


Numer umowy: <b>255/IP/12</b>	Numer archiwalny: <b>MB-L2-C06-4751/A</b>
----------------------------------	--

<b>PROJEKT BUDOWLANY PIERWSZEGO ETAPU REALIZACJI ODCINKA ZACHODNIEGO II LINII METRA W WARSZAWIE</b>		
<b>ETAP V/3</b>	Faza: <b>PROJEKT BUDOWLANY</b>	Obiekt: <b>STACJA C06 Z TORAMI ODSTAWCZYMI</b>
Tytuł opracowania: <b>PROJEKT ARCHITEKTONICZNO-BUDOWLANY TOM II/6A RAPORT Z SYMULACJI CFD DZIAŁANIA SYSTEMU WENTYLACJI AWARYJNEJ</b>		
Investor:	<b>Miasto Stołeczne Warszawa Pl. Bankowy 3/5 00-950 Warszawa</b>	
Reprezentant Inwestora:	<b>Zarząd Transportu Miejskiego ul. Żelazna 61 00-848 Warszawa</b>	
Investor Zastępczy:	<b>Metro Warszawskie Sp. z o.o. ul. Wilczy Dół 5 02-798 Warszawa</b>	

Koordynacja:		
<b>B.P. Metroprojekt Sp. z o.o ul. Solińska 19B 02-142 Warszawa</b>	Naczelnny Inżynier: <b>mgr inż. Grzegorz Miros</b>	



UNIA EUROPEJSKA  
FUNDUSZ SPÓJNOŚCI



Projekt "II linia metra w Warszawie - Prace przygotowawcze, projekt i budowa odcinka centralnego wraz z zakupem taboru" współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Funduszu Spójności w ramach Programu Infrastruktura i Środowisko

Warszawa, luty 2014

**ZESPÓŁ AUTORSKI:**

<b>Funkcja</b>	<b>Imię i nazwisko</b>	<b>Data</b>	<b>Podpis</b>
Autor opracowania	mgr inż. Mateusz Fliszkiewicz	02.2014	

**MB-L2-C06-4751/A**

**ZAWARTOŚĆ:**

**A. OPIS TECHNICZNY**

**MB-L2-C06-4751/A//01**

## A. OPIS TECHNICZNY

## SPIS TREŚCI:

1.	Dane ogólne .....	6
1.1.	Przedmiot opracowania.....	6
1.2.	Podstawa opracowania.....	6
1.3.	Zawartość opracowania .....	6
2.	Koncepcja oddymiania obiektu.....	6
2.1.	Ustalenia podstawowe .....	6
2.2.	Założenia do koncepcji zabezpieczenia przed zadymieniem stacji „C06” .....	7
2.3.	Założenia do koncepcji zabezpieczenia przed zadymieniem torów odstawczych .....	15
3.	Przewidywany czas ewakuacji użytkowników obiektu .....	17
3.1.	Przyjęty scenariusz ewakuacji oraz założenia do symulacji .....	17
3.2.	Obliczenia czasu ewakuacji wg NFPA 130 .....	19
3.3.	Charakterystyka użytego oprogramowania do modelowania ewakuacji .....	21
3.3.1.	Opis modelu.....	21
3.3.2.	Tryb symulacji .....	21
3.3.3.	Ograniczenia .....	22
3.4.	Wyniki symulacji.....	22
4.	Przewidywany czas do interwencji ekip ratowniczo-gaśniczych.....	33
5.	Symulacje CFD.....	34
5.1.	Charakterystyka użytego programu CFD .....	34
5.1.1.	Nazwa programu, wersja, producent.....	34
5.1.2.	Rodzaj i gęstość siatki obliczeniowej .....	34
5.1.3.	Model turbulencji.....	35
5.1.4.	Model spalania .....	35
5.1.5.	Model promieniowania .....	35
5.2.	Niepewności obliczeniowe i zastosowane współczynniki bezpieczeństwa.....	35
5.3.	Warunki początkowe i brzegowe .....	36
5.3.1.	Początkowa temperatura wewnętrzna i zewnętrzna.....	36
5.3.2.	Materiały elementów budowlanych.....	36
5.3.3.	Materiał palny .....	36
5.3.4.	Zastosowane schematy i ustawienia numeryczne .....	37
5.3.5.	Czas symulacji .....	37
5.4.	Analizowane parametry pożaru .....	37
5.5.	Analizowane scenariusze pożarowe.....	38
6.	Wyniki symulacji CFD .....	41

6.1.	Sprawdzenie warunków ewakuacji oraz bezpieczeństwa ekip ratowniczych.....	41
6.1.1.	Krzywe mocy pożaru .....	41
6.1.2.	Zasięg widzialności na wysokości 1.8 m w czasie ewakuacji .....	42
6.1.3.	Temperatura na wysokości 1.8 m w czasie ewakuacji.....	77
6.1.4.	Temperatura na wysokości 1.8 m po czasie interwencji ekip ratowniczych .....	112
6.1.5.	Zawartość tlenu na wysokości 1.8 m w czasie ewakuacji .....	117
6.1.6.	Temperatura na wysokości 2.5 m w czasie ewakuacji.....	122
6.1.7.	Gęstość strumienia promieniowania ciepłego.....	127
6.1.8.	Określenie wymaganej klasy temperaturowej wentylatorów wyciągowych .....	127
7.	Wnioski .....	130
8.	Bibliografia .....	131

## **1. DANE OGÓLNE**

### **1.1. PRZEDMIOT OPRACOWANIA**

Niniejsze opracowanie stanowi analizę skuteczności działania systemu wentylacji awaryjnej dla stacji „C06” oraz sąsiadujących z nią torów odstawczych II linii metra w Warszawie.

### **1.2. PODSTAWA OPRACOWANIA**

Podstawą opracowania są:

- a) Zlecenie inwestora
- b) Projekt budowlany architektoniczno-konstrukcyjny
- c) Obowiązujące przepisy przeciwpożarowe i techniczno-budowlane
- d) Obowiązujące normy
- e) Uzgodnienia branżowe

### **1.3. ZAWARTOŚĆ OPRACOWANIA**

Opracowanie zawiera część opisową, obliczeniową, wyniki oraz wnioski z przeprowadzonych symulacji CFD. W dokumencie opisano koncepcję oddymiania oraz przedstawiono schemat działania wentylacji awaryjnej. Ponadto oszacowano czas ewakuacji ludzi z ww. stacji metra oraz klasę temperaturową wentylatorów wyciągowych.

## **2. KONCEPCJA ODDYMIANIA OBIEKTU**

### **2.1. USTALENIA PODSTAWOWE**

Zgodnie z założeniami do projektu budowlanego przyjęto, że zabezpieczeniu przed zadymieniem będzie podlegał poziom peronów, tunele łączące stacje metra, tory manewrowe, tory odstawcze oraz stanowisko przeglądu pociągów znajdujące się przy stacji „C06”. Poziom peronów na stacji obejmuje jedną kondygnację podziemną. W projekcie budowlanym przewidziano rozwiązania architektoniczno-instalacyjne, stanowiące podstawę do określenia zasad funkcjonowania systemu zabezpieczenia przed zadymieniem, takie jak:

- a) na stacji „C06” na poziomie peronów znajdować się będzie kanałowa instalacja wentylacji oddymiającej o wydajności ok. 220 000 m<sup>3</sup>/h – wentylatornia stacyjna,
- b) w przyległych do stacji tunelach znajdować się będą wentylatornie szlakowe o łącznej wydajności ok. 440 000 m<sup>3</sup>/h każda,
- c) ze stacji „C06” z poziomu peronów możliwa jest ewakuacja przez dwie klatki schodowe oraz dwie pary schodów ruchomych znajdujących się na końcach peronu,
- d) za miejsce bezpieczne na stacji „C06” przyjmuje się poziom antresoli,

- e) tory manewrowe, tory odstawcze oraz stanowisko przeglądu pociągów będą stanowiły odrębne strefy dymowe oraz zostaną wyposażone w system wentylacji awaryjnej,
- f) w budynku będą znajdowała się osoby obsługi metra przeszkolone pod kątem ochrony przeciwpożarowej.

## **2.2. ZAŁOŻENIA DO KONCEPCJI ZABEZPIECZENIA PRZED ZADYMIENIEM STACJI „C06”**

Przewiduje się, że system wentylacji awaryjnej (oddymiającej) będzie pracował w dwóch trybach - poziomach:

- a) I poziom wentylacji awaryjnej: w celu zapewnienia bezpiecznych warunków ewakuacji ludzi znajdujących się na stacji oraz w pociągach metra – działający od momentu wykrycia pożaru do momentu zakończenia ewakuacji,
- b) II poziom wentylacji awaryjnej: w celu zapewnienia bezpiecznych warunków działania ekip ratowniczo-gaśniczych – działający od momentu zakończenia ewakuacji do momentu ugaszenia pożaru oraz przewietrzenia stacji.

### **Wprowadzenie:**

Głównym zadaniem wentylacji awaryjnej dla pierwszego poziomu jest zapewnienie odpowiednich warunków ewakuacji na głównych drogach ucieczki ludzi ze stacji metra w przypadku zagrożenia spowodowanego pożarem. Warunki te mogą zostać spełnione poprzez efektywne usuwanie ciepła oraz dymu z wydajnością równą ilości generowanego dymu z pożaru. Aby umożliwić bezpieczną ewakuację w każdym kierunku tj. do obydwu klatek schodowych, usuwanie produktów spalania powinno odbywać się z górnej warstwy dymu (tworzącej się podczas rozwoju pożaru) w sposób nie zakłócający jej stabilności (laminarnie). Takie założenia mogą być spełnione jedynie w przypadku zastosowania wentylacji kanałowej (wentylacji pionowej). Zastosowanie systemu wentylacji poziomej, mającej na celu przepychanie dymu w kierunku punktowego wyciągu spowoduje znaczne zaburzenie warstwy dymu. Aby ukierunkować dym w stronę wyciągu, wykorzystując system wentylacji poziomej, niezbędne jest zapewnienie prędkości przepływu powietrza w całym przekroju stacji równej, co najmniej 1 m/s. Prędkość taka powoduje znaczne zaburzenie warstwy dymu, co skutkuje, powstaniem niebezpiecznego zadymienia w całej wysokości peronu, a w efekcie końcowym uniemożliwia bezpieczną ewakuację do obydwu klatek schodowych. Ewakuacja możliwa jest jedynie w kierunku strony nawietrznej od miejsca pożaru. W przypadku drugiej linii metra przewiduje się zastosowanie jednoprzedałowych pociągów. Wystąpienie pożaru wewnątrz składu metra spowoduje, iż w pierwszej fazie niebezpieczne gazy pożarowe będą rozprzestrzeniać się wewnątrz pociągu, a następnie bezpośrednio na stację metra przez wszystkie drzwi wyjściowe składu. W tym przypadku zastosowanie wentylacji poziomej spowoduje, iż zadymienie obejmie cały peron, ponieważ

prędkość powietrza przepychającego dym (od punktu powstania pożaru) nie będzie zapewniona wewnątrz jednoprzędziowego pociągu. Wynikiem tego będzie wydostawanie się dymu na całej długości stacji, a w efekcie poziomego przepychania, powstanie niebezpiecznego zadymienia w całym jej obszarze. W związku z tym przewiduje się zastosowanie kanałowej wentylacji oddymiającej w celu spełnienia bezpiecznych warunków ewakuacji ludzi ze stacji metra „C06”.

#### **I poziom wentylacji awaryjnej:**

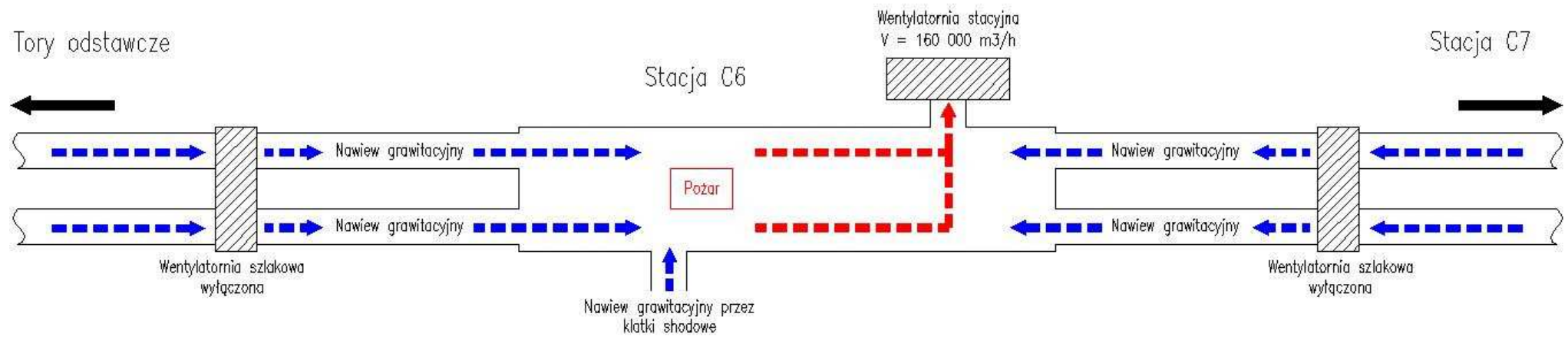
W skład systemu wentylacji dla pierwszego poziomu będzie wchodził wyciąg o wydajności  $44,5 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $\approx 160\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ ). Do tego celu wykorzystana zostanie wentylatornia stacyjna. Przewiduje się, iż założona wydajność zostanie równomiernie rozprowadzona na peronie w miejscach gdzie mogą znajdować się użytkownicy metra. Przewiduje się zastosowanie 30 punktów wyciągowych o wydajności  $5\,333 \text{ m}^3/\text{h}$  oraz powierzchni  $1 \text{ m}^2$ . Prędkość przepływu przez kratkę nie powinna być większa niż  $1,5 \text{ m/s}$ , co zapobiegnie zjawisku zasysania świeżego powietrza spod warstwy dymu, tzw. „plug-holling”. Przewidziano, iż większa część krat wyciągowych znajdować się będzie blisko klatek schodowych prowadzących na poziom antresoli. Rozwiązanie to ma na celu jak najdłuższe zabezpieczenie tego obszaru peronu, ponieważ jest on najistotniejszy ze względu na ewakuację ludzi.

Napowietrzanie realizowane będzie przez klatki schodowe oraz przyległe tunele. Napowietrzanie przez klatki schodowe oraz tunele odbywać się będzie grawitacyjnie. Przy założonej wydajności oddymiania nie przewiduje się powstania prędkości większej niż  $5 \text{ m/s}$  na drogach ewakuacyjnych. W przypadku wystąpienia prędkości większej niż  $5 \text{ m/s}$  (na etapie odbioru/testowania instalacji) na dowolnej drodze ewakuacyjnej, dopuszcza się uruchomienie wentylatorów szlakowych w trybie nawiewu na poziomie 30% swojej wydajności.

Zaproponowany system napowietrzania uniemożliwi przepływ dymu na poziom antresoli, ponieważ prędkość napływającego świeżego powietrza będzie większa niż prędkość strumienia podsufitowego dymu. Ponadto przy klatkach schodowych przewiduje się zastosowanie kurtyn dymowych, stałych lub opuszczanych do poziomu  $2,5 \text{ m}$  nad poziomem posadzki peronu, w celu dodatkowego zabezpieczenia tych klatek oraz poziomu antresoli przed przedostawaniem się dymu.



Rysunek 1. Schemat działania wentylacji awaryjnej dla I poziomu



## **II poziom wentylacji awaryjnej:**

Zadaniem wentylacji awaryjnej działającej na II poziomie jest zapewnienie bezpieczeństwa ekipom ratowniczo-gaśniczym. Powstanie zbyt wysokiej temperatury gazów pożarowych uniemożliwiłoby skuteczne działania gaśnicze, jak również mogłoby bezpośrednio zagrozić zdrowiu i życiu ratownikom Państwowej Straży Pożarnej. Aby zapewnić odpowiednie warunki działania niezbędne jest zwiększenie wydajności systemu wentylacji oddymiającej tak, aby efektywnie usuwać gorące gazy pożarowe. W związku z tym przewiduje się wykorzystanie wentylatorni szlakowych, które dodatkowo zwiększą ilość usuwanego ciepła i dymu.

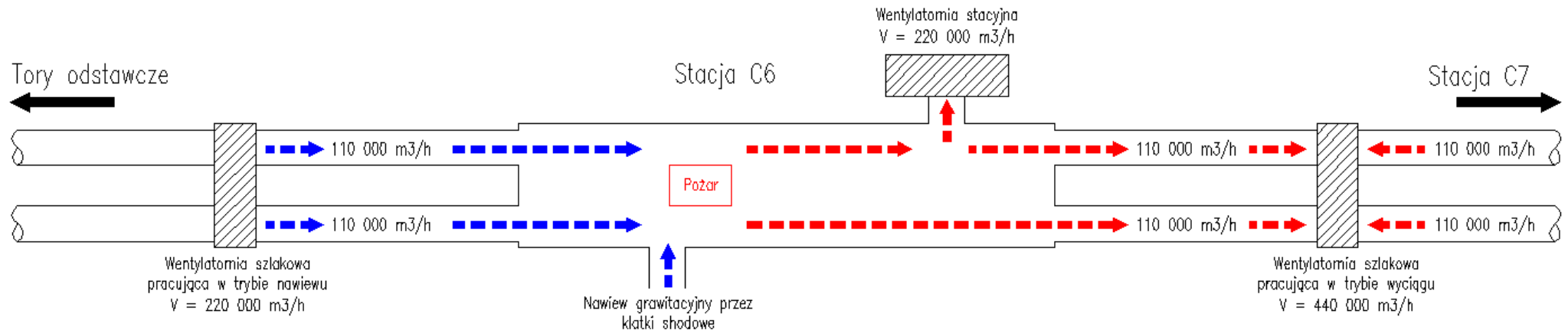
Przewiduje się, że łączna wydajność wentylatorni szlakowych wynosiła będzie po 122 m<sup>3</sup>/s każda. Wentylatornie zlokalizowane będą w połowie tunelu pomiędzy kolejnymi stacjami metra i torami odstawczymi. W przypadku wystąpienia pożaru na stacji lub pożaru pociągu, który wjeżdża na stację, uruchamiają się jedynie wentylatornie szlakowe przyległe do stacji objętej pożarem. Zadaniem pierwszej z nich jest usuwanie dymu ze stacji, natomiast drugiej napowietrzanie mechanicznie. Takie rozwiązanie umożliwi poziome przepychanie dymu w kierunku wentylatorni szlakowej działającej w trybie usuwania dymu. Ponieważ wentylatornie znajdują się pomiędzy stacjami zakłada się, że ilość powietrza usuwanego oraz nawiewanego na stację objętej pożarem równa będzie 61 m<sup>3</sup>/s, czyli połowę maksymalnej wydajności. Pozostała ilość powietrza będzie usuwana lub nawiewana z/na przyległe stacje nieobjęte pożarem. W przypadku wentylatorni pomiędzy stacją, a torami manewrowymi wentylatornia szlakowa będzie działać z połową swojej wydajności tj. 61 m<sup>3</sup>/h ze względu na fakt, iż nie mam możliwości nawiewu na kolejną stację metra. W przypadku wybudowania kolejnych stacji metra w kierunku zachodnim, wentylatornie tę należy uruchomić z maksymalną wydajnością tj. 122 m<sup>3</sup>/h.

Zaproponowane powyżej rozwiązanie pozwoli na poziome przepychanie dymu w taki sposób, aby od strony nawietrznej umożliwić bezpieczne podejście ekip ratowniczych. Rozwiązanie to spowoduje, że wysoka temperatura spychana będzie w kierunku wentylatorni szlakowej działającej w trybie usuwania dymu.

Oprócz wentylatorni szlakowych na stacji objętej pożarem będzie działać wentylatornia stacyjna, która po zakończeniu ewakuacji zwiększy swoją wydajność z 44,5 m<sup>3</sup>/s do 61 m<sup>3</sup>/s. Takie rozwiązanie dodatkowo poprawi efektywność usuwanego dymu i ciepła ze stacji oraz zwiększy prędkość powietrza dostarczanego grawitacyjnie przez klatki schodowe, co zabezpieczy przed zadymieniem poziom antresoli i dodatkowo ułatwi podejście ekipom ratowniczym do źródła pożaru.

W przypadku stacji „C06” zaleca się, aby system działał w każdym przypadku identycznie, tj. wyciąg gazów realizowany był przez wentylatornie usytuowaną pomiędzy stacjami „C06” i „C07”, natomiast nawiew przez wentylatornie usytuowaną pomiędzy stacjami „C06” i torami odstawczymi/manewrowymi. Takie rozwiązanie polepszy efektywność usuwania dymu, ponieważ większa ilość kratek wyciągowych (wentylatorni stacyjnej) znajduje się na końcu stacji w kierunku stacji „C07”. Ponadto taki układ oddymiania zapobiegnie rozprzestrzenianiu się zadymienia w kierunku torów odstawczych, gdzie może znajdować się obsługa metra.

Rysunek 2. Schemat działania wentylacji awaryjnej dla II poziomu



**Założenia ogólne:**

Cała kondygnacja peronu będzie stanowić jedną strefę dymową. Strefa ta będzie równocześnie stanowiła strefę detekcji dymu. Zakłada się, że w momencie wykrycia pożaru wszystkie drzwi (rozsuwane) na drodze ewakuacyjnej zostaną otwarte tak, aby nie utrudniać przepływu świeżego powietrza z poziomu terenu.

Zakłada się, że jednocześnie może wystąpić tylko jeden pożar w obrębie całej stacji metra.

Zakłada się, że czas detekcji pożaru nie przekroczy 60 sekund od momentu powstania pożaru na stacji lub wjechania płonącego składu na stację. Zdarzenie to spowoduje wywołanie alarmu drugiego stopnia w systemie sygnalizacji pożarowej, a następnie uruchomienie wentylacji oddymiającej. Wystąpienie alarmu II stopnia spowoduje również zamknięcie klap przeciwpożarowych w instalacji wentylacji bytowej oraz uruchomienie dźwiękowego systemu ostrzegawczego.

Zakłada się, że na stacji w trakcie pożaru oraz działania systemu wentylacji awaryjnej znajdują się dwa składy metra.

Scenariusz zdarzeń w przypadku pożaru pociągu metra znajduje się w tabeli 1 poniżej:

Tabela 1. Scenariusz zdarzeń w przypadku pożaru pociągu metra

	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390	420	450	480	510	540	570	600	630	660	690	720	750	780	810	840	870	900	
Powstanie pożaru	█																															
Przyjazd pociągu na stację	█	█	█																													
Czas wymagana na aktywację alarmu pożarowego				█	█																											
Czas ewakuacji stacji				█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Uruchomienie DSO (rozpoczęcie zorganizowanej ewakuacji)						█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Przygotowanie awaryjnego systemu wentylacji						█	█																									
Czas rozruchu wentylatorów pożarowych								█	█	█	█																					
Działanie wentylatorów w stanie ustalonym												█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Symulacja CFD				█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
Rozwój pożaru	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█

### 2.3. ZAŁOŻENIA DO KONCEPCJI ZABEZPIECZENIA PRZED ZADYMIENIEM TORÓW ODSTAWCZYCH

Przewiduje się, że system wentylacji awaryjnej (oddymiającej) będzie pracował w jednym trybie - poziome:

- a) w celu zapewnienia bezpiecznych warunków działania ekip ratowniczo-gaśniczych – działający od momentu wykrycia pożaru do momentu ugaszenia pożaru oraz przewietrzenia stacji.

#### **Wprowadzenie:**

Głównym zadaniem wentylacji awaryjnej dla torów odstawczych, torów manewrowych oraz stanowiska przeglądu pociągów jest zapewnienie bezpieczeństwa ekipom ratowniczo-gaśniczym. Powstanie zbyt wysokiej temperatury gazów pożarowych uniemożliwiłoby skuteczne działania gaśnicze, jak również mogłoby bezpośrednio zagrozić zdrowiu i życiu ratownikom Państwowej Straży Pożarnej. W ww. obszarach nie przewiduje się obecności dużej ilości osób. Jedynymi osobami będą stali pracownicy metra dobrze zaznajomieni z możliwymi kierunkami ewakuacji, jak również sposobem postępowania na wypadek pożaru. Zakłada się, iż ewakuacja z ww. obszarów nie przekroczy 5 minut.

Zakłada się, że tory manewrowe, tory odstawcze oraz stanowisko przeglądu pociągu będą stanowiły odrębne strefy dymowe. Scenariusz zdarzeń oraz uruchomienie urządzeń jest identyczne jak przedstawiono w tabeli 1.

#### **Tory manewrowe oraz tory odstawcze:**

System wentylacji awaryjnej dla torów manewrowych oraz torów odstawczych będzie działał w analogiczny sposób. W obu przypadkach projektuje się system wentylacji poziomej polegający na przepychaniu dymu w całym przekroju torów w kierunku punktowego wyciągu.

W przypadku pożaru na torach manewrowych dym usuwany będzie przez otwory oddymiające znajdujące się pomiędzy osiami 57-59 przy użyciu wentylatorni szlakowej znajdującej się bliżej stacji „C06”. Wydajność systemu równa będzie 122 m<sup>3</sup>/h. Nawiew realizowany będzie z dwóch skrajnych punktów torów odstawczych, tj. przez wentylatornie stacyjną, która nawiewać będzie świeże powietrze z wydajnością równą 61 m<sup>3</sup>/h przez otwory znajdujące się w stropie peronu stacji oraz wentylatornie szlakową z wydajnością równą 61 m<sup>3</sup>/h, znajdującą się na końcu szlaku „D06” – otwory nawiewne znajdujące się pomiędzy osiami 2-4. Otwór kompensacyjny będą stanowiły klatki schodowe na stacji „C06”.

W przypadku torów odstawczych system będzie działał analogicznie jednakże dym będzie usuwany przez otwory oddymiające znajdujące się pomiędzy osiami 29-31 przy użyciu tej samej wentylatorni szlakowej.

Granice stref dymowych ww. obszarów ustala się w osi 38, tak aby wejście do klatki schodowej było możliwe niezależnie od miejsca powstania pożaru.

**Stanowisko przeglądu pociągów:**

Zakłada się, iż stanowisko przeglądu pociągów posiadać będzie niezależny system oddymiania. Pomieszczenie to stanowi odrębną strefę pożarową. Projektuje się pionowe usuwanie dymu ze względu na fakt, iż nie ma możliwości poziomego przepychania dymu wewnątrz pomieszczenia oraz możliwość przebywania osób serwisujących składy pociągów.

W stropie nad stanowiskiem przeglądu pociągów projektuje się otwory wyciągowe równomiernie rozłożone na całej długości pomieszczenia. Łączna wydajność usuwanego dymu równa będzie  $122 \text{ m}^3/\text{s}$ , realizowana przez wentylatornię szlakową znajdującą się na końcu szlaku „D06”. Nawiew realizowany będzie przez klapy transferowe znajdujące się w dolnej części pomieszczenia. Klapy transferowe powinny być wyposażone w wyzwalacz termiczny, który zabezpieczy przed rozprzestrzenieniem się pożaru na tory odstawcze w przypadku powstania wysokiej temperatury w bliskiej odległości od klapy transferowej. Ilość klap transferowych (powierzchnia netto) należy zaprojektować z 25% nadwyżką, tak aby w przypadku zamknięcia części klap transferowych system działał skutecznie. Klapy powinny być rozłożone równomiernie, jednakże zaleca się lokalizację w końcach pomieszczenia. Aby zapewnić odpowiednią ilość świeżego powietrza transferowanego przez klapy przeciwpożarowe należy uruchomić wentylatornię szlakową (w trybie nawiewu) z wydajnością równą  $122 \text{ m}^3/\text{h}$  znajdującą się bliżej stacji „C06” – nawiew realizowany przez otwory znajdujące się w osiach 29-31.



### 3. PRZEWIDYWANY CZAS EWAKUACJI UŻYTKOWNIKÓW OBIEKTU

Przewidywany czas ewakuacji użytkowników obiektu został obliczony na podstawie normy NFPA 130 [8] oraz przeprowadzonych symulacji w programie Pathfinder wersja 2014.1.0207x64.

Dostępny bezpieczny czas ewakuacji (z ang. ASET – Available Safe Escape Time), to wyliczony czas dostępny pomiędzy zainicjowaniem pożaru a czasem, w którym tolerowane, graniczne kryteria bytowe nie są przekroczone w określonej przestrzeni w budynku.

Wymagany bezpieczny czas ewakuacji (z ang. RSET – Required Safe Escape Time), to wyliczony czas dostępny pomiędzy zainicjowaniem pożaru a czasem, w którym użytkownicy, w określonych przestrzeniach w budynku, są w stanie osiągnąć bezpieczne miejsce.

#### 3.1. PRZYJĘTY SCENARIUSZ EWAKUACJI ORAZ ZAŁOŻENIA DO SYMULACJI

Przyjęty scenariusz zakłada ewakuację 3 600 osób z poziomu peronów, z czego 600 osób znajduje się na peronie oraz 3 000 osób w 2 składach metra (po 1500 osób każdy). W symulacji komputerowej pominięto wpływ osób ewakuowanych z poziomu antresoli oraz pomieszczeń technicznych. Nie przewiduje się występowanie dużej ilości osób w ww. obszarach tak, więc nie będą one miały znaczącego wpływu na szybkość ewakuacji z poziomu peronu.

Zakłada się, że ewakuacja ze stacji metra „C06” odbywać się będzie jednocześnie. Wszystkie osoby znajdujące się na stacji oraz w składach metra zostaną powiadomione o powstaniu zagrożenia. Następnie rozpoczną ewakuację dostępnymi poziomymi i pionowymi drogami ewakuacyjnymi. Zgodnie z normą NFPA 130 założono, iż jedne schody ruchome będą wyłączone z użytku.

W symulacji komputerowej pominięto czas pierwszych wstępnych reakcji. Jest to czas od momentu ogłoszenia alarmu pożarowego do momentu rozpoczęcia procesu ewakuacji przez poszczególne osoby. Na wartość czasu pierwszych wstępnych reakcji wpływają takie zachowania jak np.: kończenie rozpoczętych prac, pakowanie osobistych rzeczy, ubieranie się itp. W przypadku rozpatrywanej stacji metra oraz założeniu tak dużej ilości osób znajdujących się na poziomie peronów i w składach metra można przyjąć, że wszystkie osoby rozpoczną ewakuację równocześnie. W przypadku, gdy część osób nie rozpocznie ewakuacji natychmiast po ogłoszeniu alarmu, to i tak opóźnienie to nie wpłynie na końcowy czas ewakuacji. Głównym czynnikiem determinującym czas ewakuacji będzie przepustowość schodów z poziomu peronów na poziom antresoli.

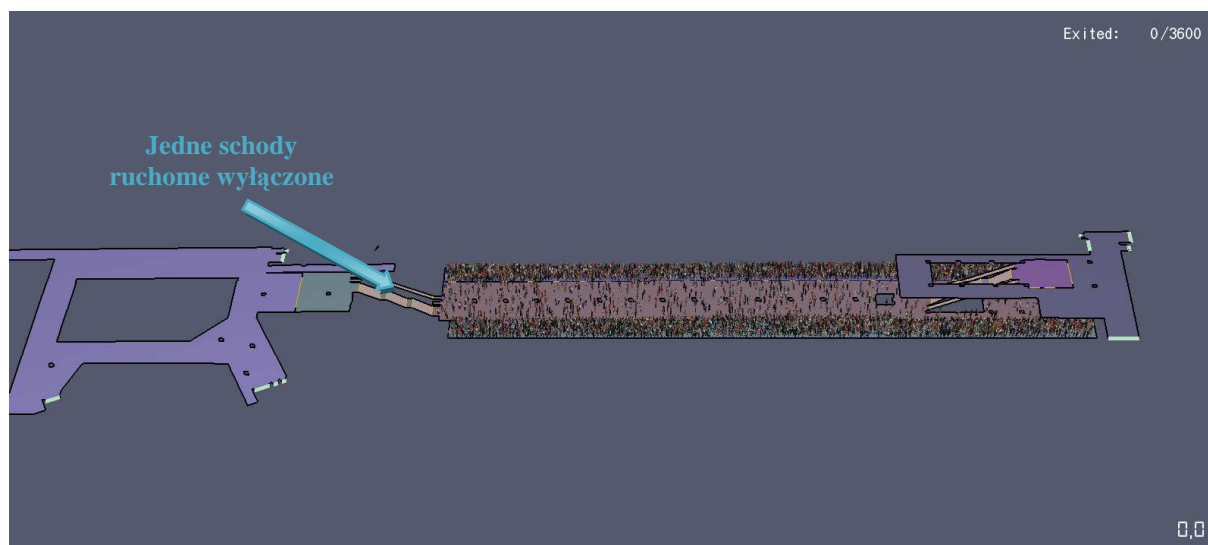
W niniejszej analizie przyjęto, że na poziomie peronu oraz w składach metra znajdować się będzie populacja, w skład, której wchodzić będzie 35% kobiet, 35% mężczyzn, 15% osób starszych oraz 15% dzieci. W symulacji przyjęto następujące cechy jednostek:

Tabela 2. Właściwości fizyczne jednostek przyjętych do symulacji

Typ jednostki	Szerokość ramion [m]	Prędkość przemieszczania [m/s]
Mężczyzna	0,540±0,040	1,35±0,40
Kobieta	0,510±0,040	1,15±0,40
Osoba starsza	0,420±0,030	0,90±0,30
Dzieci	0,500±0,040	0,80±0,30

Założono, że ww. cechy zostaną przypisane zgodnie z rozkładem normalnym tak, aby co najmniej 5% populacji posiadało wartości graniczne. Pozostałe ustawienia cech jednostek zostały ustawione domyślnie.

Rozmieszczenie jednostek na peronach wygenerowane zostało losowo. Poniżej przedstawiono model budynku wykorzystany w symulacji komputerowej.



Rysunek 3. Model budynku

### 3.2. OBLICZENIA CZASU EWAKUACJI WG NFPA 130

Przepustowość oraz prędkość przemieszczania się drogami ewakuacyjnymi:

	Przepustowość [os/mm-min]	Prędkość przemieszczania [m/min]
Perony/korytarze/rampy o nachyleniu nie większym niż 4%	0,0819	38
Antresole	0,0819	61
Schody/schody ruchome	0,0555	15 (składowa prędkości przemieszczania w pionie)
Drzwi/bramki ewakuacyjne	0,0819	
Bramki kontrolne	50 os/min	

Wyliczenie czasu ewakuacji:

Element ewakuacji	Ilość	Razem mm	os/mm-min	os/min
<i>Ewakuacja z peronu na poziom antresoli przed bramki</i>				
Schody	2	5500	0,0555	305
Schody ruchome	3*	3000	0,0555	166
				<b>471</b>
<i>Ewakuacja przez bramki na poziomie antresoli</i>				
Drzwi/bramki ewakuacyjne	3	9650	0,0819	790
Bramki kontrolne (50 os/min)	16			800
				<b>1590</b>
<i>Czas przejścia</i>				
		m	m/min	min
<i>Z poziomu peronu na zewnątrz stacji przez schody W4 (najdłuższa droga ewakuacyjna)</i>				
Peron, T <sub>1</sub>		47	38	1,24
Schody na poziom antresoli, T <sub>2</sub>		6,65	15	0,45
Antresola, T <sub>3</sub>		50	61	0,82
Schody na poziom terenu, T <sub>4</sub>		6,2	15	0,41
Całkowity czas przejścia, T <sub>1</sub> + T <sub>2</sub> + T <sub>3</sub> + T <sub>4</sub>				<b>2,92</b>

\* jedno schody ruchome wyłączony z użytku

Z powyższej tabeli wynika, iż czas ewakuacji determinowany będzie czasem przejścia z poziomu peronu na zewnątrz stacji oraz czasem kolejki, która utworzy się przy schodach z poziomu peronu na poziom antresoli. Przepustowość bramek ewakuacyjnych oraz bramek kontrolnych na poziomie antresoli jest znacznie większa niż przepustowość schodów, dlatego

też zakłada się, że przejście przez te elementy ewakuacji odbędzie się płynnie bez tworzenia dodatkowej kolejki. W związku z tym czas ewakuacji na zewnątrz stacji metra wynosi:

Czas kolejki przy schodach prowadzących na poziom antresoli:

$$T_k = 3600 \text{ [os]} / 471 \text{ [os/min]} \approx 7,64 \text{ [min]}$$

Czas przejścia na zewnątrz stacji:

$$T_p = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \approx 2,92 \text{ [min]}$$

Czas ewakuacji na zewnątrz stacji:

$$T_{ew} = T_k + T_p = 10,56 \text{ [min]}$$

Ponieważ za miejsce bezpieczne przyjęto początek schodów prowadzących z poziomu peronu na poziom antresoli wymagany czas bezpiecznej ewakuacji wynosi:

$$T_{bezp} = T_k = 7,64 \text{ [min]} = 458,4 \text{ [s]}$$

Czas przemieszczania po poziomej drodze peronu –  $T_1$  został pominięty, ponieważ czasem determinującym czas ewakuacji będzie czas kolejki.

**Czas ewakuacji w miejsce bezpieczne z poziomu peronu równy jest 458,4 sekundy.**

Po zastosowaniu współczynnika bezpieczeństwa równego 1,3 czas ewakuacji nie przekroczy 10 minut i równy jest ok. 596 sekund.

### **3.3. CHARAKTERYSTYKA UŻYTEGO OPROGRAMOWANIA DO MODELOWANIA EWAKUACJI**

#### **3.3.1. OPIS MODELU**

Geometria nawigacyjna skonstruowana jest z sieci trójkątów budujących model odwzorowujący prawdziwy obiekt. Model może zostać stworzony ręcznie lub automatycznie przy wykorzystaniu skryptów importujących pliki z innych programów (np. DXF lub FDS).

Ściany i inne nieprzekraczalne strefy reprezentowane są jako wycięcia w siatce nawigacyjnej. Obiekty te nie są pomijane w obliczeniach symulacji, jednakże stają się niedostępne dla poruszających się jednostek.

Drzwi oraz wyjścia ewakuacyjne reprezentowane są jako specjalne granice siatek nawigacyjnych. We wszystkich symulacjach drzwi zapewniają mechanizm łączenia pokoi oraz śledzenia przepływu ludzi. Dodatkowo w miejscach tych rejestrowane są parametry poruszania się ludzi. W zależności od ustawień symulacji, drzwi mogą wyraźnie regulować przepływ ludzi lub może odbywać się to automatycznie w zależności od gęstości jednostek.

Schody również reprezentowane są jako specjalne granice siatek nawigacyjnych. Prędkość poruszania się ludzi jest wtedy ograniczona przez współczynnik zależący od parametrów związanych z budową schodów. Domyślnie każde schody definiują dwoje drzwi. Funkcja tych drzwi jest identyczna jak pozostałych drzwi w modelu, jednakże jest ściśle kontrolowana poprzez edytor klatki schodowej w interfejsie użytkownika, tak aby kontrolować błędy wynikające z geometrycznej rozbieżności pomiędzy schodami i łączącymi drzwiami.

Jednostki modelowane są jako pionowe walce na siatce obliczeniowej. Przemieszczają się przy użyciu tzw. techniki „agent-based” nazwanej odwróconym układem sterowania. Obliczenia poruszania każdej z osób odbywają się niezależnie i mogą być odniesione do szeregu różnych parametrów (maksymalna prędkość, wybór wyjścia, model 3D itp.).

#### **3.3.2. TRYB SYMULACJI**

Pathfinder umożliwia modelowanie przemieszczania się jednostek po zdefiniowanej siatce w dwóch trybach. W trybie „sterowniczym”, drzwi nie wpływają na limit przepustowości ludzi, ale ludzie wykorzystują system sterowniczy do utrzymywania rozsądnego dystansu względem siebie. W trybie SFPE, osoby nie mogą omijać się wzajemnie prowadząc do przenikania się, ale drzwi wpływają na przepływ ludzi, natomiast prędkość kontrolowana jest przez zagęszczenie.

Możliwe jest dowolne przełączanie się pomiędzy tymi dwoma trybami prowadzenia symulacji w interfejsie programu i porównywanie wyników symulacji.

### 3.3.3. OGRANICZENIA

Pathfinder nie łączy interpretacji z wynikami symulacji rozwoju pożaru i transportu dymu i ciepła oraz nie umożliwia modelowania bardziej złożonych zachowań takich jak np. zachowania grupowe. Dynamiczna geometria jest wspierana tylko częściowo tj. istnieje możliwość dynamicznego wykorzystania wind. Brak jest natomiast możliwości zintegrowania dynamicznej geometrii, tj. zamykanie/otwieranie drzwi czy elementów ruchomych. Windy są aktywne wyłącznie w warunkach ewakuacji. Nie istnieje możliwość ogólnego modelowania systemu wind w trybie normalnego użytkowania.

### 3.4. WYNIKI SYMULACJI

Otrzymane wyniki zostały zaprezentowane w formie wykresów, które przedstawiają zależność pomiędzy czasem, a ilością pozostających/ewakuowanych osób z całego budynku. Ponadto za pomocą zrzutów obrazu z programu Pathfinder zaprezentowano rozkład strumieni ewakuacyjnych.

Przeprowadzono 3 identyczne symulacje zmieniając losowo właściwości fizyczne poszczególnych jednostek. Wyniki poszczególnych symulacji znajdują się w tabeli poniżej:

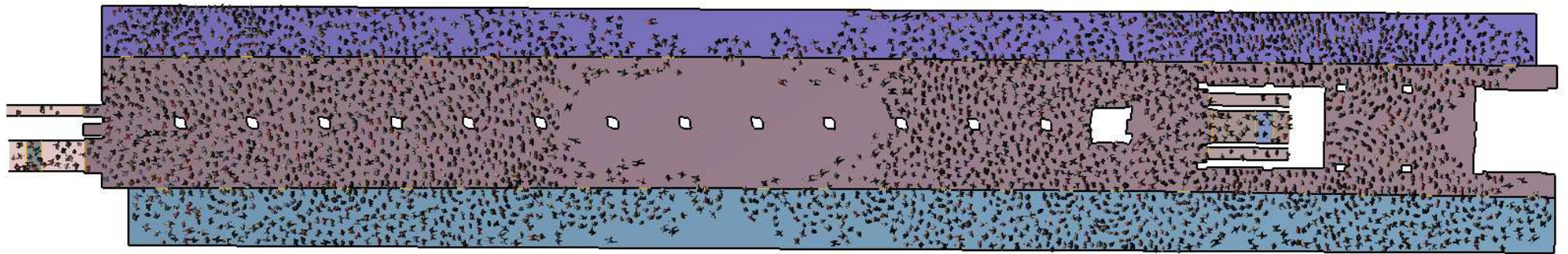
	Czas ewakuacji w miejsce bezpieczne – poziom antresoli [sek]	Czas ewakuacji na zewnątrz stacji [sek]
Symulacja nr 1	511	573
Symulacja nr 2	512	570
Symulacja nr 3	513	571
<b>Średni czas ewakuacji</b>	<b>512</b>	<b>571</b>

**Ze względu na ograniczenia programu Pathfinder czasy symulacji są dłuższe od czasu obliczonego zgodnie z normą NFPA 130. Czasy te są jednak mniejsze od czasu ewakuacji po zastosowaniu współczynnika bezpieczeństwa równego 1,3. Na potrzeby dalszej analizy założono, iż bezpieczne warunki ewakuacji powinny być spełnione przez 10 minut od powstania pożaru.**

W dalszej części zaprezentowano wyniki symulacji nr 2, której czas ewakuacji jest najbardziej zbliżony do czasu średniego.

Rozkład strumienia ewakuowanych ludzi po 60 sekundach

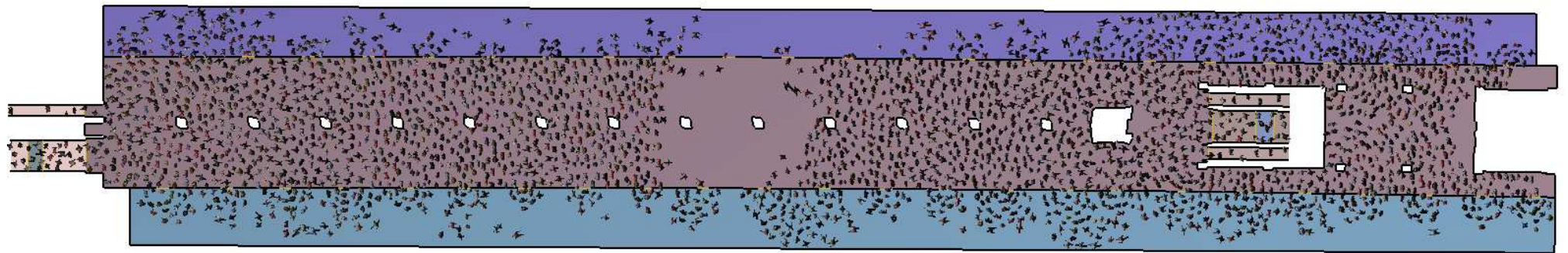
Exited: 101/3600



60,2

Rozkład strumienia ewakuowanych ludzi po 120 sekundach

Exited: 500/3600

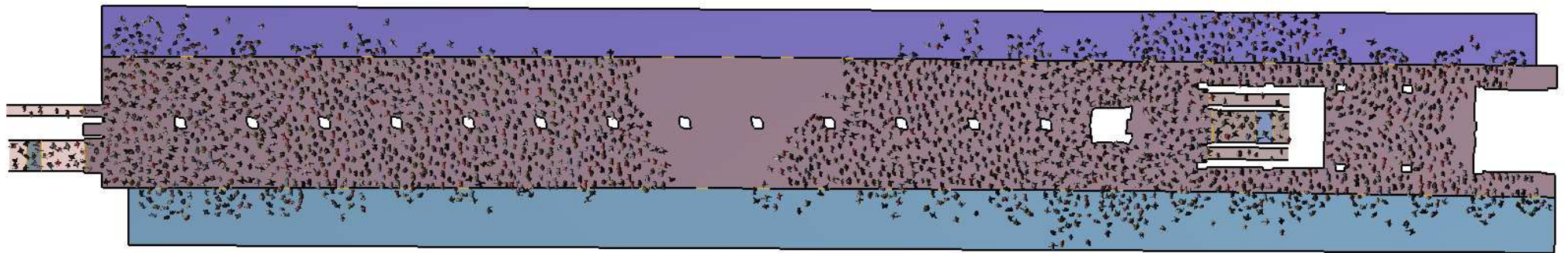


120,0



Rozkład strumienia ewakuowanych ludzi po 180 sekundach

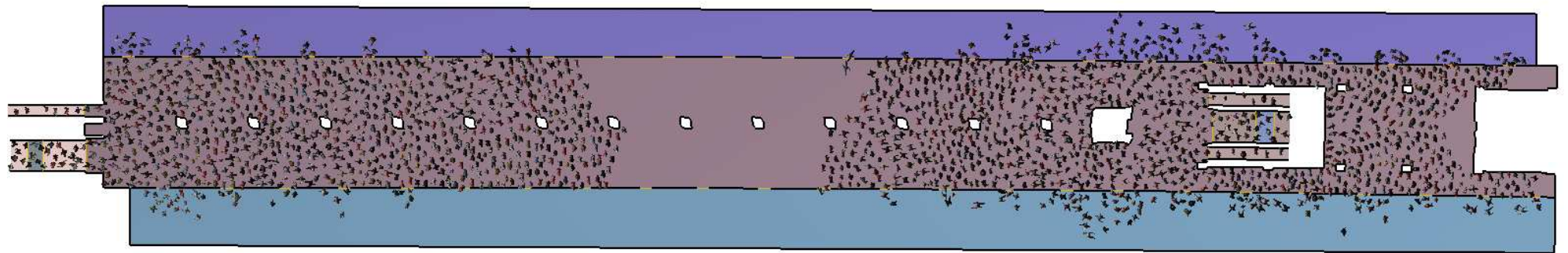
Exited: 931/3600



180,2

Rozkład strumienia ewakuowanych ludzi po 240 sekundach

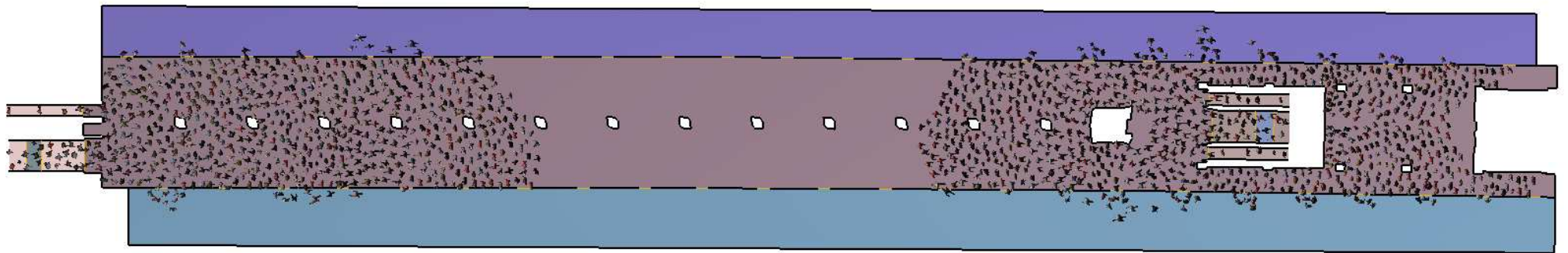
Exited: 1359/3600



240, 1

Rozkład strumienia ewakuowanych ludzi po 300 sekundach

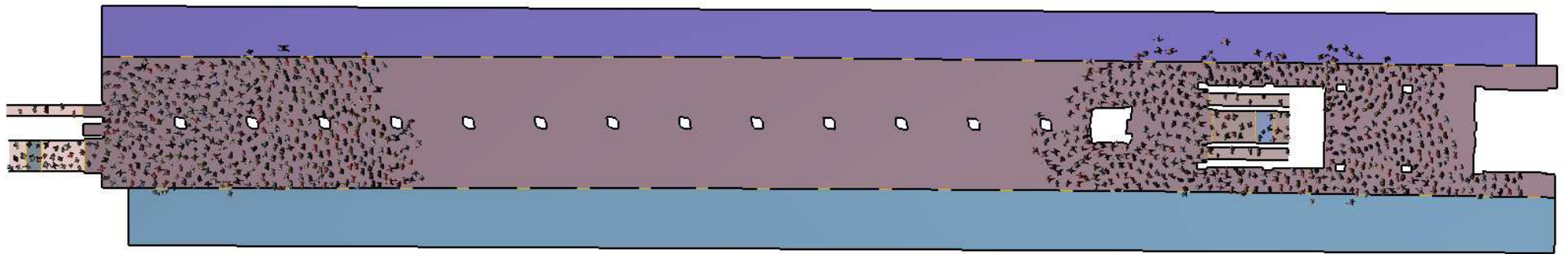
Exited: 1803/3600



300,3

Rozkład strumienia ewakuowanych ludzi po 360 sekundach

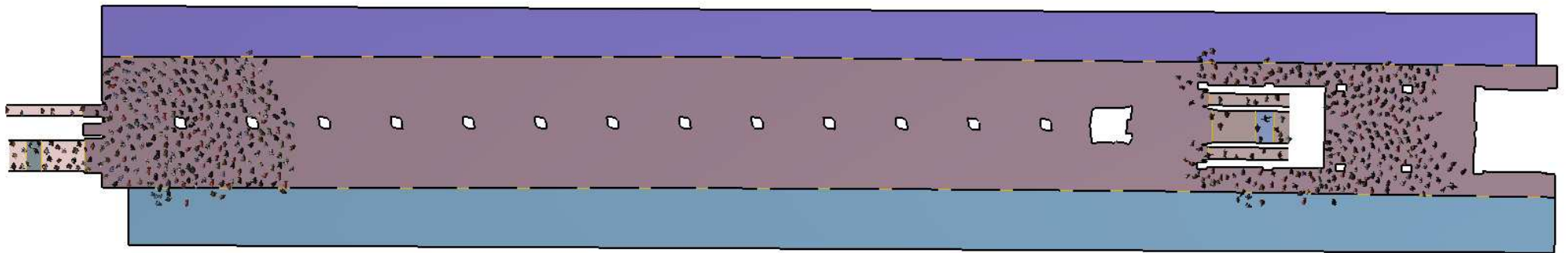
Exited: 2261/3600



360, 1

Rozkład strumienia ewakuowanych ludzi po 420 sekundach

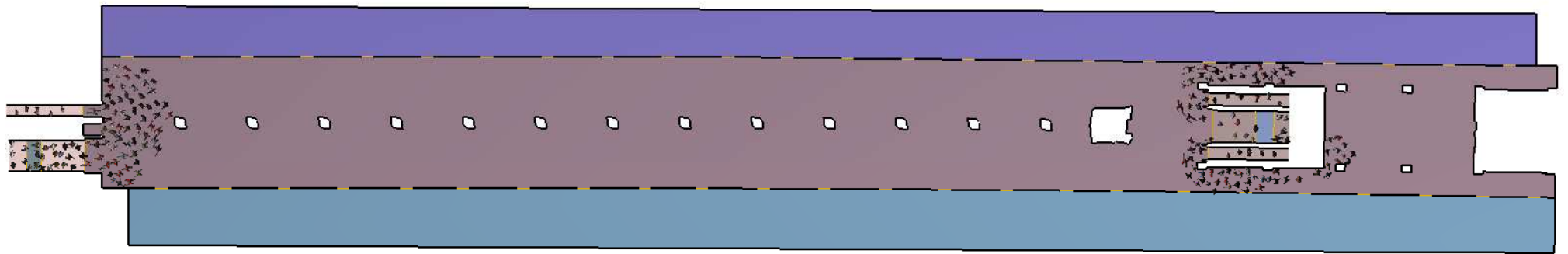
Exited: 2716/3600



420,0

Rozkład strumienia ewakuowanych ludzi po 480 sekundach

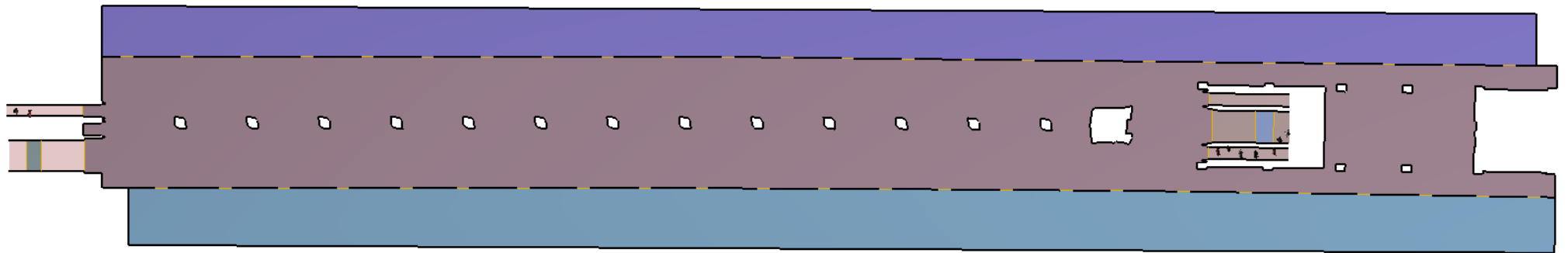
Exited: 3151/3600



480,2

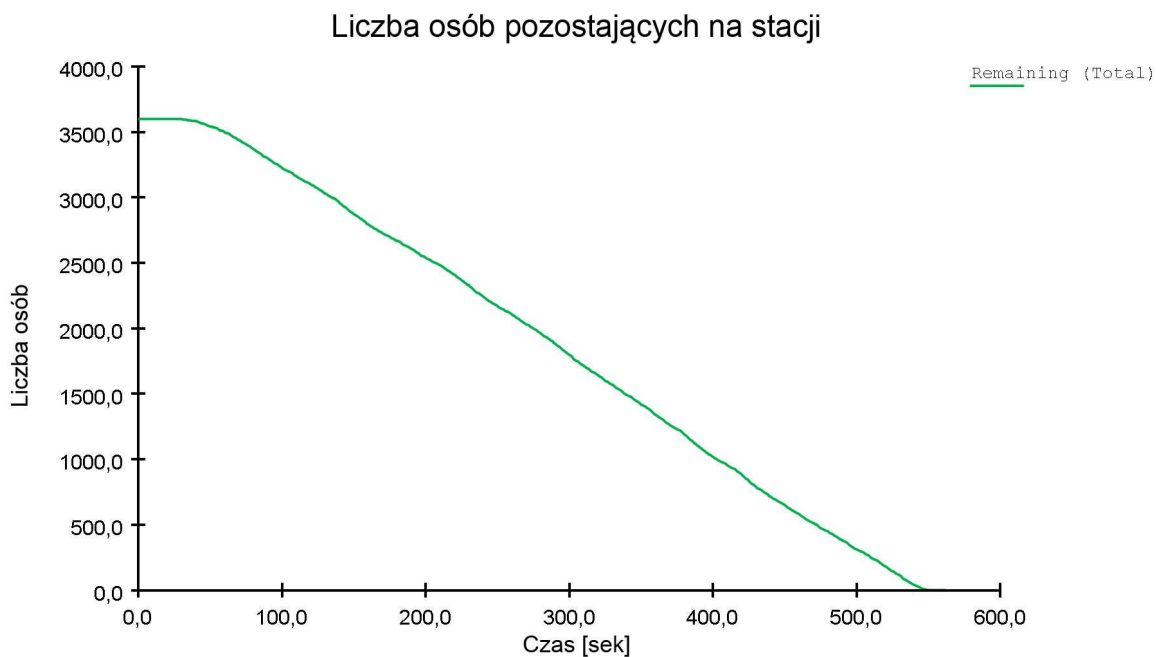
Rozkład strumienia ewakuowanych ludzi po 512 sekundach

Exited: 3361/3600



5 12,0

Poniższe wykresy przedstawiają liczę osób pozostających oraz ewakuowanych ze stacji metra na zewnątrz stacji.



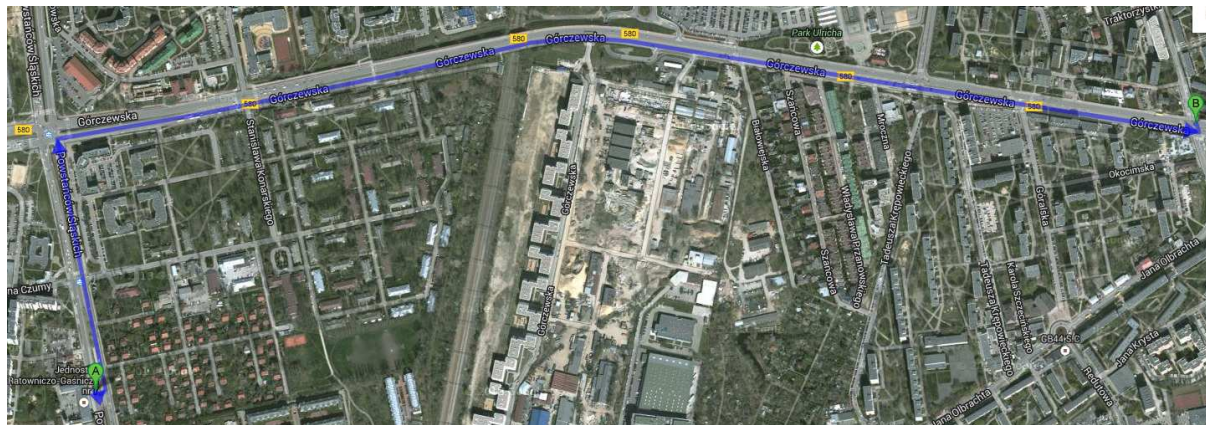
Na podstawie otrzymanych wyników symulacji można stwierdzić, iż czas ewakuacji w miejsce bezpieczne tj. poziom antresoli nie przekroczy 512 sekund. Podobnie jak miało to miejsce w przypadku obliczeń zgodnych z NFPA 130 czas ewakuacji z poziomego terenu determinowany był jedynie przepustowością schodów stałych i ruchomych. Potwierdzeniem tego są powyższe wykresy, na których widać, iż nachylenie krzywej względem osi czasu jest identyczne przez cały czas trwania ewakuacji.



#### 4. PRZEWIDYWANY CZAS DO INTERWENCJI EKIP RATOWNICZO-GAŚNICZYCH

Najbliższa Jednostka Ratowniczo-Gaśnicza Państwowej Straży Pożarnej znajduje się na ul. Chłodnej 3 (JRG 4) w Warszawie. Od projektowanego budynku znajduje się w odległości 2,5 km. Poniżej przedstawiona została jedna z możliwych dróg dojazdu (źródło:

<http://google.maps.pl>).



Szacowany czas dojazdu to:

- czas detekcji (wystąpienie alarmu II stopnia): 60 s.
- czas transmisji i powiadamiania jednostki ratowniczo-gaśniczej: 60 s.
- czas wyjazdu 1 samochodu gaśniczego (w nocy): 120 s.
- czas dojazdu (prędkość średnia - 30 km/h): 300 s.
- czas na rozpoznanie oraz przygotowanie linii gaśniczych: 180 s.
- czas dotarcia do źródła pożaru: 180 s.

Łączny czas do momentu rozpoczęcia gaszenia pożaru w stacji metra: **900 s.**

Ze względu na brak dostępnych krajowych metod obliczeniowych uwzględniających specyfikę działania Państwowej Straży Pożarnej, czas dojazdu ekip ratowniczych został oszacowany wykorzystując przybliżone wartości poszczególnych składowych akcji ratowniczo-gaśniczej. Czasy te mogą się różnić w realnych warunkach, jednakże w obliczeniach numerycznych przyjęto czas **20 minut**, czyli czas, po którym pożar osiągnie maksymalną moc. Przyjęty czas jest dłuższy od przewidywanego czasu rozpoczęcia akcji gaśniczej, co powoduje, iż zachowany jest 25% współczynnik bezpieczeństwa.

## 5. SYMULACJE CFD

### 5.1. CHARAKTERYSTYKA UŻYTEGO PROGRAMU CFD

#### 5.1.1. NAZWA PROGRAMU, WERSJA, PRODUCENT

Do przeprowadzenia szczegółowej analizy oraz otrzymania wyników zawartych w raporcie wykorzystany został program Fire Dynamics Simulator wersja 5.5.0, który jest narzędziem opracowanym przez amerykański instytut naukowo-badawczy NIST (National Institute of Standards and Technology). Program jest znany oraz stosowany w środowisku inżynierów, pracowników i studentów wyższych uczelni technicznych na całym świecie, zajmujących się nowoczesną inżynierią bezpieczeństwa pożarowego. Aplikacja wykorzystuje metody obliczeniowe numerycznej mechaniki płynów CFD. Model CFD, zastosowany w programie FDS pozwala badać rozwój pożaru w złożonych geometriach. CFD opisuje ruch płynu na podstawie rozwiązań układu równań różniczkowych cząstkowych Naviera-Stokesa. Wykorzystują one zasady zachowania masy, pędu i energii. FDS jest narzędziem przeznaczonym do szczegółowej analizy zagrożeń pożarowych i rozwiązywania problemów związanych inżynierią bezpieczeństwa pożarowego. Zapewnia tym samym możliwość poznania dynamiki zjawiska pożaru oraz zachodzących tam procesów spalania. Program ten, w zakresie zagadnień związanych z bezpieczeństwem pożarowym, można stosować do modelowania transportu ciepła i produktów spalania powstałych na skutek pożaru, wymiany ciepła poprzez promieniowanie i konwekcję, pirolizy, rozprzestrzeniania się płomieni oraz rozwoju pożaru, aktywacji tryskaczy oraz czujek dymu i ciepła, czy też oddziaływania kropli wody na płomień [1]. Program FDS wykorzystuje technikę LES oraz, po wprowadzeniu odpowiednio gęstej siatki obliczeniowej, bezpośrednią symulację numeryczną (DNS). Model LES uwzględnia wiry o wielkości porównywalnej z wielkością komórek siatki. Metoda ta w ostatnich latach jest intensywnie rozwijana, ponieważ stanowi kompromis pomiędzy dokładnością odwzorowania dynamiki pożaru, a dostępnymi obecnie możliwościami obliczeniowymi. DNS traktuje turbulencję w sposób deterministyczny.

#### 5.1.2. RODZAJ I GĘSTOŚĆ SIATKI OBLICZENIOWEJ

Użyto siatki regularnej sześcienniej o boku 20 cm. Domena obliczeniowa została podzielona na 8 siatek obliczeniowych. Rozmiar siatki dobrano w oparciu o:

- a) wytyczne Health and Safety Laboratory [2],
- b) wytyczne NUREG, publikowane również w instrukcji użytkownika FDS5 User's Guide [3],

- c) w taki sposób, by bok siatki odpowiadał średnicy hydraulicznej wentylatora strumieniowego.

### **5.1.3. MODEL TURBULENCJI**

W przeprowadzonej symulacji został wykorzystany model Smagorinsky LES, odpowiedni dla wolnych przepływów dymu i gazów pożarowych pod wpływem termicznych sił wyporu.

### **5.1.4. MODEL SPALANIA**

Użyto modelu Mixture Fraction. Model ten przyjmuje następujące uproszczenia:

- a) skład stechiometryczny mieszaniny palnej jest definiowany przez ułamek molowy gazów palnych i produktów spalania (równy 1 dla czystego paliwa) i powietrza (równy 0 dla czystego powietrza),
- b) spalanie następuje natychmiast po zmieszaniu,
- c) spalanie jest jednoetapowe i całkowite,
- d) procent powstającego tlenku węgla jest stały i wynika z początkowych założeń symulacji, a nie z aktualnych warunków spalania.

Założenia te dają prawidłowe wyniki w przypadku pożarów kontrolowanych przez paliwo jak ma to miejsce w założonych scenariuszach.

### **5.1.5. MODEL PROMIENIOWANIA**

Równanie transportu promieniowania dla gazu szarego, jest rozwiązywane metodą objętości skończonych (FVM – Finite Volume Method). Metoda ta dzieli całe widmo promieniowania na kilka przedziałów częstości (typowo 6) i korzysta w nich z całkowitej postaci równań transportu promieniowania. Przedziały te dobrane są tak, by pokrywały się z pasmami widma substancji występujących w układzie. Część strumienia mocy pożaru emitowana w postaci promieniowania jest stała i jest jednym z parametrów symulacji. Przyjęto ułamek promieniowania 20%, co odpowiada spalaniu większości tworzyw sztucznych.

## **5.2. NIEPEWNOŚCI OBLICZENIOWE I ZASTOSOWANE WSPÓLCZYNNIKI BEZPIECZEŃSTWA**

W tabeli poniżej przedstawiono średnie procentowe niepewności obliczeniowe dla poszczególnych parametrów.

Tabela 4. Średnie błędy wyznaczania wielkości fizycznych w FDS  
Źródło: [5]

Mierzona wielkość	Niepewność (%)
Temperatura warstwy podsufitowej dymu	15
Wysokość strefy wolnej od zadymienia	13
Temperatura strumienia podsufitowego	16
Temperatura płomienia	14
Stężenia gazów	9
Stężenie dymu i widzialność	33
Ciśnienie	40
Strumień ciepła	20
Temperatura powierzchni	14

### 5.3. WARUNKI POCZĄTKOWE I BRZEGOWE

#### 5.3.1. POCZĄTKOWA TEMPERATURA WEWNĘTRZNA I ZEWNĘTRZNA

Przyjęto początkową temperaturę wewnątrz i na zewnątrz obiektu równą 20°C.

#### 5.3.2. MATERIAŁY ELEMENTÓW BUDOWLANYCH

Właściwości materiałów budowlanych przyjęto w symulacji na podstawie normy PN-EN ISO 6946 [6].

Tabela 5. Właściwości materiałów budowlanych, wprowadzonych do programu FDS.

Źródło: opracowanie własne na podstawie [6].

Materiał	Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	Ciepło właściwe [kJ/kg·K]	Współczynnik przewodzenia ciepła [W/m·K]
Żelbet	2500	0,84	1,70
Błoczki betonowe	800	0,84	0,30
Płyta gipsowo-kartonowa	1000	1,00	0,30
Szkło	2500	0,84	0,80
Stal	7850	0,44	58
Tynk wapienny	1700	0,84	0,70

#### 5.3.3. MATERIAŁ PALNY

Jako materiał palny przyjęto piankę poliuretanową. Właściwości palne wg [7] zebrano w tabeli 6.

Tabela 6. Właściwości materiału spalane użyte w symulacji.

Źródło: [7].

Ciepło spalania [MJ/kg]	26200
-------------------------	-------

Ułamek masowy dymu	0,11
Ułamek masowy tlenku węgla	0,01
Stosunek atomów węgla:wodoru:tłenu	1:1,75:0,25
Masowy współczynnik ekstynkcji $K_m$ [m <sup>2</sup> /kg]	8700

### 5.3.4. ZASTOSOWANE SCHEMATY I USTAWIENIA NUMERYCZNE

W symulacji użyto domyślnych ustawień programu. Krok czasowy obliczany jest automatycznie zgodnie z jednym z trzech schematów, odnoszących się do sposobu normalizacji wektora prędkości. Normalizacja polega na tym, iż krok czasowy jest automatycznie regulowany, tak aby podczas rozwiązywania zadanego problemu obliczeniowego, cząstka płynu nie mogła przejść przez więcej niż jedną komórkę obliczeniową sitaki w danym przedziale czasowym. Domyślnym schematem dla użytej wersji 5.5.0 jest schemat  $L_\infty$ :

$$\frac{\|\vec{u}\|}{\delta x} = \max\left(\frac{|u|}{\delta x}, \frac{|v|}{\delta y}, \frac{|w|}{\delta z}\right)$$

gdzie:

$u, v, w$  – składowe wektora prędkości w kierunkach  $x, y, z$

$x, y, z$  – wymiary komórki obliczeniowej

### 5.3.5. CZAS SYMULACJI

Jako czas symulacji przyjęto czas ewakuacji, czas do interwencji ekip ratowniczych – 1 200 sekund oraz czas 3 600 sekund. Krok czasowy jest ustalany automatycznie na podstawie liczby CFL, przy użyciu schematu  $L_\infty$ .

## 5.4. ANALIZOWANE PARAMETRY POŻARU

Podczas analizy numerycznej sprawdzeniu podlegają następujące parametry:

- temperatura powietrza powyżej 60 st. C na wysokości równej 1,8 m od poziomu drogi ewakuacyjnej;
- gęstość strumienia promieniowania cieplnego o wartości powyżej 2,5 kW/m<sup>2</sup> przez czas dłuższy niż 30 s;
- temperatura gorących gazów pożarowych powyżej 200 st. C na wysokości ponad 2,5 m od poziomu drogi ewakuacyjnej;
- zasięg widzialności mniejszy niż 10 m na wysokości 1,8 m od poziomu drogi ewakuacyjnej;
- zawartość tlenu poniżej 15% na wysokości 1,8 m od poziomu drogi ewakuacyjnej;

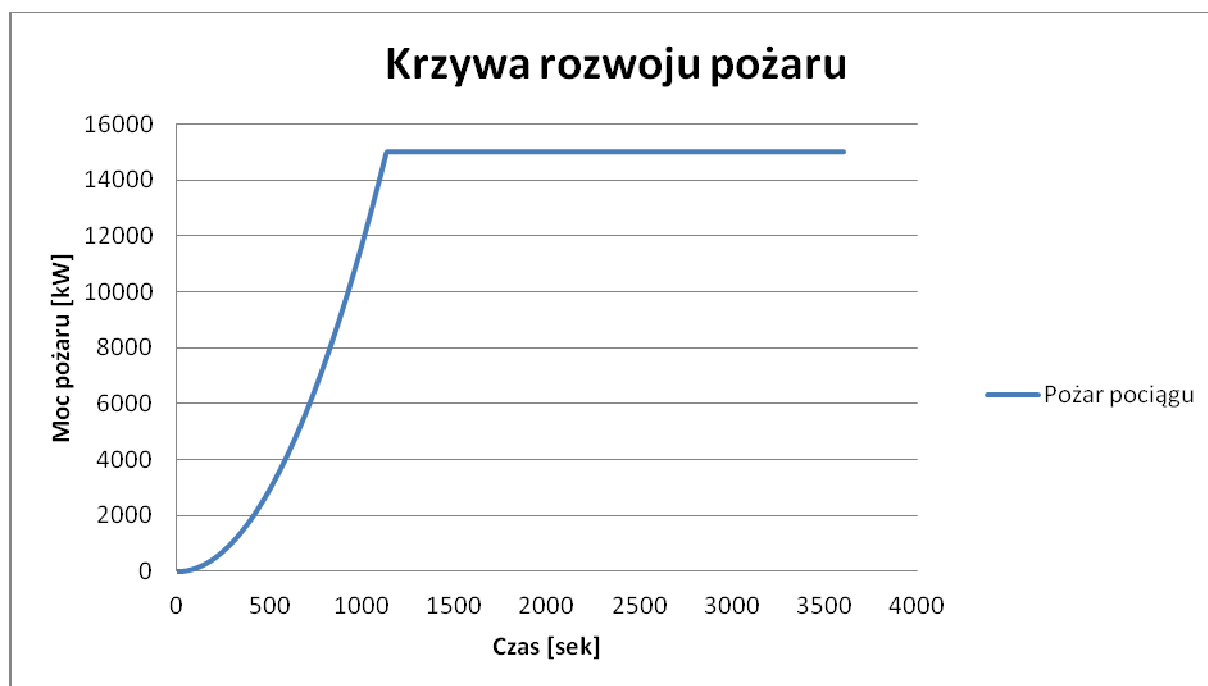
- f) temperatura gazów pożarowych powyżej 100 st. C na wysokości 1,8 m od poziomu drogi ewakuacyjnej;
- g) temperatura gazów pożarowych usuwanych przez kraty wyciągowe na stacji.

We wszystkich przypadkach zastosowano współczynnik niepewności zgodny z tabelą 5.

Dane wyjściowe zostały odczytane poprzez zdefiniowane punkty pomiarowe oraz wizualizację w programie SmokeView.

### 5.5. ANALIZOWANE SCENARIUSZE POŻAROWE

W analizowanym obiekcie wykonano kilkadziesiąt symulacji rozwoju pożaru w celu znalezienia optymalnego rozwiązania systemu wentylacji oddymiającej. W niniejszym raporcie w przypadku pożaru na stacji metra przedstawione są wyniki dla dwóch scenariuszy tj. pożaru pociągu metra wjeżdżającego na stację oraz pożaru walizki palącej się na poziomie peronu. Dla pierwszego przypadku (scenariusz nr 1) założono pożar o mocy maksymalnej 15 MW, który rozwija się ze średnią szybkością zgodnie z zależnością  $\alpha t^2$ , gdzie  $\alpha = 0,01172$ . Pożar po czasie 10 minut uzyskuje moc ok. 4 220 kW, natomiast maksymalna moc, tj. 15 000 kW stabilizuje się po czasie ok. 19 minut (1 132 sekundy). Założono pożar rozwijający się, tj. zwiększający swoją powierzchnię wraz z upływem czasu, przy założeniu stałej gęstości mocy. Założoną krzywą mocy pożaru przedstawia poniższy wykres.



W przypadku pożaru walizki (scenariusz nr 2), założono pożar o mocy 1 MW, który rozwija się szybko, również zgodnie z zależnością  $\alpha t^2$ , gdzie  $\alpha = 0,04689$ . Moc 1 MW stabilizuje się po ok. 146 sekundach. Założono pożar o stałej powierzchni, którego moc zwiększa się wraz z przyrostem gęstości mocy.



W przypadku pożaru na torach manewrowych, torach odstawczych oraz stanowisku przeglądu pociągów przedstawione są wyniki dla trzech scenariuszy – po jednym dla każdej strefy dymowej (kolejno scenariusz nr 3, 4, 5). We wszystkich przypadkach założono pożar o mocy maksymalnej 15 MW, który rozwija się ze średnią szybkością zgodnie z zależnością  $\alpha^2$ , gdzie  $\alpha = 0,01172$ . Pożar po czasie 10 minut uzyskuje moc ok. 4 220 kW, natomiast maksymalna moc, tj. 15 000 kW stabilizuje się po czasie ok. 19 minut (1 132 sekundy). Założono pożar rozwijający się, tj. zwiększający swoją powierzchnię wraz z upływem czasu, przy założeniu stałej gęstości mocy. Założoną krzywą mocy pożaru przedstawia poniższy wykres.



We wszystkich przypadkach znajdowały się dwa składy metra.

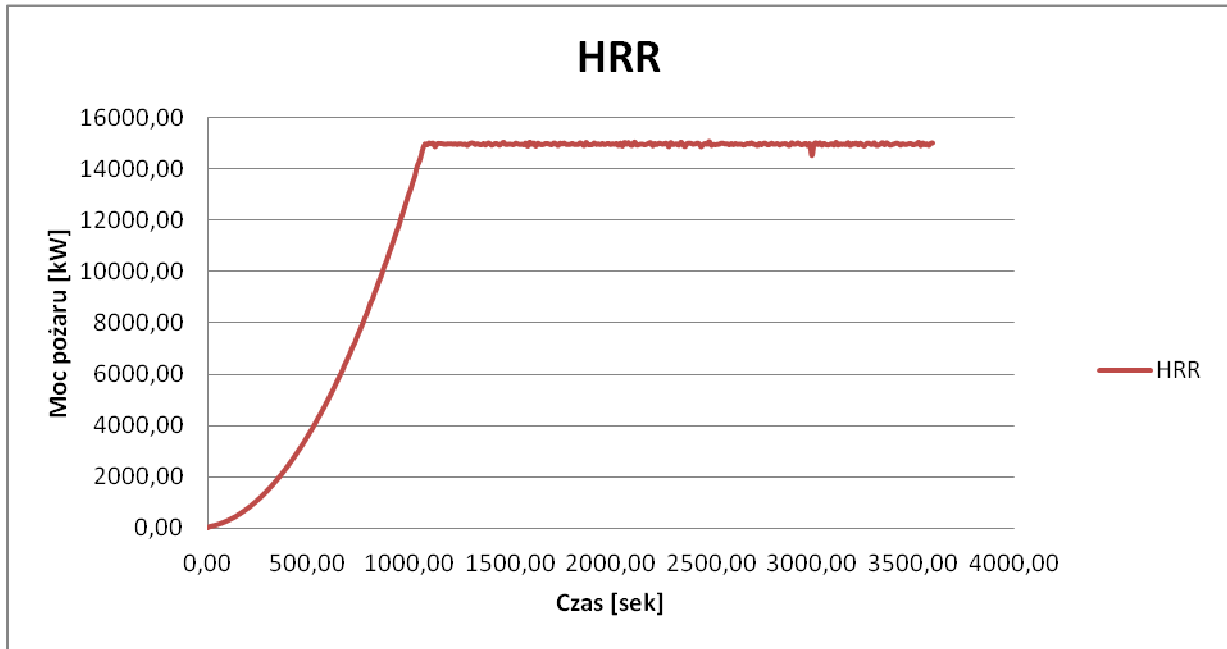


## 6. WYNIKI SYMULACJI CFD

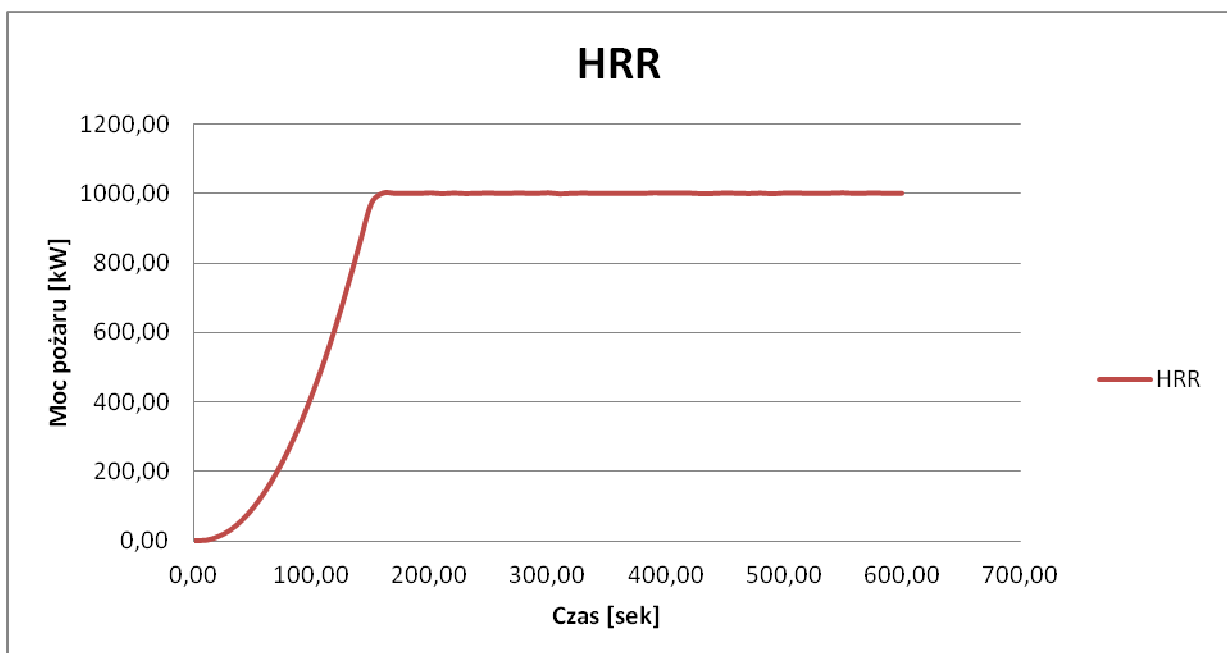
### 6.1. SPRAWDZENIE WARUNKÓW EWAKUACJI ORAZ BEZPIECZEŃSTWA EKIP RATOWNICZYCH

#### 6.1.1. KRZYWE MOCY POŻARU

Poniżej przedstawione została krzywa rozwoju pożaru, która została wygenerowana przez program FDS dla pożaru pociągu metra. Do czasu ewakuacji wszystkich osób w miejsce bezpieczne pożar uzyskuje moc ok. 4,4 MW. Po 20 min. pożar rozwija się do 15 MW.



Poniżej przedstawiono krzywą pożaru walizki. Pożar uzyskuje moc 1 MW po czasie ok. 150 sekund.

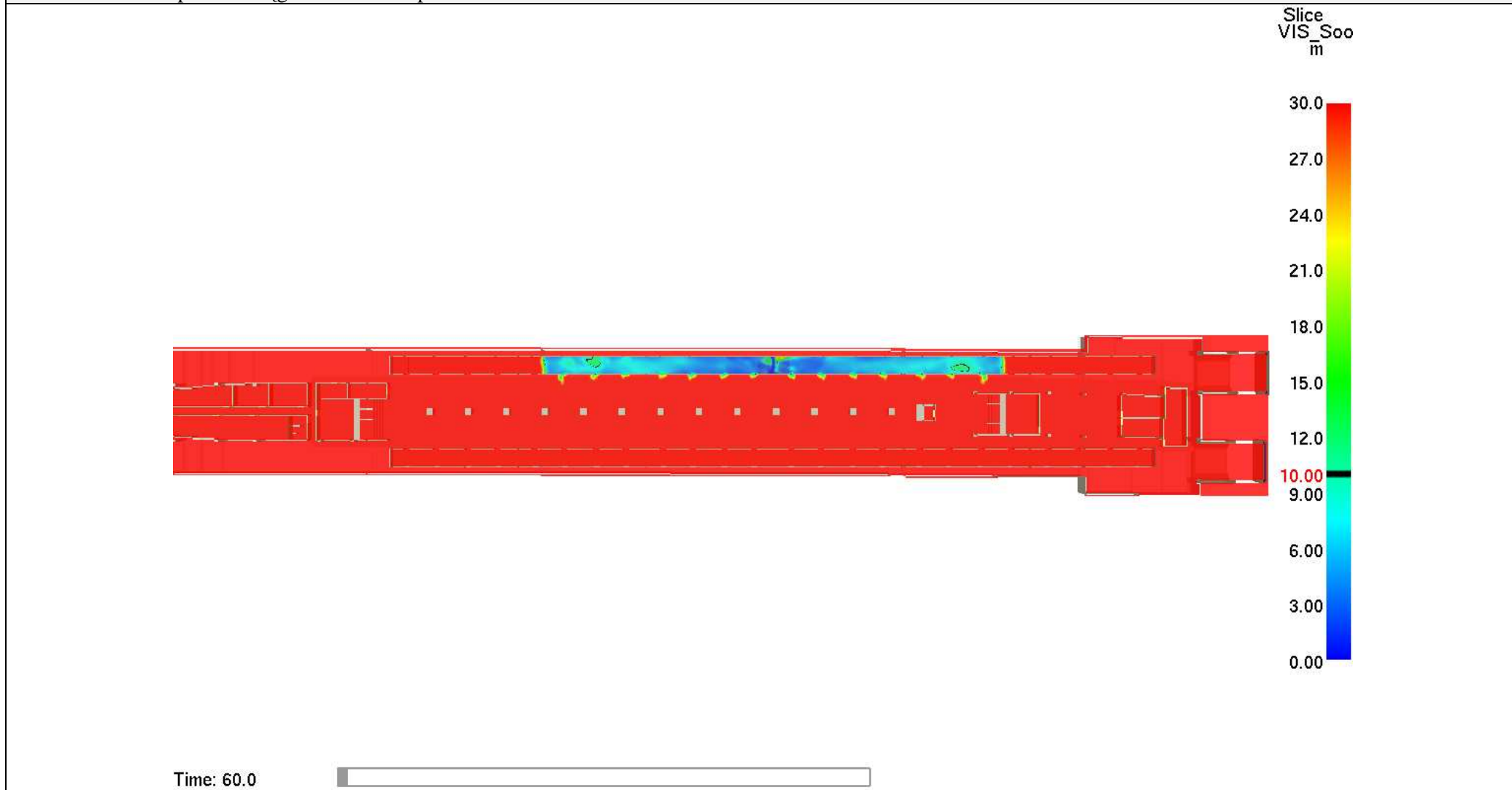


Otrzymane krzywe są zgodne z krzywymi założonymi.

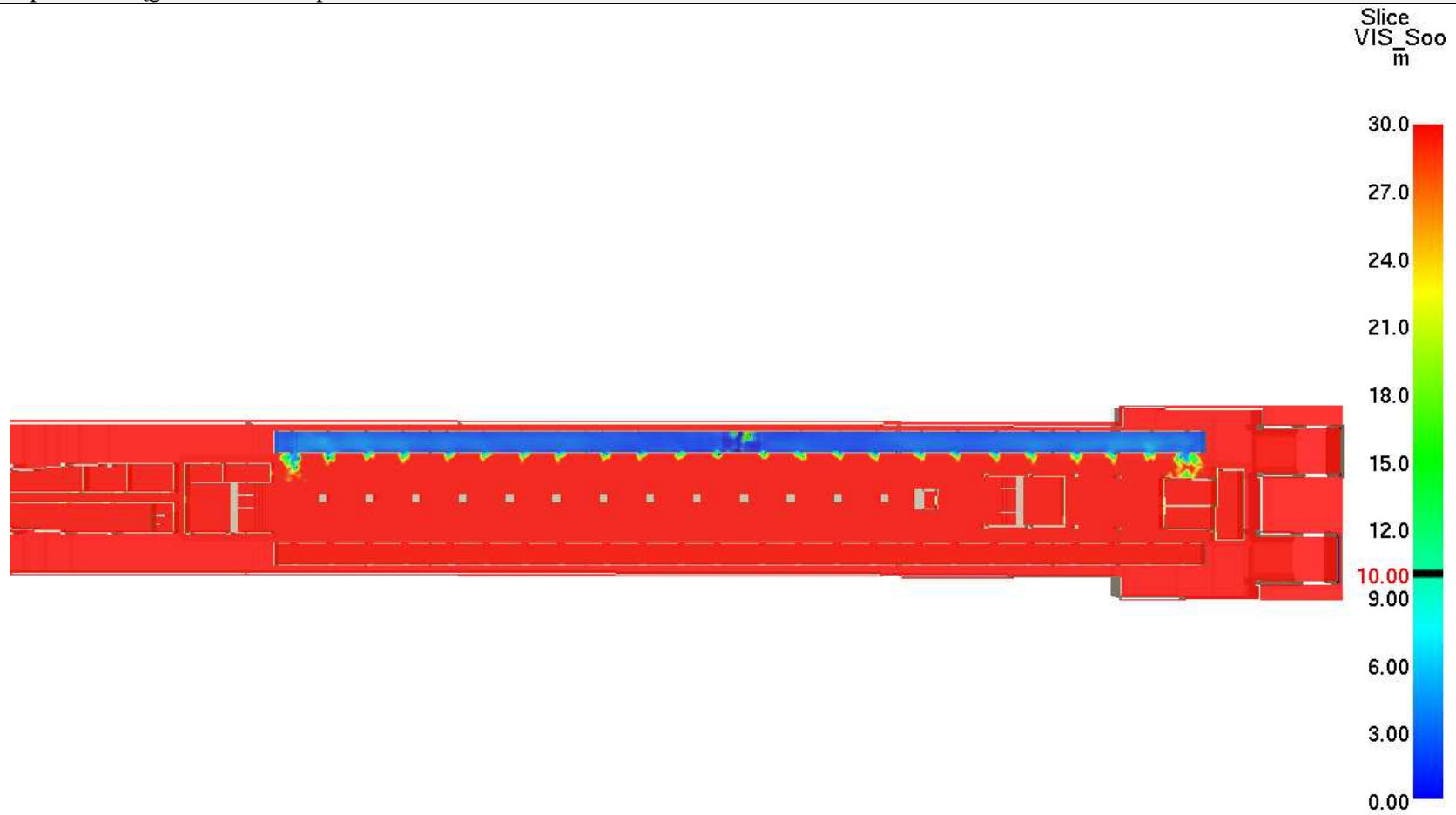
### 6.1.2. ZASIĘG WIDZIALNOŚCI NA WYSOKOŚCI 1.8 M W CZASIE EWAKUACJI

Scenariusz nr 1 - pożar pociągu:

Scenariusz nr 1 – spadek zasięgu widzialności po 60 sekundach



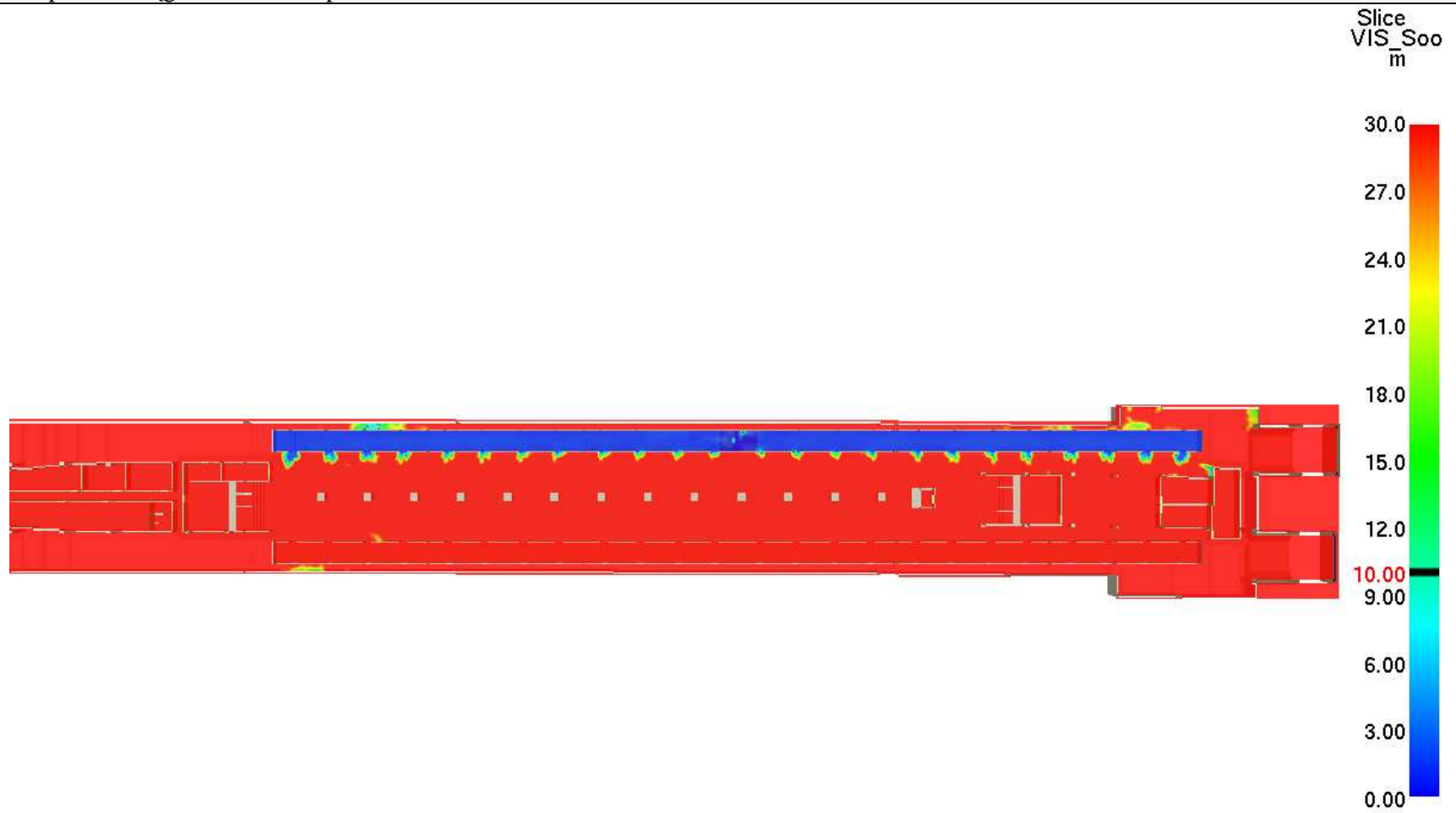
Scenariusz nr 1 – spadek zasięgu widzialności po 120 sekundach



Time: 120.0



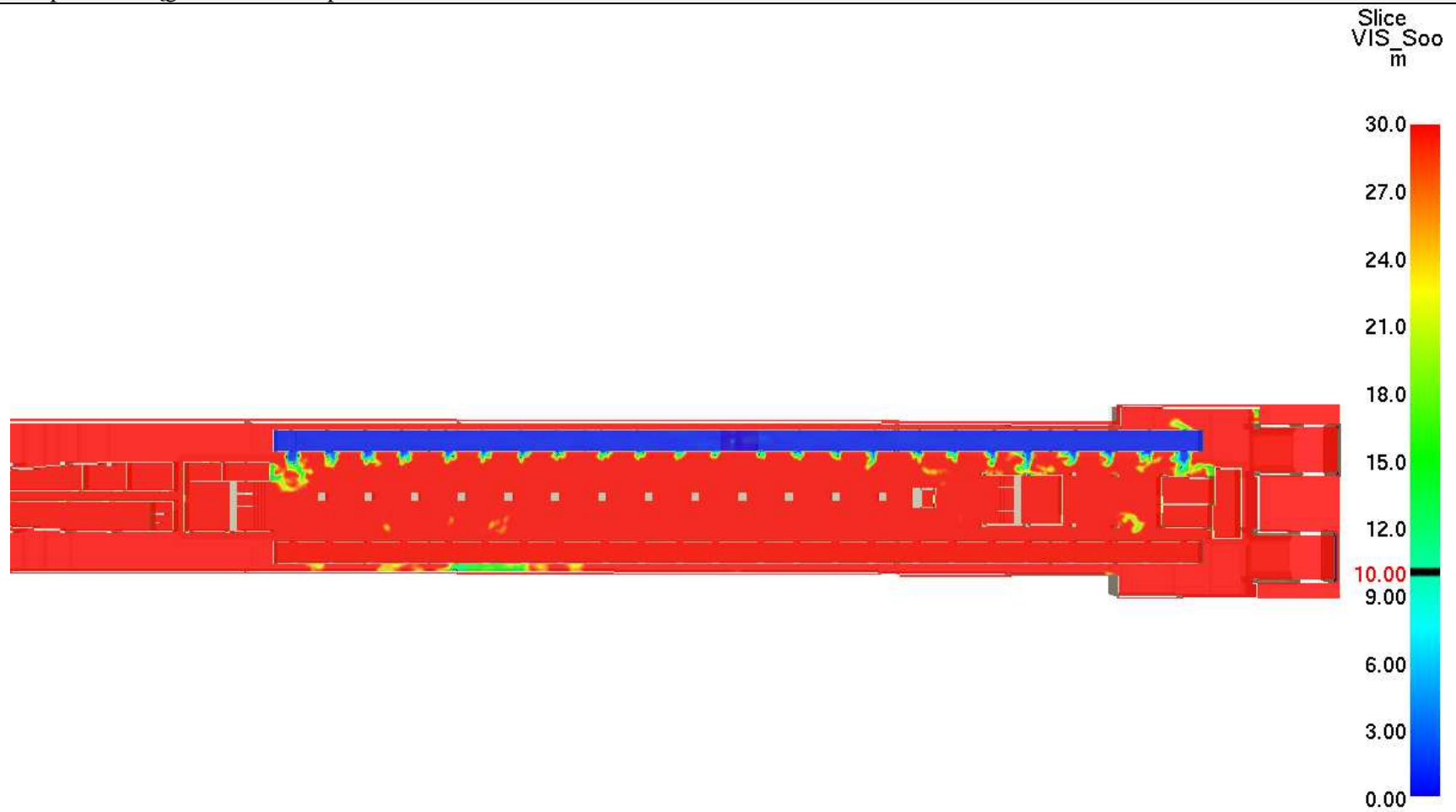
Scenariusz nr 1 – spadek zasięgu widzialności po 180 sekundach



Time: 180.0



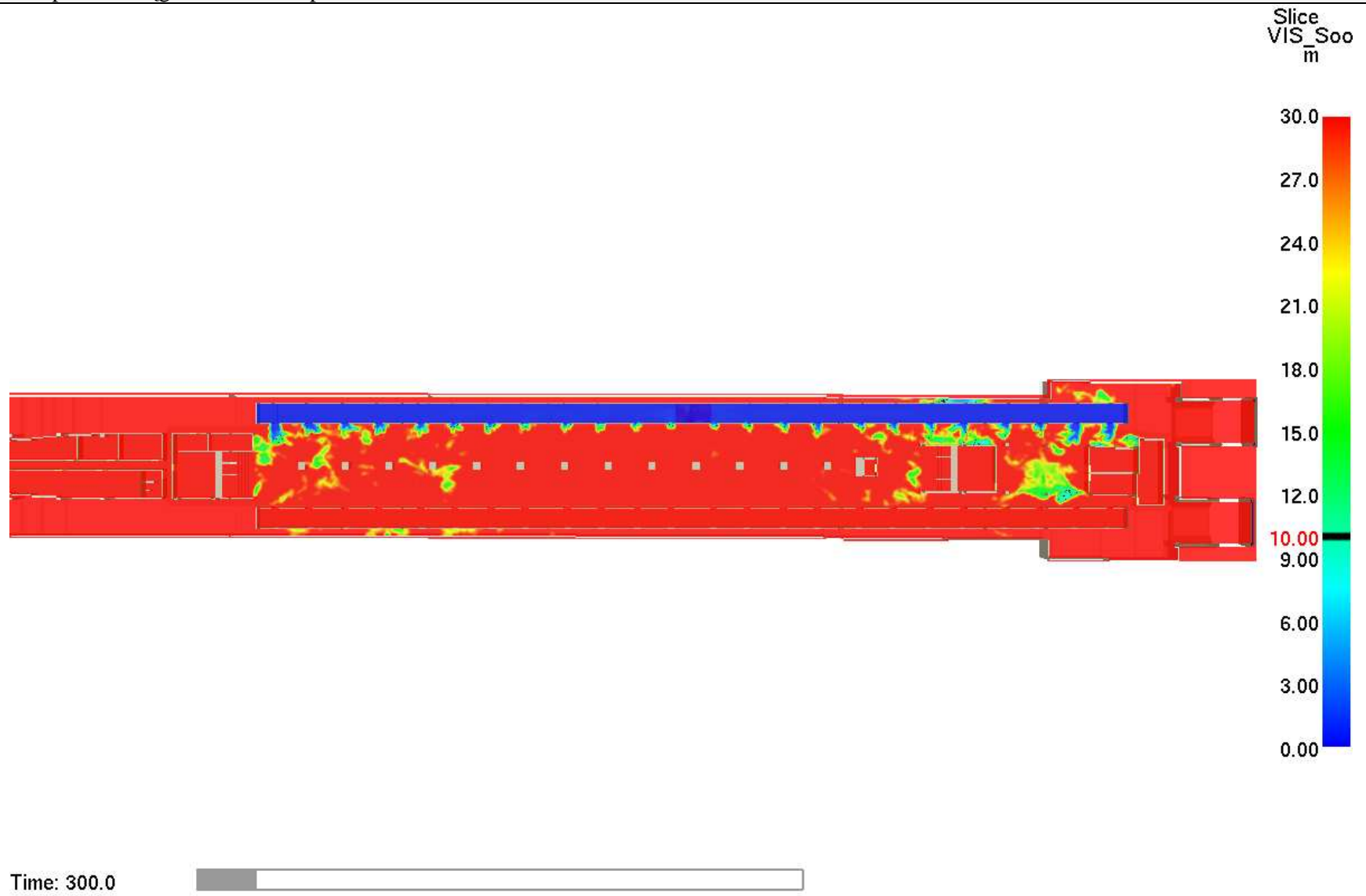
Scenariusz nr 1 – spadek zasięgu widzialności po 240 sekundach



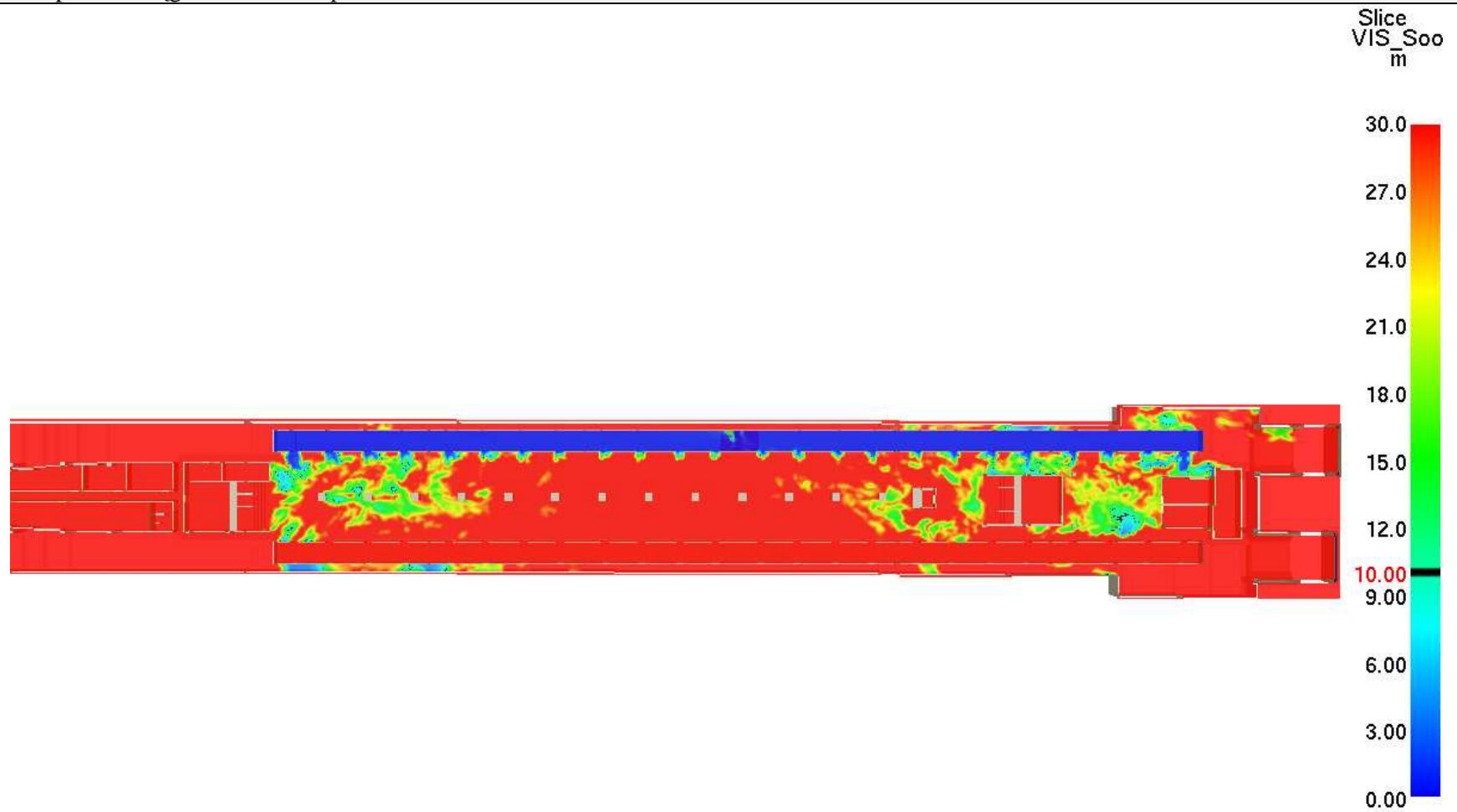
Time: 240.0



Scenariusz nr 1 – spadek zasięgu widzialności po 300 sekundach



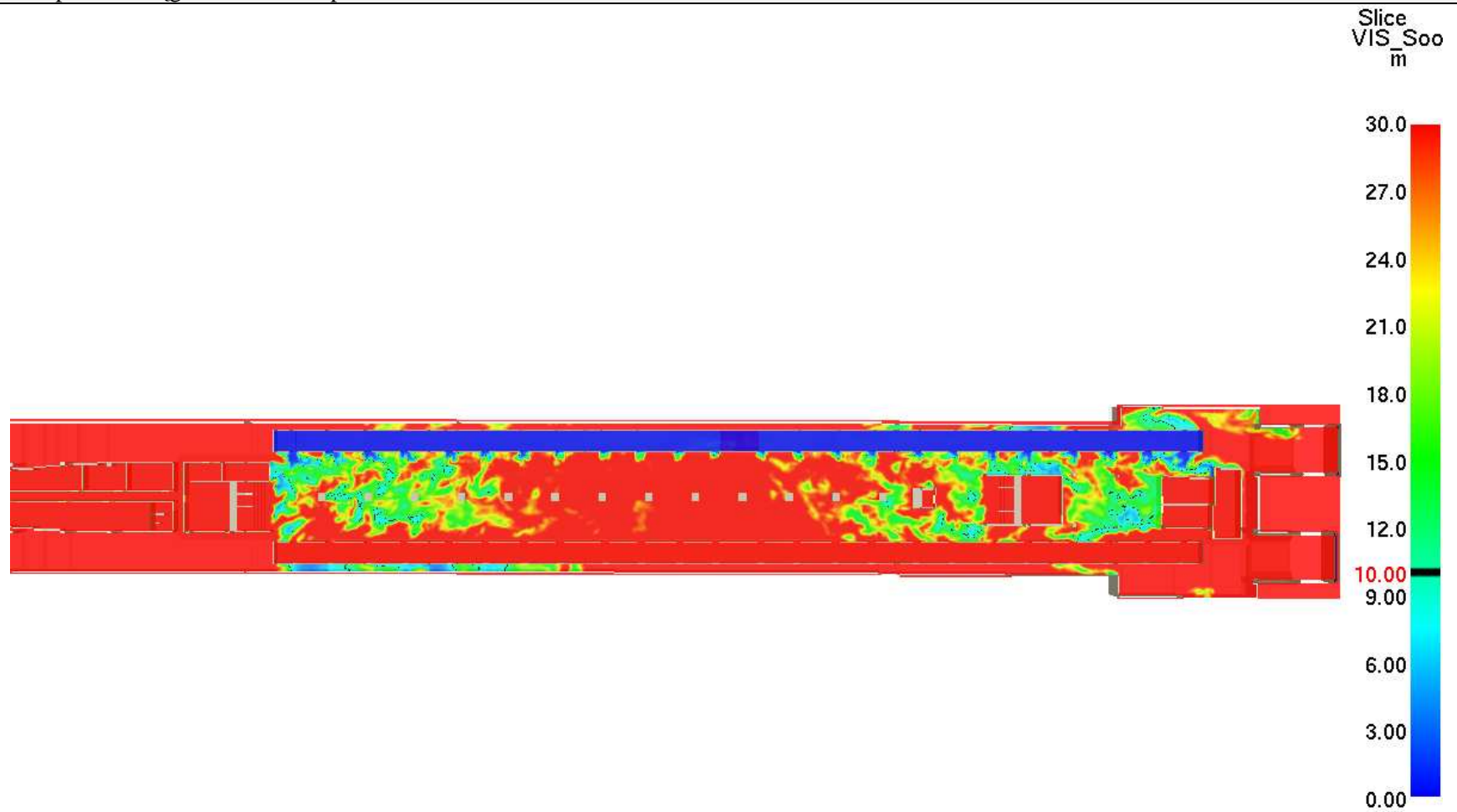
Scenariusz nr 1 – spadek zasięgu widzialności po 360 sekundach



Time: 360.0



Scenariusz nr 1 – spadek zasięgu widzialności po 420 sekundach

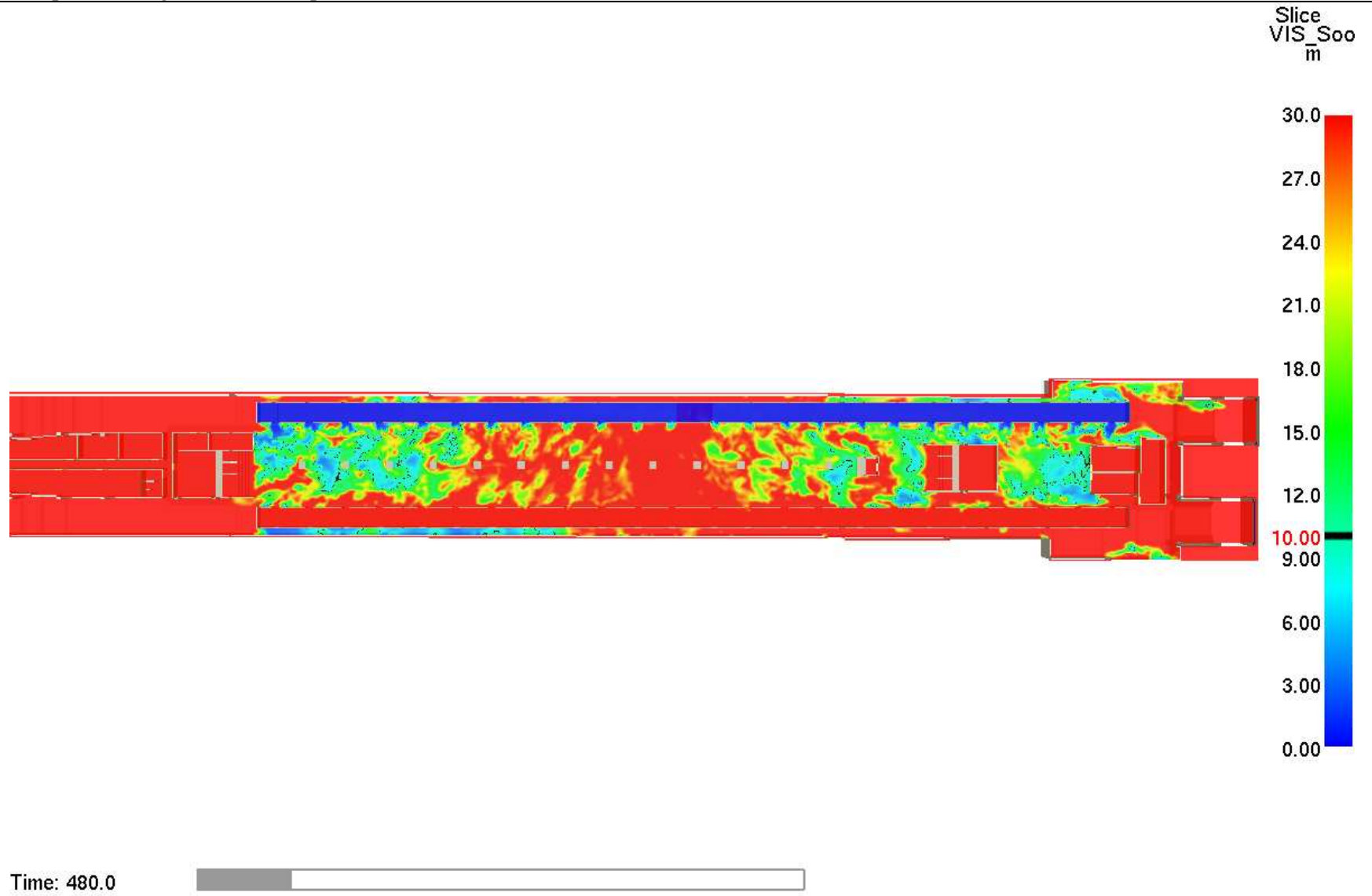


Time: 420.0

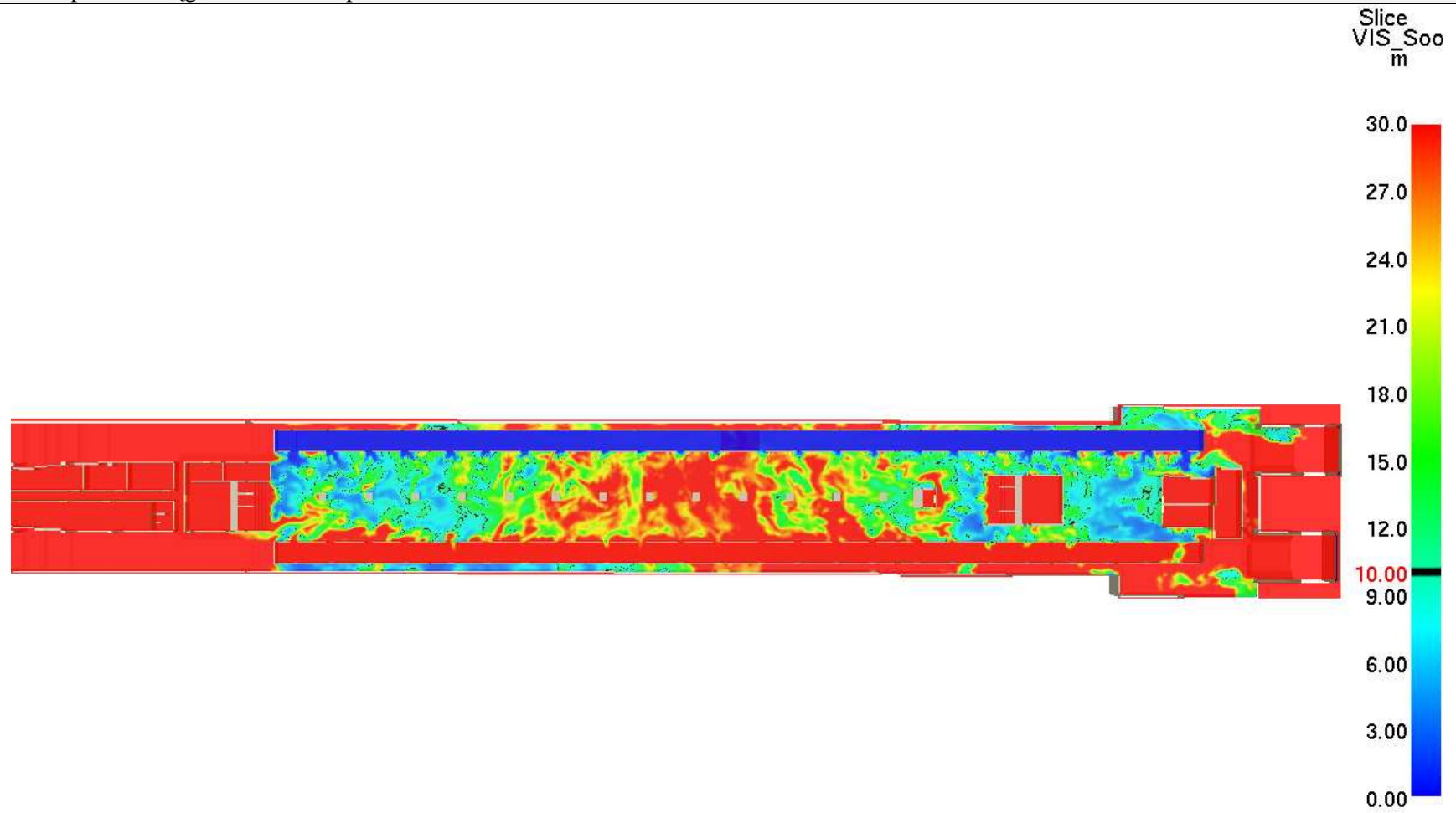




Scenariusz nr 1 – spadek zasięgu widzialności po 480 sekundach



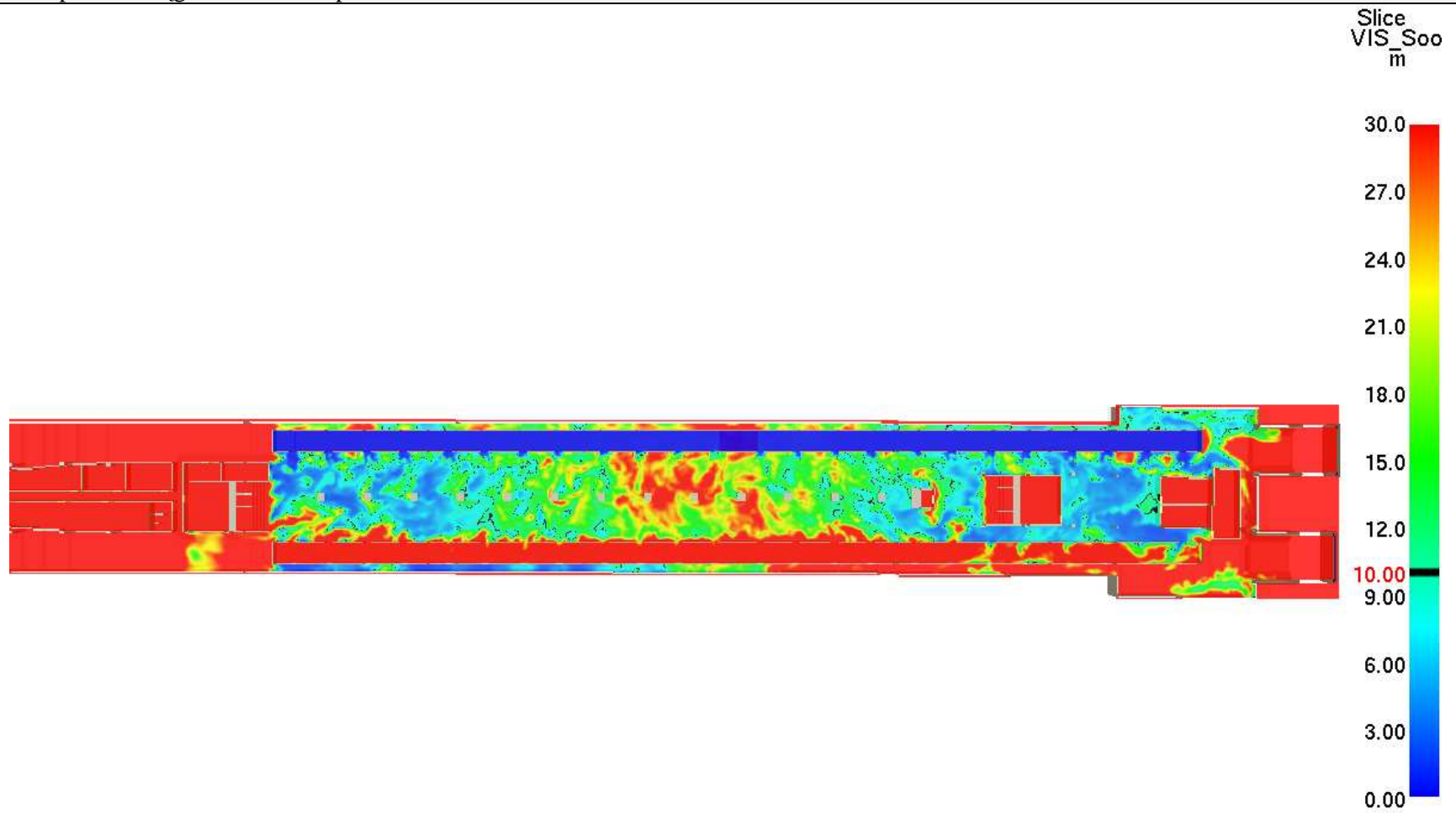
Scenariusz nr 1 – spadek zasięgu widzialności po 540 sekundach



Time: 540.0



Scenariusz nr 1 – spadek zasięgu widzialności po 600 sekundach

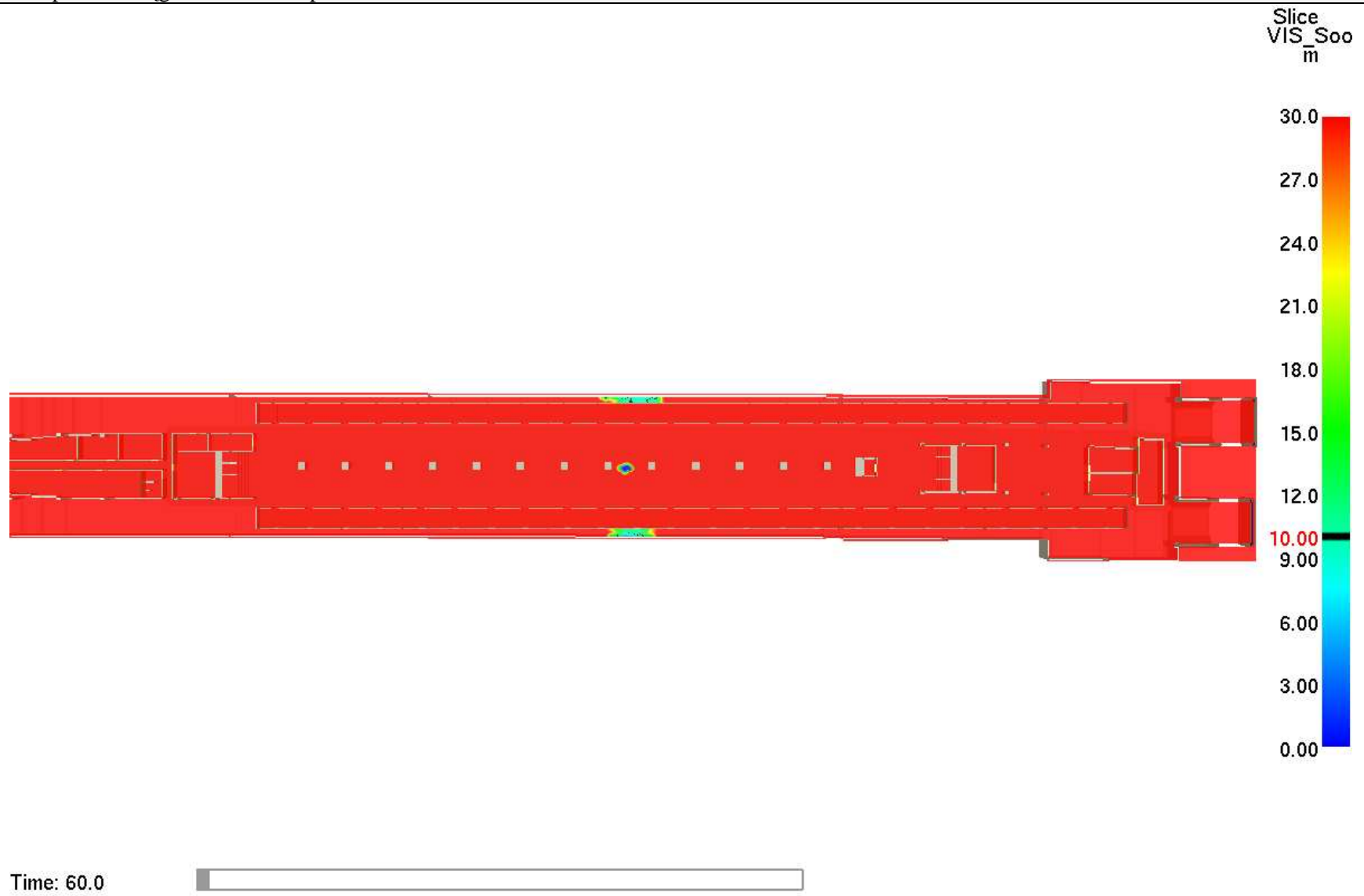


Time: 600.0

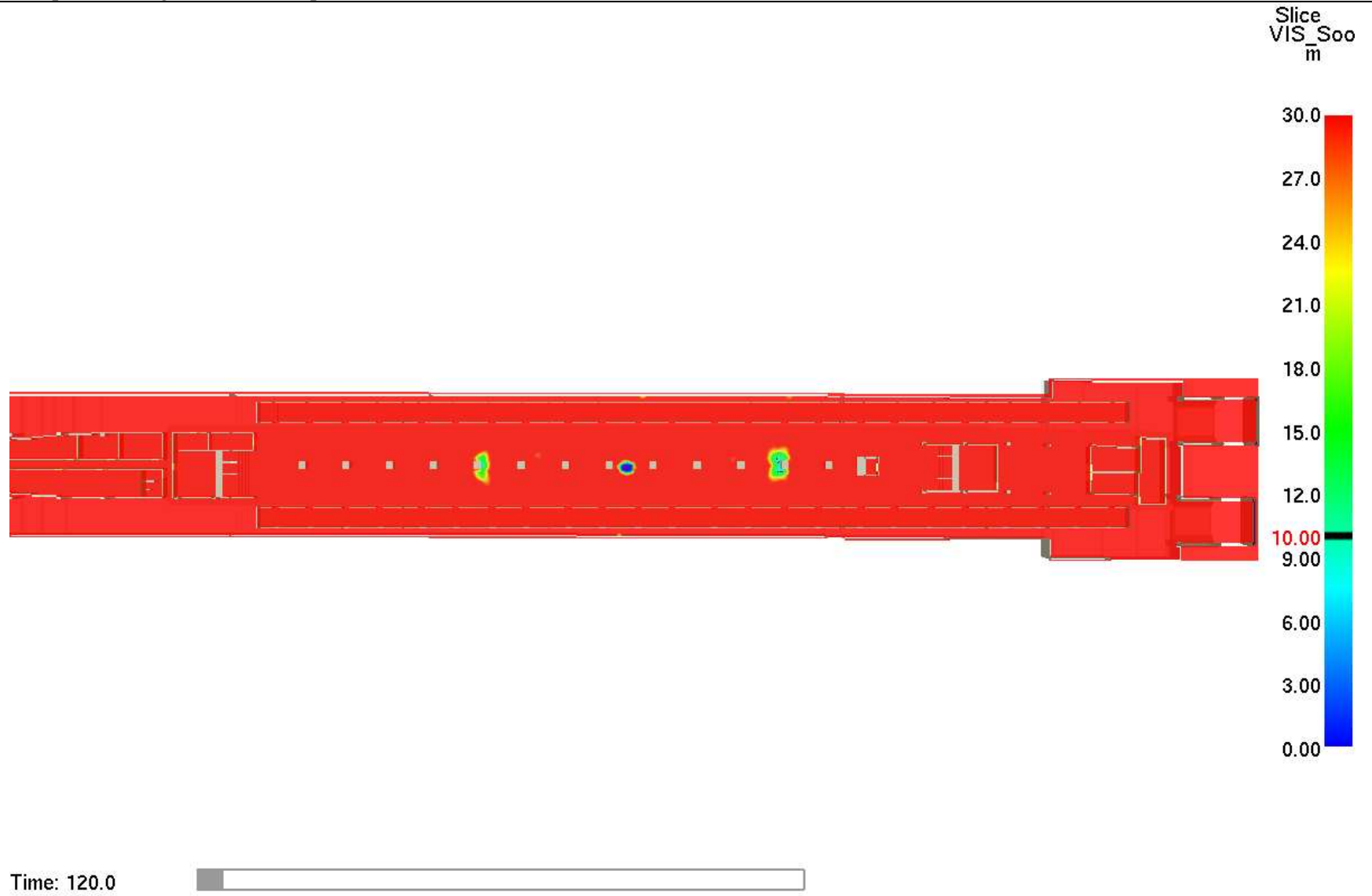


**Scenariusz nr 2 - pożar walizki:**

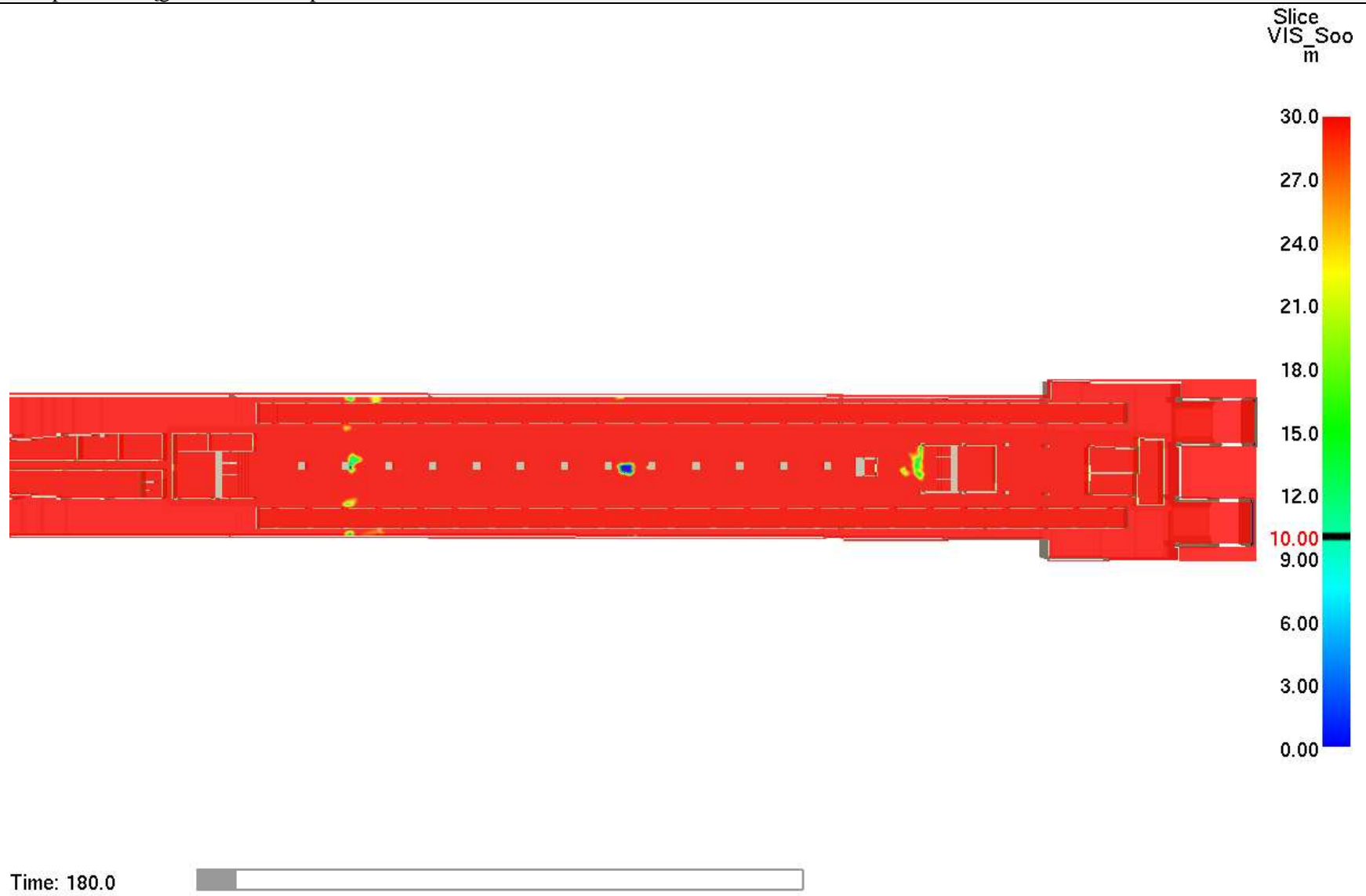
Scenariusz nr 2 – spadek zasięgu widzialności po 60 sekundach



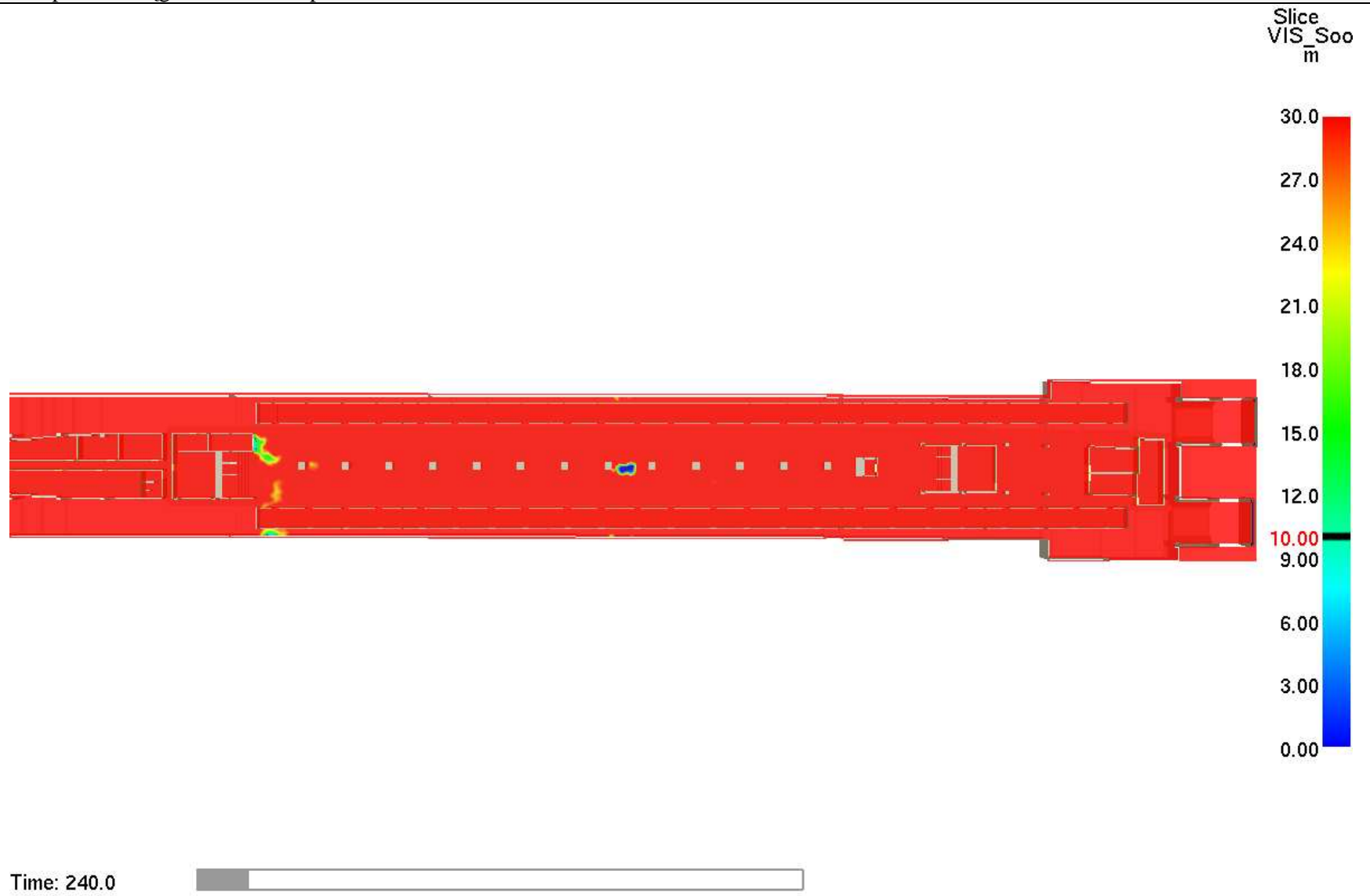
Scenariusz nr 2 – spadek zasięgu widzialności po 120 sekundach



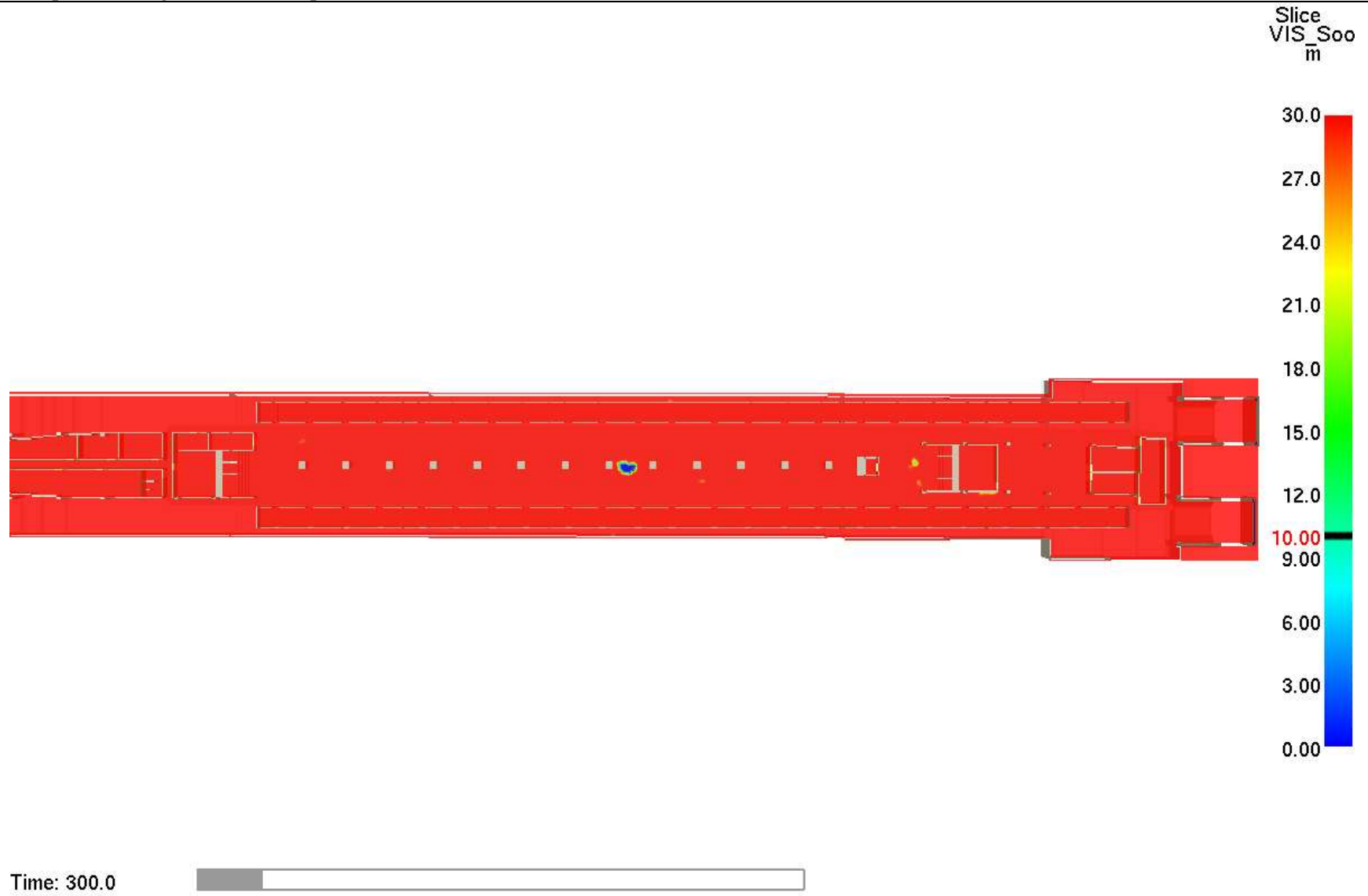
Scenariusz nr 2 – spadek zasięgu widzialności po 180 sekundach



Scenariusz nr 2 – spadek zasięgu widzialności po 240 sekundach

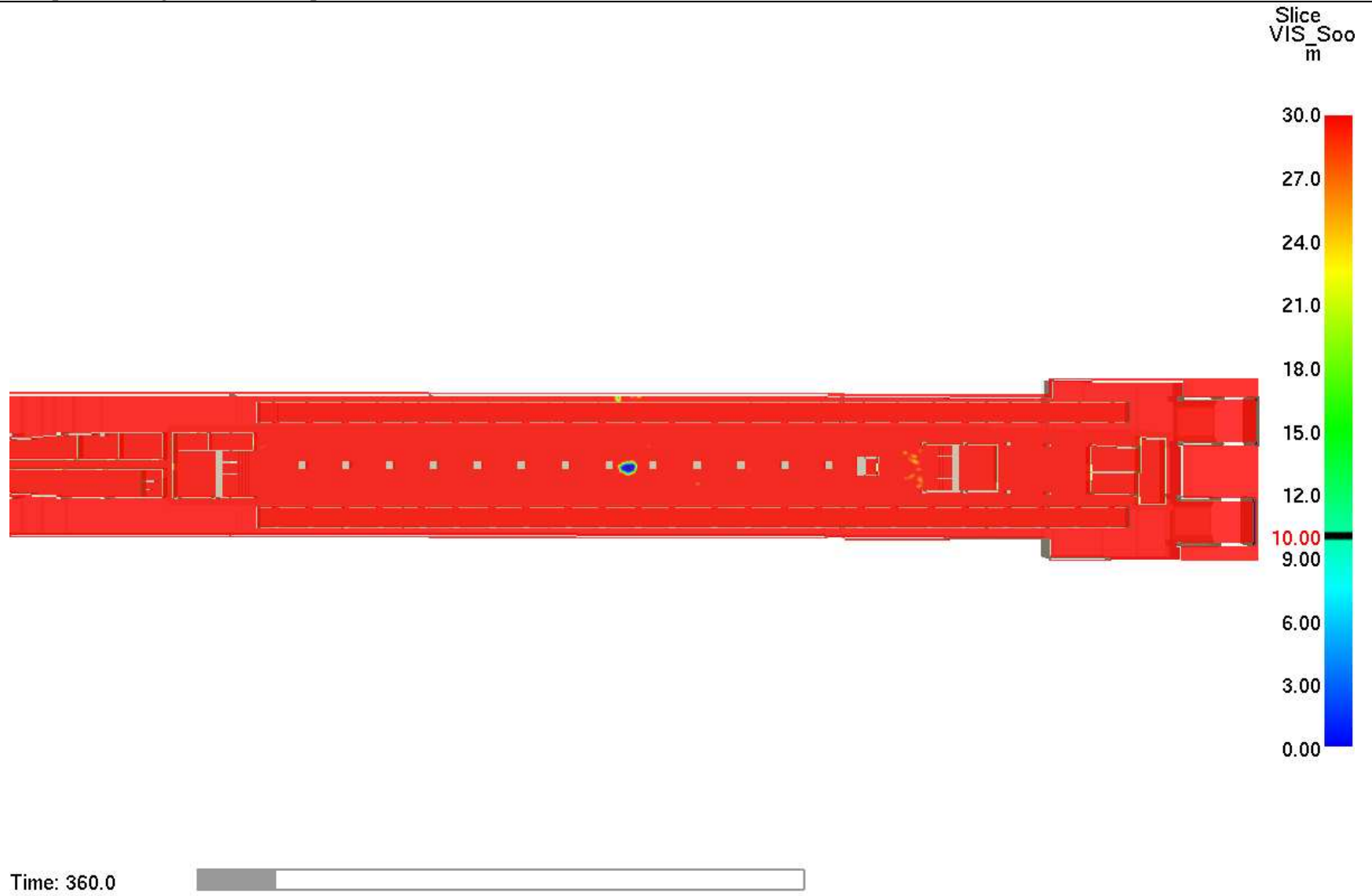


Scenariusz nr 2 – spadek zasięgu widzialności po 300 sekundach

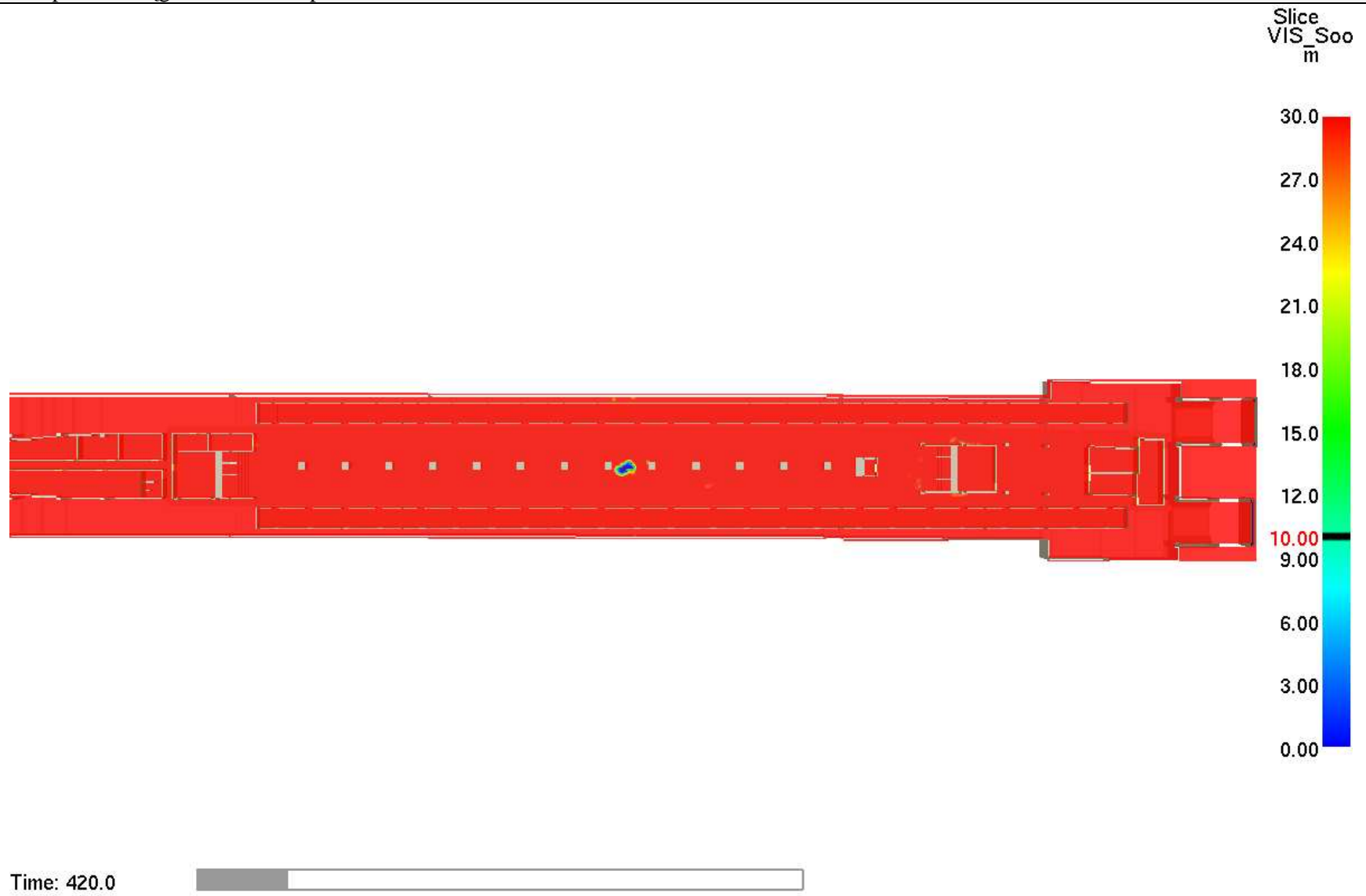




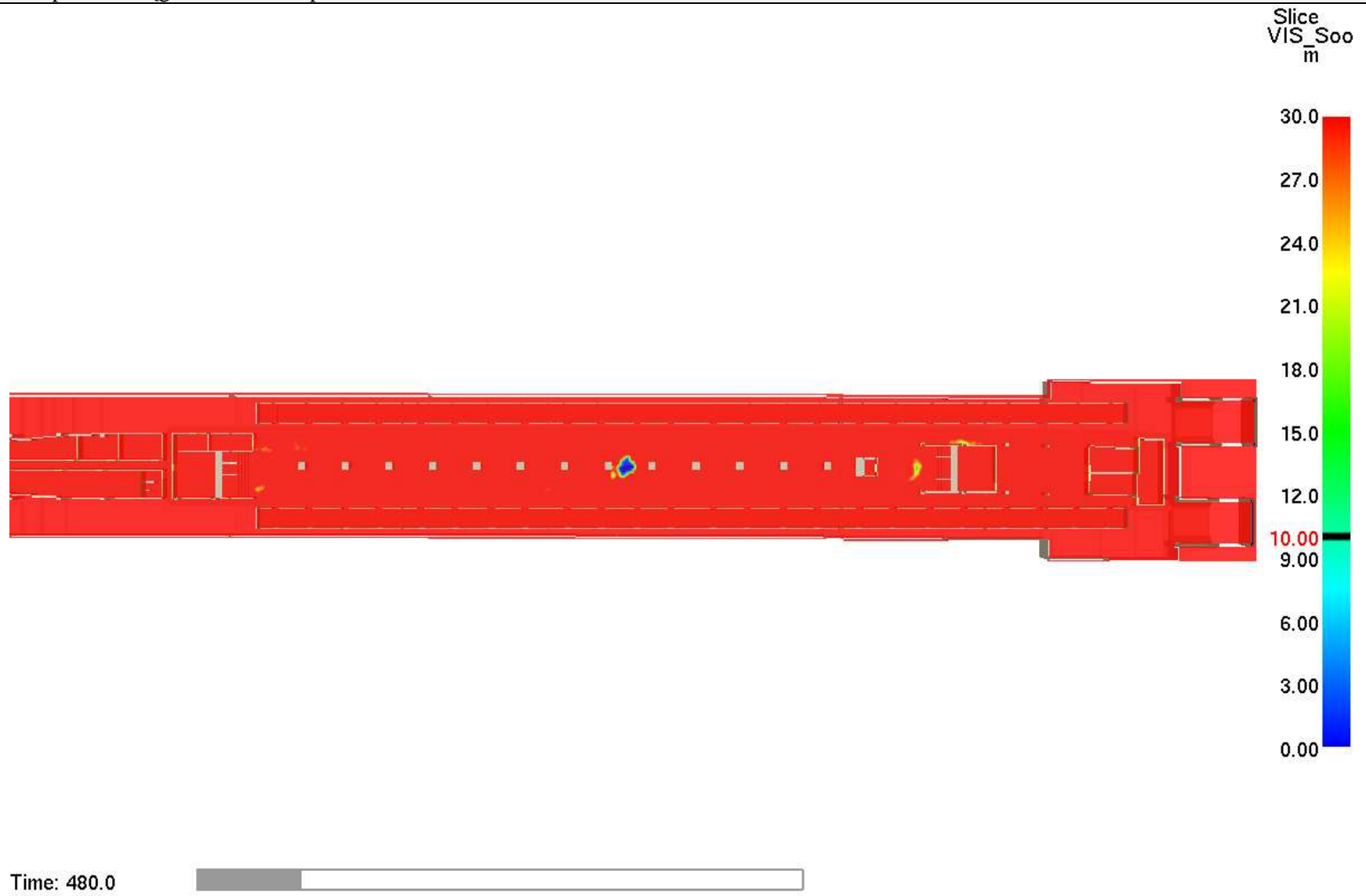
Scenariusz nr 2 – spadek zasięgu widzialności po 360 sekundach



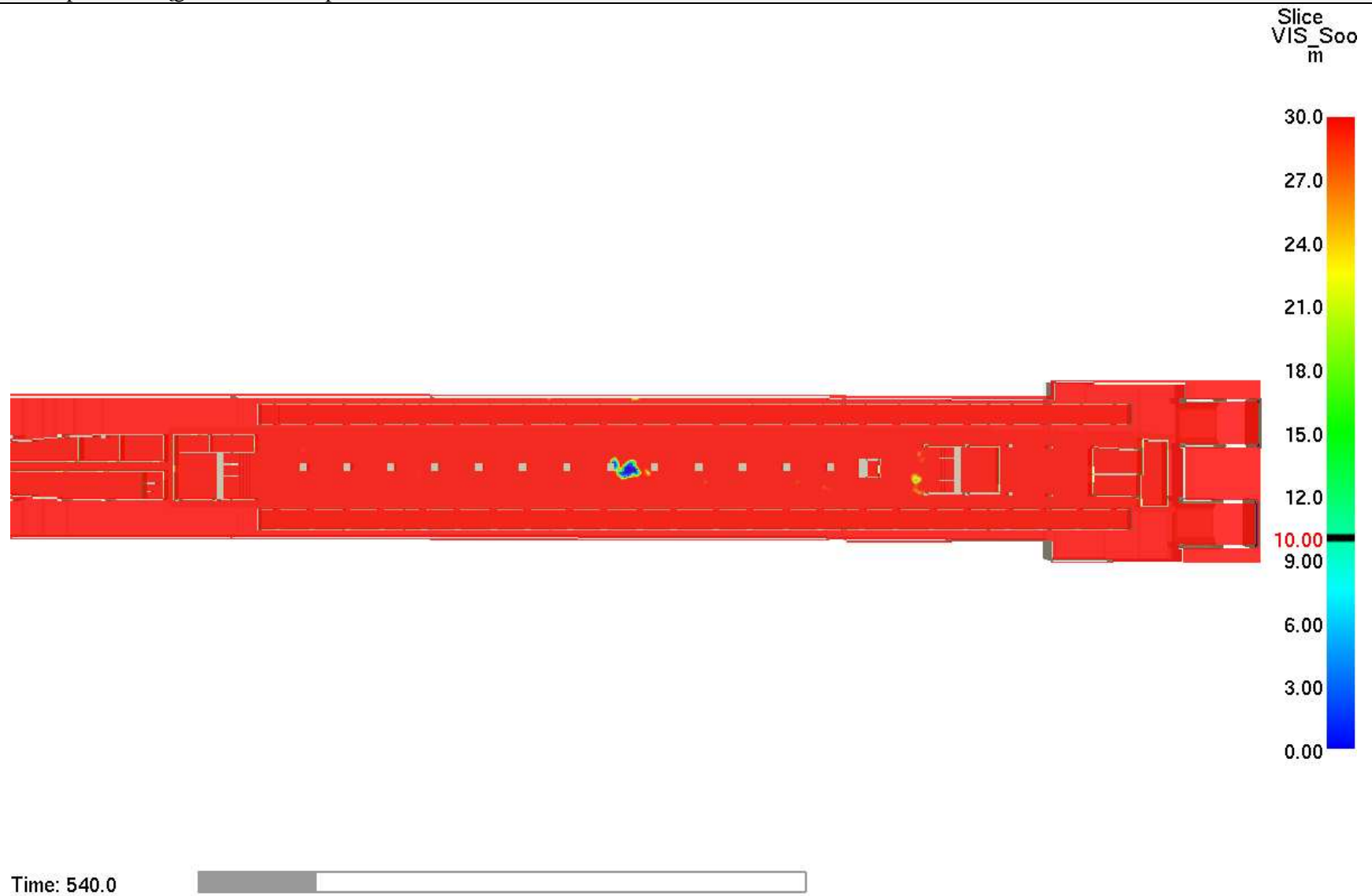
Scenariusz nr 2 – spadek zasięgu widzialności po 420 sekundach



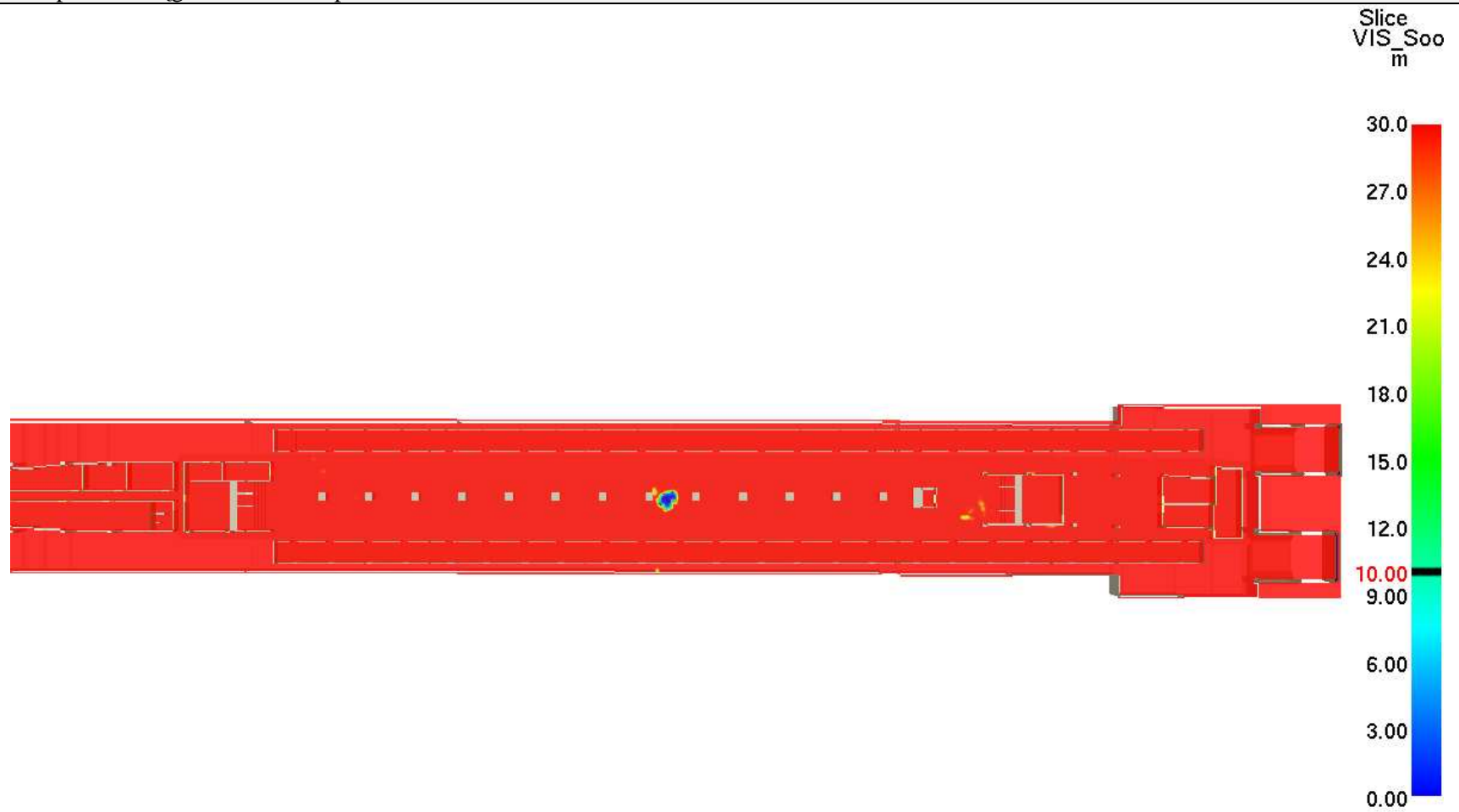
Scenariusz nr 2 – spadek zasięgu widzialności po 480 sekundach



Scenariusz nr 2 – spadek zasięgu widzialności po 540 sekundach



Scenariusz nr 2 – spadek zasięgu widzialności po 600 sekundach



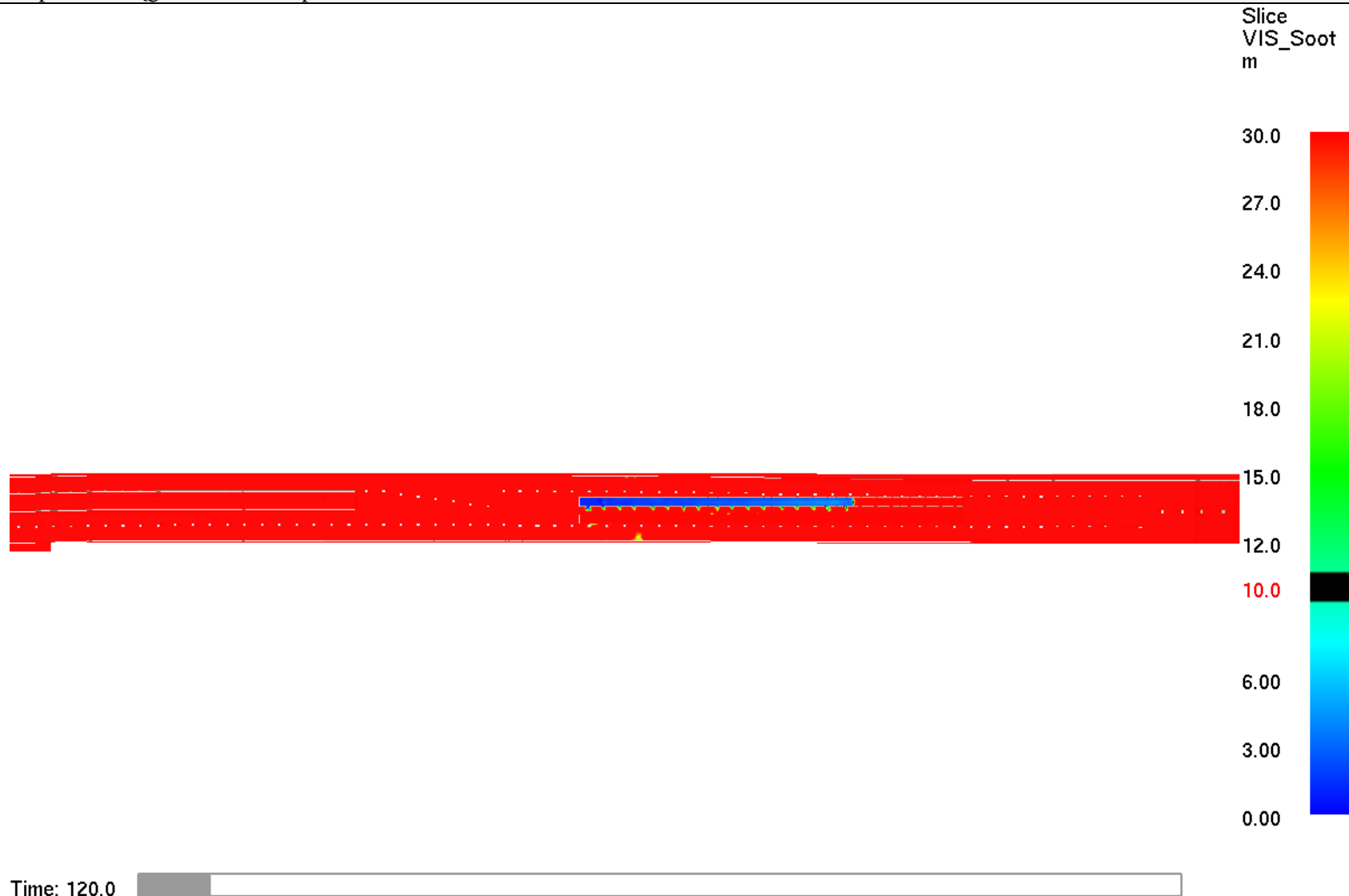
Time: 600.0

**Scenariusz nr 3 - pożar pociągu:**

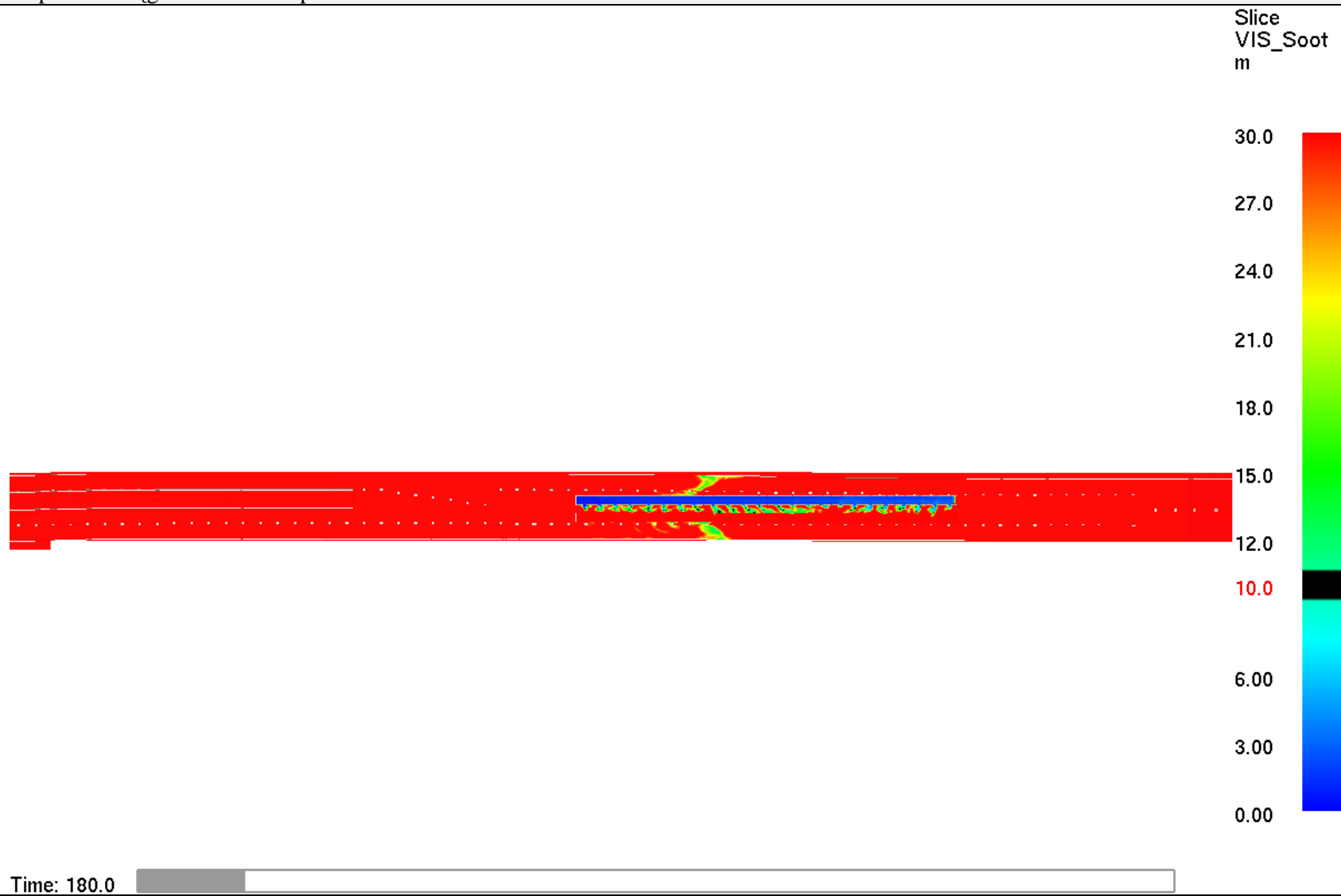
Scenariusz nr 3 – spadek zasięgu widzialności po 60 sekundach



Scenariusz nr 3 – spadek zasięgu widzialności po 120 sekundach

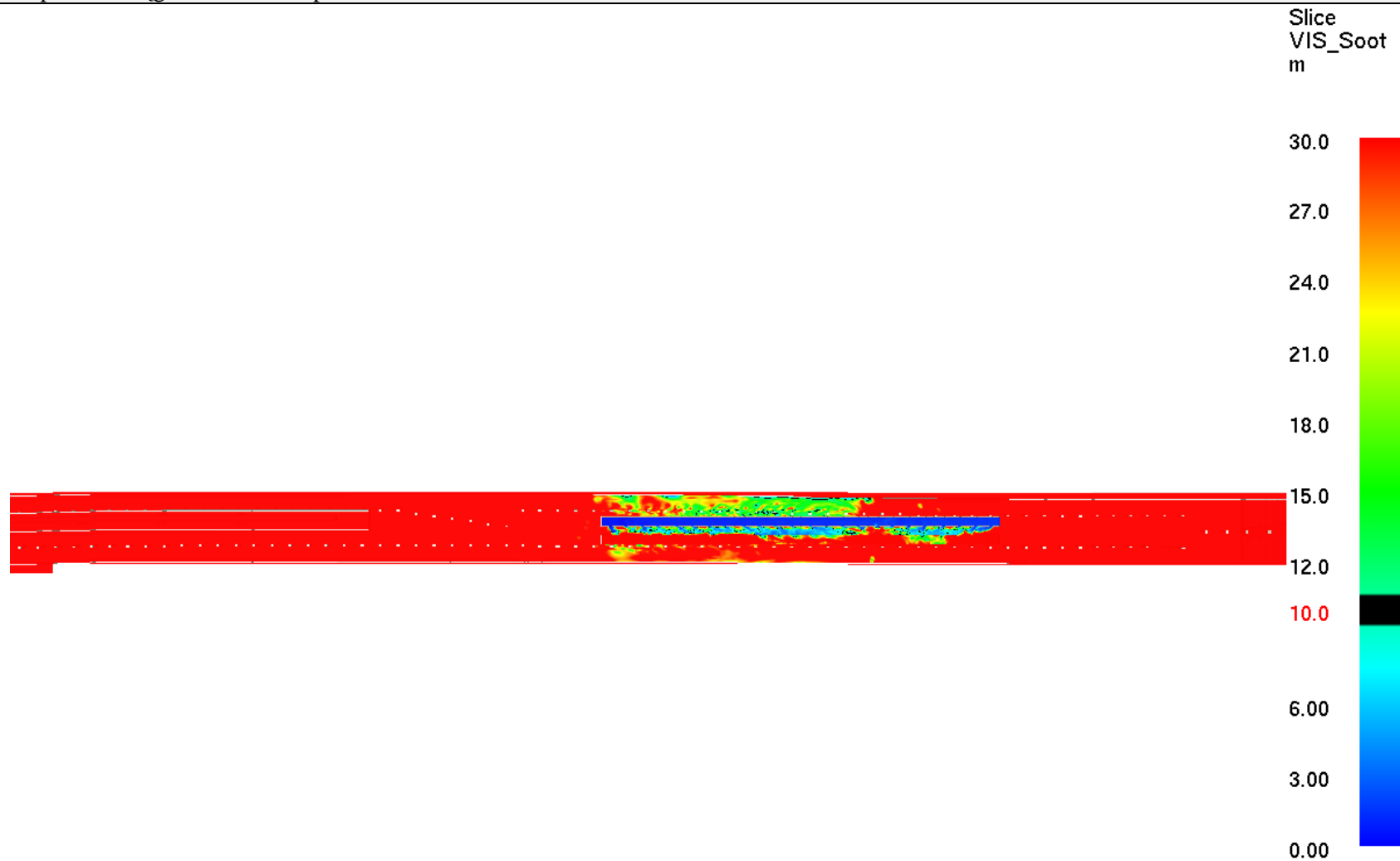


Scenariusz nr 3 – spadek zasięgu widzialności po 180 sekundach



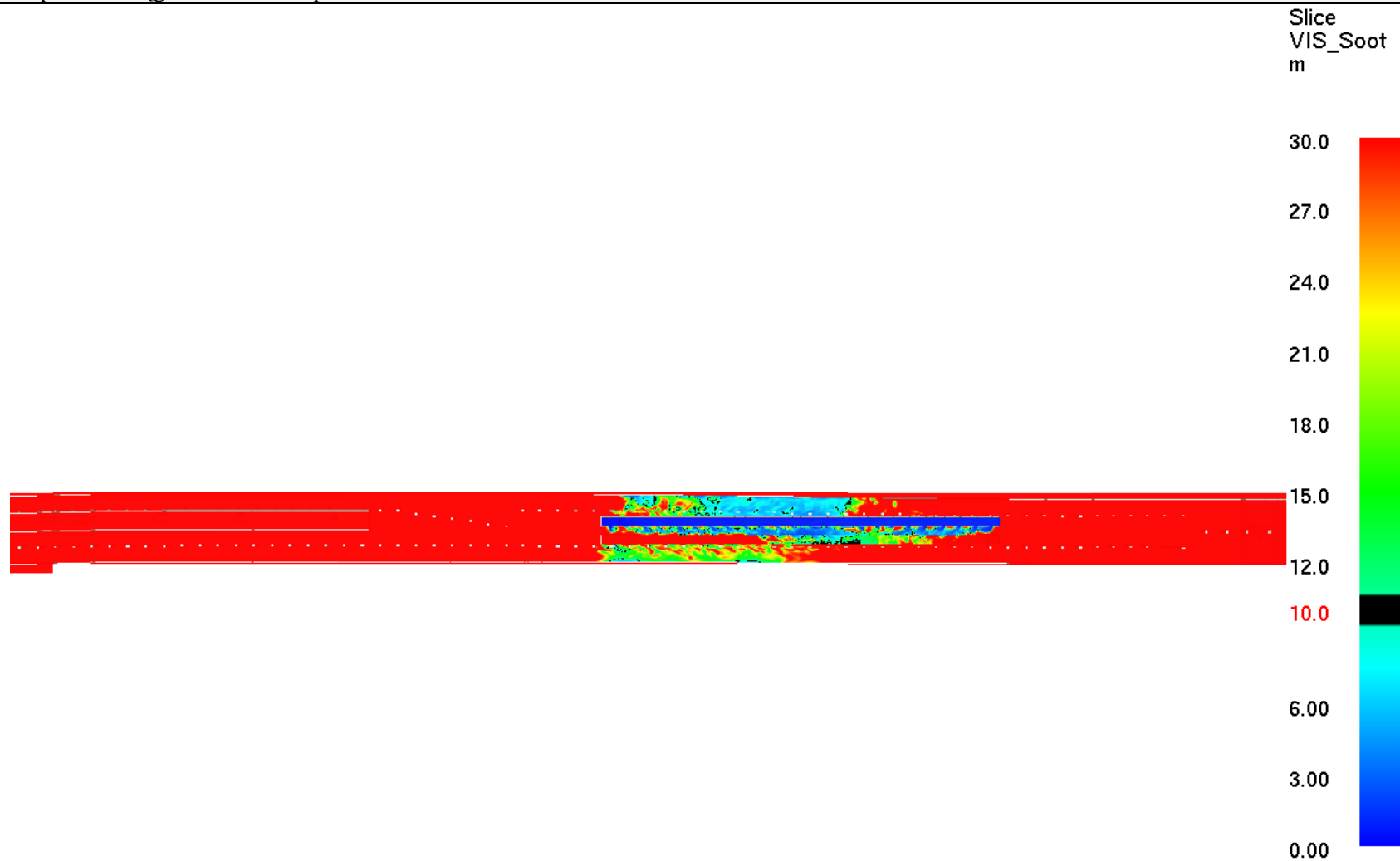


Scenariusz nr 3 – spadek zasięgu widzialności po 240 sekundach



Time: 240.0

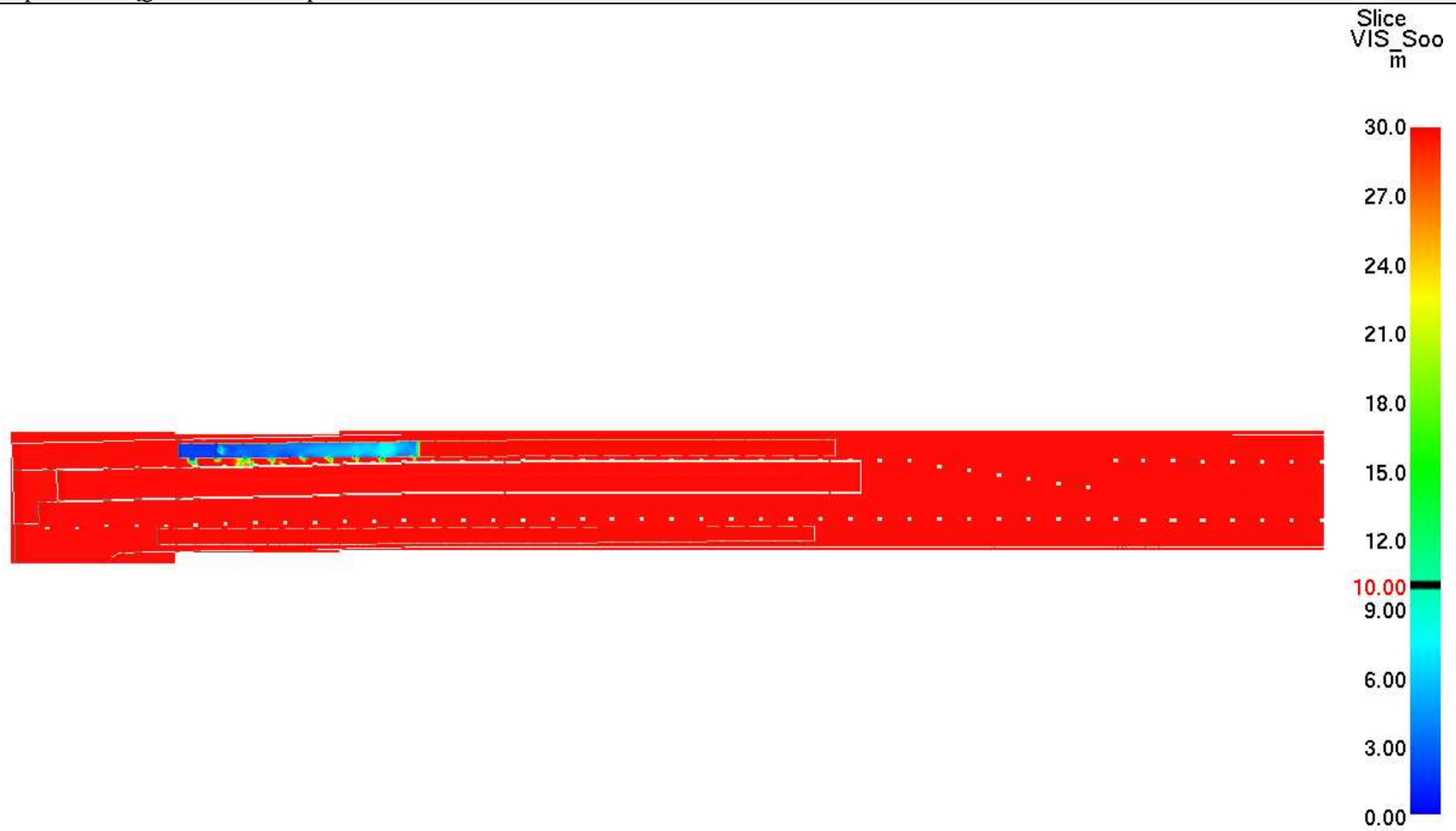
Scenariusz nr 3 – spadek zasięgu widzialności po 300 sekundach



Time: 300.0

**Scenariusz nr 4 - pożar pociągu:**

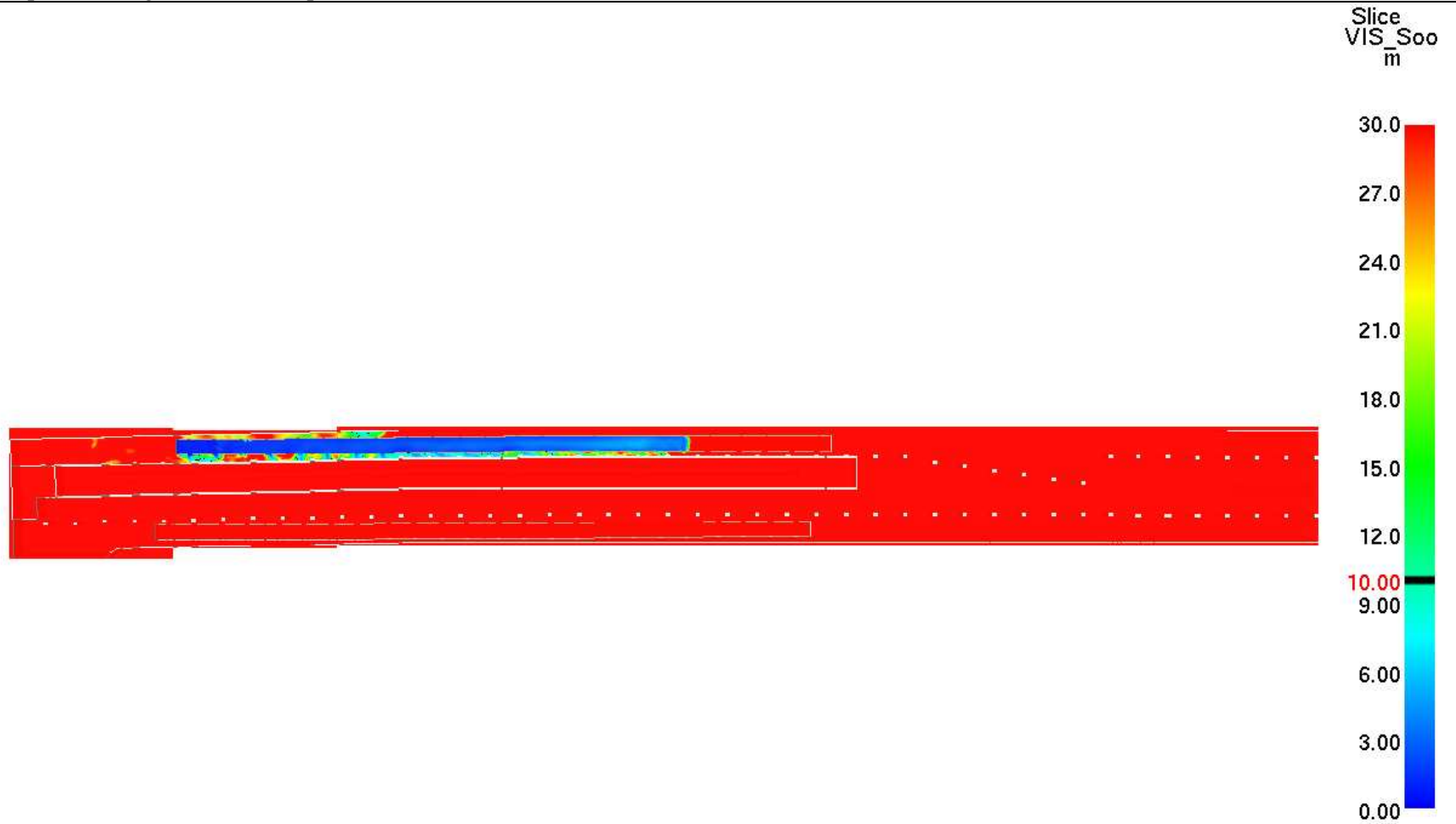
Scenariusz nr 4 – spadek zasięgu widzialności po 60 sekundach



Time: 60.0



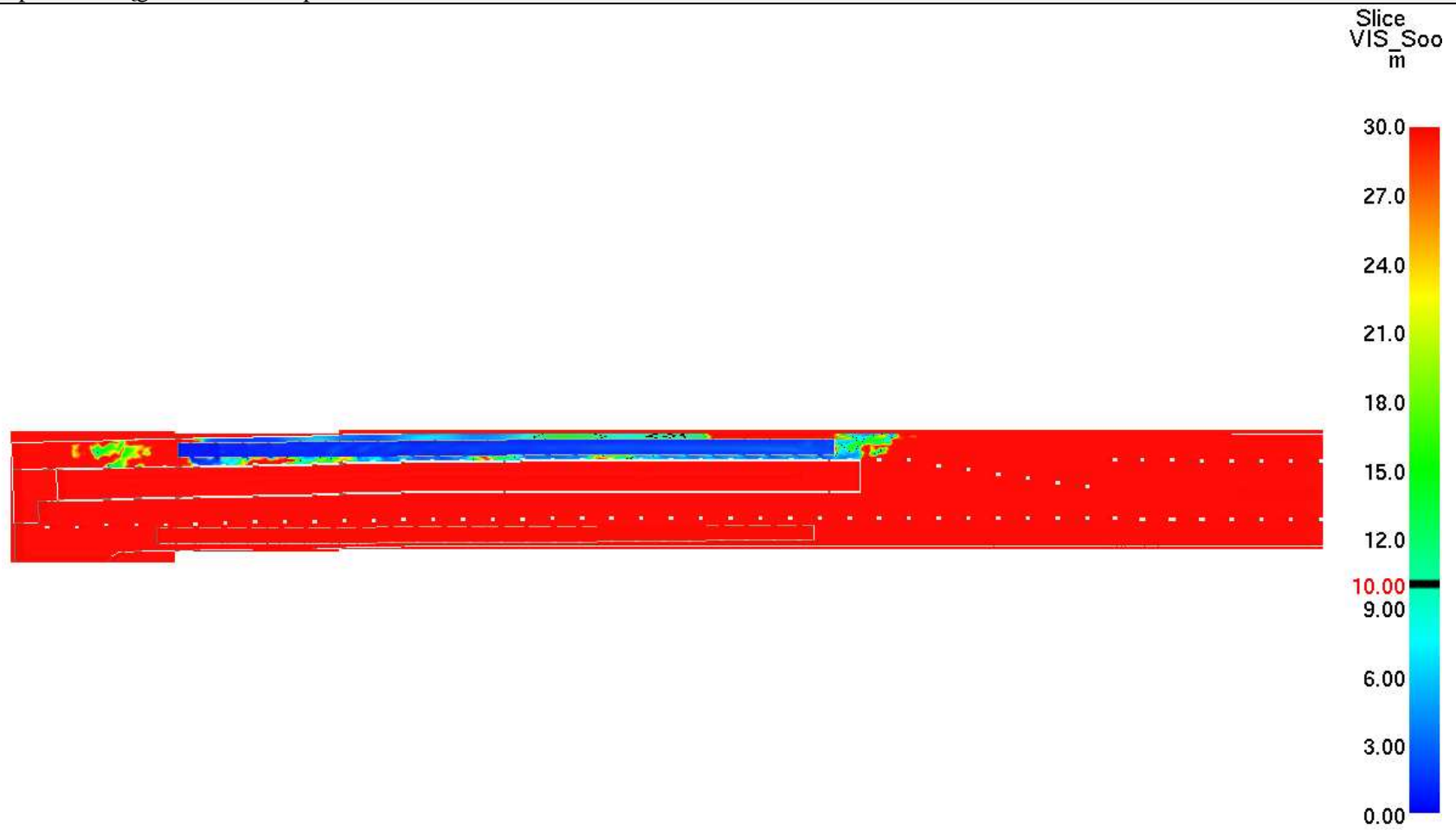
Scenariusz nr 4 – spadek zasięgu widzialności po 120 sekundach



Time: 120.0



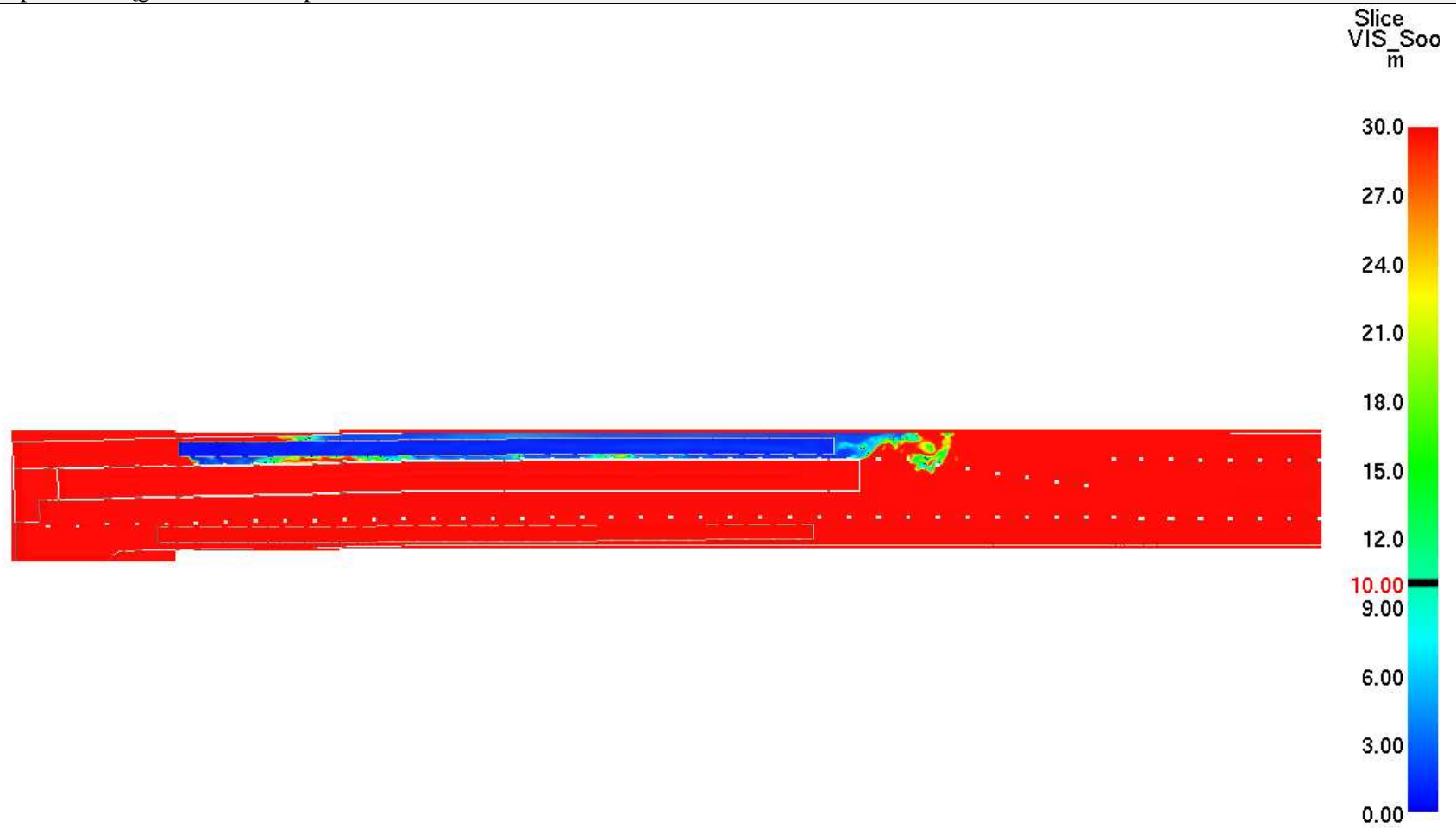
Scenariusz nr 4 – spadek zasięgu widzialności po 180 sekundach



Time: 180.0



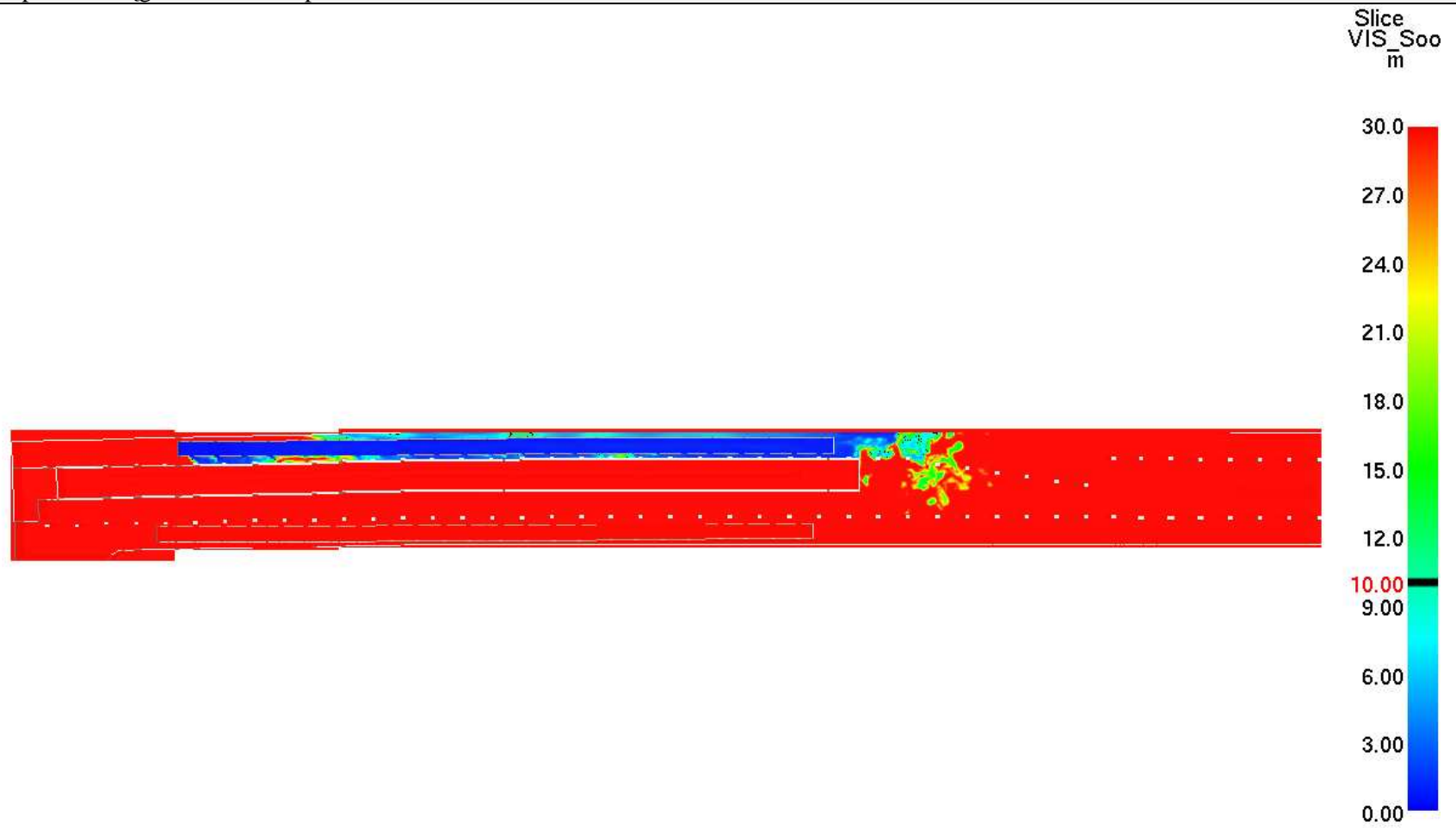
Scenariusz nr 4 – spadek zasięgu widzialności po 240 sekundach



Time: 240.0



Scenariusz nr 4 – spadek zasięgu widzialności po 300 sekundach

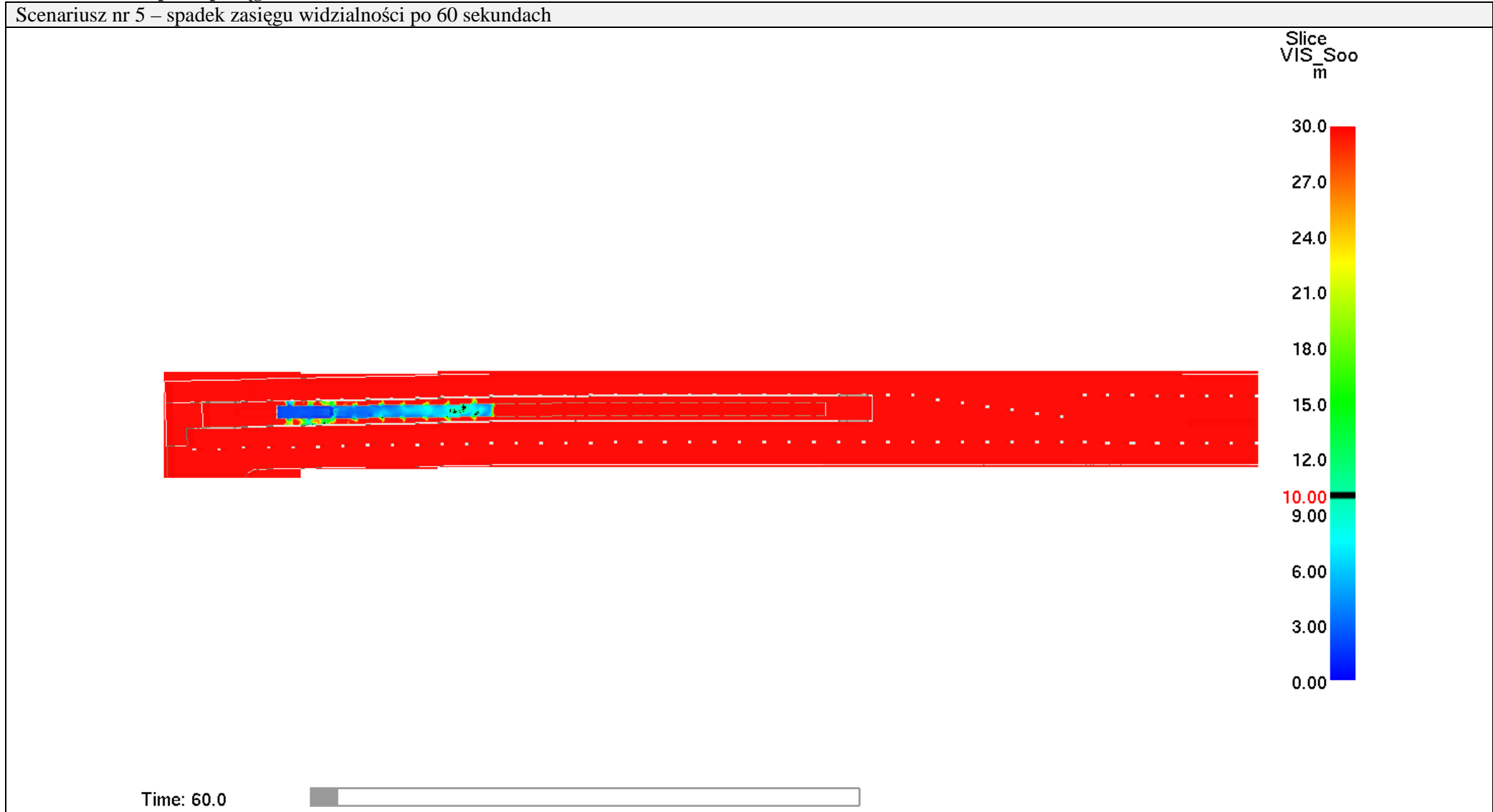


Time: 300.0



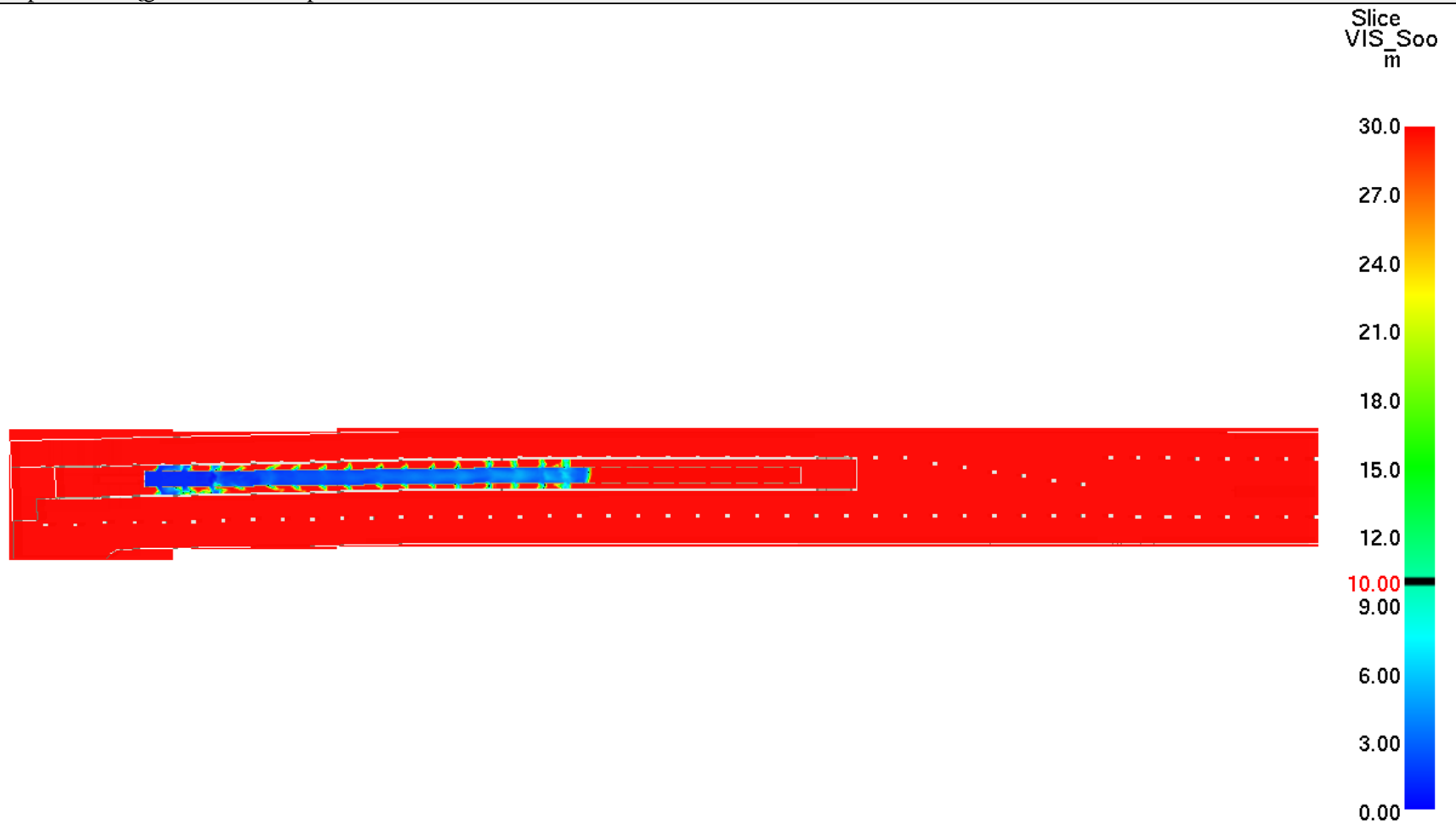
**Scenariusz nr 5 - pożar pociągu:**

Scenariusz nr 5 – spadek zasięgu widzialności po 60 sekundach





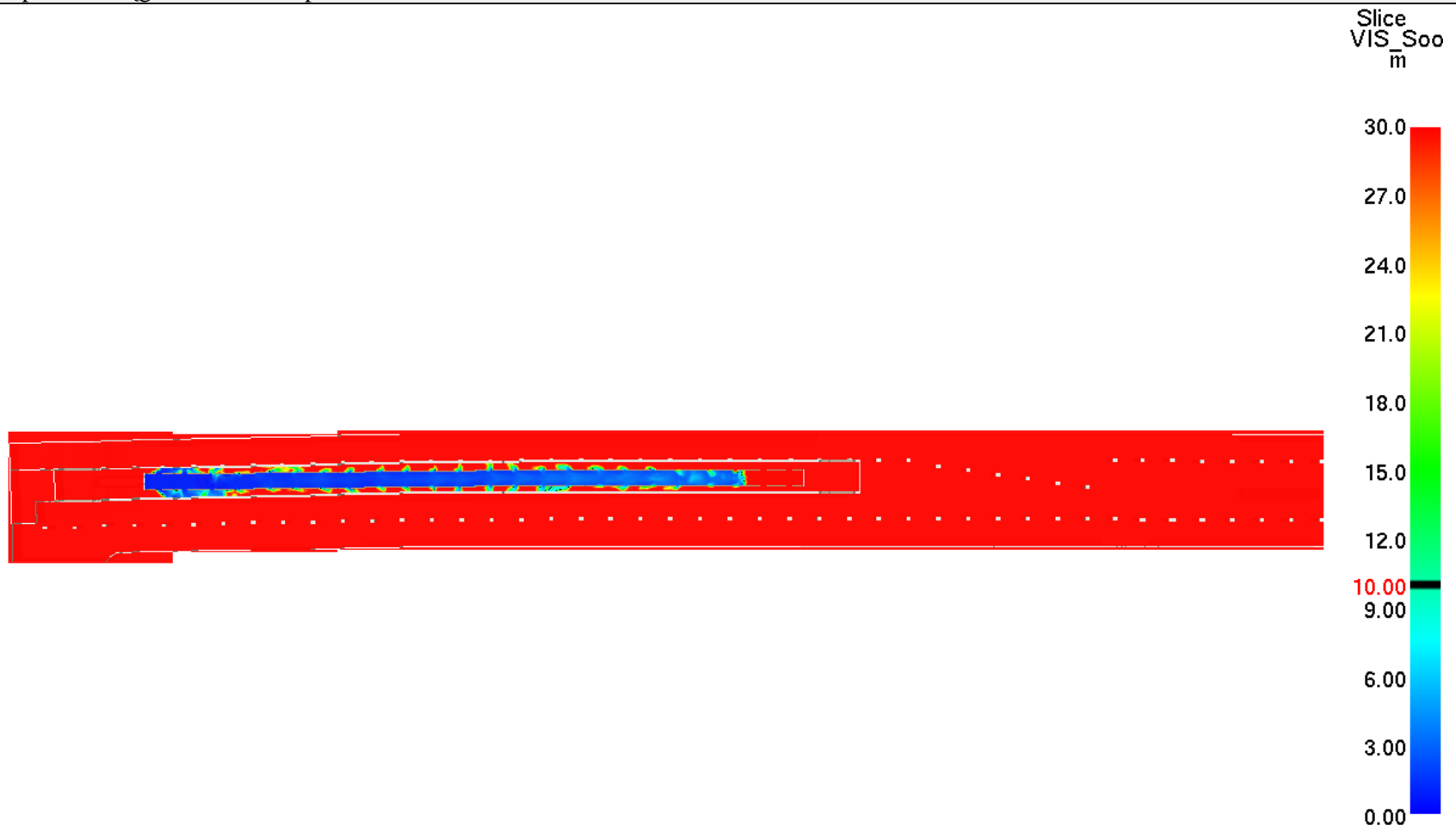
Scenariusz nr 5 – spadek zasięgu widzialności po 120 sekundach



Time: 120.0



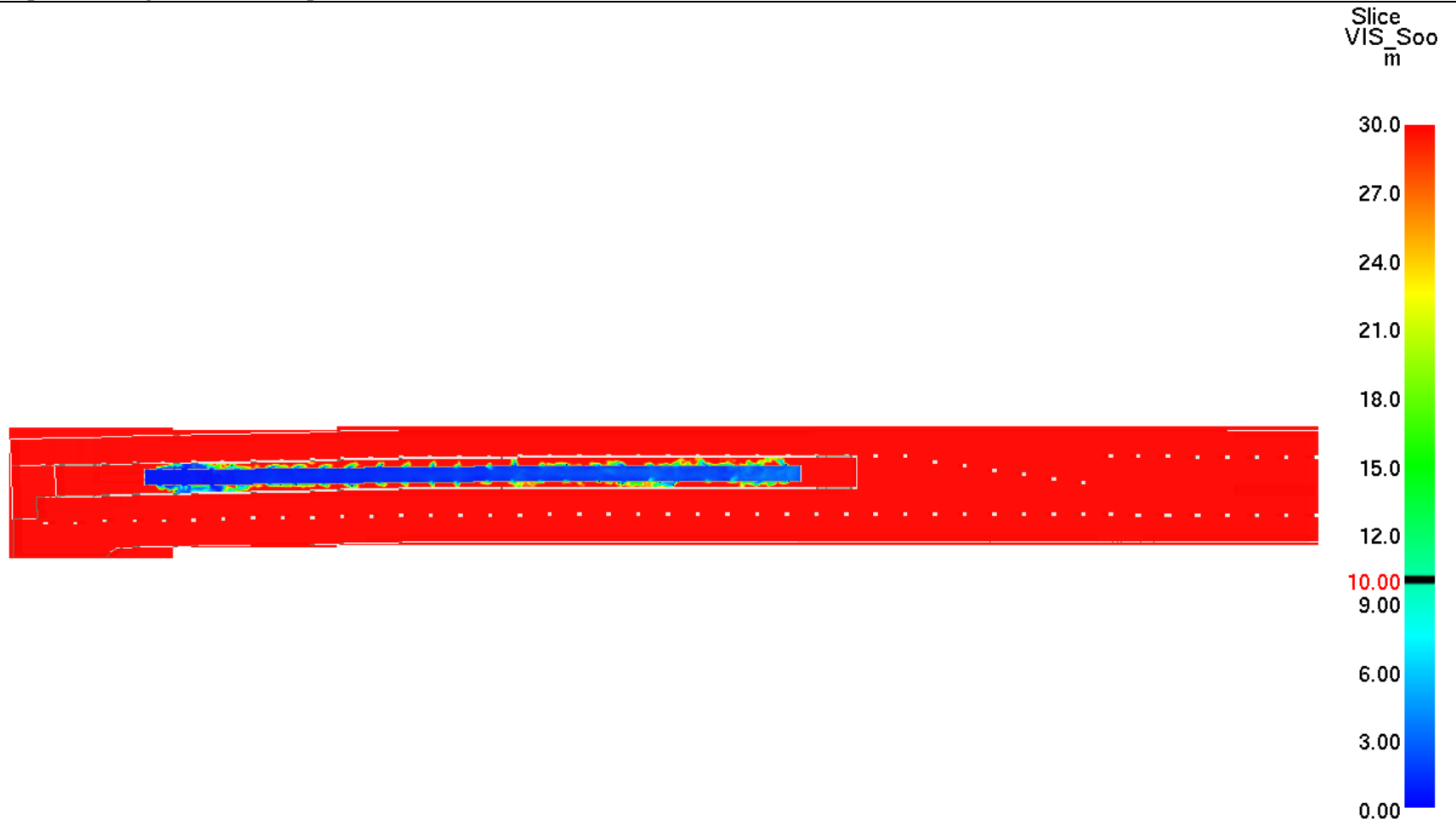
Scenariusz nr 5 – spadek zasięgu widzialności po 180 sekundach



Time: 180.0



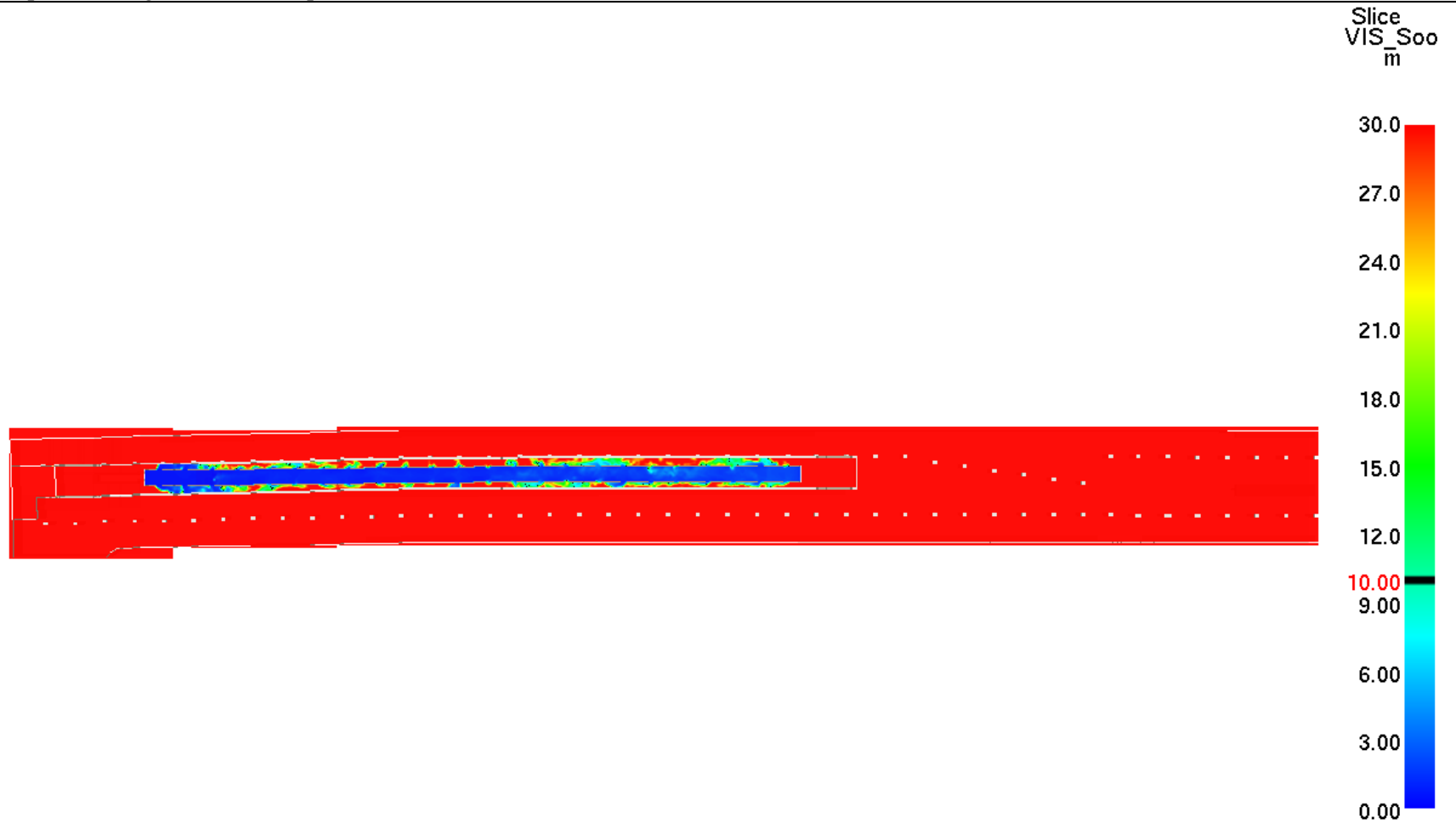
Scenariusz nr 5 – spadek zasięgu widzialności po 240 sekundach



Time: 240.0



Scenariusz nr 5 – spadek zasięgu widzialności po 300 sekundach



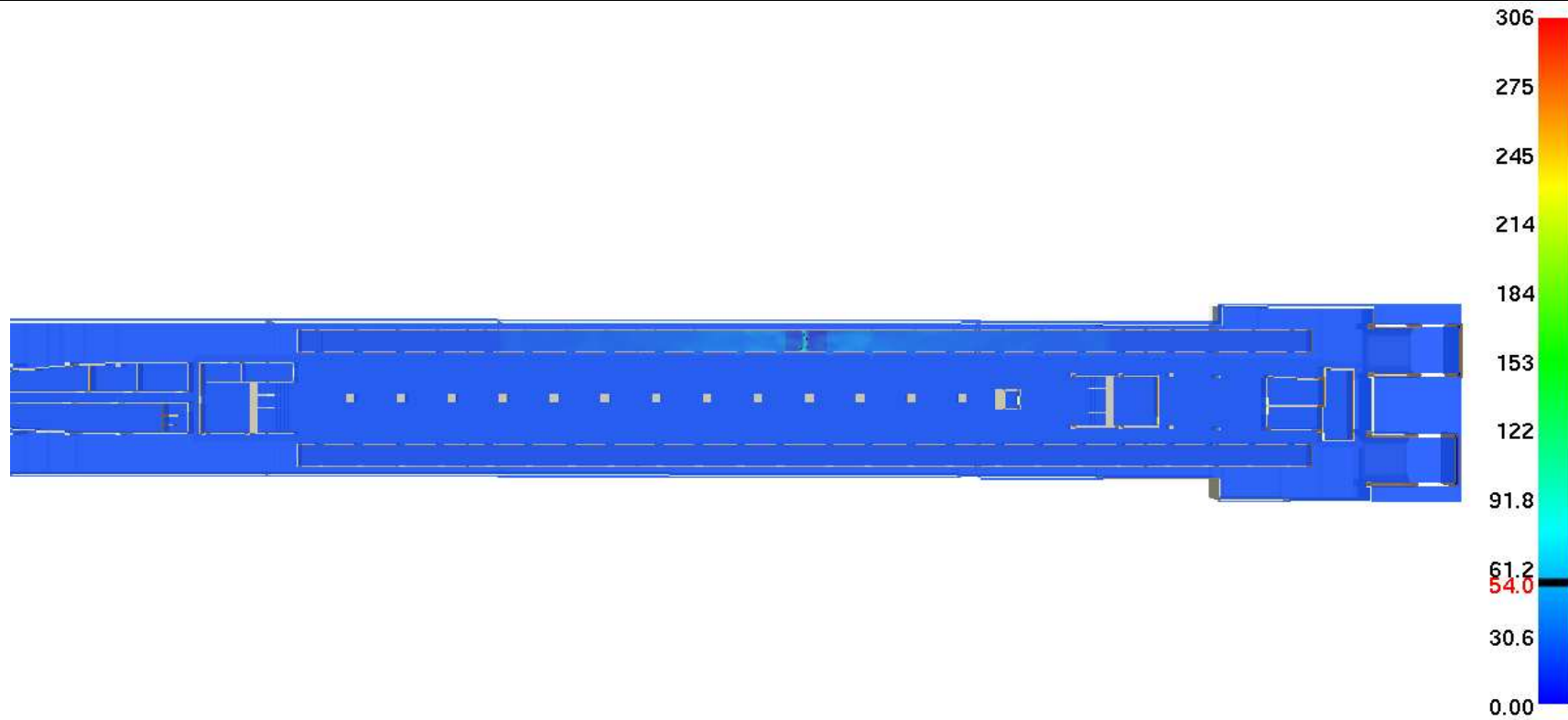
Time: 300.0



### 6.1.3. TEMPERATURA NA WYSOKOŚCI 1.8 M W CZASIE EWAKUACJI

Scenariusz nr 1 - pożar pociągu:

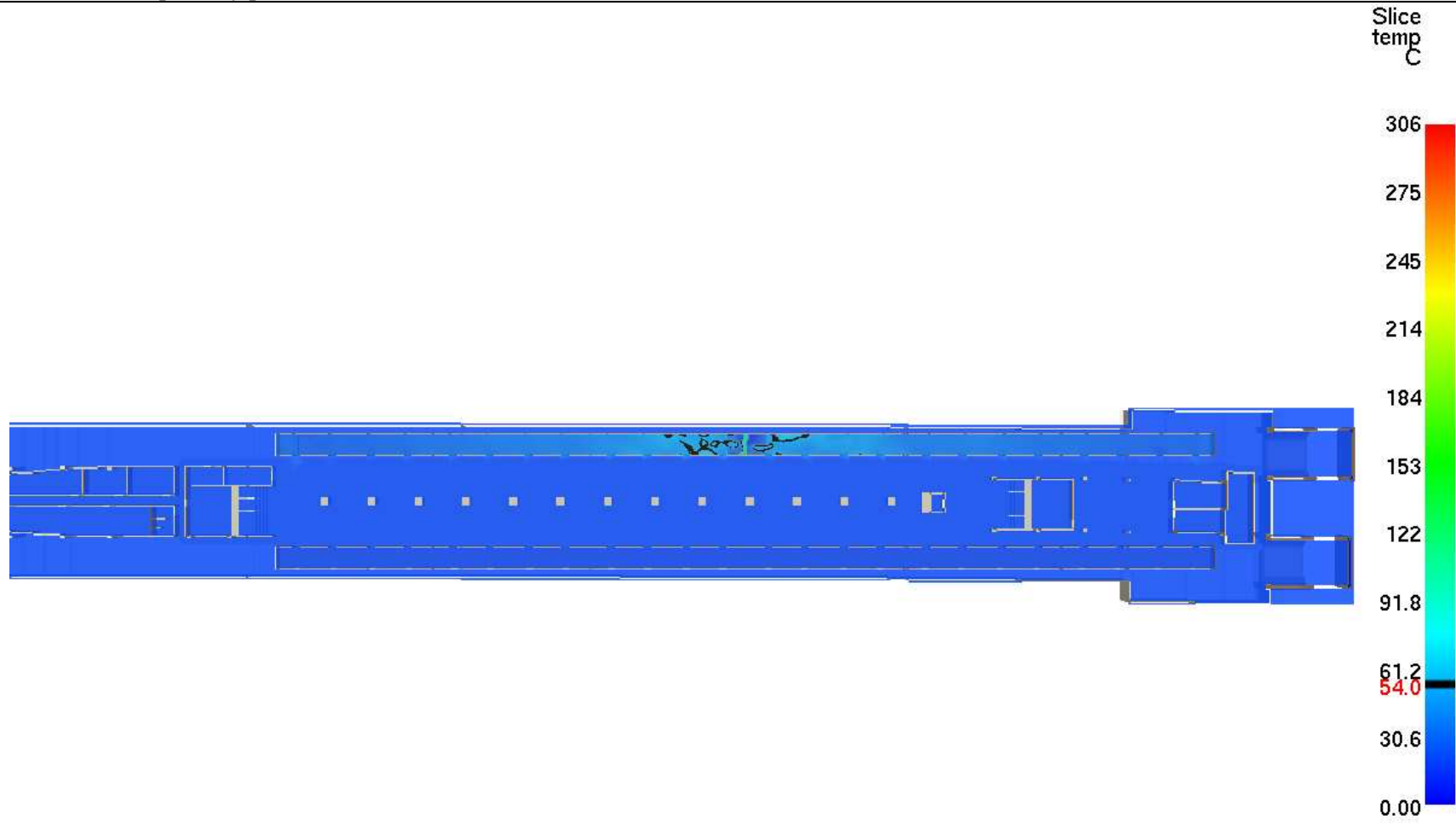
Scenariusz nr 1 – rozkład temperatury po 60 sekundach



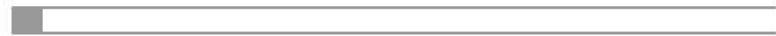
Time: 60.0



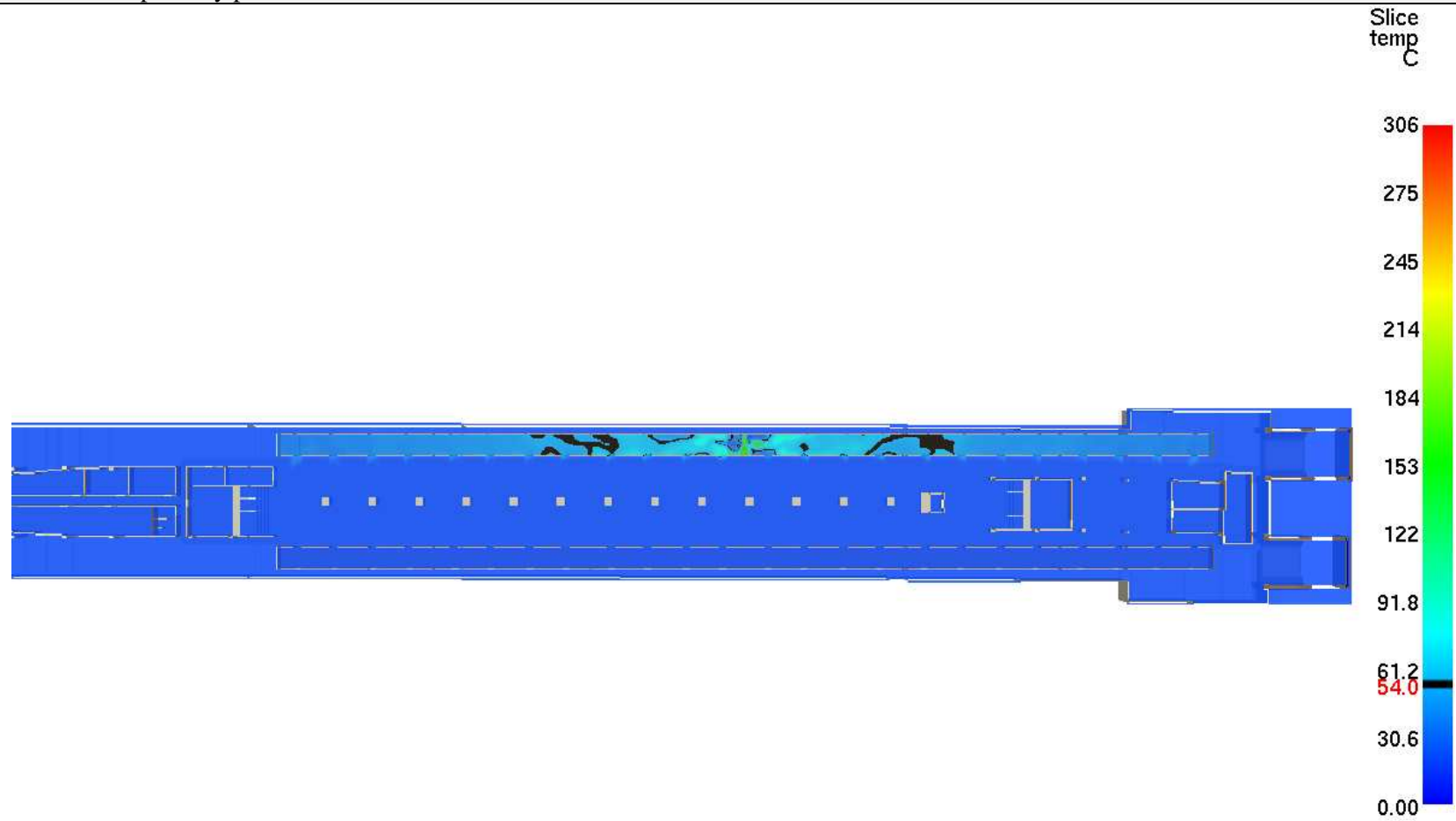
Scenariusz nr 1 – rozkład temperatury po 120 sekundach



Time: 120.0



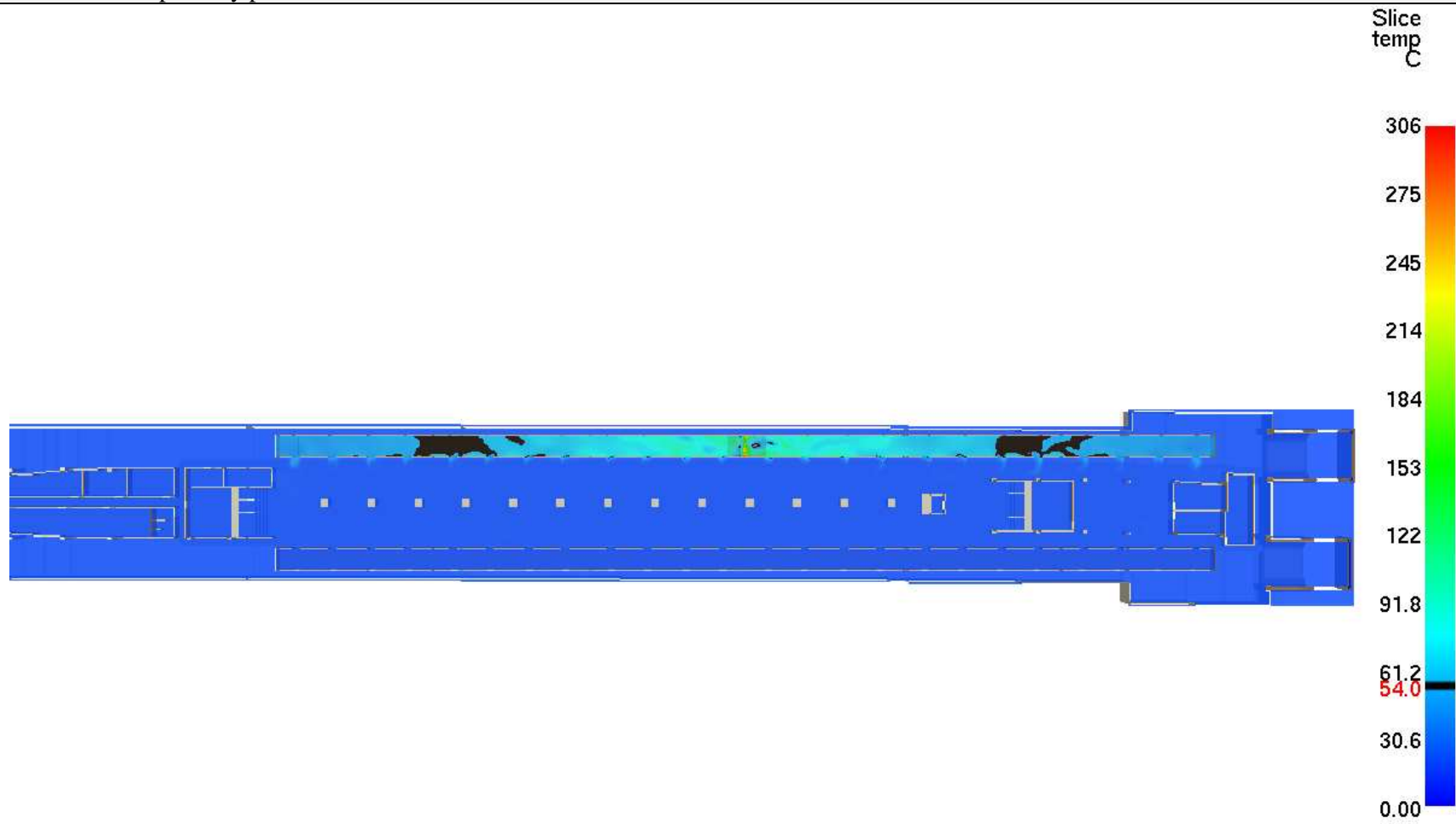
Scenariusz nr 1 – rozkład temperatury po 180 sekundach



Time: 180.0



Scenariusz nr 1 – rozkład temperatury po 240 sekundach

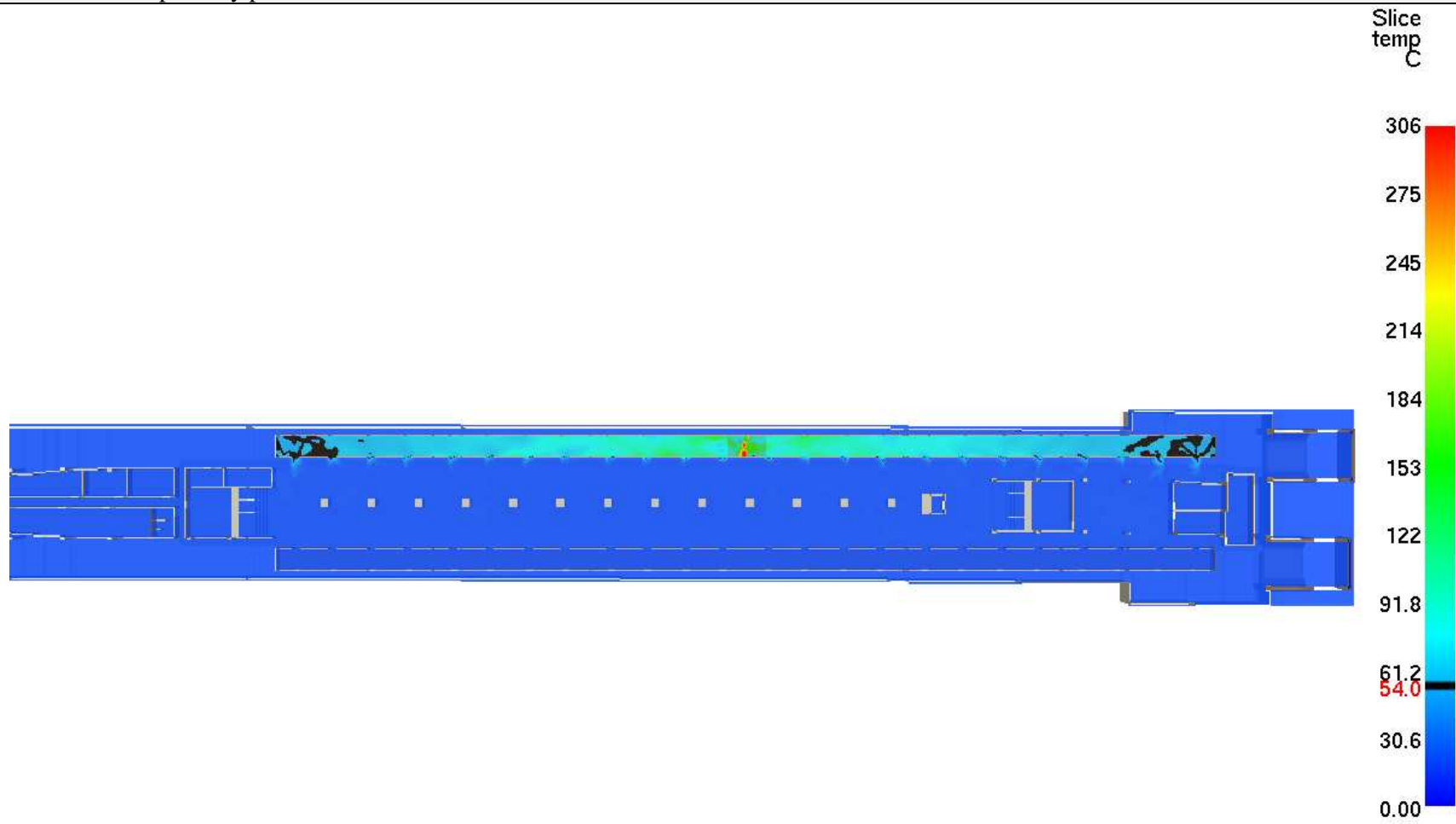


Time: 240.0





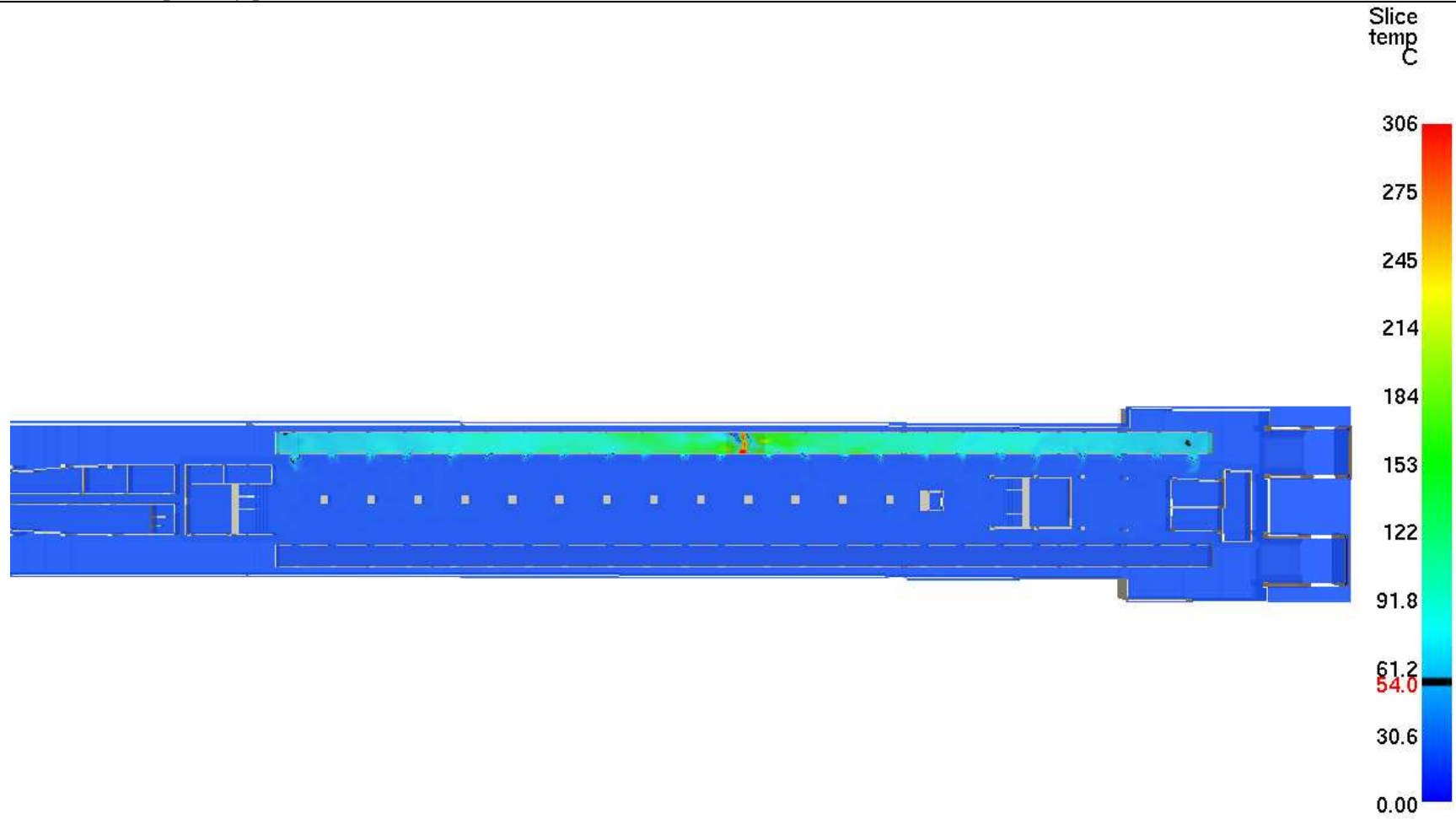
Scenariusz nr 1 – rozkład temperatury po 300 sekundach



Time: 300.0



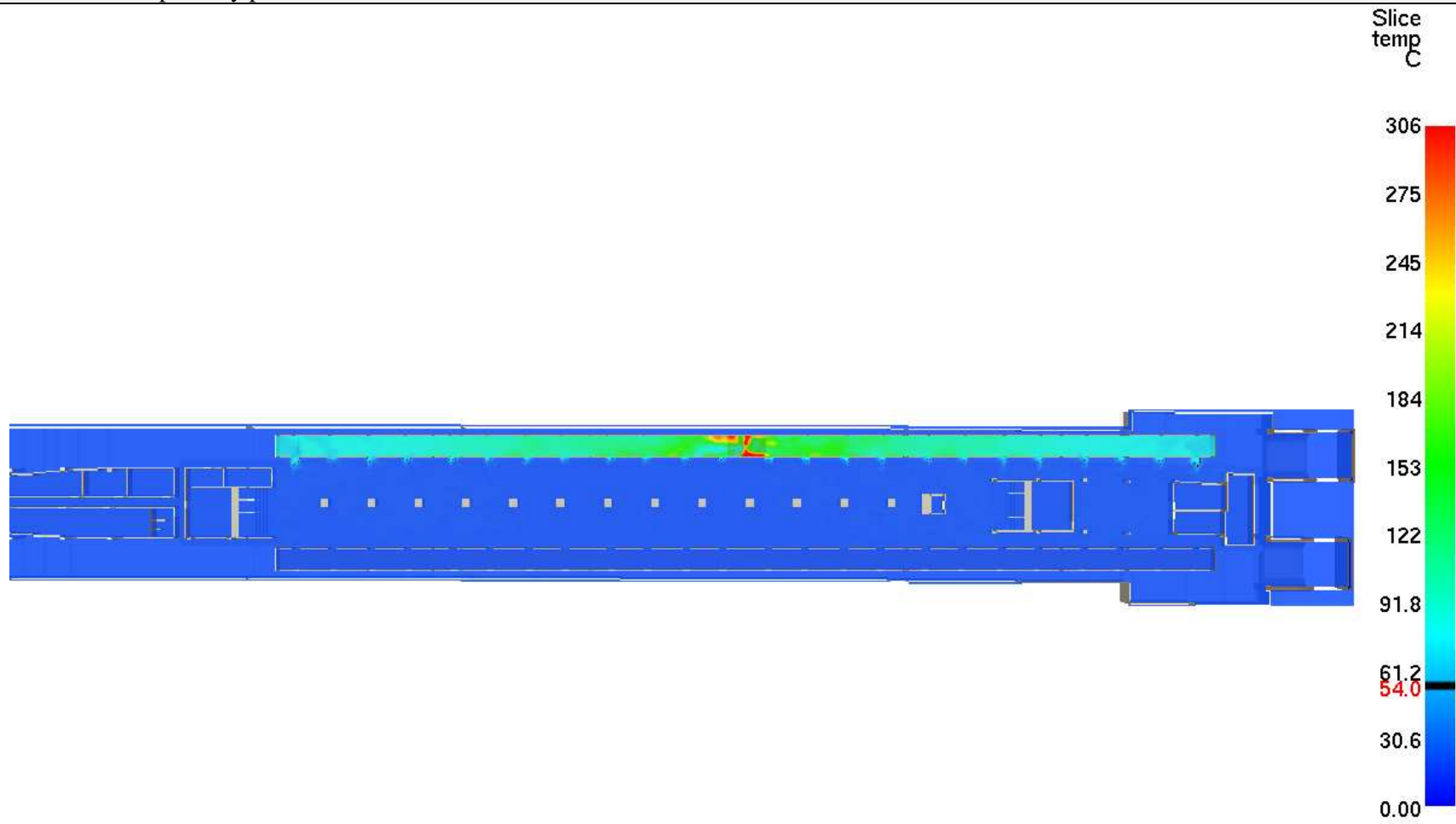
Scenariusz nr 1 – rozkład temperatury po 360 sekundach



Time: 360.0



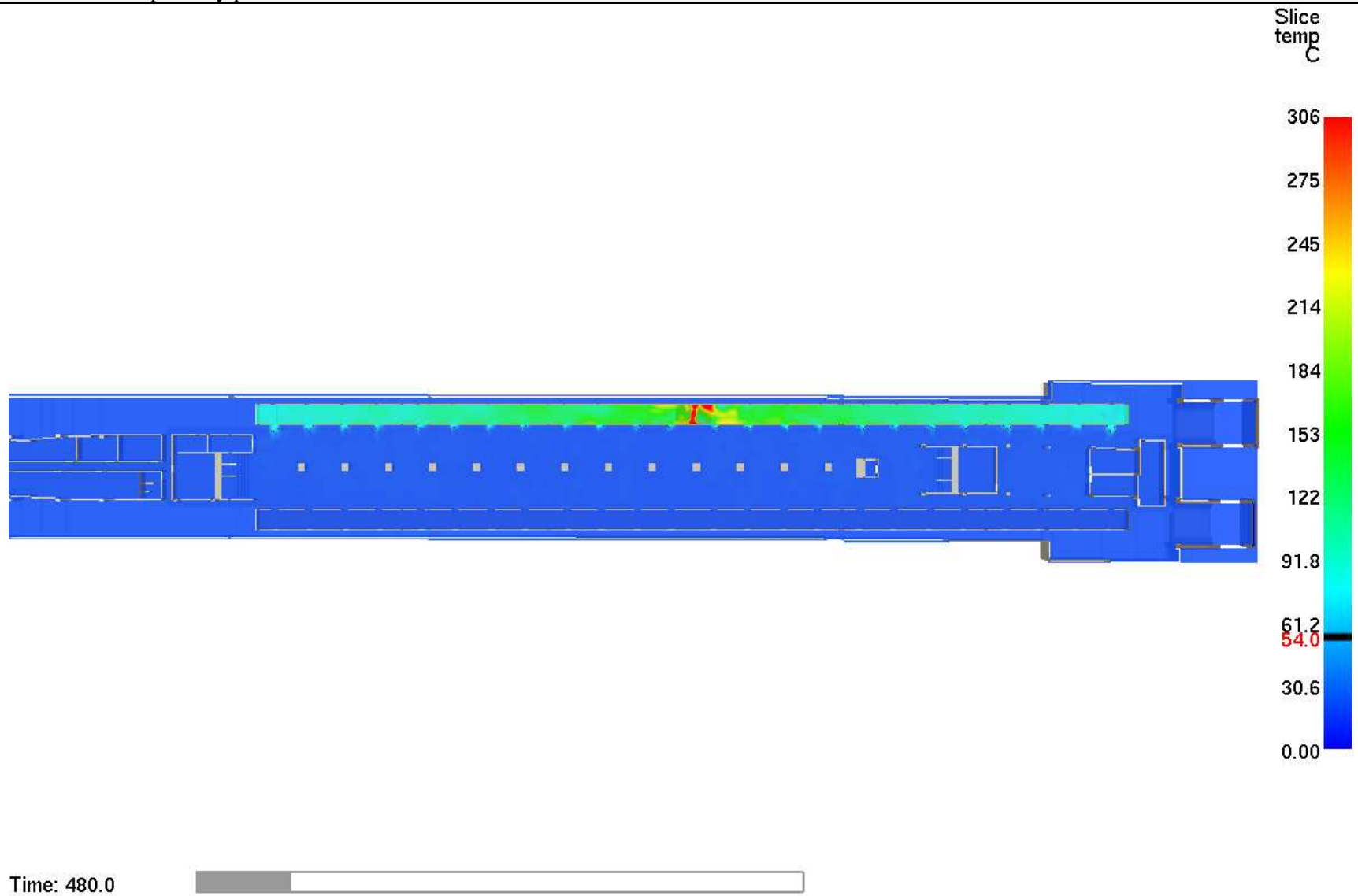
Scenariusz nr 1 – rozkład temperatury po 420 sekundach



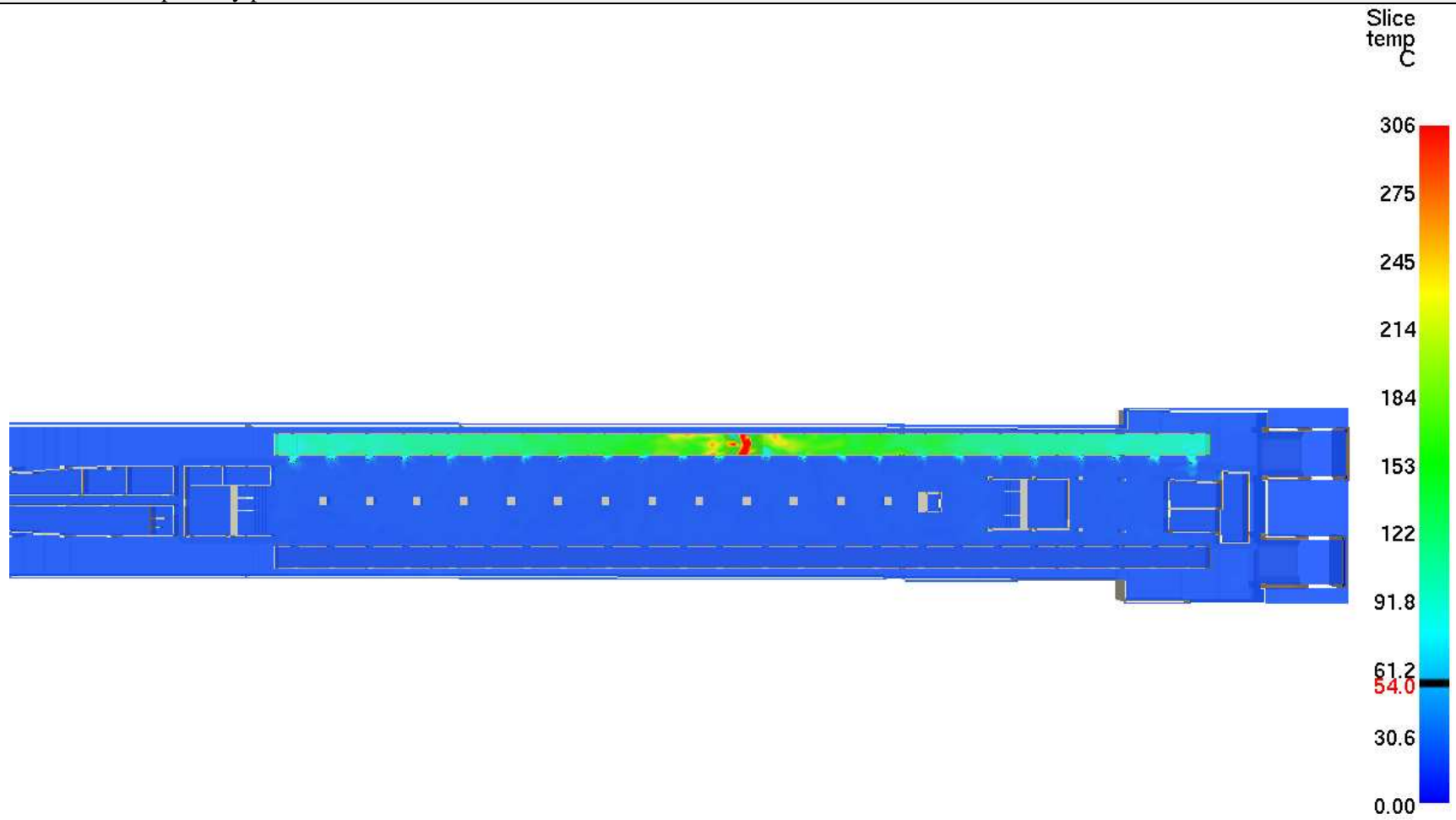
Time: 420.0



Scenariusz nr 1 – rozkład temperatury po 480 sekundach



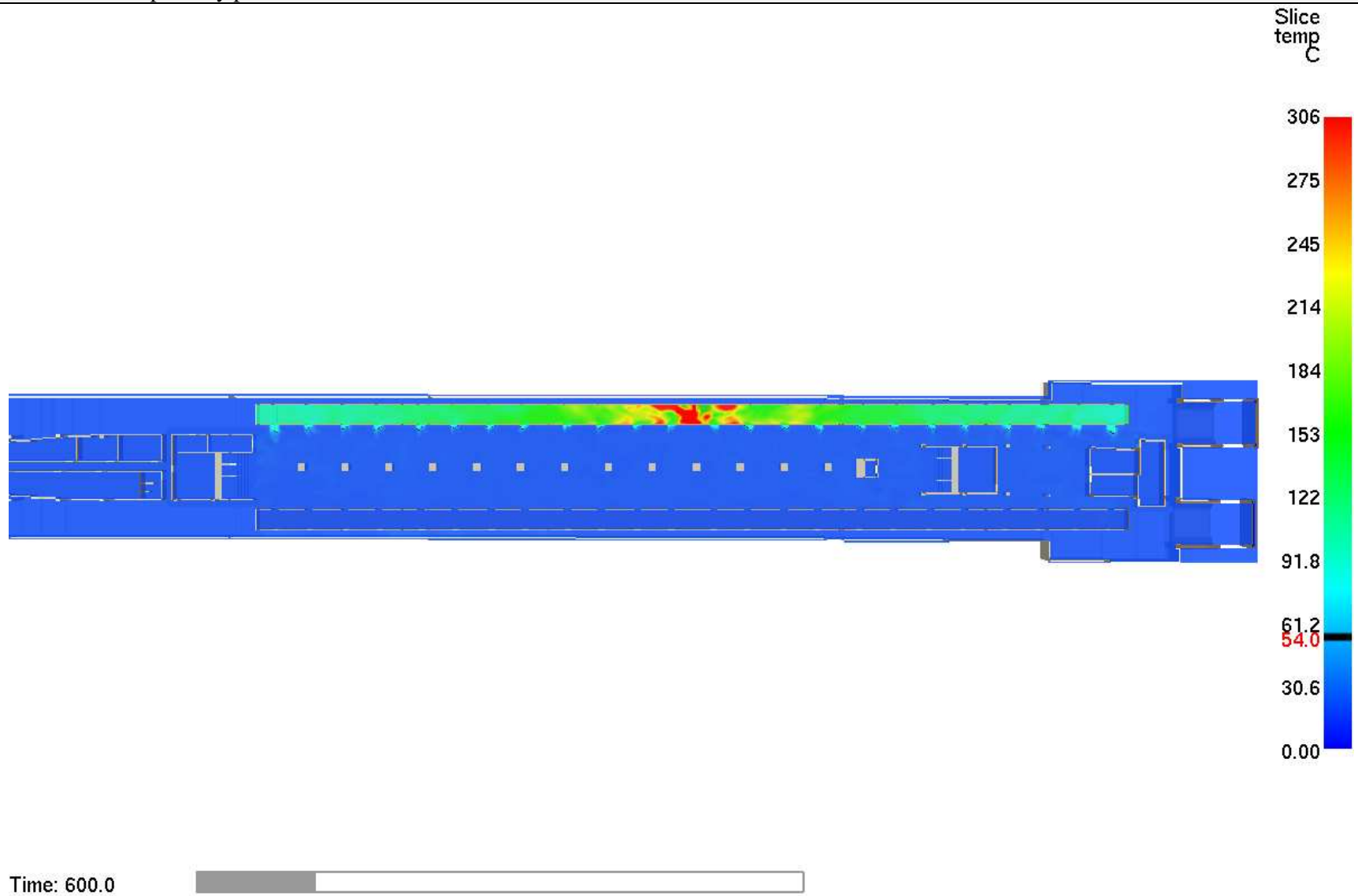
Scenariusz nr 1 – rozkład temperatury po 540 sekundach



Time: 540.0

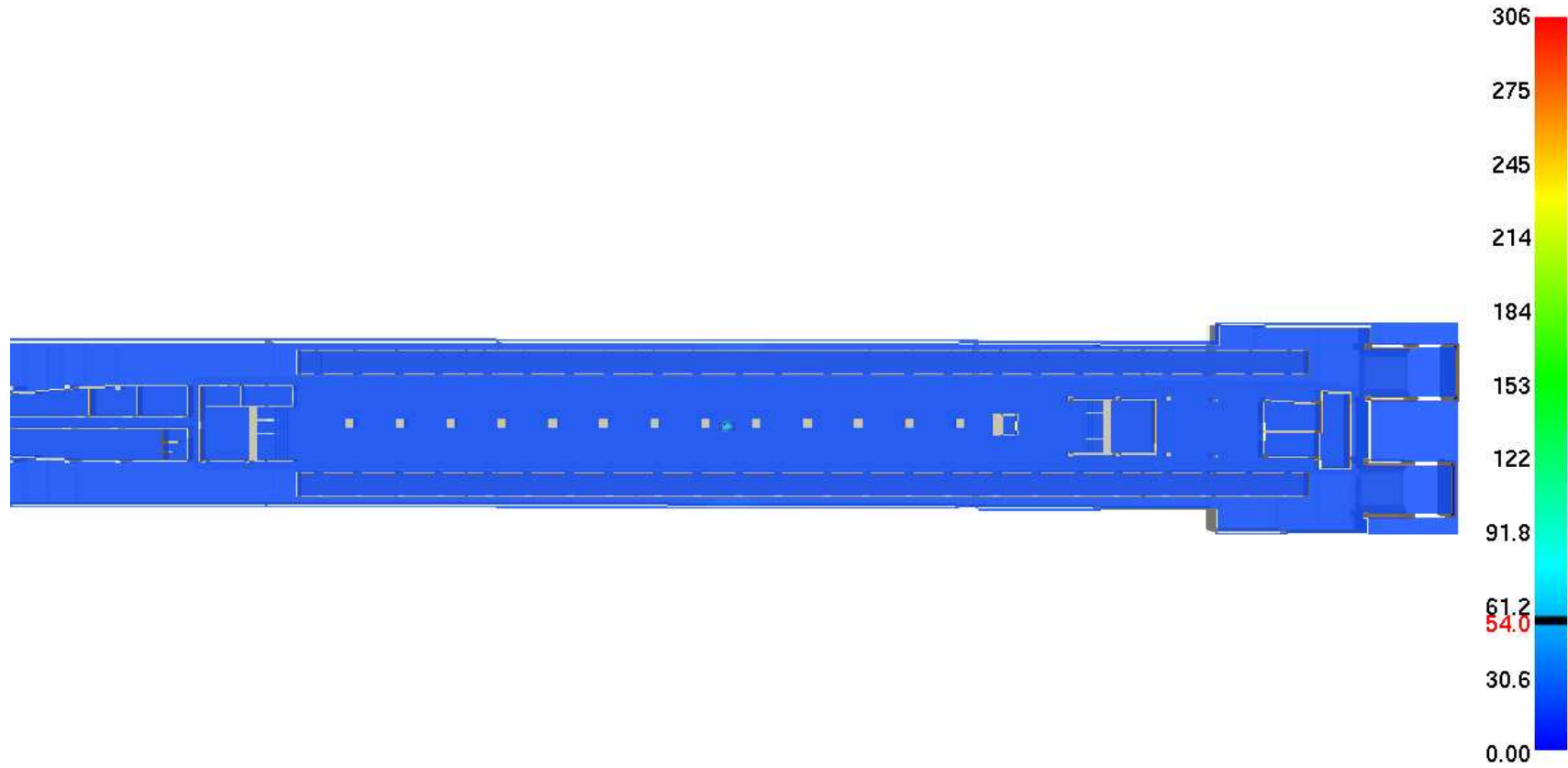


Scenariusz nr 1 – rozkład temperatury po 600 sekundach



**Scenariusz nr 2 - pożar walizki:**

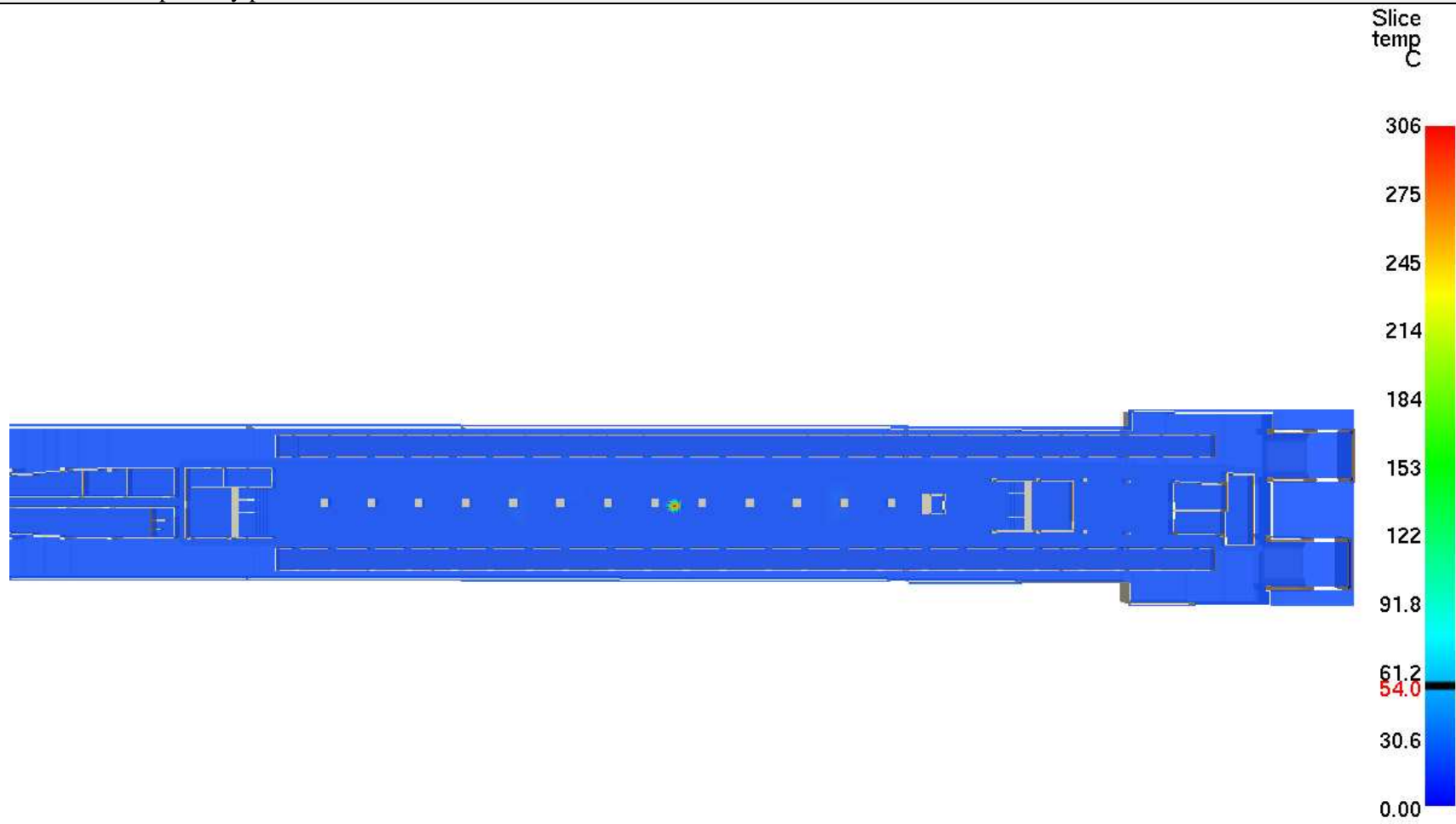
Scenariusz nr 2 – rozkład temperatury po 60 sekundach



Time: 60.0



Scenariusz nr 2 – rozkład temperatury po 120 sekundach

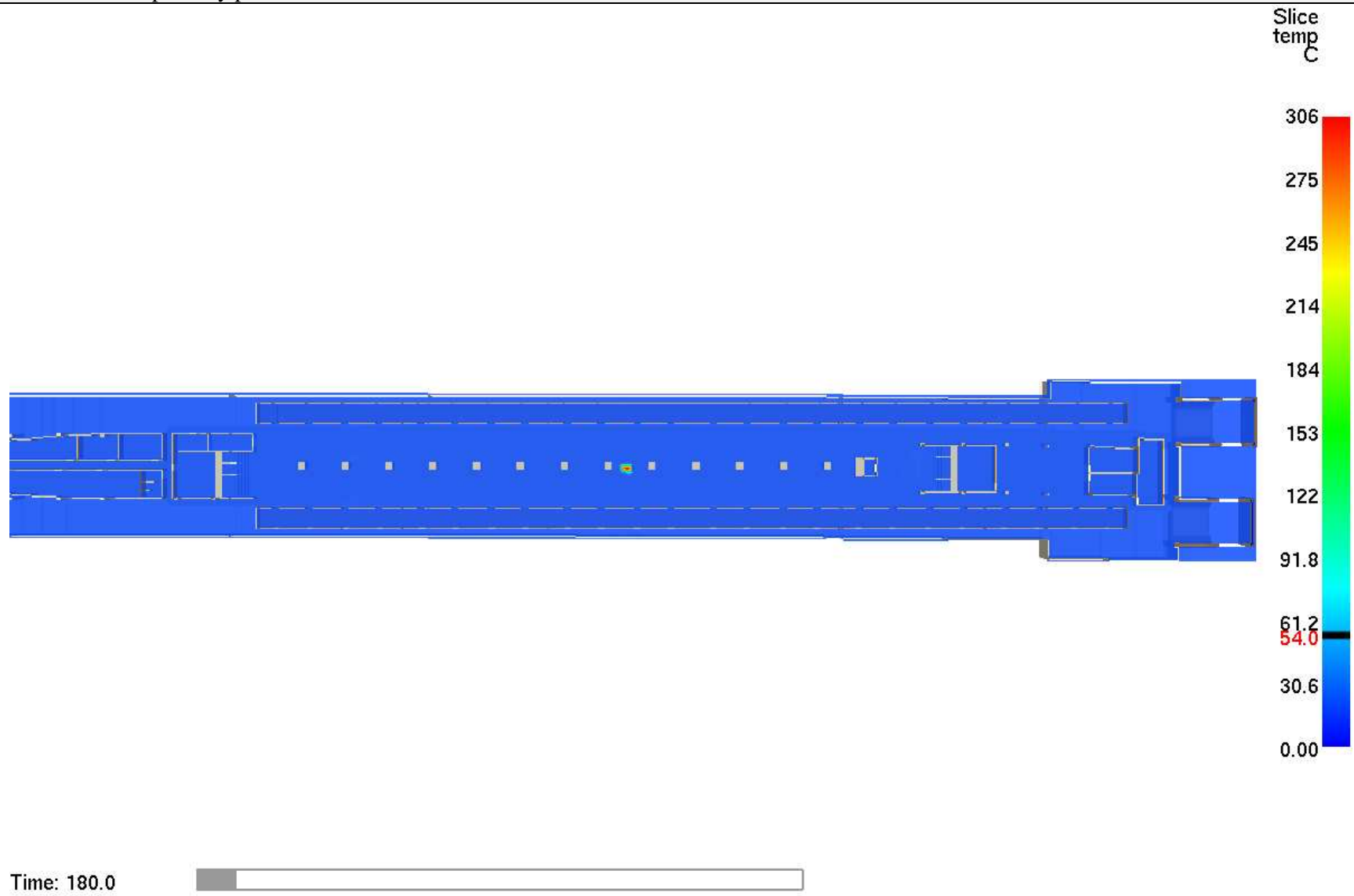


Time: 120.0

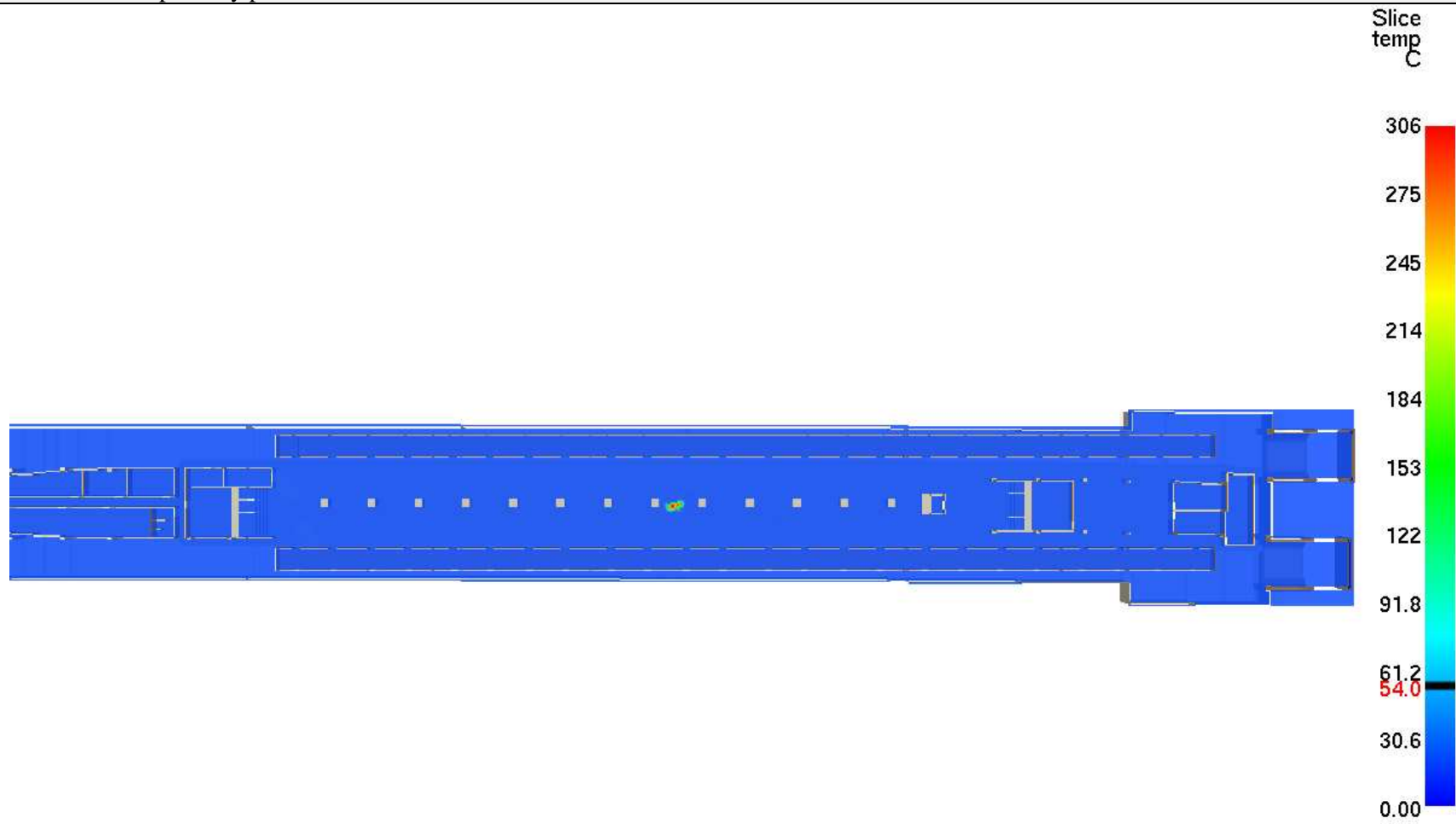




Scenariusz nr 2 – rozkład temperatury po 180 sekundach



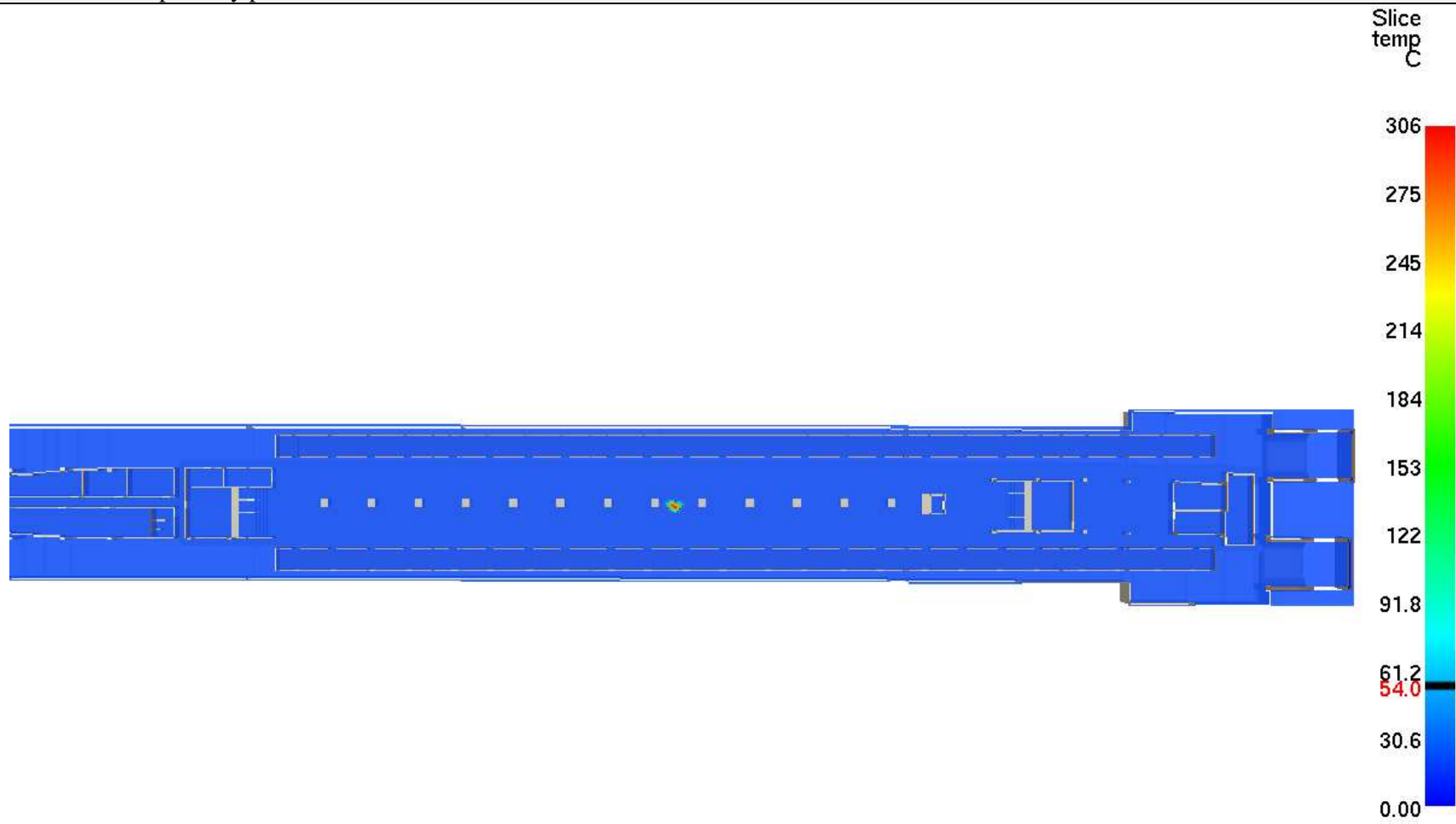
Scenariusz nr 2 – rozkład temperatury po 240 sekundach



Time: 240.0



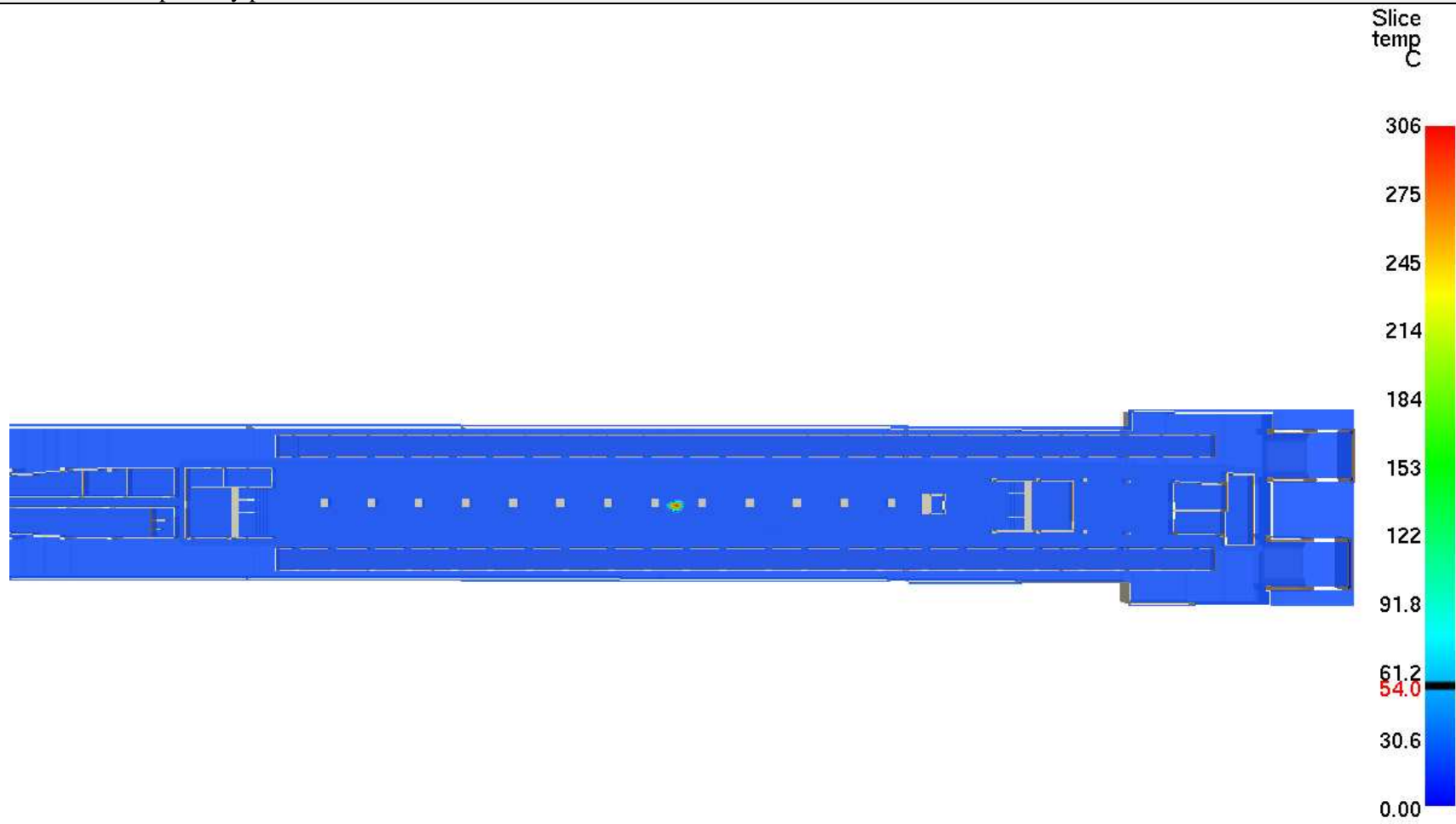
Scenariusz nr 2 – rozkład temperatury po 300 sekundach



Time: 300.0



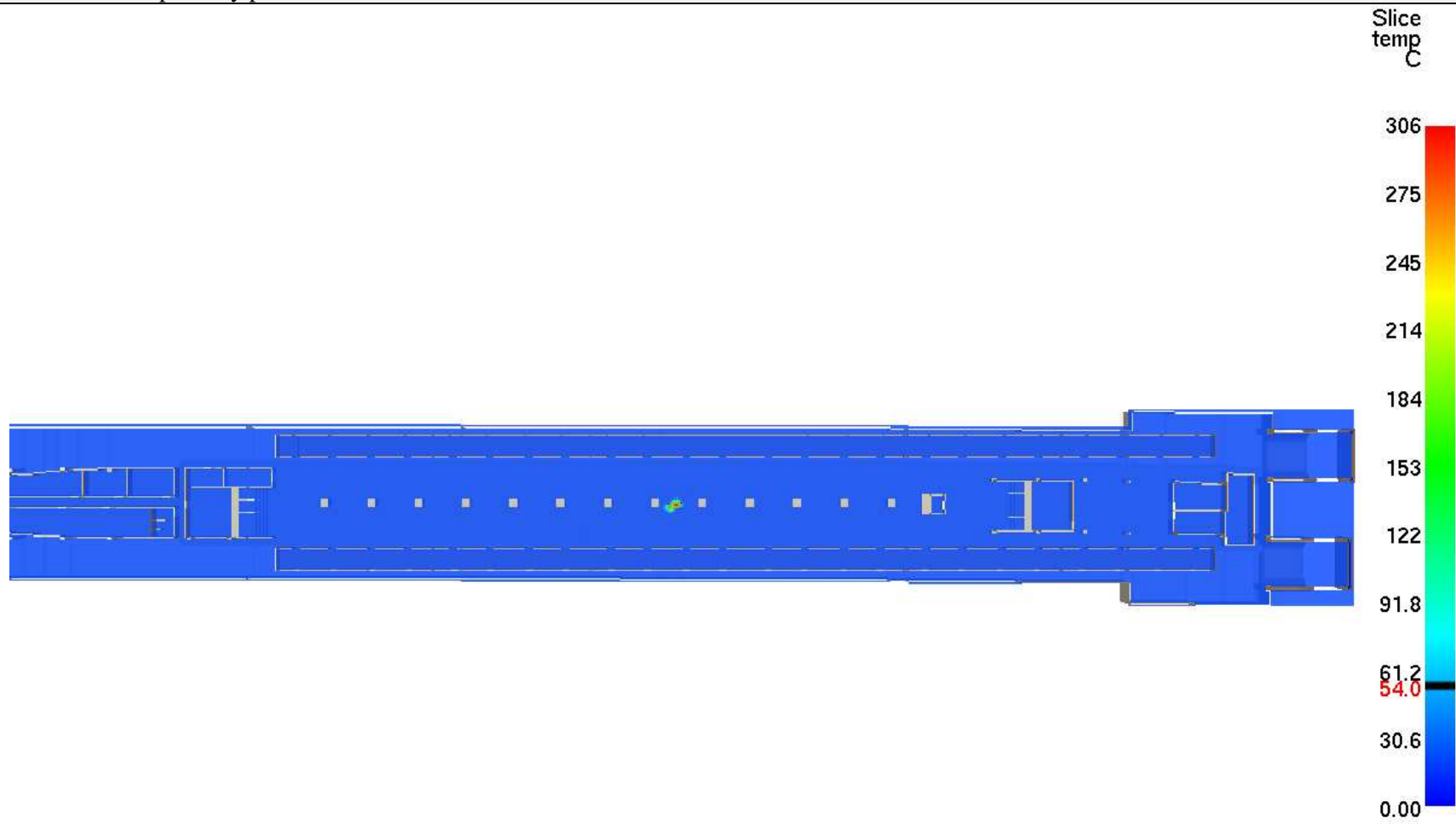
Scenariusz nr 2 – rozkład temperatury po 360 sekundach



Time: 360.0

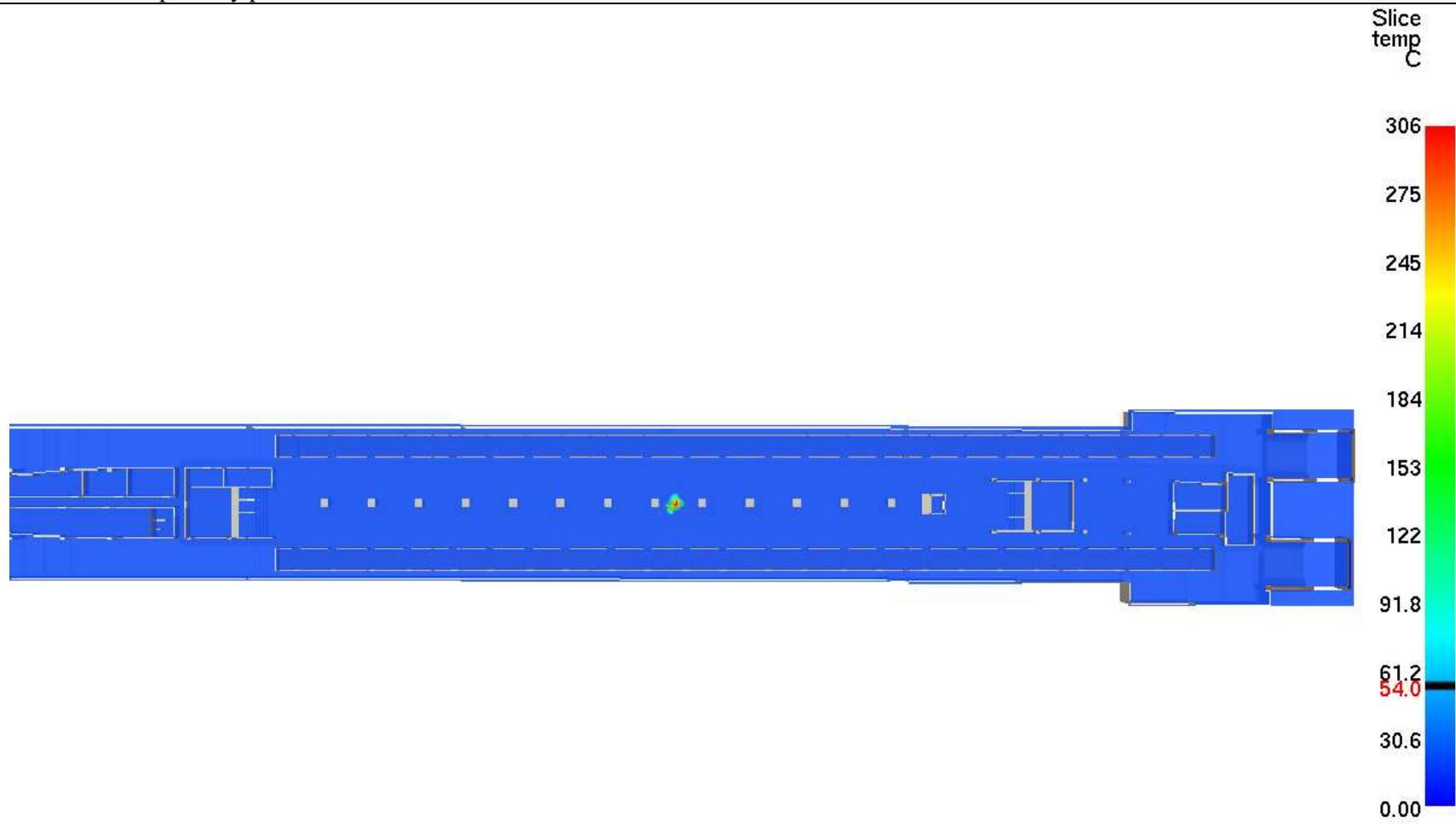


Scenariusz nr 2 – rozkład temperatury po 420 sekundach



Time: 420.0

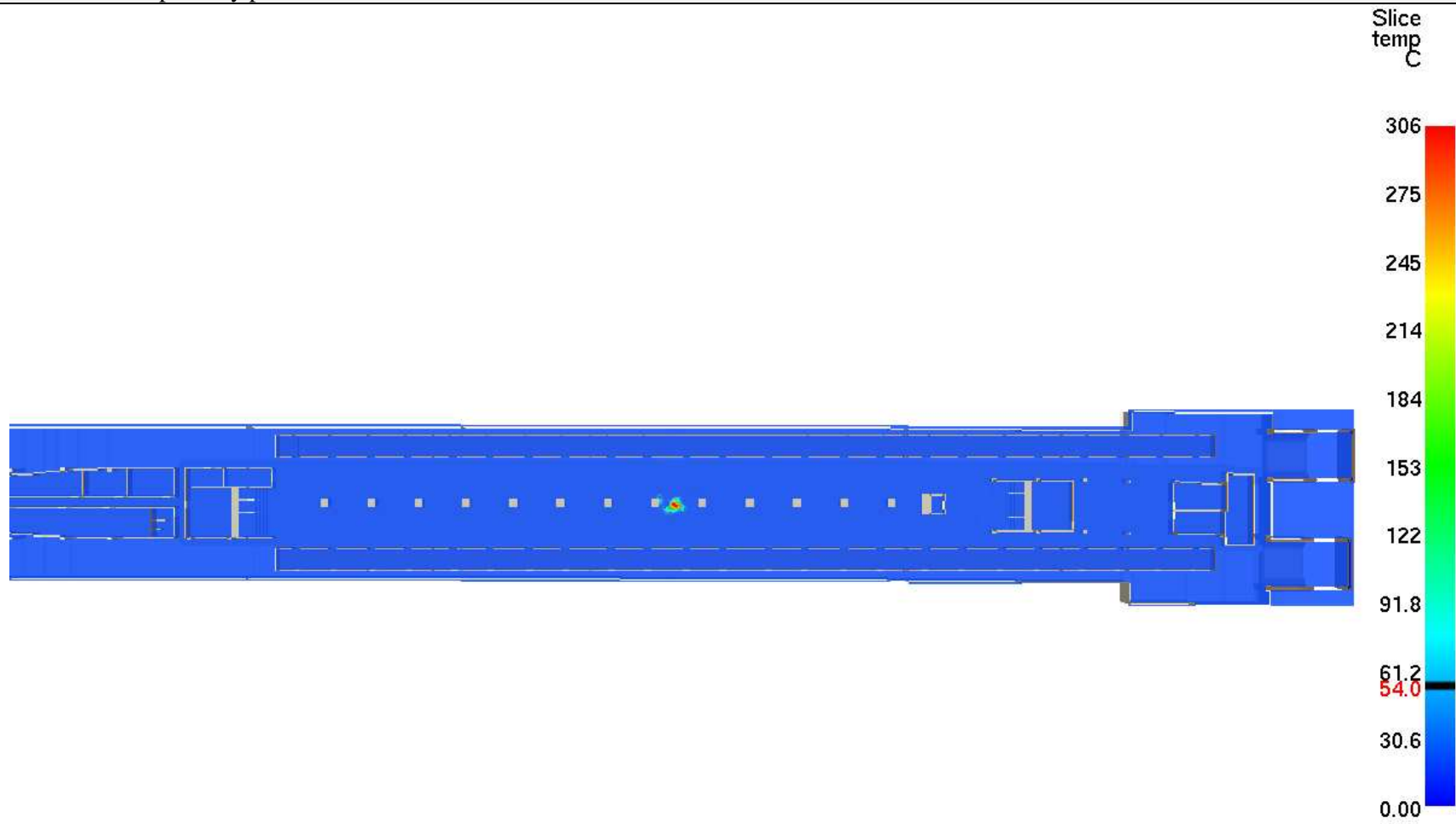
Scenariusz nr 2 – rozkład temperatury po 480 sekundach



Time: 480.0



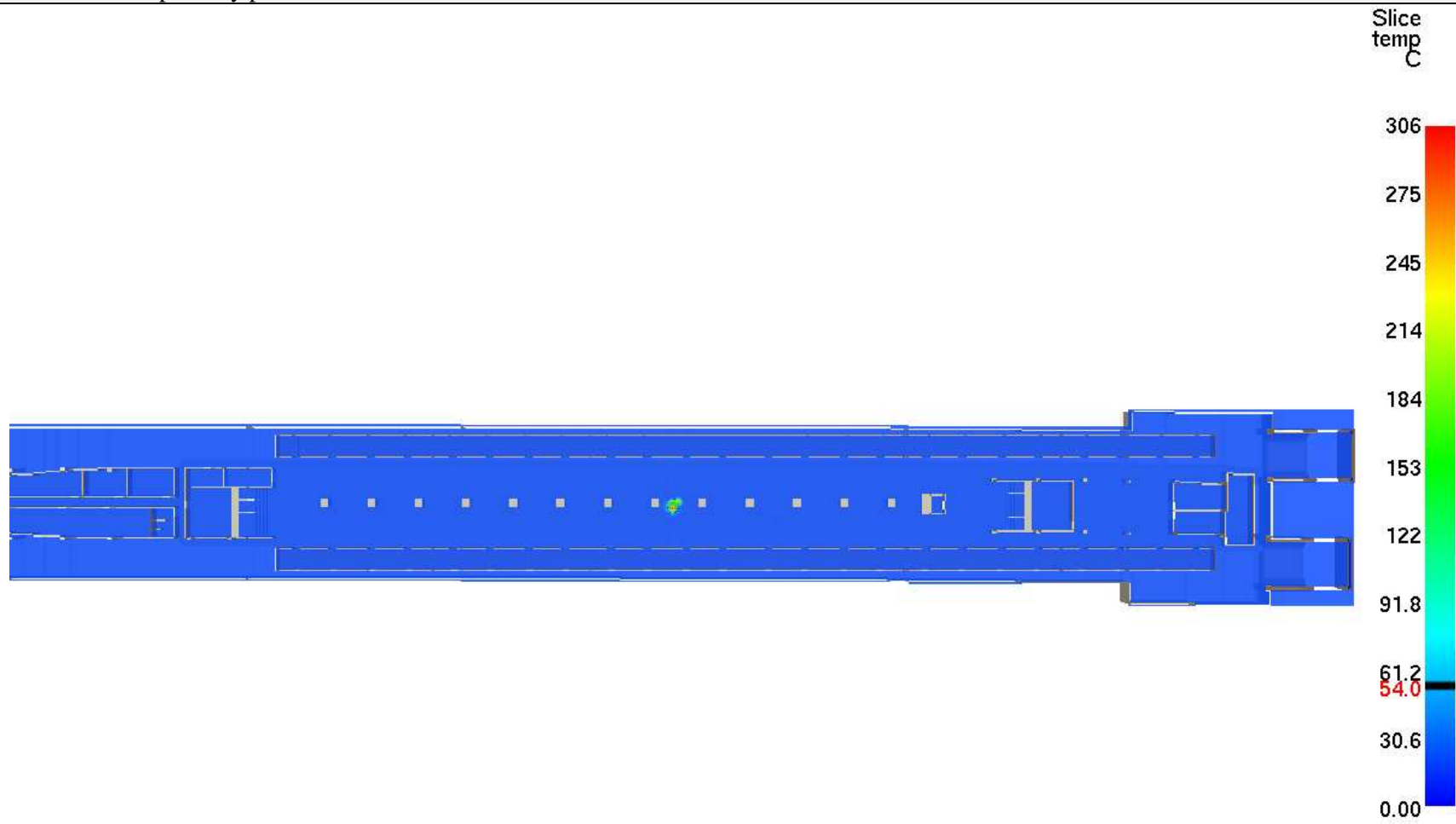
Scenariusz nr 2 – rozkład temperatury po 540 sekundach



Time: 540.0



Scenariusz nr 2 – rozkład temperatury po 600 sekundach



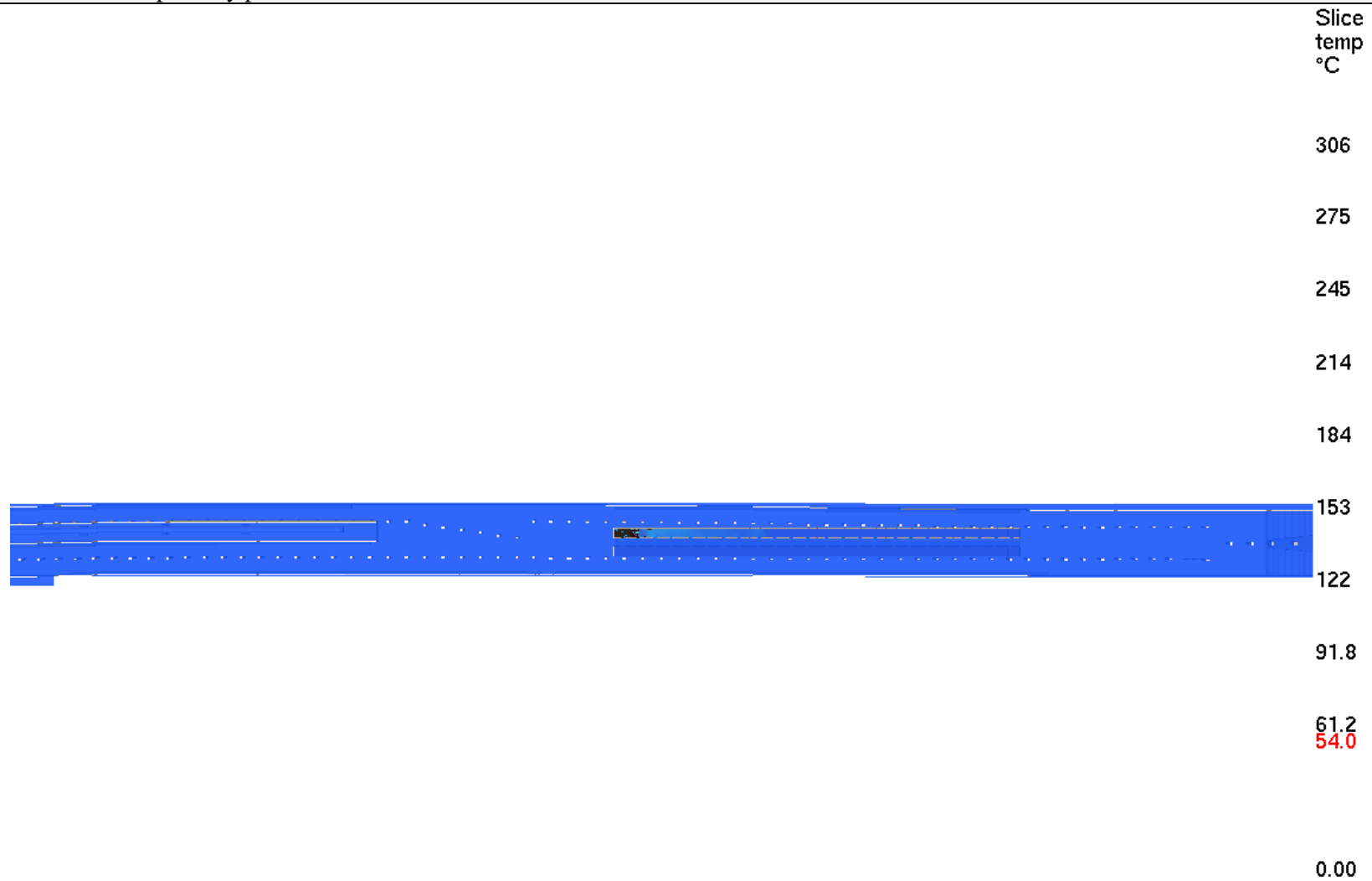
Time: 600.0





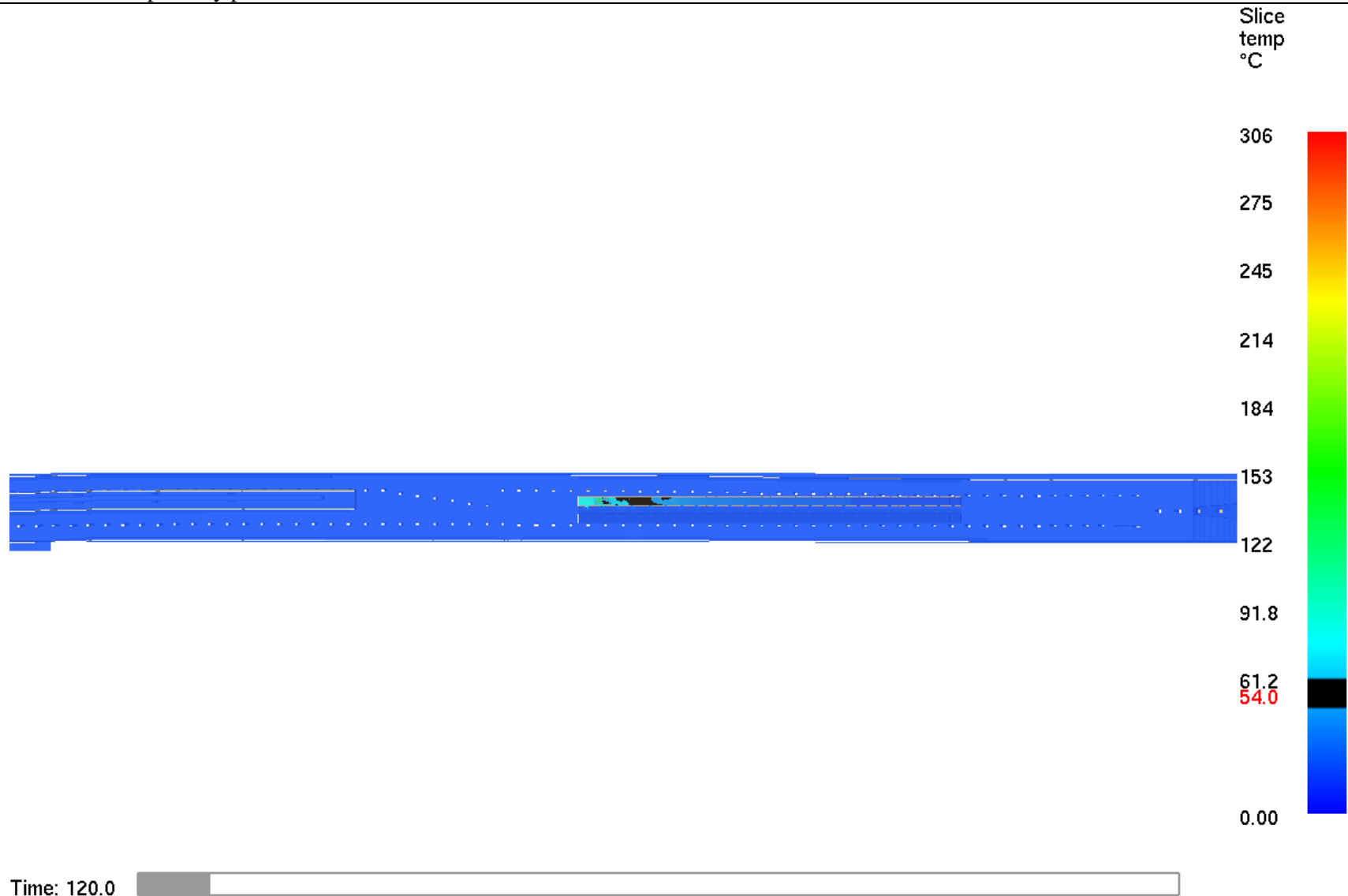
**Scenariusz nr 3 - pożar pociągu:**

Scenariusz nr 3 – rozkład temperatury po 60 sekundach



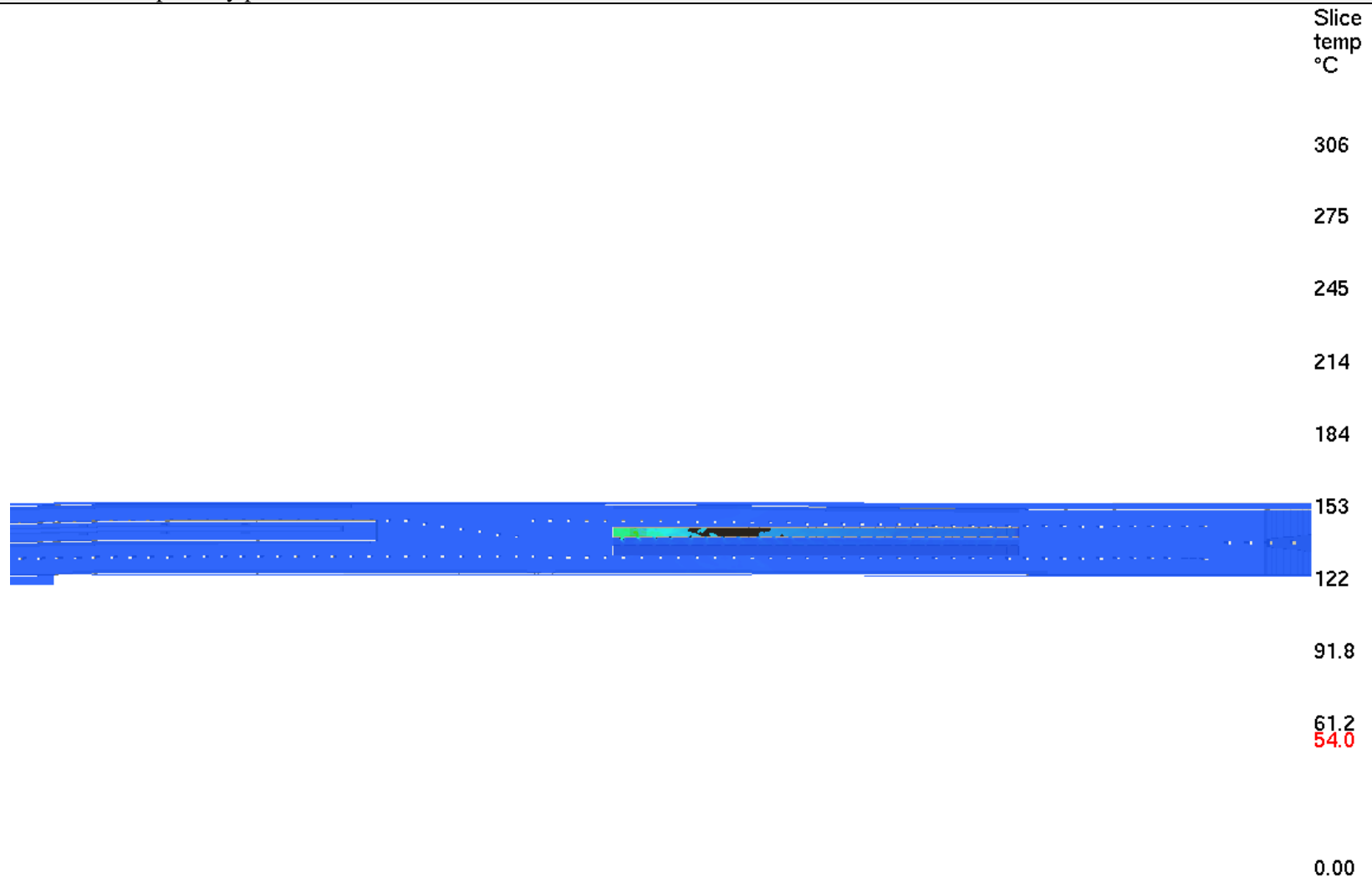
Time: 60.0

Scenariusz nr 3 – rozkład temperatury po 120 sekundach



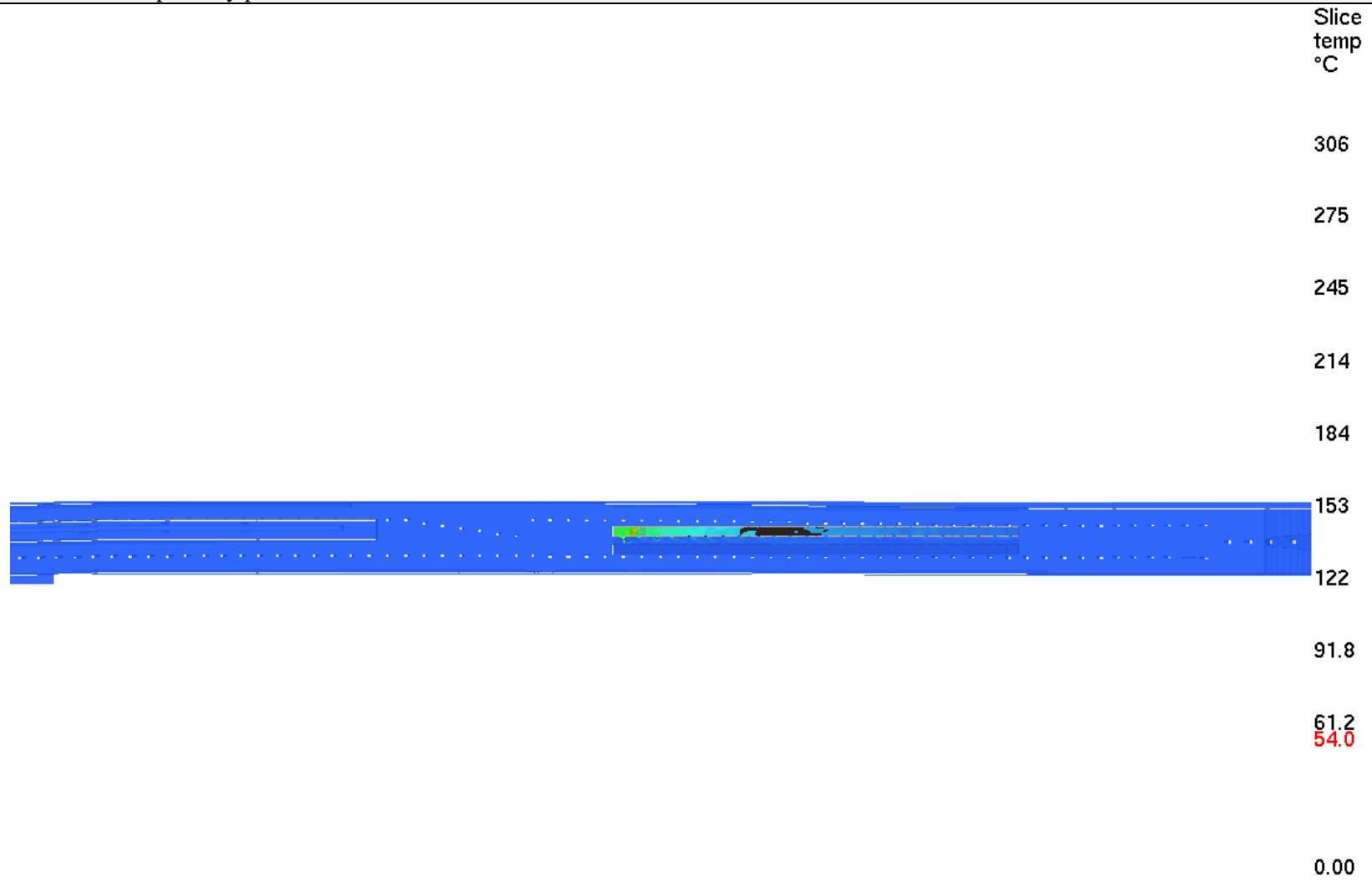
Time: 120.0

Scenariusz nr 3 – rozkład temperatury po 180 sekundach



Time: 180.0

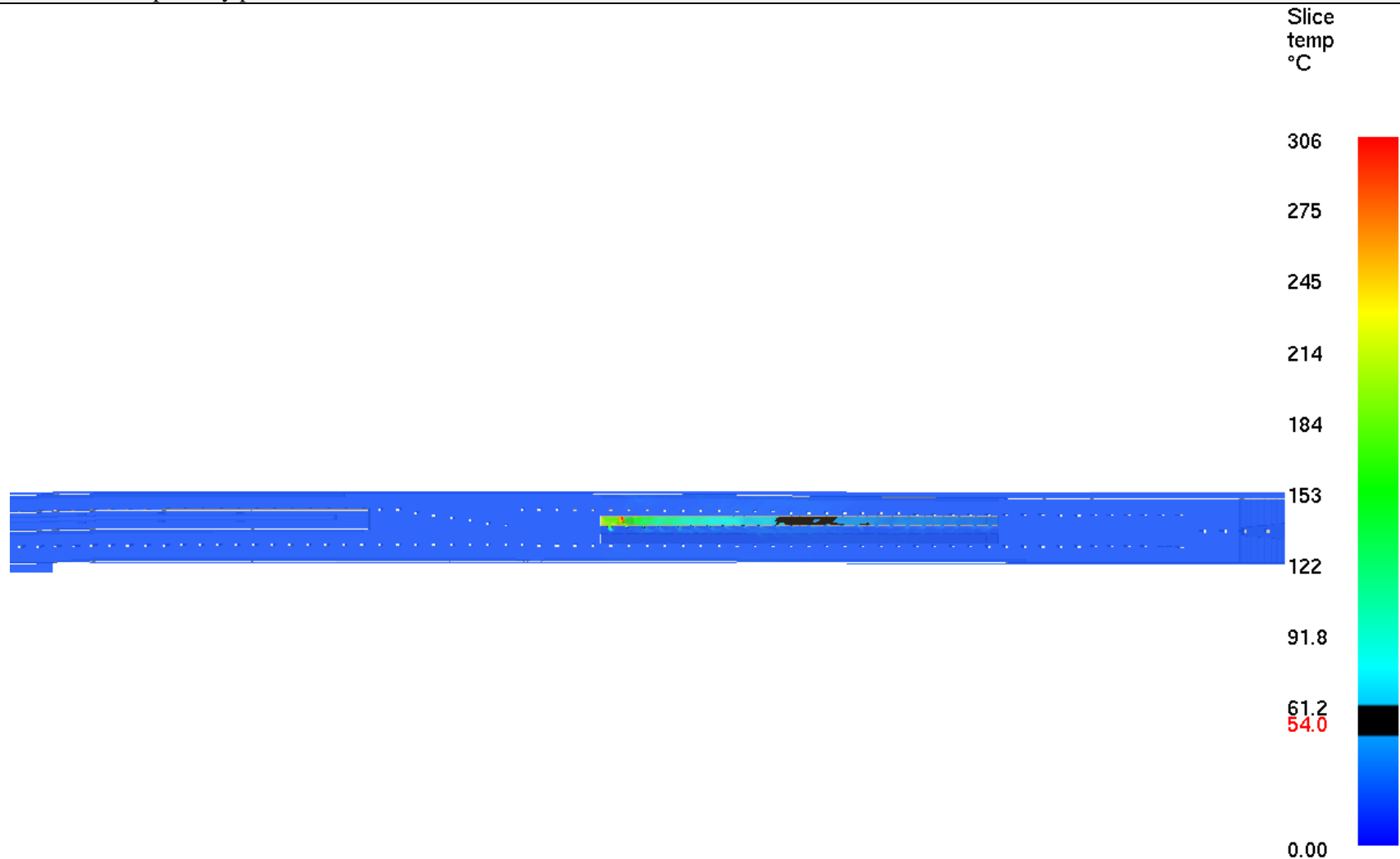
Scenariusz nr 3 – rozkład temperatury po 240 sekundach



Time: 240.0



Scenariusz nr 3 – rozkład temperatury po 300 sekundach

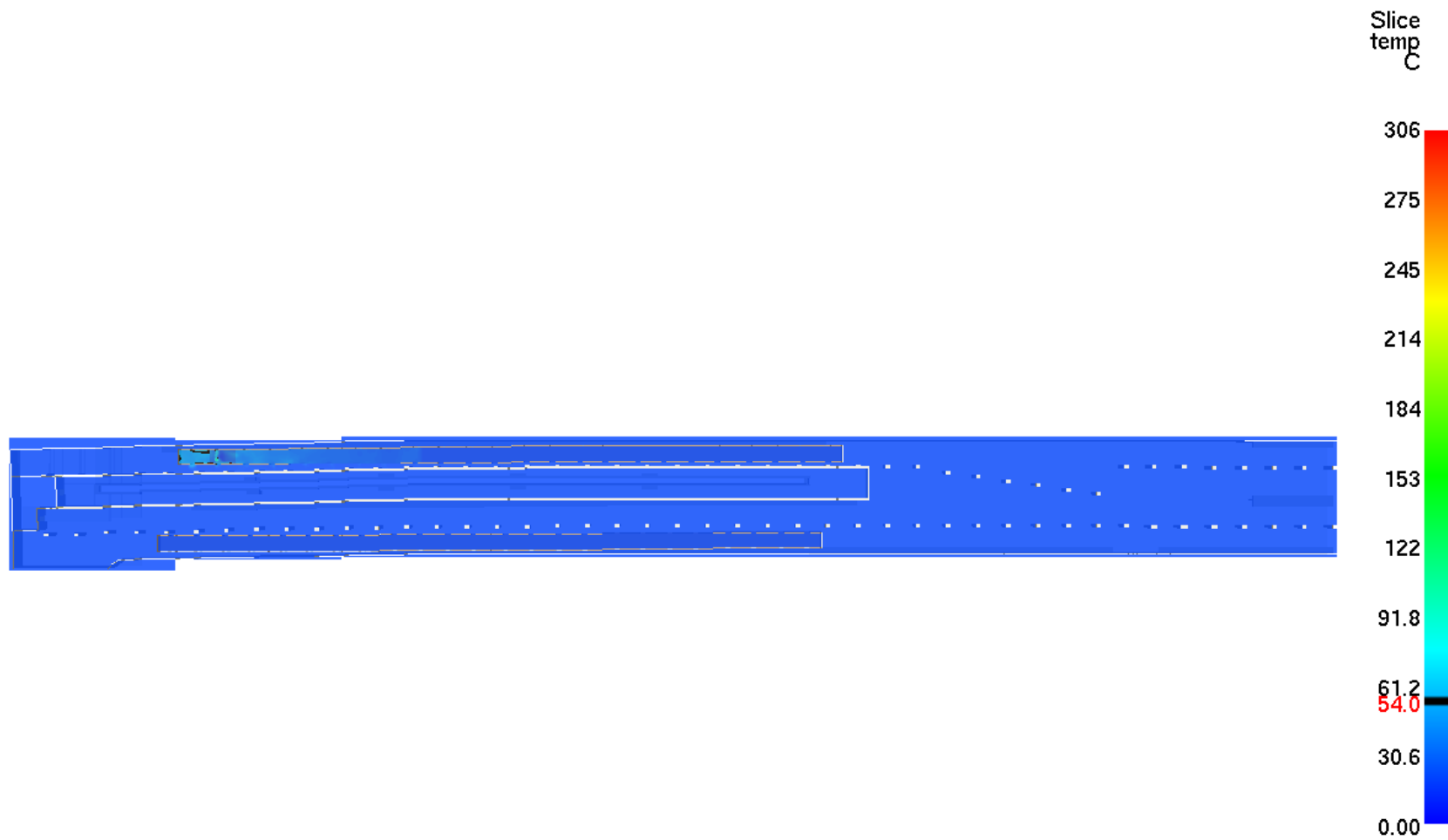


Time: 300.0



**Scenariusz nr 4 - pożar pociągu:**

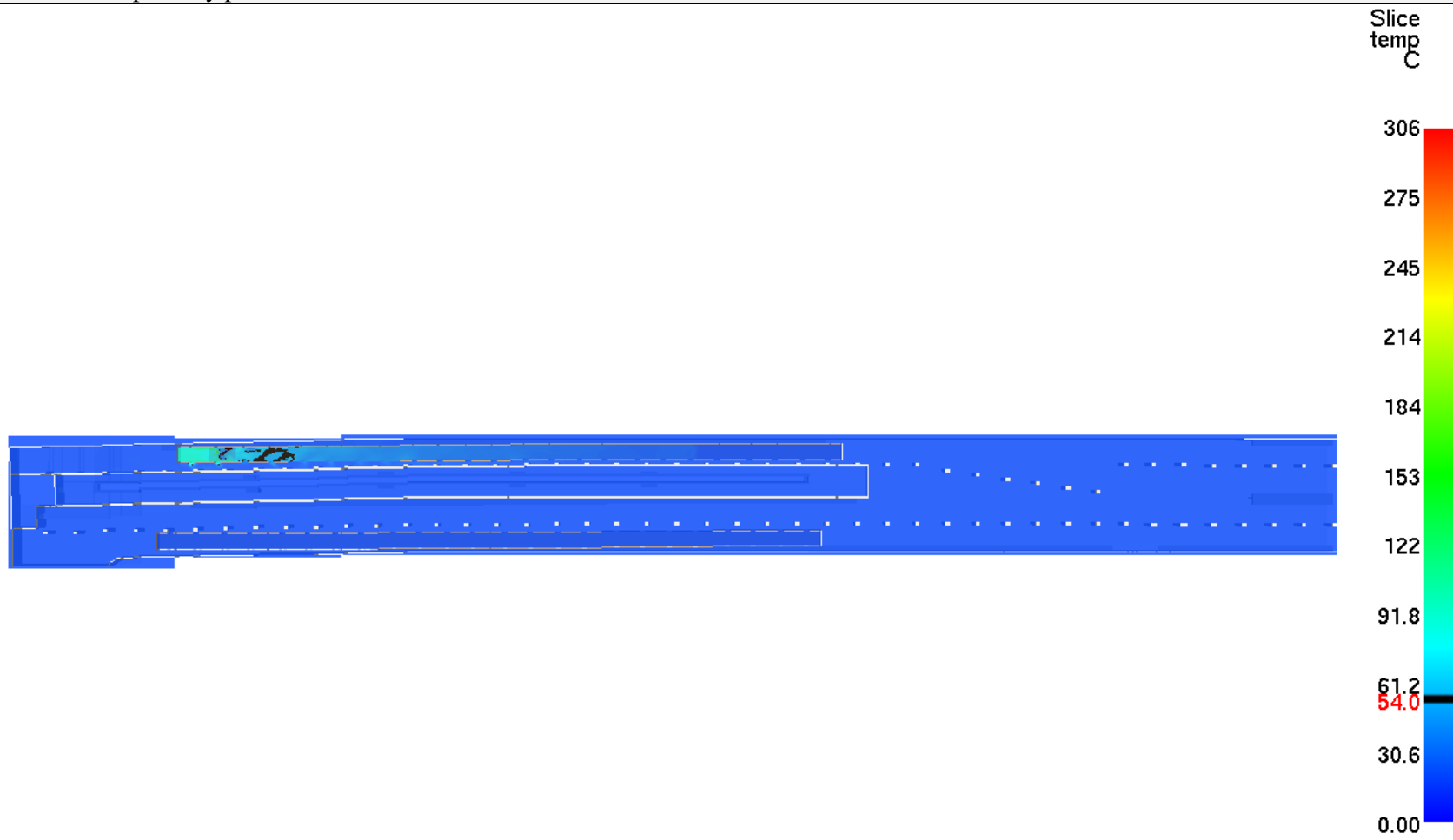
Scenariusz nr 4 – rozkład temperatury po 60 sekundach



Time: 60.0



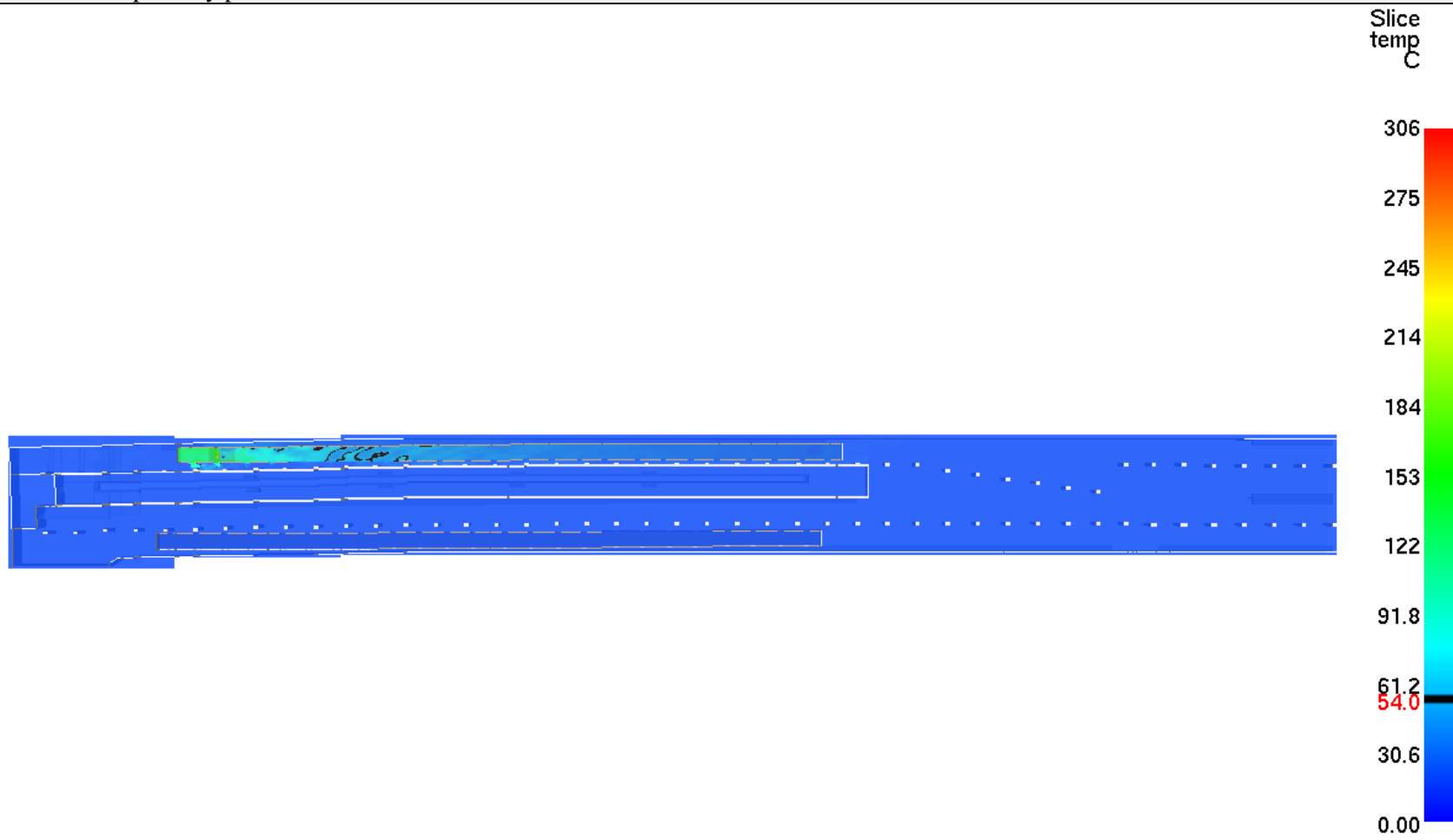
Scenariusz nr 4 – rozkład temperatury po 120 sekundach



Time: 120.0



Scenariusz nr 4 – rozkład temperatury po 180 sekundach

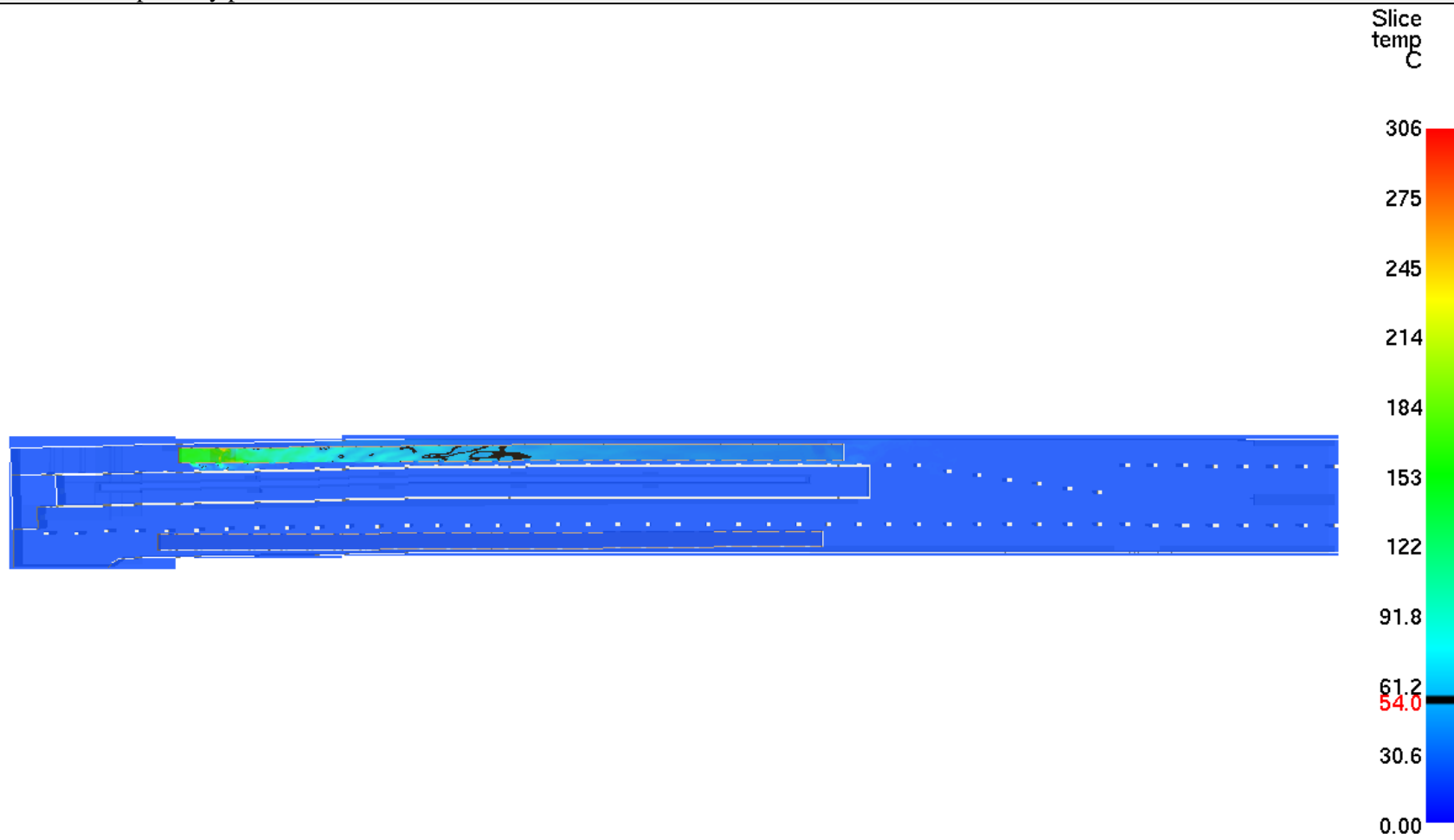


Time: 180.0





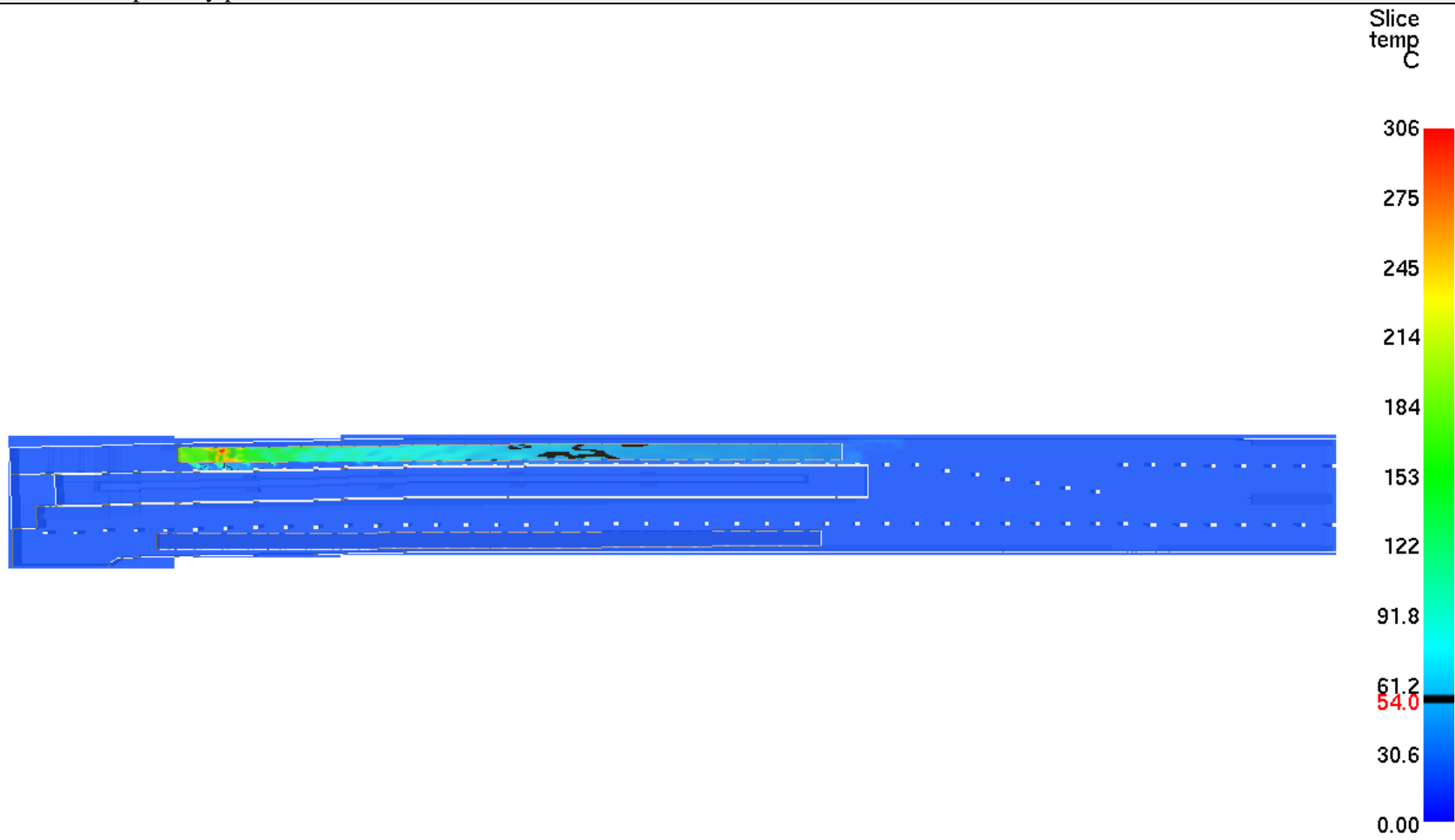
Scenariusz nr 4 – rozkład temperatury po 240 sekundach



Time: 240.0



Scenariusz nr 4 – rozkład temperatury po 300 sekundach

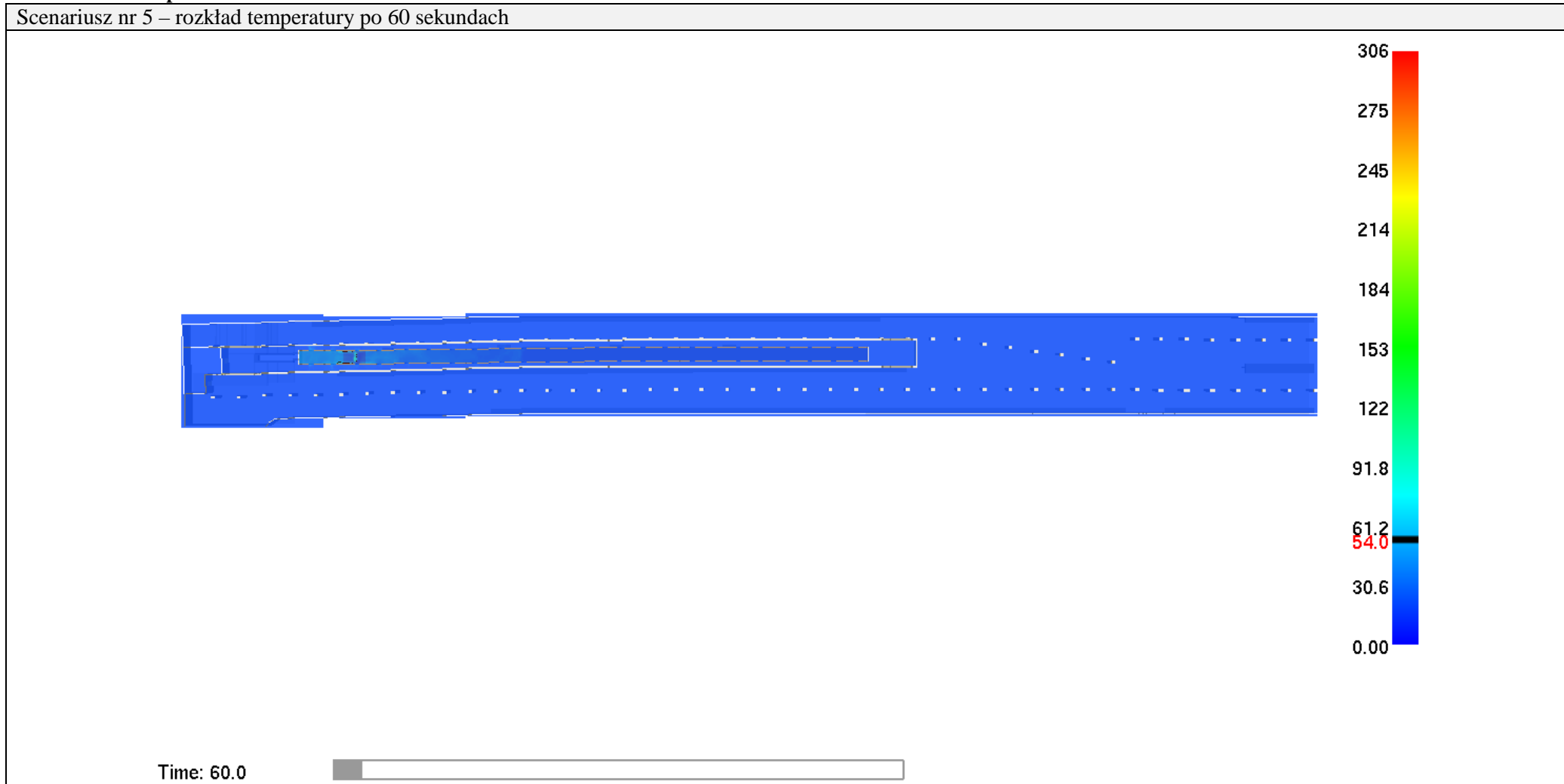


Time: 300.0

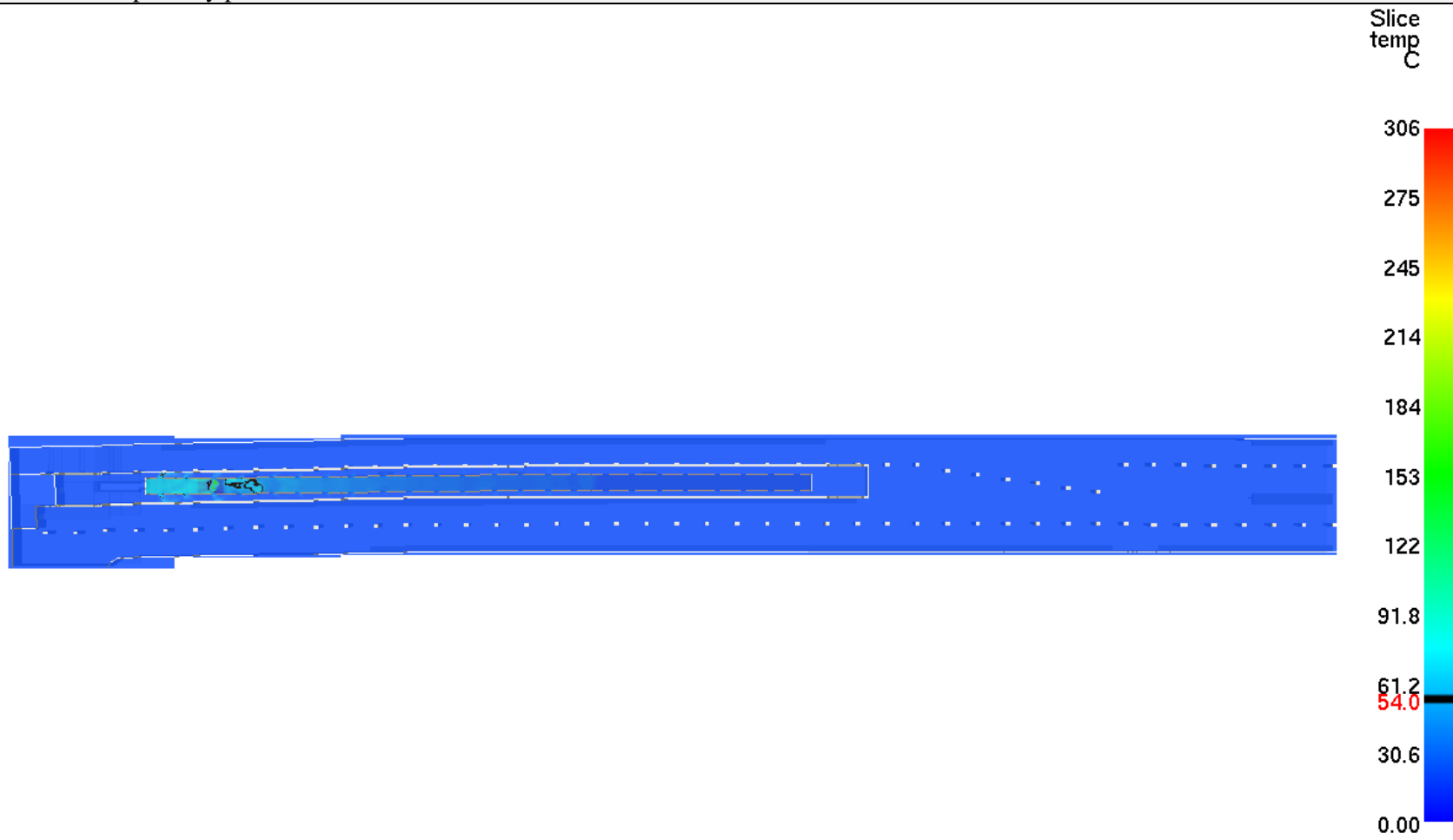


**Scenariusz nr 5 - pożar walizki:**

Scenariusz nr 5 – rozkład temperatury po 60 sekundach



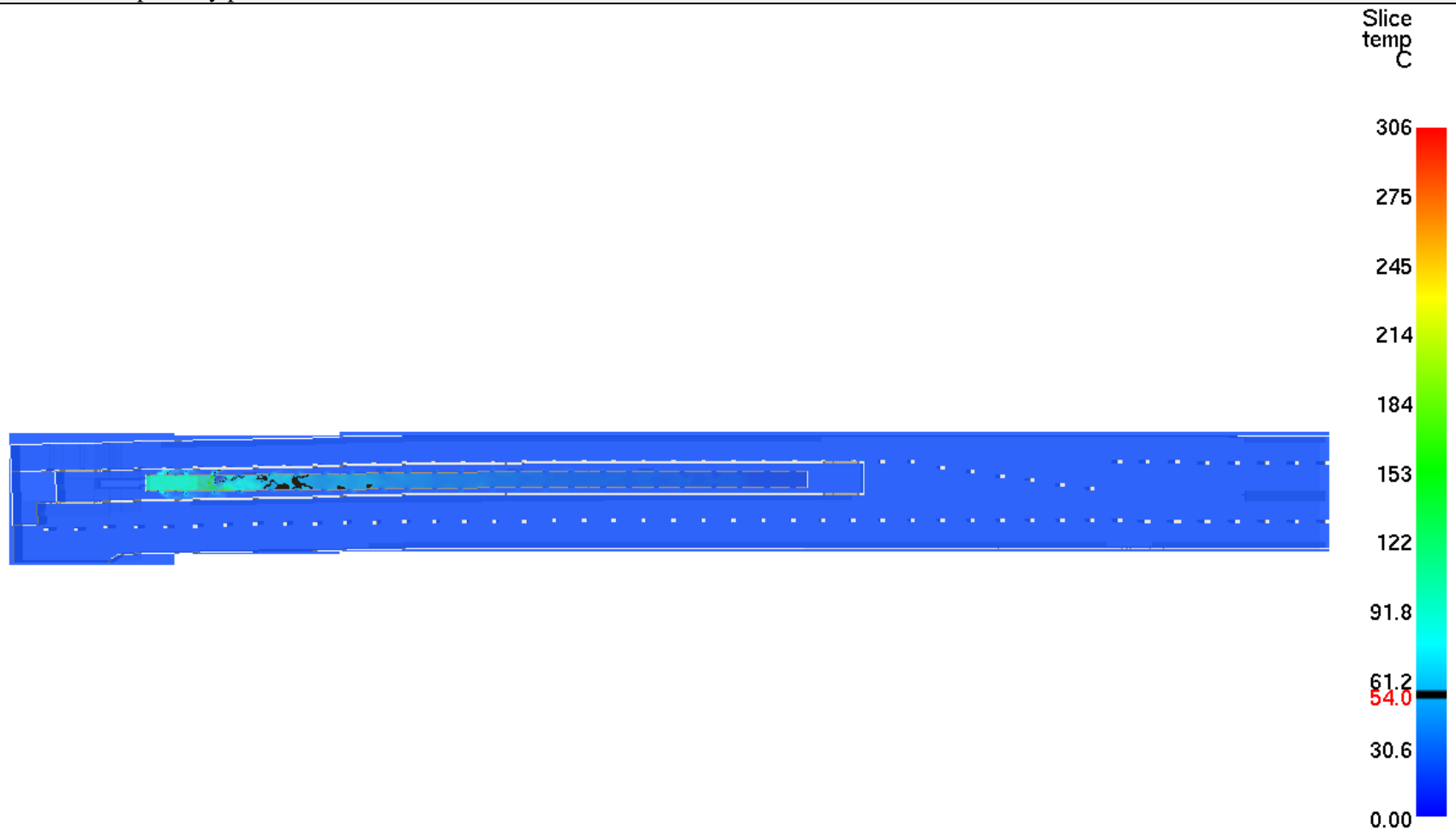
Scenariusz nr 5 – rozkład temperatury po 120 sekundach



Time: 120.0



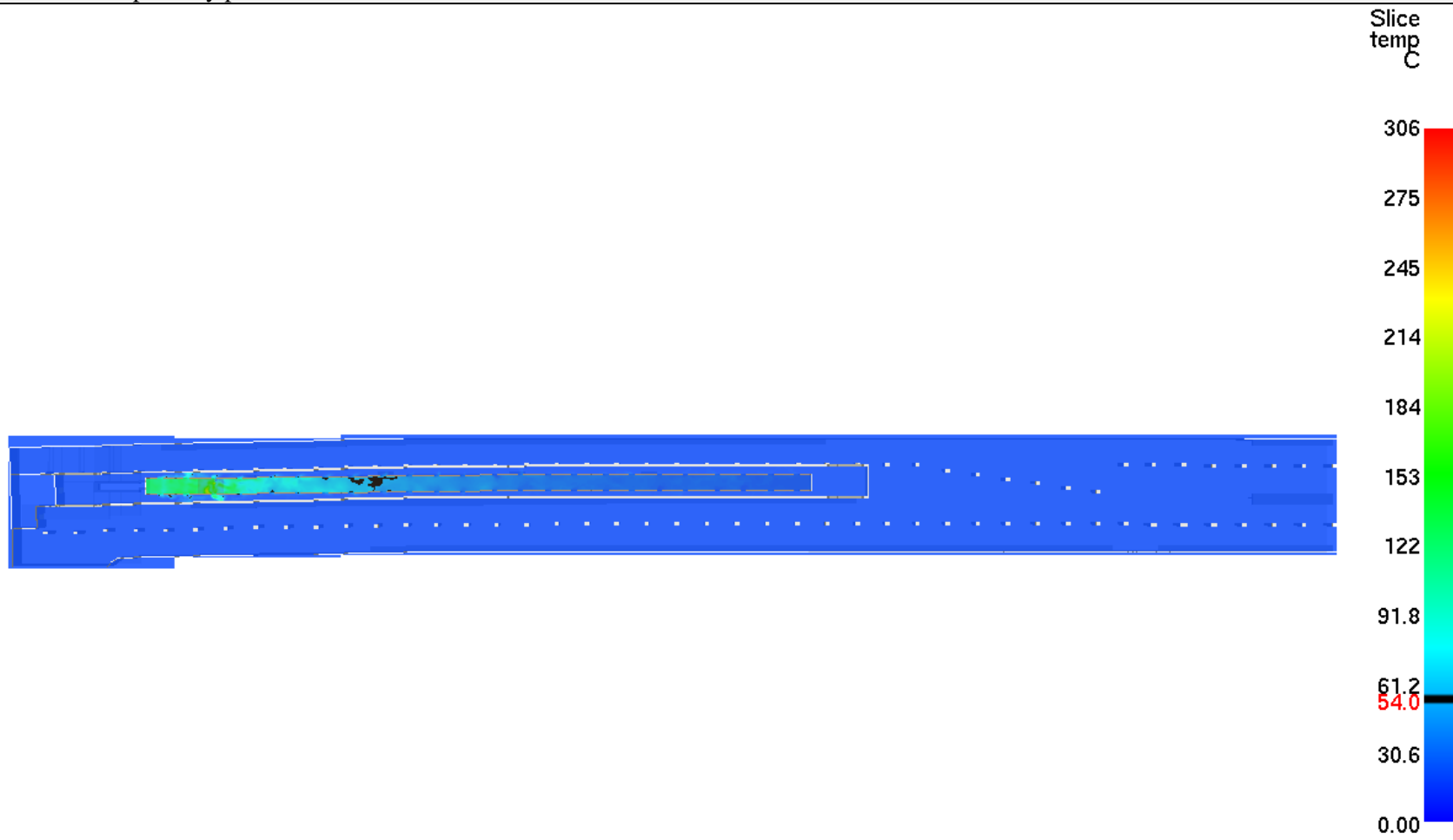
Scenariusz nr 5 – rozkład temperatury po 180 sekundach



Time: 180.0



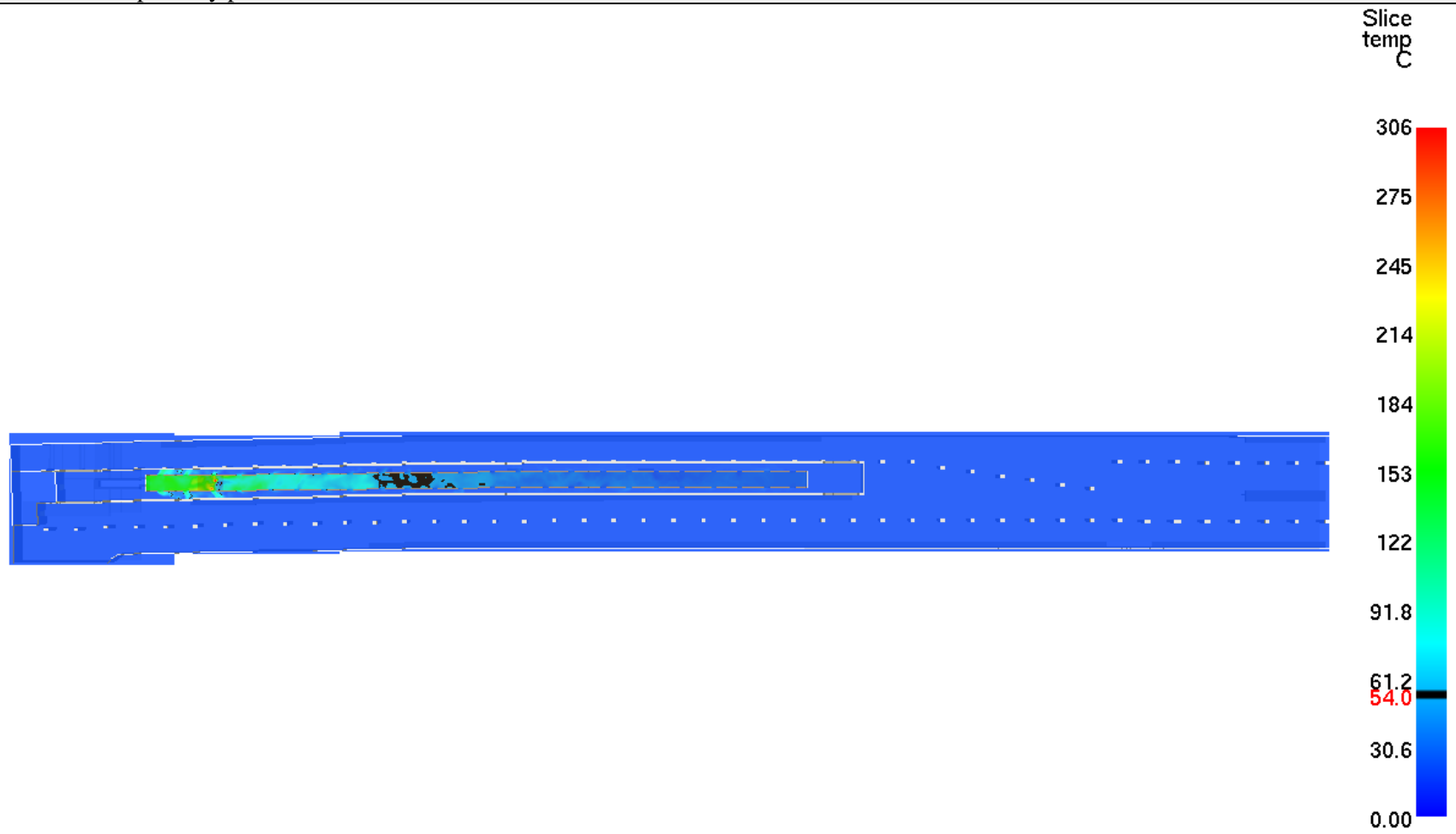
Scenariusz nr 5 – rozkład temperatury po 240 sekundach



Time: 240.0



Scenariusz nr 5 – rozkład temperatury po 300 sekundach

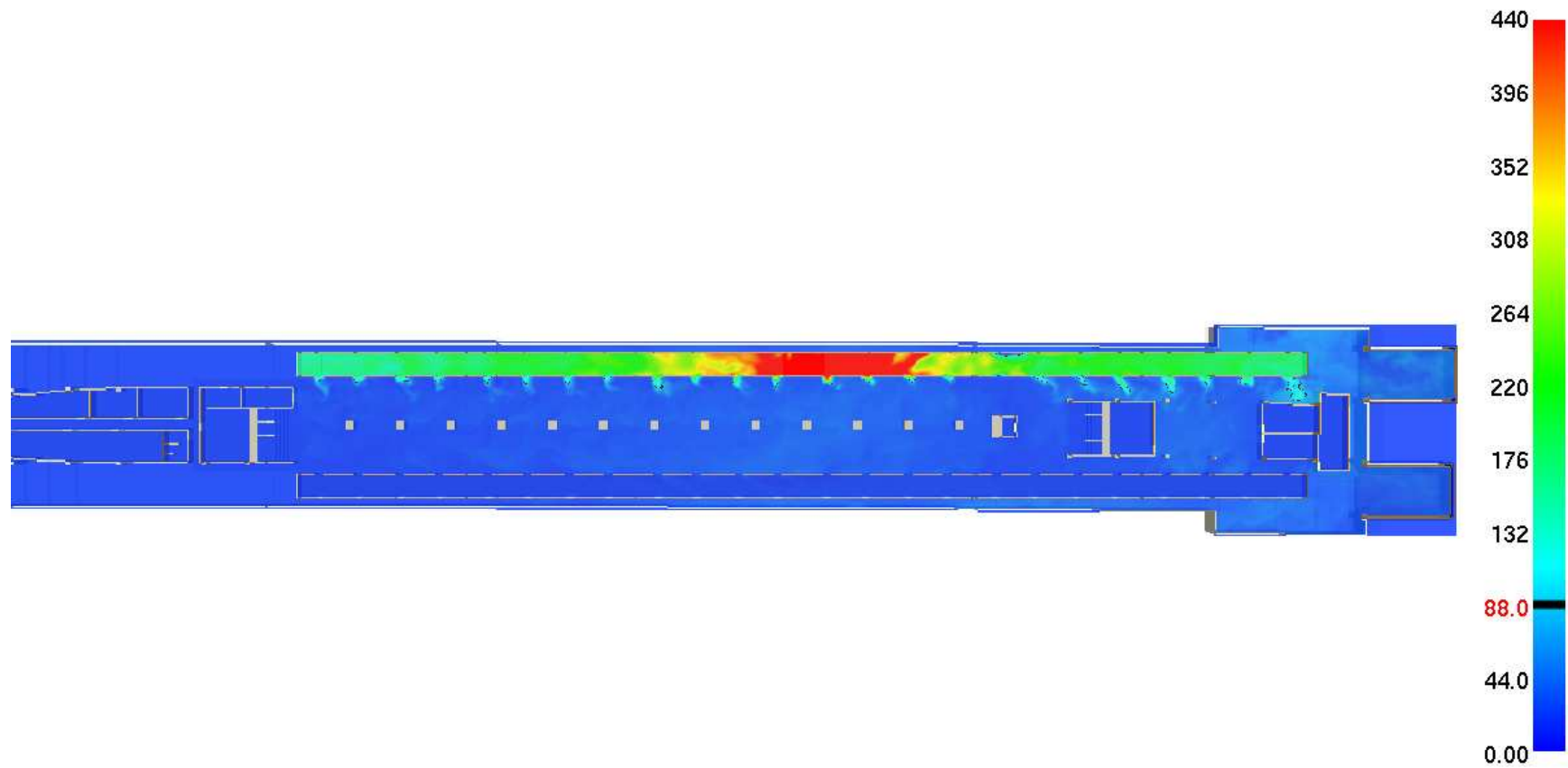


Time: 300.0



### 6.1.4. TEMPERATURA NA WYSOKOŚCI 1.8 M PO CZASIE INTERWENCJI EKIP RATOWNICZYCH

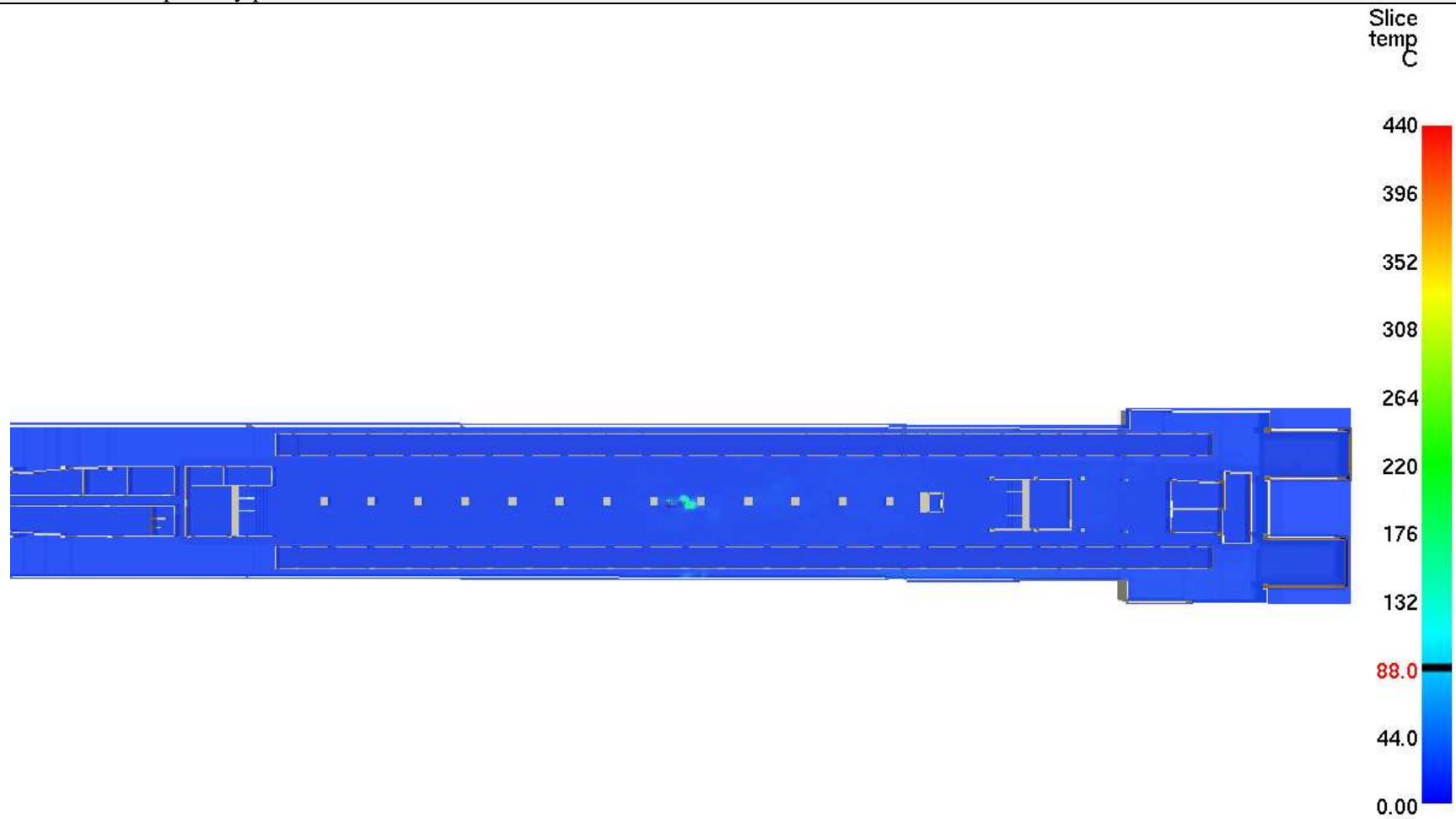
Scenariusz nr 1 – rozkład temperatury po 1200 sekundach



Time: 1200.0



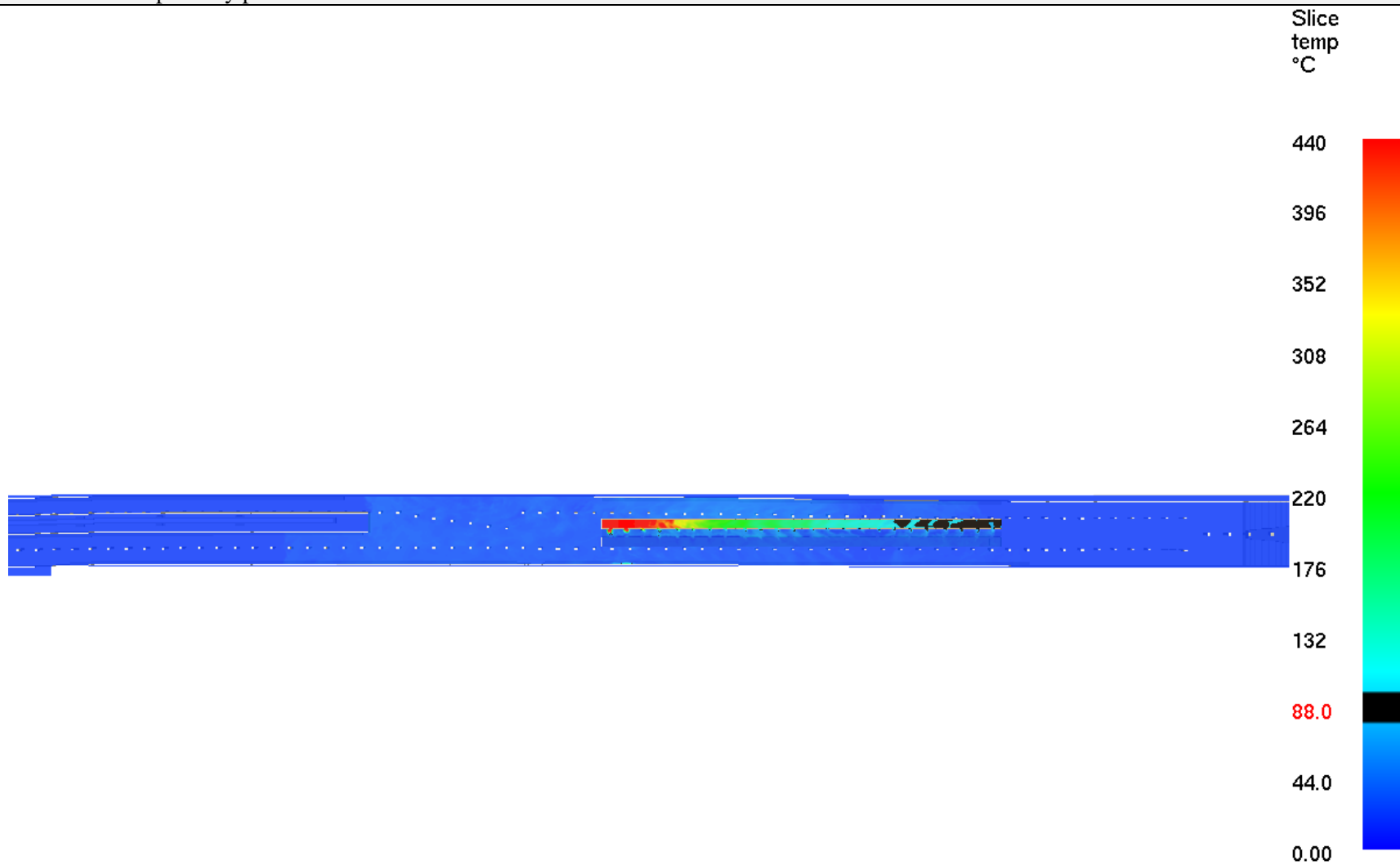
Scenariusz nr 2 – rozkład temperatury po 1200 sekundach



Time: 1200.0

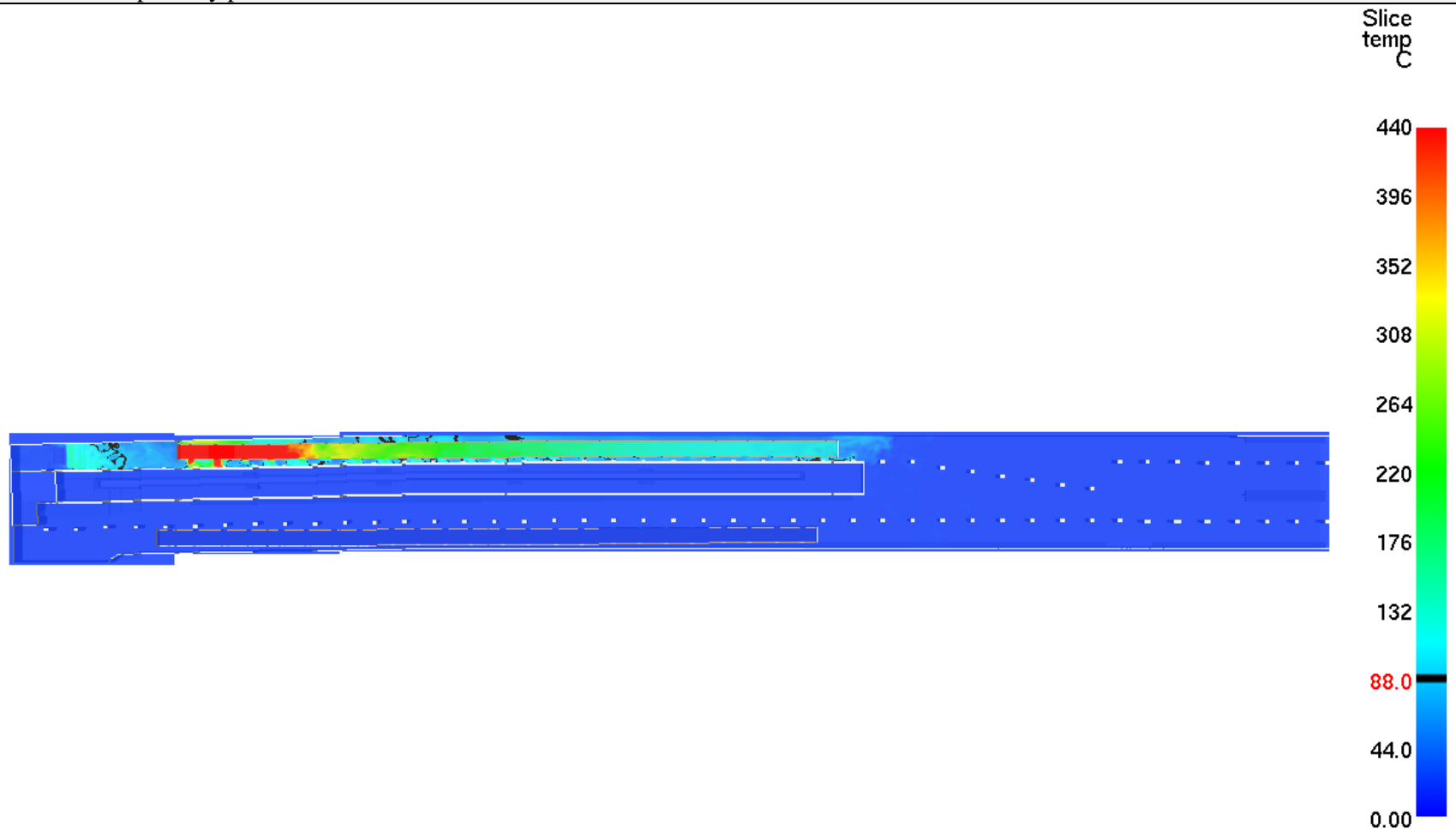


Scenariusz nr 3 – rozkład temperatury po 1200 sekundach



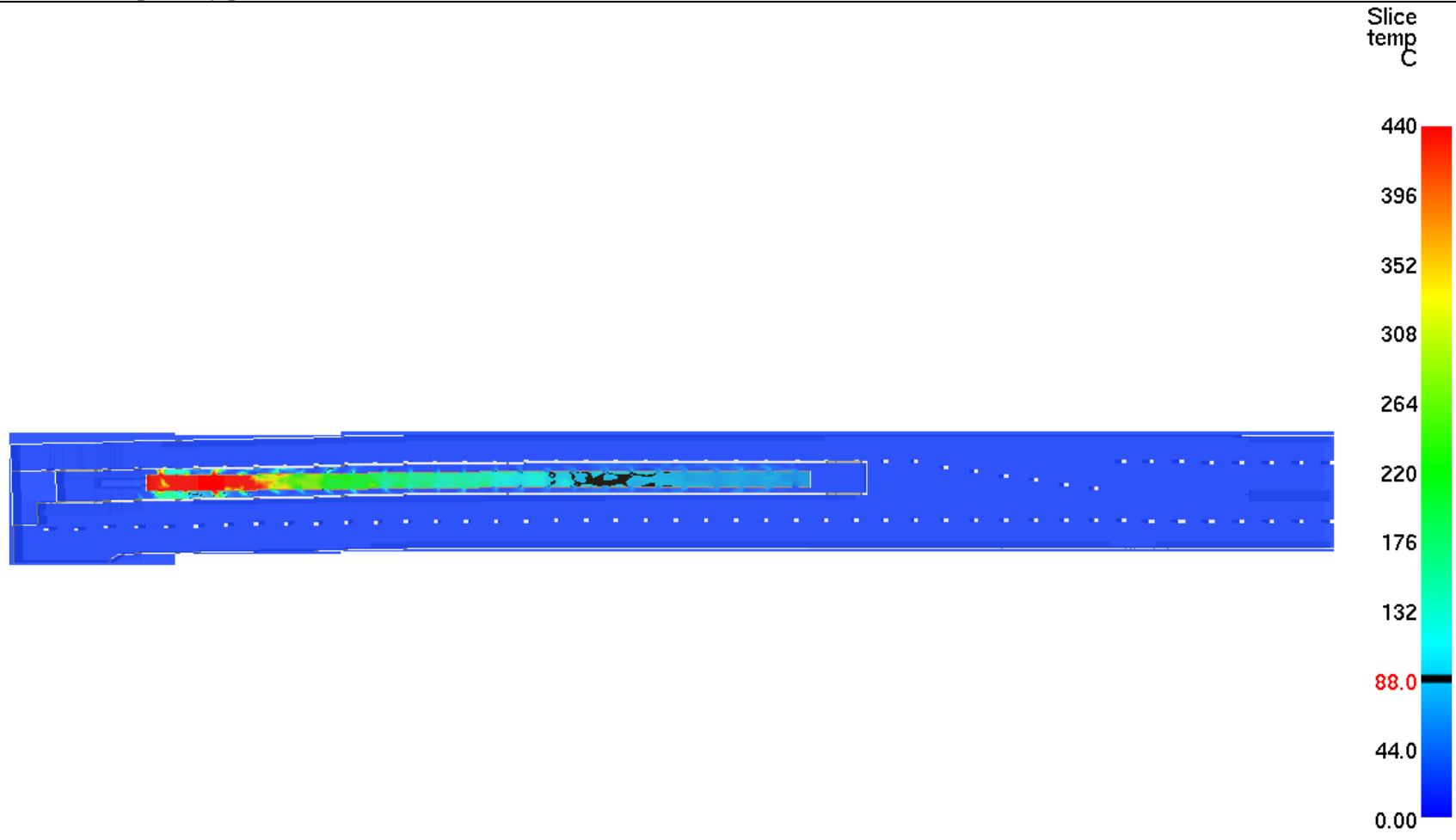
Time: 1200.0

Scenariusz nr 4 – rozkład temperatury po 1200 sekundach



Time: 1190.0

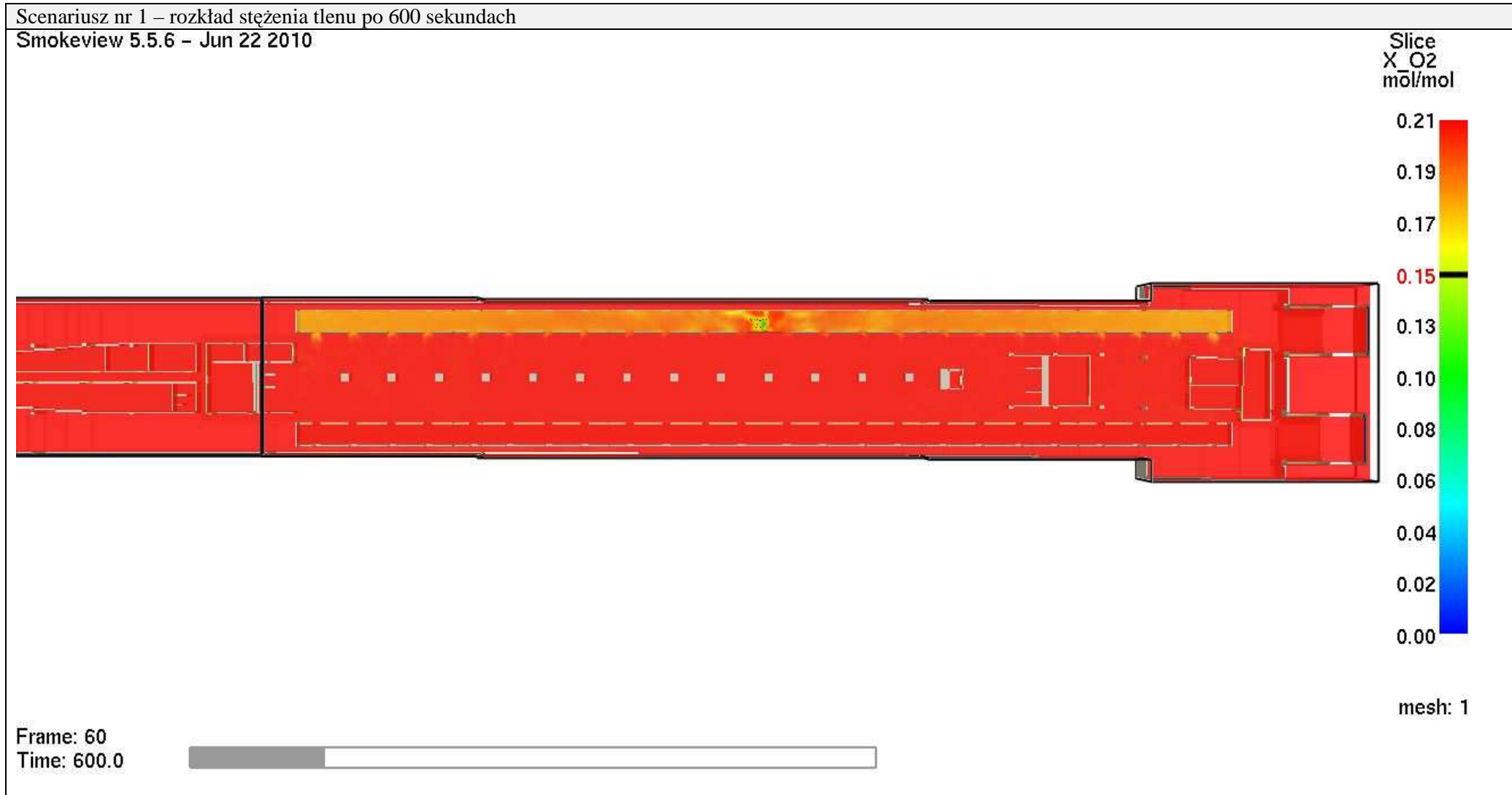
Scenariusz nr 5 – rozkład temperatury po 1200 sekundach



Time: 1190.0

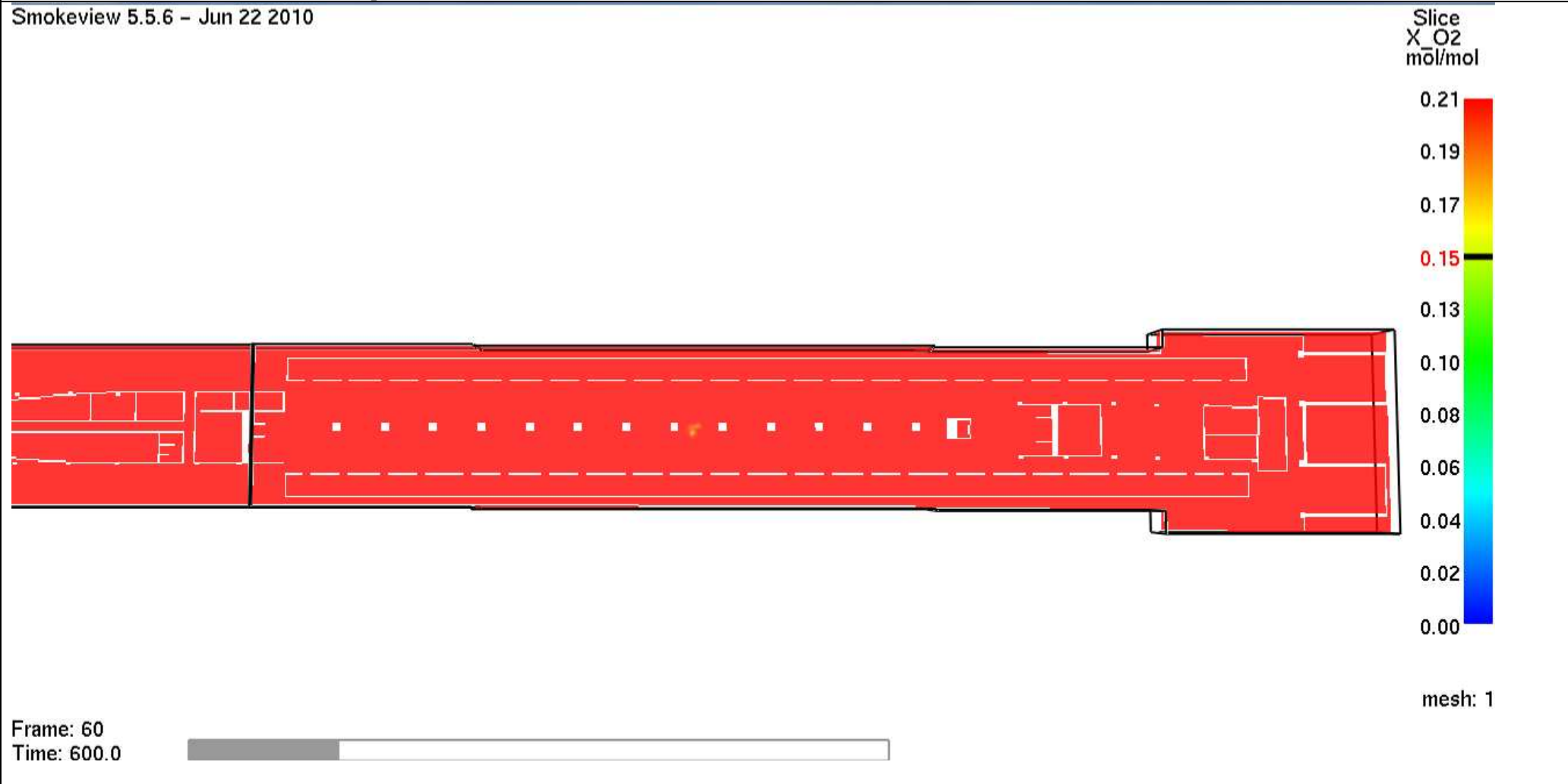


### 6.1.5. ZAWARTOŚĆ TLENU NA WYSOKOŚCI 1.8 M W CZASIE EWAKUACJI

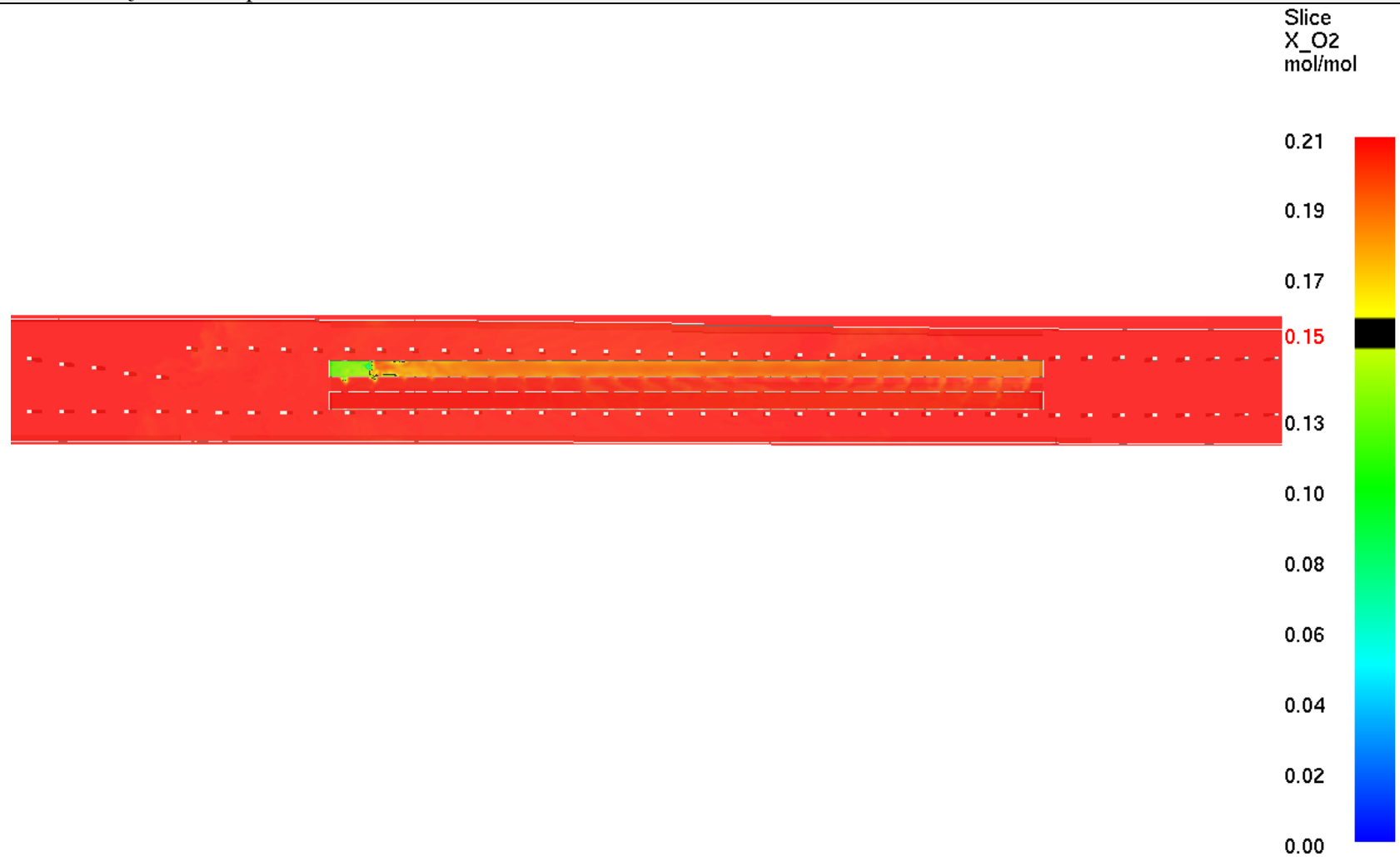


Scenariusz nr 2 – rozkład stężenia tlenu po 600 sekundach

Smokeview 5.5.6 – Jun 22 2010



Scenariusz nr 3 – rozkład stężenia tlenu po 600 sekundach



Time: 600.0



Scenariusz nr 4 – rozkład stężenia tlenu po 600 sekundach

Smokeview 5.5.6 – Jun 22 2010

Slice  
X\_O2  
mol/mol

0.21

0.19

0.17

0.15

0.13

0.10

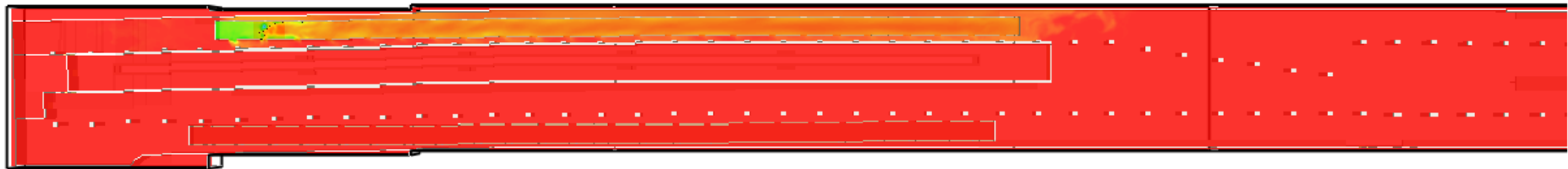
0.08

0.06

0.04

0.02

0.00



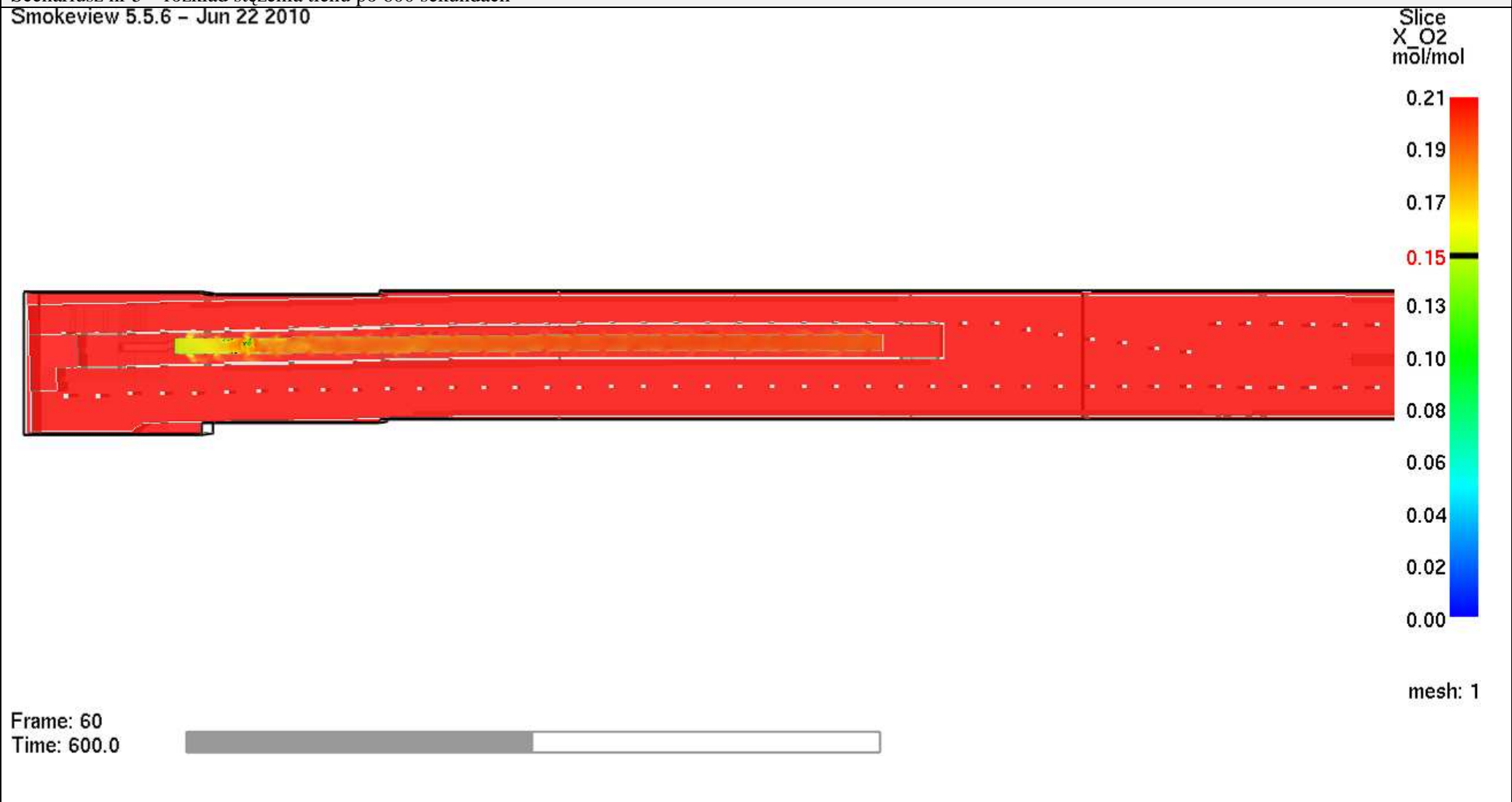
mesh: 1

Frame: 60  
Time: 600.0



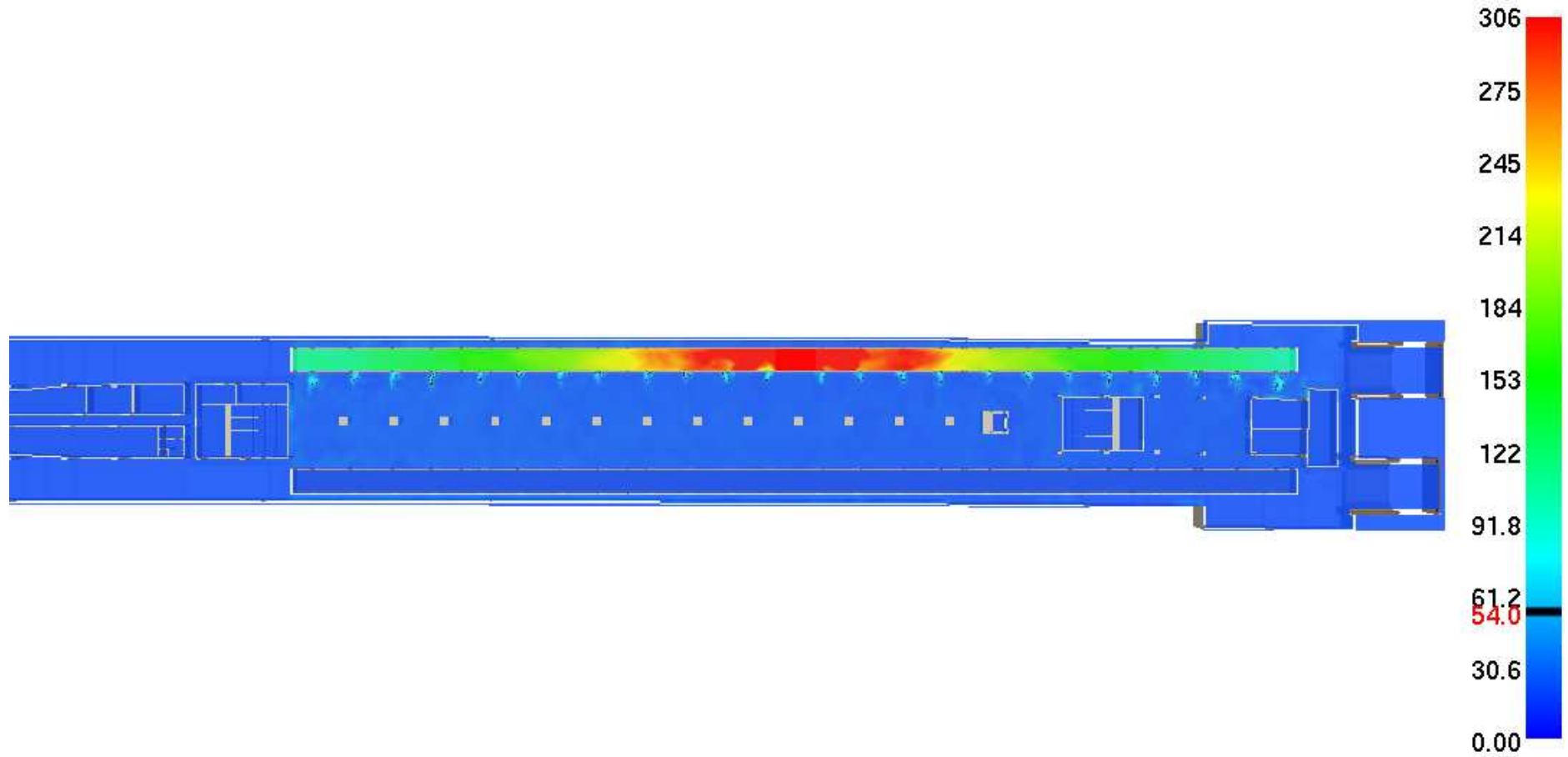


Scenariusz nr 5 – rozkład stężenia tlenu po 600 sekundach  
Smokeview 5.5.6 – Jun 22 2010



### 6.1.6. TEMPERATURA NA WYSOKOŚCI 2.5 M W CZASIE EWAKUACJI

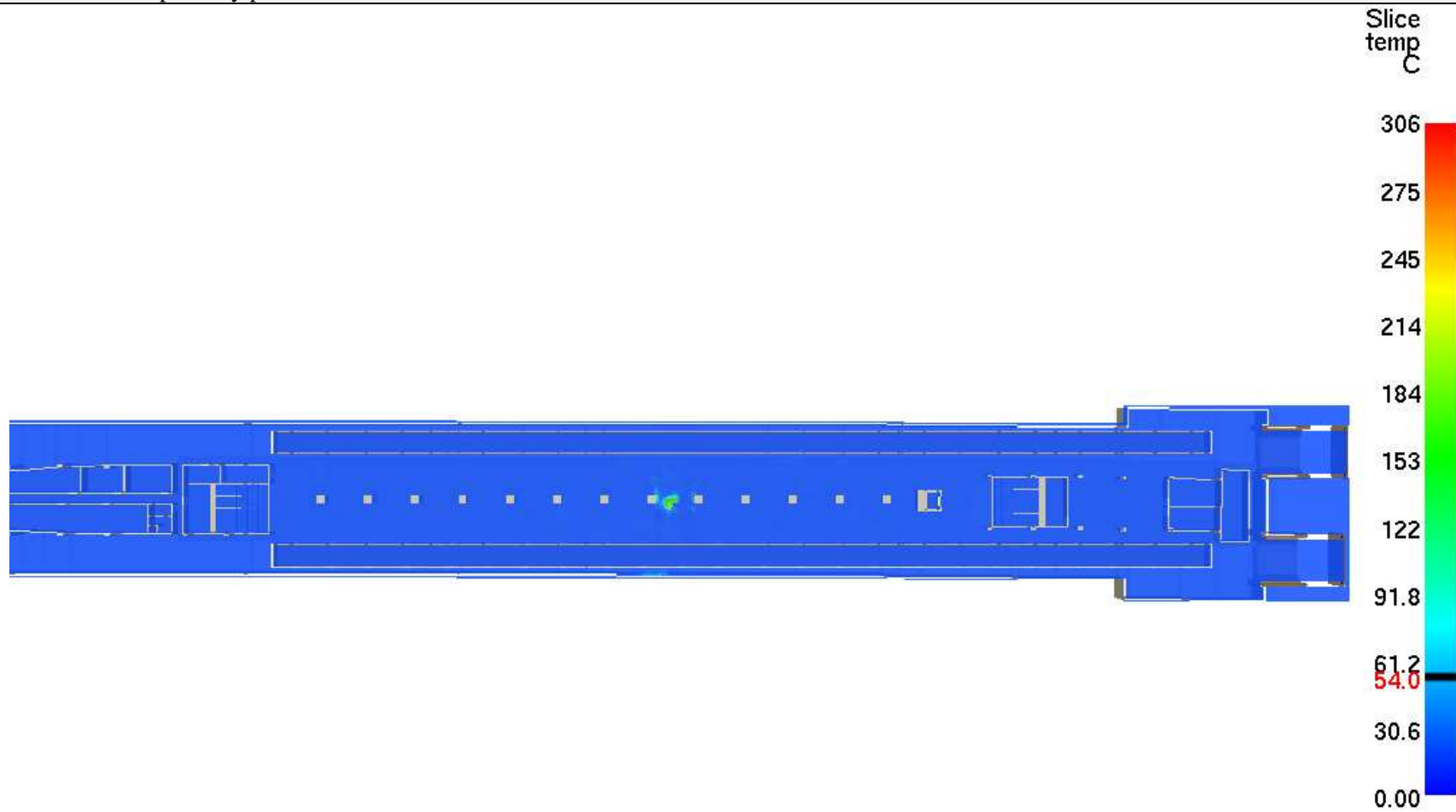
Scenariusz nr 1 – rozkład temperatury po 600 sekundach



Time: 600.0



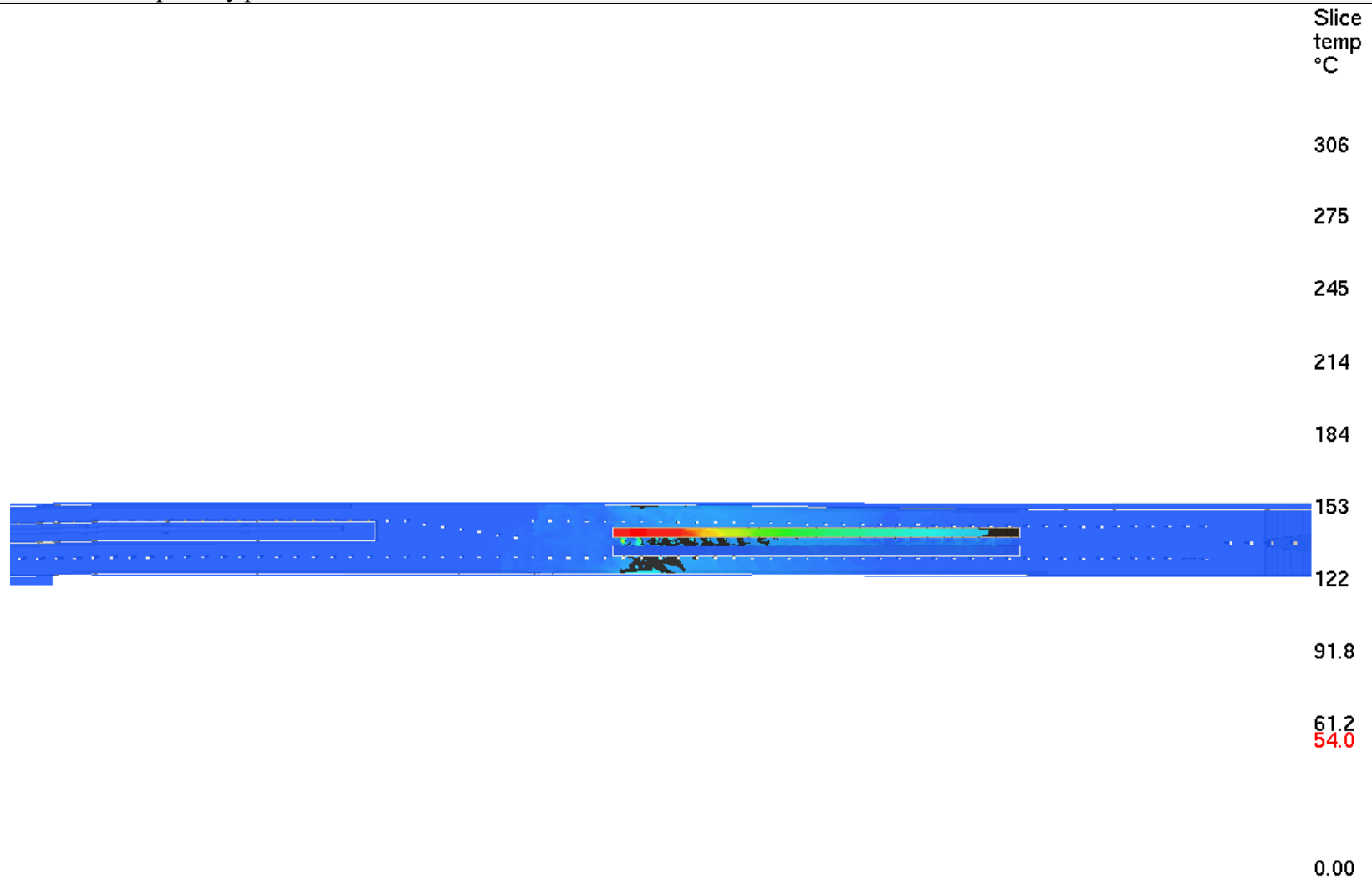
Scenariusz nr 2 – rozkład temperatury po 600 sekundach



Time: 600.0



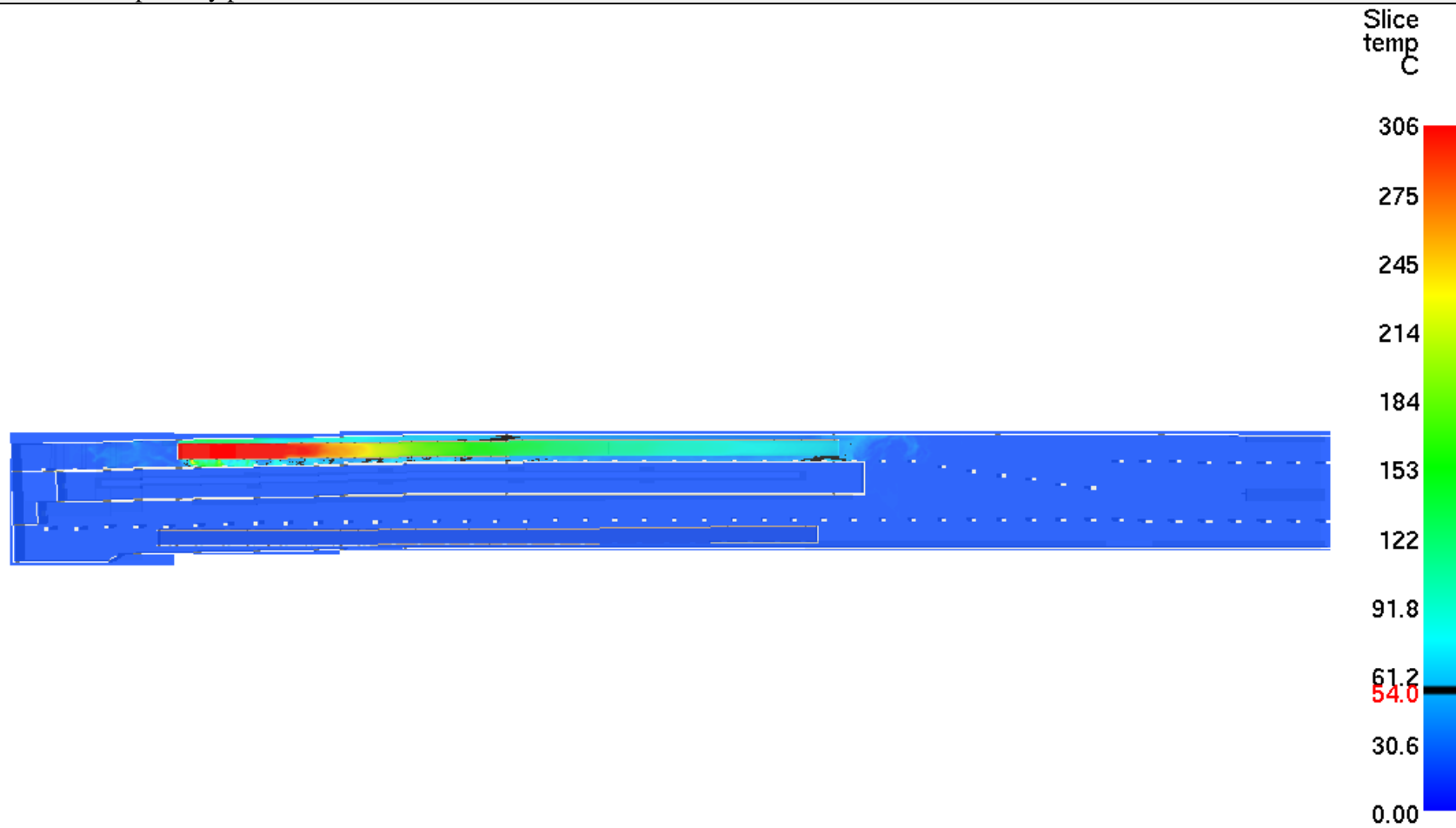
Scenariusz nr 3 – rozkład temperatury po 600 sekundach



Time: 600.0



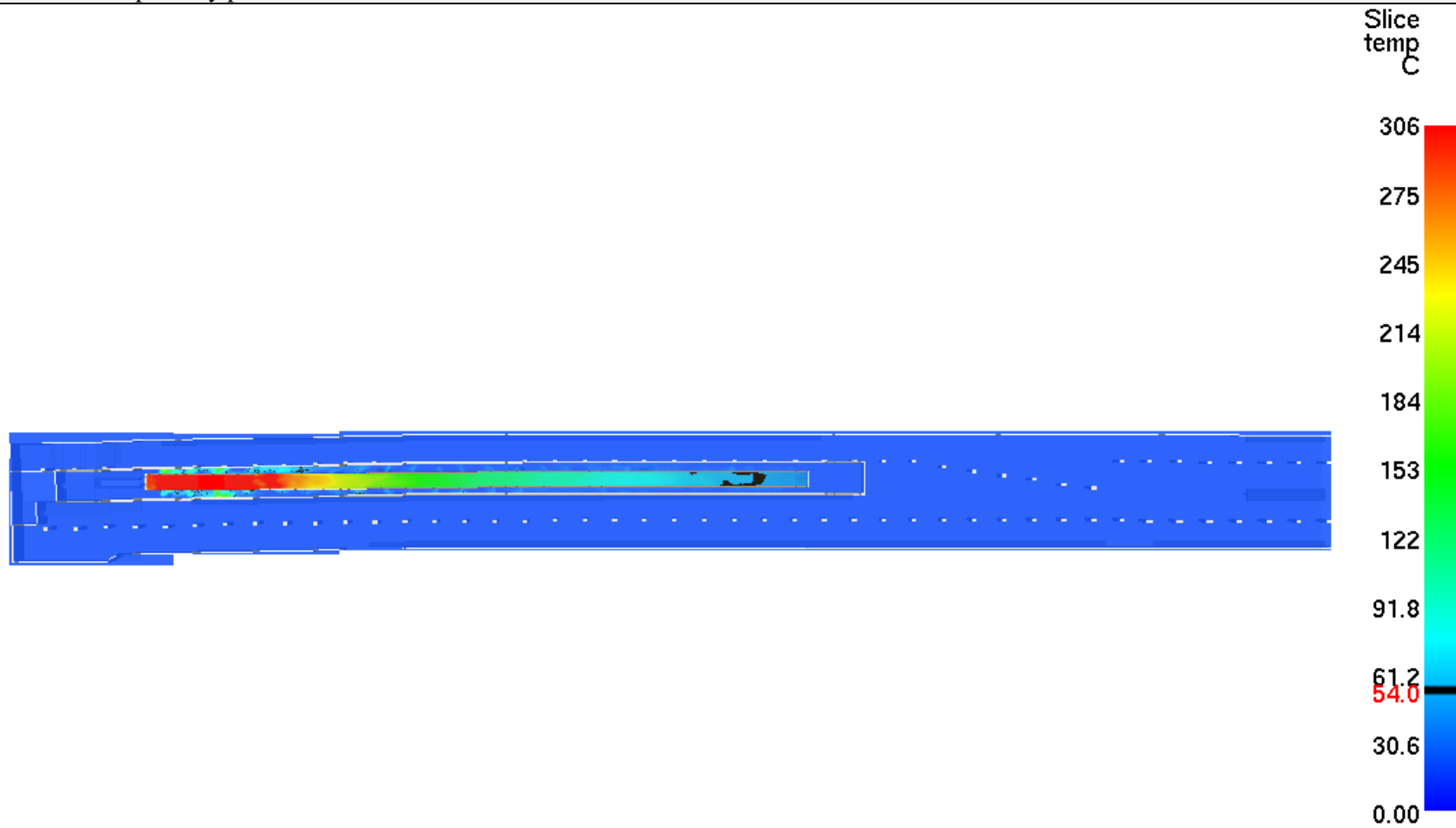
Scenariusz nr 4 – rozkład temperatury po 600 sekundach



Time: 600.0



Scenariusz nr 5 – rozkład temperatury po 600 sekundach



Time: 600.0



### 6.1.7. GĘSTOŚĆ STRUMIENIA PROMIENIOWANIA CIEPLNEGO

Gęstość strumienia promieniowania cieplnego nie przekroczyła wartości krytycznych w odległości większej niż 10 m od źródła pożaru w żadnym ze scenariuszy.

### 6.1.8. OKREŚLENIE WYMAGANEJ KLASY TEMPERATUROWEJ WENTYLATORÓW WYCIĄGOWYCH

Średnie temperatury gazów pożarowych wprowadzanych do kanałów wyciągowych zależą od objętości powietrza usuwanego przez wentylatory oraz maksymalnej konwekcyjnej mocy pożaru, zgodnie z poniższymi wzorami [10]:

$$M = \frac{V\rho T_0}{T} \quad T = T_0 + \frac{Q}{M \cdot C_{pow}}$$

V – objętość usuwanych gazów pożarowych [m<sup>3</sup>]

Q – moc konwekcyjna [kW]

T<sub>0</sub> – początkowa temperatura danej objętości powietrza [°C]

T – temperatura usuwanej masy gazów pożarowych [°C]

C<sub>pow</sub> – ciepło właściwe powietrza = 1,01 [J/kg · °C]

M – masa usuwanych gazów pożarowych [kg]

ρ – gęstość powietrza w danej temperaturze [kg/m<sup>3</sup>]

Masa usuwanego powietrza i jego temperatura są ze sobą związane. Z uwagi na powyższe do ich jednoczesnego obliczenia wykorzystano iteracyjną metodę kolejnych przybliżeń, przyjmując w pierwszym kroku gęstość i temperaturę chłodnego powietrza. W każdym kolejnym kroku stopniowo korygowano wyniki do otrzymania dwóch kolejnych różniących się maksymalnie o 1%.

Wyniki przedstawiono, jako kolejne iteracje dla maksymalnej mocy konwekcyjnej 4,1 MW (moc jaką osiąga pożar po 660 sekundach) i objętości 44,5 m<sup>3</sup>/s powietrza oraz gazów pożarowych usuwanych przez wentylatory wyciągowe działające na pierwszym poziomie wentylacji awaryjnej. W przypadku drugiego poziomu rozpatrzono moc konwekcyjną 12 MW i objętość 122 m<sup>3</sup>/s.

Tabela 7. Wartości temperatury usuwanej masy gazów pożarowych dla pierwszego poziomu wentylacji awaryjnej

<b>Temperatura usuwanych gazów pożarowych [°C]</b>	<b>Masa usuwanego powietrza [kg]</b>
20.0	53.3
95.8	42.4
115.4	40.2
120.5	39.7
121.8	39.6
122.2	39.5
122.3	39.5
122.3	39.5

Tabela 8. Wartości temperatury usuwanej masy gazów pożarowych dla drugiego poziomu wentylacji awaryjnej

<b>Temperatura usuwanych gazów pożarowych [°C]</b>	<b>Masa usuwanego powietrza [kg]</b>
20.0	146.7
101.0	114.9
123.4	108.4
129.6	106.7
131.3	106.3
131.8	106.2
131.9	106.1
131.9	106.1

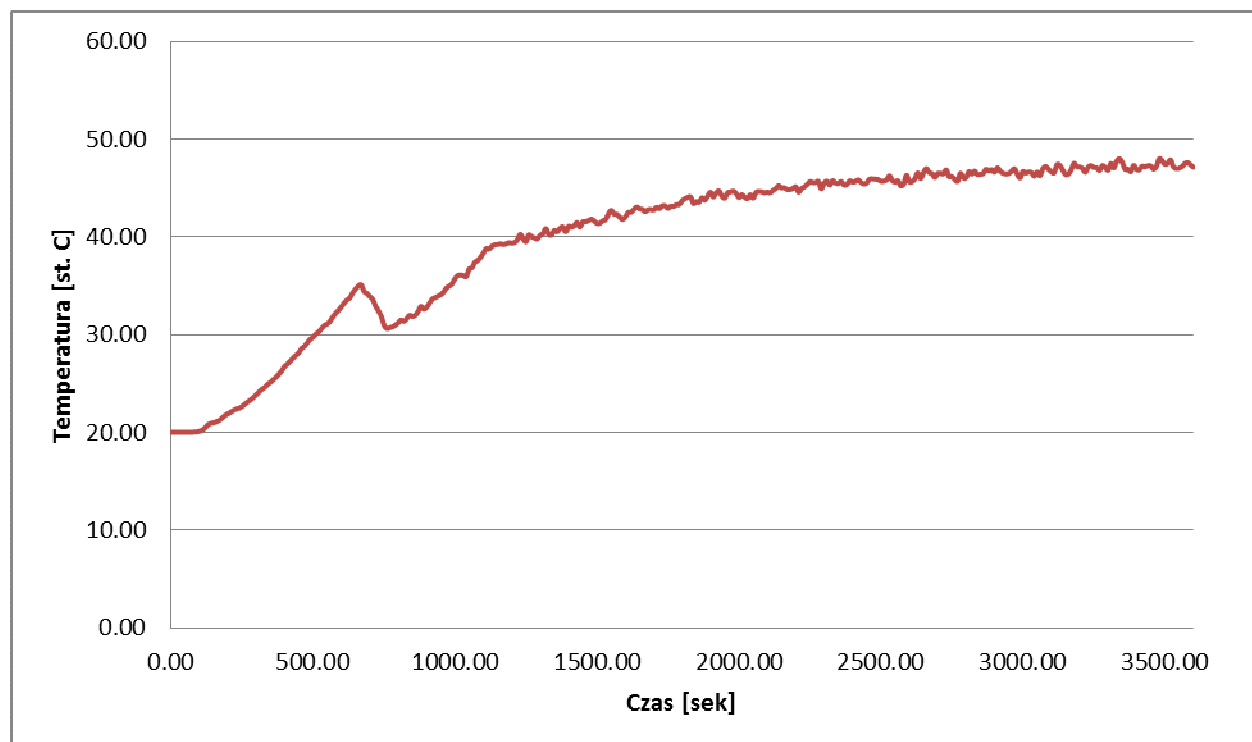
Dodatkowo przy użyciu punktów pomiarowych oszacowano maksymalną oraz średnią temperaturę gazów pożarowych wpływających do krat wyciągowych wentylatorni stacyjnej.

Maksymalna temperatura wyniosła 95 st. C (po uwzględnieniu współczynnika niepewności) w 3 580 sekundzie.

Faktyczny wpływ temperatury warstwy dymu na wentylatory wyciągowe można określić poprzez uśrednienie temperatury gazów pożarowych wprowadzanych do kanału przez wszystkie kratki wyciągowe. Gorący dym w kanale wentylacyjnym ulega mieszaniu z chłodniejszym powietrzem zasysanym przez kratki wyciągowe znajdujące się w znacznej odległości od pożaru, w wyniku czego rzeczywista temperatura oddziałująca na wentylator



wyciągowy będzie niższa od przedstawionej powyżej temperatury maksymalnej. Na wykresach przedstawiono uśrednione temperatury wpływające do wszystkich krutek wentylacyjnych. Maksymalna średnia temperatura nie przekroczyła 50 st. C.



## 7. WNIOSKI

Na podstawie otrzymanych wyników symulacji komputerowych należy stwierdzić, że proponowany system wentylacji pożarowej zapewni usuwanie dymu z wydajnością wystarczającą dla nieprzekroczenia krytycznych warunków ewakuacji przez czas obliczeniowy we wszystkich analizowanych scenariuszach. Przez większość czasu ewakuacji istnieje dobry dostęp do obydwu klatek ewakuacyjnych. Temperatura krytyczna przekroczona jest jedynie w bezpośrednim sąsiedztwie pożaru przez cały czas ewakuacji. Zasięg widzialności nieznacznie spada jedynie na niewielkim obszarze poziomu peronu. Ponadto stężenie tlenu poniżej 15% spada jedynie wewnątrz płonącego składu metra.

Analiza wykazała, iż system wentylacji oddymiającej umożliwi dostęp ekip ratowniczych w wymaganym czasie 20 minut dzięki zapewnieniu w odległości 10 metrów od pożaru temperatury poniżej 100°C. Niebezpieczna temperatura oraz promieniowanie występuje jedynie wewnątrz pociągu objętego pożarem.

Na podstawie obliczeń wydajności wentylacji stwierdzono, że w przypadku pożaru projektowego, tj. 15 MW temperatura wyciąganych gazów pożarowych nie przekroczy 400°C, dlatego też dopuszcza się zastosowanie wentylatorów w klasie F<sub>400</sub>.

Podsumowując, symulacje komputerowe wykazały, iż wszystkie poniższe parametry krytyczne nie są przekroczone, tj.:

- a) temperatura powietrza powyżej 60 st. C na wysokości równej 1,8 m od poziomemu drogi ewakuacyjnej;
- b) gęstość strumienia promieniowania cieplnego o wartości powyżej 2,5 kW/m<sup>2</sup> przez czas dłuższy niż 30 s;
- c) temperatura gorących gazów pożarowych powyżej 200 st. C na wysokości ponad 2,5 m od poziomemu drogi ewakuacyjnej;
- d) zasięg widzialności mniejszy niż 10 m na wysokości 1,8 m od poziomemu drogi ewakuacyjnej;
- e) zawartość tlenu poniżej 15% na wysokości 1,8 m od poziomemu drogi ewakuacyjnej;
- f) temperatura gazów pożarowych powyżej 100 st. C na wysokości 1,8 m od poziomemu drogi ewakuacyjnej.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- [1] Health and Safety Laboratory: Gobeau N., Ledin H.S, Lea C.J. Guidance for HSE Inspectors: Smoke movement in complex enclosed spaces - Assessment of Computational Fluid Dynamics. HSL, 2002.
- [2] K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, R. McDermott. NIST Special Publication 1019-5. Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide. 2010.
- [3] K. McGrattan, R. McDermott, S. Hostikka, J. Floyd., NIST Special Publication 1018-5. Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide. Volume 3: Validation. 2010.
- [4] Komenda Główna Państwowej Straży Pożarnej, Biuro Rozpoznawania Zagrożeń. Procedury organizacyjno-techniczne w sprawie spełnienia wymagań w zakresie bezpieczeństwa pożarowego w inny sposób niż określono to w przepisach techniczno-budowlanych. 10.2008.
- [5] NUREG 1824, United States Nuclear Regulatory Commission. Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant applications, Volume 6 Fire Dynamics Simulator. 2007.
- [6] PN-EN ISO 6946. Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania.
- [7] SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition. 2002.
- [8] NFPA 130 Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems 2010 Edition
- [9] Foster J. A., Roberts G. V.: Research Report Number 61/1994: „Measurements of the Firefighting Environment”.
- [10] PD 7346-4:2003 Components for smoke and heat control systems – Part 4: Functional recommendations and calculation methods for smoke and heat exhaust ventilation systems, employing steady-state design fires – Code of practice.
- [11] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie z dnia 12 kwietnia 2002 r. (Dz.U. Nr 75, poz. 690) z późn. zm.
- [12] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 17 czerwca 2011 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać obiekty budowlane metra i ich usytuowanie (Dz.U. 2011 nr 144 poz. 859).