**Verslag PGT:**

**Procedurally Generated Terrain**

Naam: Jonathan Vercammen

Klas: 3ICT

Schooljaar: 2022-2023

Inhoud

[1 Inleiding 1](#_Toc120872399)

[2 Noisefuncties 1](#_Toc120872400)

[2.1 Introductie 1](#_Toc120872401)

[2.2 Noise 1](#_Toc120872402)

[2.3 Random Number Generator (RNG) 2](#_Toc120872403)

[2.4 Random noise 3](#_Toc120872404)

[2.5 Value noise 3](#_Toc120872405)

[2.5.1 Werking 4](#_Toc120872406)

[2.5.2 Eigenschappen 5](#_Toc120872407)

[2.5.3 Voorbeelden 5](#_Toc120872408)

[2.6 Perlin noise 6](#_Toc120872409)

[2.6.1 Werking 6](#_Toc120872410)

[2.6.2 Eigenschappen 7](#_Toc120872411)

[2.6.3 Voorbeelden 7](#_Toc120872412)

[2.7 Simplex noise 8](#_Toc120872413)

[2.7.1 Werking 8](#_Toc120872414)

[2.7.2 Eigenschappen 9](#_Toc120872415)

[2.8 Toepassingen 10](#_Toc120872416)

[3 Fractal noise 11](#_Toc120872417)

[3.1 Parameters / Begrippen 11](#_Toc120872418)

[4 Procedurally Generated Terrain 14](#_Toc120872419)

[4.1 Introductie 14](#_Toc120872420)

[4.2 3D rendering 15](#_Toc120872421)

[4.3 De kubus 15](#_Toc120872422)

[4.4 Eenvoudig terrein genereren 16](#_Toc120872423)

[4.5 Noise integreren in terrein 16](#_Toc120872424)

[4.6 Optimalisatie 1: chunks 16](#_Toc120872425)

[4.6.1 Chunk loading 16](#_Toc120872426)

[4.6.2 Chunk unloading 16](#_Toc120872427)

[4.7 Optimalisatie 2: custom mesh renderer 17](#_Toc120872428)

[4.8 Optimalisatie 3: multi-threading 17](#_Toc120872429)

[4.9 Optimalisatie 4: GPU instancing 17](#_Toc120872430)

[4.10 Problemen 17](#_Toc120872431)

[5 Unity demo’s 17](#_Toc120872432)

[6 Besluit 18](#_Toc120872433)

[7 Codefragmenten 18](#_Toc120872434)

[8 Figurenlijst 19](#_Toc120872435)

[9 Bronvermelding 21](#_Toc120872436)

# Inleiding

~~Dit onderzoek gaat over de werking van procedurally generated terrain. Het eerste deel geeft een introductie over noisefuncties en bespreekt een aantal voorbeelden. Hoofdstuk 3 gaat dieper in op Perlin noise. Daarna volgt meer uitleg over PGT met verschillende voorbeelden in Unity....~~

Wat is het doel van dit project? Waarom Procedurally generated terrain?

# Noisefuncties

## Introductie

Willekeurigheid is overal in de wereld maar toch blijft het zo’n abstract begrip. Wanneer is iets random? Is het ontstaan van het universum of het gooien van een dobbeslteen random en hoe kunnen computers dit simuleren als ze enkel instructies kunnen volgen? Vooral de laatste vraag piekte de interesse van Ken Perlin, een professor van de New York-universiteit. Perlin vond namelijk dat computergegenereerde beelden niet organisch genoeg waren.

Tijdens het maken van de Walt Disney-film *Tron (1982)* bedacht hij een algoritme dat organische vormen kon maken. Enkele jaren later in 1997 kreeg Perlin een academische prijs van AMPAS, de Academy of Motion Picture Arts and Sciences, en kreeg het algroritme de toepasselijke naam Perlin Noise. (Wikipedia, 2022)

## Noise

Noise of ruis heeft verschillende betekenissen. Enerzijds duidt het op een storend geluid. Anderzijds betekent het een visuele storing. Denk bv. aan de sneeuw van een tv of het gekras van een radio. Voor een signaal betekent noise een willekeurige afwisseling in sterkte of snelheid.

Hoofdzakelijk bestaan er twee soorten noise namelijk value noise en gradient noise. Gradient noise heeft veel varianten. Enkele voorbeelden zijn Simplex noise, Perlin noise, simulation noise en wavelet noise. Er zijn ook speciale soorten noise zoals Worley noise of Fractal noise.

De volgende hoofdstukken gaan verder in op de meest gekende noisefuncties en hun werking.

## Random Number Generator (RNG)

Elke noisefunctie steunt op random getallen. Value noise bijvoorbeeld gebruikt deze getallen om rasterpunten op te vullen. Maar hoe kunnen computers getallen genereren? Dit is waar random number generators (RNG) van pas komen.

Computers genereren geen echte random getallen maar pseudorandom getallen. Dit zijn getallen die willekeurig lijken maar opgebouwd zijn door een vaste formule. Het grootste voordeel hiervan is dat het zeer snel werkt. Ook is er maar een kleine hoeveelheid geheugen nodig. Het nadeel hieraan is dat een formule altijd hetzelfde resultaat zal teruggeven. Om meer variatie te geven, maakt een RNG gebruik van een ‘seed’. Dit is een cijfer die bepaalt hoe de generator getallen berekent.

Een voorbeeld van een random number generator is de lineaire-congruentiegenerator. Deze heeft als formule: waarbij

|  |
| --- |
| X0­­­: seed / startwaarde |
| m: modulus, ofwel de rest na deling |
| a: vermenigvuldigingsfactor |
| c­­­: toename |

Hieronder een voorbeeld met parameters X0­­­=5, m=6, a=2 en c­­­=8.

Hier is meteen een probleem zichtbaar. Na voldoende iteraties ontstaat er zich een patroon. Parameterkeuze is bij deze generator heel belangrijk. Wanneer de uitkomst kleiner is dan tien dan zullen er in totaal maximum tien iteraties gebeuren zonder dubbele getallen. Daarom is het belangrijk om de parameters zo groot mogelijk te houden. Zo is de kans kleiner dat hetzelfde getal twee keer voorkomt.

Om een voorbeeld te geven, Java gebruikt voor haar Random()-methode volgende parameters: m= 2­­­­48, a= 25.214.903.917 en c­­­= 11. (Wikipedia, Linear congruential generator, 2022)

## Random noise

De simpelste vorm van noise is random noise. Random noise bestaat uit een n-dimensioneel raster waarin elk punt een willeukeurige waarde krijgt tussen nul en één, respectievelijk zwart en wit. In de figuur hiernaast is een voorbeeld te zien van random noise in twee dimensies.

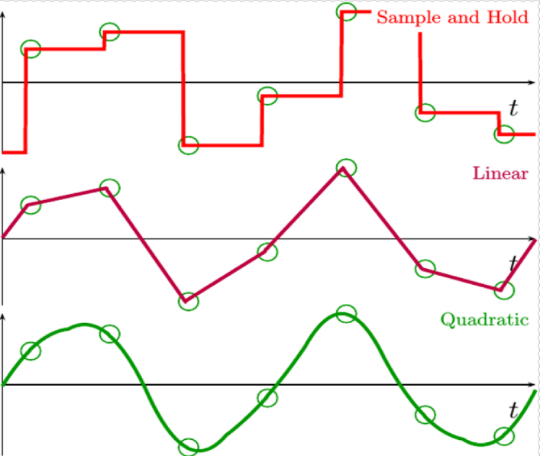
Het is duidelijk zichtbaar dat dit geen natuurlijk resultaat oplevert maar dat is ook niet het doel van random noise. Enkele toepassingen van random noise, beter bekent als white noise, zijn het maskeren van storende geluiden en in de geluidssector om versterkers te testen of audiosynthese. (Wikipedia, White noise, 2022)

Figuur Een 2D raster met white noise

## Value noise

Net zoals random noise bestaat value noise uit een n-dimensioneel raster van willekeurige punten. Het verschil is dat value noise alle tussenwaardes interpoleert door te kijken naar de dichtstbijzijnde rasterpunten. In één dimensie betekent dit een interpolatie tussen de twee dichtstbijzijnde rasterpunten. In 2D, tussen de vier dichtstbijzijnde rasterpunten. Hiernaast staat een voorbeeld van value noise. Figuur 2

Figuur Een 2D raster met value noise

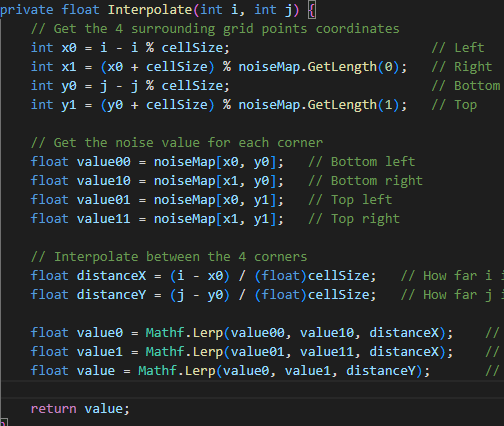
[](https://zipcpu.com/dsp/2018/03/30/quadratic.html)Er bestaan verschillende technieken om te interpoleren, meer hierover in volgend hoofdstuk. De meest gebruikte zijn linear en quadratisch. Lineair geeft snel resultaat maar ziet er vaak blokkerig uit. Quadratisch geeft het beste resultaat maar heeft veel rekenkracht nodig. Op onderstaande afbeelding is een voorbeeld zichtbaar van lineare en quadratische interpolatie. (Archer, 2011)

Figuur Verschil tussen lineare en quadratische interpolatie

### Werking

Value noise start met een n-dimensioneel raster. In onderstaand voorbeeld staat de werking uitgelegd van value noise in twee dimensies met lineare interpolatie.

Stel eerst een 2D raster op en vul elk punt met een willekeurige waarde tussen nul en één Figuur 3. Voor elke waarde tussen deze punten, bereken de geïnterpoleerde waarde van de vier omliggende rasterpunten. Onderstaand codefragment toont een manier om deze waarde te berekenen voor een punt (i , j).

Het eerste blok code zoekt de coördinaten van de cel waarin het punt zich bevindt . Daarmee worden de waardes van elk hoekpunt opgevraagt . Vervolgens berekent de code de positie van het punt in de huidige cel en zet die om in procent . Ten slotte wordt interpolatie drie keer toegepast. Figuur 7

Codefragment Interpolatie tussen twee punten i en j

De eerste keer voor de onderste twee punten, de tweede keer voor de bovenste twee punten en de laatste keer om verticaal te interpoleren.

Deze techniek heet ‘bi-lineare interpolatie’.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Figuur 4 Raster met vier punten | Figuur 5 Celcoördinaten zoeken | Figuur 6 Waardes van hoekpunten zoeken | Figuur 7 Positie in cel zoeken |
| Figuur 8 Bi-lineare interpolatie |  |  |  |

### Eigenschappen

* Zeer snel voor één laag value noise maar schaalt niet goed met meerdere lagen.
* Hoeft noise-waarden niet op te slaan in het geheugen.
* Kwaliteit is sterk afhankelijk van de interpolatietechniek.

### Voorbeelden

<https://www.wallstreetmojo.com/interpolation/>

(2.3) <https://micsymposium.org/mics_2011_proceedings/mics2011_submission_30.pdf>

## Perlin noise

Perlin noise is de meest gebruikte noisefunctie voor game development. Het is snel en geeft een natuurlijk resultaat.

Perlin noise is uitgevonden in 1982 door Ken Perlin. Later in 2001 verbeterde hij zijn algoritme dat nu gekend is als simplex noise, meer hierover in volgend hoodstuk.

Figuur Een 2D raster met Perlin noise

In tegenstelling tot value noise gebruikt Perlin noise een raster van eenheidsvectoren i.p.v. punten. Deze vectoren duwen alle tussenliggende waardes weg van de oorsprong.

Onderstaande tekst legt de werking uit van Perlin noise in twee dimensies.

### Werking

Perlin noise werkt met twee lijsten: een lijst met vectoren in willekeurige richting en een lijst met random natuurlijke getallen, de permutatielijst. Deze lijst bestaat uit n getallen tussen 0 en n – 1. Dit vervangt de random number generator die nodig is bij value noise.

De eerste stap is dezelfde als bij value noise namelijk: stel een 2D raster op van willekeurige eenheidsvectoren, kies een punt en zoek zijn omliggende rasterpunten. Zoek daarna voor elk van deze punten hun bijhorende vector uit de vectorlijst met een hashfunctie Figuur 10. Een voorbeeld hiervan is: waarbij ‘p’ de permutatietabel is. Bereken daarna voor elk hoekpunt de afstandsvector naar het punt in de cel door het verschil te nemen van beide punten Figuur 11. De laatste stap is de interpolant berekenen van deze vier waardes. Dit gebeurt op dezelfde manier als bij value noise namelijk met lineare interpolatie.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Figuur 10 gradient vectoren opzoeken | Figuur 11 afstandsvectoren berekenen |  |  |

### Eigenschappen

* Is een stuk trager dan value noise.
* Schaalt slecht bij meerdere dimensies
* Gebruikt een beetje geheugen om de vector- en permutatielijst op te slaan.
* Geeft een mooi resultaat.
* Afhankelijk van de implementatie kan Perlin noise herhalen.

### Voorbeelden

(2.4) <https://micsymposium.org/mics_2011_proceedings/mics2011_submission_30.pdf>

<https://www.ronja-tutorials.com/post/026-perlin-noise/>

## Simplex noise

Simplex noise is de verbeterde versie van Perlin noise die ook is gemaakt door Perlin zelf. Het grootste probleem met Perlin noise is dat het heel traag werkt in meerdere dimensies. De oplossing die Perlin hiervoor heeft bedacht, is om te werken met een ander raster en weg te stappen van gewone vierkanten.

### Werking

In de meetkunde zijn er een aantal manieren om een multidimensionele figuur weer te geven. Eén daarvan is de hyperkubus. De meest bekende varianten zijn het vierkant in twee dimensies en de kubus in 3D.

Een tweede manier is met een simplex. Simplices zijn de famillie van de driehoek en de piramide. In onderstaande afbeeldingen staan de meest gekende hyperkubussen en simplices nog eens op een rijtje.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Figuur 12 2D hyperkubus, beter bekent als een vierkant | Figuur 13 3D hyperkubus, beter bekent als een kubus | Figuur 14 4D hyperkubus, beter bekent als een tesseract |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Figuur 15 2D simplex, ofwel een driehoek | Figuur 16 3D simplex, ofwel een tetraëder | Figuur 17 4D simplex, ofwel een pentachoron |

Een voordeel van simplices is dat er veel minder hoekpunten zijn om te berekenen. Bij Perlin noise is het aantal hoekpunten in n dimensies gelijk aan 2n. Bij simplex noise is dit maar n+1. Een bijkomend voordeel is dat lineare interpolatie volledig wegvalt. Simplex noise gebruikt een radiale dempingsfunctie om de tussenwaardes te berekenen.

De grootste moeilijkheid bij simplex noise is het vinden van de omliggende rasterpunten. De meest gebruikte techniek is om eerst alle rasterpunten te projecteren op een 2D vlak. De berekening van de omliggende hoekpuntent is vrij complex en zal niet worden besproken in dit verslag. Nadat alle hoekpunten bekend zijn, is de rest analoog met Perlin noise. Bereken daarna voor elk hoekpunt het dot product van de afstandsvector en de vector in het hoekpunt. De laatste stap gebruikt een dempingsfunctie om de uiteindelijk waarde te bekomen. Deze vervangt de interpolatie die nodig is bij Perlin noise en is ook een stuk sneller. (Archer, 2011)

<https://www.bit-101.com/blog/2021/07/perlin-vs-simplex/>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Simplex_noise>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Simplex>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Hypercube>

(2.5) <https://micsymposium.org/mics_2011_proceedings/mics2011_submission_30.pdf>

### Eigenschappen

* Sneller dan Perlin noise
* Schaalt zeer goed met meerdere dimensies
* Gebruikt een beetje geheugen voor de permutatietabel en vectoren
* Geeft een beter resultaat dan Perlin noise

## Toepassingen

# Fractal noise

Fractal noise, of layered noise, is een veelgebruikte techniek om noise meer ‘diepte’ te geven. De naam fractal noise komt van het meetkundig begrip ‘fractaal’. Een fractaal is een figuur die volledig zelfsymetrisch is. Dit wil zeggen dat op elke plaats een patroon zichtbaar is dat zichzelf continu herhaald tot in het oneindig. Het bekendste voorbeeld hiervan is de Mandelbrot, zie figuur 19.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| [The Amazing World of Fractals | Be Loud! - A Yizzam Blog](https://blog.yizzam.com/the-amazing-world-of-fractals/)  Figuur Voorbeeld van een fractaal | [How to Render a Fractal, Fast](https://blog.bede.io/how-to-render-a-fractal-fast/)  Figuur Mandelbrot set | [Sierpiński triangle - Wikipedia](https://en.wikipedia.org/wiki/Sierpi%C5%84ski_triangle)  Figuur 20 Driehoek van Sierpiński |

Wat heeft dit nu allemaal te maken met noise? Fractal noise werkt met verschillende lagen. Elke laag is gebaseerd op de vorige en heeft meer details. Hoe deze lagen veranderen t.o.v. elkaar is te bepalen door enkele parameters.

## Parameters / Begrippen

Het eerste belangrijk begrip is de amplitude. De amplitude van een functie geeft weer wat de maxima en minima van die functie zijn. Voor noise specifiek betekent dit hoe groot, of klein, de noisewaarde op elk punt kan zijn. Hieronder enkele voorbeelden met amplitudes 20, 100 en 300.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Figuur 21 Fractal noise met amplitude 20 | Figuur 22 Fractal noise met amplitude 100 | Figuur 23 Fractal noise met amplitude 300 |

Het tweede begrip is de frequentie. Deze parameter bepaalt hoe snel noisewaardes kunnen veranderen. Een hoge frequentie geeft veel meer details weer dan een lage frequentie. Onderstaande afbeeldingen tonen dit effect aan.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Figuur 24 Fractal noise met frequentie 1 | Figuur 25 Fractal noise met frequentie 0.5 | Figuur 26 Fractal noise met frequentie 2 |

De derde parameter is het aantal octaven. Neen, het zijn geen muzieknoten maar wel het aantal iteraties noise dat samengevoegd wordt. Hoe meer octaven, hoe meer details er zich zullen vormen. Let wel op want dit is een zware bewerking dus hou deze parameter klein. Op volgende afbeeldingen staat het verschil uitgebeeld tussen 1, 3, 6 en 10 octaven. De meeste toepassingen gebruiken vier octaven noise omdat dit het beste resultaat geeft voor de rekentijd.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Figuur 27 Fractal noise met 1 octaaf | Figuur Fractal noise met 3 octaven | Figuur Fractal noise met 6 octaven |
| Figuur 30 Fractal noise met 10 octaven |  |  |

De laatste twee parameters zijn iets complexer en hebben een verband met de voorgaande parameters. Het vierde begrip is lacunariteit en geeft weer hoe snel de frequentie stijgt per octaaf of per iteratie. Deze parameter is meestal gelijk aan twee.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Figuur Fractal noise met lacunariteit 2 | Figuur Fractal noise met lacunariteit 1 | Figuur Fractal noise met lacunariteit 3 |

Het vijfde en laatste begrip is de persistentie en bepaalt hoeveel de amplitude verminderd per octaaf. De standaardwaarde is 0,5 maar andere waarden zijn ook mogelijk.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Figuur Fractal noise met persistentie 0,5 | Figuur Fractal noise met persistentie 1 | Figuur Fractal noise met persistentie 0,1 |

<https://docs.aws.amazon.com/lumberyard/latest/userguide/component-gradients-fastnoise.html>

<https://web.archive.org/web/20220504014656/https://docs.aws.amazon.com/lumberyard/latest/userguide/component-gradients-fastnoise.html>

# Procedurally Generated Terrain

Eindelijk zitten we aan het hoofdonderwerp van dit verslag: procedurally generated terrain. Dit hoofdstuk zal tal van informatie bevatten over hoe PGT werkt met een werkende demo die geschreven is in de Unity game-engine. Vanaf nu zal ook de tekst in persoonlijke stijl geschreven zijn.

## Introductie

Eerst en vooral: wat is procedurally generated terrain (PGT)? Om dat te weten is het belangrijk om eerst uit te leggen wat procedural, of procedureel, betekent.

Procedural content is when the game will generate content either during the running of a game, or at the initial load. Be it new loot drops, game spaces, or enemy types, there are a lot of options here

*- Josh Bycer* (Bycer, 2018)

M.a.w. procedurele content betekent dat de game volledig nieuwe content genereert tijdens of voor het spelen. Verwar dit zeker niet met random generation. Dit is wanneer een game content maakt op basis van vooropgestelde onderdelen. Procedural generation heeft als groot voordeel dat developers niet alles zelf moeten maken op voorhand. Procedurally generated terrain betekent dus terrein dat is gegenereerd door een computer.

<https://www.youtube.com/watch?v=CSa5O6knuwI>

<https://www.youtube.com/watch?v=fjZAgoxFKiQ>

## 3D rendering

Er bestaan hoofdzakelijk twee verschillende technieken om een 3D-object op het scherm te tonen. De eerste manier is met voxels. Een voxel is het best vergelijkbaar met een 3D pixel.

De tweede manier is met polygons. Een polygon is een gesloten 2D figuur die bestaat uit meerdere hoekpunten, of vertices, die met elkaar verbonden zijn door zijden.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Figuur Wereld gemaakt met voxels | Figuur Verschil tussen voxels en polygons | Figuur Polygon met alle onderdelen aangeduid |

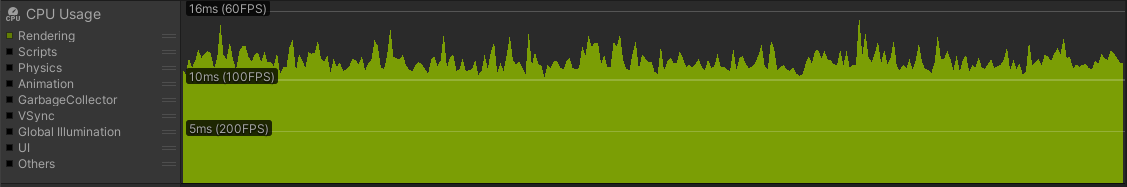
Een groot voordeel van voxels is dat ze makkelijk bewerkbaar zijn. Het is eenvoudig om voxels toe te voegen of te verwijderen van een object. Dit is een stuk moeilijker bij polygons maar die hebben dan weer als voordeel dat ze heel getailleerde figuren kunnen opslaan zonder al te veel polygonen te gebruiken.

De demo in dit project zal gebruik maken van polygons.

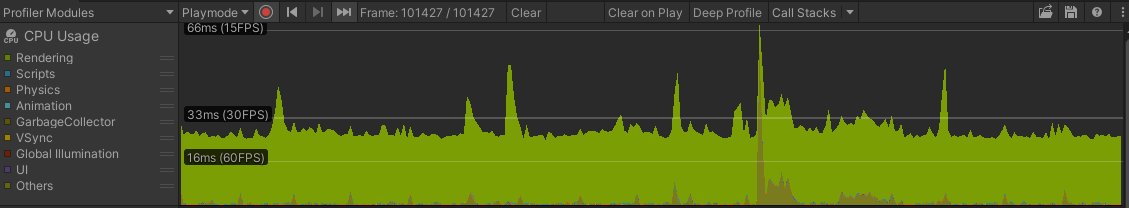
## De kubus

De eerste stap naar succesvol terrein is een kubus. In Unity bestaan er enkele standaardobjecten zoals een kubus, bol, cylinder en capsule. Je zou dan denken dat het heel eenvoudig is om terrein te genereren. Kopiëer gewoon de standaard kubus en klaar. Hoewel dit leuk klinkt, is er toch een groot probleem mee namelijk performantie. Onderstaande screenshots tonen aan hoe de performantie drastisch verslechtert naarmate het aantal blokken toeneemt.

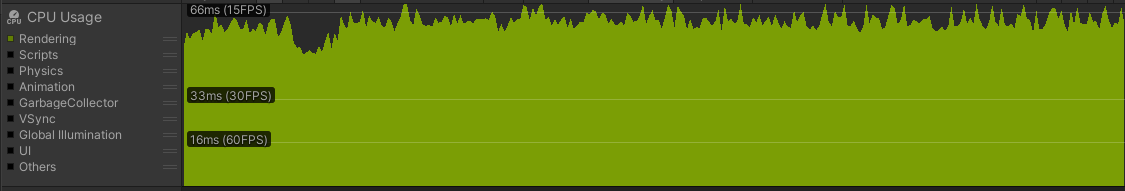
Figuur Standaardobjecten van Unity



Figuur Performantie bij ~5000 blokken



Figuur Performantie bij ~10 000 blokken



Figuur Performantie bij ~20 000 blokken

Dit is niet echt bruikbaar voor grote stukken terrein maar voorlopig volstaat deze techniek.

## Eenvoudig terrein genereren

## Noise integreren in terrein

## Geadvanceerd terrein

Meer variatie,

## Optimalisatie 1: chunks

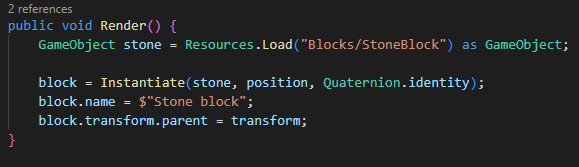
De meest eenvoudige manier om de performantie te verbeteren is door simpelweg minder blokken op het scherm te renderen.

### Chunk loading

### Chunk unloading

## Optimalisatie 2: custom mesh renderer

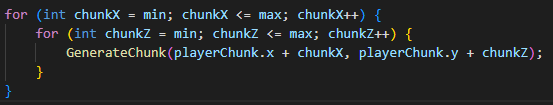
Voor: Ingebouwde cube van Unity

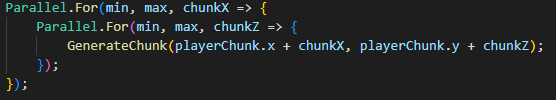


Na: custom mesh (<https://github.com/pixelreyn/VoxelProjectSeries/blob/Part2-FirstChunk/Assets/VoxelProjectSeries/Data/Container.cs>)

## Optimalisatie 3: multi-threading

Stap 1: gebruik van parallel loops





Stap 2: tasks / threads

## Problemen

# Unity demo’s

<https://noiseposti.ng/posts/2022-01-16-The-Perlin-Problem-Moving-Past-Square-Noise.html>

Unity noise functie niet goed

# Besluit

# Codefragmenten

[Codefragment 1 Interpolatie tussen twee punten i en j 4](file:///H:\Jonathan\School\3de%20hogeschool\POP\2223pop-jonathanvercammen\Verslag%20PGT.docx#_Toc119418483)

# Figurenlijst

[Figuur 1 Een 2D raster met white noise 3](file:///H:\Jonathan\School\3de%20hogeschool\POP\2223pop-jonathanvercammen\Verslag%20PGT.docx#_Toc120719349)

[Figuur 2 Een 2D raster met value noise 3](file:///H:\Jonathan\School\3de%20hogeschool\POP\2223pop-jonathanvercammen\Verslag%20PGT.docx#_Toc120719350)

[Figuur 3 Verschil tussen lineare en quadratische interpolatie 3](file:///H:\Jonathan\School\3de%20hogeschool\POP\2223pop-jonathanvercammen\Verslag%20PGT.docx#_Toc120719351)

[Figuur 4 Raster met vier punten 4](#_Toc120719352)

[Figuur 5 Celcoördinaten zoeken 4](#_Toc120719353)

[Figuur 6 Waardes van hoekpunten zoeken 4](#_Toc120719354)

[Figuur 7 Positie in cel zoeken 4](#_Toc120719355)

[Figuur 8 Bi-lineare interpolatie 4](#_Toc120719356)

[Figuur 9 Een 2D raster met Perlin noise 6](file:///H:\Jonathan\School\3de%20hogeschool\POP\2223pop-jonathanvercammen\Verslag%20PGT.docx#_Toc120719357)

[Figuur 10 gradient vectoren opzoeken 6](#_Toc120719358)

[Figuur 11 afstandsvectoren berekenen 6](#_Toc120719359)

[Figuur 12 2D hyperkubus, beter bekent als een vierkant 8](#_Toc120719360)

[Figuur 13 3D hyperkubus, beter bekent als een kubus 8](#_Toc120719361)

[Figuur 14 4D hyperkubus, beter bekent als een tesseract 8](#_Toc120719362)

[Figuur 15 2D simplex, ofwel een driehoek 8](#_Toc120719363)

[Figuur 16 3D simplex, ofwel een tetraëder 8](#_Toc120719364)

[Figuur 17 4D simplex, ofwel een pentachoron 8](#_Toc120719365)

[Figuur 18 Voorbeeld van een fractaal 11](#_Toc120719366)

[Figuur 19 Mandelbrot set 11](#_Toc120719367)

[Figuur 20 Driehoek van Sierpiński 11](#_Toc120719368)

[Figuur 21 Fractal noise met amplitude 20 11](#_Toc120719369)

[Figuur 22 Fractal noise met amplitude 100 11](#_Toc120719370)

[Figuur 23 Fractal noise met amplitude 300 11](#_Toc120719371)

[Figuur 24 Fractal noise met frequentie 1 12](#_Toc120719372)

[Figuur 25 Fractal noise met frequentie 0.5 12](#_Toc120719373)

[Figuur 26 Fractal noise met frequentie 2 12](#_Toc120719374)

[Figuur 27 Fractal noise met 1 octaaf 12](#_Toc120719375)

[Figuur 28 Fractal noise met 3 octaven 12](#_Toc120719376)

[Figuur 29 Fractal noise met 6 octaven 12](#_Toc120719377)

[Figuur 30 Fractal noise met 10 octaven 12](#_Toc120719378)

[Figuur 31 Fractal noise met lacunariteit 2 13](#_Toc120719379)

[Figuur 32 Fractal noise met lacunariteit 1 13](#_Toc120719380)

[Figuur 33 Fractal noise met lacunariteit 3 13](#_Toc120719381)

[Figuur 34 Fractal noise met persistentie 0,5 13](#_Toc120719382)

[Figuur 35 Fractal noise met persistentie 1 13](#_Toc120719383)

[Figuur 36 Fractal noise met persistentie 0,1 13](#_Toc120719384)

[Figuur 37 Wereld gemaakt met voxels 15](file:///H:\Jonathan\School\3de%20hogeschool\POP\2223pop-jonathanvercammen\Verslag%20PGT.docx#_Toc120719385)

[Figuur 38 Verschil tussen voxels en polygons 15](#_Toc120719386)

[Figuur 39 Polygon met alle onderdelen aangeduid 15](#_Toc120719387)

[Figuur 40 Standaardobjecten van Unity 15](file:///H:\Jonathan\School\3de%20hogeschool\POP\2223pop-jonathanvercammen\Verslag%20PGT.docx#_Toc120719388)

[Figuur 41 Performantie bij ~5000 blokken 15](#_Toc120719389)

[Figuur 42 Performantie bij ~10 000 blokken 16](#_Toc120719390)

[Figuur 43 Performantie bij ~20 000 blokken 16](#_Toc120719391)

# Bronvermelding

Archer, T. (2011). *Procedurally Generating Terrain.* Opgehaald van micsymposium: https://micsymposium.org/mics\_2011\_proceedings/mics2011\_submission\_30.pdf

Bycer, J. (2018, May 16). *A Study Into Replayability -- Random vs. Procedural Generation*. Opgehaald van Game Developer: https://www.gamedeveloper.com/design/a-study-into-replayability----random-vs-procedural-generation

Wikipedia. (2022, September 13). Opgehaald van White noise: https://en.wikipedia.org/wiki/White\_noise

Wikipedia. (2022, Octobre 23). Opgehaald van Linear congruential generator: https://en.wikipedia.org/wiki/Linear\_congruential\_generator

Wikipedia. (2022, October 14). *Perlin Noise*. Opgehaald van Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Perlin\_noise

Wikitionary. (2022). Opgehaald van https://en.wiktionary.org/wiki

[[1]](#footnote-1)

1. Verslag template van Richtpunt Campus Hamme [↑](#footnote-ref-1)