

# Projekt: Fungal Growth Simulation

Realizacja projektu

Autorzy projektu

Joanna Wójcicka, Jakub Rakuś, Konrad Reczko

Opiekun projektu

Dr inż. MARCIN PIEKARCZYK



EAIIIB / Katedra Informatyki Stosowanej  
Akademia Górnictwo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie  
Kraków, Polska

22 stycznia 2024 r

# Spis treści

<b>1 Cel i zakres projektu</b>	<b>3</b>
1.1 Cel projektu . . . . .	3
1.1.1 Cele szczegółowe . . . . .	3
1.2 Oczekiwane rezultaty . . . . .	3
<b>2 Charakterystyka problemu</b>	<b>4</b>
2.1 Omówienie analizowanych prac . . . . .	4
2.1.1 Competition, succession and pattern in fungal communities: towards a cellular automaton model [JHJHMP94] . . . . .	4
2.1.2 Modelling fungus dispersal scenarios using cellular automata [IERCPWA12] . . . . .	4
2.1.3 A lattice-based system for modeling fungal mycelial growth in complex environments [HMPP18] . . . . .	5
2.1.4 The Development of Fungal Networks in Complex Environments [GHK <sup>+</sup> 06] . . . . .	6
2.2 Prace stanowiące główną inspirację . . . . .	7
<b>3 Dane porównawcze</b>	<b>8</b>
<b>4 Model formalny</b>	<b>9</b>
4.1 Architektura siatki . . . . .	9
4.2 Implementacja zachowania komórek . . . . .	10
4.3 Parametry rozrostu . . . . .	11
<b>5 Realizacja praktyczna</b>	<b>12</b>
5.1 Założenia projektowe . . . . .	12
5.2 Oprogramowanie . . . . .	12
5.3 Szczegóły implementacji . . . . .	12
5.3.1 Implementacja symulacji . . . . .	12
5.3.2 Implementacja wizualizacji . . . . .	14
5.3.3 Implementacja narzędzi pomocniczych i integracja wizualizacji z symulacją . . . . .	15
<b>6 Rezultaty symulacji</b>	<b>16</b>
6.1 Niewielkie złoża surowca o małej koncentracji . . . . .	16
6.2 Niewielkie złoża surowca o średniej koncentracji . . . . .	19
6.3 Ogromne złoża o bardzo niskiej koncentracji surowca . . . . .	20
6.4 Najmniejsze złoża o wysokiej koncentracji . . . . .	23
<b>7 Dyskusja wyników</b>	<b>25</b>
<b>8 Podsumowanie</b>	<b>26</b>

# 1 Cel i zakres projektu

## 1.1 Cel projektu

Projekt ma na celu stworzenie symulacji rozwoju grzybni, wykorzystując model automatu komórkowego. Głównym celem jest badanie dynamicznego rozwoju struktury grzybni w zróżnicowanych warunkach środowiskowych. Projekt skupia się na rozwiązyaniu problemu zasymulowania bardzo skomplikowanego organizmu używając stosunkowo prostych zasad. Jednym z kluczowych zadań jest znalezienie modelu, który pomimo ograniczeń automatu komórkowego pozwoli zaobserwować zachowania odzwierciedlające analogiczne procesy zachodzące w środowisku naturalnym.

### 1.1.1 Cele szczegółowe

1. Opracowanie matematycznego modelu opisującego procesy wzrostu i rozwoju grzybni, uwzględniającego wpływ różnych czynników środowiskowych.
2. Implementacja modelu w postaci automatu komórkowego, umożliwiającego dynamiczną symulację rozwoju grzybni.
3. Weryfikacja i kalibracja modelu na podstawie istniejących badań dotyczących wzrostu grzybni oraz własnych obserwacji.

## 1.2 Oczekiwane rezultaty

Oczekiwanym rezultatem projektu jest stworzenie intuicyjnego i efektywnego programu symulacyjnego, który umożliwi szybkie oraz łatwe przedstawienie zachowania grzybni w zróżnicowanych środowiskach. Program ten powinien charakteryzować się kilkoma kluczowymi cechami:

- **Interfejs Graficzny:** Stworzenie intuicyjnego interfejsu graficznego, który pozwoli użytkownikowi obserwować rezultaty w czasie rzeczywistym jak i bezpośrednio na nie wpływać (poprzez np. dodanie przeszkody). Przejrzysty interfejs pozwoli na szybkie zrozumienie wpływu różnych czynników na rozwój grzybni.
- **Wizualizacja Dynamicznego Rozwoju Grzybni:** Skoncentrowanie się na atrakcyjnej wizualizacji procesu rozwoju grzybni, uwzględniającej przejrzyste tekstury, które w oczywisty sposób sugerują co symbolizuje dana komórka. To pozwoli użytkownikowi śledzić i analizować dynamikę rozwoju grzybni w czasie rzeczywistym.
- **Szybkość i Efektywność:** Optymalizacja programu pod kątem szybkości działania, aby umożliwić przeprowadzanie symulacji w krótkim czasie. Efektywność jest kluczowa dla umożliwienia użytkownikowi eksploracji różnych warunków środowiskowych i ich wpływu na grzybnię.

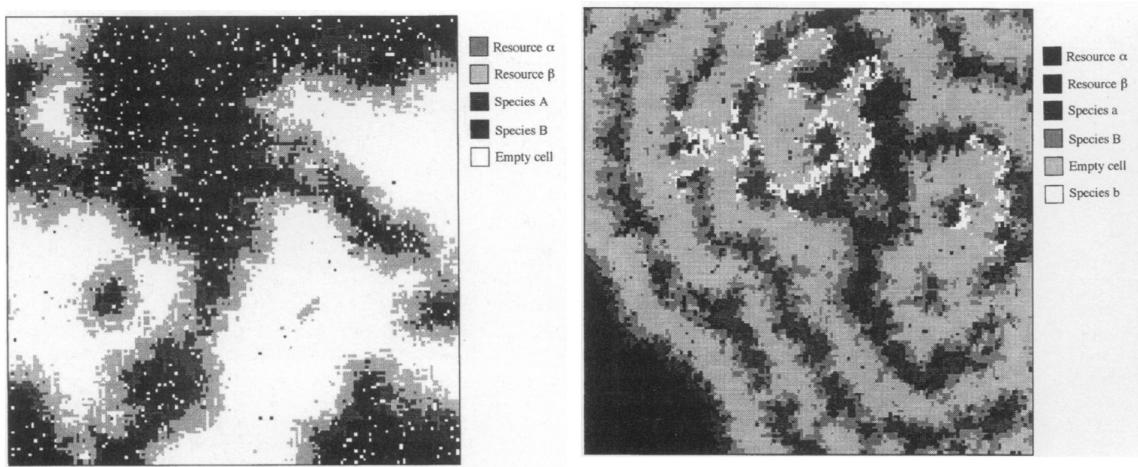
## 2 Charakterystyka problemu

Ze względu na złożoność problemu w literaturze można spotkać się z różnymi podejściami, które oprócz odmiennych sposobów modelowania problemu różnią się też zakresem symulacji. Niektóre modele skupiają się na samym procesie rozwoju pojedynczego gatunku w danym środowisku [GHK<sup>+</sup>06], gdy inne skupiają się na konkurencji międzygatunkowej [JHJHMP94] i uwzględniają dodatkowe aspekty (np. choroby) [IERCPWA12].

### 2.1 Omówienie analizowanych prac

#### 2.1.1 Competition, succession and pattern in fungal communities: towards a cellular automaton model [JHJHMP94]

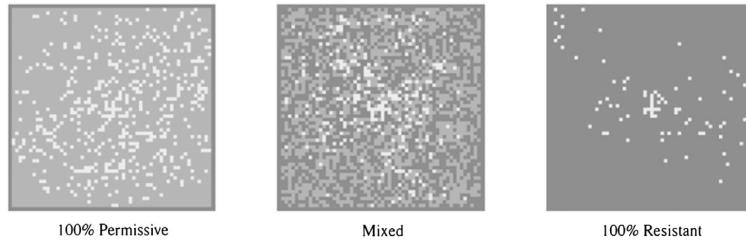
- Dwuwymiarowa siatka. Komórki w siatce zmieniają stany dyskretnie zgodnie ze stałym i jednolitym zestawem reguł, które uwzględniają stany komórek i ich wzajemne interakcje.
- W tym modelu stan komórki nie zależy wyłącznie od niej samej i jej bezpośrednich sąsiadów. Zależy również od stanów komórek znajdujących się w obrębie dystansu eksploracyjnego mycelium.
- Pokazana jest konkurencja gatunkowa jak na rysunku (Rys. 1)



Rysunek 1: Wizualizacja walki o surowce [JHJHMP94].

#### 2.1.2 Modelling fungus dispersal scenarios using cellular automata [IERCPWA12]

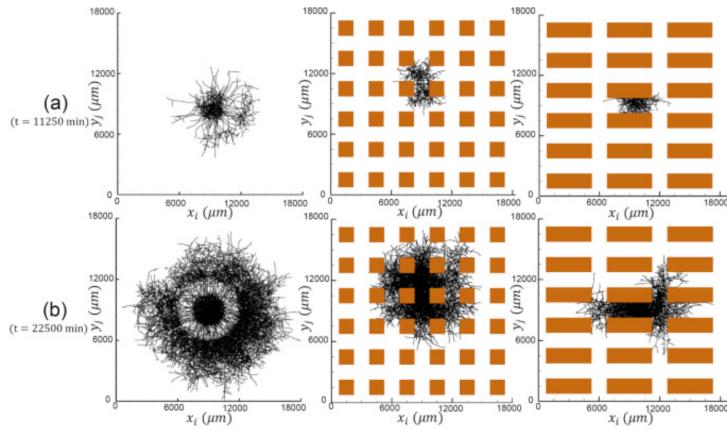
- Skończona, dwuwymiarowa siatka kwadratowa o liniowym wymiarze.
- Ukryte automaty reprezentują zainfekowane hosty (lub skolonizowany substrat) w fazie wzrostu wegetatywnego.
- Model uwzględnia sezonowość.
- Do oceny wpływu proporcji odpornych hostów na kontrolę choroby rozważono trzy scenariusze: siatka z wyłącznie podatnymi hostami, siatka z pięćdziesięcioma procentami podatnych i pozostałymi odpornymi oraz siatka tylko z odpornymi hostami widoczne na rysunku (Rys. 2).



Rysunek 2: Wizualizacja rozprzestrzenienia choroby w zależności od odporności [IERCPWA12].

### 2.1.3 A lattice-based system for modeling fungal mycelial growth in complex environments [HMPP18]

- Model sieci mycelialnej na bazie siatki krystalicznej w sposób dyskretny.
- Algorytm ekstensji wierzchołków mycelium eliminujący ograniczenia siatkowe.
- Modelowanie wzrostu mycelium w mediach porowatych z zastosowaniem tigmotropizmu.
- Uwzględnienie tropizmu (Rys. 4) (reakcja ruchowa na bodźce zewnętrzne) roślin w odpowiedzi na przeszkody jak na rysunku (Rys. 3).



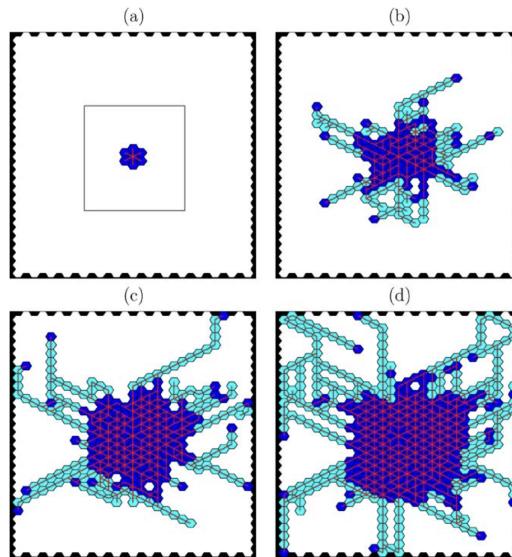
Rysunek 3: Wizualizacja rozprzestrzenienia w środowisku z przeszkodami [HMPP18].

Growth Behavior	Growth Pattern	Growth Behavior	Parameter	Effect (Growth Pattern During $\Delta t$ )	
				①*	②*
Hyphal elongation		Hyphal elongation	$R$		
Lateral branching		Lateral branching	$P_{br}^{lat}$		
Apical branching		Apical branching	$P_{br}^{api}$		
Anastomosis		Anastomosis	$P_{anas}$		
Tropism		Tropism	$\ \vec{T}\ , v$		
Obstacle		Obstacle	$c_s, v$		

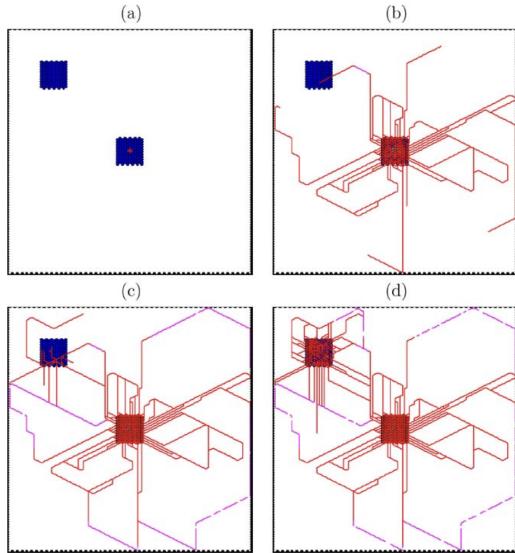
Rysunek 4: Tablica możliwych zachowań w kroku czasowym [HMPP18].

#### 2.1.4 The Development of Fungal Networks in Complex Environments [GHK<sup>+</sup>06]

- Model odnosi się do modelu komputerowego, w którym połączenia (lub "wiązania") między elementami (reprezentującymi na przykład strzępki lub punkty mycelium) są ułożone w heksagonalnym wzorze.
- Samo mycelium modelowane jest przy użyciu siatki trójkątnej osadzonej w sześciokątnej siatce używanej do modelowania rozmieszczenia substratu.
- Translokacja i pobór substratu modelowany za pomocą procesu deterministycznego.



Rysunek 5: Wizualizacja rozrostu na siatce heksagonalnej oraz wewnętrznej struktury [GHK<sup>+</sup>06].



Rysunek 6: Symulacja procesu poszukiwania zasobów [GHK<sup>+</sup>06].

Zidentyfikowano dwa odrębne fazy wzrostu; eksploracja i eksploatacja, widoczne na rysunku (Rys. 6):

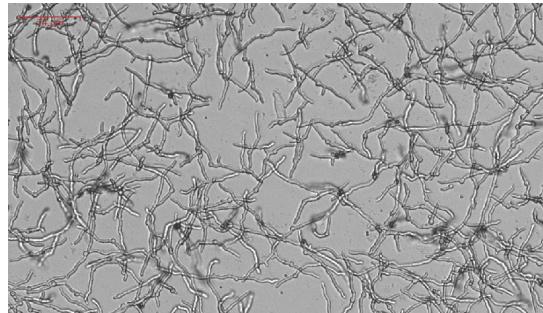
- Faza eksploracji odnosi się do okresu, w którym mycelium aktywnie poszukuje nowych obszarów i źródeł pożywienia, rozprzestrzeniając się w przestrzeni.
- Faza eksploatacji to etap, w którym mycelium koncentruje się na intensywnym wykorzystywaniu dostępnych już zasobów.

## 2.2 Prace stanowiące główną inspirację

Główną inspirację rozwiązań stanowią dwie prace: *The Development of Fungal Networks in Complex Environments* [GHK<sup>+</sup>06], oraz *A lattice-based system for modeling fungal mycelial growth in complex environment* [HMPP18]. Podobnie jak w pracy [GHK<sup>+</sup>06] proponowany model będzie bazował na modelu probabilistycznym na siatce heksagonalnej.

### 3 Dane porównawcze

W związku z tym, że symulowane zagadnienie jest zjawiskiem występującym w naturze, dane porównawcze są łatwe do pozyskania. Podczas walidacji modelu wykorzystywane były obrazy środowisk występujących w naturalnych środowiskach (Rys. 7). Model był również porównywany do rezultatów pracy [GHK<sup>+</sup>06] widocznych na obrazkach 5 oraz 6



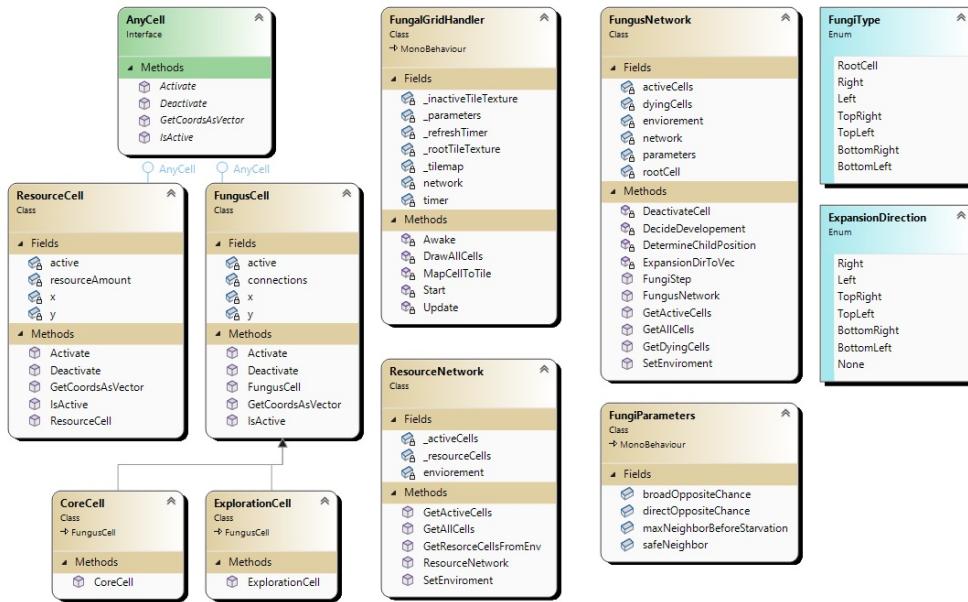
Rysunek 7: Grzybnia pod mikroskopem

## 4 Model formalny

### 4.1 Architektura siatki

Zaimplementowane zostaną dwie siatki heksagonalne (Rys. 8) - jedna dla rozrastających się komórek grzybni i druga dla surowców. Dzięki temu, że Unity generuje scenę w 3D, będzie odpowiednio można ustawić te siatki względem siebie na płaszczyźnie. Unity dba również o wielkość siatki i dopasowuje jej rozmiar dynamicznie w zależności od aktualnych potrzeb. Podział wygląda następująco:

- FungusNetwork - pełna logika rozrostu grzybni.
- ResourceNetwork - generowanie surowców i logika ich wykorzystania przez komórki grzybni. Każda komórka surowca ma w sobie daną wartość liczbową, która zostaje zmniejszana za każdym razem kiedy komórka grzybni pobiera pożywienie. W momencie, kiedy wartość ta spada poniżej zera, komórka jest dezaktywowana.

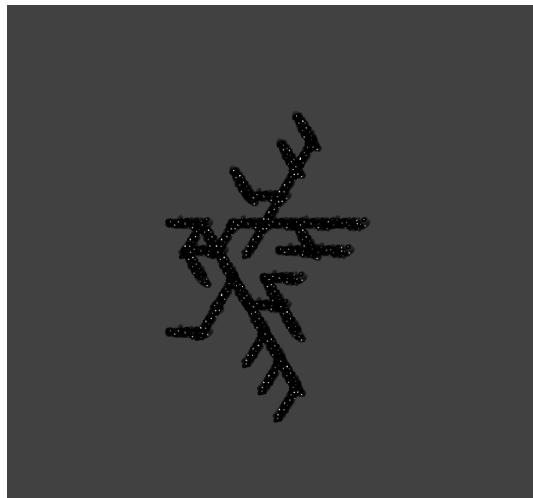


Rysunek 8: Architektura siatki.

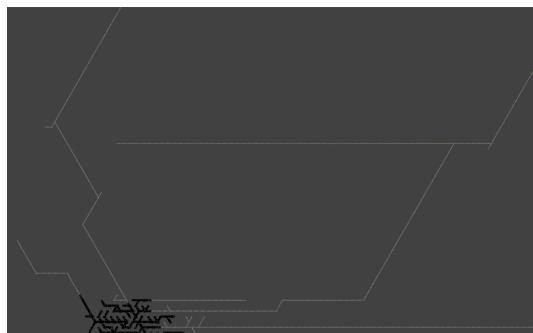
## 4.2 Implementacja zachowania komórek

Zachowanie komórek zostało zaimplementowane w oparciu o model: [GHK<sup>+</sup>06]. W naszej implementacji zastosowany zostanie podział komórek na dwie kategorie:

- Zwykłe komórki (CoreCell) - zapełniają przestrzeń gęstą siatką komórek. Rozrasta się w równomierny sposób. Podczas określania kierunku rozrostu kandydatami są z podobnym prawdopodobieństwem pola przeciwnie do sąsiadów jak i pola przylegające do przeciwnych. Są umiarkowanie czule na ilość sąsiadów co oznacza że szansa na śmierć komórki przez przeludnienie wzrasta liniowo z ilością sąsiadów aż do osiągnięcia punktu krytycznego gdzie szansa na przeżycie jest bardzo niska (Rys. 9).
- Komórki poszukujące (ExplorationCell) - służą do poszukiwania surowców. W związku z tym rozrastają się dużo szybciej ale głównie w liniach prostych (okazjonalnie zmieniając kierunek lub rozdwajając się). Podczas określania kierunku rozrostu z największym prawdopodobieństwem kandydatem jest kierunek przeciwny do sąsiada z minimalną szansą na dodanie przylegających do nich pól (co odpowiada za skręcanie). Jest bardzo wyczulony na ilość sąsiadów i umiera jeśli posiada ich za dużo (Rys. 10).



Rysunek 9: Zwykłe komórki.



Rysunek 10: Komórki poszukujące.

### **4.3 Parametry rozrostu**

- directOppositeChance - prawdopodobieństwo rozrostu w linii prostej od komórki rodzica
- broadOppositeChance - prawdopodobieństwo rozrostu na pola sąsiadujące z komórką rodzica
- maxNeighborBeforeStarvation - liczba sąsiadujących komórek, po przekroczeniu której szansa śmierci komórki jest stała i bardzo wysoka
- safeNeighbor - liczba sąsiadujących komórek, poniżej której szansa śmierci komórki jest stała i bardzo niska
- resourceConsumption - ilość surowców spożywana przez daną komórkę

## 5 Realizacja praktyczna

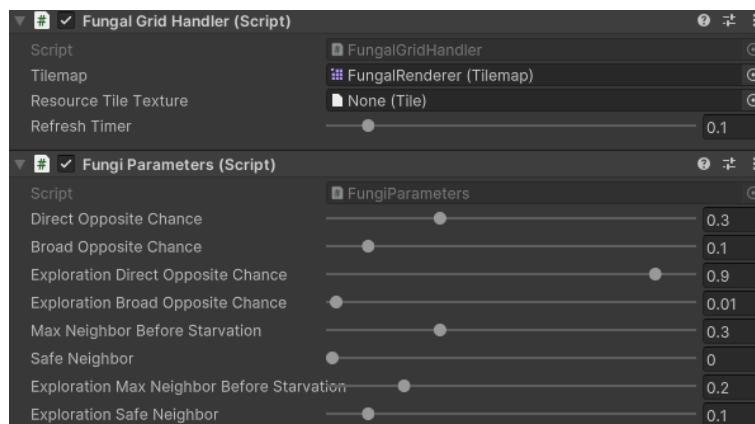
### 5.1 Założenia projektowe

Program w pełni implementuje wszystkie elementy projektu związane z symulacją rozrostu grzyba, a więc:

- Rozrost komórek grzyba
- Symulacja środowiska i jego surowców
- Symulacja interakcji komórek ze środowiskiem

### 5.2 Oprogramowanie

Program korzysta z silnika gier komputerowych Unity. Do tworzenia kodu zostało użyte IDE firmy JetBrains Rider. Użycie silnika Unity pozwoliło na skupienie zasobów na implementacji samej symulacji poprzez zastosowanie gotowych schematów siatki heksagonalnej. Modularny system komponentów wewnętrz Unity pozwolił na łatwą parametryzację zmiennych odpowiedzialnych za symulację (Rys. 11) jak i na zmienianie ich podczas symulacji aby znaczco ułatwić ustalenie ich optymalnych wartości.



Rysunek 11: Parametry symulacji widoczne wewnątrz edytora Unity z wygodnymi suwakami.

### 5.3 Szczegóły implementacji

Implementacje można rozdzielić na trzy części:

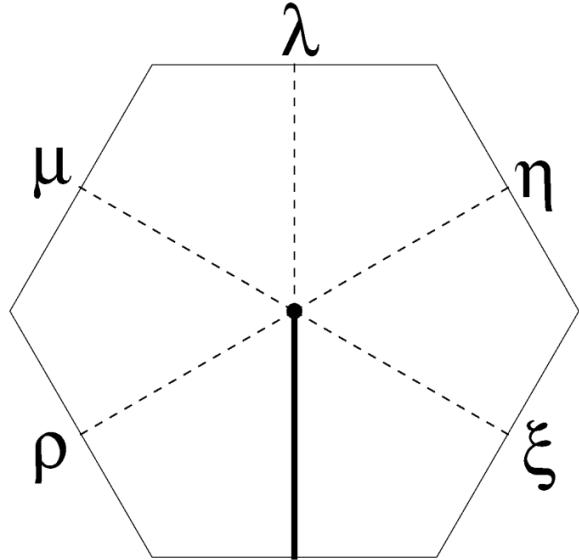
1. Implementacja symulacji
2. Implementacja wizualizacji
3. Implementacja narzędzi pomocniczych i integracja wizualizacji z symulacją

#### 5.3.1 Implementacja symulacji

Symulacja oparta jest na modelu probabilistycznym wewnątrz siatki heksagonalnej [GHK<sup>+06</sup>]. Rozwój komórek grzyba został podzielony na trzy etapy:

- Explore Step - decyduje o rozroście komórek eksploracyjnych
- Grow Step - decyduje o rozroście komórek trzonowych
- Feed Step - decyduje o zużyciu i pobieraniu zasobów

Explore Step oraz Grow Step funkcjonują identycznie z wyjątkiem częstotliwości wywoływanego oraz rodzaju komórek których dotyczą. Na każdy krok rozrostu przypadają trzy kroki eksploracji. Podczas tych kroków każda aktywna komórka podejmuje próbę rozprzestrzenienia się na jedno z wolnych sąsiednich pól z danym prawdopodobieństwem (Rys. 12).



Rysunek 12: Prawdopodobieństwo dla każdego z kierunków jest obliczane na bazie sąsiednich komórek z przeciwnego kierunku. Przykład: jeśli komórka ma sąsiada ze strony  $\mu$  to współczynnik dla kierunku zostaje zwiększy zgodnie z parametrem *Direct Opposite Chance* (Rys. 11), natomiast  $\rho$  oraz  $\xi$  zgodnie z parametrem *Broad Opposite Chance* (Rys. 11). Po podsumowaniu prawdopodobieństwo dla każdego kierunku jest określone jako jego współczynnik dzielony przez sumę wszystkich współczynników.

Podejście probabilistyczne jest zainspirowane modelem zaproponowanym w pracy *The Development of Fungal Networks in Complex Environments* [GHK<sup>+</sup>06].

Są dwa przypadki w których aktywna komórka nie rozprzestrzenia się:

- Wszystkie sąsiednie pola są zajęte
- Każda komórka może dezaktywować się z prawdopodobieństwem 0.1 za każdego posiadanej sąsiada, chyba że prawdopodobieństwo przekracza parametr *Max Neighbor Before Starvation* (Rys. 11) albo jest mniejszy niż parametr *Safe Neighbor* (Rys. 11). Przekroczenie pierwszego zwiększa prawdopodobieństwo dezaktywacji do 0.95. Wszystkie wartości poniżej *Safe Neighbor* zamieniane są na 0. Parametry są rozdzielone na komórki trzonowe i eksploracyjne.

Grow Step można podzielić na cztery podetapy:

- Wszystkie komórki dzielą się surowcami z sąsiadami.
- Wszystkie komórki, które są w kontakcie z surowcem pobierają z niego pożywienie.
- Wszystkie nieaktywne komórki posiadające wystarczający zapas surowca aktywują się.
- Wszystkie aktywne komórki zużywają część swojego pożywienia, jeśli nie mają go wystarczająco dezaktywują się.

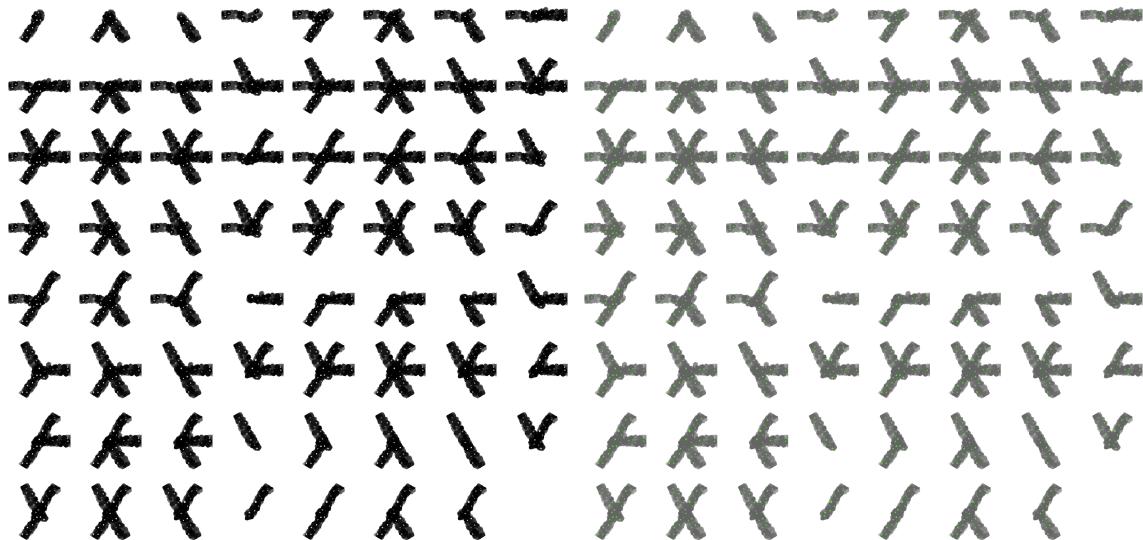
Każda komórka na początku fazy karmienia na podstawie wielkości własnego zapasu pożywienia dzieli się z sąsiadami. Decyzja o ilości przekazanego pożywienia podejmowana jest na zasadzie progów.

Poniżej pewnej ilości koniecznej do przetrwania paru cykli komórka nie dzieli się wcale. W innym przypadku komórka oddaje albo połowę swoich surowców do podzielenia między sąsiadami albo 80% jeśli posiada ich bardzo dużo. Wyjątkami od tej zasady są komórki eksploracyjne:

- Jeśli komórka eksploracyjna posiada tylko jednego sąsiada (czyli jest końówką) to nie dzieli się surowcami.
- W przeciwnym przypadku oddaje całość swoich surowców. Skutkiem tego jest tworzenie się kanałów między koloniami.

### 5.3.2 Implementacja wizualizacji

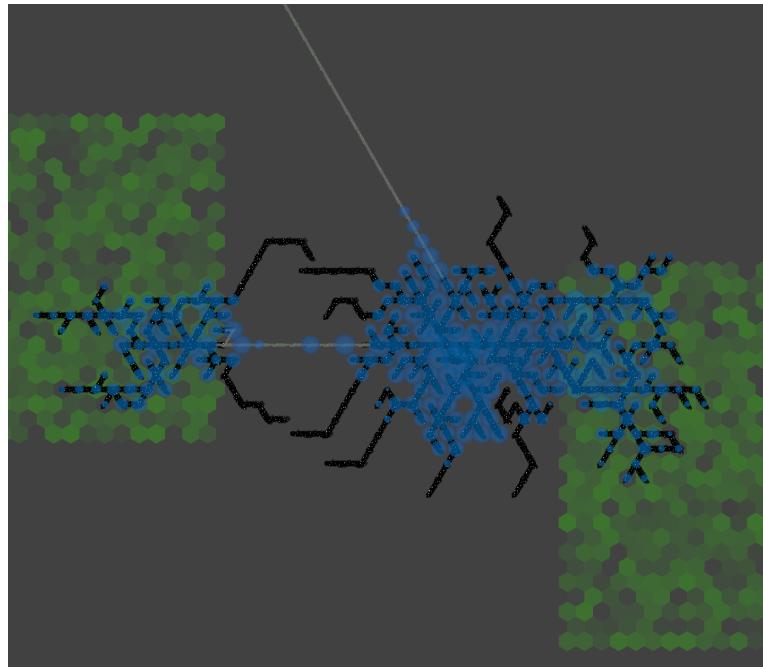
Wizualizacja odbywa się przy pomocy wbudowanego silnika renderującego Unity. W zależności od rodzaju komórki w polu wyświetlna jest jedna ze wcześniej przygotowanych tekstur (Rys. 13).



Rysunek 13: Tekstury dla komórek.

W przypadku surowców wyświetlana jest zielona komórka, której przezroczystość zależy od ilości zasobów w stosunku do pojemności (Rys. 15).

Wizualizacja umożliwia również wyświetlenie nakładki pokazującej aktualny zapas surowców wewnątrz każdej komórki używając narzędzia *Gizmos* silnika Unity (Rys. 14).



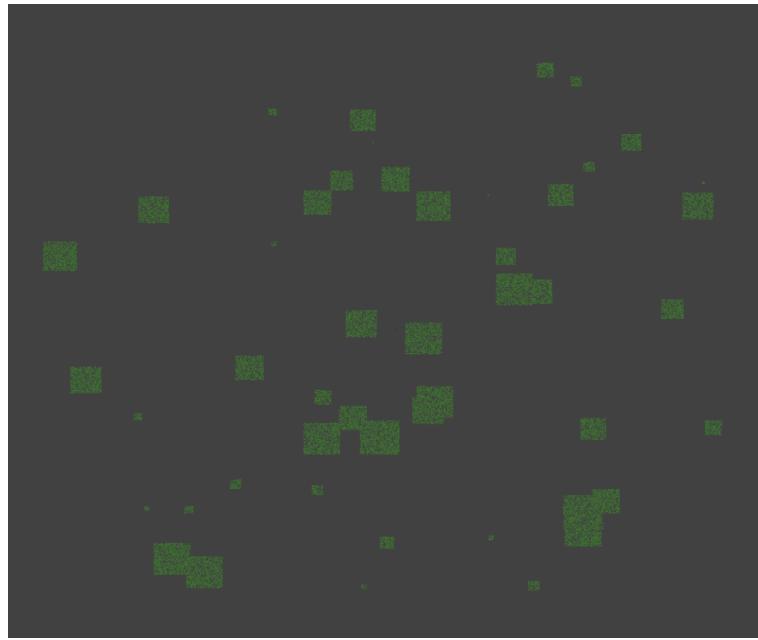
Rysunek 14: Zapas surowca wizualizowany poprzez wielkość niebieskiego koła. Zielone komórki reprezentują zasoby.

### 5.3.3 Implementacja narzędzi pomocniczych i integracja wizualizacji z symulacją

Aby ułatwić tworzenie symulacji zostały przygotowane funkcje pomocnicze które pozwalają pobierać koordynaty komórek na zasadzie sąsiedztwa. Pozwala to uniknąć problemów związanych z ustalaniem pozycji  $x$  i  $y$  danej komórki. Używając tych koordynatów klasa *FungalGridHandler* jest w stanie pobrać wszystkie obiekty klasy *Cell* które przechowują koordynaty oraz informacje o połączeniach, a następnie przypisać do siatki w odpowiednim miejscu teksturę odzwierciedlającą połączenia.

## 6 Rezultaty symulacji

Symulacja była przeprowadzana poprzez umieszczenie jednej komórki w środowisku wypełnionym w losowy sposób złożami surowców (Rys. 15).



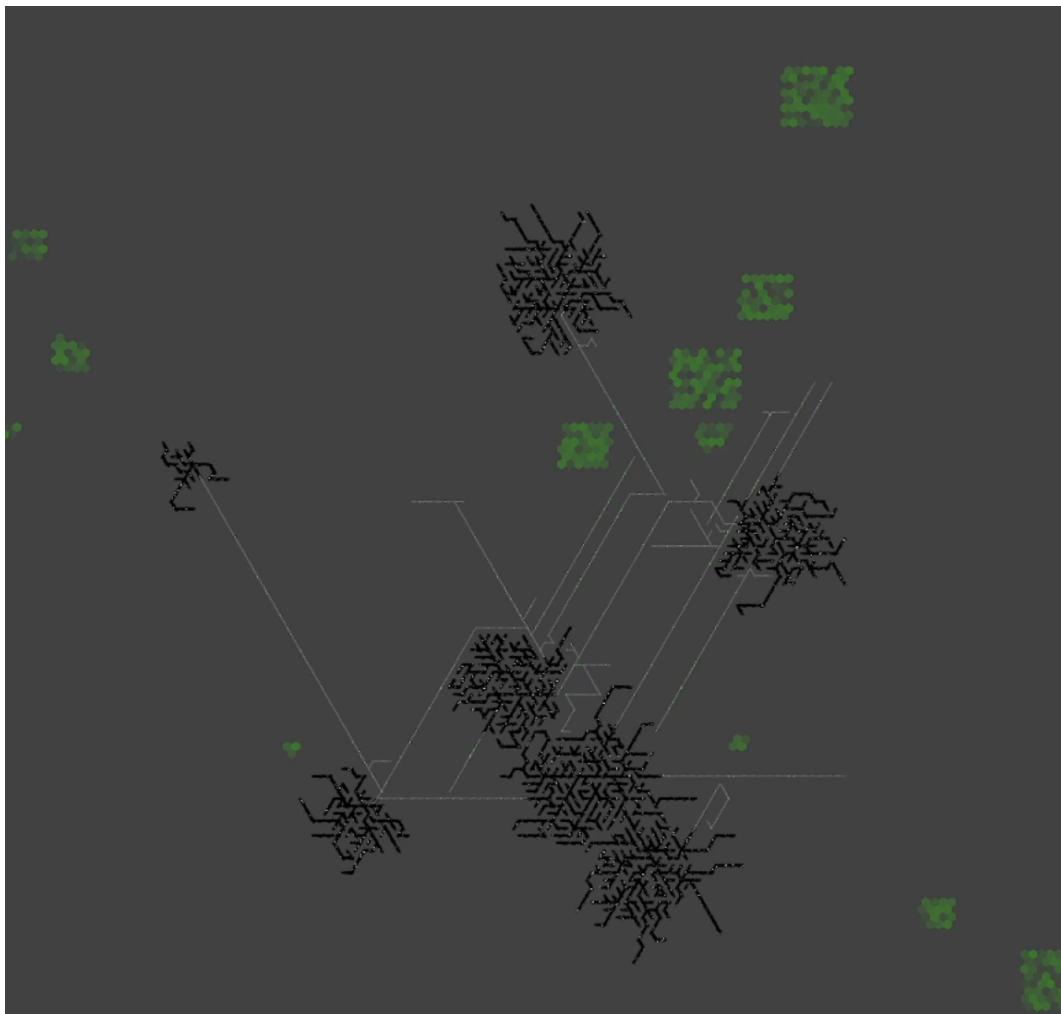
Rysunek 15: Przykładowe wygenerowane środowisko.

Siatka środowiska jest dynamicznie powiększana w zależności od wielkości grzyba, ale aby ograniczyć rozrost do ogromnych rozmiarów podczas przygotowywania środowiska surowce były w generowane w maksymalnej odległości 250 komórek od punktu początkowego.

Przeanalizowane zostały cztery główne scenariusze w których modyfikowane były jedynie warunki początkowe środowiska. Zielone komórki reprezentują surowce, czarne - komórki trzonowe, a szare - komórki eksploracyjne. Na niektórych rysunkach w celu wizualizacji surowców zostały wykorzystane półprzezroczyste niebieskie koła.

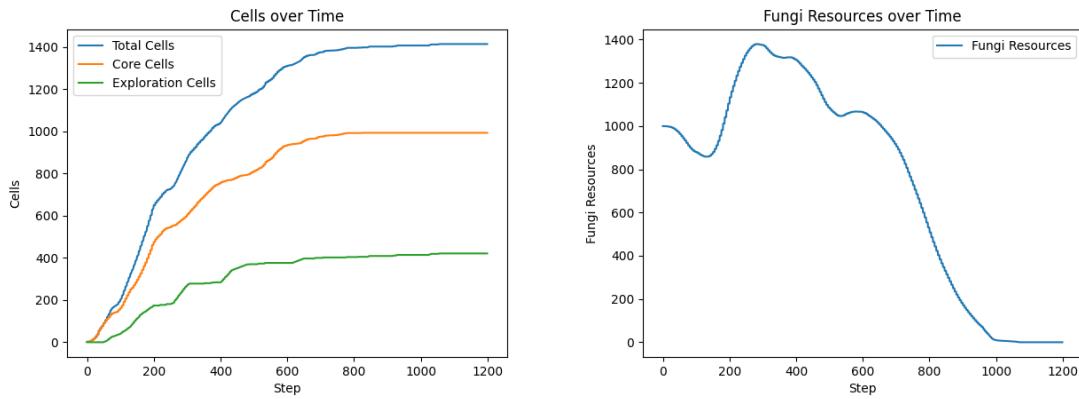
### 6.1 Niewielkie złożo surowca o małej koncentracji

W ramach pierwszego eksperymentu grzyb został umieszczony w środowisku zawierającym małe (około 1x1 do 8x8) złożo surowca. Każda komórka w złożu zawierała od zera do pięćdziesięciu jednostek surowca. Każda komórka grzyba potrzebuje jedną jednostkę surowca aby przetrwać fazę karmienia. Środowisko okazało się zbyt mało obfite by utrzymać nawet niewielką populację. Powstały niewielkie koncentracje komórek wokół odnalezionych pokładów surowca (Rys. 16) ale wystarczało go jedynie na utrzymanie komórek trzonowych co sprawiło że nie doszło do wytwarzania wystarczającej ilości komórek eksploracyjnych.



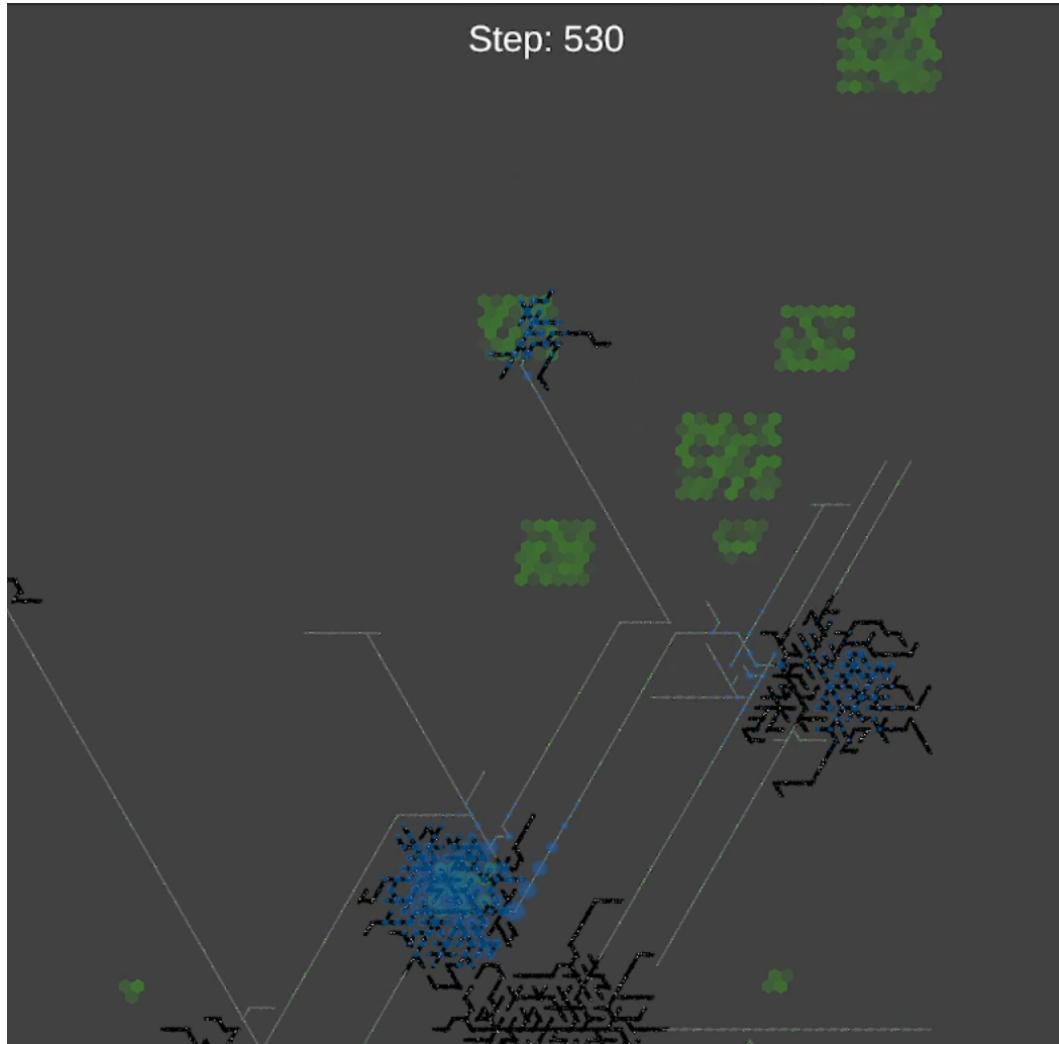
Rysunek 16: Stan końcowy pierwszego eksperymentu. Komórki zgromadziły się wokół surowca lecz jego ilość była za mała by rozwiniąć kolonię.

Na wykresie przedstawiającym sumaryczną ilość surowca zebranego przez całą kolonię (Rys. 17) można zauważać krótkie okresy przyrostu po których następuje gwałtowne wyczerpanie surowca. Populacja kolonii była zdominowana przez komórki trzonowe co prawdopodobnie wynikało z niewystarczającej ilości surowca w skupiskach aby wytworzyć komórki eksploracyjne.



Rysunek 17: Statystki dla pierwszego eksperymentu.

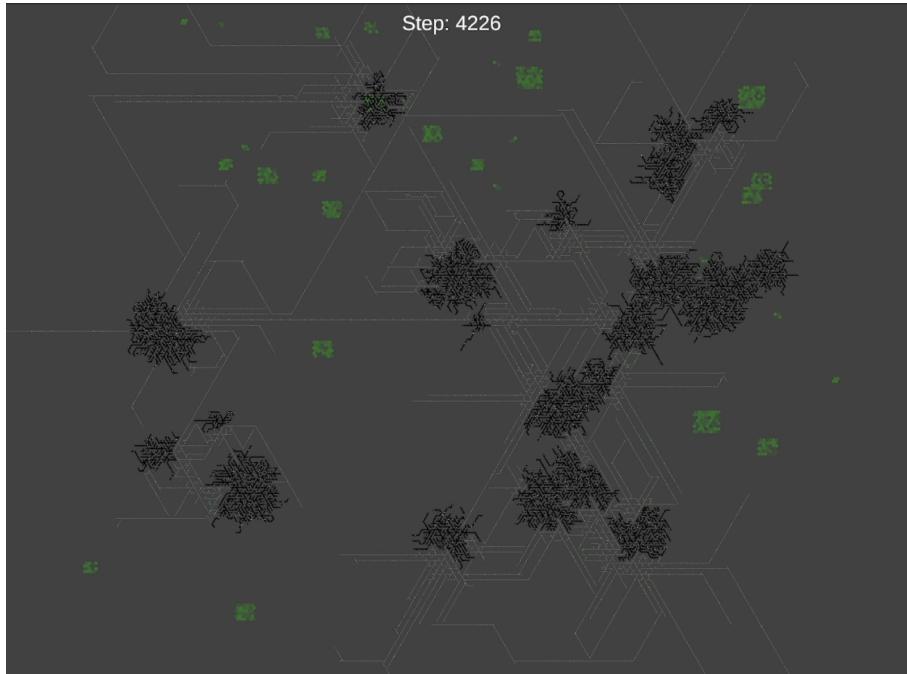
Można zauważać jak niewielki wpływ dla utrzymania kolonii miało wykrycie pojedynczego złoża na północy kolonii w okolicach kroku 500-600 (Rys. 18). Po wyczerpaniu tego skupiska doszło do śmierci kolonii, ponieważ nie wystarczyło surowców aby poszukiwać kolejnych koncentracji.



Rysunek 18: Odkrycie i zajęcie złoża surowców przez kolonię.

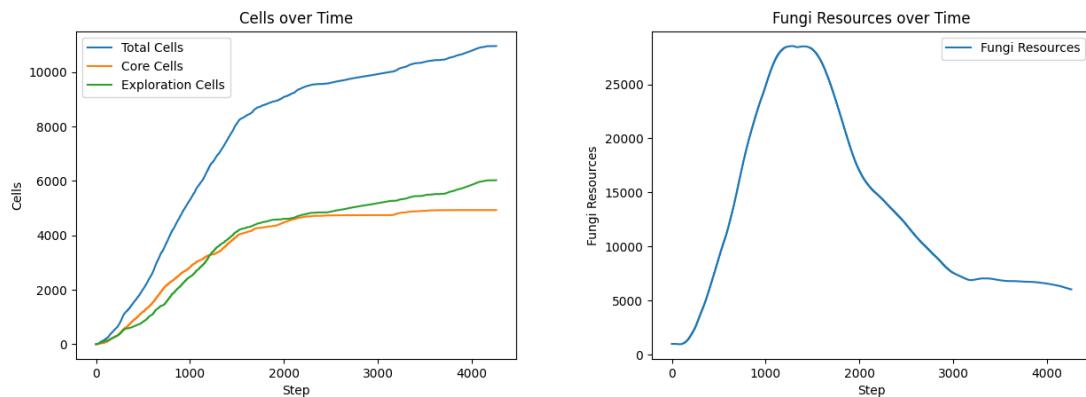
## 6.2 Niewielkie złoża surowca o średniej koncentracji

W drugim eksperymencie maksymalna ilość surowca zawartego w jednej komórce złoża została zwiększa dziesięciokrotnie. Sprawiło to, że skupiska komórek wokół złoż surowców mogły nie tylko utrzymać się przy życiu ale i także inwestować surowiec w wytwarzanie komórek eksploracyjnych. Doprowadziło to do odkrycia dużo większej ilości złoż i utworzenia gęstej sieci komórek eksploracyjnych (Rys. 19).



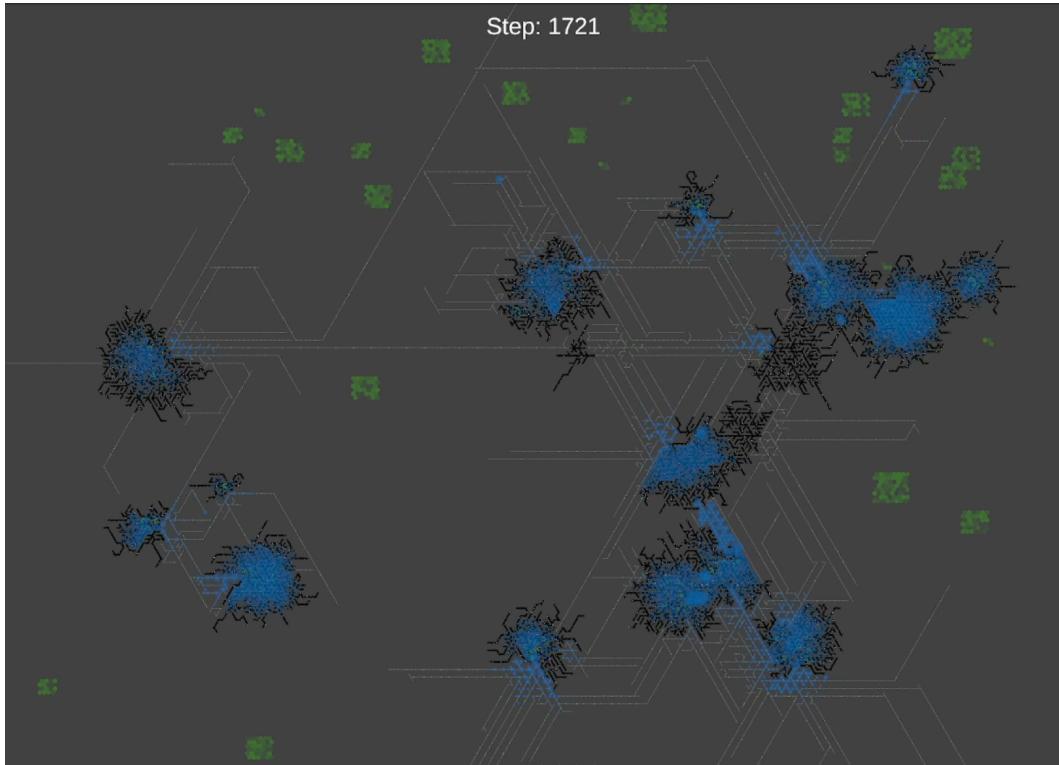
Rysunek 19: Stan końcowy drugiego eksperymentu. Tym razem oprócz większych koncentracji wokół złoż można również zobaczyć rozwiniętą sieć komórek eksploracyjnych.

W porównaniu do pierwszego eksperymentu (Rys. 17) można zauważyc równowagę pomiędzy wykształconymi komórkami trzonowymi i eksploracyjnymi (Rys. 20). Dzięki obfitości surowców kolonia mogła w szybkim tempie odkrywać złoża co doprowadziło do gwałtownego rozrostu do kroku 500. Następnie do kroku około 1200 z odkrytych złoż były pobierane surowce, które były wykorzystane aby utworzyć komórki eksploracyjne. Gdy większość największych skupisk została wyczerpana z surowca główna kolonia obumarła i przy życiu zostały jedynie mniejsze skupiska na obrzeżach.



Rysunek 20: Statystki dla drugiego eksperymentu.

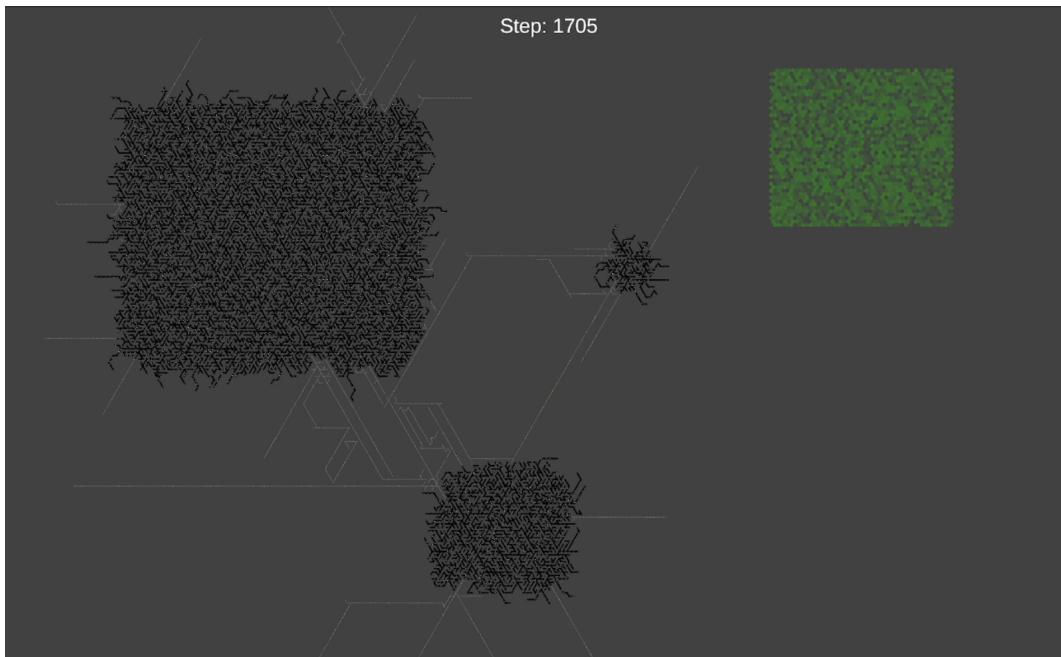
Dzięki wysokiej zawartości komórek złoża w surowiec każda pomniejsza kolonia grzyba mogła przez dłuższy czas utrzymywać swoje komórki przy życiu (Rys. 21) i doprowadzać do kocówek surowce aby tworzyć komórki eksploracyjne.



Rysunek 21: Wizualizacja zawartości surowca w koncentracjach. Niebieskie koła swoją wielkością symbolizują zawartość surowca w danej komórce.

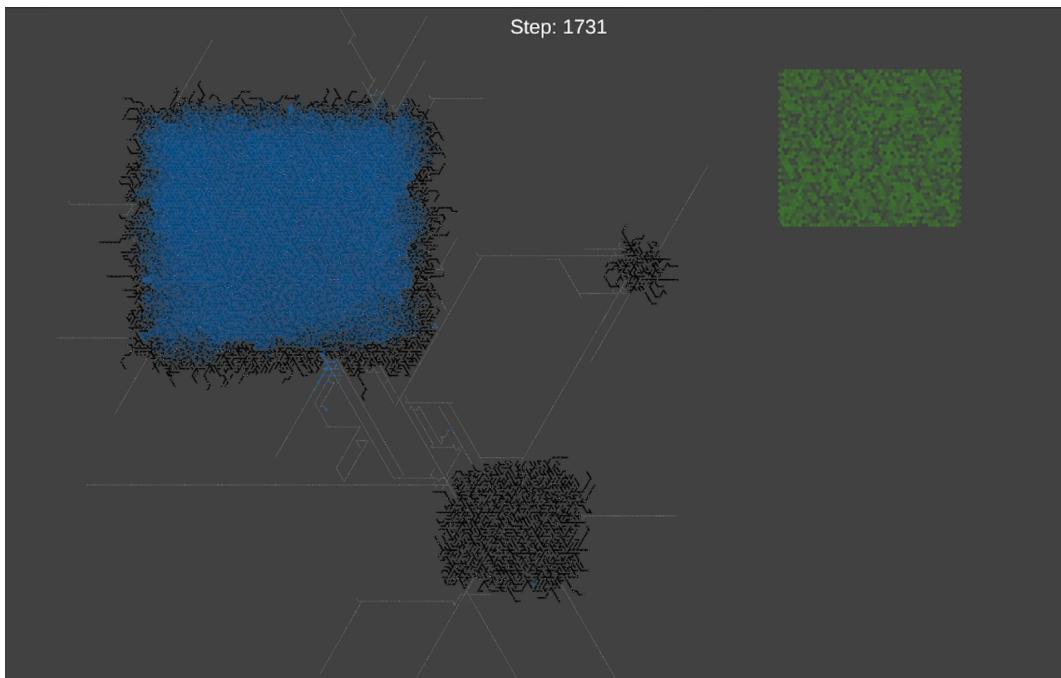
### 6.3 Ogromne złoża o bardzo niskiej koncentracji surowca

W trzecim eksperymencie ilość złóż została ograniczona do trzech ale maksymalny rozmiar został znaczco zwiększyony. Maksymalna zawartość surowca w jednej komórce została również drastycznie zmniejszona do zaledwie czterdziestu jednostek. Skutkiem było gwałtowne zajęcie powierzchni złóż przez komórki trzonowe, które bardzo szybko wyczerpały dostępne zasoby (Rys. 22).



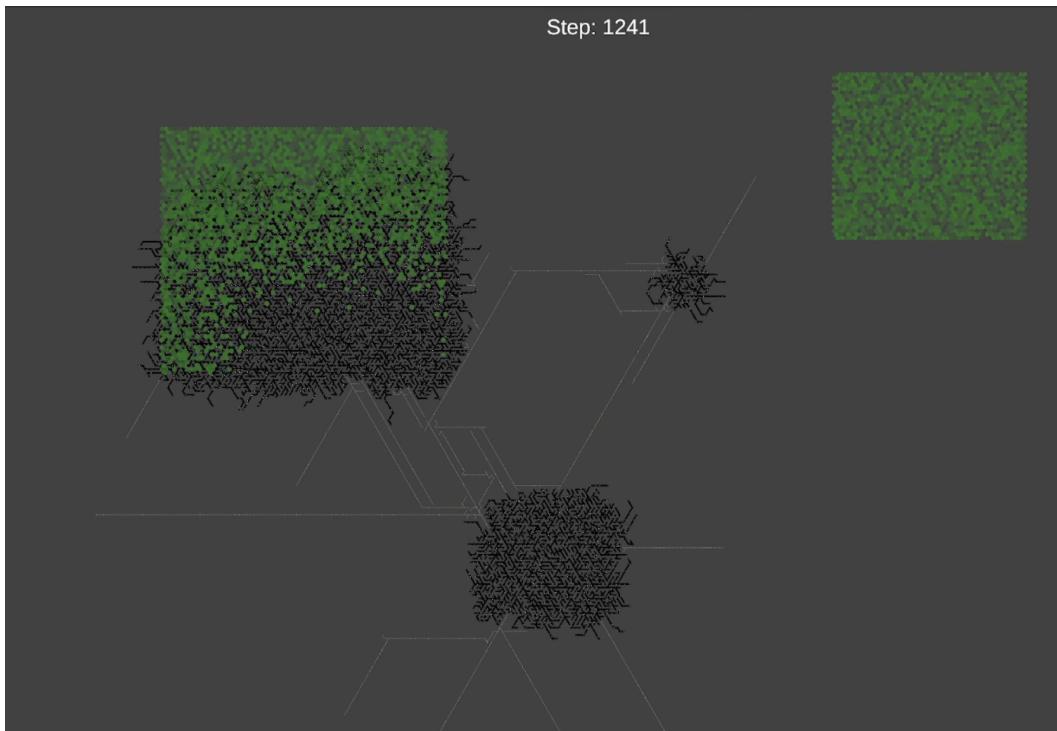
Rysunek 22: Stan końcowy trzeciego eksperymentu. Złożą surowca zajmowały wielką powierzchnię co doprowadziło do gwałtownego rozrostu grzyba ale zawartość była zbyt niska by skutecznie wykształcić wiele komórek eksploracyjnych.

Dodatkową konsekwencją znaczącej powierzchni jaką musiały pokryć komórki trzonowe był fakt, że przetransportowanie surowca z centrum skupiska do brzegów zajmowało za dużo czasu. Zanim więc surowiec mógł być dostarczony do końcówek aby wykształcić komórki eksploracyjne był on zużywany przez komórki transportujące. Skutkowało to „uwięzieniem” surowców w środku kolonii (Rys. 23).



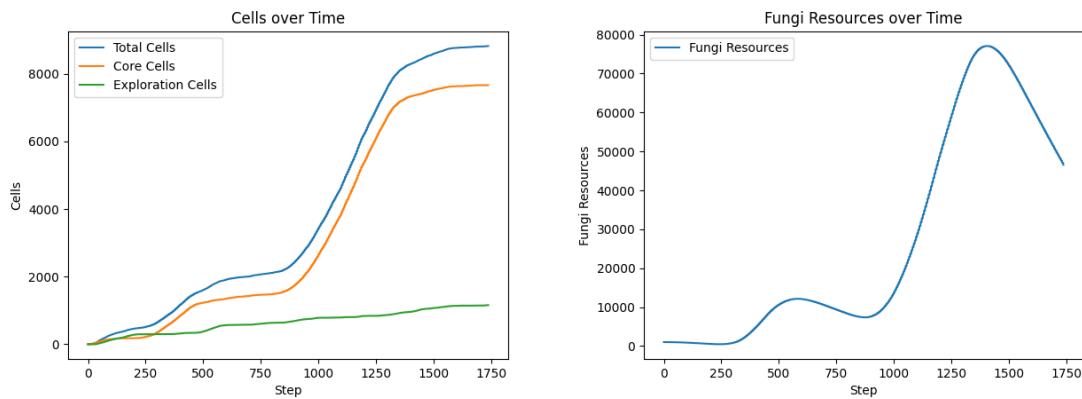
Rysunek 23: Surowiec pobrany przez komórki trzonowe nie mógł być na czas dostarczony do końcówek kolonii. Niefektywna dystrybucja surowca doprowadziła do zbyt wolnego rozwoju.

W związku z niską zawartością komórek surowca zajmowanie przestrzeni złoża przez komórki trzonowe było podobnie szybkie jak wyczerpywanie go. Efektem było wizualne „pożeranie” zasobów (Rys. 24).



Rysunek 24: Zajmowanie przez kolonię złoża surowców.

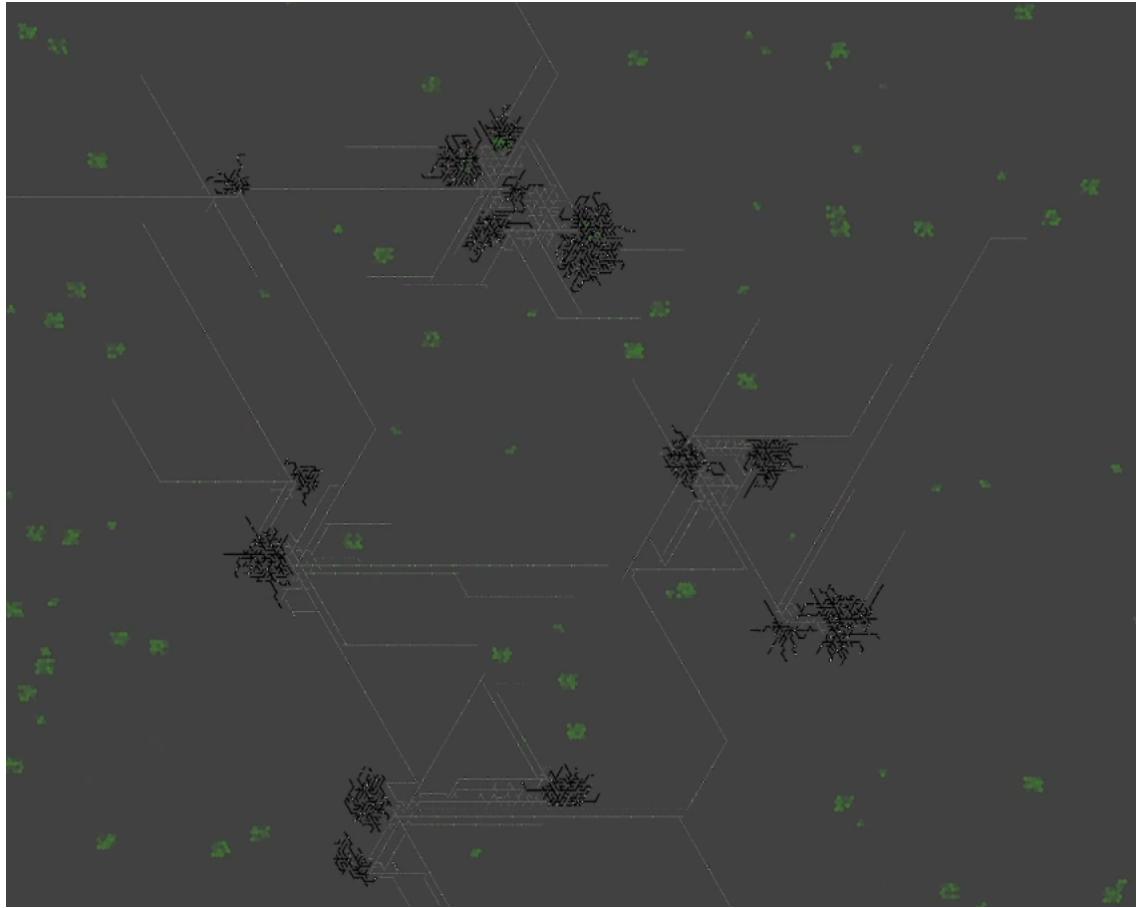
W wyniku wielkości powierzchni złoż surowca nie było potrzeby wyksztalcania komórek eksploracyjnych w kluczowych fazach rozwoju kolonii co skutkowało zdecydowaną przewagą komórek trzonowych nad eksploracyjnymi. Na wykresach (Rys. 25) wyraźnie widać moment zajęcia największego ze złoż w krokach od 1000 do 1400 oraz gwałtowną utratę surowca wynikającą z konieczności utrzymania ponad 8000 komórek.



Rysunek 25: Statystki dla trzeciego eksperymentu.

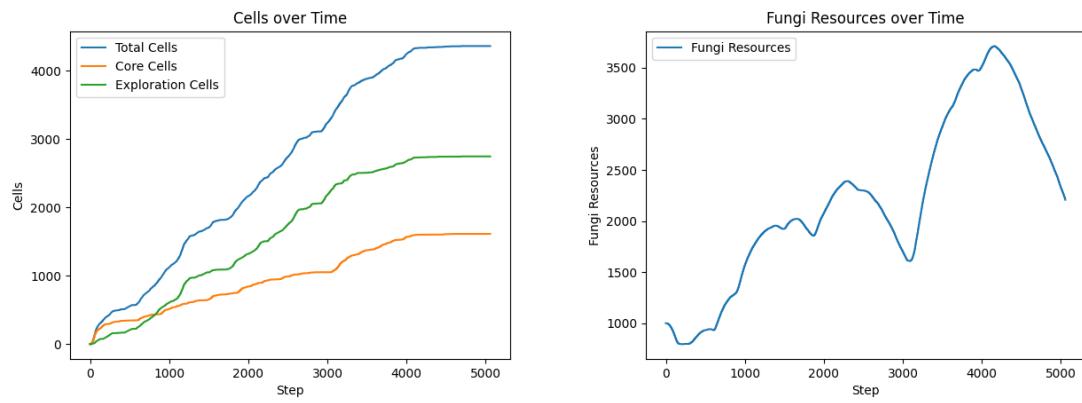
## 6.4 Najmniejsze złoża o wysokiej koncentracji

Czwarty eksperyment miał na celu uzyskanie efektu odwrotnego do eksperymentu trzeciego. Złożo zostały zmniejszone do bardzo małych rozmiarów lecz każda komórka posiadała dużo więcej surowca. Sprawiło to, że nie było konieczności wykształcania gęstej sieci komórek trzonowych czego konsekwencją było przeznaczanie surowców na rozwój komórek eksploracyjnych (Rys. 26).

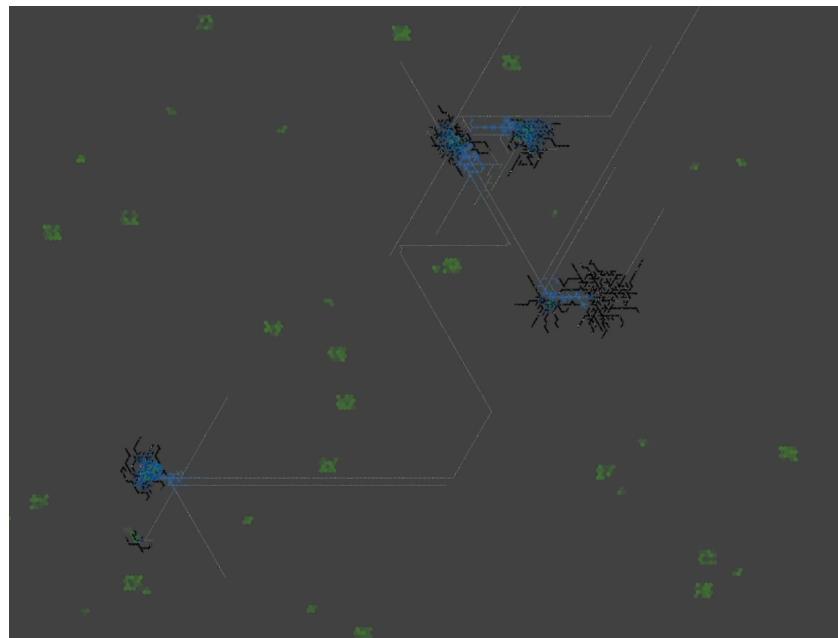


Rysunek 26: Stan końcowy czwartego eksperymentu. Niewielkie koncentracje komórek trzonowych wydobywały surowiec i przeznaczały go prawie wyłącznie na budowanie gęstej sieci komórek eksploracyjnych.

Zgodnie z oczekiwaniami komórki eksploracyjne stanowiły większość w kolonii (Rys. 27). Na wykresie przedstawiającym zasób surowca całej kolonii widoczne jest, że między okresami wzrostu mijało często bardzo wiele kroków symulacji. Pozwalała na to obfitość surowców. Komórki trzonowe mogły bardzo długo przekazywać surowce do komórek eksploracyjnych dzięki czemu, podczas gdy kolonia wyczerpywała aktywne źródła pożywienia, jedna z wielu odnóg sieci eksploracyjnej znajdowała kolejne obfite źródło.



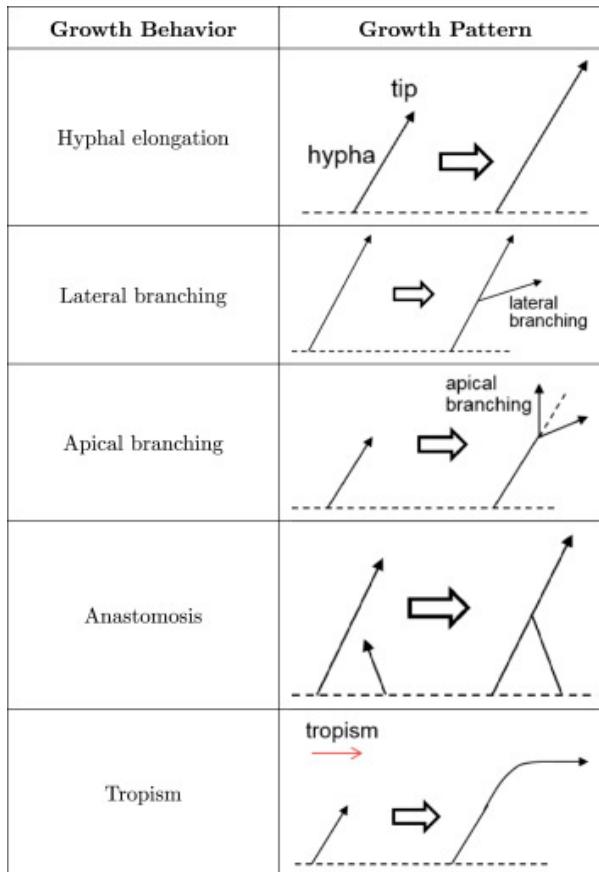
Rysunek 27: Statystki dla czwartego eksperymentu.



Rysunek 28: Komórki trzonowe „pompują” surowce ze złóż do sieci eksploracyjnej.

## 7 Dyskusja wyników

Podobnie jak w pracy *A lattice-based system for modeling fungal mycelial growth in complex environments* [HMPP18] można zaobserwować kilka zachowań analogicznych do grzybów w naturze (Rys. 29), które nie są bezpośrednio zaimplementowane ale są konsekwencją złożenia wielu prostszych reguł.



Rysunek 29: Zachowania zaobserwowane podczas przeprowadzania symulacji.

Mozna też zauważyć, że grzybnia zgodnie z oczekiwaniemi koncentruje się wokół surowców. Warto podkreślić, że w modelu podczas wyboru kierunku nie jest brana pod uwagę obecność surowca w otoczeniu, więc zjawisko to musi być wynikiem złożenia pozostałych reguł. Występowanie takich zachowań sugeruje wysoką skuteczność modelu w odwzorowywaniu zachowań zachodzących w naturze. Obserwując efekty symulacji można też dostrzec podobieństwo do wyników widocznych na rysunku 6, komórki poszukujące rozprzestrzeniają się z koncentracji surowca w poszukiwaniu innych złoż.

## 8 Podsumowanie

Przedstawiony projekt stanowi implementację symulacji wzrostu grzybni opartej na modelu probabilistycznym i automacie komórkowym. Zastosowanie siatki heksagonalnej oraz dynamiczne dostosowywanie się środowiska do rozmiarów grzyba umożliwiają realistyczną symulację procesu rozrostu komórek grzyba w różnych warunkach środowiskowych.

Symulacja pozwala na analizę wpływu różnych czynników, takich jak parametry rozrostu, ilość surowców czy struktura początkowa środowiska, na rozwój grzyba. Dzięki interfejsowi graficznemu oraz narzędziom wizualizacji użytkownik może obserwować proces rozrostu grzyba w czasie rzeczywistym, a także bezpośrednio na niego wpływać.

Otrzymane rezultaty symulacji mogą stanowić podstawę do dalszych analiz i eksperymentów w zakresie wzrostu grzybni oraz interakcji między komórkami. Możliwość dostosowania parametrów symulacji pozwala na uzyskanie różnorodnych scenariuszy rozwoju grzyba.

Symulacja może być rozwinięta poprzez dodanie bardziej zaawansowanych mechanizmów wzrostu komórek, uwzględnienie dodatkowych czynników wpływających na środowisko, czy też implementację bardziej zaawansowanego interfejsu użytkownika. Dalsze prace nad projektem mogą również obejmować integrację z innymi modelami biologicznymi oraz analizę bardziej skomplikowanych interakcji między organizmami.

## Literatura

- [GHK<sup>+</sup>06] Boswell Graeme, Jacobs Helen, Ritz Karl, Gadd Geoffrey, and Davidson Fordyce. The development of fungal networks in complex environments. 2006.
- [HMPP18] Du Huan, Ayous Mehdi, Lv Pin, and Perré Patrick. A lattice-based system for modeling fungal mycelial growth in complex environments. 2018.
- [IERCPWA12] de Paula Ferreira Iuri Emmanuel, de Andrade Moral Rafael, Ferreira Cláudia Pio, and Conde Godoy Wesley Augusto. Modelling fungus dispersal scenarios using cellular automata. 2012.
- [JHJHMP94] Halley John, Comins Hugh, Lawton J. H., and Hassell M. P. Competition,succession and pattern in fungal communities: towards a cellular automaton model. 1994.