

# Contents

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Samenvatting</b>	<b>3</b>
2.1	1.Training van het AUGUSTUS-programma voor het ontdekken van nieuwe genmodellen en hun patronen. . .	3
2.2	2.. De training van het AUGUSTUS-programma met proteïne van langere evolutionaire afstand . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Alignment. Ruwe gegevens inspecteren</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>GenemarkET. Model opbouwen (protocol 1). mRNA pijplijn</b>	<b>9</b>
4.1	Deel 1. Model opbouwen . . . . .	9
4.2	Etrain (protocol7) . . . . .	12
<b>5</b>	<b>ProtHints en de eiwitpijplijn</b>	<b>14</b>
5.1	ProtHints . . . . .	14
5.2	Protocol 2. Het creëren van genstructuren voor training op basis van eiwitten. . . . .	18
5.3	GenomeThreader . . . . .	18
5.4	Protocol 6.Verwijderen van Redundant Genstructuren (protocol 6) . . . . .	19
5.5	Trainingsset van Proteins.Etrain . . . . .	28
<b>6</b>	<b>Prediction met behulp van extrinsiek bewijs (Protocol 15)</b>	<b>33</b>
<b>7</b>	<b>Identificatie en visualisatie</b>	<b>42</b>
7.1	Gen-identificatie (nucleotide niveau) . . . . .	42
7.2	Visualisatie . . . . .	51
7.3	GenViz . . . . .	51
7.4	JBrowse . . . . .	51
7.5	Artemis . . . . .	52
<b>8</b>	<b>Bijlage</b>	<b>53</b>
	<b>References</b>	<b>60</b>

## 1 Inleiding

Dit onderwerp van onderzoek is heel belangrijk, omdat er in de experimentele wetenschap momenteel gezocht wordt naar alternatieven voor het gebruik van dieren in verschillende laboratoriumexperimenten. Aangezien verschillende wormsoorten een belangrijke rol spelen als modellen in medisch en biologisch onderzoek, is het cruciaal om hun genetisch materiaal te onderzoeken. Dit project richt zich specifiek op de analyse van het genoom van de soort Lumbricida. De soort Lumbricus Terrestris hoort tot de fylogenetische familie Annelida, Clitellata, Oligochaeta, Crassiclitellata, Lumbricina, Lumbricidae

(Erxleben and Grüning 12:19:56 +0000). De soort ringwormen (Annelida) zijn de oudste evolutionaire groep. De musculatuur lijkt hier sterk op de dwarsgestrepte musculatuur van dieren.(Pilato n.d.). Daarom is deze soort een van de mensrelevante modellen voor laboratoriumonderzoek.

Genoomannotatie is het proces dat gericht is op het identificeren van functionele componenten binnen een DNA-sequentie. Dit proces van annotatie biedt inzicht in het genoom door de plaats en functie van genen te specificeren, waaronder genen die eiwitten coderen of andere functies vervullen, evenals de bijbehorende regulerende elementen. De assemblage is altijd gebaseerd op de reads die zijn gegenereerd tijdens het sequentieproces. Het proces van genoomassemblage houdt in dat het originele genoom wordt gereconstrueerd uit kleine stukjes DNA, verkregen door middel van sequencing(“De Novo Assembly Tutorial” n.d.). Deze reads zorgen ervoor dat het oorspronkelijke genoom meestal meerdere keren wordt gedekt. Bij het analyseren van genomische en metagenomische gegevens, is de gebruikelijke oplossing een verzameling contigs. Een contig is een aaneengeschakelde nucleotidesequentie. Deze contigs kunnen worden samengevoegd tot scaffolds, waarbij scaffolds bestaan uit een reeks contigs met een schatting van de afstanden tussen deze sequenties(“The NCBI Eukaryotic Genome Annotation Pipeline” n.d.) processen van genomassemblage en annotatie zijn geïntegreerd in een groter geheel dat zich richt op de identificatie van het genoom. Het annoteren van genoom is nog steeds een proces dat veel tijd kost en verschillende soorten sequentieanalyses samenbrengt. Gezien de grootte en complexiteit van genomen, is de eerste stap naar volledige genomassemblage meestal het verkrijgen van sequencinggegevens om ruwe assemblage en voorspelling van genmodellen te verkrijgen.

Het hele annotatieproces bestaat over het algemeen uit de volgende stappen : 1) Het maskeren van sterk repetitieve elementen in de genoomsequentie 2) het gebruik van transcripten en eiwitten van dezelfde of verwante soorten om ab initio te voorspellen . De bekende transcripten en eiwitten zijn opgeslagen in genetische databases zoals NCBI en BLAST. 3) gebruik van zoekalgoritmen om mogelijke genstructuren te identificeren; 4) het combineren van deze gegevens om een eerste reeks genmodellen te creëren; 5) filteren van de resultaten op kwaliteit om de meest waarschijnlijke genmodellen te identificeren die volledige eiwitcoderende regio's.(ncbi.nlm.nih.gov n.d.) . In eerste instantie wordt de kwaliteitsselectie uitgevoerd met behulp van een set positieve controles voor het programma. Na het voltooiën van deze controles wordt het percentage fout-positieven resultaten duidelijk zichtbaar.

Een overzicht van publiek beschikbare genomen en annotaties in de soort *Lumbricus terrestris*.

Hoewel er in de bestaande literatuur slechts een beperkt aantal studies is dat de assemblage en annotatie van het genoom van *Lumbricus terrestris* behandelt, zijn er wel talrijke beschrijvingen van de genoomannotatie van andere organismen. Voor de soorten *C.Elegans* en *Lubricus Rubellis* is er bijvoorbeeld een volledige annotatie. Voor het eerst wordt een gedetailleerde

genoomassemblage van de genen van een soort *Lumbricus terrestris* gepubliceerd op 30 oktober (Blaxter, Spurgeon, and Kille 2023a). Door de innovatieve long-read sequencing methoden van Pacific Biosciences hebben de wetenschappers het genoom gesequenced en gepubliceerd. Hoewel het gepubliceerde genoom compleet is op sequentieniveau, is de analyse van de annotaties erg fragmentarisch. Deze genoomassemblage is de eerste die voor het publiek beschikbaar is. Het project legt de focus op het verder onderzoeken van de metadata van genoomassemblages. Tot nu toe zijn er in de literatuur geen uitgebreide en systematische studies gedaan over de annotatie van het *Lumbricus terrestris* genoom.

## 2 Samenvatting

### 2.1 1.Training van het AUGUSTUS-programma voor het ontdekken van nieuwe genmodellen en hun patronen.

De training van AUGUSTUS vond plaats in verschillende stappen. In het begin werd de predictor uitgevoerd met de standaardinstellingen voor *caenorhabditis*, wat leidde tot 11.000 voorlopige genmodellen voor één chromosoom, maar met een vrij lage nauwkeurigheid in de voorspellingen. Voor het opstellen van een eerste trainingsset van genen werden RNA-sequencingdata gebruikt. De transcriptomereads werden met TopHat op het genoom gemapt (zie documentatie protocol1, data\_processing). Dit resulteerde in 9.953 voorspelde genmodellen per chromosoom op basis van het transcriptoom. Gemiddeld waren de genen ongeveer 5.146 baseparen lang, en elk gen had meestal rond de 3,2 exons (zie protocol1, data\_processing, genemarkES, genemark.average\_gene\_length.out). De exons waren gemiddeld 1.719 baseparen, terwijl de introns gemiddeld 4.760 baseparen lang waren.

Daarna werden de genensets gefilterd met het Augustus-programma filterGenemark.pl. Na de filtratie bleven er 1.975 genen over op één chromosoom. Etrain werd uitgevoerd met genen die uit het transcriptoom kwamen. De uiteindelijke parameters werden gebruikt om de gff-annotatie te genereren. Een de novo-model met hoge specificiteit en sensitiviteitsscores van 8-9 voor de *Lumbricus Terrestris* werd verkregen via de mRNA-pijplijn.

### 2.2 2.. De training van het AUGUSTUS-programma met proteïne van langere evolutionaire afstand

Het AUGUSTUS-programma is getraind met proteïne die een langere evolutionaire afstand hebben. Hiervoor is een database uit Ortho DB, Arthropoda (“Bioinformatics Web Server - University of Greifswald” n.d.) gebruikt. Deze database is voorbereid met “ProtHints”, wat een onderdeel is van de Braker-pipeline(“Gaius-Augustus/BRAKER” [2018] 2024). Voor de

BLAST-analyse werd de versie ncbi-blast-2.16.0+ toegepast (zie protocol 2 documentatie). De OrthoDB-database diende als referentie. Om redundantie te verminderen, zijn alle trainingsgen aminozuursequenties met elkaar vergeleken en zijn alleen die eiwitsequenties behouden die minder dan 80% redundant zijn met andere sequenties in de set (zie protocol 2, scripts en documenten). Hieruit is een model (species) afgeleid dat de annotatie heeft opgeleverd.

Na het verwijderen van redundante genstructuren in de proteïne-pijplijn, zijn de specificiteit en gevoeligheid gestegen van 0,01 naar 0,4-0,5 punten voor het de novo-model van de eiwitpijplijn.

### 3 Alignment. Ruwe gegevens inspecteren

Voor de Alignment zijn Bowtie en Tophat gebruikt. Het transcriptome ID49 is afkomstig van Project: PRJEB59399(“ENA Browser” n.d.), dat een verzameling genomische en transcriptomische data bevat voor *Lumbricus terrestris*, ook wel de gewone regenworm genoemd. Dit project is opgezet om de assemblage en annotatie van het genoom te ondersteunen. Je kunt de ruwe gegevens hier bekijken: <https://www.ebi.ac.uk/ena/browser/view/PRJEB59399>. Reference genoom: [https://ftp.ensembl.org/pub/rapid-release/species/Lumbricus\\_\\_terrestris/GCA\\_949752735.1/ensembl/genome/](https://ftp.ensembl.org/pub/rapid-release/species/Lumbricus__terrestris/GCA_949752735.1/ensembl/genome/)

Eerst wordt de index opgebouwd met bowtie2. Daarna vindt de Alignmenet plaats met Tophat. Cufflinks voegt alle reads samen tot transcripties met: cufflinks accepted\_hits.bam.

```
bowtie2-build -f Lumbricus_terrestris-GCA_949752735.1-softmasked.fa lumter --large-index
```

```
tophat lumter sample_1.fastq sample_2.fastq \  
--output-dir TopHAT \
```

```
cufflinks accepted_hits.bam
```

Cufflink zal transcripts.gtf genereren, terwijl TopHat accepted\_hits.bam aanmaakt met de resultaten van de uitlijning en een lijst van uitlijningen in junctions.bed. Elke junction bestaat uit twee verbonden BED-blokken, waarbij elk blok zo lang is als de maximale overhang van een lees die de junction overspant. De score is het aantal uitlijningen dat de junction overspant. Het uitvoerbestand introns.gff bevat informatie over de strengen die gebruikt kan worden voor ET-training.

OX457036.1 TopHat2 intron 253060 254504 12 + . .

Ten eerste moeten we de ruwe gegevens bekijken die we hebben van de genoom-Alignment . Elke junction bestaat uit twee verbonden BED-blokken, waarbij elk blok zo lang is als de maximale overhang van een lees die de junction overspant. De score is het aantal uitlijningen dat de junction overspant. Junctions.bed (TopHat, protocol1, script2):

```
head(junctions)
```

```
##           V1      V2      V3           V4 V5 V6      V7      V8      V9 V10      V11
## 1 OX457036.1 135689 136300 JUNC000000001 16 - 135689 136300 255,0,0 2 143,22
## 2 OX457036.1 136278 139661 JUNC000000002 13 - 136278 139661 255,0,0 2 22,37
## 3 OX457036.1 139624 150988 JUNC000000003 9 - 139624 150988 255,0,0 2 37,70
## 4 OX457036.1 150918 153142 JUNC000000004 1 - 150918 153142 255,0,0 2 70,16
## 5 OX457036.1 150929 156647 JUNC000000005 1 - 150929 156647 255,0,0 2 59,92
## 6 OX457036.1 155453 155919 JUNC000000006 2 - 155453 155919 255,0,0 2 92,59

##           V12
## 1 0,589
## 2 0,3346
## 3 0,11294
## 4 0,2208
## 5 0,5626
## 6 0,407
```

Cufflink verwerkt de uitgelijnde RNA-Seq-reads die van Tophat komen en bouwt ze op in de transcripten en exonen.

```
transcripts <- read.table("lumbricus/protocol1/data_processing/TOPHAT/transcripts.gtf", sep="\t")

colnames(transcripts) <- c("chr", "versie", "feature", "start", "end", "score", "strain", "v8")

transcripts %>% select(1:5) %>% head()
```

```
##           chr      versie      feature      start      end
## 1 OX457036.1 Cufflinks transcript 109191 109546
## 2 OX457036.1 Cufflinks          exon 109191 109546
```

```
## 3 OX457036.1 Cufflinks transcript 124949 125423
## 4 OX457036.1 Cufflinks          exon 124949 125423
## 5 OX457036.1 Cufflinks transcript 135006 155436
## 6 OX457036.1 Cufflinks          exon 135006 135832
```

1. We gaan de outputbestanden van Tophat+Cufflink, namelijk accepted\_hits.bam en junctions.bed, in IGV zetten, samen met het transcriptbestand van Cufflinks. Eerst hebben we een bed-bestand nodig.

```
awk '{if($3=="exon" ) {print $1,$4,$5, $7, $3 } }' transcripts.gtf > exon_ids.bed

awk '{if($3=="transcript" ) {print $1,$4,$5, $7, $3 } }' transcripts.gtf > transcripts_ids.b
```

1. Bekijk de bed-bestanden voor de genoombrowser:

```
exons_ids <- read.table("lumbricus/protocol1/data_processing/TOPHAT/igv/exon_ids.bed", sep="\t")

transcript_ids <- read.table("lumbricus/protocol1/data_processing/TOPHAT/igv/transcripts_ids.bed", sep="\t")

head(exons_ids)
```

```
##                               V1
## 1 OX457036.1 109191 109546 . exon
## 2 OX457036.1 124949 125423 . exon
## 3 OX457036.1 135006 135832 - exon
## 4 OX457036.1 136279 136300 - exon
## 5 OX457036.1 139625 139661 - exon
## 6 OX457036.1 150919 150988 - exon
```

```
head(transcript_ids)
```

```
##                               V1
## 1 OX457036.1 109191 109546 . transcript
```

```
## 2 OX457036.1 124949 125423 . transcript
## 3 OX457036.1 135006 155436 - transcript
## 4 OX457036.1 135006 156649 - transcript
## 5 OX457036.1 135006 156649 - transcript
## 6 OX457036.1 135006 156649 - transcript
```

Bekijk de exonen (diepblauw) en transcripties (lichtblauw) in IGV:

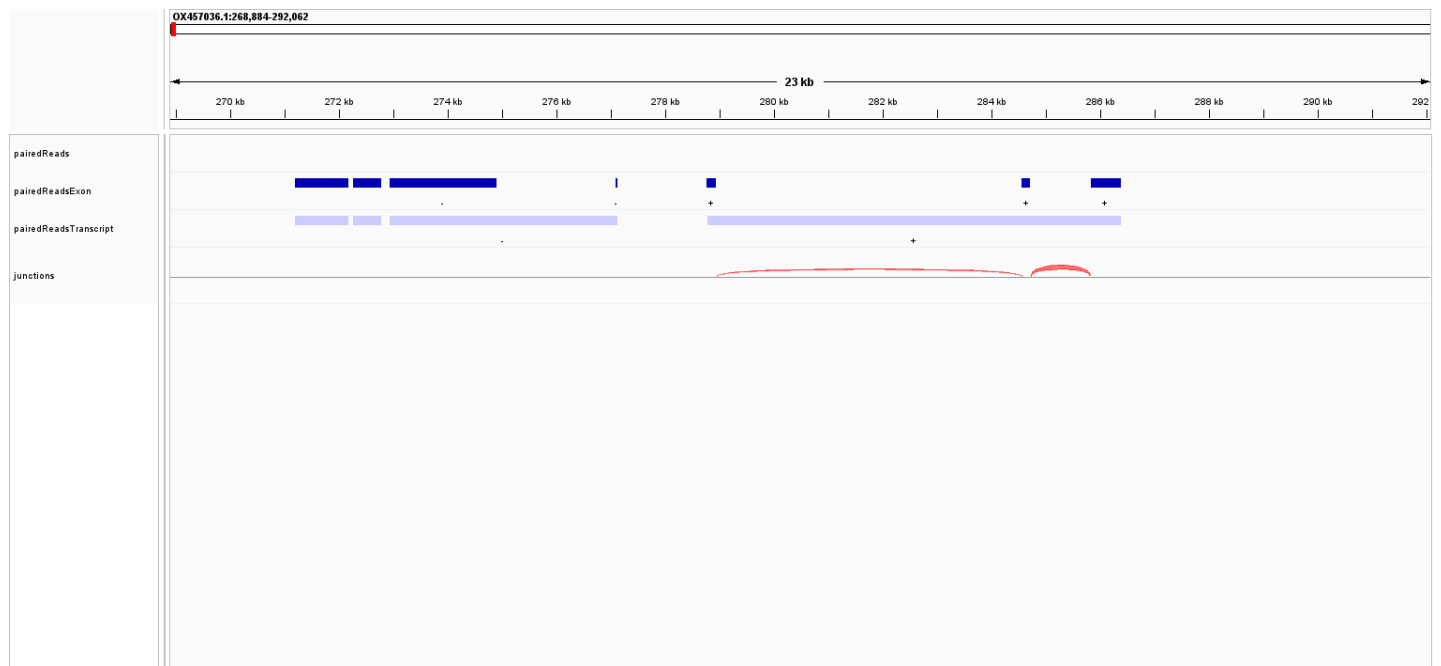


Figure 1: exon-transcripts structure chr1:23kb

Vervolgens plaatsen we junctions.bed (rood) en geaccepteerde hits of reads (grijs) op dezelfde track om de exon-intronstructuur te visualiseren.

Voordat we GeneMarkET uitvoeren, verzamelen we enkele statistieken uit de primaire analyse. Eerst bekijken we de gemiddelde introns, exonen en lengtes.

```
introns <- read.table("lumbricus/protocol1/data_processing/TOPHAT/introns.gff", sep="\t")

colnames(introns) <- c("chr", "aligner", "structure", "start", "end", "score", "strand", "v8", "v9")

head(introns)
```

```
##      chr aligner structure  start      end score strand v8 v9
```

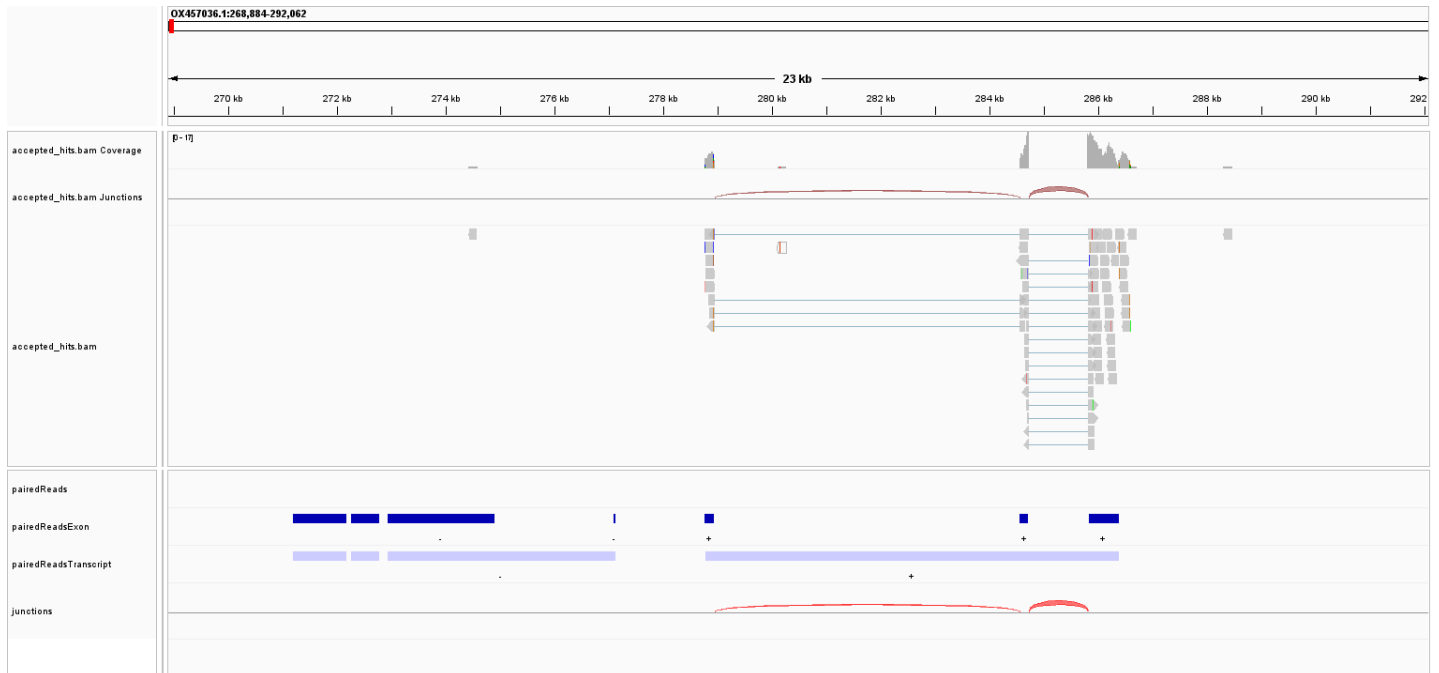


Figure 2: exon-intron structure chr1:23kb, reads in grey

```
## 1 OX457036.1 TopHat2   intron 135833 136278    16    -    .    .
## 2 OX457036.1 TopHat2   intron 136301 139624    13    -    .    .
## 3 OX457036.1 TopHat2   intron 139662 150918     9    -    .    .
## 4 OX457036.1 TopHat2   intron 150989 153126     1    -    .    .
## 5 OX457036.1 TopHat2   intron 150989 156555     1    -    .    .
## 6 OX457036.1 TopHat2   intron 155546 155860     2    -    .    .
```

```
introns_length <- introns %>% mutate(ilength=end-start)
```

```
max_intron <- max(introns_length$ilength) %>% round(digits = 1)
```

```
avr_intron <- mean(introns_length$ilength) %>% round(digits = 1)
```

```
exons <- read.table("lumbricus/protocol1/data_processing/TOPHAT/transcripts.gtf", sep="\t")
```

```
exons <- exons %>% select(1:5)
```

```
colnames(exons) <- c("chr", "aligner", "structure", "start", "end")
```

```
exons_length <- exons %>% mutate(elength=end-start)
```



```
max_exon <- max(exons_length$elength) %>% round(digits = 1)
```

```
max_exon
```

```
## [1] 255549
```

```
avr_exon <- mean(exons_length$elength) %>% round(digits = 1)
```

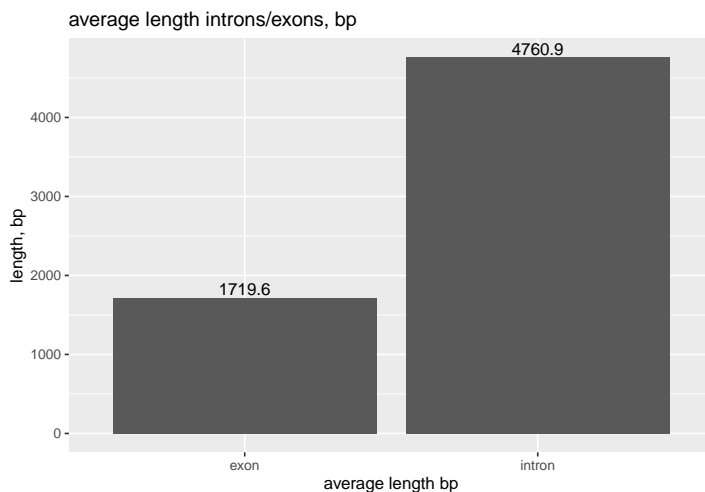
maximale lengte van intron :  $2.91919 \times 10^5$

gemiddelde intronlengte 4760.9

maximale lengte van exon :  $2.55549 \times 10^5$

gemiddelde lengte exon 1719.6

```
plot
```



## 4 GenemarkET. Model opbouwen (protocol 1). mRNA pijplijnne

### 4.1 Deel 1. Model opbouwen

Het script `bed_to_gff.pl` van GeneMarkES maakt `introns.gff` aan vanuit de `TopHat junctions.bed`. Dit bestand bevat informatie over de strengen en kan direct gebruikt worden met GeneMarkET (protocol 1, script 2).

```
introns <- read.table("lumbricus/protocol1/data_processing/TOPHAT/introns.gff", sep="\t")

colnames(introns) <- c("chr", "aligner", "structure", "start", "end", "score", "strand", "v8", "v9")

head(introns)
```

```
##          chr aligner structure  start    end score strand v8 v9
## 1 OX457036.1 TopHat2   intron 135833 136278    16      -  .  .
## 2 OX457036.1 TopHat2   intron 136301 139624    13      -  .  .
## 3 OX457036.1 TopHat2   intron 139662 150918     9      -  .  .
## 4 OX457036.1 TopHat2   intron 150989 153126     1      -  .  .
## 5 OX457036.1 TopHat2   intron 150989 156555     1      -  .  .
## 6 OX457036.1 TopHat2   intron 155546 155860     2      -  .  .
```

Om genemark met introns.gff uit te voeren:

```
../../gmes_petap.pl --verbose --sequence genome.fa --ET introns.gff
```

2. GeneMarkET gaat een ghmm-model en genemark.gtf produceren. Dit bestand(gtf) bevat informatie over de start- en eindcoördinaten van genen, die in de daaropvolgende stap gebruikt zal worden.

```
cut -f 2,3,4,5 lumbricus/protocol1\
/data_processing/GeneMarkES/genemark.gtf | head
```

```
## bash: cannot set terminal process group (1286504): Inappropriate ioctl for device
## bash: no job control in this shell
## cut: lumbricus/protocol1: Is a directory
## cut: /data_processing/GeneMarkES/genemark.gtf: No such file or directory
```

1. Genemark maakt gebruik van filterGenemark.pl voor kwaliteitscontrole. Dit zorgt ervoor dat alleen de genmodellen die geregistreerd zijn in de exon-intronstructuur behouden blijven. (protocol1, script3) Na het filteren van de primaire resultaten wordt er een set van 1.975 genmodellen voor één chromosoom opgeslagen in genemark.f.good.gtf.

```
cut -f 2,3,4,5 lumbricus/protocol1/data_processing/GeneMarkES/genemark.f.good.gtf | head
```

```
## bash: cannot set terminal process group (1286504): Inappropriate ioctl for device
## bash: no job control in this shell
## GeneMark.hmm3      stop_codon  51009   51011
## GeneMark.hmm3      CDS 51009   54860
## GeneMark.hmm3      exon      51009   54860
## GeneMark.hmm3      start_codon 54858   54860
## GeneMark.hmm3      stop_codon  82883   82885
## GeneMark.hmm3      CDS 82883   86734
## GeneMark.hmm3      exon      82883   86734
## GeneMark.hmm3      start_codon 86732   86734
## GeneMark.hmm3      stop_codon  116110  116112
## GeneMark.hmm3      CDS 116110  117048
## bash: [1286561: 2 (255)] tcsetattr: Inappropriate ioctl for device
```

1. Genemark.f.good.gtf is nu klaar om een trainingsset te maken van (protocol1, stap 4 en 5). Eerst wordt gtf omgezet naar gb. Zie protocol1, data\_processing, Bonafide.

```
gff2gbSmallDNA.pl bonafide.gtf genome.fa 450 tmp.gb
filterGenesIn_mRNAname.pl bonafide.gtf tmp.gb > bonafide.gb
```

```
cat lumbricus/protocol1/data_processing/bonafide/bonafide.gb | head
```

```
## bash: cannot set terminal process group (1286504): Inappropriate ioctl for device
## bash: no job control in this shell
## LOCUS      OX457036.1 Lumbricus terrestris genome assembly, chromosome: 1_50559-55310   4752 bp   DNA
## FEATURES          Location/Qualifiers
##      source      1..4752
##      mRNA        complement(451..4302)
```

```
##                               /gene="1_t"
##      CDS                     complement(451..4302)
##                               /gene="1_t"
## BASE COUNT      1219 a   994 c   853 g   1655 t   31 n
## ORIGIN
##      1 catccgtctt tttggaatcg atttttatcg tattctgaaa tgttcttatc aatcttacac
## bash: [1286577: 2 (255)] tcsetattr: Inappropriate ioctl for device
```

## 4.2 Etrain (protocol7)

Op basis van de genen die we hebben verkregen via mRNA-alignment, gaan we een trainingsset opstellen om een nieuw model te trainen. In de vorige sectie hebben we bonafide.gb aangemaakt, waarin 1.975 geverifieerde genen voor een specifiek chromosoom zijn opgenomen. We zijn nu klaar om de ontwikkeling van een nieuwe species te starten.

```
conda activate c
new_species.pl --species=lumter
```

```
etraining --species=lumter bonafide.gb &> bonafide.out
```

Check for Stop Codonds:

```
grep -c "Variable stopCodonExcludedFromCDS set right" bonafide.out
```

0

We hoeven geen bad lijst op te stellen, omdat er geen stopcodons in de CDS aanwezig zijn.

```
grep -c LOCUS bonafide.gb
```

1975

Het randomSplit.pl-script splitst de data op in twee segmenten: een kleinere sectie genaamd test.gb voor trainingsdoeleinden, en een grotere sectie die train.gb wordt genoemd voor de evaluatie van het trainingsproces.

```
randomSplit.pl bonafide.gb 200

mv bonafide.gb.test test.gb

mv bonafide.gb.train train.gb
```

```
etrainig --species=lumter train.gb &> etrain.out
```

Deze configuratie kan worden aangepast in het configuratiebestand (map config, species, lumter\_parameters.cfg).

tag: 511 (0.259) taa: 700 (0.354) tga: 764 (0.387)

Evaluatie van de voorspelling:

```
augustus --species=lumter test.gb > test.out
```

\*\*\*\*\* Evaluation of gene prediction \*\*\*\*\*

-----\														
sensitivity			specificity											
-----														
nucleotide level	0.963		0.972											
-----/														
-----\														
#pred			#anno			FP = false pos.			FN = false neg.					
total/			total/			TP			sensitivity			specificity		
unique			unique			part			ovlp			wrng		
-----														
						78			87					
exon level	389	398	311	-----			-----			0.781	0.799			
			389	398		56	6	16	56	6	25			
-----/														

```

-----\
transcript | #pred | #anno | TP | FP | FN | sensitivity | specificity |
-----|
gene level | 389 | 398 | 311 | 78 | 87 | 0.781 | 0.799 |
-----/

# total time: 31.2

# command line:

# augustus --species=wormETO test.gb

```

See also: lumbricus/protocol1/test/test.out

Hier eindigt onze mRNA-pijplijn, waarbij we een hoge specificiteitscore hebben bereikt voor het model dat we hebben gemaakt voor Lumbricus Terrestris. Dit model zal dienen voor visualisatie.

## 5 ProtHints en de eiwitpijplijn

### 5.1 ProtHints

Er zijn veel genen in verschillende genoom die door hun evolutionaire oorsprong met elkaar verbonden zijn. De gelijkenis tussen eiwitsequenties is goed zichtbaar. OrthoDB is een belangrijke bron voor eiwitten en dient als een database die eiwitten met een uitgebreider evolutionair verleden omvat. Zie protocol 2.

```
../bin/prothint.py ../OX457036.1.fasta ../Arthropoda.fa
```

```
grep ">" seed_proteins.faa | wc -l
```

14733

Prothint heeft een database met eiwitten voorbereid voor startAlign.pl. Het resultaat was 14.733 eiwitten in het bestand seed\_proteins.faa. Dit seed-bestand kan worden gebruikt met startAlign.pl om een gth.concat.alg-object te verkrijgen, dat vervolgens wordt gebruikt om bonafide.gb te genereren.

```
head lumbricus/protocol2/data_processing/ProtHints/seed_proteins.faa
```

```
## bash: cannot set terminal process group (1286504): Inappropriate ioctl for device
```

```
## bash: no job control in this shell
```

```
## >6249_g
```

```
## MPSVSGLIEMMMMTATITVMMTVTTVRIVERLGWGSYDTGDGDDDDDDDDDDDDDDDDDDDDDDDDDDDDSSNNNSSNPPQVTAECLRRELRRCRHRFRSTSSEMTAPPAASA
```

```
##
```

```
## >10626_g
```

```
## MLGRGDCERKKQNGILETAIHEHAWLQYLEGTDERNKGKSKAGNLKAKREKLQKMRKGDIEEIGLLRGFAERKEKQGETEGLTGQVEEMEIDGPTTEKARHCLVAK
```

```
##
```

```
## >2633_g
```

```
## MSSAAHVNASRRQQRQTINVRQRKDGEGRRLKRGVLVGNSDLTVNWWKATRCRPVPLRYQGVSNETLRMNCNSTSGEGRFGTAIAIGVRRQKKGAKRQKDEKL
```

```
##
```

```
## >1749_g
```

Naast het seed\_proteins.faa genereert protHints een prothint\_augustus.gff hintsbestand dat je direct kunt gebruiken met augustus.

```
head lumbricus/protocol2/data_processing/\
```

```
ProtHints/prothint_augustus.gff
```

```
## bash: cannot set terminal process group (1286504): Inappropriate ioctl for device
```

```
## bash: no job control in this shell
```

```
## OX457036.1 ProtHint stop 51009 51011 2 - 0 src=P;mult=9;pri=4;al_score=0.163636;
## OX457036.1 ProtHint start 52806 52808 2 - 0 src=P;mult=2;pri=4;al_score=0.2;
## OX457036.1 ProtHint intron 53104 53221 2 - . src=P;mult=1;pri=4;al_score=0.361685;
## OX457036.1 ProtHint intron 53515 53655 0 - . src=P;mult=1;pri=4;al_score=0.108387;
## OX457036.1 ProtHint start 55225 55227 0 - 0 src=P;mult=1;pri=4;al_score=0.104132;
## OX457036.1 ProtHint stop 82883 82885 2 - 0 src=P;mult=11;pri=4;al_score=0.163636;
## OX457036.1 ProtHint intron 84978 85095 2 - . src=P;mult=1;pri=4;al_score=0.361685;
## OX457036.1 ProtHint intron 85389 85529 0 - . src=P;mult=1;pri=4;al_score=0.108387;
## OX457036.1 ProtHint start 87099 87101 0 - 0 src=P;mult=1;pri=4;al_score=0.104132;
```

```
## OX457036.1 ProtHint intron 144544 144597 0 + . src=P;mult=1;pri=4;al_score=0.13595;
```

2. We kunnen augustus meteen draaien met de prothint\_augustus.gff die door de eiwitten zijn gemaakt, voordat we de trainingsset aanpakken.

```
augustus --species=lumter\  
--predictionStart=2000000 --predictionEnd=3000000\  
OX457036.1.fasta\  
--extrinsicCfgFile=extrinsic.cfg\  
--hintsfile=prothint_augustus.gff \  
> augustus.hints.prots.orthodb.arthropoda.2-3mb.gff
```

Hierdoor ontstaat een annotatie voor 2mb-3mb van het chromosoom, gebaseerd op de eiwitindicaties van eiwitten die een lange evolutionaire afstand hebben.

```
cat lumbricus/protocol2/data_processing\  
/ProtHints/augustus.hints.prots.orthodb.arthropoda.2-3mb.gff | \  
tail -n 50
```

```
## bash: cannot set terminal process group (1286504): Inappropriate ioctl for device  
## bash: no job control in this shell  
## # 3'UTR exons and introns: 0/0  
## # hint groups fully obeyed: 0  
## # incompatible hint groups: 2  
## # P: 2 (407821_0:000ad4_584_g)  
## # end gene g81  
## ###  
## # start gene g82  
## OX457036.1 AUGUSTUS gene 2981898 2982863 1 - . g82  
## OX457036.1 AUGUSTUS transcript 2981898 2982863 1 - . g82.t1  
## OX457036.1 AUGUSTUS stop_codon 2981898 2981900 . - 0 transcript_id "g82.t1"; gene_id "g82";  
## OX457036.1 AUGUSTUS CDS 2981898 2982863 1 - 0 transcript_id "g82.t1"; gene_id "g82";
```



```

## OX457036.1  AUGUSTUS      start_codon 2982861 2982863 .   -   0   transcript_id "g82.t1"; gene_id "g82";
## # protein sequence = [MDDEETVPYSLPRTTSTPATKGAAEASAFGQSRAEAYRTFEDPEYQFLDLPKKDRKKVLISSETTVSDSKRWEDASHLM
## # GPRKIQMKPGKFDGTSSLESFLTQFEVCARHNRWDDSDKVDFLRCAKDKAATQLLWDFGARADVTDQLVGRLRQRYGVEGQAETYRAQLYRRQRAD
## # ESLSDLHDIRRLVVLAYPVPSNETTEIVARDSFLEAIRDRELSLKVREPKSIDEAYRVALRLSAYQQMTDVEDRRRPPNVRVQTQEADAGNQLQT
## # QLDGFLAAQRKWQRDFEDRISLQLNELRNQSQTHPDVAPATRNPAASP]
## # Evidence for and against this transcript:
## # % of transcript supported by hints (any source): 100
## # CDS exons: 1/1
## #      P:      1
## # CDS introns: 0/0
## # 5'UTR exons and introns: 0/0
## # 3'UTR exons and introns: 0/0
## # hint groups fully obeyed: 0
## # incompatible hint groups: 1
## #      P:      1 (407821_0:000ad4_584_g)
## # end gene g82
## ###
## # start gene g83
## OX457036.1  AUGUSTUS      gene      2983320 2984174 0.91   -   .   g83
## OX457036.1  AUGUSTUS      transcript 2983320 2984174 0.91   -   .   g83.t1
## OX457036.1  AUGUSTUS      stop_codon 2983320 2983322 .   -   0   transcript_id "g83.t1"; gene_id "g83";
## OX457036.1  AUGUSTUS      CDS 2983320 2984174 0.91   -   0   transcript_id "g83.t1"; gene_id "g83";
## OX457036.1  AUGUSTUS      start_codon 2984172 2984174 .   -   0   transcript_id "g83.t1"; gene_id "g83";
## # protein sequence = [MEKAGLYFNLKKTCLMTTENWTSFEVDGEEMKVVTCTCFGAMIENDGGCERYCGSLAGGINFFAVCVFFACERTCL
## # SEPLVASSSCPLEPAPSSRLFARSNLPLRAARCLFELPDRTCPSEPPVRCSSRTCPSEPLAASSSCPLEPAPPSRLSACSGRLRPLRAASSLFELLAR
## # TSLFRFTAESNLFVRAACLLLRGTGLETYKRRKKKKPSFAVGIEVGESQSLRVNPSGVSQRNEKGSSSSVVRSPPRKVISSIRQSEVSSSFKLRLKL
## # RLNSGQFVVE]
## # Evidence for and against this transcript:
## # % of transcript supported by hints (any source): 0
## # CDS exons: 0/1

```

```
## # CDS introns: 0/0

## # 5'UTR exons and introns: 0/0

## # 3'UTR exons and introns: 0/0

## # hint groups fully obeyed: 0

## # incompatible hint groups: 0

## # end gene g83

## ###

## # command line:

## # augustus --species=lumter --predictionStart=2000000 --predictionEnd=3000000 OX457036.1.fasta --extrinsicC
```

## 5.2 Protocol 2. Het creëren van genstructuren voor training op basis van eiwitten.

### 5.3 GenomeThreader

We hebben 14.733 eiwitten verzameld uit de eerdere secties. Nu gaan we een trainingsset opzetten met deze eiwitten. Uit de oorspronkelijke 14.733 eiwitten hebben we een klein deel gekozen om de trainingsset te vormen.

```
startAlign.pl --genome OX457036.1.fasta \
--prot seed_proteins.faa \
--pos OX457036.1:1-10000000 \
--prg gth
```

2. Hierdoor ontstaat het object `gth.concat.aln`, dat vervolgens kan worden geconverteerd naar het gtf-formaat (`protocol2`, `data_processing`, `protHints`).

```
gth2gtf.pl gth.concat.aln bonafide.gtf
```

Converting GenomeThreader file `align_gth/gth.concat.aln` to gtf format

Controleer het gtf-bestand :

```
head lumbricus/protocol2/data_processing/Bonafid/bonafide.gtf
```

```
## bash: cannot set terminal process group (1286504): Inappropriate ioctl for device
```

```
## bash: no job control in this shell
```

```
## OX457036.1   gth CDS 51009   54860   .   -   0   gene_id "OX457036.1_g_gene1_mRNA1"; transcript_id "OX457036.1_g_gene1_mRNA1";
## OX457036.1   gth exon   51009   54860   .   -   0   gene_id "OX457036.1_g_gene1_mRNA1"; transcript_id "OX457036.1_g_gene1_mRNA1";
## OX457036.1   gth CDS 82883   86734   .   -   0   gene_id "OX457036.1_g_gene2_mRNA2"; transcript_id "OX457036.1_g_gene2_mRNA2";
## OX457036.1   gth exon   82883   86734   .   -   0   gene_id "OX457036.1_g_gene2_mRNA2"; transcript_id "OX457036.1_g_gene2_mRNA2";
## OX457036.1   gth CDS 104626  104645  .   -   2   gene_id "OX457036.1_g_gene3_mRNA3"; transcript_id "OX457036.1_g_gene3_mRNA3";
## OX457036.1   gth exon   104626  104645  .   -   2   gene_id "OX457036.1_g_gene3_mRNA3"; transcript_id "OX457036.1_g_gene3_mRNA3";
## OX457036.1   gth CDS 104696  104750  .   -   0   gene_id "OX457036.1_g_gene3_mRNA3"; transcript_id "OX457036.1_g_gene3_mRNA3";
## OX457036.1   gth exon   104696  104750  .   -   0   gene_id "OX457036.1_g_gene3_mRNA3"; transcript_id "OX457036.1_g_gene3_mRNA3";
## OX457036.1   gth CDS 104904  105745  .   -   2   gene_id "OX457036.1_g_gene3_mRNA3"; transcript_id "OX457036.1_g_gene3_mRNA3";
## OX457036.1   gth exon   104904  105745  .   -   2   gene_id "OX457036.1_g_gene3_mRNA3"; transcript_id "OX457036.1_g_gene3_mRNA3";
```

```
computeFlankingRegion.pl bonafide.gtf
```

Output van computeFlankingRegion.pl:

Total length gene length (including introns): 5412279. Number of genes: 1090. Average Length: 4965.39357798165 The flanking\_DNA value is: 2482 (the Minimum of 10 000 and 2482)

```
gff2gbSmallDNA.pl bonafide.gtf genome.fa 2482 bonafide.gb
```

Bonafide.gb wordt in de volgende pipeline gebruikt om redundantie te verwijderen.

## 5.4 Protocol 6.Verwijderen van Redundant Genstructuren (protocol 6)

Voor NCBI Blast, controleer de link en stel het Path in naar de Blast uitvoerbare bestanden.

```
wget ftp://ftp.ncbi.nlm.nih.gov/blast/executables/blast+/LATEST/
```

```
export PATH=$PATH :HOME/ncbi-blast-2.16.0+
```

Maak gebruik van de opgegeven commandoregel om het GTF-bestand van de trainingsgenstructuur te transformeren naar een FASTA-bestand dat de eiwitsequentie omvat.

```
gtf2aa.pl genome.fa bonafide.f.gtf prot.aa
```

Inspecteer prot.aa :

```
head lumbricus/protocol2/data_processing/Redundancy/prot.aa
```

```
## bash: cannot set terminal process group (1286504): Inappropriate ioctl for device
```

```
## bash: no job control in this shell
```

```
## >OX457036.1_t_gene395_mRNA512
```

```
## ESSLPRCCPAGRGGGSQDSIAHARCFDRRITFSMMTLVGLGKEGLKRRKGGMDGERDLNWLEGGMGGEVQNRVIGIERRY*
```

```
## >OX457036.1_t_gene508_mRNA640
```

```
## MEESRPVTPAQPSRPPSSMEVLLEAIQTNAKSTHDAMTSIQSSLQLNARDTQEAIATVELNLAVQSNVREEISSVKSIVRDTQDAISSVQSNVSDAISSVQLNVRE
```

```
## >OX457036.1_t_gene532_mRNA668
```

```
## MTCLRRIEGVTRRERIRNTEIHNRLKIQRDIVDRIQIRRMRYFGHVVRMQSGRYPKVALQGYVHGKRRRGRPRKRWMDVAEEDCLRMGLTVGEATTRAQDRDDWRLS
```

```
## >OX457036.1_t_gene891_mRNA1213
```

```
## GKGRVNGCCFWRIRSGKLVREISTFCDIEFCEFKFGRDSFEVSCRGGKMASLEELIPEFGDVRDIPSDTLRLVSETYGEEVEDVSRSQVRRMAMKPLSPKLGSA
```

```
## >OX457036.1_t_gene296_mRNA397
```

```
## WSEEPEEGDGVWLVMIVEELQKIGIHEADHSMVDHIRNEEVKLKLAGSRYLEYIIMGRRGRLAGHILRLPKERIARTAIKWVPEGGKRRRGRPRNTWRRTFKGDLERM
```

Voer een Blast uit van alle eiwitsequenties uit de vorige stap met elkaar en toon alleen de eiwitsequenties die minder dan 80% identiek zijn aan een andere sequentie in de groep.

```
aa2nonred.pl prot.aa prot.nr.aa
```

```
head lumbricus/protocol2/data_processing/Redundancy/prot.nr.aa
```

```
grep ">" lumbricus/protocol2/data_processing/Redundancy/prot.nr.aa | wc -l
```

```
## bash: cannot set terminal process group (1286504): Inappropriate ioctl for device
```

```
## bash: no job control in this shell
```

```
## >OX457036.1_t_gene753_mRNA930
```

```
## SIVGAATEVYNRMSSDFLPTPTKSHYIFNLRDLSKCIQESKQVFRFLFCHEALRVFHDRLTTSEDKMSFYAILAEIAPKFFNENADAQSFLKHPIIFGDFIKVAAPRE
```

```
## >OX457036.1_t_gene803_mRNA1030
## SQKSRASATIVVCDLDHMMIRLPHFTAKRSVEPFQSTEEQVLGRIRSFPQGSSGGPDGLRPQHLSDLVNCVEIGSELIFAITGLVNLLLKGECPEDIRPVLFGGTL
## >OX457036.1_t_gene103_mRNA135
## MSINFAQRIQMPGIERVHGVTKVRNEFNILGYSVSFRYVISVFEDRIPYRLRKEIRLTGIRNAVDIGSSENANCLYVSDYEKCVRKITRERDGGHKIIKWLTAYR
## >OX457036.1_t_gene500_mRNA632
## IMRAEIQGRLNRGRQKKSWMDMIQQDMEFLGLRKEEVRDRTTWRQRIRINGLKYYVYVYGHVSVNMKDIIIEHRLTVAELHFLKRAEILDRREKPLDVERKRQTETET
## >OX457036.1_t_gene503_mRNA635
## MCEVAEYFENGELVIFDDSDPAPSYADEMESDEMDDSKSDFPEAECAMALLELAQSFGLVSSLNSFGHINDETGLRNAATEPSNVPLNNTAENLASTADARQHFSAF
## 602
```

Daarna hebben we 602 niet-redundante eiwitten om mee verder te gaan:

```
grep ">" lumbricus/protocol2/data_processing/Redundancy/prot.nr.aa | wc -l
```

```
## bash: cannot set terminal process group (1286504): Inappropriate ioctl for device
## bash: no job control in this shell
## 602
```

```
cat bonafide.gb | perl -ne 'if(m/\s+/gene="(\\S+)\\s+/){ \
print "\\n".$1."\\n";}' | sort -u > traingenelst
```

regel 1: syntaxisfout bij onverwacht token '('

Dit leverde een syntaxisfout op, waarna alle perl -ne regex werden vervangen door Python regex, die werden uitgevoerd in de IDE.

```
import re
import subprocess

# Read from the file 'bonafide.gb'
with open('bonafide.gb', 'r') as file:
    content = file.read()
```

```

# Find all unique gene names

gene_names = set(re.findall(r'/gene="(\\S+)"', content))

# Writing unique gene names to a file

with open('traingen.es.lst', 'w') as f:

    for gene in sorted(gene_names):

        f.write(f"{gene}" + "\n")

```

De uitvoer bevat de strings die als transcriptnamen worden gebruikt in het bonafide.gtf-bestand, waaruit bonafide.gb oorspronkelijk is gemaakt, met aanhalingstekens.

```

head lumbricus/protocol2/data_processing/Redundancy/traingen.es.lst

```

```

## "OX457036.1_t_gene1000_mRNA1441"
## "OX457036.1_t_gene1001_mRNA1448"
## "OX457036.1_t_gene1002_mRNA1452"
## "OX457036.1_t_gene1003_mRNA1454"
## "OX457036.1_t_gene1004_mRNA1455"
## "OX457036.1_t_gene1006_mRNA1462"
## "OX457036.1_t_gene1007_mRNA1463"
## "OX457036.1_t_gene1008_mRNA1464"
## "OX457036.1_t_gene1009_mRNA1468"
## "OX457036.1_t_gene100_mRNA132"

```

Hierna volgt een reeks scripts/opdrachten die alleen bedoeld zijn om een lijst te verkrijgen van niet-redundante genen en hun bijbehorende loci in GeneBank. Dit is voornamelijk een bewerking voor tekstbestanden

```

grep -oE '(OX457036[A-Za-z1-9._]{1,})\\w+' prot.nr.aa > nonred.lst

```

```
head lumbricus/protocol2/data_processing/Redundancy/nonred.lst
```

```
## OX457036.1_t_gene753_mRNA930
## OX457036.1_t_gene803_mRNA1030
## OX457036.1_t_gene103_mRNA135
## OX457036.1_t_gene500_mRNA632
## OX457036.1_t_gene503_mRNA635
## OX457036.1_t_gene504_mRNA636
## OX457036.1_t_gene573_mRNA720
## OX457036.1_t_gene618_mRNA766
## OX457036.1_t_gene384_mRNA500
## OX457036.1_t_gene496_mRNA628
```

Isoleer de genen in traingenenes.lst van bonafide.gtf:

```
grep -f traingenenes.lst -F bonafide.gtf > bonafide.f.gtf
```

```
head lumbricus/protocol2/data_processing/Redundancy/bonafide.f.gtf
```

```
## OX457036.1   gth CDS 51009   54860   .   -   0   gene_id "OX457036.1_g_gene1_mRNA1"; transcript_id "OX45703
## OX457036.1   gth exon   51009   54860   .   -   0   gene_id "OX457036.1_g_gene1_mRNA1"; transcript_id "OX4
## OX457036.1   gth CDS 82883   86734   .   -   0   gene_id "OX457036.1_g_gene2_mRNA2"; transcript_id "OX45703
## OX457036.1   gth exon   82883   86734   .   -   0   gene_id "OX457036.1_g_gene2_mRNA2"; transcript_id "OX4
## OX457036.1   gth CDS 104626  104645   .   -   2   gene_id "OX457036.1_g_gene3_mRNA3"; transcript_id "OX45703
## OX457036.1   gth exon   104626  104645   .   -   2   gene_id "OX457036.1_g_gene3_mRNA3"; transcript_id "OX4
## OX457036.1   gth CDS 104696  104750   .   -   0   gene_id "OX457036.1_g_gene3_mRNA3"; transcript_id "OX45703
## OX457036.1   gth exon   104696  104750   .   -   0   gene_id "OX457036.1_g_gene3_mRNA3"; transcript_id "OX4
## OX457036.1   gth CDS 104904  105745   .   -   2   gene_id "OX457036.1_g_gene3_mRNA3"; transcript_id "OX45703
## OX457036.1   gth exon   104904  105745   .   -   2   gene_id "OX457036.1_g_gene3_mRNA3"; transcript_id "OX4
```

```
grep -oE '(OX457036[A-Za-z1-9._]{1,})\w+' prot.nr.aa > nonred.lst
```

```
head lumbricus/protocol2/data_processing/Redundancy/nonred.lst
```

```
## OX457036.1_t_gene753_mRNA930
## OX457036.1_t_gene803_mRNA1030
## OX457036.1_t_gene103_mRNA135
## OX457036.1_t_gene500_mRNA632
## OX457036.1_t_gene503_mRNA635
## OX457036.1_t_gene504_mRNA636
## OX457036.1_t_gene573_mRNA720
## OX457036.1_t_gene618_mRNA766
## OX457036.1_t_gene384_mRNA500
## OX457036.1_t_gene496_mRNA628
```

In nonred.lst gaan we nu een niet-redundante subset van genen vinden.

Voor het filteren van het bestand bonafide.gb hebben we een lijst met loci-namen nodig in plaats van genenamen.

```
cat bonafide.gb | perl -ne '
if ( $_ =~ m/LOCUS\s+(\S+)\s/ ) {
    $txLocus = $1;
} elsif ( $_ =~ m/\s/gene="\s+(\S+)\s"/ ) {
    $txInGb3{$1} = $txLocus
}

if( eof() ) {
    foreach ( keys %txInGb3 ) {
        print "$_\t$txInGb3{$_}\n";
    }
}' > loci.lst
```



```
Unrecognized character \xE2; marked by <-- HERE after <-- HERE near column 1 at -e line 1.
cat: write error: Broken pipe
./test.sh: line 2: syntax error near unexpected token `('
./test.sh: line 2: `if ( $_ =~ m/LOCUS\s+(\S+)\s/ ) {'
```

Deze commando van het protocol veroorzaakte een fout en is vervangen. Het is nu locilist.py (scripts, protocol2).

```
import re

txInGb3 = {}

txLocus = ""

with open("bonafideOrtho.gb.db") as file:

    for line in file:

        if re.search(r'LOCUS\s+(\S+)\s', line):

            txLocus = re.search(r'LOCUS\s+(\S+)\s', line).group(1)

        elif re.search(r'/gene="(\S+)"', line):

            gene = re.search(r'/gene="(\S+)"', line).group(1)

            txInGb3[gene] = txLocus

with open("loci.lst", "w") as output_file:

    for key in txInGb3.keys():

        output_file.write(f"{key}\t{txInGb3[key]}\n")
```

en nonred.loci.py (scripts, protocol2):

```
import subprocess

with open('nonred.lst', 'r') as f:

    patterns = f.read().splitlines()
```

```

with open('loci.lst', 'r') as f:

    loci = f.read().splitlines()

matched_loci = [locus.split('\t')[1] for locus in loci if any(pattern in locus for pattern in patterns)]

with open('nonred.loci.lst', 'w') as f:

    f.write('\n'.join(matched_loci))

```

wat nonred.loci.lst en loci.lst (met 2 kolommen) produceert:

```
head lumbricus/protocol2/data_processing/Redundancy/nonred.loci.lst
```

```

## OX457036.1_102144-115856
## OX457036.1_161655-167728
## OX457036.1_180282-185623
## OX457036.1_225887-235418
## OX457036.1_345964-351295
## OX457036.1_411769-417637
## OX457036.1_418604-428585
## OX457036.1_428586-437296
## OX457036.1_468333-473965
## OX457036.1_488481-495418

```

```
head lumbricus/protocol2/data_processing/Redundancy/loci.lst
```

```

## OX457036.1_t_gene1_mRNA1 OX457036.1_48527-57342
## OX457036.1_t_gene2_mRNA2 OX457036.1_80401-89216
## OX457036.1_t_gene3_mRNA3 OX457036.1_102144-115856
## OX457036.1_t_gene4_mRNA4 OX457036.1_138781-147529
## OX457036.1_t_gene5_mRNA5 OX457036.1_161655-167728

```

```
## OX457036.1_t_gene6_mRNA6 OX457036.1_180282-185623
## OX457036.1_t_gene7_mRNA7 OX457036.1_225887-235418
## OX457036.1_t_gene8_mRNA8 OX457036.1_321850-327440
## OX457036.1_t_gene9_mRNA9 OX457036.1_345964-351295
## OX457036.1_t_gene10_mRNA10 OX457036.1_389861-394620
```

```
filterGenesIn.pl nonred.loci.lst bonafide.gb > bonafide.f.gb
```

Deze commando haalt enkel de laatste locus uit de bonafide.gb. Het doel is om alle unieke loci uit de bonafide.gb te verzamelen, niet alleen de laatste.

Om alle unieke loci te krijgen, moeten we dit in een loop zetten (protocol2, scripts, bonafide.nonred.f.py).

```
import re

origfilename = "bonafideRED.gb"
goodfilename = "nonred.loci.lst"

goodlist = {}

with open(goodfilename, 'r') as goodfile:

    for line in goodfile:

        goodlist[line.strip()] = 1

with open(origfilename, 'r') as origfile:

    content = origfile.read().split('\n/\n')

    for gendaten in content:

        match = re.match(r'^LOCUS +(\S+) .*', gendaten)

        if match:

            genname = match.group(1)

            if genname in goodlist:

                with open('bonafide.filtered.nonred.gb', 'a') as f2:

                    f2.write( gendaten+ '\n'+ '/' + '\n')
```

```
f2.close()
```

```
grep -c LOCUS lumbricus/protocol2/data_processing/Redundancy/bonafide.f.nonred.gb
```

```
## 602
```

Na deze fase zijn er 602 verschillende loci in Bonafide.

## 5.5 Trainingsset van Proteins.Etrain

We hebben in de vorige sectie 602 niet-redundante genstructuren ontdekt die kunnen dienen om een nieuwe soort te ontwikkelen.

Creëer een nieuwe species

```
new_species.pl --species=wormNonredEP
```

```
etrainig --species=wormNonredEP bonafide.gb &> bonafide.out
```

Check for stop-codons:

```
grep -c "Variable stopCodonExcludedFromCDS set right" bonafide.out
```

49

We moeten 49 stopcodons uitfilteren.Bad List:

```
etrainig --species=wormNonredEP bonafide.gb 2>&1\  
| grep "in sequence" \  
| sed -E 's/.*n sequence (\\S+):.*\\/\\1/' \  
| sort -u > bad.pre.list
```

```
grep -oE "in sequence.*(OX457036.[1-9A-Za-z_0-]{1,})\w+" \
bad.pre.list\
| grep -oE "(OX457036.[1-9A-Za-z_0-]{1,})\w+"> bad.list
```

```
head ~/lumbricus/protocol2/data_processing/bad-list/bad.list
```

```
## bash: cannot set terminal process group (1286504): Inappropriate ioctl for device
## bash: no job control in this shell
## OX457036.1_80264327-80269533
## OX457036.1_3169142-3174603
## OX457036.1_3169142-3174603
## OX457036.1_82306032-82311964
## OX457036.1_83519819-83526493
## OX457036.1_85356189-85367403
## OX457036.1_3254876-3258078
## OX457036.1_87513969-87519492
## OX457036.1_3258079-3261568
## OX457036.1_92067632-92073579
```

Vervolgens filter bad.list uit bonafide.gb:

```
perl filterGenes.pl bad.list bonafide.filtered.nonred.gb \
> bonafide.filtered.gb
```

```
grep -c LOCUS bonafide.gb bonafide.filtered.gb
```

```
bonafide.gb:602 bonafide.filtered.gb:373
```

```
ln -s bonafide.filtered.gb bonafide.gb
```

test.gb is een klein bestand dat dient voor training. Train.gb is een groot bestand dat gebruikt wordt om de training te evalueren.

```
randomSplit.pl bonafide.gb 200
```

```
mv bonafide.gb.test test.gb
```

```
mv bonafide.gb.train train.gb
```

```
etrainig --species=wormNonredEP train.gb &> etrain.out
```

```
cat lumbricus/protocol2/data_processing/Bonafid/etrain.out
```

```
## bash: cannot set terminal process group (1286504): Inappropriate ioctl for device
```

```
## bash: no job control in this shell
```

```
## # Read in 373 genbank sequences.
```

```
## Quantiles of the GC contents in the training set:
```

```
## 0% 0.351
```

```
## 5% 0.385 10% 0.388
```

```
## 15% 0.393 20% 0.397
```

```
## 25% 0.4 30% 0.403
```

```
## 35% 0.405 40% 0.407
```

```
## 45% 0.412 50% 0.415
```

```
## 55% 0.417 60% 0.419
```

```
## 65% 0.425 70% 0.429
```

```
## 75% 0.432 80% 0.438
```

```
## 85% 0.446 90% 0.456
```

```
## 95% 0.478 100% 0.596
```

```
## HMM-training the parameters...
```

```
## i= 0 bc= (0.237, 0.263, 0.263, 0.237)
```

```
## ** building model for exons *EXON*
```

```
## gene OX457036.1_t_gene1093_mRNA1640 transcr. 1 in sequence OX457036.1_98424851-98432363: Initial exon does :
```

```
## start codon frequencies: ATG(372)
```

```

## # admissible start codons and their probabilities: ATG(1), CTG(0), TTG(0)

## number of bases in the reading frames: 160917 161284 161285

## --- frame = 0 ---      minPatSum = 233
## --- frame = 1 ---      minPatSum = 233
## --- frame = 2 ---      minPatSum = 233

## --- initial frame = 0 ---      minPatSum = 233
## --- initial frame = 1 ---      minPatSum = 233
## --- initial frame = 2 ---      minPatSum = 233

## --- internal exon terminal frame = 0 ---      minPatSum = 233
## --- internal exon terminal frame = 1 ---      minPatSum = 233
## --- internal exon terminal frame = 2 ---      minPatSum = 233

## single, initial, internal, terminal mean exon lengths :

## 934  275 199 246

## single exon : 66

## initial exon 0 : 134
## initial exon 1 : 79
## initial exon 2 : 93

## internal exon 0 : 511
## internal exon 1 : 196
## internal exon 2 : 193

## terminal exon : 307

## Frequency of stop codons:

## tag:   97 (0.26)
## taa:  102 (0.273)
## tga:  174 (0.466)

## end *EXON*

## Storing parameters to file...

## Writing exon model parameters [1] to file /home/alena/anaconda3/envs/c/config/species/wormNonredEP/wormNonr

```

```
tail -6 etrain.out | head -3
```

```
tag: 97 (0.26) taa: 102 (0.273) tga: 174 (0.466)
```

Je moet deze waarden corrigeren in je wormNonredEP\_parameters.cfg in config map

```
augustus --species=wormNonredEP test.gb > test.out
```

Eerst werd er een test gedaan op het model voordat het geoptimaliseerd werd, waarbij redudante structuren werden verwijderd.

Deze test gaf een gevoeligheid en specificiteit van 0.01.

Na het toepassen van het protocol voor het verwijderen van redundante genstructuren, nam de specificiteit toe met 0,3 tot 0,5 punten.

*****	Evaluation of gene prediction										*****
-----\											
		sensitivity		specificity							
-----											
nucleotide level		0.942		0.762							
-----/											
-----\											
		#pred		#anno				FP = false pos.		FN = false neg.	
		total/		total/		TP		-----	-----	sensitivity	
		unique		unique				part		ovlp	
						part		ovlp		wrng	
-----											
						1071		767			
exon level		1884		1580		813		-----	-----	0.515	
						436		104		531	
						456		145		166	



```

-----/
-----\
transcript | #pred | #anno | TP | FP | FN | sensitivity | specificity |
-----|
gene level | 454 | 373 | 88 | 366 | 285 | 0.236 | 0.194 |
-----/

```

Zie lumbricus/protocol2/test/test.out voor meer informatie.

## 6 Prediction met behulp van extrinsiek bewijs (Protocol 15)

Voor de extrinistiek Hints is proteoom van wormen geselecteerd. Het proteoom komt van UniProt, dat zowel het proteoom van Lumbricus Terrestris als dat van Eisenia Fetida omvat. Twee van de Fasta-bestanden die we van UniProt hebben gekregen, zijn in één bestand samengevoegd.

Proteome Lumbricus Terrestris: [https://www.uniprot.org/uniprotkb?query=%28taxonomy\\_id%3A6397%29](https://www.uniprot.org/uniprotkb?query=%28taxonomy_id%3A6397%29)

Proteome Eisenia Fetida: [https://www.uniprot.org/uniprotkb?query=%28taxonomy\\_id%3A6393%29](https://www.uniprot.org/uniprotkb?query=%28taxonomy_id%3A6393%29)

Samengevat Lumbricus en Eisenia:

lumbricus -> protocol15 -> data\_processing -> merged\_6393\_and\_6397.fa

Fasta files, afkomstig van Uniprot: Eisenia: lumbricus -> protocol15 -> data\_raw -> uniprotkb\_taxonomy\_id\_6393\_2024\_12\_29.fasta

Lumbricus : lumbricus -> protocol15 -> data\_raw -> uniprotkb\_taxonomy\_id\_6397\_2024\_12\_29.fasta.

Eerste step is de ProtHints:

```
../bin/prothint.py ../OX457036.1.fasta ../merged_6393_and_6397.fa
```

Het programma ProtHints wordt gebruikt om hints voor te bereiden (ProtHints installatie vond plaats in protocol 2). In deze fase wordt het bestand prothint\_augustus.gff aangemaakt. Voorbeeld prothint\_augustus.gff :

OX457036.1	ProtHint	start	33409650	33409652	2	-	0	src=P;mult=2;pri=4;al_score=0.433058;
OX457036.1	ProtHint	intron	34198705	34199175	2	+	.	src=P;mult=2;pri=4;al_score=0.38446;
OX457036.1	ProtHint	intron	34199278	34199565	2	+	.	src=P;mult=2;pri=4;al_score=0.26901;
OX457036.1	ProtHint	intron	37878497	37880236	2	+	.	src=P;mult=1;pri=4;al_score=0.488541;
OX457036.1	ProtHint	intron	37880480	37881139	2	+	.	src=P;mult=1;pri=4;al_score=0.474112;
OX457036.1	ProtHint	stop	37881166	37881168	2	+	0	src=P;mult=1;pri=4;al_score=0.429752;

Je kunt hints gelijk toepassen in augustus.

```
augustus --species=caenorhabditis
--predictionStart=2000000 --predictionEnd=3000000\
OX457036.1.fasta
--extrinsicCfgFile=extrinsic.cfg
--hintsfile=prothint_augustus.gff
> augustus.extrinsics.hints.gff
```

For de extrinsic.cfg zie:

<https://github.com/nextgenusfs/augustus/blob/master/config/extrinsic/cgp.extrinsic.cfg>

Voorbeeld extrinsic.cfg:

```
# source of extrinsic information:
# M manual anchor (required)
# P protein database hit
# E EST/cDNA database hit
# C combined est/protein database hit
# D Dialign
# R retroposed genes
# T transMapped refSeqs
# W wiggle track coverage info from RNA-Seq
```

[SOURCES]

M RM E W P

```
#
# individual_liability: Only unsatisfiable hints are disregarded. By default this flag is not set
# and the whole hint group is disregarded when one hint in it is unsatisfiable.
# 1group1gene: Try to predict a single gene that covers all hints of a given group. This is relevant for
# hint groups with gaps, e.g. when two ESTs, say 5' and 3', from the same clone align nearby.
#
```

[SOURCE-PARAMETERS]

```
# feature          bonus          malus  gradelevelcolumns
#      r+/r-
#
# the gradelevel columns have the following format for each source
# sourcecharacter numscoreclasses boundary    ...  boundary    gradequot    ...  gradequot
#
```

[GENERAL]

start	1	0.8	M	1	1e+100	RM	1	1	E	1	1	W	1	1	P	1	1e3
stop	1	0.8	M	1	1e+100	RM	1	1	E	1	1	W	1	1	P	1	1e3
tss	1	1	M	1	1e+100	RM	1	1	E	1	1	W	1	1	P	1	1
tts	1	1	M	1	1e+100	RM	1	1	E	1	1	W	1	1	P	1	1
ass	1	0.95	0.1	M	1	1e+100	RM	1	1	E	1	1	W	1	1	P	100
dss	1	0.95	0.1	M	1	1e+100	RM	1	1	E	1	1	W	1	1	P	100
exonpart	1	.992	.985	M	1	1e+100	RM	1	1	E	1	1	W	1	1.02	P	1
exon	1	0.9		M	1	1e+100	RM	1	1	E	1	1	W	1	1	P	1e4
intronpart	1	1		M	1	1e+100	RM	1	1	E	1	1	W	1	1	P	1
intron	1	.34		M	1	1e+100	RM	1	1	E	1	1e6	W	1	1	P	100
CDSpart	1	1	.985	M	1	1e+100	RM	1	1	E	1	1	W	1	1	P	1e5

CDS	1		1	M	1	1e+100	RM	1	1	E	1	1	W	1	1	P	1	1
UTRpart	1	1	1	M	1	1e+100	RM	1	1	E	1	1	W	1	1	P	1	1
UTR	1		1	M	1	1e+100	RM	1	1	E	1	1	W	1	1	P	1	1
irpart	1		1	M	1	1e+100	RM	1	1	E	1	1	W	1	1	P	1	1
nonexonpart	1		1	M	1	1e+100	RM	1	1.15	E	1	1	W	1	1	P	1	1
genicpart	1		1	M	1	1e+100	RM	1	1	E	1	1	W	1	1	P	1	1

Tijdens deze stap wordt er een gff-annotatiebestand geproduceerd. Voorbeeld Augustus gff van protein Hints:

```
# start gene g10
OX457036.1 AUGUSTUS gene 2072765 2073299 0.59 + . g10
OX457036.1 AUGUSTUS transcript 2072765 2073299 0.59 + . g10.t1
OX457036.1 AUGUSTUS tss 2072765 2072765 . + . transcript_id "g10.t1"; gene_id "g10";
OX457036.1 AUGUSTUS 5'-UTR 2072765 2072799 0.99 + . transcript_id "g10.t1"; gene_id "g10";
OX457036.1 AUGUSTUS start_codon 2072800 2072802 . + 0 transcript_id "g10.t1"; gene_id "g10";
OX457036.1 AUGUSTUS single 2072800 2073033 0.93 + 0 transcript_id "g10.t1"; gene_id "g10";
OX457036.1 AUGUSTUS CDS 2072800 2073033 0.93 + 0 transcript_id "g10.t1"; gene_id "g10";
OX457036.1 AUGUSTUS stop_codon 2073031 2073033 . + 0 transcript_id "g10.t1"; gene_id "g10";
OX457036.1 AUGUSTUS 3'-UTR 2073034 2073299 0.6 + . transcript_id "g10.t1"; gene_id "g10";
OX457036.1 AUGUSTUS tts 2073299 2073299 . + . transcript_id "g10.t1"; gene_id "g10";
# protein sequence = [MYKLVDETSKLAWLLCLMRMLSQKYVSSMLMLANSRASLLPLLIAYNELISRDELSCYRFLHSCDMFILTFRRS]
# Evidence for and against this transcript:
# % of transcript supported by hints (any source): 0
# CDS exons: 0/1
# CDS introns: 0/0
# 5'UTR exons and introns: 0/1
# 3'UTR exons and introns: 0/1
# hint groups fully obeyed: 0
# incompatible hint groups: 0
# end gene g10
```

De proteïnesequentie in de gff is gereed om te gebruiken met de Blast-web of API-versie. Voor het evidence at protein level is het nuttig om GenomeThreader (<https://genomethreader.org/download.html>) in te zetten om specifieke eiwitten van Lumbricus Terrestris te vinden. Commando voor GenomeThreader 1.7.1:

```
gth -genomic soft.masked.chromosome1.OX457036.1.fasta -protein merged_6393_and_6397.fa
```

GenomeThreader geeft de positie van het gevonden eiwit in de gegeven dna-sequentie, evenals de identificatie van het eiwit “Q8MWU7” (protocol15-> data\_processing-> output.gth).

```
$ Arguments: -genomic soft.masked.chromosome1.OX457036.1.fasta -protein merged_6393_and_6397.fa
```

```
*****
```

```
Protein Sequence: file=merged_6393_and_6397.fa, description=tr|Q8MWU7|Q8MWU7_9ANNE Hox01 (Fragment) OS=Eisenia
```

```
1 HFNRYLTRRR RIEIAHALCL TERQI
```

```
Genomic Template: file=soft.masked.chromosome1.OX457036.1.fasta, strand=-, from=4635697, to=4635026, descripti
```

```
Predicted gene structure:
```

```
Exon 1 4635397 4635323 ( 75 n); Protein 1 25 ( 25 aa); score: 0.878
```

```
MATCH OX457036.1- tr+ 0.878 75 1.000 P
```

```
PGS_OX457036.1-_tr+ (4635397 4635323)
```

```
Alignment (genomic DNA sequence = upper lines):
```

```
CACTTCAACA AATATCTGAC GAGGAGACGA AGGATCGAGA TCTCGCACCA GCTGTGCTTG 4635338
```

```
H F N K Y L T R R R R I E I S H Q L C L
```

```
| | | + | | | | | | | | + | | |
```

```
H F N R Y L T R R R R I E I A H A L C L 20
```

```

ACGGAACGAC AGGTG                                4635323

T   E   R   Q   V

|   |   |   |   +

T   E   R   Q   I                                25

```

```

*****

```

Gegevens met betrekking tot chromosoom 1 voorspellingen komen voort uit bewijs van eiwitten (file GenomeThreader.output.gth, data\_processing, protocol15).

Predicted:

strand=- from=4635697 to=4635026

Protein ID : Q8MWU7|

DNA-binding transcription factor activity, RNA polymerase II-specific

Predicted:

strand=- from=19847071 to=19841778

A0A088BZ25\_EISFE 26S proteasome non-ATPase regulatory subunit 4 (Fragment) OS=Eisenia fetida

Predicted:

strand=- from=23688885 to=23683840

G3LY18\_EISFE Superoxide dismutase OS=Eisenia fetida

Predicted:

strand=- from=23686573 to=23683870

B9TY06\_LUMTE Superoxide dismutase OS=Lumbricus terrestris

Predicted:

strand=- from=23686573 to=23684768

B9TY04|B9TY04\_LUMRU Superoxide dismutase (Fragment) OS=Lumbricus rubellus

Predicted:

strand=+ from=37878052 to=37880778

Q9GRJ1 CALM\_LUMRU Calmodulin OS=Lumbricus rubellus

Predicted:

strand=+ from=37879936 to=37880745

Q2I6A7\_EISFE Calmodulin (Fragment) OS=Eisenia fetida

Predicted:

strand=+ from=39296646 to=39299946

V9VGQ0\_LUMRU glutathione gamma-glutamylcysteinyltransferase OS=Lumbricus rubellus OX=35632

Predicted:

strand=+ from=44647234 to=44650203

P92182 ACT1\_LUMTE Actin-1 OS=Lumbricus terrestris

Predicted:

strand=+ from=44647234 to=44650203

P91754|ACT\_LUMRU Actin OS=Lumbricus rubellus

Predicted:

strand=+ from=44648761 to=44649954

E9KJS6\_9ANNE Beta-actin OS=Lumbricus friendi

Predicted:

strand=+ from=51521291 to=51525245

Q2I743\_LUMTE Extracellular hemoglobin linker L2 subunit OS=Lumbricus terrestris

Predicted:

strand=- from=55530224 to=55501373

Q0G8J7\_LUMTE High-affinity serotonin transporter protein OS=Lumbricus terrestris

Predicted:

V9GWR0\_LUMTE Peroxidase OS=Lumbricus terrestris

strand=+ from=57431103 to=57470825

Predicted:

strand=+ from=61318513 to=61319184

Q8MWS8\_9ANNE Hox20 OS=Eisenia andrei

Predicted:

strand=- from=66406471 to=66405222

Q2I6A6\_EISFE HSp60 (Fragment) OS=Eisenia fetida

Predicted:

strand=- from=7768149 to=77676755

Q2I741\_LUMTE Extracellular hemoglobin linker L4 subunit OS=Lumbricus terrestris



Predicted:

strand=- from=77703849 to=77700628

P08924|GLB1\_LUMTE Extracellular globin-1 OS=Lumbricus terrestris

Predicted:

strand=- from=87203704 to=87077023

P92182|ACT1\_LUMTE Actin-1 OS=Lumbricus terrestris

Predicted:

strand=+ from=90736653 to=90737447

Q2I6A1\_EISFE Ubiquitin (Fragment) OS=Eisenia fetida

Predicted:

strand=+ from=90736725, to=90737447

P84589|UBIQ\_LUMTE Ubiquitin (Fragment) OS=Lumbricus terrestris

Predicted:

strand=+ from=91986226 to=91991793

A0A143Y4B3\_9ANNE Myeloid Differentiation primary response protein MyD88

Predicted:

strand=+ from=98669240 to=98672183

Q2I699\_EISFE Protein kinase C2 (Fragment) OS=Eisenia fetida

Visualisatie van protein evidence voor Chromosome I OX457036.1 Lumbricus Terrestris:

<https://alenagrrr3.github.io/OX457036.1.html/OX457036.1.proteins.Lumbricus>

## 7 Identificatie en visualisatie

### 7.1 Gen-identificatie (nucleotide niveau)

Dit hoofdstuk bespreekt voorspelling op nucleotidenniveau. Alle voorspellingen zijn gebaseerd op een DNA-fragment van 1 mb, wat overeenkomt met 1% van chromosoom. De exacte locatie is aangeduid als 2000000-3000000. (2-3 mb) van chr1. De predictor is toegepast op het nieuwe lumtermodel (zie, protocol 1, model) dat in deel 1 is ontwikkeld. Alle stappen voor identificatie zijn vastgelegd in prediction.xlsx (map identification-n).

```
augustus --species=lumter lumter.fasta --predictionStart=2000000 --predictionEnd=3000000 --gff3=on
```

Voor het identificeren van genen hebben we de qblast() functie gebruikt uit de Bio.Blast.NCBIWWW module van Biopython. De qblast functie heeft verschillende opties die vergelijkbaar zijn met de parameters die je kunt instellen op de BLAST webpagina. Wij hebben nucleotide blast ("blastn", "nt") gebruikt. Deze functie is bedoeld om nucleotidesequenties te vinden die vergelijkbaar zijn met die van andere organismen, en deze gegevens zijn beschikbaar in de NCBI-database. Hulp voor de qblast functie:

```
from Bio.Blast import NCBIWWW
help(NCBIWWW.qblast)
```

Some useful parameters:

- program           blastn, blastp, blastx, tblastn, or tblastx (lower case)
- database           Which database to search against (e.g. "nr").
- sequence           The sequence to search.
- ncbi\_gi            TRUE/FALSE whether to give 'gi' identifier.
- descriptions       Number of descriptions to show. Def 500.
- alignments         Number of alignments to show. Def 500.
- expect             An expect value cutoff. Def 10.0.
- matrix\_name         Specify an alt. matrix (PAM30, PAM70, BLOSUM80, BLOSUM45).
- filter             "none" turns off filtering. Default no filtering
- format\_type         "HTML", "Text", "ASN.1", or "XML". Def. "XML".
- entrez\_query        Entrez query to limit Blast search

- This function does no checking of the validity of the parameters and passes the values to the server as is. More help is available at: <https://ncbi.github.io/blast-cloud/dev/api.html>

Eerst hebben we het ruwe GFF-bestand voorbereid voor de Blast API door alle spaties en het ‘#’ symbool te verwijderen.

Om de gencoördinaten te krijgen, maakten we gebruik van een regex-patroon.

Voor het ophalen van de coderingssequentie uit het GFF-bestand maakten we gebruik van een andere regex.

Nadat je het GFF-bestand hebt geparsed, is het klaar voor gebruik met de Blast API. Elke coderingssequentie heeft een unieke identificatie die de start- en eindcoördinaten bevat: genomisch OX457036.1:2000789-2003917

```
head lumbricus/identification-n/predicton/genome.fa.gff
```

43

```
## aaactaatgctaggtccactcatgaagcaatacagactaacgctaagtcttcacaagaggctatgcaagcgcatgctaagtcaactcatgatgctatg
## acttctatacagtcgtctttgcaactgaatgccagagagacgcaagaggcgattgccacggtggagtttaatgtcctggcagtgcaatcaaagttag
## cgaagctatctcctcagtgcaatcaaagtgaagaggagataagagaagagatctcggtgtaagagataatgtcaggggaagcgctgacggaaatgg
## tatcacgattggaaaggctagaggcgctgccgggtacccaagcctgctgtggattcgaaccctgggtacctcacgctattacccctgcgacgcgcca
## taccactcgaccatcggcctgggggaaactttgggtgctaggcctaaagatttcacgcaacctgggtatattcgggagaagtgatagattggctggtag
## gccgccaatttcatatagggagtacggtagtcgaaaagactggccgcctttcctgggttgggattcgaaccagaagtacctcctcctgtcctccct
## ctatctctagagctcgtccacagcagcacgcgggtcccatcaggcgaggatccggaagtggcgactccggggatgccgataggggcgggcgttacaatt
## ggtcccagccagtggggtcaaattagttctagagattttggtgatgataggttagaagaggaaactgactatgctagaacaggcgaaatggcaatttc
```

De blast-query's via Bio.Blast.NCBIWWW.qblast zijn uitgevoerd en de resultaten zijn teruggegeven in XML-formaat (voor meer informatie, zie: `blast.py`).

```
from Bio.Blast import NCBIWWW
from Bio.Blast import NCBIXML

genomic="genome.fa"

sequence_data = open(genomic).read()

sequence_data

result_handle = NCBIWWW.qblast("blastn", "nt", sequence_data, hitlist_size=5, alignments=50)

with open('results.xml', 'w') as save_file:
    blast_results = result_handle.read()
    save_file.write(blast_results)
```

Voor de blast-analyse is het bestand `genome.fa` opgedeeld in drie verschillende fracties, wat resulteerde in 3 xml-bestanden (identificatie->xml). Elke DNA-sequentie die je invoert in nucleotide BLAST krijgt een bepaald aantal hits, en het geeft ook

wat statistieken over die hits.

Een voorbeeld van een hit: .

```
<Iteration_hits>

<Hit>

  <Hit_num>1</Hit_num>

  <Hit_id>gi|11071239|emb|AJ299434.1|</Hit_id>

  <Hit_def>Lumbricus rubellus mt2A gene for metallothionein 2A, exons 1-4</Hit_def>

  <Hit_accession>AJ299434</Hit_accession>

  <Hit_len>7302</Hit_len>

  <Hit_hsps>

    <Hsp>

      <Hsp_num>1</Hsp_num>

      <Hsp_bit-score>85.143</Hsp_bit-score>

      <Hsp_score>93</Hsp_score>

      <Hsp_evalue>7.19655e-12</Hsp_evalue>

      <Hsp_query-from>70</Hsp_query-from>

      <Hsp_query-to>246</Hsp_query-to>

      <Hsp_hit-from>306</Hsp_hit-from>

      <Hsp_hit-to>490</Hsp_hit-to>

      <Hsp_query-frame>1</Hsp_query-frame>

      <Hsp_hit-frame>1</Hsp_hit-frame>

      <Hsp_identity>131</Hsp_identity>

      <Hsp_positive>131</Hsp_positive>

      <Hsp_gaps>8</Hsp_gaps>

      <Hsp_align-len>185</Hsp_align-len>

      <Hsp_qseq>AGATTGAACATCAAACAGGATATAGTTGACAAAGTGCGGAATAGAAGAATGCGATACTTTGGACATGTGA-----CAAGAATGGGGAACGAAA

      <Hsp_hseq>AGACTGAATATTCAACATGATATAATACACAAGATCCAAAGTAAACGACTACGCTACTTTGGCCACGTATATATATCCAGAATGAGGGATGAGA

      <Hsp_midline>||| ||| || |||| ||||| | |||| | | | || | || ||||| || || | ||||| || | |

    </Hsp>

  </Hit_hsps>
```

</Hit>

De XML-resultaten van de blast-uitvoer laten zien hoe goed de Alignment overeenkomt, samen met de eval-waarde. De gevonden Hits worden bewaard met het NCBI-referentienummer, zoals “ref XM\_003731435.1”, of het Ensemble-referentienummer, zoals “emb OE003277.1”. Zodra je de XML-resultaten hebt, is de eerste stap om ze te parsen. De XML-resultaten zijn geparsed en gesorteerd op coördinaten en e-waarde (sort-blast-by-coords.py, sort-blast-by-pval.py).

```
import os

cwd = os.getcwd()

print(cwd)

import sys

from Bio.Blast import NCBIXML

OUT = open("sorted_by_coordinates.fraction3.txt", 'w')

OUT.write("Query Name\tQuery Length\tAlignment ID NCBI\teValue\n")

result_handle = open("blast.results.fraction3.xml")

blast_records = NCBIXML.parse(result_handle)

for rec in blast_records:

    for alignment in rec.alignments:

        for hsp in alignment.hsps:

            fields = [rec.query_id, rec.query[:100], str(rec.query_length), alignment.hit_id,

                      alignment.accession, str(hsp.expect)]

            OUT.write("\t".join(fields) + "\n")

OUT.close()

print('Done')
```

```
sorted_by_coordinate <- read_excel("lumbricus/identification-n/prediction.xlsx", sheet = 6 )

sorted_by_p <- read_excel("lumbricus/identification-n/prediction.xlsx", sheet = 5 )

# sorted by coordinates
```

```
head(sorted_by_coordinate )
```

```
## # A tibble: 6 x 6
##   `Query Name` `Query Length` `Alignment ID NCBI` eValue Column1 ` _1`
##   <chr>        <chr>                <dbl> <chr>  <chr>    <dbl>
## 1 Query_1234140 genomic OX457036.1:2~      459 gi|26~ XM_063~ 6.18e-5
## 2 Query_1234140 genomic OX457036.1:2~      459 gi|26~ XM_063~ 3.20e-2
## 3 Query_1234140 genomic OX457036.1:2~      459 gi|26~ XM_062~ 4.75e-1
## 4 Query_1234140 genomic OX457036.1:2~      459 gi|26~ XM_062~ 4.75e-1
## 5 Query_1234140 genomic OX457036.1:2~      459 gi|26~ XM_062~ 4.75e-1
## 6 Query_1234141 genomic OX457036.1:2~      408 gi|28~ OZ0783~ 4.46e-6
```

```
# sorted by p-val
```

```
head(sorted_by_p)
```

```
## # A tibble: 6 x 2
##   Column1 Column2
##   <chr>    <chr>
## 1 <NA>    <NA>
## 2 query:  genomic OX457036.1:2108840-2109808
## 3 match:  gi|2739567124|gb|CP157508.1| Candidozyma auris strain BA03 chromosome~
## 4 query:  genomic OX457036.1:2108840-2109808
## 5 match:  gi|2739567124|gb|CP157508.1| Candidozyma auris strain BA03 chromosome~
## 6 query:  genomic OX457036.1:2108840-2109808
```

Eerst moeten we naar alle voorspellingen kijken, ook naar de voorspellingen met ongunstige eval-waarden (vergelijkbaar met p-waarden). Alle voorspellingen: .

```
all_predictions <- read_excel("lumbricus/identification-n/prediction.xlsx", sheet = 1 )
```

```
all_predictions
```

```
## # A tibble: 89 x 5
```

```
## `OX457036.1:2000789-2003917` AUGUSTUS gene predicted:not satisfac~1 `185403`
## <chr> <chr> <chr> <chr> <chr>
## 1 OX457036.1:2007959-2008723 AUGUSTUS gene predicted:not satisfact~ 1852
## 2 OX457036.1:2039309-2039692 AUGUSTUS gene predicted:not satisfact~ 881419
## 3 OX457036.1:2062296-2062562 AUGUSTUS gene predicted:not satisfact~ 0
## 4 OX457036.1:2087020-2087265 AUGUSTUS gene predicted: Lumbricus ru~ 7.38114~
## 5 OX457036.1:2089471-2089899 AUGUSTUS gene predicted:Lampetra plan~ 8.69409~
## 6 OX457036.1:2090721-2091137 AUGUSTUS gene predicted:not satisfact~ 965729
## 7 OX457036.1:2106048-210639 AUGUSTUS gene predicted:Mus musculus ~ 6.12276~
## 8 OX457036.1:2106538-2106948 AUGUSTUS gene predicted:not satisfact~ 640374
## 9 OX457036.1:2107471-2108487 AUGUSTUS gene predicted:not satisfact~ 3.24628~
## 10 OX457036.1:2108840-2109808 AUGUSTUS gene predicted: Candidozyma ~ 1.27857~
## # i 79 more rows
## # i abbreviated name: 1: `predicted:not satisfactory p-value`
```

In deze fase hadden we voorspellingen( Hits) voor 92 genen op een 1mb chromosoom (tussen 2mb en 3mb), zelfs met enkele genen die niet zo'n goede eval-waarden hadden.

```
colnames(all_predictions ) <- c("id","source","feature", "predicted", "eval")
```

```
all_predictions $eval <- parse_number(all_predictions $eval)
```

```
df.f.pavlue <- all_predictions %>% filter(eval<= 1e-4) %>% filter(eval!=0)
```

```
head(df.f.pavlue)
```

```
## # A tibble: 6 x 5
```

```
## id source feature predicted eval
## <chr> <chr> <chr> <chr> <dbl>
## 1 OX457036.1:2087020-2087265 AUGUSTUS gene predicted: Lumbricus rub~ 7.38e- 7
## 2 OX457036.1:2089471-2089899 AUGUSTUS gene predicted:Lampetra plane~ 8.69e-99
## 3 OX457036.1:2106048-210639 AUGUSTUS gene predicted:Mus musculus c~ 6.12e-10
## 4 OX457036.1:2108840-2109808 AUGUSTUS gene predicted: Candidozyma a~ 1.28e-22
```



```
## 5 OX457036.1:2108840-2109808 AUGUSTUS gene      predicted: Phaeodactylu~ 2.82e-13
```

```
## 6 OX457036.1:2112894-2113442 AUGUSTUS gene      predicted: Ixodes scapu~ 1.27e-14
```

```
write.table( df.f.pavalue, +  
             "lumbricus/identification-n/prediction/df.filtered.txt",sep="\t")
```

```
predictions <-read.table("lumbricus/identification-n/predicition/df.filtered.txt")
```

In de daaropvolgende fase hebben we een eval, evaluatiedrempel van 1e-4 ingesteld, wat redelijk mild is. Na het filteren van de voorspellingen met ongunstige eval-waarden, hebben we 32 voorspellingen gevonden die betrekking hebben op 32 genen voor een 1 Mb segment van het eerste chromosoom, wat 1% van het totale chromosoom is. De uiteindelijke voorspelling voor het fragment dat we onderzoeken, is als volgt.

prediction:

```
table7 <- predictions %>% select(V7)  
table7 %>%  
  kable("html") %>%  
  kable_styling(font_size = 7)
```

V7

predicted: Lumbricus rubellus mt2A gene for metallothionein 2A, exons 1-4;AJ299434.1;

predicted:Lampetra planeri genome assembly, chromosome: 62; emb OZ078387.2

predicted:Mus musculus chromosome 8, clone RP23-339I14, complete sequence;AC121136.11

predicted: Candidozyma auris strain BA03 chromosome; 1 eval; CP157508.1

predicted: Phaeodactylum tricornutum CCAP 1055/1 predicted protein partial mRN;XM\_002176960.1

predicted: Ixodes scapularis G-protein coupled receptor dmsr; XM\_029969893.4

predicted :Melanogrammus aeglefinus genome assembly, chromosome: 10; emb OZ180142.1

predicted : Earthworm (L.terrestris) extracellular globin chain c gene, complete cds; gb J05161.1 LUMHBC

predicted:Zymobacter palmae IAM14233 DNA, complete genome;dbj|AP018933.1

predicted: Hylaeus volcanicus uncharacterized LOC128877144 (LOC128877144), transcript variant X5, mRNA;XM\_054124195.1

predicted:Mus musculus BAC clone RP23-95F15 from chromosome 1, complete sequence;AC165443.5

predicted:4\_Tte\_b3v08;emb|OE003277.1

predicted:Earthworm (L.terrestris) extracellular globin chain c gene, complete cds;J05161.1 LUMHBC

predicted: XM\_009033761.1| Helobdella robusta hypothetical protein mRNA

predicted:XM\_069820523.1| PREDICTED: Periplaneta americana carbonic anhydrase beta (CAHbeta), transcript variant X3, mRNA

predidcted:Loxodonta africana zinc finger protein 252-like (LOC100666328), transcript variant X4, mRNA

predicted:gb|KX592814.1| Bos taurus isolate Dominette\_000065F genomic sequence

predicted: gb|J05161.1|LUMHBC Earthworm (L.terrestris) extracellular globin chain c gene, complete cds

predicted:ref|XM\_637462.1| Dictyostelium discoideum AX4 hypothetical protein (DDB\_G0277655) mRNA, complete cds

predicted:Rattus norvegicus uncharacterized LOC134482949 (LOC134482949), ncRNA

Melanogrammus aeglefinus genome assembly, chromosome: 13

predicted:PREDICTED: Portunus trituberculatus putative uncharacterized protein DDB\_G0271982 (LOC123514901), partial mRNA

predicted:emb|LN021320.1| Spirometra erinaceieuropaei genome assembly S\_erinaceieuropaei ,scaffold SPER\_scaffold0020968

predicted: gb|L12688.1|LUMBT Earthworm DNA sequence

prediction:emb|OZ078459.1| Lampetra fluviatilis genome assembly, chromosome: 56

emb|OZ180149.1| Melanogrammus aeglefinus genome assembly, chromosome: 17

predicted: ef|NC\_043824.1|;Passiflora obovata chloroplast, complete genome;gb|MK694931.1|

predicted:ref|XM\_005559078.4;Macaca fascicularis piggyBac transposable element derived 4 (PGBD4), mRNA

predicted:emb|OE179951.1| 2\_Tcm\_b3v08

predicted:emb;BX544872.8;Zebrafish DNA sequence from clone DKEY-58L12 in linkage group 3, complete sequence

predicted:XM\_023356947.1;Centruroides sculpturatus uncharacterized LOC111615539 (LOC111615539), mRNA

predicted:XM\_066083420.1| PREDICTED: Magallana gigas retrovirus-related Pol polyprotein from transposon 412 (LOC105343682), mRNA

For more details,see Voor meer informatie, kijk in de map identification-n, prediction.xlsx, sheet “df\_fitlered”.

## 7.2 Visualisatie

## 7.3 GenViz

Voor het voorbereiden van de data kun je de volgende bestanden bekijken: `genviz-features.py`, map visualisatie en GenomeViz.

De genen die zijn gevonden, worden weergegeven in grafieken, met speciale aandacht voor de eerste 2-3 megabases van chromosoom 1 (coördinaten 2000000-3000000).

Om te scrollen door de features, kun je de webversie gebruiken:

<https://alenagrrr3.github.io/2-3mb-terrsetris/>

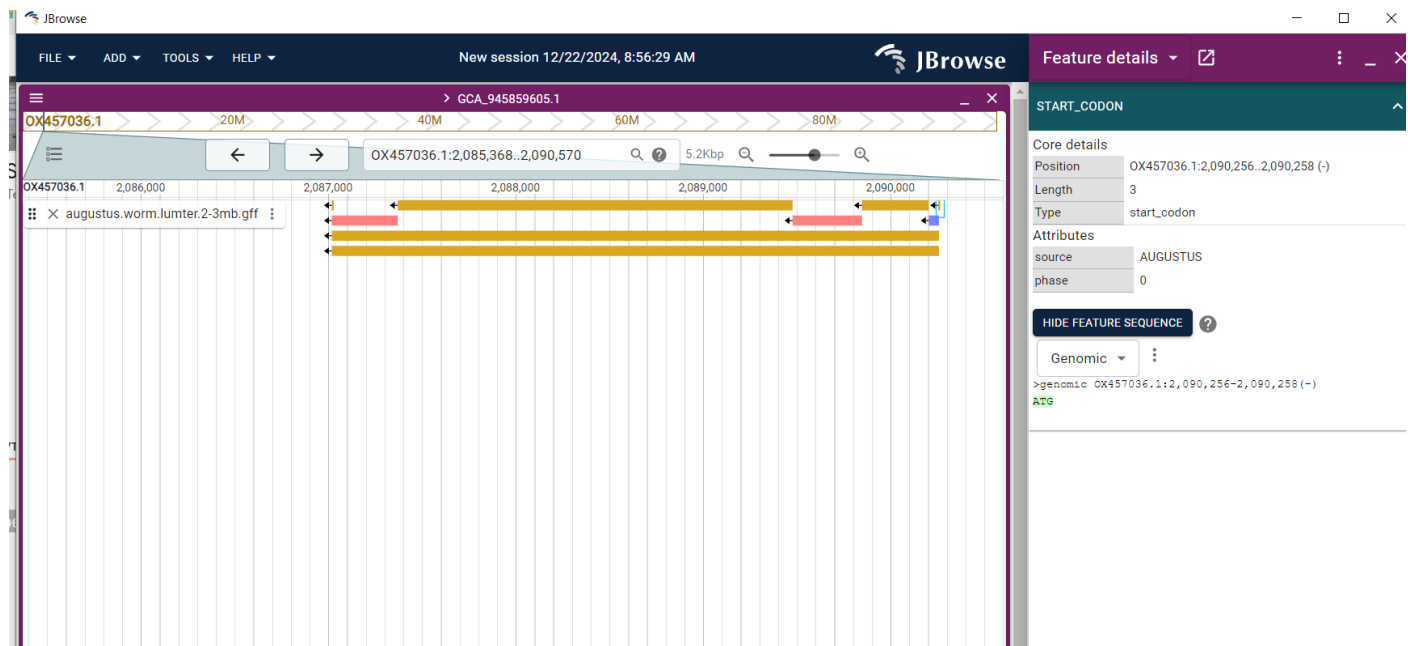
De totale representatie van het chromosoom /OX457036.1.

<https://alenagrrr3.github.io/OX457036.1.html/>

## 7.4 JBrowse

Het gen met de coördinaten OX457036.1:2,087,020 - 2,090,258 is geïdentificeerd als het mt2A-gen voor metallothioneïne 2A van *Lumbricus rubellus*, inclusief exons 1-4; AJ299434.1. is onderzocht in de in Jbrowser (“JBrowse | JBrowse” n.d.)

Gene 5, with intron, Cds, and transcript:



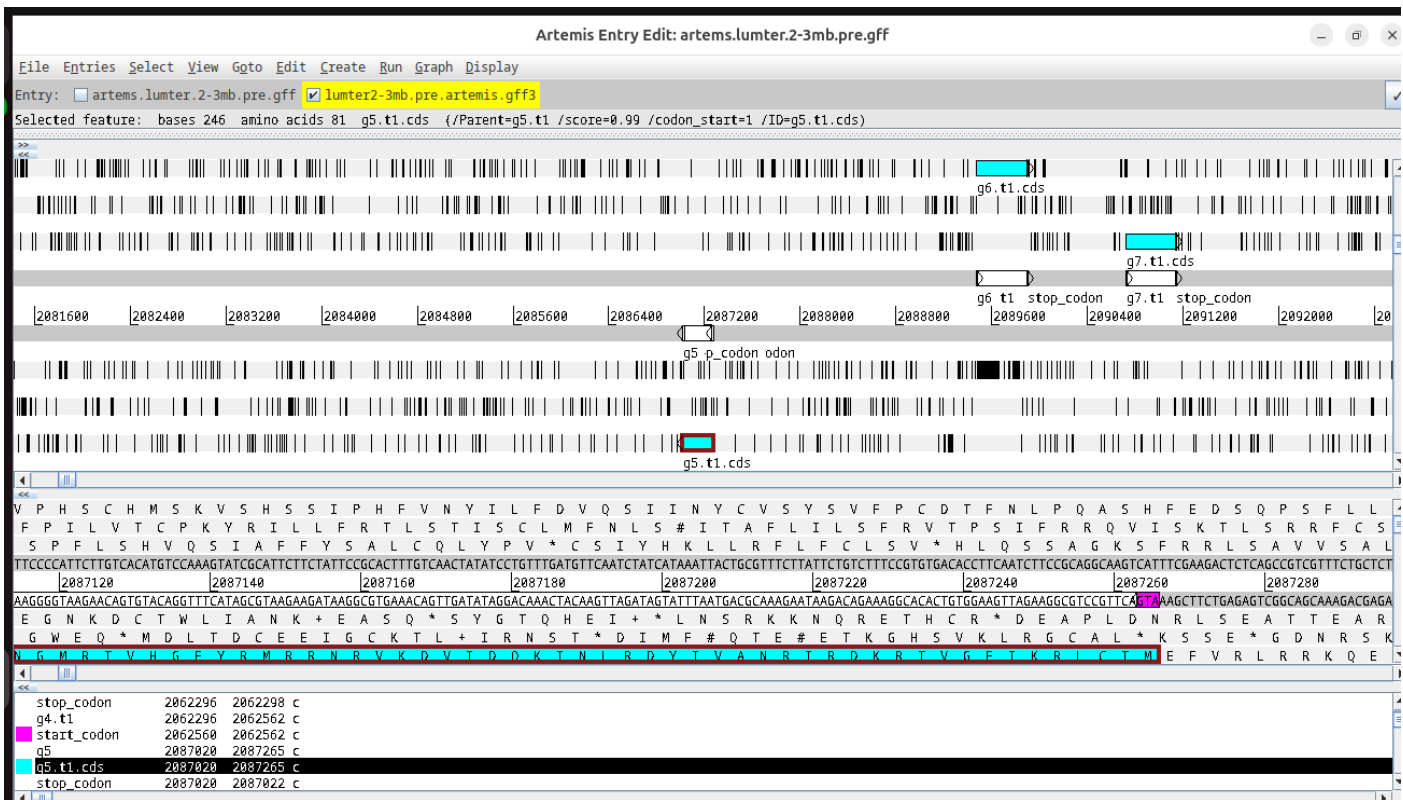
To

zoom in, you can use the link:

<https://raw.githubusercontent.com/alenaagrrr3/OX457036.1.html/refs/heads/main/lumterAM182481.1-gene5.svg>

## 7.5 Artemis

gen "g5" (OX457036.1:2,087,020 - 2,090,258 ) in Artemis Browser met startcodon en CDS (minus streng):



To

zoom in, you can use the link:

<https://raw.githubusercontent.com/alenaagrrr3/OX457036.1.html/refs/heads/main/artemis-g5-startcodon.webp>

## 8 Bijlage

Map structure:

```
fs::dir_tree("lumbricus")

## lumbricus

## +-- DESCRIPTION

## +-- NAMESPACE

## +-- bib

## +-- docs

## | +-- PVA_Regenwormproject.html

## | +-- PVA_regenwormproject.Rmd

## | +-- docs.pdf

## | \-- pva_feedback.v.1.0_lajsa_alena_merged.docx
```

```

## +-- identification-n

## |   +-- gff

## |   |   \-- lumter2-3mb.gff3

## |   +-- predicton

## |   |   +-- df.filtered.txt

## |   |   \-- genome.fa.gff

## |   +-- prediction.xlsx

## |   +-- scripts

## |   |   +-- blast.py

## |   |   +-- parse-nucleotide.py

## |   |   +-- parse-proteins.py

## |   |   +-- soort-blast-by-coords.py

## |   |   \-- sort-blast-by-pval.py

## |   \-- xml

## |       +-- blast.results.fraction2.xml

## |       +-- blast.results.fraction3.xml

## |       \-- results.fraction1.xml

## +-- identifictation-p

## +-- lumbricus.Rproj

## +-- protocol1

## |   +-- data_processing

## |   |   +-- GeneMarkES

## |   |   |   +-- genemark.average_gene_length.out

## |   |   |   +-- genemark.f.good.gtf

## |   |   |   +-- genemark.gtf

## |   |   |   \-- hmm.model

## |   |   |       \-- gmhmm.mod

## |   |   +-- TOPHAT

## |   |   |   +-- accepted_hits.bam

## |   |   |   +-- align_summary.txt

```

```

## | | | +-- igv
## | | | | +-- exon-intron.png
## | | | | +-- exon-introns.svg
## | | | | +-- exon_ids.bed
## | | | | +-- exontranscripts.png
## | | | | +-- igv_snapshot.svg
## | | | | +-- igv_snapshot_bed_vs_junctions.png
## | | | | +-- junction_vs_bam_10kb.png
## | | | | +-- junction_vs_bam_11kb.png
## | | | | +-- junction_vs_bam_11kb2.png
## | | | | +-- junction_vs_bam_2.8.bp.png
## | | | | \-- transcripts_ids.bed
## | | | +-- introns.gff
## | | | +-- introns_by_gmh_with_gtf.gff
## | | | +-- junctions.bed
## | | | \-- transcripts.gtf
## | | \-- bonafide
## | | +-- bonafide.gb
## | | +-- bonafide.gb.test
## | | +-- bonafide.gb.train
## | | +-- bonafide.unique.gb
## | | +-- etrain.out
## | | \-- test.out
## | +-- data_raw
## | | +-- masked
## | | | \-- chromosome1.fasta.masked
## | | \-- soft-masked
## | | \-- soft.masked.chromosome1.OX457036.1.fasta
## | +-- model
## | | \-- wormET0

```

```

## | |      +-- wormET0_exon_probs.pbl
## | |      +-- wormET0_igenic_probs.pbl
## | |      +-- wormET0_intron_probs.pbl
## | |      +-- wormET0_metapars.cfg
## | |      +-- wormET0_metapars.cgp.cfg
## | |      +-- wormET0_metapars.utr.cfg
## | |      +-- wormET0_parameters.cfg
## | |      \-- wormET0_weightmatrix.txt

## | +-- refs

## | | +-- README.GeneMark-ET

## | | \-- refs

## | +-- scrips

## | | +-- bed_to_gff.pl
## | | +-- filterGenemark.pl
## | | +-- step1.sh
## | | +-- step2.sh
## | | +-- step3.sh
## | | +-- step4.sh
## | | \-- step5.sh

## | \-- test

## |      \-- eval.png

## +-- protocol15

## | +-- data_processing

## | | +-- GenomeThreader.output.gth
## | | +-- extrinsic.cfg
## | | +-- merged_6393_and_6397.fa
## | | \-- prothint_augustus.gff

## | +-- data_raw

## | | +-- soft.masked.chromosome1.OX457036.1.fasta
## | | +-- uniprotkb_taxonomy_id_6393_2024_12_29.fasta.gz

```



```

## | | \-- uniprotkb_taxonomy_id_6397_2024_12_29.fasta.gz
## | +-- gff
## | | +-- annotation_from_proteins_2-3mb-ch1.gff3
## | | +-- augustus.proteome.hints.2-3mb.gff
## | | +-- augustus.proteome.hints.2-3mb.gff3
## | | \-- wproteins.23mb.gff3
## | \-- scripts
## | \-- stap1.sh
## +-- protocol2
## | +-- data_processing
## | | +-- Bonafid
## | | | +-- bonafide.gb
## | | | +-- bonafide.gtf
## | | | \-- etrain.out
## | | +-- ProtHints
## | | | +-- augustus.hints.prots.orthodb.arthropoda.2-3mb.gff
## | | | +-- extrinsic.cfg
## | | | +-- gth.concat.aln
## | | | +-- prothint.gff
## | | | +-- prothint_augustus.gff
## | | | +-- run.cfg
## | | | \-- seed_proteins.faa
## | | +-- Redundancy
## | | | +-- bonafide.f.gb
## | | | +-- bonafide.f.gtf
## | | | +-- bonafide.f.nonred.gb
## | | | +-- loci.lst
## | | | +-- nonred.loci.lst
## | | | +-- nonred.lst
## | | | +-- prot.aa

```

```

## | | | +-- prot.nr.aa
## | | | \-- traingen.es.lst
## | | \-- bad-list
## | | +-- bad.list
## | | +-- bad.pre.list
## | | +-- bonafide.f.nonred.gb
## | | \-- inseq
## | +-- data_raw
## | | \-- transcriptome.refs
## | +-- filter
## | | +-- before.png
## | | +-- bonafide.filtered.nonred.gb
## | | +-- export.hist.on.wormEP
## | | +-- filterGenes.pl
## | | +-- filtered.gb
## | | +-- prot.out.png
## | | \-- test.out
## | +-- model
## | | \-- wormNonredEP
## | | +-- wormNonredEP_exon_probs.pbl
## | | +-- wormNonredEP_igenic_probs.pbl
## | | +-- wormNonredEP_intron_probs.pbl
## | | +-- wormNonredEP_metapars.cfg
## | | +-- wormNonredEP_metapars.cgp.cfg
## | | +-- wormNonredEP_metapars.utr.cfg
## | | +-- wormNonredEP_parameters.cfg
## | | \-- wormNonredEP_weightmatrix.txt
## | +-- refs
## | | \-- refs
## | +-- resources

```

```

## | | \-- ncbi-blast-2.16.0+
## | |      +-- ChangeLog
## | |      \-- bin
## | |      +-- blast_vdb_cmd
## | |      +-- blastn_vdb
## | |      +-- blastp
## | |      +-- makeprofiledb
## | |      \-- rpsblast
## | \-- scripts
## |      +-- bonafide.nonred.f.py
## |      +-- create_train_list.py
## |      +-- createbonafidef.py
## |      +-- locilst.py
## |      +-- nonred.loci.py
## |      +-- step1.sh
## |      +-- step2.sh
## |      \-- step3.sh
## \-- visualization
##      +-- GenomeViz
##      |      +-- custom_bopython-feature.png
##      |      +-- genviz-features.py
##      |      +-- index.html
##      |      \-- terr.png
##      +-- artemis
##      |      +-- artemis-g5.png
##      |      \-- lumter.artemis.track.gff3
##      \-- jbrowser
##      +-- 2087020.png
##      +-- cds.png
##      +-- intron.png

```

```
##      +-- start_codon.png
##      \-- transcript1.png
```

## References

- “Augustus.” n.d. Bioinformatics Notebook. Accessed November 25, 2024. <https://rnnh.github.io/bioinfo-notebook/docs/augustus.html>.
- “Augustus/Docs/RUNNING-AUGUSTUS.md at Master · Gaius-Augustus/Augustus.” n.d. GitHub. Accessed November 25, 2024. <https://github.com/Gaius-Augustus/Augustus/blob/master/docs/RUNNING-AUGUSTUS.md>.
- Baum, Dr Julia. n.d. “Ever Thought about Earthworms?” African Wildlife Economy Institute. Accessed November 25, 2024. <https://www0.sun.ac.za/awei/articles/ever-thought-about-earthworms>.
- “Bioinformatics and Other Bits - Creating a Local RefSeq Protein Blast Database.” n.d. Accessed November 28, 2024. <https://dmnfarrell.github.io/bioinformatics/local-refseq-db>.
- “Bioinformatics Web Server - University of Greifswald.” n.d. Accessed December 18, 2024. [https://bioinf.uni-greifswald.de/bioinf/partitioned\\_odb11/](https://bioinf.uni-greifswald.de/bioinf/partitioned_odb11/).
- Blaxter, Mark L., David Spurgeon, and Peter Kille. 2023a. “The Genome Sequence of the Common Earthworm, *Lumbricus Terrestris* (Linnaeus, 1758).” *Wellcome Open Research* 8 (October): 500. <https://doi.org/10.12688/wellcomeopenres.20178.1>.
- . 2023b. “The Genome Sequence of the Common Earthworm, *Lumbricus Terrestris* (Linnaeus, 1758).” *Wellcome Open Research* 8 (October): 500. <https://doi.org/10.12688/wellcomeopenres.20178.1>.
- Brůna, Tomáš, Katharina J Hoff, Alexandre Lomsadze, Mario Stanke, and Mark Borodovsky. 2021. “BRAKER2: Automatic Eukaryotic Genome Annotation with GeneMark-EP+ and AUGUSTUS Supported by a Protein Database.” *NAR Genomics and Bioinformatics* 3 (1): lqaa108. <https://doi.org/10.1093/nargab/lqaa108>.
- Buchfink, Benjamin, Chao Xie, and Daniel H Huson. 2015. “Fast and Sensitive Protein Alignment Using DIAMOND.” *Nature Methods* 12 (1): 59–60. <https://doi.org/10.1038/nmeth.3176>.
- colauttilab.github.io/. n.d. “De Novo Assembly Tutorial.” Accessed November 30, 2024. <https://colauttilab.github.io/NGS/deNovoTutorial.html>.
- “De Novo Assembly Tutorial.” n.d. Accessed December 29, 2024. <https://colauttilab.github.io/NGS/deNovoTutorial.html>.
- ebi.ac.uk. n.d. “ENA Browser.” Accessed November 25, 2024. <https://www.ebi.ac.uk/ena/browser/view/PRJEB59400>.
- “ENA Browser.” n.d. Accessed December 18, 2024. <https://www.ebi.ac.uk/ena/browser/view/ERR10851549>.

Erxleben, Anika, and Björn Grüning. 12:19:56 +0000. “Genome Annotation.” Text. Galaxy Training Network; Galaxy Training Network. 12:19:56 +0000. [https://translated.turbopages.org/proxy\\_u/en-ru.ru.dd5ab9ec-67446c58-5ab2c0cb-74722d776562/https/training.galaxyproject.org/training-material/topics/genome-annotation/tutorials/genome-annotation/tutorial.html](https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.dd5ab9ec-67446c58-5ab2c0cb-74722d776562/https/training.galaxyproject.org/training-material/topics/genome-annotation/tutorials/genome-annotation/tutorial.html).

“Gaius-Augustus/BRAKER.” (2018) 2024. Gaius-Augustus. <https://github.com/Gaius-Augustus/BRAKER>.

“Gene Cluster Visualizations in R.” n.d. Accessed November 27, 2024. <https://nvelden.github.io/geneviewer/>.

“Genome Annotation / Tutorial List.” 13:32:22 +0000. Text. Galaxy Training Network; Galaxy Training Network. 13:32:22 +0000. <https://training.galaxyproject.org/training-material/topics/genome-annotation/>.

“Home · TransDecoder/TransDecoder Wiki.” n.d. Accessed November 28, 2024. <https://github.com/TransDecoder/TransDecoder/wiki>.

“Index of /Genomes.” n.d. Accessed November 28, 2024. <https://ftp.ncbi.nlm.nih.gov/genomes/>.

“Index of /Genomes/MapView.” n.d. Accessed November 28, 2024. <https://ftp.ncbi.nlm.nih.gov/genomes/MapView/>.

“Index of /Releases/Dfam\_3.8/Families/FamDB/.” n.d. Accessed December 18, 2024. [https://www.dfam.org/releases/Dfam\\_3.8/families/FamDB/](https://www.dfam.org/releases/Dfam_3.8/families/FamDB/).

“JBrowse | JBrowse.” n.d. Accessed November 26, 2024. <https://jbrowse.org/jb2/>.

Leung, Maxwell C. K., Phillip L. Williams, Alexandre Benedetto, Catherine Au, Kirsten J. Helmcke, Michael Aschner, and Joel N. Meyer. 2008. “Caenorhabditis Elegans: An Emerging Model in Biomedical and Environmental Toxicology.” *Toxicological Sciences* 106 (1): 5–28. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfn121>.

“LumbriBASE.” n.d. Accessed November 30, 2024. [http://xyala2.bio.ed.ac.uk/Lumbribase/lumbribase\\_php/lumbribase.shtml](http://xyala2.bio.ed.ac.uk/Lumbribase/lumbribase_php/lumbribase.shtml).

ncbi.nlm.nih.gov. n.d. “The NCBI Eukaryotic Genome Annotation Pipeline.” Accessed November 25, 2024. [https://www.ncbi.nlm.nih.gov/refseq/annotation\\_euk/process/](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/refseq/annotation_euk/process/).

Pilato, Giovanni. n.d. “The significance of musculature in the origin of the Annelida.” Accessed November 30, 2024. <http://ouci.dntb.gov.ua/en/works/ldperODl/>.

“Sanger-Pathogens/Artemis.” (2009) 2024. Pathogen Informatics, Wellcome Sanger Institute. <https://github.com/sanger-pathogens/Artemis>.

Short, Stephen, Amaia Green Etxabe, Alex Robinson, David Spurgeon, and Peter Kille. 2023. “The Genome Sequence of the Red Compost Earthworm, *Lumbricus Rubellus* (Hoffmeister, 1843).” *Wellcome Open Research* 8 (August): 354. <https://doi.org/10.12688/wellcomeopenres.19834.1>.

Stanke, Mario. 2005. “Augustus Online.” Service. Institute for Mathematics and Computer Science, University of Greifswald. February 4, 2005. <https://bioinf.uni-greifswald.de/augustus/submission.php>.

“The Genome Sequence of the Common ... | Wellcome Open Research.” n.d. Accessed December 19, 2024. <https://wellcomeopenresearch.org/articles/8-500>.

“The NCBI Eukaryotic Genome Annotation Pipeline.” n.d. Accessed December 29, 2024. [https://www.ncbi.nlm.nih.gov/refseq/annotation\\_euk/process/](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/refseq/annotation_euk/process/).

University of Greifswald. n.d. “Bioinformatics Web Server - University of Greifswald.” Accessed December 28, 2024. [https://bioinf.uni-greifswald.de/bioinf/partitioned\\_odb11/](https://bioinf.uni-greifswald.de/bioinf/partitioned_odb11/).