEC & CIGRE
- 4 Przykład obliczeniowy
- 5 Podsumowanie

Czynniki wpływające na dopuszczalną obciążalność prądową:

- Konstrukcja kabla
- Sposób łączenia żył powrotnych
- Temperatura gruntu i powietrza
- Głębokość ułożenia kabli
- Odległość pomiędzy fazami oraz układ ułożenia (płaski, trójkątny)
- Średnica przepustów kablowych oraz ich wypełnienie
- Natężenie promieniowania słonecznego
- Wpływ zewnętrznych źródeł ciepła
- **Rezystywność cieplna otoczenia: ziemi rodzimej i materiału wypełniającego**

Obliczenia elektryczne w celu określenia strat (wytwarzania ciepła) w elementach kabla

Źródła ciepła w kablu:

- żyła robocza
- izolacja (straty dielektryczne)
- ekran metaliczny
- pancerz

$$W_I = W_{\dot{z}} + W_e + W_p$$

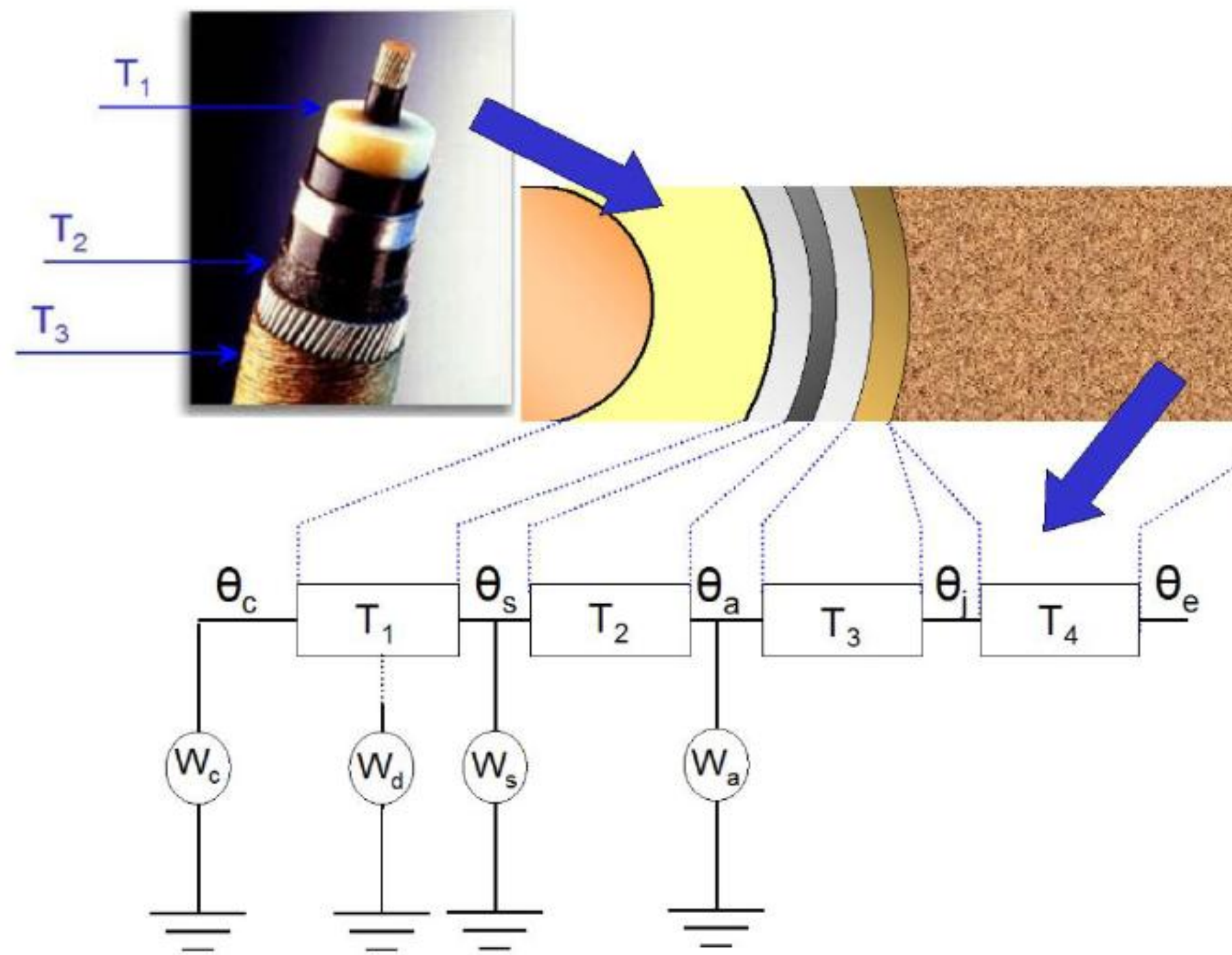
$$W_I = W_{\dot{z}} \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2)$$

λ_1 – współczynnik strat w ekranie metalicznym

λ_2 – współczynnik strat w pancerzu

Obliczenia wymiany ciepła

Bilans cieplny



$$I_c = \sqrt{\frac{\Delta Q - W_d \cdot [0.5 \cdot T_1 + (T_2 + T_3 + T_4)]}{R \cdot T_1 + R \cdot T_2 \cdot (1 + \lambda_1) + R \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \cdot (T_3 + T_4)}}$$

R – rezystancja AC żyły roboczej
w temperaturze pracy [Ω/m]

W_d – straty dielektryczne [W/m]

T – rezystancja cieplna [$\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}$]

ΔQ – przyrost temperatury [$^{\circ}\text{C}$]

Źródło: G. Anders, TFK Seminar, 2019

Rezystancja cieplna

Rezystancje cieplne $T_1 \div T_3$

$$T_x = \frac{\rho_T}{2\pi} \cdot \ln \left[1 + \frac{2 \cdot t_x}{d_x} \right]$$

ρ_T – rezystywność cieplna danego obszaru [K·m/W]

d_x – średnica pod danym obszarem [mm]

t_x – grubość danego obszaru [mm]

Rezystancja cieplna T_4 (IEC 60287-2)

- Pojedynczy kabel w gruncie

$$T_x = \frac{\rho_T}{2\pi} \cdot \ln \left[u + \sqrt{u^2 - 1} \right]$$

$$u = \frac{2 \cdot L}{D_e}$$

L – odległość do powierzchni ziemi [mm]

D_e – średnica zewnętrzna kabla [mm]

Obciążalność prądowa

... z uwzględnieniem wysuszania gruntu

$$I_c = \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_d \cdot [0.5 \cdot T_1 + (T_2 + T_3 + \nu T_4) + (\nu - 1) \cdot \Delta\theta_x]}{R \cdot T_1 + R \cdot T_2 \cdot (1 + \lambda_1) + R \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \cdot (T_3 + \nu T_4)}}$$

gdzie:

ν – współczynnik cieplnej rezystywności gruntu suchego do wilgotnego ($\nu = \rho_d / \rho_w$),

ρ_d – rezystywność cieplna suchego gruntu [K·m/W],

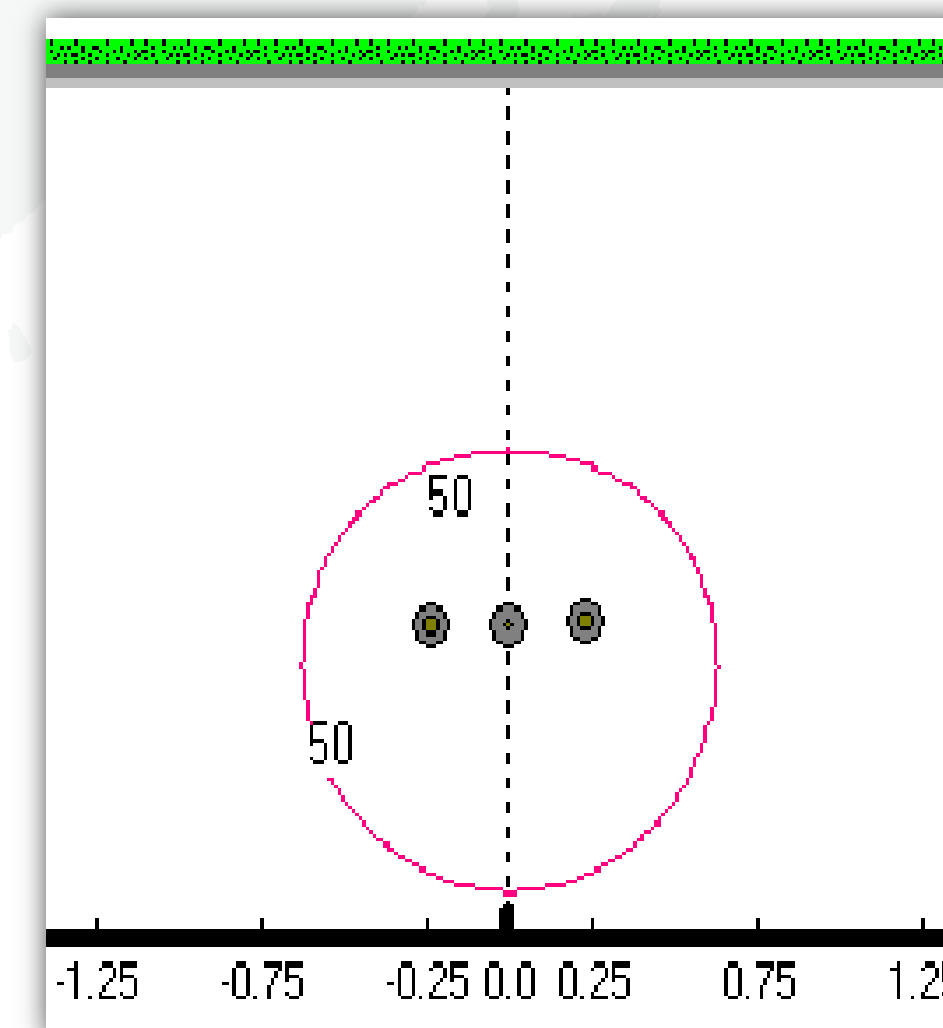
ρ_w – rezystywność cieplna wilgotnego gruntu [K·m/W],

θ_x – krytyczna temperatura gruntu i wartość temperatury granicznej izotermy [°C],

θ_a – temperatura otoczenia [°C],

$\Delta\theta_x$ – krytyczny wzrost temperatury gruntu ($\theta_x - \theta_a$) [°C].

Wielkość fizyczna	Wartość
ρ_d	2,5 K·m/W
ρ_w	1 K·m/W
ν	2,5
θ_x	50°C
θ_a	20°C
$\Delta\theta_x$	30 K



Przesuszanie gruntu

Rezystywność cieplna gruntu



gęstość

zawartość wody

- przestrzenie między ziarnami, które mogą być wypełnione wodą
- transport ciepła w materiale sypkim zależy od liczby punktów styku pomiędzy ziarnami
- przy obecności wody w pustych przestrzeniach przewodnictwo cieplne ulega poprawie
- migrację wilgoci z przestrzeni między ziarnami w kierunku obszarów o niższej temperaturze
- zależność migracji wilgoci od frakcji
- woda migruje szybciej w kierunku od linii kablowej, niż do niej powraca

wymiana ziemi rodzimej na wypełnienie kontrolowane

Przesuszanie gruntu

Wypełnienie kontrolowane

ziemia rodzima

piasek

betonit

- Ziemia rodzima wymaga przesiania, wzdłuż trasy zmienna rezystywność
- Zmniejszenie migracji wilgoci
- materiał wokół kabla o jednorodnej drobnej frakcji

Betonit:

- mieszanka piaskowo-cementowa, o proporcji 14:1
- Możliwie najmniejsza frakcja
- gęstość nie mniejsza niż 1600 kg/m³
- odpowiednia ilość dodanej wody
- Stabilna rezystywność cieplna (0,6 ÷ 1,0 K·m/W)

Właściwości fizyczne wybranych typów gleb oraz wypełnienia kontrolowanego

Typ gleby lub wypełnienia kontrolowanego	Gęstość w stanie suchym [kg/m ³]	Rezystywność cieplna [K·m/W]	
		W stanie mokrym	W stanie suchym
Drobny żwir	2150	0,5	2,5
Piasek 0-2 mm	1900	0,5	1,7
Piasek plażowy	1700	0,55	3,5
Glina (chuda)	1700	0,75	2,5
Glina (tłusta)	1600	0,9	3,0

Wysuszanie gruntu – podejście do zagadnienia z innych krajów

IEC

Międzynarodowa Komisja Elektrotechniczna
(ang. International Electrotechnical Commission)

CIGRÉ

Stowarzyszenie zrzeszające ekspertów zajmujących się zagadnieniami dotyczącymi wytwarzania, przesyłu i dystrybucji energii elektrycznej (fr. Conseil International des Grands Réseaux Électriques).

IEC 60287-3-1:2017

	Rezystywność cieplna [K·m/W]		Temperatura gruntu [°C]	Izoterma graniczna [°C]
	Grunt wilgotny	Grunt suchy		
Szwajcaria	1,0	2,5	20	50
Francja	1,2	2,5	20	60
GB	1,2	3,0	15	50
Holandia	1,0	2,5	20	30-50
Kanada	0,9	3,0	25	50
Meksyk	1,5		25	50
Niemcy	1,0	2,5	20	
Austria	1,0	2,5	20	

Kiedy nie sprecyzowano, IEC sugeruje:

- temperatura gruntu 20°C,
- rezystywność cieplna 0,7 K·m/W dla gruntu bardzo wilgotnego,
- rezystywność cieplna 1,0 K·m/W dla gruntu wilgotnego,
- rezystywność cieplna 2,0 K·m/W dla gruntu suchego,
- rezystywność cieplna 3,0 K·m/W dla gruntu bardzo suchego.

CIGRE B1.41 714

LONG TERM PERFORMANCE OF SOIL AND BACKFILL SYSTEMS



- 2-stronicowy kwestionariusz
- Dane z 17 krajów
- Zakłady i instytucje energetycznych
- Doświadczenia dotyczące wizualnych lub mierzonych zmian parametrów gruntu/zasypki, awarii kabli z powodu lokalnego przegrzania

CIGRE B1.41 714

LONG TERM PERFORMANCE OF SOIL AND BACKFILL SYSTEMS

WIELKA BRYTANIA

Jedno z pierwszych miejsc, w których odkryto migrację wilgoci / wysychanie i niekontrolowane rozprzestrzenianie się ciepła.

Zazwyczaj brane tam pod uwagę i w wielu przypadkach są stosowane materiały wypełniające o kontrolowanej rezystywności cieplnej wewnątrz izotermy 50°C

NIEMCY

DIN/VDE:

- grunt wilgotny: 1,0 K·m/W,
- grunt suchy: 2,5 K·m/W.

Graniczna izoterma wewnątrz której następuje wysychanie gruntu zależy od charakterystyki obciążenia.

Krytyczny wzrost temperatury gruntu oblicza się ze wzoru:

$$\Delta\theta_x = 15 + \frac{(1 - m) \cdot 100}{3}$$

m – współczynnik obciążenia

Dla obciążenia ciągłego $m=1 \rightarrow 15^\circ\text{C}$,

a dla obciążenia ze współczynnikiem $m = 0,7 \rightarrow 25^\circ\text{C}$.

CIGRE B1.41 714

LONG TERM PERFORMANCE OF SOIL AND BACKFILL SYSTEMS

Inne wnioski

- podczas awarii związanych z przegrzaniem kabli elektroenergetycznych wystąpił problem z materiałem wypełniającym najbliższe otoczenie kabli
- Z punktu widzenia materiału wypełniającego, systemy kablone są w większości przypadków zarządzane bez okresowych kontroli lub przeglądów, pomiary rezystywności cieplnej są wykonywane na etapie projektowania
- Systemy DTS (system liniowego monitoringu temperatury w oparciu o technologię światłowodową) zostały wprowadzone dopiero niedawno i są instalowane przede wszystkim w głównych systemach.
- Generalnie podwyższone temperatury ziemi i związane z nimi zjawisko wysuszania gruntu nastąpiło z powodów:
 - Słabej jakości zasypki,
 - większe obciążenia,
 - instalacja niezgodna z projektem,
 - wymiana materiału zasypki otaczającego kabel na materiały o słabych właściwościach termicznych,
 - instalacja rur grzewczych w pobliżu.

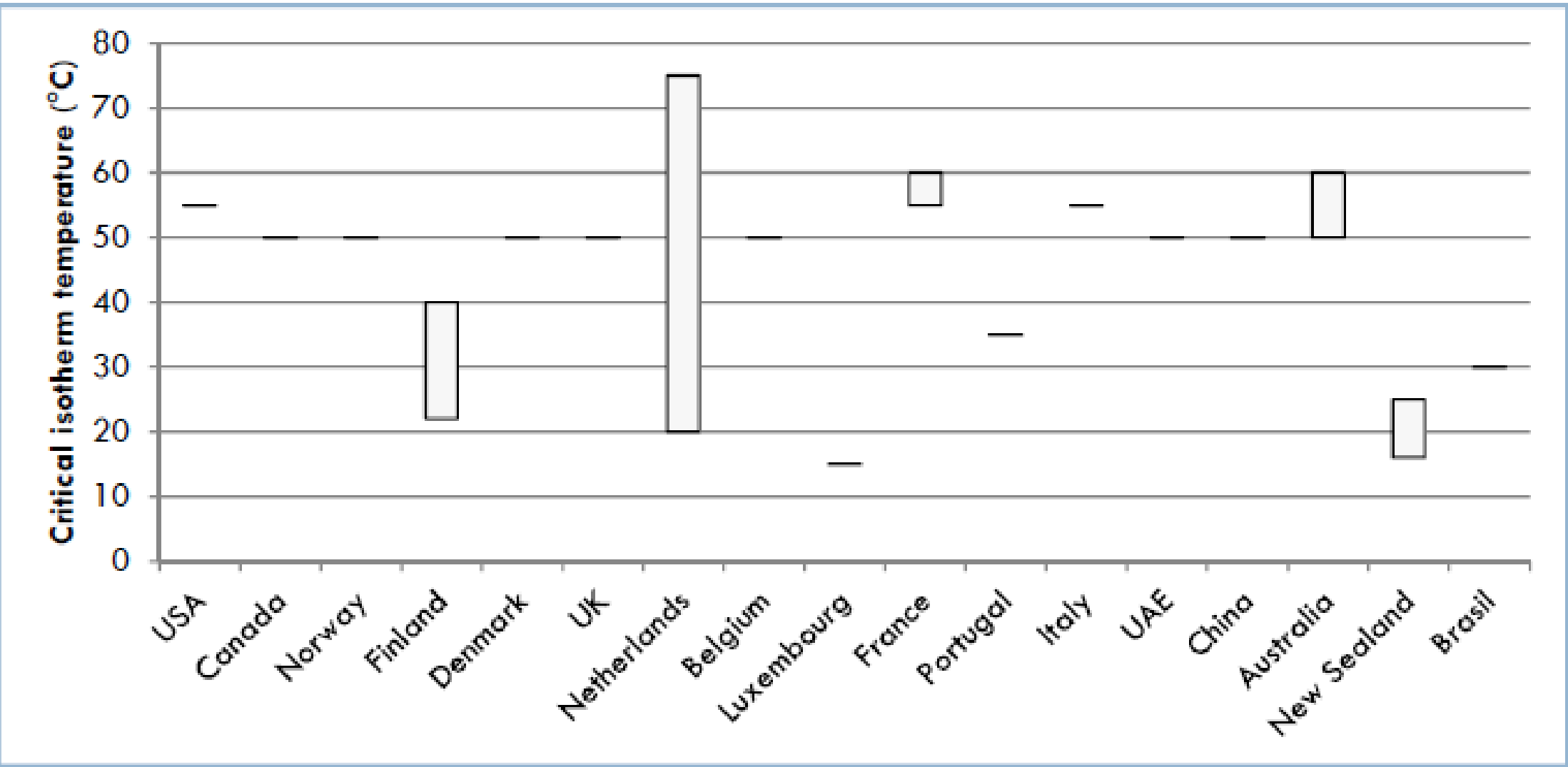
CIGRE B1.35 640

A Guide for Rating Calculations of Insulated Cables

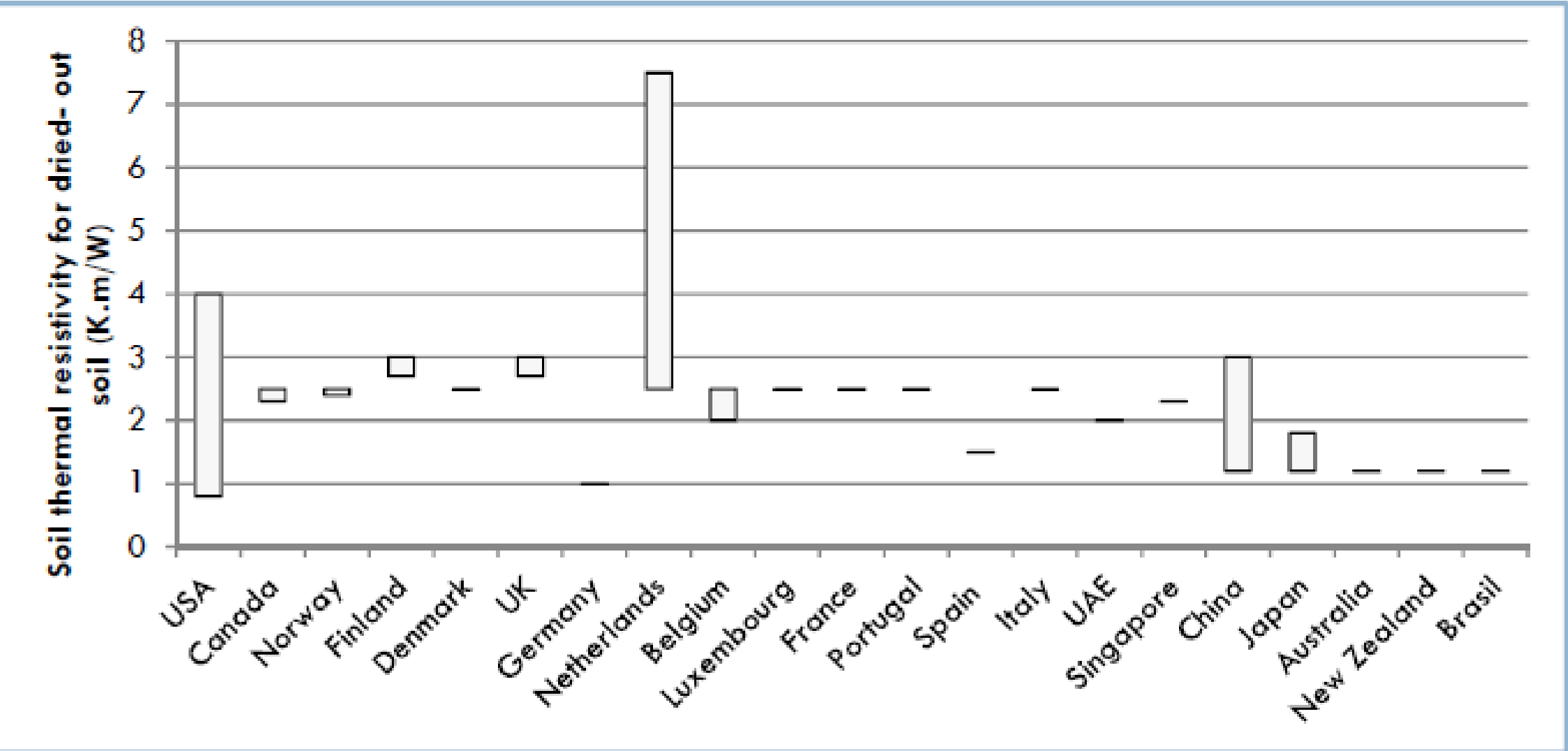
Wskazówki przy obliczaniu obciążalności linii kablowych

Czynnik wysuszania gruntu jako bardzo istotny z punktu widzenia wyznaczania rezystywności cieplnej otoczenia kabli

Izoterma graniczna



Rezystywność cieplna wysuszonego gruntu

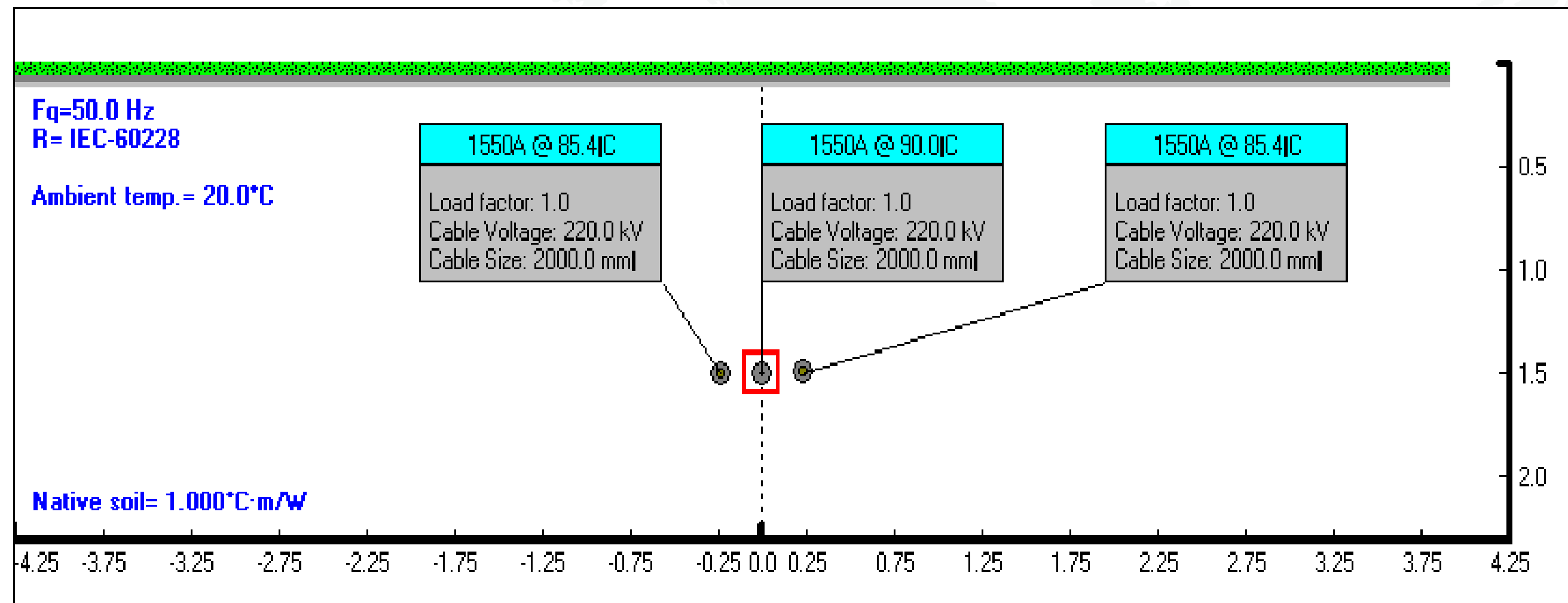


Przykład obliczeniowy

Obciążalność bez uwzględnienia wysuszania gruntu

XRUHKXS 2000RMS mm² 220 kV

Obciążalność długotrwała **1550 A**



Układ płaski (240 mm)

Uziemienie ekranów jednostronne

Głębokość ułożenia 1,5 m

Temperatura otoczenia 20°C

Rezystywność cieplna gruntu 1,0 [K·m/W]

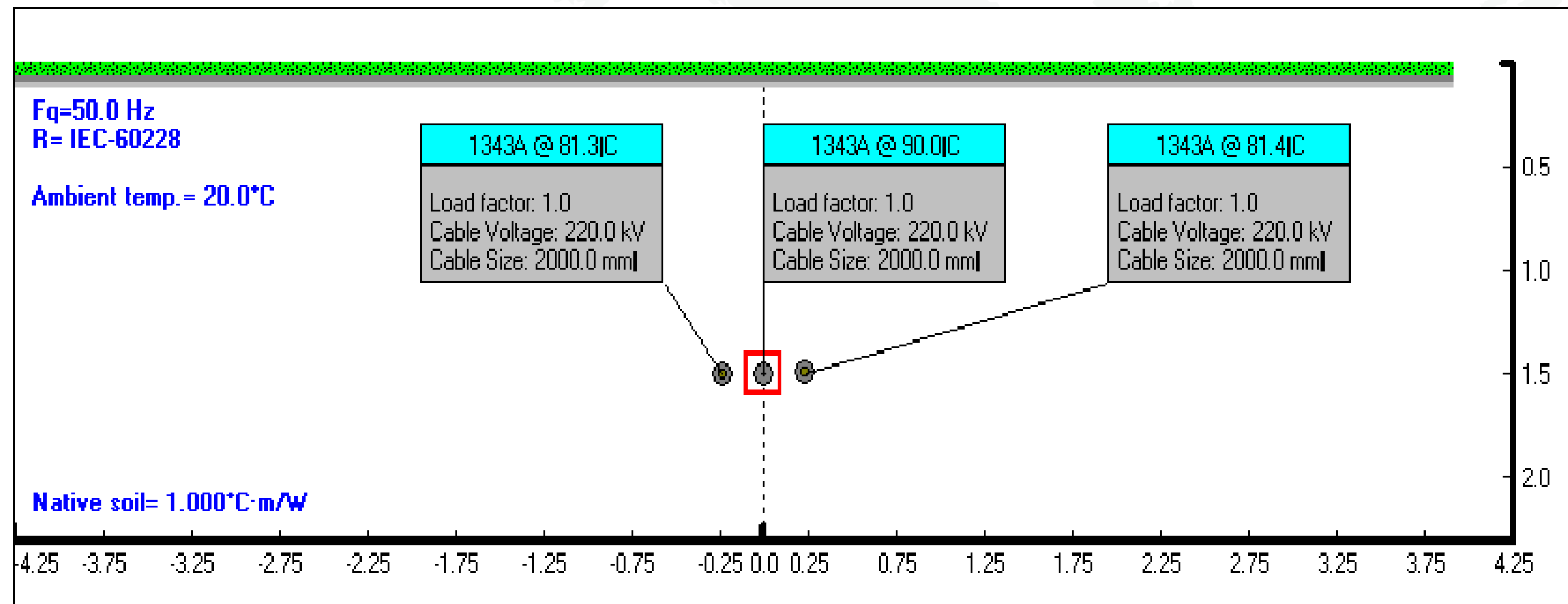
Źródło: Cymcap 9.0

Przykład obliczeniowy

Obciążalność z uwzględnieniem wysuszania gruntu

XRUHKXS 2000RMS mm² 220 kV

Obciążalność długotrwała **1343 A**



Układ płaski (240 mm)

Uziemienie ekranów jednostronne

Głębokość ułożenia 1,5 m

Temperatura otoczenia 20°C

Rezystywność cieplna gruntu 1,0 [K·m/W]

Rezystywność cieplna gruntu suchego
(50°C) - 2,5 [K·m/W]

Źródło: Cymcap 9.0

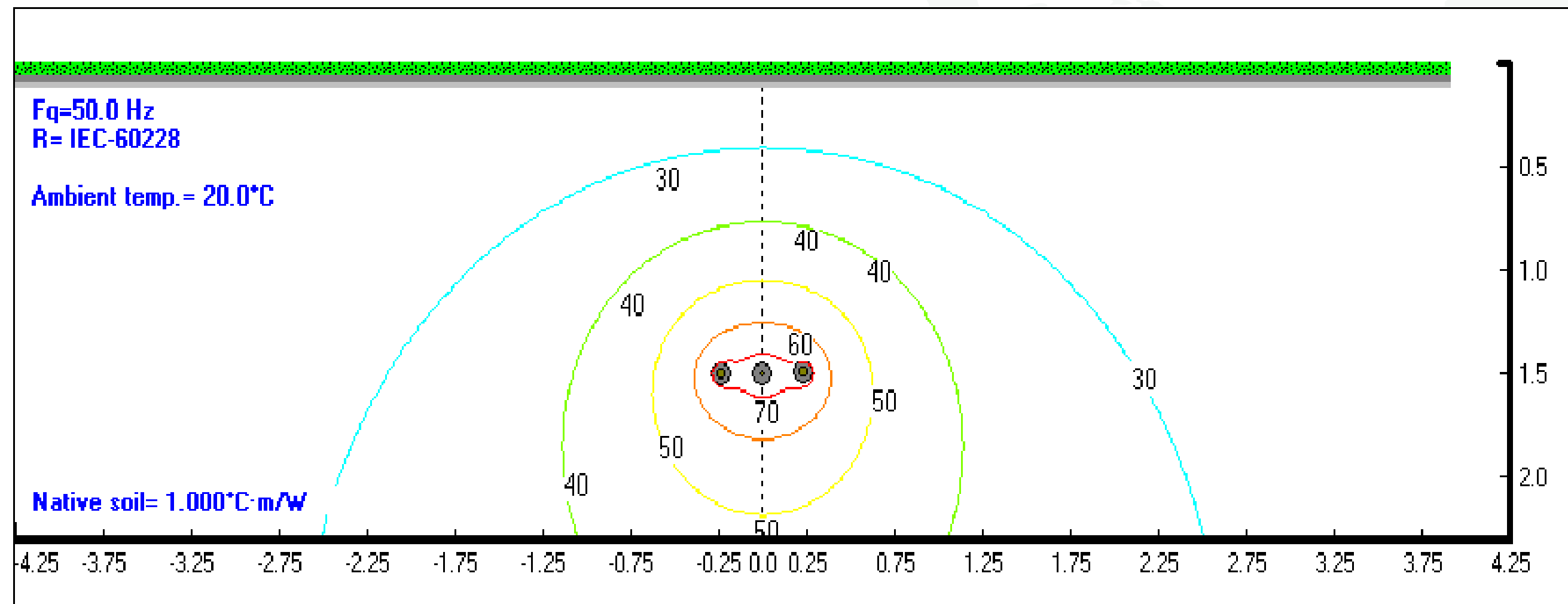
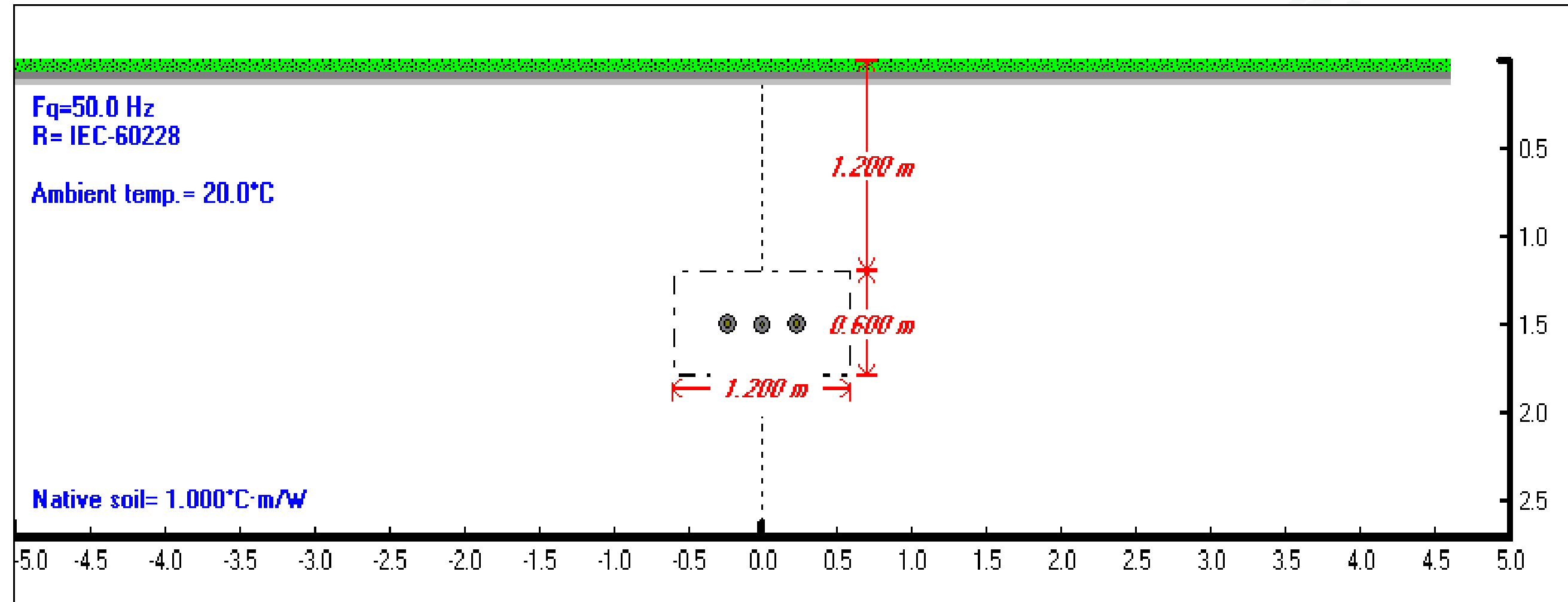
Przykład obliczeniowy

Wyniki symulacji

	Bez uwzględnienia wysuszania gruntu	Z wysuszaniem gruntu (2,5 K·m/W; izoterma graniczna 50°C)
T ₁ [K·m/W]	0,36	0,36
T ₃ [K·m/W]	0,05	0,05
T₄ [K·m/W]	1,4	3,5
Prąd obciążenia [A]	1550	1343
Temperatura żyły roboczej dla prądu I = 1550 A [°C]	90	139

$$I_c = \sqrt{\frac{\Delta Q - W_d \cdot [0.5 \cdot T_1 + (T_2 + T_3 + T_4)]}{R \cdot T_1 + R \cdot T_2 \cdot (1 + \lambda_1) + R \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \cdot (T_3 + T_4)}}$$

Przykład obliczeniowy



Źródło: Cymcap 9.0

Rozwiązanie

Koperta betonitowa o rezystywności cieplnej w stanie suchym 1,0 K·m/W:
- prostokąt o wymiarach

- szerokość 1,2 m.
- wysokość 0,6 m.

Izoterma graniczna 50°C, wewnątrz której przewiduje się wysuszenie gruntu

Wnioski

- Wysuszenie gruntu stanowi istotny czynnik wpływający na długotrwałą obciążalność prądową linii kablowych
- Proces ten prowadzi do wzrostu rezystywności cieplnej medium otaczającego kable
- W celu ograniczenia negatywnych skutków migracji wilgoci konieczne jest stosowanie odpowiednich materiałów wypełniających takich jak betonit
- Praca kabli przy potencjalnie wyższych temperaturach wpływa również na ich żywotność

Odpowiednie projektowanie i monitorowanie warunków eksploatacyjnych linii kablowych pozwala na minimalizację ryzyka związanego z wysuszeniem gruntu i zapewnia ich długotrwałą, bezpieczną pracę.

Dziękuję za uwagę



Marcin Kocik

Kierownik Zespołu Technologicznego ds. Systemów WN

marcin.kocik@tfkable.com

Tele-Fonika Kable SA - Zakład Bydgoszcz
