Vlaanderen
is wetenschap

Monitoring van de effecten van de pompinstallatie en waterkrachtcentrale te Ham op het visbestand in het Albertkanaal

Raf Baeyens & Ine Pauwels, David Buysse, Ans Mouton, Jenna Vergeynst, Isabelle Papadopoulos, Nico De Maerteleire, Sebastien Pieters, Emilie Gelaude, Karen Robberechts, Pieterjan Verhelst, Sophie Vermeersch, Lore Vandamme & Johan Coeck.

INSTITUUT
NATUUR- EN BOSONDERZOEK

Auteurs:
Raf Baeyens & Ine Pauwels, David Buysse, Ans Mouton, Jenna Vergeynst, Isabelle Papadopoulos, Nico De Maerteleire, Sebastien Pieters, Emilie Gelaude, Karen Robberechts, Pieterjan Verhelst, Sophie Vermeersch, Lore Vandamme & Johan Coeck.
Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek

Het INBO is het onafhankelijk onderzoeksinstituut van de Vlaamse overheid dat via toegepast wetenschappelijk onderzoek, data- en kennisontsluiting het biodiversiteits-beleid en -beheer onderbouwt en evalueert.

Reviewers:
Jeroen Van Wichelen

Vestiging:
INBO Brussel
Havenlaan 88 bus 73, 1000 Brussel
www.inbo.be

e-mail:
ine.pauwels@inbo.be & raf.baeyens@inbo.be

Wijze van citeren:
Baeyens, R. & Pauwels, I.S., Buysse, D., Mouton, A.M., Vergeynst, J., Papadopoulos, I., De Maerteleire, N., Pieters, S., Gelaude, E., Robberechts, K., Verhelst, P., Vermeersch, S., Vandamme, L., Coeck, J.(2019). Monitoring van de effecten van de pompinstallatie en waterkrachtcentrale te Ham op het visbestand in het Albertkanaal. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2019 (53). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.
DOI: doi.org/10.21436/inbor.15830647

D/2019/3241/319
Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2019 (53)
ISSN: 1782-9054

Verantwoordelijke uitgever:
Maurice Hoffmann

Foto cover:
Luchtfoto pompinstallatie en waterkrachtcentrale van Ham op het Albertkanaal (foto van De Vlaamse Waterweg NV)

Dit onderzoek werd uitgevoerd in opdracht van:
De Vlaamse Waterweg NV (https://www.vlaamsewaterweg.be/)

© 2019, Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek

Monitoring van de effecten van de pompinstallatie en waterkrachtcentrale te Ham op het visbestand in het Albertkanaal

Raf Baeyens & Ine Pauwels

David Buysse, Ans Mouton, Jenna Vergeynst, Isabelle Papadopoulos, Nico De Maerteleire, Sebastien Pieters, Emilie Gelaude, Karen Robberechts, Pieterjan Verhelst, Sophie Vermeersch, Lore Vandamme & Johan Coeck

EINDRAPPORT

doi.org/10.21436/inbor.15830647
Bestek nr. FAC-D-STU-13-11

INSTITUUT
NATUUR- EN BOSONDERZOEK

Dankwoord

Gedurende de hele onderzoeksperiode konden we steeds rekenen op de bereidwillige ondersteuning van De Vlaamse Waterweg (DVW). Het inzetten van een kraan, het ad hoc oplossen van problemen of het aanpassen van bestaande infrastructuur om terugvangstpercentages te verhogen, het vormde nooit een probleem. Daarom gaat onze speciale dank uit naar Werner Dirckx en Koen Maeghe. Voor kleinere technische problemen konden we steeds beroep doen op de aanwezige techniekers van DVW, Gerd Lemmens en William.

Daarnaast willen we ook Jan Mangelschots en Kathleen Moësse danken voor de informatie over de installaties.

Een deel van de inzichten over het migratiegedrag van schieraal en zalmsmolt werd verworven met medewerking van collega's van de Universiteit van Luik. Een grote mate van appreciatie gaat uit naar Michaël Ovidio, Jean-Philippe Benitez en Arnaud Dierckx. Daarnaast zijn we ook Yvan Neus en Xavier Rollin dankbaar voor het ter beschikking stellen van gekweekte zalmsmolts voor het telemetrie-onderzoek.

Bovendien kon de studie naar het migratiegedrag niet onder de huidige omvang uitgevoerd worden zonder de financiële steun van Lifewatch (https://www.lifewatch.eu/belgium) voor een deel van de aankoop van infrastructuur.

Tot slot willen we team BMK van INBO, in het bijzonder Thierry Onkelinx, bedanken voor zijn ondersteuning bij de statistische analyses.

Ethiek

Met betrekking tot het gebruik van proefdieren beschikt het INBO over een erkenning van de Ethische Commissie, conform aan de wetgeving van de proefdierkunde (erkenning: LA1400559). Er werd voor aanvang van de proeven een 'aanvraagdossier voor de ethische evaluatie van dierproeven' ter goedkeuring voorgelegd aan de Ethische Commissie. Dit aanvraagdossier werd goedgekeurd.

Samenvatting

Het Albertkanaal is de belangrijkste economische waterweg in België. De onzekerheid over de toekomstige voeding van dit kanaal met water uit de Maas in het licht van klimaatverandering zette de beheerder, De Vlaamse Waterweg NV (DVW), aan tot het installeren van vijzelpompinstallaties (verder ook pomp- en waterkrachtcentrale genoemd). Deze installaties bestaan uit 's werelds grootste Archimedesschroeven, die niet alleen (schut)water kunnen oppompen in droge periodes, maar ook stroom genereren door overtollig water te turbineren. Finaal zal ter hoogte van elk van de zes sluiscomplexen op het Albertkanaal zo een installatie gebouwd en gebruikt worden. Ook in het kader van de bouw van deze toekomstige installaties is het noodzakelijk om de impact na te gaan van deze installaties op het omringende milieu, in dit geval op de toestand van de aanwezige visgemeenschap. Zo kunnen eventuele negatieve effecten m.b.v. gerichte maatregelen vermeden worden als blijkt dat de installaties veel schade berokkenen. Bovendien is het bij wet verplicht om de impact op het milieu na te gaan in een milieueffectenrapport (MER). Dit rapport beschrijft het onderzoek naar de impact van de vijzelinstallatie in Ham. Deze installatie heeft naast drie open Archimedesvijzels ook één gesloten buisvijzel. De buisvijzel wordt verwacht visvriendelijker te zijn. Hij kan alleen water oppompen en niet turbineren. De aanwezigheid van deze vijzel verantwoordt de keuze voor Ham als onderzoeksite. De studie werd uitgevoerd door het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek in opdracht van DVW.

Naast de directe impact van de installatie op passerende vissen, wordt ook de totale impact op de aanwezige visfauna in het Albertkanaal onderzocht. Tot de aanwezige fauna worden naast de residente soorten ook vissen gerekend die het Albertkanaal gebruiken als trekroute naar zee. Om de directe impact van de pomp- en waterkrachtcentrale in kaart te brengen werden experimenten uitgevoerd met gekweekte vissen van de soorten brasem (*Abramis brama*), paling (*Anguilla anguilla*), blankvoorn (*Rutilus rutilus*) en forel (*Salmo trutta fario*). De experimenten werden zowel bij pomp- als bij turbinewerking uitgevoerd om voor beide werkingen apart de impact te kunnen bepalen. De proefvissen van de vier soorten werden gedwongen de pompen en turbines te passeren en werden na passage gevangen, gewogen, gemeten en geëvalueerd op eventueel opgelopen schade. In de eerste plaats werd echter bepaald of de vissen de passage overleefden of niet. Op basis van de waargenomen proporties aan gestorven en zwaar beschadigde dieren, werd het totale verlies ten gevolge van de passage bepaald. Dit verliespercentage is een maat voor de directe impact van de installatie op passerende vissen. Ook vissen uit het Albertkanaal die tijdens hun (natuurlijke) stroomop- en stroomafwaartse migratie en/of dispersie (i.e. ongedwongen) de pompen en turbines passeerden werden op verschillende tijdstippen doorheen het jaar en over een periode van tenminste 24u onderzocht.

Vervolgens werd de kennis die verzameld werd in de experimenten op gedwongen en natuurlijke passage gebruikt om toekomstscenario's te berekenen over de totale impact van de installatie op het visbestand in het Albertkanaal. Daarvoor werd het aantal gevangen vissen omgerekend naar een aantal per volume water. Deze densiteit werd op zijn beurt vermenigvuldigd met toekomstscenario's over toekomstig te verpompen en te turbineren debieten. Tot slot werd ook kennis over het aantal vissen in het kanaal uit een voorgaande studie van het Agentschap voor Natuur en Bos (ANB) gebruikt om een ruwe inschatting te maken van het aandeel vissen die potentieel zouden kunnen verloren gaan, onder verschillende toekomstscenario's voor te verpompen of te turbineren debieten. Daarnaast werd specifiek geëvalueerd wat het aandeel migrerende vissen is die op hun trekroute naar zee het sluiscomplex van Ham passeren langs de waterkrachtcentrale. Daarvoor werd een groot aantal individuen van paling en zalm gevangen en van een zender voorzien. De dieren werden vrijgelaten in de Maas en het Albertkanaal om hun migratieroute te kunnen evalueren met behulp van akoestische telemetrie.

De resultaten van de studie geven het volgende inzicht over de directe en totale impact van de **pompinstallatie** op passerende vissen. Algemeen is er een verlies aan vis van ongeveer

13 tot 23%. Van de natuurlijk verpompte vissen gingen er gemiddeld 13% dood of ze raakten zwaar gewond. Bij de vissen die gedwongen werden de open vijzels te passeren was het verlies gemiddeld 23% over de drie geteste soorten heen. Specifiek per soort werd een verlies vastgesteld van gemiddeld (over alle debieten van de open vijzels) 15% brasem, 15% paling en 38% blankvoorn. Deze gemiddeldes waren voor brasem en blankvoorn deels afhankelijk van het debiet waarop gepompt werd. Anderzijds verschilden deze percentages voor brasem en paling naargelang de lengte van de vissen. Er werd nooit een verlies groter dan 39% geobserveerd. Het laagst mogelijke verlies was 6%. Het verlies door de gesloten pompvijzel bij brasem, blankvoorn en paling was lager (respectievelijk 9, 10 en 11%) dan bij de open vijzels. De uiteindelijke impact van de pompinstallatie op de aanwezige visfauna in het kanaal is klein omdat slechts weinig vissen gebruik maken van deze doorgang. In het slechtst mogelijke toekomstscenario wordt een verlies geschat van 15% van het visbestand in het Albertkanaal ten gevolge van de werking van de pompinstallaties wanneer deze alle zes tegelijk in werking zijn, en wanneer deze uit open vijzels bestaan. Wanneer de pompinstallaties uit gesloten vijzels zouden bestaan, wordt het verlies geschat op 2% van het visbestand.

Het verlies in **turbinemodus** bij de soorten die gedwongen werden om de turbines te passeren was vergelijkbaar met de pompmodus voor paling (17%) en blankvoorn (34%), maar was veel groter voor brasem (55%). Deze gemiddeldes weken in kleine mate af naargelang de grootte van de vissen en het debiet waarop geturbineerd werd, maar algemeen was er nooit meer dan 59% verlies. Bovendien werd enkel bij 3 en 4 m^3/s voor grote brasems een verlies tot 64% gevonden. Voor forel waren de geobserveerde verliezen groter, maar dat kwam vermoedelijk doordat deze vissen teveels stress ondervonden van de manipulaties die ze tijdens de experimenten ondergingen. Hierdoor werden de resultaten van deze testen verder niet meegenomen in de conclusies. Het gemiddeld gemeten verlies voor alle ongedwongen geturbineerde vissoorten was 25%. Dit is relatief groot door de directe impact op de passerende vissen. De impact van de waterkrachtcentrale was groter dan de impact door het pompen. De grotere impact op het visbestand in het Albertkanaal is niet groter omdat er meer vissen per volume water geturbineerd worden, integendeel. De natuurlijke proeven wijzen erop dat er minder vis per volume water geturbineerd wordt dan verpompt. In het slechtst mogelijke toekomstscenario wordt een verlies geschat van 34% van het visbestand in het Albertkanaal ten gevolge van de werking van de waterkrachtcentrales wanneer deze alle zes tegelijk in werking zijn.

De impact op het visbestand in het Albertkanaal wordt voor het slechtst mogelijke toekomstscenario gedefinieerd als 34% van het geobserveerde aantal vissen in het Albertkanaal.

In de studie naar de grote **migratoren** observeerden we dat 18% van de gezenderde palingen gebruik maakten van de waterkrachtcentrale om stroomafwaarts te migreren voorbij het sluiscomplex in Ham. Van de bestudeerde zalmen koos geen enkel individu de route via de waterkrachtcentrale. Als het gemiddeld geobserveerde verlies van 17% van de palingen die de turbines passeren vermenigvuldigd wordt met een verwacht aandeel van 18% die langs de waterkrachtcentrale van Ham passeert, dan resulteert dat in een verwacht verlies van 3% van de uittrekkende palingen ter hoogte van de waterkrachtcentrale in Ham.

Ondanks hoge verliescijfers voor zowel pomp- als turbinemodus, speelt de factor 'visgedrag' een bepalende rol in de bepaling van het uiteindelijke effect van de installaties. Het eerder beperkt gebruik van de vijzels bij pomp- en turbinewerking door grote migratoren, resulteert in een kleiner negatief effect op het visbestand. Rekening houdend met het frequenter gebruik door vissen van de installatie in turbinemodus, in combinatie met de geobserveerde hoge verliescijfers en de huidige status van o.a. paling, wordt er aanbevolen om het toevoerriool af te schermen voor vissen, zodat deze niet in de installatie terecht komen.

Summary

The Albert Canal is the most important economic waterway in Belgium. Due to climate change, uncertainty about the water supply from the river Meuse rises. Therefore, the water manager, 'De Vlaamse Waterweg NV' (DVW), aims to install six pumping/hydropower stations at each of the six ship lock complexes that are present on the canal. These installations are equipped with Archimedes screws that serve as pumps as well as turbines. The water manager is obliged to evaluate the impact of these installations on the environment prior to the construction and use of other installations. In this study, the impact of the installations on fish was investigated. First, the direct impact of the Archimedes screws on the state of passing fish was evaluated. Second, the impact on the fish populations in the Albert Canal was evaluated by combining the results of the direct impact of the screws, with information on the fish abundance in the entire canal and future scenarios on pumped or turbinated volumes of water.

In order to estimate the direct impact of the screws on passing fish, experiments were conducted with hatched fish of four species. Selected species were bream (*Abramis brama*), roach (*Rutilus rutilus*), European eel (*Anguilla anguilla*) and brown trout (*Salmo trutta fario*). Bream and roach are dominant species in the canal. European eel is abundant as well, and moreover this species uses the canal as a migration route to the sea. Trout was selected as a representative for Atlantic salmon. Beside eel, Atlantic salmon smolts use the Albert canal as a migration route to the sea. In these experiments fish were forced to pass the screws at all operational discharges possible and at both operational modes: pumping and turbinating. The impact on trout was only tested for the turbinating mode as Atlantic salmon are only expected to pass the hydropower installation on their downstream migration to the sea (i.e. the screws in turbinating mode). Every fish that was caught after forced passage, was evaluated on its state (dead or alive) and possible injuries. The following types of injury were defined: scale loss for ≤ 25% of the body surface and fin injuries (light injury), and scale loss for > 25% of the body surface, contusion(s), haemorrhage(s) or cut(s) (heavy injury). Further, fish were weighed and measured. The percentages per state and type of injury were defined for each test. Based on these observations, the percentage of fish that was actually lost from the population was defined. Herein, a fish that was lost was defined as either dead or heavily injured. The observed data were also used to develop a statistical model per experiment, which indicated the chance of a fish to be eliminated from the population and whether this chance was influenced by fish length, fish weight and the operational discharge of the screws.

Beside the experiments with forced fish passage, evaluations were performed on wild fish that passed the screws (both in pump and turbine mode) within several experiments during the year, each lasting 24 hours. Caught fish were evaluated similarly as in the experiments on forced passage and the number of fish per species was determined.
Next, the observed and modeled percentages of loss, resulting from the experiments with forced passage, were combined with information on future volumes of water and information on fish abundance in the Albert canal to generally define the impact on the fish populations in the canal.
Finally, the percentage of migratory European eel and Atlantic salmon passing the hydropower installation during downstream migration was evaluated by tracking a large number of individuals with acoustic telemetry. The behavior in the vicinity of the hydropower installation and in the entire canal up to the port of Antwerp was studied, and their escapement success was calculated. Some eel were even tracked from the river Ourthe onwards, to evaluate if they could reach the sea either via the Albert canal or the Meuse river.

The experiments on forced fish passage through the **pumping** (open) screws indicated a direct loss (dead or heavily injured) of around 15% of bream and eel and 38% of roach.

Of all wild fish passing the pumping screws during the 24h-tests, 13% was observed dead or heavily injured due to screw passage. The experiments with forced passage indicated that less fish died or got heavily injured when passing the closed screw, in contrast to the open screws. Respectively 9, 11 and 10% of bream, roach and eel died or got heavily injured due to passage of the closed screw. Additionally, the closed screw pumped less fish per volume of water than an open screw during the 24h-continuous measurements. Despite this direct impact, the final impact of the installation in pumping mode is rather small, because relatively few resident fish are pumped by the installation. Future scenarios on pumping indicate a worst-case loss of 15% of the fish in the Albert canal when only open screws are used and assuming that all six (future) installations are operational. Under the same scenarios and assumptions, pumping with only closed screws would minimize the predicted loss to 2% of the fish in the Albert canal.

The experiments on forced fish passage through the **turbines** indicated a loss of 55% (i.e. dead or heavily injured) of the tested bream, 17% of eel and 34% of roach. These percentages may vary with the length of the fish and the discharge that is turbinated, but will not be higher than 59%. Only large breams are expected to have a risk of up to 64% to die or get heavily injured during passage when turbinating 3 or 4 m^3/s. Observations for trout were worse still, but the statistical analysis indicated a potential effect of handling during the experiments. Therefore, the results for trout were ignored. Of all wild fish that were turbinated, 25% were observed to be dead or heavily injured due to screw passage. Moreover, the impact of the hydropower installation on the fish populations in the Albert canal is found to be relatively large and larger than the impact of pumping. This is due to the relatively high direct impact of the hydropower installation and not because a higher number of fish per volume of water is turbinated. Future scenario's on volumes of water to be turbinated, indicate a worse-case scenario of 34% fish loss from the Albert canal, if all six hydropower installations are operative at full power of 15 m^3/s per screw and three screws per installation.

The behavioural study of the **migratory eel and salmon** indicated that 18% of the tracked eel passed the ship lock complex of Ham via the hydropower installation, in contrast to the tracked salmon that only passed the ship lock complex through the ship locks (if they passed it). Since the risk for an eel to die or get heavily injured when passing the hydropower installation is 17%, and since eels have 18% chance of passing the hydropower installation when it is operational, the expected loss of downstream migrating eels in Ham is 3%.

Hence, the results indicate that fish behaviour itself plays an important role in the resulting effect of the installation on the resident and migratory fish in the canal. Therefore, we emphasize that any device that can prevent a fish from entering the installation will drastically minimize the final impact on the fish populations in the canal. This is specifically true in times when multiple installations are simultaneously operational and need to pump or turbinate large volumes of water.

Inhoudsopgave

Dankwoord ... 2

Ethiek ... 2

Samenvatting ... 4

Summary ... 4

Lijst van figuren ... 9

Lijst van tabellen ... 18

1 Inleiding ... 22

2 Doelstellingen ... 25

2.1 Onderzoeksvragen ... 25

2.1.1 Directe impact van de pomp- en waterkrachtcentrale op vissen die de installatie passeren 25

2.1.2 Totale impact van de pomp- en waterkrachtcentrale op de aanwezige visfauna in het Albertkanaal ... 26

2.2 Leidraad opbouw studie ... 26

3 Materiaal en methoden ... 31

3.1 Studiegebied ... 31

3.1.1 Het Albertkanaal ... 31

3.1.2 Het beheer van het Albertkanaal ... 32

3.1.3 De pompinstallatie en waterkrachtcentrale in Ham ... 33

3.1.3.1 De pompinstallatie ... 35

3.1.3.2 De waterkrachtcentrale ... 35

3.1.3.3 Visveiligheid ... 36

3.2 Proefopzet ... 36

3.2.1 Experimenten gedwongen en natuurlijke passage ... 36

3.2.1.1 Sterfte en schadebeoordeling ... 36

3.2.1.2 Pomp experimenten ... 39

3.2.1.2.1 Opvangconstructie ... 39

3.2.1.2.2 Experimenteel design ... 40

3.2.1.3 Turbine experimenten ... 41

3.2.1.3.1 Opvangconstructie ... 41

3.2.1.3.2 Experimenteel design ... 42

3.2.2 Migratiestudie paling en zalm ... 43

3.2.2.1 Vismigratie ... 44

3.2.2.1.1 Vismigratie in (uitsluitend) rivieren: potadrome migratie ... 44

3.2.2.1.2 Vismigratie tussen zee en rivier: diadrome migratie ... 44

3.2.2.2 Akoestische telemetrie ... 46

3.2.2.2.1 Akoestische ontvangers/hydrofoons ... 46

3.2.2.2.2 Akoestische zenders ... 49

3.2.2.2.3 Vangen en zenderen van proefdieren ... 50

3.3 Data-analyse **51**
3.3.1 Experimenten gedwongen passage 51
3.3.1.1 Observaties 51
3.3.1.2 Statistiek 52
3.3.2 Experimenten natuurlijke passage 54
3.3.3 Berekeningen toekomstscenario's 54
3.3.4 Migratiestudie paling en zalm 55

4 Resultaten ***56***

4.1 Experimenten gedwongen passage **56**
4.1.1 Pompen 56
4.1.1.1 Terugvangstpercentages 56
4.1.1.2 Observaties toestand (sterfte) 57
4.1.1.3 Observaties schadegroepen (zware schade) 58
4.1.1.4 Statistiek sterftekans en verlieskans 60
4.1.1.5 Observaties schadeklassen 65
4.1.1.6 Sterftekans ongeacht het ongekende lot van niet-geobserveerde vissen 66
4.1.1.7 Samenvatting sterfte en verlies 68
4.1.2 Turbines 69
4.1.2.1 Terugvangstpercentages 69
4.1.2.2 Observaties toestand (sterfte) 70
4.1.2.3 Observatie schadegroepen (zware schade) 70
4.1.2.4 Statistiek sterftekans en verlieskans 72
4.1.2.5 Observatie schadeklassen 79
4.1.2.6 Sterftekans ongeacht het ongekende lot van niet-geobserveerde vissen 80
4.1.2.7 Samenvatting sterfte en verlies 82

4.2 Experimenten natuurlijke passage **83**
4.2.1 Pompen 83
4.2.1.1 Open vijzels 83
4.2.1.2 Gesloten vijzel 83
4.2.1.3 Illustraties waargenomen schade 84
4.2.2 Turbines 85
4.2.2.1 Illustraties waargenomen schade 86

4.3 Berekenen toekomstscenario's **87**
4.3.1 Pompen 87
4.3.2 Turbines 88

4.4 Migratiestudie paling en zalm **89**
4.4.1 Schieraal 89
4.4.1.1 Zeewaartse migratie doorheen het Albertkanaal 89
4.4.1.2 Routekeuze ter hoogte van sluiscomplex Ham 91
4.4.1.3 Migratieverliezen vanaf sluiscomplex Ham 96
4.4.2 Zalmsmolt 97
4.4.2.1 Routekeuze ter hoogte van sluiscomplex Ham 97
4.4.2.2 Migratieverliezen vanaf sluiscomplex Ham 101
4.4.2.3 Toetsing resultaten met het beoordelingskader van de MER 102

5 Bespreking ***104***

5.1 Directe impact pompen **104**

5.1.1 Gesloten buisvijzel 104
5.1.2 Open vijzels 105

5.2 Directe impact turbines 106

5.3 Toekomstscenario's 107

5.4 Migratiestudie paling en zalm 108

5.4.1 Het Albertkanaal als migratieroute 108
5.4.2 De rol van de sluiscomplexen in zeewaartse vismigratie 109
5.4.3 De impact van werkende vijzelturbines op stroomafwaarts migrerende vissen 110

6 Algemeen besluit 111

7 Referenties 114

8 Bijlagen 117

8.1 Algemeen 117

8.2 Lengteverdeling proefvissen experimenten gedwongen passage 117

8.3 Schadegroepen en schadeklassen gedwongen passage pompen per debiet 118

8.4 Statistische testen: parameterwaarden 121

8.4.1 Statistische test verlieskans verpompte brasem 121
8.4.2 Statistische test sterftekans verpompte paling 123
8.4.3 Statistische test verlieskans verpompte paling 124
8.4.4 Statistische test sterftekans verpompte blankvoorn 126
8.4.5 Statistische test verlieskans verpompte blankvoorn 127
8.4.6 Statistische test sterftekans geturbineerde brasem 127
8.4.7 Statistische test verlieskans geturbineerde brasem 129
8.4.8 Statistische test sterftekans geturbineerde paling 131
8.4.9 Statistische test verlieskans geturbineerde paling 132
8.4.10 Statistische test sterftekans geturbineerde blankvoorn 134
8.4.11 Statistische test verlieskans geturbineerde blankvoorn 135
8.4.12 Statistische test sterftekans geturbineerde forel 137
8.4.13 Statistische test verlieskans geturbineerde forel 139
8.4.14 Figuren schadeklassen turbineproeven voor brasem, paling, blankvoorn en forel 142

Lijst van figuren

Figuur 1: Situering Albertkanaal met aanduiding sluiscomplexen. 31

Figuur 2: Schematisch overzicht van het kanalenstelsel rond het Albertkanaal en de Maas met alle mogelijke vismigratieknelpunten voor o.a. paling en zalm die uittrekt naar zee. De rode cirkel duidt het sluiscomplex van Ham aan, waar het overgrote deel van dit onderzoek zich afspeelt. De studie naar de migratiekeuze van paling en zalm situeert zich in het kanalenstelsel rond het Albertkanaal en de Maas 33

Figuur 3: Luchtfoto pompinstallatie/waterkrachtcentrale in Ham (bron: DVW)..... 34

Figuur 4: Luchtfoto van het sluiscomplex in Ham met aanduiding van de sluizen, de pompinstallatie/waterkrachtcentrale en de netto stroomrichting (witte pijl; stroomopwaartse zijde rechts van het sluiscomplex, stroomafwaartse zijde links). 34

Figuur 5: Profieldoorsnede van de vijzel, waarbij de inlaatklep van de vijzel omlaag is (rode pijl), zodat water de vijzel draaiende kan houden om stroom op te wekken. Inzet: aanzicht in droge toestand van de inlaatklep in gesloten toestand. 35

Figuur 6: a) schadeklassen (1: decapitatie of doorsnijding, 2: snijwonde, 3: kneuzing, 4: schubverlies, 4 & 5: vinschade), b) Illustratie van de inwendige schade bij een kneuzing bij paling 37

Figuur 7: Opgetakelde pompfuik met schuilconstructie achteraan. 39

Figuur 8: Invoerbuis voor de gedwongen pompproeven (links) en luchtfoto (rechts) met de locatie van de pompput beneden aan de vijzels (rode kader), het pompstation (gele kader) en de opvangconstructie (groen). 41

Figuur 9: Opvangconstructie voor de turbineproeven (links: locatie van de kooi, de geleidingsfuik en het opvangponton. Rechts: foto van de plaatsing van de vangstkooi in de sponningen van de vuilroosters. 42

Figuur 10: Levenscyclus van Europese paling. 45

Figuur 11: Detail van de locaties van de hydrofoons in het Albertkanaal (zwarte ruit: sluiscomplex, gele bol: hydrofoon, rood vierkant: hydrofoon en uitzetlocaties in het Albertkanaal). Inzet: montage voor de ophanging van een hydrofoon in het Albertkanaal, waarbij na installatie in het water de hydrofoon verticaal en iets boven de kanaalbodem hangt. 47

Figuur 12: Overzicht van het volledige Belgisch netwerk aan hydrofoons (zie ook http://www.lifewatch.be/). 47

Figuur 13: Schematisch overzicht van het volledige netwerk aan hydrofoons in het studiegebied. 48

Figuur 14: Locatie van de hydrofoons in het VPS netwerk (groene bollen; 2-dimensionale evaluatie van visbeweging) en extra hydrofoons in de sluizen en het toevoerkanaal (gele bollen; 1 dimensionale evaluatie van visbeweging of evaluatie van aan- of afwezigheid). 49

Figuur 15: Principe van positiebepaling in een VPS netwerk (bron: Vemco). 49

Figuur 16: Linker helft van een dubbele schietfuik. 50

Figuur 17: Links: verschillende types Vemco zenders. Rechts: het dichtnaaien van de buikholte van een schieraal na het inbrengen van een zender. 50

Figuur 18: Uitzetlocaties (gele sterren)van schieraal en zalmsmolts met aanduiding van de sluiscomplexen van het Albertkanaal (zwart). 51

Figuur 19: Percentage terugvangst per soort en debiet als de range tussen het kleinste en grootste geobserveerde terugvangstpercentage over de drie herhalingen per getest debiet per soort (verticale waardebalken), en het gemiddelde terugvangstpercentage per soort over de debieten heen (horizontale stippellijn).. 56

Figuur 20: Het percentage levende ('alive'), en dode ('dead') dieren van het totaal aantal teruggevangen dieren na gedwongen passage door de pomp. Voor brasem en paling werden herhalende testen uitgevoerd, maar voor blankvoorn niet. De balkjes visualiseren de range tussen het kleinste en grootste percentage van de verschillende herhalende testen (bij brasem en paling) per debiet. De gesloten vijzel komt overeen met een debiet van 1,5 m³/s, de andere debieten betreffen passage door de open vijzels. Afwezigheid van een balkje betekent dat de proportie 0 % was binnen deze klasse..... 57

Figuur 21: Het percentage dode ('dead'), en zwaar ('heavily'), lichte ('moderately') en niet ('none') beschadigde dieren van het totaal aantal teruggevangen dieren na gedwongen passage door de pomp per type vijzel (gesloten versus open). Voor brasem en paling werden herhalende testen uitgevoerd, maar voor blankvoorn niet. De balkjes visualiseren de range tussen het kleinste en grootste percentage van de verschillende (herhalende) testen (bij brasem en paling) per vijzeltype. De gesloten vijzel komt overeen met een debiet van 1,5 m³/s, de open vijzels betreffen testen op 3, 4 en 5 m³/s. Afwezigheid van een balkje betekent dat de proportie 0 % was binnen deze klasse..... 59

Figuur 22: (a) Voorspelde sterftekans en (b) voorspelde verlieskans (sterfte + zware schade) voor brasem die verpompt wordt met de gesloten vijzel (links boven), of met de open vijzel op 3 (rechts boven), 4 (links onder) of 5 m³/s (rechts onder)(donker blauwe lijn: gemiddelde sterftekans, licht blauwe arcering: 60% betrouwbaarheidsinterval, midden blauwe arcering: 80% betrouwbaarheidsinterval, donker blauwe arcering: 95% betrouwbaarheidsinterval)..... 62

Figuur 23: (a) Voorspelde sterftekans en (b) voorspelde verlieskans voor paling die verpompt wordt met de gesloten vijzel (links boven), of met de open vijzel op 3 (rechts boven), 4 (links onder) of 5 m³/s (rechts onder) ten opzichte van de lengte (gemodelleerd in dm) van de paling. (donker blauwe lijn: gemiddelde sterftekans, licht blauwe arcering: 60% betrouwbaarheidsinterval, midden blauwe arcering: 80% betrouwbaarheidsinterval, donker blauwe arcering: 95% betrouwbaarheidsinterval)..... 63

Figuur 24: (a) Voorspelde sterftekans en (b) voorspelde verlieskans voor blankvoorn die verpompt wordt met de gesloten vijzel (links boven), of met de open vijzel op 3 (rechts boven), 4 (links onder) of 5 m³/s (rechts onder) ten opzichte van de lengte (gemodelleerd in dm) van de blankvoorn. (donker blauwe lijn: gemiddelde sterftekans, licht blauwe arcering: 60% betrouwbaarheidsinterval, midden blauwe arcering: 80% betrouwbaarheidsinterval, donker blauwe arcering: 95% betrouwbaarheidsinterval). De lengte van de vis heeft geen significant effect op zijn sterftekans, maar het vijzeltype en debiet wel..... 65

Figuur 25: Het percentage aan niet-beschadigde dieren (dood, stervend of levend) en dieren met schubverlies (tot 25, 50, 75 en 100% van hun lichaamsoppervlak), vinschade, snijwond(en), kneuzing(en) en onthoofding van het totaal aantal teruggevangen vissen na gedwongen passage door de pomp per vijzeltype (open of gesloten). De balkjes visualiseren de range tussen het kleinste en grootste percentage van de verschillende herhalende testen per debiet. De gesloten vijzel komt overeen met een debiet van 1,5 m³/s, de andere debieten betreffen passage door de open vijzels. Afwezigheid van een balkje betekent dat de proportie 0 % was binnen deze klasse..... 66

Figuur 26: Percentage terugvangst per soort en debiet als de range tussen het kleinste en grootste geobserveerde terugvangstpercentage over de drie herhalingen per getest debiet per soort (verticale waardebalken), en het gemiddelde terugvangstpercentage per soort over de debieten heen (horizontale stippellijn).. 69

Figuur 27: Het percentage levende ('alive'), en dode ('dead') dieren van het totaal aantal teruggevangen dieren na gedwongen passage door de turbine. Per soort en debiet werden 3 herhalende testen met 100 vissen uitgevoerd. De balkjes visualiseren de range tussen het kleinste en grootste percentage van de drie testen..... 70

Figuur 28: Het percentage dode, zwaar beschadigde, licht beschadigde en niet zichtbaar beschadigde vissen na passage door de turbine van het totaal aantal teruggevangen dieren. De beschadigde dieren waren levend bij terugvangst, de groep dode dieren bevat naast dode dieren ook stervende dieren. 71

Figuur 29: (a) Voorspelde sterftekans en (b) voorspelde verlieskans voor brasem die geturbineerd wordt met de open vijzel op 3 (links), 4 (midden) of 5 m³/s (rechts) ten opzichte van de lengte (gemodelleerd in cm) van de brasems. (donker blauwe lijn: gemiddelde sterftekans, licht blauwe arcering: 60% betrouwbaarheidsinterval, midden blauwe arcering: 80% betrouwbaarheidsinterval, donker blauwe arcering: 95% betrouwbaarheidsinterval)..... 74

Figuur 30: (a) Voorspelde sterftekans en (b) voorspelde verlieskans voor paling die geturbineerd wordt met de open vijzel op 3 (links), 4 (midden) of 5 m³/s (rechts) ten opzichte van de lengte (gemodelleerd in cm) van de palingen. (donker blauwe lijn: gemiddelde sterftekans, licht blauwe arcering: 60% betrouwbaarheidsinterval, midden blauwe arcering: 80% betrouwbaarheidsinterval, donker blauwe arcering: 95% betrouwbaarheidsinterval)..... 75

Figuur 31: (a) Voorspelde sterftekans en (b) voorspelde verlieskans voor blankvoorn die geturbineerd wordt met de open vijzel op 3 (links), 4 (midden) of 5 m³/s (rechts) ten opzichte van de lengte (gemodelleerd in cm) van de blankvoorns. (donker blauwe lijn: gemiddelde sterftekans, licht blauwe arcering: 60% betrouwbaarheidsinterval, midden blauwe arcering: 80% betrouwbaarheidsinterval, donker blauwe arcering: 95% betrouwbaarheidsinterval)..... 77

Figuur 32: (a) Voorspelde sterftekans en (b) voorspelde verlieskans voor forel die geturbineerd wordt met de open vijzel op 3 (links), 4 (midden) of 5 m³/s (rechts) ten opzichte van de lengte (gemodelleerd in cm) van de forellen op basis van een model met vis gewicht (WAIC = 486.56) (donker blauwe lijn: gemiddelde sterftekans, licht blauwe arcering: 60% betrouwbaarheidsinterval, midden blauwe arcering: 80% betrouwbaarheidsinterval, donker blauwe arcering: 95% betrouwbaarheidsinterval)..... 79

Figuur 33: Het percentage aan niet-beschadigde dieren (dood, stervend of levend) en dieren met schubverlies (tot 25, 50, 75 en 100% van hun lichaamsoppervlak), vinschade, snijwond(en), kneuzing(en) en onthoofding van 3 herhalende testen per soort..... 80

Figuur 34: Kans dat een dode brasem (Bream), paling (Eel) en blankvoorn (Roach) gevangen wordt in de opvangconstructie bij een test op 5 m³/s. 81

Figuur 35: Enkele voorbeelden van pompschade door de open vijzel..... 85

Figuur 36: Voorbeelden van zware schade bij verschillende vissoorten na doorgang door een open vijzel in turbinemodus; schubverlies, vinschade en snijwonde open kieuwdeksel bij karper (1), schubverlies en kneuzing bij blankvoorn (2),

schubverlies en snijwonde bij brasem (3), schubverlies, snijwonde en vinschade bij blankvoorn (4), kneuzingen bij paling (5) en decapitatie bij snoekbaars..... 86

Figuur 37: Schematisch overzicht van de verdeling van 15 schieralen, uitgezet in de monding van de Ourthe (boven) en afsplitsing van het Albertkanaal ter hoogte van Monsin..... 90

Figuur 38: Verdeling van 55 schieralen die uitgezet werden in het Albertkanaal stroomopwaarts de sluiscomplexen van Genk (n=37, enkel schieralen die stroomafwaarts migreerden door het Albertkanaal), Diepenbeek (n=5) en Hasselt (n=13). 91

Figuur 39: Verdeling van 86 VPS schieralen. Alle percentages refereren aan het beginaantal van 86 schieralen..... 92

Figuur 40: Verdeling van 86 VPS schieralen ter hoogte van het sluiscomplex in Ham. 92

Figuur 41: Passeerpoging van een schieraal met zendernummer 105, welke passeerde via de noordersluis. De kleuren van de dots geven een indicatie over de betrouwbaarheid van de positieberekening waarbij geel zeer goed is en rood minder betrouwbaar..... 93

Figuur 42: Passeerpoging van een schieraal met zendernummer 38747, welke passeerde via de noordersluis. De kleuren van de dots geven een indicatie over de betrouwbaarheid van de positieberekening waarbij geel zeer goed is en rood minder betrouwbaar..... 93

Figuur 43: Passeerpoging van een schieraal met zendernummer 47320, welke passeerde via de turbines. De kleuren van de dots geven een indicatie over de betrouwbaarheid van de positieberekening waarbij geel zeer goed is en rood minder betrouwbaar..... 94

Figuur 44: Verdeling van de procentuele turbinetijd tijdens 91 passeerpogingen van schieralen aan het sluiscomplex van Ham. Zwarte bollen zijn de gemiddelden en sterretjes zijn uitbijters (1,5*IQR)..... 95

Figuur 45: De kans op passage van de waterkrachtcentrale van een schieraal in het VPS netwerk in functie van het percentage van zijn verblijftijd dat de turbines in werking waren..... 96

Figuur 46: Migratieverliezen van 82 schieralen vanaf het sluiscomplex in Ham. Zwarte verliescijfers zijn verliezen in het pand na passage door het stroomopwaartse complex, rode verliescijfers zijn verliezen te wijten aan het niet kunnen passeren van sluiscomplexen (geen detectie stroomafwaarts sluiscomplex). 96

Figuur 47: Verdeling van 72 VPS zalmsmolts..... 98

Figuur 48: Verdeling van 72 zalmsmolts ter hoogte van het sluiscomplex van Ham. 98

Figuur 49: Passeerpoging van een zalmsmolt met zendernummer 34434, welke passeerde via de vulopening van de middensluis. De kleuren van de dots geven een indicatie over de betrouwbaarheid van de positieberekening waarbij geel zeer goed is en rood minder betrouwbaar. 99

Figuur 50: Passeerpoging van een zalmsmolt met zendernummer 34437, welke passeerde via de vulopening van de duwvaartsluis. De kleuren van de dots geven een indicatie over de betrouwbaarheid van de positieberekening waarbij geel zeer goed is en rood minder betrouwbaar. 99

Figuur 51: Passeerpoging van een zalmsmolt met zendernummer 34519, welke passeerde via de vulopening van de noordersluis. De kleuren van de dots geven een indicatie over de betrouwbaarheid van de positieberekening waarbij geel zeer goed is en rood minder betrouwbaar. 100

Figuur 52: Verdeling van de procentuele turbinetijd tijdens 72 passeerpogingen van zalmsmolts aan het sluiscomplex van Ham. Zwarte bollen zijn de gemiddelden en sterretjes zijn uitbijters (1,5*IQR). 100

Figuur 53: Migratieverliezen van 59 zalmsmolts vanaf het sluiscomplex in Ham. Zwarte verliescijfers zijn verliezen in het pand na passage door het stroomopwaartse complex, rode verliescijfers zijn verliezen te wijten aan het niet kunnen passeren van sluiscomplexen 101

Figuur 54: (1) Foto van de inslag van de buisvijzel van Ham, (2) foto van een buisvijzel met een axiaalwaaier (bron: Fishflow Innovations), en (3) foto van de buisvijzel van Ham in werking 104

Figuur 55: Rubberen beschermstrip over de vijzelinslag. 107

Figuur 56: Lengte (mm) verdeling van de geteste individuen per soort voor de experimenten met gedwongen passage bij pompwerking 117

Figuur 57: Lengte (mm) verdeling van de geteste individuen per soort voor de experimenten met gedwongen passage bij turbinewerking. 118

Figuur 58: Het percentage dode ('dead'), en zwaar ('heavily'), lichte ('moderately') en niet ('none') beschadigde dieren van het totaal aantal teruggevangen dieren na gedwongen passage door de pomp per debiet. Voor brasem en paling werden herhalende testen uitgevoerd, maar voor blankvoorn niet. De balkjes visualiseren de range tussen het kleinste en grootste percentage van de verschillende herhalende testen (bij brasem en paling) per debiet. De gesloten vijzel komt overeen met een debiet van 1,5 m³/s, de andere debieten betreffen passage door de open vijzels. Afwezigheid van een balkje betekent dat de proportie 0 % was binnen deze klasse 119

Figuur 59: Het percentage aan niet-beschadigde dieren (dood, stervend of levend) en dieren met schubverlies (tot 25, 50, 75 en 100% van hun lichaamsoppervlak), vinschade, snijwond(en), kneuzing(en) en onthoofding van het totaal aantal teruggevangen brasems na gedwongen passage door de pomp per debiet. De balkjes visualiseren de range tussen het kleinste en grootste percentage van de verschillende herhalende testen per debiet. De gesloten vijzel komt overeen met een debiet van 1,5 m³/s, de andere debieten betreffen passage door de open vijzels. Afwezigheid van een balkje betekent dat de proportie 0 % was binnen deze klasse 119

Figuur 60: Het percentage aan niet-beschadigde dieren (dood, stervend of levend) en dieren met schubverlies (tot 25, 50, 75 en 100% van hun lichaamsoppervlak), vinschade, snijwond(en), kneuzing(en) en onthoofding van het totaal aantal teruggevangen palingen na gedwongen passage door de pomp per debiet. De balkjes visualiseren de range tussen het kleinste en grootste percentage van de verschillende herhalende testen per debiet. De gesloten vijzel komt overeen met een debiet van 1,5 m³/s, de andere debieten betreffen passage door de open vijzels. Afwezigheid van een balkje betekent dat de proportie 0 % was binnen deze klasse 120

Figuur 61: Het percentage aan niet-beschadigde dieren (dood, stervend of levend) en dieren met schubverlies (tot 25, 50, 75 en 100% van hun lichaamsoppervlak), vinschade, snijwond(en), kneuzing(en) en onthoofding van het totaal aantal teruggevangen blankvoorns na gedwongen passage door de pomp per debiet. De balkjes visualiseren de range tussen het kleinste en grootste percentage van de verschillende herhalende testen per debiet. De gesloten vijzel komt overeen met een debiet van 1,5 m³/s, de andere debieten betreffen passage door de open vijzels. Afwezigheid van een balkje betekent dat de proportie 0 % was binnen deze klasse 121

Figuur 62: Posterior gemiddelde (verticale zwarte lijnen), en de 25%, 97%, 10%, 90%, 20% en 80% quantielen van de betrouwbaarheidsintervallen (zwarte punten) per herhalende test voor de pompproef met brasem. Enkel bij grote onderlinge verschillen in deze waarden tussen de testen moet men een effect veronderstellen van het uitvoeren van de test op het eindresultaat van de hele proef. 122

Figuur 63: De densiteitsverdeling van de geschatte parameterwaarden van het model voor brasem bij pompwerking per geteste variabele (gesloten vijzel links boven, open vijzel op 3 m³/s midden boven, open vijzel op 4 m³/s rechts boven, open vijzel op 5 m³/s links onder en vis lengte rechts onder). Wanneer het cijfer 0 in minder dan 95%van de gevallen voorkomt (en dus buiten de curve valt), dan wijst dit op een significant effect van de betreffende variabele. In dit geval gebeurt dat bij geen enkele variabele, al is het op het randje voor de gesloten vijzel en de open vijzel op 3 m³/s, die mogelijks een zeer licht negatief significant effect hebben op de sterftekans voor paling. 122

Figuur 64: Posterior gemiddelde (verticale zwarte lijnen), en de 25%, 97%, 10%, 90%, 20% en 80% quantielen van de betrouwbaarheidsintervallen (zwarte punten) per herhalende test voor de pompproef met paling. Enkel bij grote onderlinge verschillen in deze waarden tussen de testen moet men een effect veronderstellen van het uitvoeren van de test op het eindresultaat van de hele proef. 123

Figuur 65: De densiteitsverdeling van de geschatte parameterwaarden van het model voor paling bij pompwerking per geteste variabele (gesloten vijzel links boven, open vijzel op 3 m³/s midden boven, open vijzel op 4 m³/s rechts boven, open vijzel op 5 m³/s links onder en vis lengte rechts onder). Wanneer het cijfer 0 in minder dan 95%van de gevallen voorkomt (en dus buiten de curve valt), dan wijst dit op een significant effect van de betreffende variabele. In dit geval gebeurt dat bij geen enkele variabele, al is het op het randje voor de gesloten vijzel en de open vijzel op 3 m³/s, die mogelijks een zeer licht negatief significant effect hebben op de sterftekans voor paling. 124

Figuur 66: Posterior gemiddelde (verticale zwarte lijnen), en de 25%, 97%, 10%, 90%, 20% en 80% quantielen van de betrouwbaarheidsintervallen (zwarte punten) per herhalende test voor de pompproef met paling. Enkel bij grote onderlinge verschillen in deze waarden tussen de testen moet men een effect veronderstellen van het uitvoeren van de test op het eindresultaat van de hele proef. 125

Figuur 67: De densiteitsverdeling van de geschatte parameterwaarden van het model voor paling bij pompwerking per geteste variabele (gesloten vijzel links boven, open vijzel op 3 m³/s midden boven, open vijzel op 4 m³/s rechts boven, open vijzel op 5 m³/s links onder en vis lengte rechts onder). Wanneer het cijfer 0 in minder dan 95%van de gevallen voorkomt (en dus buiten de curve valt), dan wijst dit op een significant effect van de betreffende variabele. In dit geval gebeurt dat bij geen enkele variabele, al is het op het randje voor de gesloten vijzel en de open vijzel op 3 m³/s, die mogelijks een zeer licht negatief significant effect hebben op de sterftekans voor paling. 125

Figuur 68: De densiteitsverdeling van de geschatte parameterwaarden van het model voor blankvoorn bij pompwerking per geteste variabele (gesloten vijzel links boven, open vijzel op 3 m³/s midden boven, open vijzel op 4 m³/s rechts boven, open vijzel op 5 m³/s links onder en vis lengte rechts onder). Wanneer het cijfer 0 in minder dan 95%van de gevallen voorkomt (en dus buiten de curve valt), dan wijst dit op een significant effect van de betreffende variabele. In dit geval gebeurt dat bij alle variabelen (schroeftypes en debieten) behalve de lengte van de vis. 126

Figuur 69: De densiteitsverdeling van de geschatte parameterwaarden van het model voor blankvoorn bij pompwerking per geteste variabele (gesloten vijzel links boven, open vijzel op 3 m³/s midden boven, open vijzel op 4 m³/s rechts boven, open vijzel op 5 m³/s links onder en vis lengte rechts onder). Wanneer het cijfer 0 in minder dan 95%van de gevallen voorkomt (en dus buiten de curve valt), dan wijst dit op een significant effect van de betreffende variabele. In dit geval gebeurt dat bij alle variabelen (schroeftypes en debieten) behalve de lengte van de vis. 127

Figuur 70: Posterior gemiddelde (verticale zwarte lijnen), en de 25%, 97%, 10%, 90%, 20% en 80% quantielen van de betrouwbaarheidsintervallen (zwarte punten) per herhalende test voor de turbineproef met brasem. Enkel bij grote onderlinge verschillen in deze waarden tussen de testen moet men een effect veronderstellen van het uitvoeren van de test op het eindresultaat van de hele proef. 128

Figuur 71: De densiteitsverdeling van de geschatte parameterwaarden van het model voor brasem bij turbinewerking per geteste variabele (open vijzel op 3 m³/s links boven, open vijzel op 4 m³/s midden boven, open vijzel op 5 m³/s rechts boven en vis lengte links onder). Wanneer het cijfer 0 in minder dan 95%van de gevallen voorkomt (en dus buiten de curve valt), dan wijst dit op een significant effect van de betreffende variabele. In dit geval gebeurt dat bij de open vijzels op 3 en 5 m³/s in lichte mate, en de lengte van de vis. 129

Figuur 72: Posterior gemiddelde (verticale zwarte lijnen), en de 25%, 97%, 10%, 90%, 20% en 80% quantielen van de betrouwbaarheidsintervallen (zwarte punten) per herhalende test voor de turbineproef met brasem. Enkel bij grote onderlinge verschillen in deze waarden tussen de testen moet men een effect veronderstellen van het uitvoeren van de test op het eindresultaat van de hele proef. 130

Figuur 73: De densiteitsverdeling van de geschatte parameterwaarden van het model voor brasem bij turbinewerking per geteste variabele (open vijzel op 3 m³/s links boven, open vijzel op 4 m³/s midden boven, open vijzel op 5 m³/s rechts boven en vis lengte links onder). Wanneer het cijfer 0 in minder dan 95%van de gevallen voorkomt (en dus buiten de curve valt), dan wijst dit op een significant effect van de betreffende variabele. In dit geval gebeurt dat bij de open vijzels op 3 en 5 m³/s in lichte mate, en de lengte van de vis. 130

Figuur 74: Posterior gemiddelde (verticale zwarte lijnen), en de 25%, 97%, 10%, 90%, 20% en 80% quantielen van de betrouwbaarheidsintervallen (zwarte punten) per herhalende test voor de turbineproef met paling. Enkel bij grote onderlinge verschillen in deze waarden tussen de testen moet men een effect veronderstellen van het uitvoeren van de test op het eindresultaat van de hele proef. 131

Figuur 75: De densiteitsverdeling van de geschatte parameterwaarden van het model voor paling bij turbinewerking per geteste variabele (open vijzel op 3 m³/s links boven, open vijzel op 4 m³/s midden boven, open vijzel op 5 m³/s rechts boven en vis lengte links onder). Wanneer het cijfer 0 in minder dan 95%van de gevallen voorkomt (en dus buiten de curve valt), dan wijst dit op een significant effect van de betreffende variabele. In dit geval gebeurt dat bij de open vijzel op 3 m³/s in lichte mate, en de lengte van de vis..... 132

Figuur 76: Posterior gemiddelde (verticale zwarte lijnen), en de 25%, 97%, 10%, 90%, 20% en 80% quantielen van de betrouwbaarheidsintervallen (zwarte punten) per herhalende test voor de turbineproef met paling. Enkel bij grote onderlinge verschillen in deze waarden tussen de testen moet men een effect veronderstellen van het uitvoeren van de test op het eindresultaat van de hele proef. 133

Figuur 77: De densiteitsverdeling van de geschatte parameterwaarden van het model voor paling bij turbinewerking per geteste variabele (open vijzel op 3 m³/s links boven, open vijzel op 4 m³/s midden boven, open vijzel op 5 m³/s rechts boven en vis lengte links onder). Wanneer het cijfer 0 in minder dan 95%van de gevallen voorkomt (en dus buiten de curve valt), dan wijst dit op een significant effect van de betreffende variabele. In dit geval gebeurt dat bij de open vijzel op 3 m³/s in lichte mate, en de lengte van de vis 133

Figuur 78: Posterior gemiddelde (verticale zwarte lijnen), en de 25%, 97%, 10%, 90%, 20% en 80% quantielen van de betrouwbaarheidsintervallen (zwarte punten) per herhalende test voor de turbineproef met blankvoorn. Enkel bij grote onderlinge verschillen in deze waarden tussen de testen moet men een effect veronderstellen van het uitvoeren van de test op het eindresultaat van de hele proef. 134

Figuur 79: De densiteitsverdeling van de geschatte parameterwaarden van het model voor blankvoorn bij turbinewerking per geteste variabele (open vijzel op 3 m³/s links boven, open vijzel op 4 m³/s midden boven, open vijzel op 5 m³/s rechts boven en vis lengte links onder). Wanneer het cijfer 0 in minder dan 95%van de gevallen voorkomt (en dus buiten de curve valt), dan wijst dit op een significant effect van de betreffende variabele. In dit geval gebeurt dat enkel bij de lengte van de vis in lichte mate. 135

Figuur 80: Posterior gemiddelde (verticale zwarte lijnen), en de 25%, 97%, 10%, 90%, 20% en 80% quantielen van de betrouwbaarheidsintervallen (zwarte punten) per herhalende test voor de turbineproef met blankvoorn. Enkel bij grote onderlinge verschillen in deze waarden tussen de testen moet men een effect veronderstellen van het uitvoeren van de test op het eindresultaat van de hele proef. 136

Figuur 81: De densiteitsverdeling van de geschatte parameterwaarden van het model voor blankvoorn bij turbinewerking per geteste variabele (open vijzel op 3 m³/s links boven, open vijzel op 4 m³/s midden boven, open vijzel op 5 m³/s rechts boven en vis lengte links onder). Wanneer het cijfer 0 in minder dan 95%van de gevallen voorkomt (en dus buiten de curve valt), dan wijst dit op een significant effect van de betreffende variabele. In dit geval gebeurt dat enkel bij de lengte van de vis in lichte mate. 136

Figuur 82: Posterior gemiddelde (verticale zwarte lijnen), en de 25%, 97%, 10%, 90%, 20% en 80% quantielen van de betrouwbaarheidsintervallen (zwarte punten) per herhalende test voor de turbineproef met forel. Enkel bij grote onderlinge verschillen in deze waarden tussen de testen moet men een effect veronderstellen van het uitvoeren van de test op het eindresultaat van de hele proef. 137

Figuur 83: Posterior gemiddelde (verticale zwarte lijnen), en de 25%, 97%, 10%, 90%, 20% en 80% quantielen van de betrouwbaarheidsintervallen (zwarte punten) per herhalende test voor de turbineproef met forel, en waarbij de resultaten van 1 van de herhalende testen op 5 m³/s verwijderd werden. Enkel bij grote onderlinge verschillen in deze waarden tussen de testen moet men een effect veronderstellen van het uitvoeren van de test op het eindresultaat van de hele proef. 138

Figuur 84: De densiteitsverdeling van de geschatte parameterwaarden van het model voor forel bij turbinewerking, waarbij de resultaten van 1 van de herhalende testen op 5 m³/s verwijderd werden, per geteste variabele (open vijzel op 3 m³/s links boven, open vijzel op 4 m³/s midden boven, open vijzel op 5 m³/s rechts boven en vis lengte links onder). Wanneer het cijfer 0 in minder dan 95%van de gevallen voorkomt (en dus buiten de curve valt), dan wijst dit op een significant

effect van de betreffende variabele. In dit geval is dat het geval voor de open vijzel op 3 m³/s en het gewicht van de vis. 139

Figuur 85: Posterior gemiddelde (verticale zwarte lijnen), en de 25%, 97%, 10%, 90%, 20% en 80% quantielen van de betrouwbaarheidsintervallen (zwarte punten) per herhalende test voor de turbineproef met forel. Enkel bij grote onderlinge verschillen in deze waarden tussen de testen moet men een effect veronderstellen van het uitvoeren van de test op het eindresultaat van de hele proef. 140

Figuur 86: Posterior gemiddelde (verticale zwarte lijnen), en de 25%, 97%, 10%, 90%, 20% en 80% quantielen van de betrouwbaarheidsintervallen (zwarte punten) per herhalende test voor de turbineproef met forel, en waarbij de resultaten van 1 van de herhalende testen op 5 m³/s verwijderd werden. Enkel bij grote onderlinge verschillen in deze waarden tussen de testen moet men een effect veronderstellen van het uitvoeren van de test op het eindresultaat van de hele proef. 141

Figuur 87: De densiteitsverdeling van de geschatte parameterwaarden van het model voor forel bij turbinewerking, waarbij de resultaten van 1 van de herhalende testen op 5 m³/s verwijderd werden, per geteste variabele (open vijzel op 3 m³/s links boven, open vijzel op 4 m³/s midden boven, open vijzel op 5 m³/s rechts boven en vis lengte links onder). Wanneer het cijfer 0 in minder dan 95%van de gevallen voorkomt (en dus buiten de curve valt), dan wijst dit op een significant effect van de betreffende variabele. In dit geval is dat het geval voor de open vijzel op 3 m³/s en het gewicht van de vis. 141

Figuur 88: Percentagebalken voor brasem; niet-beschadigde dieren (met aanduiding van dode + stervende individuen), schubverlies (25, 50, 75 en 100% van lichaamsoppervlakte), vinschade, snijwonde, kneuzing en onthoofding. 142

Figuur 89: Percentagebalken voor blankvoorn; niet-beschadigde dieren (met aanduiding van dode + stervende individuen), schubverlies (25, 50, 75 en 100% van lichaamsoppervlakte), vinschade, snijwonde, kneuzing en onthoofding. 143

Figuur 90: Percentagebalken voor paling; niet-beschadigde dieren (met aanduiding van dode + stervende individuen), schubverlies (25, 50, 75 en 100% van lichaamsoppervlakte), vinschade, snijwonde, kneuzing en onthoofding. 143

Figuur 91: Percentagebalken voor forel; niet-beschadigde dieren (met aanduiding van dode + stervende individuen), schubverlies (25, 50, 75 en 100% van lichaamsoppervlakte), vinschade, snijwonde, kneuzing en onthoofding. 144

Lijst van tabellen

Tabel 1: Leidraad opbouw studie, de uitgevoerde experimenten en toegepaste methodes en hun benaming in de rest van dit rapport. 28

Tabel 2: Voornaamste technische specificaties van de open Archimedes schroeven van de (pomp- en) waterkrachtcentrale van Ham. 36

Tabel 3: Indeling in 4 schadegroepen op basis van schadeklassen. 39

Tabel 4: Aantallen proefdieren voor de gedwongen doorvoerproeven bij pompen. 40

Tabel 5: Aantallen proefdieren voor de gedwongen doorvoerproeven bij turbineren. 43

Tabel 6: Gemiddelde terugvangstpercentages per soort, en het kleinste en grootste geobserveerde terugvangstpercentage van alle proeven (herhalingen en debieten: 1,5 m³/s (gesloten vijzel), 3, 4 en 5 m³/s (open vijzels)) van de betreffende soort (de range). 57

Tabel 7: Gemiddelde percentages en hun range (als kleinste en grootste waargenomen percentages over alle herhalende testen) dode, zwaar beschadigde, licht beschadigde en niet zichtbaar beschadigde vissen voor de 3 soorten en 3 debieten, waarbij het totaal verlies per soort (kolom 5 en 6) de som is van de categorieën dode dieren en zwaar beschadigde dieren. 60

Tabel 8: Sterftekans voor paling die verpompt wordt op 5 m³/s met een open vijzel. De rechter kolom geeft de uiteindelijke sterftekans. De formule en de waarden die daarin ingevuld moeten worden staan in kolommen 2 tot en met 5. 67

Tabel 9: Overzicht van de waargenomen sterfte en het waargenomen verlies per vissoort en debiet voor gedwongen passage door de pompen. 68

Tabel 10: Gemiddelde terugvangstpercentages per soort, en het kleinste en grootste geobserveerde terugvangstpercentage van alle proeven (herhalingen en debieten: 3, 4 en 5 m³/s) van de betreffende soort (de range). 69

Tabel 11: Gemiddelde percentages 'dood', 'zware schade', 'lichte schade' en 'geen schade' voor de 4 soorten en 3 debieten, waarbij het totaal verlies per soort de som is van de categorieën 'dood' en 'zware schade'. 72

Tabel 12: Sterftekans (P(D)) voor brasem, paling en blankvoorn die de turbine passeert. De rechter kolom geeft de uiteindelijke sterftekans. De formule en de waarden die daarin ingevuld moeten worden staan in kolommen 2 tot en met 5. 81

Tabel 13: Overzicht van de waargenomen sterfte en het waargenomen verlies per vissoort en debiet voor gedwongen passage door de turbines. 82

Tabel 14: Aantal gevangen vissen, schadegroepen (grijs, %) en schadeklassen (wit, absolute getallen) van de 10 natuurlijke passageproeven voor de open vijzels. 83

Tabel 15: Gewogen gemiddelde voor de 4 schadegroepen voor de natuurlijke passage pompproeven met de open vijzel (5m³). 83

Tabel 16: Aantal gevangen vissen, schadegroepen (grijs, %) en schadeklassen (wit, absolute getallen) van de 10 natuurlijke passageproeven voor de gesloten vijzel. 84

Tabel 17: Gewogen gemiddelde voor de 4 schadegroepen voor de natuurlijke passage pompproeven met de gesloten vijzel (1,5m³). 84

Tabel 18: Aantal gevangen vissen, schadegroepen (grijs, %) en schadeklassen (wit, absolute getallen) van de 4 natuurlijke passageproeven voor de open vijzels. 85

Tabel 19: Gewogen gemiddelde voor de 4 schadegroepen voor de natuurlijke turbineproeven met 3 open vijzels (15m³). 86

Tabel 20: Geëxtrapoleerde sterfte range door jaarlijks pompen met de open vijzelinstallaties (rij 7). De pomptijd en het pompvolume zijn de gemeten (gemiddelde voor de periode 2015-2017) en verwachte aantallen (2020, 2050 nat jaar, 2050 droog jaar) voor de betreffende periodes. Het aantal vissen verpompt is het aantal vissen die voor het betreffende pompvolume verwacht worden te passeren, berekend o.b.v. het waargenomen aantal ongedwongen gepasseerde vissen per volume water tijdens de experimenten en gecorrigeerd voor het aandeel niet-teruggevangen vissen. De finale range aan mortaliteit, is het aandeel van de biomassa aan vis voor heel het Albertkanaal zoals geobserveerd in de studie van ANB (zie sectie 2.2). 87

Tabel 21: Geëxtrapoleerde sterfte range door jaarlijks pompen met de gesloten vijzelinstallatie (rij 7). De pomptijd en het pompvolume zijn de verwachte aantallen voor de betreffende periodes. Het aantal vissen verpompt is het aantal vissen die voor het betreffende pompvolume verwacht worden te passeren, berekend o.b.v. het waargenomen aantal ongedwongen gepasseerde vissen per volume water tijdens de experimenten en gecorrigeerd voor het aandeel niet-teruggevangen vissen. De finale range aan mortaliteit, is het aandeel van de biomassa aan vis voor heel het Albertkanaal zoals geobserveerd in de studie van ANB (zie sectie 2.2). 87

Tabel 22: Geëxtrapoleerde sterfte range door jaarlijks turbineren (rij 7). De turbinetijd en het te turbineren volume water zijn de gemeten (2015-2017) en verwachte (2020, 2050 nat en 2050 droog) aantallen voor de betreffende periodes. Het aantal vissen geturbineerd is het aantal vissen die voor het betreffende geturbineerde volume verwacht worden te passeren, berekend o.b.v. het waargenomen aantal ongedwongen gepasseerde vissen per volume water tijdens de experimenten en gecorrigeerd voor het aandeel niet-teruggevangen vissen. De finale range aan mortaliteit, is het aandeel van de biomassa aan vis voor heel het Albertkanaal zoals geobserveerd in de studie van ANB (zie sectie 2.2). 89

Tabel 23: Aantallen, vangst- en uitzetlocaties van de schieralen die gezenderd zijn om de migratie doorheen het Albertkanaal te bestuderen..... 89

Tabel 24: Aantallen, vangst- en uitzetlocatie en gebruikte zendertypes van 86 schieralen die ingezet werden voor detectie in het VPS netwerk in Ham..... 91

Tabel 25: Aantallen, uitzetlocatie en -plaats van 72 VPS zalmsmolts..... 97

Tabel 26: Toetsing beoordelingskader MER aangaande vismigratie (Verhaegen et al., 2009). 102

Tabel 27: WAIC waarden voor de zes geteste modellen voor brasem die gedwongen doorgevoerd werd door de gesloten vijzel en de open vijzels op 3, 4 en 5 m³/s. Kolom één geeft de variabelen die in het model getest werden, kolom twee geeft aan of er wel (random effect ja) of geen (random effect nee) rekening gehouden werd met een potentiële correlatie van resultaten binnen de herhalende testen, en kolom drie geeft de waarde voor WAIC waarbij het laagste getal op het beste model wijst, en een verschil tussen twee modellen van minder dan twee verwaarloosbaar is..... 121

Tabel 28: WAIC waarden voor de zes geteste modellen voor paling die gedwongen doorgevoerd werd door de gesloten vijzel en de open vijzels op 3, 4 en 5 m³/s. Kolom één geeft de variabelen die in het model getest werden, kolom twee geeft aan of er wel (random effect ja) of geen (random effect nee) rekening gehouden werd met een potentiële correlatie van resultaten binnen de herhalende testen, en kolom drie geeft de waarde voor WAIC waarbij het laagste getal op het beste model wijst, en een verschil tussen twee modellen van minder dan twee verwaarloosbaar is..... 123

Tabel 29: WAIC waarden voor de zes geteste modellen voor paling die gedwongen doorgevoerd werd door de gesloten vijzel en de open vijzels op 3, 4 en 5 m³/s. Kolom één geeft de variabelen die in het model getest werden, kolom twee geeft aan of er wel (random effect ja) of geen (random effect nee) rekening gehouden werd met een potentiële correlatie van resultaten binnen de herhalende testen, en kolom drie geeft de waarde voor WAIC waarbij het laagste getal op het beste model wijst, en een verschil tussen twee modellen van minder dan twee verwaarloosbaar is..... 124

Tabel 30: WAIC waarden voor de drie geteste modellen voor blankvoorn die gedwongen doorgevoerd werd door de gesloten vijzel en de open vijzels op 3, 4 en 5 m³/s. Kolom één geeft de variabelen die in het model getest werden, en kolom drie geeft de waarde voor WAIC waarbij het laagste getal op het beste model wijst, en een verschil tussen twee modellen van minder dan twee verwaarloosbaar is. Er werden geen modellen getest met de variabele 'herhalende testen' als random effect (kolom twee) omdat voor deze soort geen herhalende testen uitgevoerd werden omwille van logistieke redenen. 126

Tabel 31: WAIC waarden voor de drie geteste modellen voor blankvoorn die gedwongen doorgevoerd werd door de gesloten vijzel en de open vijzels op 3, 4 en 5 m³/s. Kolom één geeft de variabelen die in het model getest werden, en kolom drie geeft de waarde voor WAIC waarbij het laagste getal op het beste model wijst, en een verschil tussen twee modellen van minder dan twee verwaarloosbaar is. Er werden geen modellen getest met de variabele 'herhalende testen' als random effect (kolom twee) omdat voor deze soort geen herhalende testen uitgevoerd werden omwille van logistieke redenen. 127

Tabel 32: WAIC waarden voor de zes geteste modellen voor brasem die gedwongen doorgevoerd werd door de open vijzels op 3, 4 en 5 m³/s bij turbinewerking. Kolom één geeft de variabelen die in het model getest werden, kolom twee geeft aan of er wel (random effect ja) of geen (random effect nee) rekening gehouden werd met een potentiële correlatie van resultaten binnen de herhalende testen, en kolom drie geeft de waarde voor WAIC waarbij het laagste getal op het beste model wijst, en een verschil tussen twee modellen van minder dan twee verwaarloosbaar is..... 127

Tabel 33: WAIC waarden voor de zes geteste modellen voor brasem die gedwongen doorgevoerd werd door de open vijzels op 3, 4 en 5 m³/s bij turbinewerking. Kolom één geeft de variabelen die in het model getest werden, kolom twee geeft aan of er wel (random effect ja) of geen (random effect nee) rekening gehouden werd met een potentiële correlatie van resultaten binnen de herhalende testen, en kolom drie geeft de waarde voor WAIC waarbij het laagste getal op het beste model wijst, en een verschil tussen twee modellen van minder dan twee verwaarloosbaar is..... 129

Tabel 34: WAIC waarden voor de zes geteste modellen voor paling die gedwongen doorgevoerd werd door de open vijzels op 3, 4 en 5 m³/s bij turbinewerking. Kolom één geeft de variabelen die in het model getest werden, kolom twee geeft aan of er wel (random effect ja) of geen (random effect nee) rekening gehouden werd met een potentiële correlatie van resultaten binnen de herhalende testen, en kolom drie geeft de waarde voor WAIC waarbij het laagste getal op het beste model wijst, en een verschil tussen twee modellen van minder dan twee verwaarloosbaar is..... 131

Tabel 35: WAIC waarden voor de zes geteste modellen voor paling die gedwongen doorgevoerd werd door de open vijzels op 3, 4 en 5 m³/s bij turbinewerking. Kolom één geeft de variabelen die in het model getest werden, kolom twee geeft aan of er wel (random effect ja) of geen (random effect nee) rekening gehouden werd met een potentiële correlatie van resultaten binnen de herhalende testen,

en kolom drie geeft de waarde voor WAIC waarbij het laagste getal op het beste model wijst, en een verschil tussen twee modellen van minder dan twee verwaarloosbaar is..... 132

Tabel 36: WAIC waarden voor de zes geteste modellen voor blankvoorn die gedwongen doorgevoerd werd door de open vijzels op 3, 4 en 5 m³/s bij turbinewerking. Kolom één geeft de variabelen die in het model getest werden, kolom twee geeft aan of er wel (random effect ja) of geen (random effect nee) rekening gehouden werd met een potentiële correlatie van resultaten binnen de herhalende testen, en kolom drie geeft de waarde voor WAIC waarbij het laagste getal op het beste model wijst, en een verschil tussen twee modellen van minder dan twee verwaarloosbaar is..... 134

Tabel 37: WAIC waarden voor de zes geteste modellen voor blankvoorn die gedwongen doorgevoerd werd door de open vijzels op 3, 4 en 5 m³/s bij turbinewerking. Kolom één geeft de variabelen die in het model getest werden, kolom twee geeft aan of er wel (random effect ja) of geen (random effect nee) rekening gehouden werd met een potentiële correlatie van resultaten binnen de herhalende testen, en kolom drie geeft de waarde voor WAIC waarbij het laagste getal op het beste model wijst, en een verschil tussen twee modellen van minder dan twee verwaarloosbaar is..... 135

Tabel 38: WAIC waarden voor de zes geteste modellen voor forel die gedwongen doorgevoerd werd door de open vijzels op 3, 4 en 5 m³/s bij turbinewerking. Kolom één geeft de variabelen die in het model getest werden, kolom twee geeft aan of er wel (random effect ja) of geen (random effect nee) rekening gehouden werd met een potentiële correlatie van resultaten binnen de herhalende testen, en kolom drie geeft de waarde voor WAIC waarbij het laagste getal op het beste model wijst, en een verschil tussen twee modellen van minder dan twee verwaarloosbaar is..... 137

Tabel 39: WAIC waarden voor de zes geteste modellen voor forel die gedwongen doorgevoerd werd door de open vijzels op 3, 4 en 5 m³/s bij turbinewerking, en waarbij de resultaten van 1 van de herhalende testen op 5 m³/s verwijderd werden. Kolom één geeft de variabelen die in het model getest werden, kolom twee geeft aan of er wel (random effect ja) of geen (random effect nee) rekening gehouden werd met een potentiële correlatie van resultaten binnen de herhalende testen, en kolom drie geeft de waarde voor WAIC waarbij het laagste getal op het beste model wijst, en een verschil tussen twee modellen van minder dan twee verwaarloosbaar is..... 137

Tabel 40: WAIC waarden voor de zes geteste modellen voor forel die gedwongen doorgevoerd werd door de open vijzels op 3, 4 en 5 m³/s bij turbinewerking. Kolom één geeft de variabelen die in het model getest werden, kolom twee geeft aan of er wel (random effect ja) of geen (random effect nee) rekening gehouden werd met een potentiële correlatie van resultaten binnen de herhalende testen, en kolom drie geeft de waarde voor WAIC waarbij het laagste getal op het beste model wijst, en een verschil tussen twee modellen van minder dan twee verwaarloosbaar is..... 139

Tabel 41: WAIC waarden voor de zes geteste modellen voor forel die gedwongen doorgevoerd werd door de open vijzels op 3, 4 en 5 m³/s bij turbinewerking, en waarbij de resultaten van 1 van de herhalende testen op 5 m³/s verwijderd werden. Kolom één geeft de variabelen die in het model getest werden, kolom twee geeft aan of er wel (random effect ja) of geen (random effect nee) rekening gehouden werd met een potentiële correlatie van resultaten binnen de herhalende testen, en kolom drie geeft de waarde voor WAIC waarbij het laagste getal op het beste model wijst, en een verschil tussen twee modellen van minder dan twee verwaarloosbaar is..... 140

1 Inleiding

Het Albertkanaal is het kanaal dat Luik verbindt met Antwerpen, en de Maas met de Schelde. In Vlaanderen beheert De Vlaamse Waterweg nv (DVW, voorheen NV De Scheepvaart) het kanaal. Het is 129 km lang en wordt gevoed met Maaswater dat onttrokken wordt in Luik en Maastricht. Het totale verval van het Albertkanaal tussen Luik en Antwerpen bedraagt 56 meter en het wordt opgevangen door 6 sluiscomplexen (Genk, Diepenbeek, Hasselt, Ham, Olen en Wijnegem). Alle complexen overbruggen 10 meter hoogteverschil, behalve Wijnegem, dat de resterende 6 meter opvangt. Met bijna 40 miljoen ton vervoerde goederen per jaar is het Albertkanaal de belangrijkste waterweg in Vlaanderen. Vooral het containervervoer nam het voorbije decennium nog sterk toe.

Bij langdurige droogteperiodes daalt het debiet van de Maas in die mate dat de wateronttrekking naar het Albertkanaal moet worden beperkt. Een dergelijke beperking betekent concreet dat binnenschippers alleen maar het water op mogen met sterk verminderde vracht. Dat zorgt voor economisch verlies en het beschadigt de betrouwbaarheid van de binnenvaart. Dankzij het bouwen van speciale pompinstallaties kunnen diepgangbeperkingen voor de scheepvaart vermeden worden, doordat de installaties water oppompen vanuit de Schelde en vanuit de stroomafwaarts gelegen kanaalpanden naar de panden stroomopwaarts. Drie van de grote sluiscomplexen op het Albertkanaal, nl. deze in Hasselt, Ham en Olen, zijn al voorzien van zo een pompinstallatie. De pompinstallaties zijn uitgerust met grote Archimedes schroeven (22 x 4,30m schroef, min en max debiet van respectievelijk 3 en 5m³/s). De overige sluiscomplexen van Genk, Diepenbeek en Wijnegem zullen in de nabije toekomst ook uitgerust worden met dergelijke installaties (www.vlaamsewaterweg.be).

De pompinstallaties in Ham, Hasselt en Olen houden in de eerste plaats het waterpeil in de aangrenzende kanaalpanden op peil bij waterschaarste. Daarnaast kunnen deze installaties werken als waterkrachtcentrale en stroom genereren bij wateroverschot. Ze leveren stroom voor de werking van de sluizen, en genereren daarbovenop nog eens 3 miljoen kWh, of ongeveer het jaarverbruik van een duizendtal gezinnen. Deze combinatie van pompinstallatie en waterkrachtcentrale met Archimedes schroeven is uniek in de wereld. Te meer in het kader van de bouw van de toekomstige installaties op de overige sluiscomplexen, is het noodzakelijk om hun schadelijkheid na te gaan op het omringende milieu, in dit specifieke geval op de toestand van de aanwezige vispopulatie. Zo kunnen eventuele negatieve effecten vermeden worden. Bovendien is het bij wet verplicht om de impact op het milieu van dergelijke installaties na te gaan in een milieueffectenrapport (MER).

Waterbeheerders moeten onder impuls van internationale en Vlaamse wetgeving, zoals de Palingverordening, de Europese Kaderrichtlijn Water, de Benelux beschikking vrije vismigratie, de habitatrichtlijn en het decreet integraal waterbeleid, de uitdaging aangaan om de ecologische kwaliteit van onze waterlopen te behouden en herstellen. Dankzij de toegenomen aandacht voor waterhuishouding met behulp van pompen en turbines en in het kader van een MER voerde het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO) op vraag van de DVW onderzoek uit naar de ecologische gevolgen van de uitbouw van het sluiscomplex in Ham met een pompinstallatie/waterkrachtcentrale.

In het verleden werd al onderzoek uitgevoerd naar de invloed van pompinstallaties en waterkrachtcentrales op zowel de stroomopwaartse als de stroomafwaartse migratie van vissen (o.a. Winter et al., 2006; Calles & Greenberg, 2009; Buysse et al., 2014). Vissen hebben immers de natuurlijke reflex om zowel bij stroomop- als bij stroomafwaartse migratie een doorgang te zoeken op de plaatsen met het hoogste debiet (vaak zijn dit de pomp- of turbine- in- en uitlaten). Bij afwezigheid van afscheidings- of visgeleidingssystemen kunnen ze in de pomp of turbine terecht komen. Pompen en turbines kunnen daarom een significante sterfte bij vispopulaties veroorzaken (Winter et al., 2007; Buysse et al., 2014). In Ham zijn geen afscheidings- of visgeleidingssystemen aanwezig en daarom werd

onderzocht wat de overlevingskansen zijn voor vissen wanneer ze door de pompen/turbines van de pomp- en waterkrachtcentrales migreren.

De waterkwaliteit van het Albertkanaal is relatief goed (https://www.vmm.be/data/waterkwaliteit). In het kanaal zijn al meer dan 40 verschillende vissoorten waargenomen, waarvan een 20-tal vissoorten frequent voorkomen (Van Thuyne, 2008). Daarnaast vervult het kanaal een belangrijke functie als migratieroute voor o.a. paling en zalm (Nzau Matondo et al., 2016; Visser & Kroes, 2016). Beide soorten zijn bij wet beschermd tegen verdere achteruitgang van hun bestand (Palingverordening voor paling, Habitatrichtlijn bijlage II voor zalm).

Paling en zalm zijn twee voorbeelden van vissoorten die voor hun succesvolle overleving eens per jaar een grote migratietocht ondernemen. Paling plant zich voort op zee en groeit op in zoet water. De jonge dieren komen als glasaal toe aan de monding van onze rivieren, zwemmen deze op als juveniel en groeien verder op als "rode paling" in zoet (en brak) water. Na enkele jaren, wanneer ze geslachtsrijp zijn ondergaan ze een transformatie naar schieraal en trekken ze met de stroming mee terug stroomafwaarts naar zee om zich voor te planten in het mariene milieu. Bij zalm gaat het net omgekeerd. Deze vis leeft als volwassen dier in het mariene milieu en trekt het binnenland in als geslachtsrijpe adult. Zalm plant zich voort in zoet water en de jonge zalmen (juvenielen, ook zalmsmolts genoemd) maken een grote trek stroomafwaarts vanuit het binnenland terug naar zee. Beide soorten, evenals andere vissoorten die er een gelijkaardige levenswijze op na houden, zijn zeer gevoelig aan vertragingen en obstructies op hun grote trek doorheen onze rivieren van en naar zee. Dergelijke vertragingen en obstructies, soms met directe sterfte tot gevolg, worden veroorzaakt ter hoogte van menselijke constructies zoals o.a. sluizen, stuwen, dammen en waterkrachtcentrales. Vertraging en sterfte aan deze constructies moet zoveel mogelijk vermeden worden om de succesvolle overleving van deze soorten te garanderen.

DVW koos dan ook voor de toepassing van vooruitstrevende en ecologisch verantwoorde technologie om eventuele schade aan het visbestand in de kanalen tot een absoluut minimum te beperken. Een uitgebreid milieueffectenrapport werd opgesteld zodat de mogelijke effecten van de geplande installaties op het visbestand in kaart werden gebracht. De gebouwde pompinstallatie en waterkrachtcentrale in Ham werd visvriendelijk ingericht om schade aan het aanwezige visbestand te beperken tot aanvaardbare grenzen. Een eerste stap hierin was de keuze voor Archimedes schroeven (ook vijzels genoemd). Op de onderzoeksite in Ham werd bovendien één gesloten vijzel geïnstalleerd om te testen of dit type daadwerkelijk visvriendelijker is dan die van de open vijzels. De gesloten vijzel kan enkel water oppompen en niet turbineren.

In dit rapport beschrijven we de resultaten van het onderzoek naar de impact van de waterkrachtcentrale van Ham op vis. Het onderzoek werd uitgevoerd en beschreven door het INBO op vraag van DVW in het kader van het MER dat bedoeld is om de ecologische gevolgen van de uitbouw van het sluiscomplex van Ham met deze pomp- en waterkrachtcentrale in kaart te brengen.

Het onderzoek werd als volgt aangepakt. Ten eerste werd de directe impact onderzocht van de pomp- en waterkrachtcentrale op vissen die de installatie passeren. Dat werd onderzocht met behulp van experimenten waarbij vissen in gekende aantallen geforceerd werden om de vijzels te passeren, zowel bij pomp- als turbinewerking. Ten tweede werd deze impact geëxtrapoleerd naar de uiteindelijke impact van de installatie op de aanwezige visfauna in het kanaal. De aanwezige vissen zijn enerzijds vissen die heel hun leven in het kanaal leven, en zijn anderzijds grote migratoren zoals o.a. paling en zalm die één keer per jaar het kanaal als migratieroute gebruiken naar zee. De totale impact op de visfauna werd voor beide groepen vissen bepaald. Dat gebeurde door enerzijds te evalueren hoeveel vissen er de vijzels passeerden zonder dat ze hiertoe gedwongen werden. Anderzijds werd een telemetriestudie uitgevoerd met paling en zalm om het aandeel te evalueren van deze vissen dat de waterkrachtcentrale passeert op zijn weg naar zee. Tot slot werd m.b.v. scenario's

van de volumes water die in de toekomst nog zullen verpompt of geturbineerd worden, een ruwe inschatting gemaakt van het mogelijke toekomstige effect van de pomp- en waterkrachtcentrales in het Albertkanaal op het visbestand.

Op basis van de resultaten van dit onderzoek werden aanbevelingen geformuleerd die de negatieve effecten van de pomp- en waterkrachtcentrale op vis op een efficiënte en duurzame manier kunnen minimaliseren.

2 Doelstellingen

Het doel van dit onderzoek is om de impact van de waterkrachtcentrale van Ham op vis te onderzoeken. Dit doel kadert in het bredere doel van het MER om de ecologische gevolgen van de uitbouw van het sluiscomplex van Ham met deze pomp- en waterkrachtcentrale in kaart te brengen.

De impact op vis wordt enerzijds gedefinieerd als de schadelijkheid van de vijzels op vissen die deze passeren (ook 'de directe impact' van de pompen en turbines genoemd). Anderzijds wordt deze gedefinieerd als 'de totale impact' van de installatie op het aanwezige en passerende visbestand.

De metingen die tot dit doel leidden werden uitgevoerd op de site te Ham, omdat enkel daar ook het effect van een gesloten (pomp)vijzel gekwantificeerd kon worden. De pomp- en waterkrachtcentrale van Ham is uitgerust met drie, grote, open Archimedes schroeven (3-5 m^3/s debiet), en één kleinere, gesloten Archimedes schroef (1,5 m^3/s debiet).

2.1 Onderzoeksvragen

2.1.1 Directe impact van de pomp- en waterkrachtcentrale op vissen die de installatie passeren

De verschillende vormen van schade of verwondingen die kunnen optreden bij het passeren van vissen door vijzels (hetzij voor pompen, hetzij voor turbineren), worden veroorzaakt door botsing met de schoepen of andere bewegende of stilstaande delen, snelle drukverschillen, turbulentie, hoge stroomsnelheden en cavitatie (implosie dampbellen). Sommige van deze verwondingen zijn zodanig ernstig dat de vis sterft.

Het INBO onderzocht in de eerste plaats wat de geobserveerde sterfte en sterftekans is van een vis die de vijzels passeert. In functie van de vis overleefbaarheid onderzochten we daarnaast wat de geobserveerde schade is en wat de kans is op zware schade. Het totale verlies aan vis is de som van dode dieren en zwaar beschadigde dieren en geeft een beeld van de directe impact van de pompen en turbines op vis. Bovendien werd onderzocht hoe deze sterfte en zware schade beïnvloed wordt door het type vijzel (open of gesloten bij pompen) en het debiet waarop de vijzels werken (enkel bij open vijzels en bij pompen en turbineren).

Concreet vertaalt zich dit in de onderstaande onderzoeksvragen. De antwoorden op deze vragen geven een volledig beeld van de directe impact van de installatie op vissen die de pompen en turbines passeren. Daarnaast kunnen hieruit mogelijke maatregelen afgeleid worden die de impact zo efficiënt mogelijk kunnen minimaliseren:

A. Hoe groot is **de kans dat een vis sterft** ten gevolge van een passage van de installatie bij pompwerking en bij turbinewerking?
B. Hoe groot is de **kans dat een vis zwaar beschadigd geraakt** ten gevolge van een passage van de installatie bij pompwerking en bij turbinewerking?
C. Welke **types schade** worden waargenomen bij vissen die de installatie passeren bij pompwerking en bij turbinewerking?
D. Is er een **verschil in kans** op sterfte en verlies door zware schade voor een vis die de open Archimedes vijzels passeert bij pompwerking en turbinewerking **naargelang het debiet** waarop de vijzels draaien? En is dit effect afhankelijk van de **lengte van de vis**?
E. Is er een significant kleinere kans op sterfte en verlies door zware schade voor een vis die de pompen passeert door de **gesloten Archimedes vijzel**, dan wanneer hij passeert langs de **open Archimedes vijzels**?

2.1.2 Totale impact van de pomp- en waterkrachtcentrale op de aanwezige visfauna in het Albertkanaal

De grootte van de totale impact van de pomp- en waterkrachtcentrales in het Albertkanaal op het aanwezige visbestand is enerzijds afhankelijk van de directe impact van de pompen en turbines op passerende vissen, maar is daarnaast ook afhankelijk van het aantal vissen dat de installaties passeert. Daarbij is het slechtst mogelijke scenario dat een groot aandeel van de aanwezige vissen een heel schadelijke installatie passeert (grote directe impact op passerende vissen).

In dit luik van de studie werd het aandeel vissen onderzocht dat minstens één keer tijdens zijn leven de vijzels van de pomp- en waterkrachtcentrale passeerde. Aanwezige vissen zijn zowel vissen die gedurende hun hele leven in de buurt van de installatie leven, als vissen zoals paling en zalm die er één keer per jaar passeren op hun grote trek naar zee. Het aandeel van de eerste groep werd onderzocht m.b.v. enkele 24 uur durende vangstinspanningen. Het aandeel van de tweede groep (palingen en zalmen) werd onderzocht m.b.v. telemetrie (zie verder).

Specifiek werd in dit luik van het onderzoek een antwoord gezocht op de volgende onderzoeksvragen om de totale impact van de pomp- en waterkrachtcentrale op de aanwezige visfauna te kunnen kwantificeren:

F. **Hoeveel vissen per volume water passeren** gemiddeld de installatie bij pompwerking en hoeveel bij turbinewerking?
G. **Hoeveel** van deze gepasseerde vissen zijn **dood of zwaar beschadigd** (totaal verlies)?
H. Hoe verhoudt dit aandeel **sterfte en zware schade** (totaal verlies) zich tot de sterfte en schade die geobserveerd wordt in het onderzoeksluik naar de **directe impact** van de installatie op passerende vissen?
I. Wat zijn de **verliezen** die **in de toekomst** verwacht kunnen worden o.b.v. de geobserveerde (en berekende) sterfte- en schade(kansen) van beide onderzoeksluiken in verhouding tot toekomstscenario's m.b.t. het volume water dat verpompt of geturbineerd zal/kan worden?
J. Wat is het **aandeel migrerende paling en zalm** dat op weg naar zee langs de waterkrachtcentrale passeert?

2.2 Leidraad opbouw studie

Hier geven we een overzicht van de verschillende specifieke experimenten en methodes die toegepast werden om bovenstaande onderzoeksvragen te beantwoorden (Tabel 1). In Tabel 1 geven we aan hoe de experimenten en methodes in de rest van dit rapport genoemd worden, wat er geanalyseerd wordt en welke onderzoeksvragen op basis daarvan opgelost worden.

Op de migratiestudie op paling en zalm na (Tabel 1), werden alle experimenten en methodes op een gelijkaardige manier toegepast op de pompen en de turbines. In alle onderdelen van het rapport komt de indeling 'pompen' versus 'turbines' dan ook veelvuldig terug. Daarnaast werd alles gestructureerd volgens de doelstellingen van deze studie, nl. enerzijds het bepalen van 'de directe impact' van de pomp- en waterkrachtcentrale op vis die de installatie passeert, en anderzijds 'de totale impact' van de installatie op de aanwezige visfauna in het Albertkanaal.

In het kader van het eerste luik werden experimenten uitgevoerd met gedwongen passage van vissen door de pompen en turbines (zie Tabel 1 voor verdere duiding). In het kader van het tweede luik werden vangsten uitgevoerd op vissen die ongedwongen de vijzels

passeerden, werden scenarioberekeningen gemaakt en werd een migratiestudie uitgevoerd op paling en zalm met behulp van akoestische telemetrie (Tabel 1).

Om de lezer zo goed mogelijk door de beschrijving van de werkwijze (sectie materiaal en methode) en de resultaten (sectie resultaten) van de experimenten met gedwongen passage te loodsen (Tabel 1), leggen we hier kort uit hoe deze beschrijving in dit rapport werd aangepakt.

De experimenten met gedwongen passage hadden in de eerste plaats tot doel om de kans in te schatten dat een vis verloren gaat ten gevolge van een passage door de pompen en turbines. Een vis werd als 'verloren' gedefinieerd wanneer hij stierf of zwaar gewond raakte. Om te beginnen werd dit verlies bepaald aan de hand van een evaluatie van de toestand van de vissen (dood of levend) en de schadegroep waarbinnen ze na passage behoorden (dood, zwaar beschadigd, licht beschadigd, of niet beschadigd). Om te bepalen tot welke schadegroep vissen behoorden die nog leefden na passage, werd geëvalueerd welk type schade ze opliepen (schadeklasse genoemd; zie verder in dit rapport in sectie 3.2.1.1 voor een uitvoerige beschrijving). Naast de kans dat een vis die de pompen en turbines passeert verloren gaat, werd ook de kans berekend dat een vis sterft (kans op zware schade niet meegeteld).

Om nu de kans te bepalen dat een vis sterft of verloren gaat, werden niet alleen **observaties** gemaakt en gerapporteerd van de opgetreden sterfte en zware schade bij de (gedwongen) gepasseerde vissen, maar werden deze observaties ook **statistisch geanalyseerd**. De statistiche testen lieten toe om een onzekerheid te berekenen op de waarnemingen. Bovendien kon het effect van het debiet op de sterfte- en verlieskans enkel statistisch bepaald worden. Verder is een belangrijke mededeling dat niet alle vissen die gedwongen werden de pompen en turbines te passeren, teruggevangen konden worden. Dat betekent dat voor een bepaald aandeel vissen geen evaluatie kon gebeuren van de impact van de pompen en turbines. Afhankelijk van de toestand van deze niet-geobserveerde vissen was een waargenomen sterfte- of verlieskans een over- of onderschatting van de werkelijke sterfte- of verlieskans. Hier werd rekening mee gehouden door bijkomende experimenten uit te voeren (zoals verder in dit rapport wordt uitgelegd) en deze via een wiskundige berekening mee te nemen in de uiteindelijke **berekening van een sterftecijfer** dat rekening houdt met het lot van de niet-geobserveerde vissen.

In de resultaten sectie over de experimenten met gedwongen passage wordt deze info telkens in deze volgorde gerapporteerd:

- Terugvangstpercentage van de vissen die gedwongen warden de pompen en turbines te passeren
- Geobserveerde toestand, schadegroepen en schadeklassen en bijhorende geobserveerde sterfte en verlieskans
- Statistisch bepaalde sterfte- en verlieskans
- Berekende sterftekans, die rekening houdt met het lot van de niet-geobserveerde vissen

Aan de hand van deze werkwijze komt men tot een correct en volledig beeld van de directe impact van de pomp- en waterkrachtcentrale op vis. De resultaten worden verder in dit rapport telkens weergegeven a.d.h.v. een gemiddelde kans en de bijhorende onzekerheid in samenvattende tabellen op het einde van de betreffende resultaten-sectie. De conclusies die we uit deze getallen kunnen trekken worden overzichtelijk samengevat in de sectie conclusies. Lezers die uitsluitend geïnteresseerd zijn in de directe impact van de pomp- en waterkrachtcentrale op vis, worden daarom meteen doorverwezen naar sectie 4.1.1.7, sectie 4.1.2.7 en sectie 6 (Algemeen besluit).

Tabel 1: Leidraad opbouw studie, de uitgevoerde experimenten en toegepaste methodes en hun benaming in de rest van dit rapport.

Experiment/Methode	Beschrijving	Benaming	Analyse	Onderzoeksvragen
Onderzoeksluik directe impact pomp- en waterkrachtcentrale op vis				
Experiment met proefvissen op pompen	Er werd een gekend aantal individuen van drie verschillende soorten (brasem, paling en blankvoorn) gedwongen om de pompen te passeren en de vissen werden geëvalueerd op sterfte en schade na passage. Zowel de gesloten buisvijzel op één debiet, als de open vijzels op drie verschillende debieten werden getest.	Gedwongen passage bij pompwerking	• Terugvangstpercentage • Toestand vis (dood of levend) • Schadegroep (zwaar of licht beschadigd) • Schadeklasse (type schade) • Sterftekans en verlieskans • Invloed type vijzel • Invloed debiet	De vragen A tot en met E worden beantwoord (sectie 2.1)
Experiment met proefvissen op turbines	Er werd een gekend aantal individuen van vier verschillende soorten (brasem, paling, blankvoorn en forel) gedwongen om de turbines te passeren en de vissen werden geëvalueerd op sterfte en schade na passage. De open vijzels werden op drie verschillende debieten getest.	Gedwongen passage bij turbinewerking	• Terugvangstpercentage • Toestand vis (dood of levend) • Schadegroep (zwaar of licht beschadigd) • Schadeklasse(type schade) • Sterftekans en verlieskans • Invloed debiet	De vragen A tot en met E worden beantwoord (sectie 2.1)
Onderzoeksluik totale impact pomp- en waterkrachtcentrale op de aanwezige visfauna				
Experimenten op natuurlijk (ongedwongen) gepasseerde vissen op pompen	Op dezelfde manier als bij de experimenten met gedwongen passage werden vissen geëvalueerd die van nature de pompen zijn gepasseerd wanneer de pompen in werking waren. Daarvoor werd gedurende minstens 24u een opvangconstructie operationeel gemaakt die de vissen ving. Het totale volume water dat tijdens het experiment onafgebroken verpompt werd, werd bepaald. De open vijzels werden uitsluitend op het maximale debiet getest.	Natuurlijke passage bij pompwerking	• Aantal gepasseerde vissen • Aantal per volume water • Toestand vis (dood of levend) • Schadegroep (zwaar of licht beschadigd) • Schadeklasse (type schade)	De vragen F, G en H worden beantwoord (sectie 2.1)
Experimenten op natuurlijk	Op dezelfde manier als bij de experimenten met gedwongen passage werden vissen	Natuurlijke passage bij turbinewerking	• Aantal gepasseerde vissen • Aantal per volume water	De vragen F, G en H worden beantwoord

(ongedwongen) gepasseerde vissen op turbines	geëvalueerd die van nature de turbines zijn gepasseerd wanneer deze in werking waren. Daarvoor werd gedurende minstens 24u een opvangconstructie operationeel gemaakt die de vissen ving. Het totale volume water dat tijdens het experiment onafgebroken geturbineerd werd, werd bepaald. De open vijzels werden uitsluitend op het maximale debiet getest.		• Toestand vis (dood of levend) • Schadegroep (zwaar of licht beschadigd) • Schadeklasse (type schade) • De gepasseerde soorten	(sectie 2.1)
Berekeningen toekomstscenario's	Op basis van de informatie die verzameld werd over de directe impact van de installatie op vis (sterfte- en schade t.g.v. gedwongen passage), over de impact op natuurlijke gepasseerde vissen (sterfte en schade na natuurlijke passage) en o.b.v. informatie over toekomstige scenario's m.b.t. de hoeveelheid water die nog zal verpompt of geturbineerd worden, werd een ruwe inschatting gemaakt van de totale hoeveelheid vis die potentieel beschadigd zal worden in de toekomst omdat hij de pomp- en waterkrachtcentrale passeert.	Toekomstscenario's	• Aantal en biomassa vissen die in de toekomst impact zullen ondervinden van de pomp- en waterkrachtcentrale, o.b.v. info over • Kans op sterfte of zware schade zoals waargenomen in de experimenten met gedwongen passage • Kans op sterfte of zware schade zoals waargenomen in de experimenten met natuurlijke passage	Vraag I wordt beantwoord (sectie 2.1)
Migratiestudie op paling en zalm m.b.v. akoestische telemetrie	Met behulp de techniek, akoestische telemetrie, werd van een gekend aantal individuen van paling en zalm de trekroute in kaart gebracht. Enerzijds werd onderzocht welke vissen het Albertkanaal kozen om naar zee te gaan. Anderzijds werd onderzocht hoeveel vissen in Ham langs de waterkrachtcentrale migreerden.	Akoestische telemetrie	• Aandeel gezenderde vissen die de waterkrachtcentrale van Ham passeert via info over: • Routekeuze vanaf de Maas • Routekeuze ter hoogte van het sluizencomplex van Ham.	Vraag J wordt beantwoord (sectie 2.1)

Tot slot willen we hier verwijzen naar een voorgaande studie, waarvan de resultaten noodzakelijk waren voor het oplossen van de onderzoeksvragen in onderzoeksluik twee (totale impact op aanwezige visfauna). Deze studie geeft namelijk een idee van de aanwezige visfauna in het Albertkanaal, wat noodzakelijke informatie is voor het inschatten van de totale impact van de installatie op deze aanwezige visfauna. Daarnaast geeft deze studie de referentiesituatie weer vóór het in werking treden van de installaties op het Albertkanaal. De referentiesituatie werd gemonitord i.h.k.v. langlopend onderzoek naar het visbestand in het Albertkanaal. door het Agentschap voor Natuur en Bos (ANB). Het had onder meer de volgende doelstellingen:

- bepaling van de soortensamenstelling van het visbestand,
- bepaling van het aantal gevangen vissen per vissoort,
- bepaling van de lengtefrequentie-verdeling met afleiding van lengteklassen verdeeld over juveniele, sub-adulte en adulte stadia,
- bepaling van de lengte-gewicht relatie en de conditie (over de volledige lengterange) voor de meest abundante vissoorten,
- verhouding roofvis-witvis,
- schatting densiteit per vissoort in kg/ha over de verschillende lengteklassen,
- schatting van het totale aantal vissen in aantal/ha en de totale biomassa in kg/ha,
- bepaling van het viswatertype op basis van de aanwezige visstand en aan de hand van de globale karakteristieken van het betreffende water.

Het INBO heeft optimaal gebruik gemaakt van de resultaten van dit onderzoek om de referentiesituatie t.b.v. de totale impact van de installatie in Ham op de visfauna in beeld te brengen. Daarnaast werden de resultaten van deze voorgaande studie gebruikt om een selectie te maken van 4 vissoorten waarvoor de directe impact van de installatie in Ham op passerende vissen werd onderzocht.

3 Materiaal en methoden

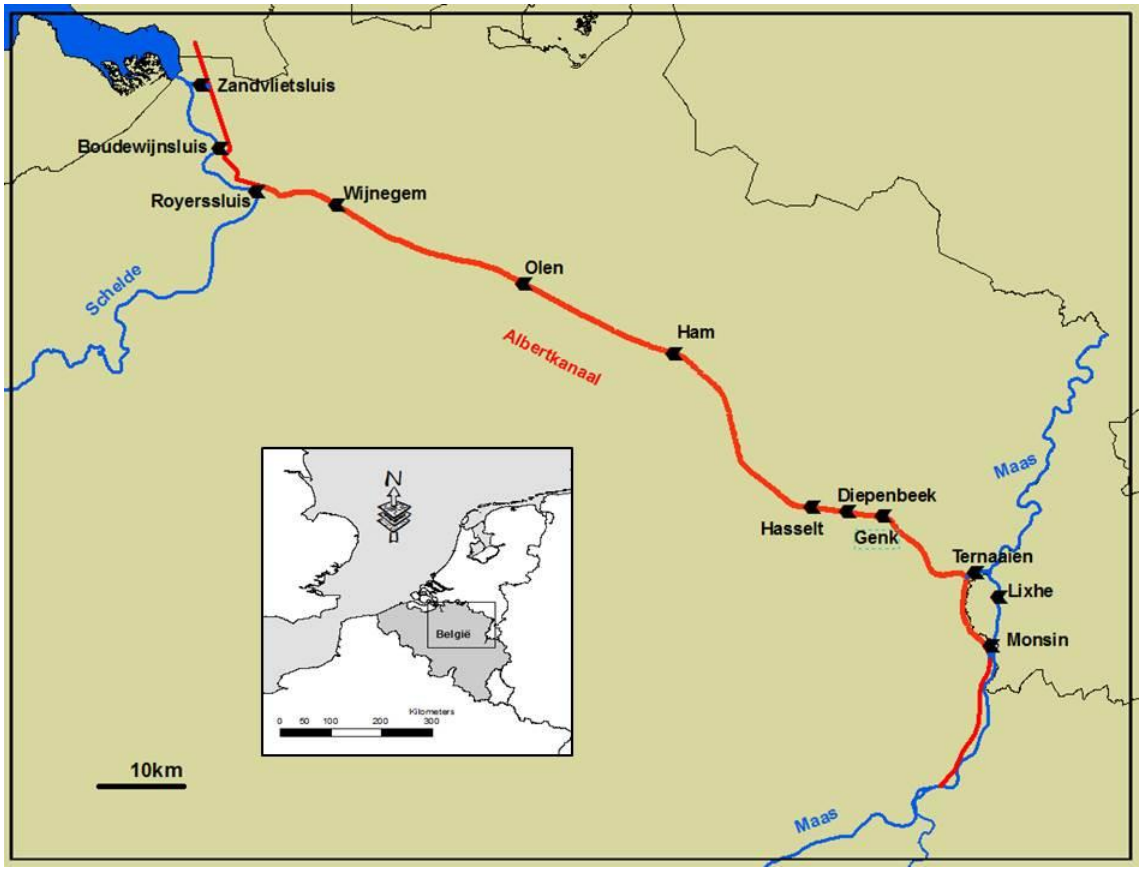
3.1 Studiegebied

3.1.1 Het Albertkanaal

Het Albertkanaal is een kanaal in België dat Luik verbindt met Antwerpen, en de Maas met de Schelde (Figuur 1). In Vlaanderen beheert DVW het kanaal, in Wallonië de Autonome Haven van Luik. Met bijna 40 miljoen ton vervoerde goederen per jaar is het Albertkanaal de belangrijkste economische waterweg in Vlaanderen. Vooral het containervervoer nam het voorbije decennium nog sterk toe. In het kader van de capaciteitsverhoging van het Albertkanaal investeert DVW dan ook in de verdere uitbouw van het Albertkanaal.

Het totale verval van het Albertkanaal tussen Luik en Antwerpen bedraagt 56 meter en het wordt opgevangen door 6 sluiscomplexen (Genk, Diepenbeek, Hasselt, Ham, Olen en Wijnegem). Alle complexen overbruggen 10 meter hoogteverschil, behalve Wijnegem, dat de resterende 6 meter opvangt. In de kanalen aangrenzend op het Albertkanaal zijn ook tal van waterbouwkundige constructies aanwezig. Deze worden schematisch weergegeven voor heel het studiegebied in Figuur 2.

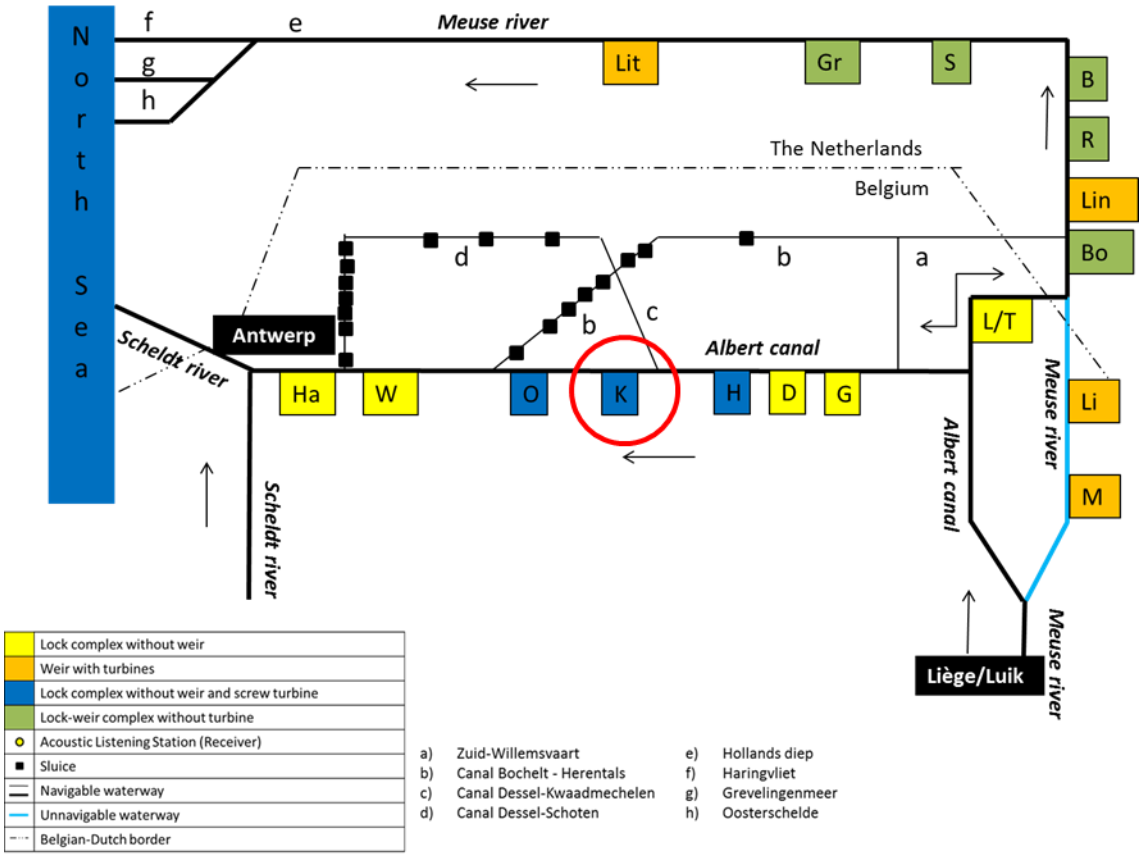
Het onderzoek op de directe impact van de pomp- en waterkrachtcentrale situeert zich uitsluitend in Ham (Figuur 1 en Figuur 4). Voor het onderzoek naar de totale impact van de pomp- en waterkrachtcentrale op de aanwezige visfauna, en specifiek de migrerende vissoorten: paling en zalm, wordt een veel ruimer gebied onderzocht (Figuur 2).



Figuur 1: Situering Albertkanaal met aanduiding sluiscomplexen.

3.1.2 Het beheer van het Albertkanaal

Het Albertkanaal en de Kempense kanalen worden bijna volledig gevoed met water van de Maas. De voeding van het Albertkanaal vindt plaats in Luik, waar het kanaal in open verbinding staat met de Maas. Het meest stroomopwaarts kanaalpand van het Albertkanaal wordt op een constant peil gehouden door de stuw van Monsin (Figuur 1 en Figuur 2). Een deel van het onttrokken water voor de voeding van het Albertkanaal wordt op Waals grondgebied terug naar de Maas afgevoerd via het sluiscomplex van Ternaaien (Lanaye ; Figuur 1 en Figuur 2) en in geringe mate via kleinere sluizen in Monsin en Visé. Het resterend deel wordt gebruikt voor de voeding van het Vlaamse deel van het Albertkanaal en in mindere mate van de Zuid-Willemsvaart via het kanaal Briegden-Neerharen. Over de toegestane waterafname in functie van het beschikbare Maasdebiet sloot Vlaanderen met Nederland het Maasafvoerverdrag af in 1995 (Vanfraechem, 2003). Het verdrag bepaalt de verdeling van het Maaswater bij lage Maasafvoeren over enerzijds de Nederlandse en Vlaamse kanalen, en anderzijds de gemeenschappelijke Maas. Het verdrag gaat uit van een gelijke verdeling bij lagere Maasafvoeren. Tijdens droogteperiodes wordt het beschikbare onttrekkingsdebiet uit de Maas door het Maasafvoerverdrag beperkt. Het gevolg hiervan is dat een diepgangbeperking voor de scheepvaart kan worden ingesteld, indien onvoldoende water beschikbaar is om het Albertkanaal te voeden. Dit gebeurde al in oktober 2005 en juli 2011 gedurende enkele dagen op het Albertkanaal stroomopwaarts Genk, omdat wegens een te beperkte wateraanvoer het waterpeil in dit pand sterk was gedaald. Deze diepgangbeperkingen zijn erg negatief voor de binnenscheepvaart en de bedrijvigheid rond het kanaal. Bevoorradingen en afvoer van goederen komen dan immers in het gedrang waardoor deze locaties minder aantrekkelijk worden voor bedrijven, wat de economische ontwikkeling rond het kanaal stremt. Dit is in sterk contrast met het gevoerde beleid om de binnenvaart te promoten en de watergebonden industrie rondom het Albertkanaal te versterken. Wetenschappelijk onderzoek wijst uit dat dergelijke lage Maasdebieten in de toekomst steeds frequenter zullen voorkomen (Arnell, 2004). Bovendien wordt verwacht dat in de toekomst het waterverbruik ten behoeve van de scheepvaart en de andere functies verder zal stijgen. Een toegenomen scheepvaart resulteert immers in een groter waterverbruik door de sluizen. Om in periodes van lage afvoeren te kunnen voldoen aan de bepalingen van het Maasafvoerverdrag, is een laagwaterstrategie voor het Albertkanaal en de Kempische Kanalen opgesteld. Het doel van deze laagwaterstrategie is het opstellen van een zogenaamde verdringingsreeks die de volgorde van de te nemen waterbesparende maatregelen rangschikt, met als doel om zo goed mogelijk met de beschikbare hoeveelheid zoet water om te springen. De waterbesparende maatregelen kunnen mogelijk ongewenste effecten hebben, maar het principe wordt gehanteerd dat deze economische, ecologische en maatschappelijke effecten minimaal moeten zijn.

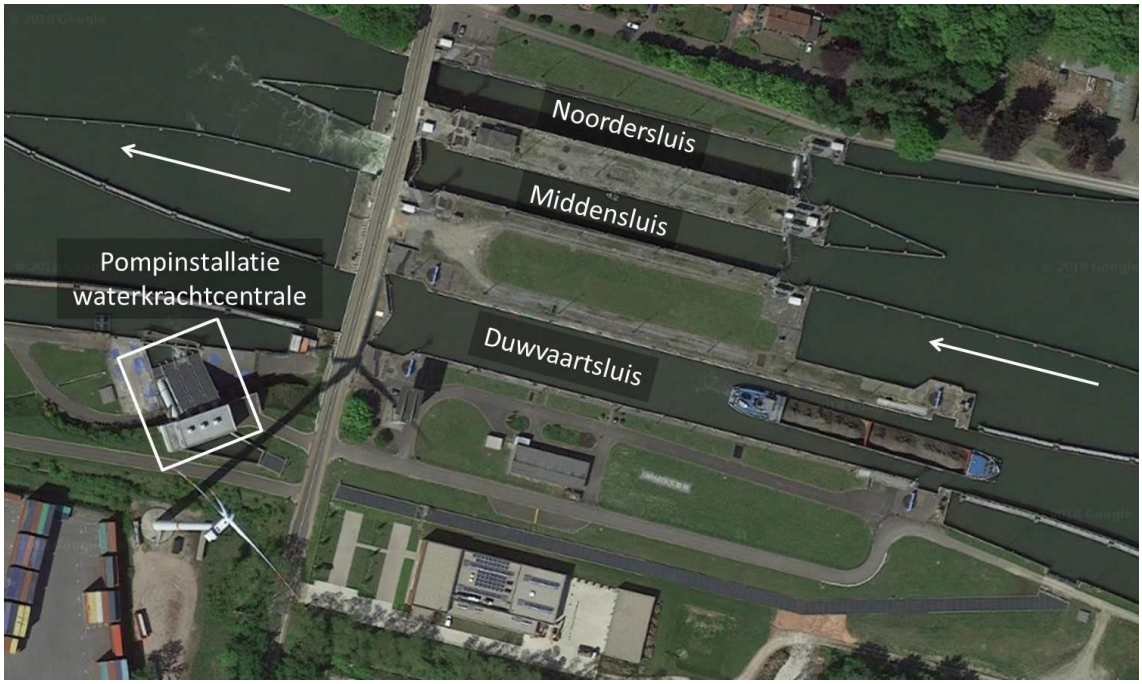


Figuur 2: Schematisch overzicht van het kanalenstelsel rond het Albertkanaal en de Maas met alle mogelijke vismigratieknelpunten voor o.a. paling en zalm die uittrekt naar zee. De rode cirkel duidt het sluiscomplex van Ham aan, waar het overgrote deel van dit onderzoek zich afspeelt. De studie naar de migratiekeuze van paling en zalm situeert zich in het kanalenstelsel rond het Albertkanaal en de Maas.

3.1.3 De pompinstallatie en waterkrachtcentrale in Ham

De pomp- en waterkrachtcentrale van Ham (Figuur 1; Figuur 3) bevindt zich in een zijkanaaltje van het Albertkanaal op de linker oever, parallel met het sluiscomplex (Figuur 4). Water dat opgepompt wordt vloeit van het kanaalpand stroomafwaarts (Schelde-kant) naar het kanaalpand stroomopwaarts (Maas-kant) van het sluiscomplex, en wordt aangetrokken door een opening in de kanaalwand die uitmondt in een put waaruit de Archimedes vijzels het water naar boven pompen (verder in dit rapport 'pompput' genoemd). Water dat geturbineerd wordt, vloeit van het stroomopwaartse naar het stroomafwaartse kanaalpand en wordt aangevoerd via het zijkanaaltje (Figuur 4).

Figuur 3: Luchtfoto pompinstallatie/waterkrachtcentrale in Ham (bron: DVW).



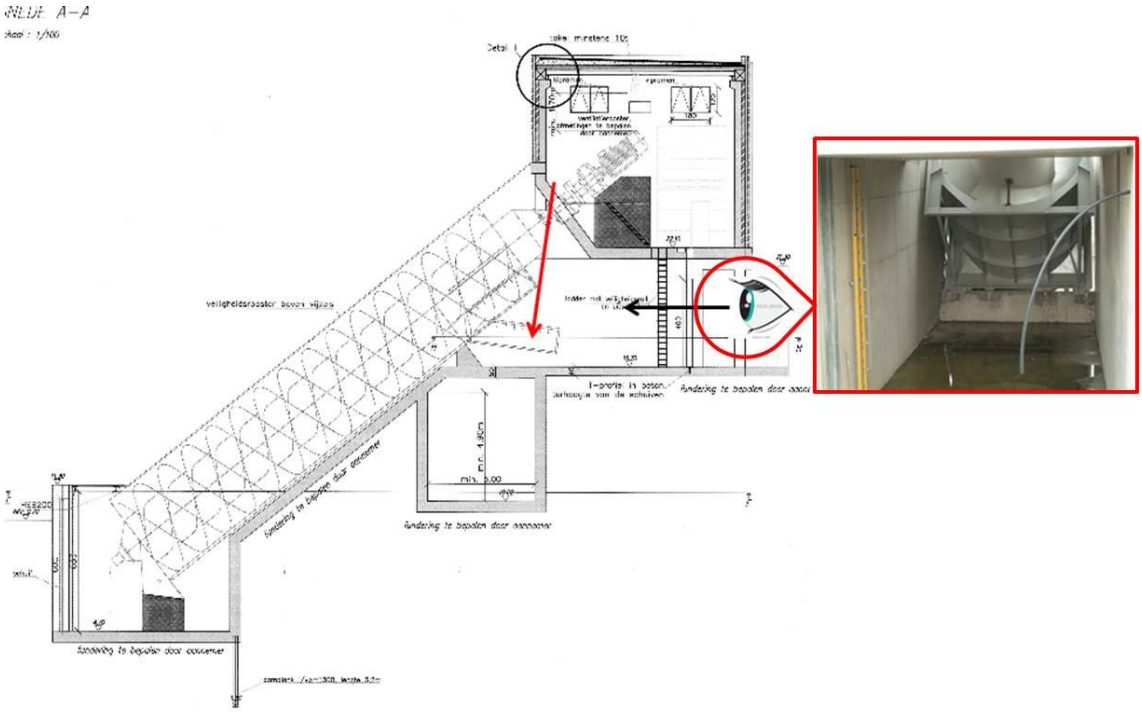
Figuur 4: Luchtfoto van het sluiscomplex in Ham met aanduiding van de sluizen, de pompinstallatie/waterkrachtcentrale en de netto stroomrichting (witte pijl; stroomopwaartse zijde rechts van het sluiscomplex, stroomafwaartse zijde links).

3.1.3.1 De pompinstallatie

Met het in gebruik nemen van pompinstallaties op de sluiscomplexen kan de schade, als gevolg van de maatregelen uit de laagwaterstrategie, verminderd worden. Zonder deze pompinstallaties kan de verwachte financieel-economische schade (verminderde scheepvaart, verminderde industriële activiteit en landbouwproductie) tot 100 maal hoger oplopen (Verhaegen et al., 2009). Er werd dan ook besloten dat de bouw van pompinstallaties op de sluiscomplexen van het Albertkanaal een noodzakelijke investering was om zonder excessieve kosten te kunnen voldoen aan de bepalingen van het Maasafvoerverdrag. Andere mogelijke oplossingen, zoals het stopzetten of verminderen van de waterinname door de industrie en landbouw, gaven aanleiding tot veel hogere economische, ecologische en/of maatschappelijke effecten. Het voorafgaand onderzoek toonde aan dat pompinstallaties op de zes sluiscomplexen noodzakelijk zijn. Deze pompinstallaties moeten in staat zijn om het water dat geschut werd bij sluiswerking terug te pompen naar het stroomopwaartse kanaalpand, zodat het opnieuw gebruikt kan worden voor de scheepvaart. Zo is er (netto) meer water beschikbaar voor andere behoeften (vb. drinkwater).

3.1.3.2 De waterkrachtcentrale

Waterkracht is de energie die door vallend of stromend water wordt ontwikkeld. Een waterturbine kan deze energie omzetten in een draaiende beweging. Door de as van de turbine te koppelen aan een generator wordt de energie omgezet in elektriciteit (Figuur 5).



Figuur 5: Profieldoorsnede van de vijzel, waarbij de inlaatklep van de vijzel omlaag is (rode pijl), zodat water de vijzel draaiende kan houden om stroom op te wekken. Inzet: aanzicht in droge toestand van de inlaatklep in gesloten toestand.

De pompinstallaties in Ham kunnen in omgekeerde draairichting werken als turbine en dus waterkrachtcentrale. Naar Vlaamse normen is er een vrij groot potentieel van groene stroom uit waterkracht aanwezig ten gevolge van het vrij groot verval aan de sluiscomplexen op het Albertkanaal en het relatief grote en constante debiet (Tabel 2). Met uitzondering van de periodes met lage Maasafvoeren, kan binnen de contouren van het Maasafvoerverdrag extra

water afgevoerd worden via het Albertkanaal die deze waterkrachtcentrales dan kunnen voeden. DVW wil dit potentieel benutten en op die manier bijdragen tot het realiseren van de Vlaamse doelstellingen met betrekking tot de productie van duurzame energie op basis van hernieuwbare energiebronnen.

Tabel 2: Voornaamste technische specificaties van de open Archimedes schroeven van de (pomp- en) waterkrachtcentrale van Ham.

Max. turbinecapaciteit	1,2 MW
Capaciteit 1 schroef	8000 W
Max. turbinedebiet	15 m³
Min. turbinedebiet	3 m³
Hoogteverschil	10 m
Totale lengte schroef	28 m
Diameter schroef	4,3 m
Gewicht schroef	85 T
Hellingshoek	38°

3.1.3.3 Visveiligheid

DVW koos voor de toepassing van vooruitstrevende en ecologisch verantwoorde technologie om eventuele schade aan het visbestand in het kanaal tot een absoluut minimum te beperken. Er werd gekozen voor Archimedes vijzels. Op de onderzoeksite in Ham werd bovendien één gesloten buisvijzel geïnstalleerd (enkel pompfunctie) om te testen of de visvriendelijkheid van dit type daadwerkelijk groter is dan die van de toegepaste open vijzels. De gesloten buisvijzel is de uiterst rechtse van de vier vijzels die zichtbaar zijn op de luchtfoto (Figuur 3).

3.2 Proefopzet

3.2.1 Experimenten gedwongen en natuurlijke passage

Om een representatief beeld te krijgen van de effecten op vissen na passage door de installatie, volstaat het niet om af en toe de (ongedwongen of 'natuurlijk') gepasseerde vissen op te vangen na turbine- of pompwerking. Verschillende vissoorten passeren immers op verschillende periodes gedurende het jaar voor verschillende doeleinden. De hoeveelheden kunnen ook jaarlijks fluctueren, zoals het visbestand in het kanaal dat ook doet (Kemper & Vis, 2010; Visser & Kroes, 2016). Daarom werden er in deze studie naast het opvangen van ongedwongen gepasseerde vissen ook vissen gedwongen om te passeren, door ze rechtstreeks in de vijzels in te voeren. Bovendien werd in afzonderlijke experimenten de vangstkans getest van dode proefdieren. Op basis van die informatie werd het resultaat van de experimenten op gedwongen passage gecorrigeerd voor proefdieren die na passage niet gevangen konden worden en daardoor niet geëvalueerd konden worden op hun toestand en opgelopen schade (zie sectie 3.3.1.2 Statistiek).

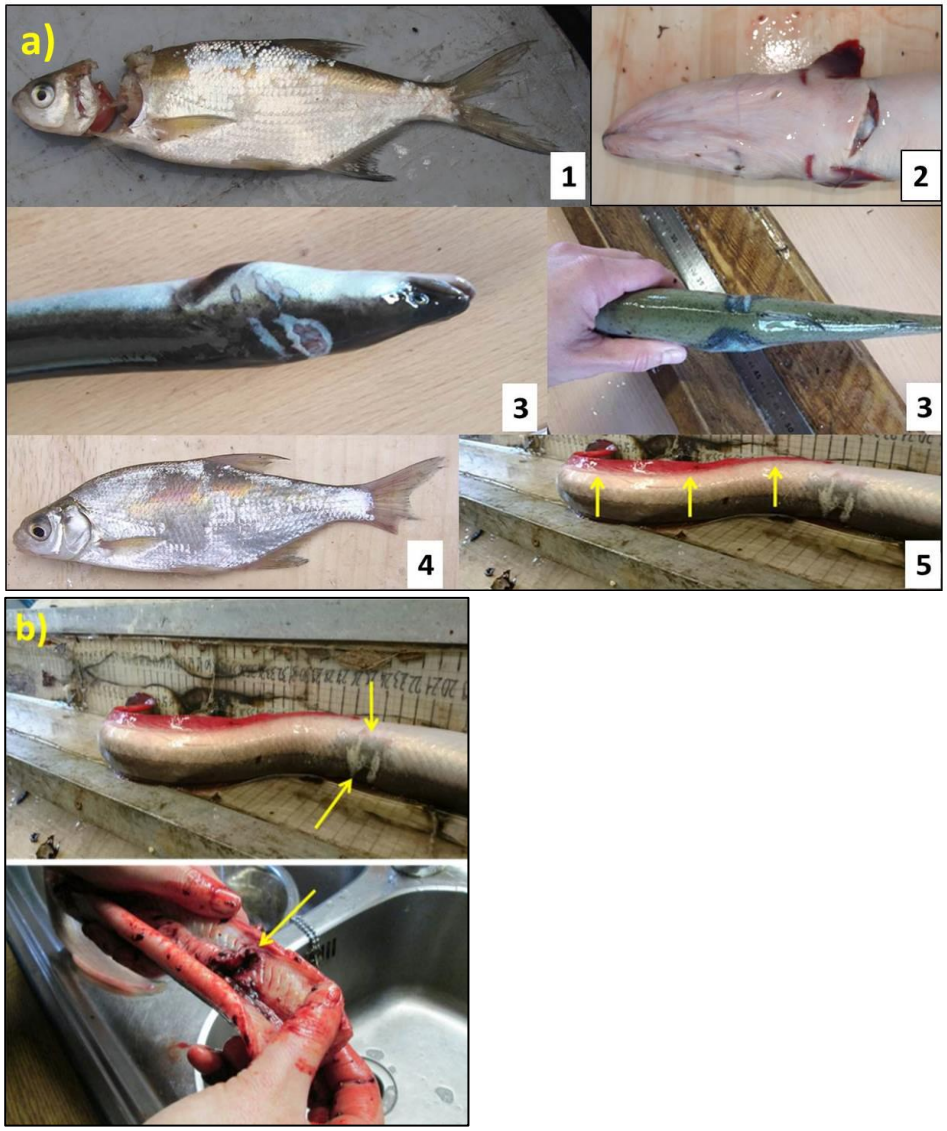
3.2.1.1 Sterfte en schadebeoordeling

In de eerste plaats werd van alle vissen die de vijzels tijdens de meetdagen van deze studie passeren geëvalueerd of ze levend of dood waren (verder in dit rapport 'toestand' genoemd). Daarnaast werd geëvalueerd of de vissen (ongeacht hun toestand) schade opliepen.

Als er verwonde vissen werden aangetroffen dan werden ze, al naargelang de aard van hun verwonding, in een zogenoemde '**schadeklasse**' ondergebracht (Figuur 6). Als er combinaties van types wonden optraden, werden deze allemaal genoteerd en werd de zwaarste vorm van schade in rekening gebracht in de uiteindelijke analyses.

Uit voorgaand onderzoek naar de schadelijkheid van verschillende pomptypes (waaronder ook Archimedes vijzels) voor vissen (Buysse et al., 2014), is gebleken welke verschillende vormen van verwondingen kunnen optreden. Deze verschillende schadeklassen werden ook in dit onderzoek gebruikt om te oordelen welke verwondingen eventueel het meest voorkwamen en om ze toe te wijzen aan bepaalde eigenschappen van de installatie. Deze schadeklassen zijn;

- decapitatie of doorsnijding
- snijwonde
- vinschade
- kneuzing/bloeding
- schubverlies (bij soorten met schubben), of krassen (bij soorten zonder schubben zoals paling)



Figuur 6: a) schadeklassen (1: decapitatie of doorsnijding, 2: snijwonde, 3: kneuzing, 4: schubverlies, 4 & 5: vinschade), b) Illustratie van de inwendige schade bij een kneuzing bij paling.

Als bij vissen schubverlies werd vastgesteld, dan werd dit gekwantificeerd naargelang het percentage van de lichaamsoppervlakte die ontdaan werd van schubben. Volgende klassen werden onderscheiden;

- schubverlies/krassen over 0 – 25 % van het lichaamsoppervlak

- schubverlies/krassen over 25 –50 % van het lichaamsoppervlak
- schubverlies/krassen over 50 – 75 % van het lichaamsoppervlak
- schubverlies/krassen over 75 – 100 % van het lichaamsoppervlak

Het vertalen van visschade naar visoverleefbaarheid is moeilijk maar essentieel om de effecten van de installatie op de verliezen van het visbestand te kunnen kwantificeren. Vissen met zware schade hebben een heel grote kans om te sterven om diverse redenen. Er kan onomkeerbare schade optreden waardoor vitale levensfuncties stil vallen en de vissen snel sterven. Daarnaast zijn gewonde vissen gevoeliger voor predatie en infecties wat vaak ook tot sterfte leidt. Gezien de moeilijkheid om in te schatten hoeveel gewonde vissen alsnog zullen sterven, is er geopteerd om een classificatie te maken in **4 schadegroepen** (Tabel 3). Deze groepen moeten toelaten om de uiteindelijke effecten op het visbestand in het Albertkanaal beter in te schatten.

Verder in dit document wordt er voor iedere uitgevoerde proef een beeld gegeven van achtereenvolgens:

- de **toestand** van de vissen die de vijzels passeerden:
  - levend
  - dood
- de **schadegroep** van de vissen die de vijzels passeerden:
  - niet zichtbaar beschadigd
  - licht beschadigd
  - zwaar beschadigd
  - dood
- de **schadeklasse(n)** die de vissen die de vijzels passeerden vertoonden:
  - niet zichtbaar beschadigd
  - schubverlies voor 0-25% van het lichaamsoppervlak
  - schubverlies voor 25-50% van het lichaamsoppervlak
  - schubverlies voor 50-75% van het lichaamsoppervlak
  - schubverlies voor 75-100% van het lichaamsoppervlak
  - vinschade
  - snijwonde
  - zwelling/kneuzing/bloeding
  - decapitatie of doorsnijding

Tabel 3: Indeling in 4 schadegroepen op basis van schadeklassen.

Toestand	Schadegroepen	Welke schadeklassen?
Levend	Geen zichtbare schade	-
	Lichte schade	Schubverlies < 25% en vinschade
	Zware schade	Schubverlies > 25%, zwelling/kneuzing/bloeding, snijwonde
Dood	Dood	Allemaal mogelijk

3.2.1.2 Pomp experimenten

3.2.1.2.1 Opvangconstructie

De opvangconstructie voor verpompte vissen werd stroomopwaarts van de pompinstallatie in het omloopkanaal geplaatst. Deze constructie bestond uit een metalen frame, een fuik en een optakelsysteem. De fuik (inzwemopening van 3,5x5m, lengte 25m) filterde het volledig verpompte debiet. De bevestiging van de fuik aan de metalen frame-box gebeurde door de fuik in geleiders te schuiven aan de stroomopwaartse kant van het frame. Achteraan werd de fuik voorzien van een schuilconstructie om schubverlies te minimaliseren. De schuilconstructie was een polyester koker waarin de vissen beschermd zaten tegen de stroming (Figuur 7). De verzamelkamer van de fuik werd bovendien uit knooploos net gemaakt om geen beschadiging te veroorzaken aan de verpompte vissen.

Figuur 7: Opgetakelde pompfuik met schuilconstructie achteraan.

3.2.1.2.2 Experimenteel design

Om de effecten van de vijzels bij pompwerking op vis te onderzoeken, werd de toestand, schadegroep en schadeklasse bepaald op vissen die gedwongen en 'natuurlijk' de vijzels passeerden. De gedwongen proeven werden uitgevoerd op zowel de gesloten als de open vijzels. De gesloten vijzel pompt uitsluitend een debiet van 1,5 m³/s. De open vijzels pompen 3, 4 en 5 m³/s per vijzel en werden op deze drie debieten getest. De vissen werden beneden aan de vijzels ingevoerd en boven in het omloopkanaal teruggevangen.

Gedwongen passage

Op basis van visstandsbemonsteringen die werden uitgevoerd in opdracht van het ANB werden blankvoorn, brasem en paling geselecteerd als vissoorten voor de experimenten met gedwongen passage. Deze drie soorten maken samen 57% van de biomassa uit van het Albertkanaal (Kemper & Vis, 2010). Specifiek voor het kanaalpand benedenstrooms het sluiscomplex van Ham was het aandeel van deze drie soorten in de totale biomassa maar liefst 87% (Visser & Kroes, 2016). Alle proefdieren werden bij viskwekers aangekocht.

Voor elk debiet werden per vissoort 300 vissen getest door ze rechtstreeks in de vijzel in te voeren. Gezien er drie vissoorten getest werden, er drie debieten zijn waarop de open vijzels werken, en er één debiet is waarop de gesloten vijzel werkt, werden er respectievelijk 2700 en 900 vissen gedwongen de open en gesloten vijzel(s) te passeren. Voor de testen met brasem en paling werden de 300 vissen opgesplitst in drie groepen ('herhalende testen' genoemd) van 100 (Tabel 4). De herhalende testen werden soms op dezelfde dag uitgevoerd en de vissen werden tussen de herhalingen van elkaar onderscheidden d.m.v. een merkteken (i.e. een vinknip). De testen met blankvoorn werden zonder herhalingen uitgevoerd omdat door een logistiek probleem de 300 geteste vissen niet per 100 van elkaar onderscheidden konden worden. De aangekochte blankvoorns waren in de maat 5-25 cm, de palingen waren tussen 45 en 90 cm groot, maar voornamelijk rond de 60 cm om vergelijkbaar te zijn met volwassen vrouwelijke schieralen, en de brasems waren tussen 20 en 45 cm groot (Figuur 56 in de bijlage).

Tabel 4: Aantallen proefdieren voor de gedwongen doorvoerproeven bij pompen.

	pompdebiet (m³/s)			
	1,5	**3**	**4**	**5**
brasem	100	100	100	100
	100	100	100	100
	100	100	100	100
paling	100	100	100	100
	100	100	100	100
	100	100	100	100
blankvoorn	100	100	100	100
	100	100	100	100
	100	100	100	100

De vissen werden door een watervoerende, lange gladde buis tot net onder de vijzel gebracht. Door gebruik te maken van een houten frame in een afsluitsponning, kon de buis exact gepositioneerd worden qua diepte en positie ten opzichte van de centrale as van de vijzel (Figuur 8).

Figuur 8: Invoerbuis voor de gedwongen pompproeven (links) en luchtfoto (rechts) met de locatie van de pompput beneden aan de vijzels (rode kader), het pompstation (gele kader) en de opvangconstructie (groen).

Vissen die opgepompt werden konden niet ontsnappen naar het opwaartse kanaalpand, maar de afstand tussen het pompgebouw en het opvangnet (85m, zie ook Figuur 8) bood wel kansen om zich in een luwere zone onder het pompgebouw schuil te houden. Om de kans te verkleinen dat vissen in een beschutte plaats bleven en niet aan de stroming blootgesteld werden, werd er na elke proef een uur lang verder gepompt met een hoog debiet tussen 12 en 15m³/s. Er werd ook een controlemeting (of 'blanco' test) uitgevoerd met respectievelijk dode en levende paling om enerzijds het vangstpercentage te evalueren, en anderzijds de potentiële effecten van de opvangconstructie op vis (visschade).

Net voor het uitzetten van de pompinstallatie werd de fuik van de opvangconstructie gelicht. Zo werd voorkomen dat vissen die zich eventueel vooraan in de fuik bevonden konden terugzwemmen en ontsnappen. Alle vissen werden uit de fuik gehaald en in een ruime kuip water gezet. Elke vis werd gewogen (tot op 1 g), gemeten (tot op 1 mm) en beoordeeld op zijn toestand (levend of dood) en zichtbare schade (zie ook secties 3.1 en 3.2.1.1).

Natuurlijke passage

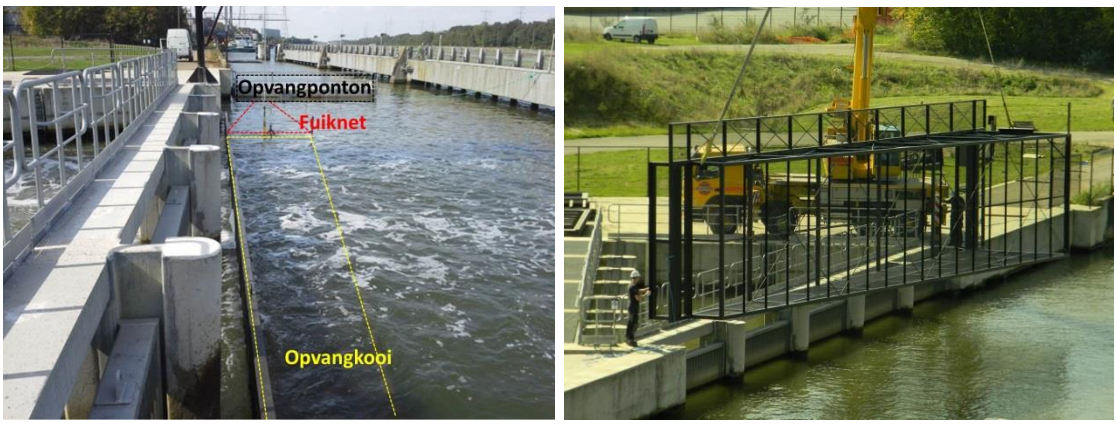
Om een inschatting te maken van de hoeveelheid 'natuurlijk' verpompte vissen met de drie open vijzels, werd er in de periode van maart tot oktober 10 dagen (24 uur per dag) gepompt met één open vijzel op een pompdebiet van 5m³/s. Om een inschatting te maken van de hoeveelheid 'natuurlijk' verpompte vissen met de gesloten vijzel en eveneens de schade aan de verpompte vissen te kunnen bepalen, werd dezelfde proef gedurende 10 dagen (24 uur per dag) herhaald met gebruik van de gesloten vijzel (1,5m³/s). De gevangen vissen werden geëvalueerd op schade. De schadebepaling verliep op net dezelfde manier als bij de proeven met gedwongen passage.

3.2.1.3 Turbine experimenten

3.2.1.3.1 Opvangconstructie

Om het effect te meten van het gebruik van open vijzels als waterkrachtcentrale op de populaties van verschillende vissoorten in het Albertkanaal, werden de geturbineerde vissen opgevangen in een vangkooi bij de uitstroom van de turbine. Aangezien er voor een dergelijke constructie te weinig plaats was in de put onderaan de vijzels en omdat deze ook niet in het verlengde van de installaties kon aangebracht worden omwille van de scheepvaart en de scheepvaartgeleidingswand, werd er op de uitstroom van de installaties een (metalen) kooi gebouwd. De kooi werd aan de uitstroom vastgemaakt door ze in sponningen te schuiven van de linker en rechter grof vuil rooster. Op de kooi werd aan de stroomafwaartse zijde en parallel met de oever, een grote geleidingsfuik met een opvangponton en Noors leefnet (groot stockagenet op drijvers) bevestigd, waaruit de gevangen vissen eenvoudig opgeschept konden worden (Figuur 9). Een vis die in de kooi terecht kwam en de kooiwand volgde, zwom in de geleidingsfuik en kon niet meer terug naar de kooi. Het einde van de fuik werd geleegd in het Noors leefnet waar de fuik op aangesloten was. De gevangen vissen

werden na doorvoer naar het Noors leefnet opgeschept in kuipen water, verdoofd en getest op sterfte, schade en lengte en gewicht.



Figuur 9: Opvangconstructie voor de turbineproeven (links: locatie van de kooi, de geleidingsfuik en het opvangponton. Rechts: foto van de plaatsing van de vangstkooi in de sponningen van de vuilroosters.

Na verloop van de eerste reeks turbineproeven werd vastgesteld dat de kooi de uitstroomopening van de turbines niet volledig afdichtte, door de aanwezigheid van een betonnen richel op de kanaalbodem en dwars op de uitstroomopening onder de kooi. Daarnaast werd ook vastgesteld dat een aantal damwandplaten te hoog afgebrand waren, waardoor de kooi niet aansloot op de bodem van de pompput. Na een aantal duikinspecties, bijkomende testen en overlegmomenten werd het probleem verholpen door het onderste deel van de grofvuilroosters af te dichten met metalen platen en de kooi te voorzien van een automatische stop. Na de werken werden de turbineproeven opnieuw uitgevoerd.

3.2.1.3.2 Experimenteel design

Om de effecten van passage van de vijzels bij turbinewerking te onderzoeken, werd de toestand, schadegroep en schadeklasse bepaald van vissen die gedwongen en 'natuurlijk' de vijzels passeerden. De gedwongen en natuurlijke proeven werden uitsluitend met de open vijzels uitgevoerd, omdat de gesloten vijzel niet kan turbineren. De open vijzels pompen 3, 4 en 5 m³/s per vijzel. De gedwongen passages werden op elk van deze debieten geëvalueerd (Tabel 5). De natuurlijke passages werden enkel geëvalueerd bij turbinewerking op 5 m³/s. De vissen werden bij gedwongen passage rechtstreeks boven in de vijzels ingevoerd. Zowel gedwongen als natuurlijk gepasseerde vissen werden beneden in een opvangconstructie teruggevangen.

Gedwongen passage

Voor de gedwongen passage van vissen bij turbinewerking werd gekozen voor blankvoorn en brasem als dominante potamodrome vissoorten (Kemper & Vis, 2010). Daarnaast werden ook de diadrome soorten paling en zalm geselecteerd. Paling trekt stroomafwaarts door het Albertkanaal als volwassen schieraal en zalm als juveniele smolt. Omdat juveniele zalm erg moeilijk te verkrijgen is, werd er gekozen om met kleine forel te werken aangezien ze een vergelijkbare morfologie en zwemcapaciteit hebben. De aangekochte blankvoorns hadden een lengte tussen 10 en30 cm. De palingen waren tussen 45 en 70 cm groot, maar voornamelijk rond de 60 cm om vergelijkbaar te zijn met volwassen vrouwelijke schieralen. De brasems waren tussen 25 en 45 cm groot, en de forellen tussen 25 en 35 cm (Figuur 57 in de bijlage). Voor elke soort werden telkens drie keer 100 individuen gedwongen om de vijzels te passeren op 3, 4 en 5 m³ (in totaal 3600 vissen; Tabel 5). Elke groep van 100 vissen kreeg een ander merkteken (i.e. een vinknip) om ze van elkaar te kunnen onderscheiden (herhalende testen genoemd). Er werden bijkomend ook testen uitgevoerd met dode en levende brasem, paling en blankvoorn om de vangstkans van dode en levende vissen te bepalen. Deze proefvissen werden in de uitstroom van de turbines uitgezet.

Alle geteste vissen werden na terugvangst uit de opvangconstructie gehaald, in een ruime kuip water gezet en verdoofd. Elke vis werd gewogen (tot op 1g), gemeten (tot op 1mm) en beoordeeld op toestand (levend of dood) en uitwendig zichtbare schade (schadegroep en schadeklassen, zie ook sectie 3.2.1.1).

Tabel 5: Aantallen proefdieren voor de gedwongen doorvoerproeven bij turbineren.

	turbinedebiet (m^3/s)		
	3	**4**	**5**
brasem	100	100	100
	100	100	100
	100	100	100
paling	100	100	100
	100	100	100
	100	100	100
blankvoorn	100	100	100
	100	100	100
	100	100	100
forel	100	100	100
	100	100	100
	100	100	100

Ook bij deze proeven werd gebruik gemaakt van een invoerbuis om de vissen tot aan het begin van de vijzel te brengen. Deze buis werd zo geïnstalleerd dat ingevoerde vis met de stroom mee boven de inlaatklep van de turbine in het water terecht kwam. Vissen konden na invoer niet ontsnappen naar het toevoerkanaal.

Natuurlijke passage proeven

Om een inschatting te maken van de hoeveelheid 'natuurlijk' geturbineerde vissen en eveneens hun schade te kunnen bepalen, werd er verspreid over het hele jaar (uitgezonderd de zomer) 4 dagen 24 uur per dag geturbineerd met 3 open vijzels ($15m^3$). De gevangen vissen werden geëvalueerd op schade. De schadebepaling verliep op net dezelfde manier als bij de proeven met gedwongen passage.

3.2.2 Migratiestudie paling en zalm

Om de totale impact van de pomp- en waterkrachtcentrale op de aanwezige visfauna te kwantificeren, moest onderzocht worden hoeveel vissen de installaties passeerden. Behalve de passage van vissoorten die in het kanaal zelf leven gedurende hun hele levenscyclus, evalueerden we ook de passage van vissoorten die één keer in hun leven het kanaal gebruiken als trekroute naar de zee. Concreet werden twee soorten geselecteerd die representatief zijn voor het stroomafwaarts migratiegedrag van vissen in het Albertkanaal: volwassen paling (schieraal) en juveniele zalm (smolts). Van deze soorten werd enerzijds geëvalueerd of ze het Albertkanaal als migratieroute naar zee kiezen, of de Maas. Anderzijds werd van vissen die langs het Albertkanaal zwommen, geëvalueerd of en hoe ze het sluizencomplex en de waterkrachtcentrale van Ham passeerden. Specifiek werd daarbij onderzocht wat het aandeel (gezenderde) paling en zalm is die langs de waterkrachtcentrale passeerde.

Een paling of zalm die het sluiscomplex van Ham wil passeren van de Maas naar de Schelde toe, kan hetzij via de sluizen zelf passeren, hetzij via de turbine-installatie. Het passeren van de sluizen zelf, kan samen met de schepen langs de open sluisdeuren, of kan via de vul- en leegopeningen van de sluizen. Om de vispasseerbaarheid van het gehele sluizencomplex (met focus op de waterkrachtcentrale) beter te begrijpen is het dus aangewezen om het gebruik van de mogelijke migratieroutes in kaart te brengen. Dit moet bovendien inzicht geven in de potentiële effecten op het natuurlijke migratiegedrag van de vissen. De

aanwezigheid van een sluis en/of turbine kan gedragswijzigingen veroorzaken. Door o.a. lawaai en veranderde hydraulische condities ter hoogte van waterkrachtcentrales vertonen vissen vaak vlucht- en zoekgedrag. Dat kan op zijn beurt tot vertraging of zelfs volledige onderbreking van de migratie leiden. Vertragingen en onderbrekingen kunnen naast vlucht- en zoekgedrag veroorzaakt worden door o.a. rechtstreekse schade bij passage van turbine of sluis. Ook schade zonder sterfte kan een uiteindelijke voortplanting van de vis in de weg staan als de migratie zodanig vertraagd wordt dat het energiepeil om paaigronden te bereiken uit balans is, of door een verhoogde kans op predatie door predatoren (vogels, roofvissen).

3.2.2.1 Vismigratie

Volgens hun migratiegedrag kunnen vissen in rivieren onderverdeeld worden in twee grote groepen: potadrome soorten en diadrome soorten. De eerste groep voert (jaarlijks) kleine of grote migraties uit binnen een riviersysteem, terwijl soorten uit de tweede groep migreren tussen zee en rivier.

3.2.2.1.1 Vismigratie in (uitsluitend) rivieren: potadrome migratie

Zoals bij de meeste dieren is migratiegedrag van vissen in rivieren - en eigenlijk in elk watertype - het resultaat van een scheiding in tijd en ruimte van optimale biotopen (habitats) die gebruikt worden om te groeien, om te overleven (bescherming te vinden) en om zich voort te planten en dit tijdens verschillende stadia in de levenscyclus van de soort (Northcote, 1984). Stroomop- en stroomafwaartse migraties in waterlopen worden daarom over het algemeen gekenmerkt door cyclische verplaatsingen tussen minstens twee, maar vaak drie of meer verschillende habitats. Potadrome vissoorten voor Vlaanderen zijn o.a. blankvoorn, giebel, winde, baars, brasem, kolblei, riviergrondel, tiendoornige stekelbaars, rietvoorn, karper, snoekbaars, bittervoorn (Coeck et al., 2000).

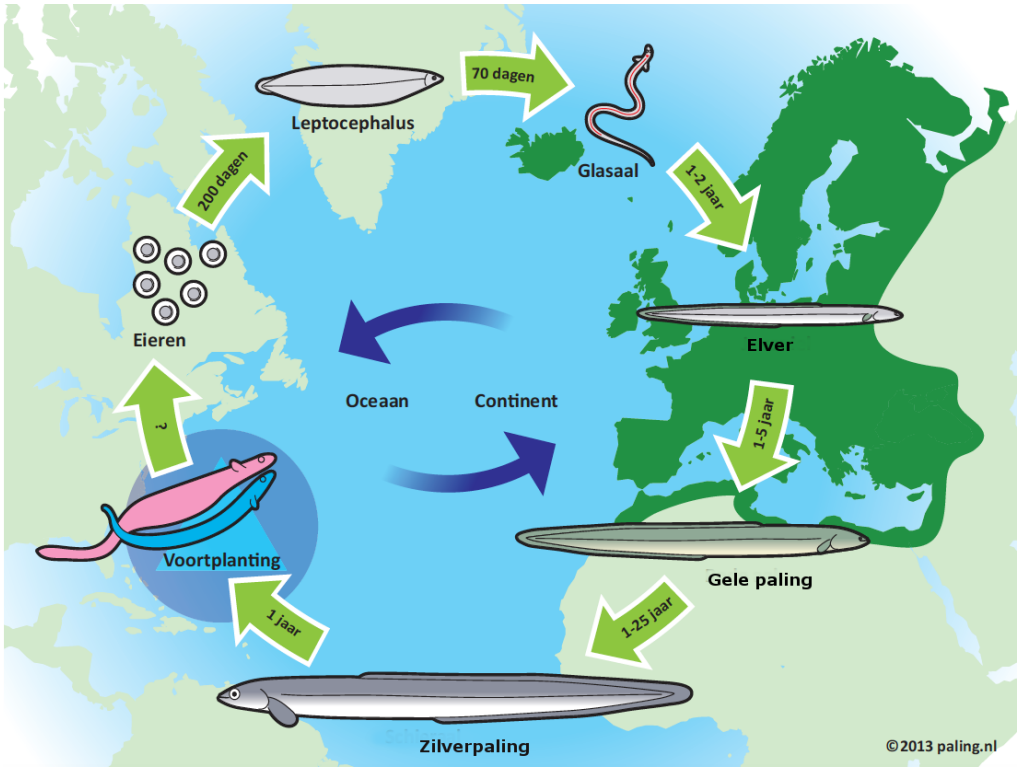
3.2.2.1.2 Vismigratie tussen zee en rivier: diadrome migratie

Bij diadrome migratie worden 2 types onderscheiden. Vissen die opgroeien in zoet water en paaien in zee worden katadrome vissen genoemd, vissen die opgroeien in zee maar paaien in zoetwater worden tot de anadrome vissen gerekend. Klassieke voorbeelden van anadrome vissen zijn de zalm en de Atlantische steur terwijl de paling een typisch katadrome vis is.

Zoetwatervissen zijn één van de meest bedreigde soortengroepen in Europa. Van de bijna 200 Europese zoetwatervissoorten zijn er minstens 37% bedreigd. Het hoge bedreigingsniveau voor de Europese zoetwatervissen is een indicatie voor de uitzonderlijke kwetsbaarheid van de Europese zoetwaterhabitats en van hun slechte staat van bescherming (Freyhof & Brooks, 2011) . Eén van de belangrijkste problemen zijn deze die verband houden met migratiebelemmering. Deze problemen manifesteren zich vooral op twee vlakken. Enerzijds is er de aanwezigheid van migratiebarrières waardoor de stroomopwaartse migratie wordt belemmerd. Anderzijds kan eveneens de stroomafwaartse migratie op verschillende manieren belemmerd worden.

Het bekendste voorbeeld van vismigratie betreft de zeewaartse migratie van de Europese paling. Alle palingen moeten immers naar de Sargassozee (nabij het eiland Bermuda) zwemmen om er te paaien. Het is het begin van wat een spectaculaire reis van ongeveer 6.000 kilometer. Voor schieraal, net als alle andere vissoorten, is het echter niet zo eenvoudig om uit het Albertkanaal te migreren omdat ze gehinderd worden door de aanwezige sluiscomplexen. Het geslacht paling (*Anguilla*) behoort tot de familie *Anguillidae* ('echte palingen') en herbergt momenteel 16 soorten en 3 ondersoorten. Alle palingsoorten zijn katadrome vissen. Het paaigebied van de Europese paling (*Anguilla anguilla* L.) bevindt zich ergens in de (on)dieptes van de Sargassozee. Uit de eitjes ontluiken doorzichtige wilgenbladlarven die zijdelings afgeplat zijn en daardoor perfect aangepast zijn aan het pelagische leven in zee. Na een één tot meerdere jaren durende reis bereiken ze met behulp van zeestromingen de Europese kust waar ze metamorfoseren tot eveneens doorzichtige glasaaltjes. Door middel van passief getijdentransport dringen ze de estuaria binnen. Daar

trekken de glasaaltjes actief verder omdat de invloed van de getijden verkleint, waarbij ze geleidelijk hun transparantie verliezen (pigmenteren) en uitgroeien tot jonge palingen (elvers). Zodra een geschikt leefgebied is gevonden, gaan ze een sedentair bestaan leiden, waarbij ze zich enkel nog op relatief korte afstanden verplaatsen om zich te voeden en te schuilen. Deze levensfase (gele paling) kan afhankelijk van de omstandigheden 3 tot 20 jaar, of zelfs langer, duren. Wanneer Europese palingen geslachtsrijp worden, ondergaan ze sterke morfologische en fysiologische veranderingen als voorbereiding op hun terugkeer naar de paaigronden in de Sargassozee. De onder- en zijkant van hun lichaam wordt zilverachtig wit terwijl de bovenzijde donkergrijs tot zwart verkleurt. Deze vorm van camouflage (omgekeerd schaduweffect) verkleint de kans op predatie tijdens hun trans-Atlantische migratie. De borstvinnen van deze zogeheten schieralen worden zwart en spits en de diameter van de ogen vergroot. Het zijn aanpassingen waarvan wordt aangenomen dat ze de migratie op grote diepte in de oceanen vergemakkelijken. Tijdens de migratie verwerven schieralen een tolerantie voor zoutwater, zal het spijsverteringsstelsel degenereren en komen de geslachtsorganen tot ontwikkeling. De stroomafwaartse migratie van schieraal is een typisch fenomeen van de herfst en vindt voornamelijk plaats tijdens donkere nachten met veel neerslag. Eenmaal in zee, trekken de zilverpalingen via de Azoren richting Sargassozee, waarbij ze waarschijnlijk gebruik maken van het aardmagnetisch veld om zich te oriënteren. Vlaamse en Nederlandse onderzoekers hebben recent, met behulp van een netwerk van detectiestations in de Schelde en de Noordzee, kunnen aantonen dat gezenderde zilverpalingen uit onze contreien de Atlantische Oceaan bereiken via het Engels Kanaal in plaats van de langere route via de Noordzee. De paai vindt plaats van december tot april waarna de uitgeputte dieren sterven.



Figuur 10: Levenscyclus van Europese paling.

De Atlantische zalm is een ander voorbeeld van een echte grote migrator. Zalm probeert zich voort te planten in de snelstromende bovenlopen van Ardeense rivieren om vervolgens als zalmsmolt naar zee te trekken om er op te groeien. Al sinds eind de jaren '80 probeert men binnen het project '*Meuse saumon 2000*' (https://www.saumon-meuse.be/) de kansen voor herstel van de wilde zalmpopulatie in België te vergroten. Hiervoor werd een uitgebreid herbepotingsprogramma opgezet, werden vispassages aangelegd en wetenschappelijk

onderzoek uitgevoerd. De laatste jaren lijken deze inspanningen stilaan hun vruchten af te werpen met vangsten van tientallen paairijpe zalmen die terugkeren naar de Ardennen. Het belang van het Albertkanaal als alternatieve migratieroute is groot voor de jonge zalmsmolts die hun weg terug naar zee zoeken.

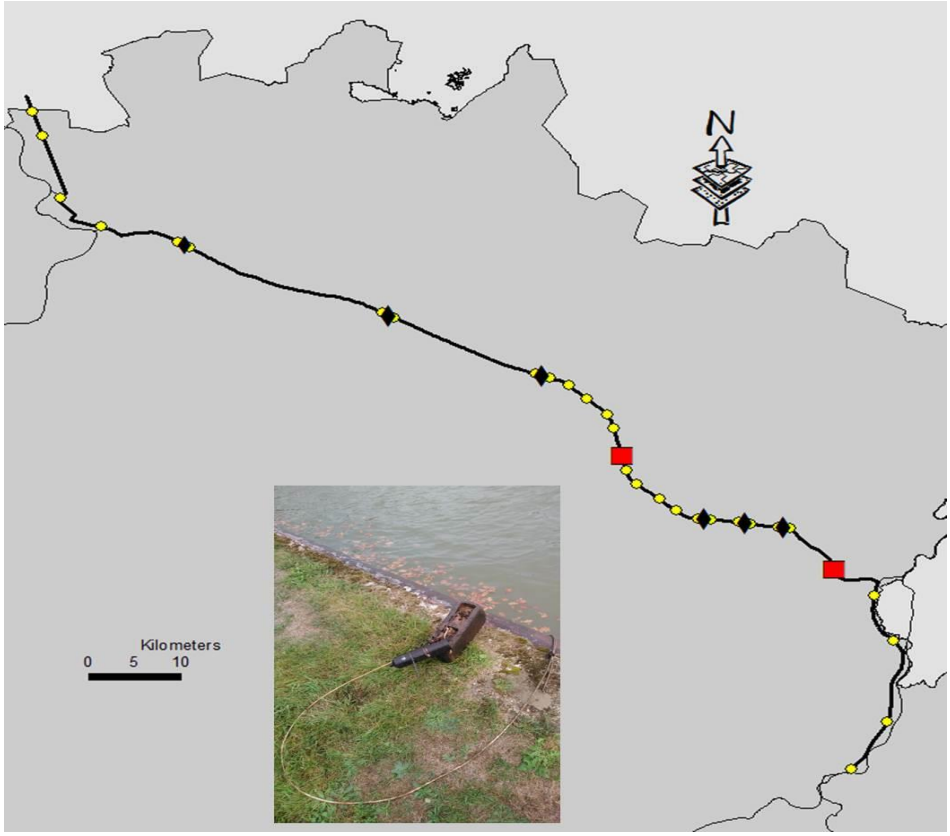
3.2.2.2 Akoestische telemetrie

Om de migratieroutes van paling en zalm te achterhalen werd akoestische telemetrie toegepast. Akoestische telemetrie is een onderzoeksmethode die gebruik maakt van geluidsgolven in water om vissen te positioneren. Deze onderzoekstechniek is gebaseerd op enkele relatief eenvoudige basisprincipes. Akoestische zenders (tags) zijn kleine geluidsproducenten die het mogelijk maken om zwemmende vissen op afstand te traceren en hun bewegingen in kaart te brengen. De technologie wordt gebruikt om op relatief kleine schaal visgedrag te bestuderen. Studies die deze technologie gebruiken, vinden meestal plaats in rivieren, meren, estuaria, bij stuwdammen en op zee. Er werd gebruik gemaakt van het 69 kHz VEMCO VR2W systeem (http://www.vemco.com/), dat bestaat uit akoestische ontvangers (verder in dit rapport hydrofoons genoemd) in het kanaal en zenders welke ingeplant werden in de vissen.

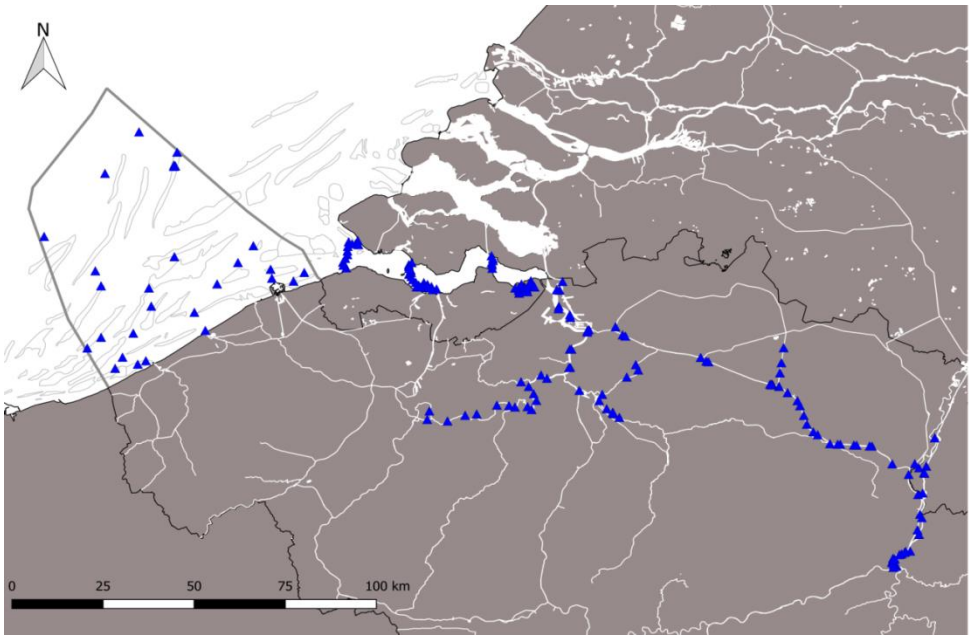
De zenders werden ingeplant in schieralen en zalmsmolts die enerzijds in het Albertkanaal zelf vrijgelaten werden en anderzijds stroomopwaarts van het Albertkanaal in het Maasbekken. De schieralen werden telkens in het wild gevangen met behulp van fuiken in de buurt van hun uitzetlocatie. De zalmsmolts voor uitzetting in Albertkanaal en Maas, werden verkregen en gezenderd in de viskwekerij van Erezée.

3.2.2.2.1 Akoestische ontvangers/hydrofoons

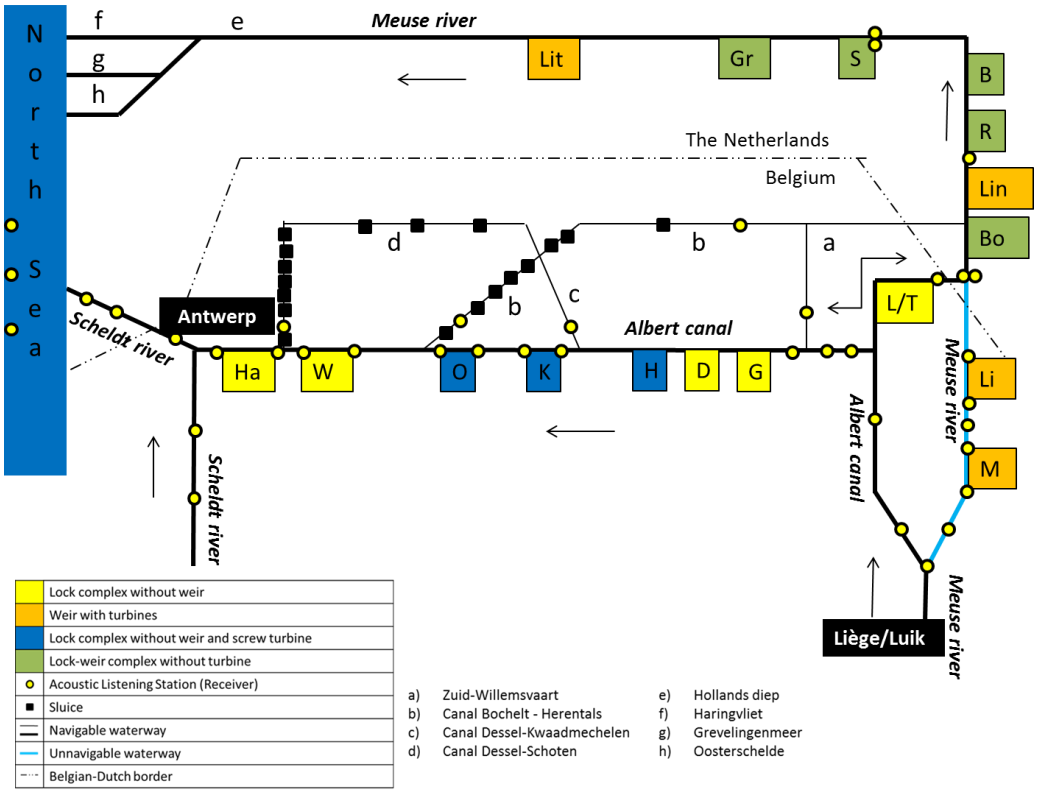
Hydrofoons (type Vemco VR2W) die op strategische plaatsen in het Albertkanaal werden opgehangen, vangen het geluidssignaal van de gezenderde vissen op m.b.v. een ingebouwde antenne (de eigenlijke hydrofoon), zetten dit signaal om in een digitale ID code (de unieke code van de zender) en slaan het tijdstip waarop deze ID ontvangen werd op in de ingebouwde data-logger. De hydrofoon vangt het geluid van een zender op van zodra de vis die de zender draagt zich binnen het bereik van de ontvanger bevindt (onder water). De opgeslagen data kunnen via bluetooth van de hydrofoon naar een PC gedownload en opgeslagen worden. De hydrofoons werden eenvoudig met behulp van een staalkabel en gewicht aan de kant van het Albertkanaal bevestigd (Figuur 11), dit zonder hinder voor scheepvaart of waterafvoer. In het Albertkanaal (inclusief de Kempische kanalen en de Antwerpse dokken) werden in totaal 49 hydrofoons geplaatst om gezenderde vissen te detecteren (Figuur 12, Figuur 13). Deze werden zodanig geplaatst dat alle verschillende, mogelijke migratieroutes van de stroomafwaarts migrerende vissen geïdentificeerd konden worden. Buiten dit netwerk was er al een bestaand netwerk in de Schelde van Gent tot de monding van de Westerschelde aanwezig, dankzij de steun van het Lifewatch fonds (http://www.lifewatch.be/). Ook stroomopwaarts van Luik tot Borgharen (Nl) werd een netwerk van ontvangers gehangen in samenwerking met de Universiteit van Luik en Sportvisserij Nederland (Figuur 12, Figuur 13). De gekozen migratieroutes van de vissen konden dus geëvalueerd worden van de monding van de Ourthe tot Gent en tot in de Noordzee.



Figuur 11: Detail van de locaties van de hydrofoons in het Albertkanaal (zwarte ruit: sluiscomplex, gele bol: hydrofoon, rood vierkant: hydrofoon en uitzetlocaties in het Albertkanaal). Inzet: montage voor de ophanging van een hydrofoon in het Albertkanaal, waarbij na installatie in het water de hydrofoon verticaal en iets boven de kanaalbodem hangt.



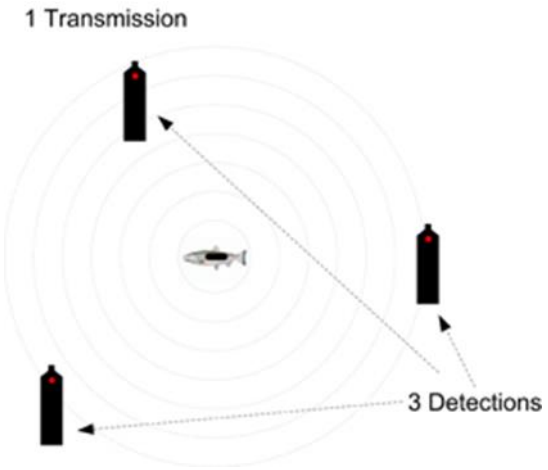
Figuur 12: Overzicht van het volledige Belgisch netwerk aan hydrofoons (zie ook http://www.lifewatch.be/).



Figuur 13: Schematisch overzicht van het volledige netwerk aan hydrofoons in het studiegebied.

Ter hoogte van sluiscomplexen werden steeds twee ontvangers geplaatst (stroomopwaarts en stroomafwaarts) om de eventuele migratievertraging voor het passeren van een sluiscomplex te kennen. Ter hoogte van het sluiscomplex van Ham werden extra ontvangers opgehangen in het aanvoerkanaal van de turbines en in elke sluis (Figuur 14). Bovendien werd stroomopwaarts van dit sluiscomplex een extra netwerk met ontvangers geïnstalleerd aan de scheepsgeleidingswanden. Dit zogenoemde 'VPS-netwerk' (Vemco Positioning System) werd gebruikt om de zwemroutes van gezenderde vissen meer gedetailleerd in kaart te brengen in een zone van 300-400 m direct stroomopwaarts van de sluisdeuren. Specifiek laat het VPS netwerk toe om de exacte positie van een vis te kennen (evaluatie van visbeweging in twee dimensies), in tegenstelling tot de evaluatie van aanwezigheid van de vis, zonder exacte positionering, bij detectie met maximaal één hydrofoon (aan- of afwezigheid van de vis en dus evaluatie van visbeweging in één dimensie). Om de precieze posities van gezenderde vissen te kunnen berekenen, moet de zender zich binnen het detectiebereik van minimaal drie hydrofoons bevinden (Figuur 15). Met behulp van informatie over het verschil in de aankomsttijd van hetzelfde uitgezonden signaal op elk van deze hydrofoons, kon de positie van de zender op een bepaald tijdstip berekend worden. Om de goede werking van het VPS netwerk continue te kunnen evalueren, werden er ook referentie zenders in het netwerk geplaatst op gekende posities. Deze zenders werden tijdens het hele verloop van de studie continue gepositioneerd.

Figuur 14: Locatie van de hydrofoons in het VPS netwerk (groene bollen; 2-dimensionale evaluatie van visbeweging) en extra hydrofoons in de sluizen en het toevoerkanaal (gele bollen; 1 dimensionale evaluatie van visbeweging of evaluatie van aan- of afwezigheid).



Figuur 15: Principe van positiebepaling in een VPS netwerk (bron: Vemco).

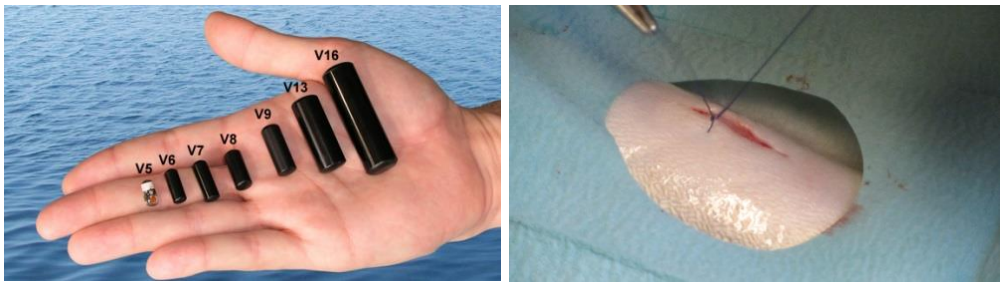
3.2.2.2.2 Akoestische zenders

Er bestaan verschillende types akoestische zenders en ze verschillen onderling in de volgende eigenschappen: grootte, de tijd die nodig is om de unieke code uit te zenden als geluidsignaal, de frequentie waarmee het signaal uitgezonden wordt en de sterkte van het geluidsignaal. De grootte van de zender is uitsluitend afhankelijk van de batterijgrootte. Hoe groter de batterij des te langer de zender gebruikt kan worden, maar ook des te krachtiger het uitgezonde signaal kan zijn. Voor paling werd meestal gebruik gemaakt van het type V13, wat duidt op de diameter van de zender (13 mm). Eén groep werd met V9 (9 mm diameter) gezenderd om na te gaan of dat type zender minder foute positioneringen zou opleveren in het VPS netwerk.

3.2.2.2.3 Vangen en zenderen van proefdieren

De schieralen werden gevangen in het najaar in het Albertkanaal ter hoogte van het meest stroomopwaartse sluiscomplex in Genk. Een beperkt aantal schieralen werd gevangen aan de sluiscomplexen van Diepenbeek en Hasselt, terwijl twee proefdieren gevangen werden in de Amblève (zijrivier Ourthe). In het Albertkanaal werden alle schieralen gevangen met dubbele schietfuiken (Figuur 16). Daarnaast werden er ook een aantal schieralen gebruikt die onbeschadigd in de opvangconstructie gevangen werden in Ham. Naast de gebruikelijke biometrie (meten en wegen) werden er ook zogenaamde schieraalkenmerken opgemeten om de maturatie-index te berekenen. Deze index geeft aan in welk levensstadium de paling zich bevindt; groeifase, pre-migratorische of migratorische fase (Durif et al., 2005).

Figuur 16: Linker helft van een dubbele schietfuik.



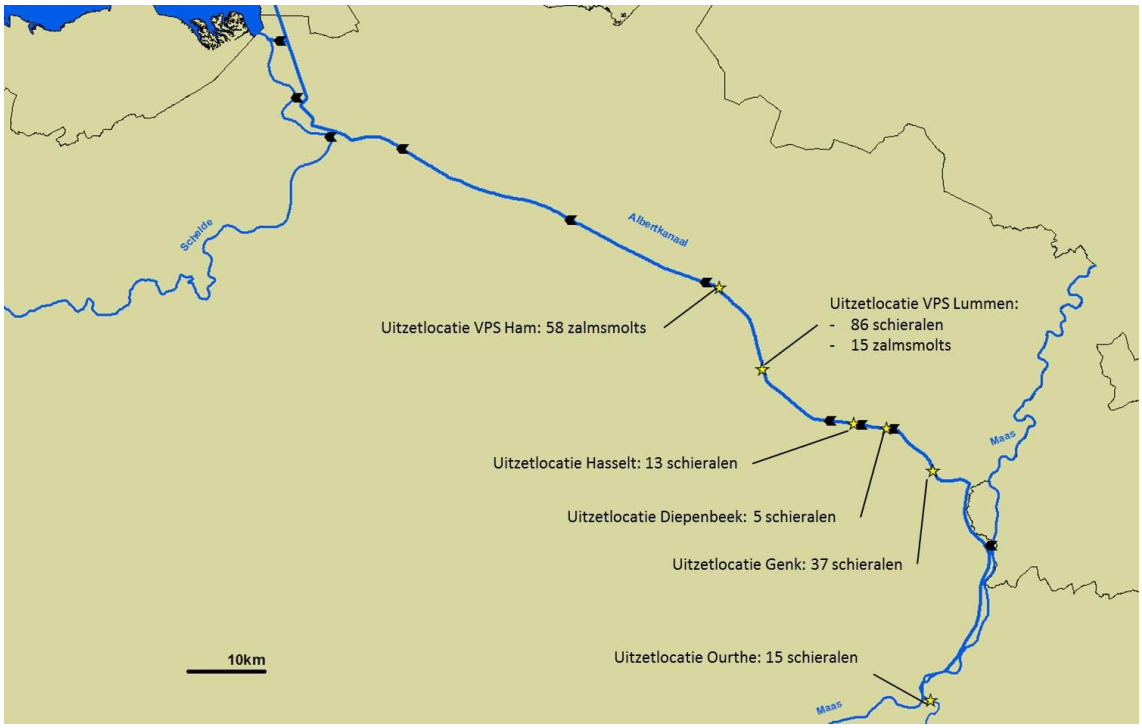
Figuur 17: Links: verschillende types Vemco zenders. Rechts: het dichtnaaien van de buikholte van een schieraal na het inbrengen van een zender.

Voor het bestuderen van de smoltmigratie gebruikten we gekweekte zalmsmolts uit de kwekerij van Erezée. De reden voor het gebruik van gekweekte i.p.v. wilde zalm was dat er onvoldoende wilde zalmsmolts voorhanden waren.

De proefdieren werden voor zendering overgebracht in een kuip met verdovingsmiddel tot ze voldoende verdoofd waren. Via een kleine chirurgische snede in de buikwand werd een zender in de buikholte aangebracht. De incisie werd met behulp van resorbeerbare draad opnieuw dichtgenaaid (Figuur 17) waarna de vissen in met water gevulde en goed beluchte kuipen gezet werden om te herstellen. Van zodra de dieren zichtbaar goed hersteld waren van de ingreep (meestal na ca. 15 min) werden ze uitgezet.

Het merendeel van de gezenderde schieralen werden uitgezet op hun vangstlocatie. Deze was voor de meeste schieralen stroomopwaarts van het sluiscomplex van Genk, aan de brug van de Hoefaertweg in Bilzen (Figuur 18). Deze dieren werden uitgerust met een zender met een lange levensduur (ongeveer 3 jaar) om de volledige migratie doorheen het kanaal te

kunnen bestuderen. Op deze uitzetlocatie hadden de vissen ook nog de mogelijkheid om de andere kant uit te zwemmen en via het sluiscomplex van Ternaaien of de stuw van Monsin de Maas te bereiken. Schieralen die gevangen werden in de twee andere Limburgse sluiscomplexen werden ook daar terug stroomopwaarts uitgezet. Aan de monding van de Ourthe in de Maas in Luik werden ook schieralen uitgezet om na te gaan hoe ze zich verdelen over de Maas en het Albertkanaal ter hoogte van de afsplitsing net stroomafwaarts Luik. De vissen die uitgerust werden met een zender met hoge uitzendfrequentie en dus kortere levensduur (tweedimensionale telemetrie d.m.v. VPS tracks) werden uitgezet in het midden van het pand Hasselt-Ham, ter hoogte van de brug van de Genenbosstraat (Lummen, Figuur 18). Het merendeel van de zalmsmolts werd net stroomopwaarts het VPS netwerk uitgezet.



Figuur 18: Uitzetlocaties (gele sterren)van schieraal en zalmsmolts met aanduiding van de sluiscomplexen van het Albertkanaal (zwart).

3.3 Data-analyse

3.3.1 Experimenten gedwongen passage

3.3.1.1 Observaties

Het effect van de vijzels op de toestand en (eventueel) opgelopen schade van de vissen, werd bepaald aan de hand van de proporties (%). De proportie is het aantal vissen binnen een betreffende klasse op het totaal aantal teruggevangen vissen en niet op het totaal aantal geteste vissen. De klassen voor de toestand van de vissen zijn: levend of dood, en de klassen voor de schade zijn diegene die besproken werden in sectie 3.2.1.1. De schadegroepen (niet zichtbaar beschadigd, licht beschadigd, zwaar beschadigd en dood) werden bepaald op basis van de schadeklassen, zoals besproken in sectie 3.2.1.1, waarbij beschadigde dieren enkel de dieren zijn die nog leefde na passage.

Per test (geteste vissoort en debiet) werden herhalingen uitgevoerd om de variatie op de proeven ten gevolge van toevalsfactoren of externe factoren in kaart te brengen. De resulterende proporties binnen iedere toestands- of schadeklasse worden daarom niet uitsluitend op basis van een gemiddelde waarde (over de herhalingen) gerapporteerd, maar

ook op basis van een range, die een idee geeft van de variatie op het gemiddelde. Omdat er slechts 3 herhalingen per test uitgevoerd werden, werd er geopteerd om de range te definiëren aan de hand van de kleinste en grootste geobserveerde waarde van de drie herhalingen per test, en niet aan de hand van een standaard deviatie zoals gebruikelijk. Deze ranges worden in de figuren weergegeven als verticale balkjes, per soort en per debiet (= per proef).

Enkel bij de proeven met blankvoorn op de vijzels in pomp-modus, werden geen herhalingen uitgevoerd, werd dus geen range gerapporteerd en is er ook geen kennis over de onzekerheid op de gerapporteerde proporties. Deze proporties zijn slechts gebaseerd op één test met 300 individuen, i.p.v. drie testen met 100 individuen.

3.3.1.2 Statistiek

Naast de bepaling van de sterftekans (en verlieskans) voor (gedwongen) gepasseerde vissen o.b.v. de geobserveerde proportie aan dode (en zwaar beschadigde) teruggevangen dieren, werd deze ook bepaald aan de hand van een statistische analyse van de data. Specifiek werd een binomiaal model gefit op de waargenomen proporties dode versus levende, teruggevangen dieren die de pompen en turbines gedwongen passeerde op (1,5), 3, 4 en 5 m^3/s. Het binomiale model dat gefit werd aan de verzamelde data, geeft de sterftekans (en verlieskans) weer voor een vis die de pompen en turbines passeert in functie van het debiet waarop de vijzel pompt of turbineert en de lengte van de vis. Daarnaast werd ook geëvalueerd of toevoegen van informatie over het gewicht van de vis een betere fit opleverde van het model aan de data. Bovendien werd ook een potentieel effect getest van de manipulatie van de vissen op de resultaten op basis van de herhalende testen. Specifiek werd er geëvalueerd of de gegevens binnen iedere test met elkaar gecorreleerd waren. Indien dit namelijk wel het geval is, kan men een effect veronderstellen van het uitvoeren van de test op de uitkomst. Wanneer men rekening wil houden met dit potentiële effect, dan voegt men deze variabele (herhalende testen) toe als een random effect aan het model (zie verder). Er werden binomiale modellen gefit per soort apart zowel in pompwerking als in turbinewerking. Bovendien werden modellen gefit die de kans op sterfte voorspellen en modellen die de kans op verlies voorspellen. Modellen die de sterftekans voorspellen werden gebaseerd op data van vissen die dood waren na passage, terwijl modellen die de verlieskans voorspellen gebaseerd werden op data van vissen die dood of zwaar gewond waren na passage.

Bij pompwerking wordt er verondersteld dat de gesloten pomp/schroef meer visvriendelijk is dan de open pompen/schroeven. We evalueerde of dit daadwerkelijk zo is met modellen waarin pomp-type een verklarende variabele is. Deze modellen testten of vissen significant minder kans hebben op sterfte wanneer ze met de gesloten vijzel opgepompt worden. Om een correcte statistische vergelijking te maken werden voor de open vijzels de debieten mee in rekening gebracht. Met andere woorden, de open vijzels werden als drie afzonderlijke groepen aanschouwd en niet als 1 grote groep 'open vijzel'. Dat is nodig omdat er een verschillend effect kan zijn van het debiet waarop deze vijzels pompen, waardoor deze niet als één grote en dezelfde groep mogen worden aanschouwd.

Alle modellen werden gefit in de software R (R Core Team, 2019) m.b.v. geïntegreerde, geneste Laplace benaderingen of "Integrated Nested Laplace Approximations" (INLA; Illian et al. 2012), wat een Bayesiaanse statistiek is. De volgende 3 stappen worden doorlopen bij het testen van de statistische modellen:

1. Eerst werd het beste model geselecteerd uit 6 verschillende modellen a.d.h.v. het Watanabe-Akaike Information Criterion (Gelman et al., 2014) Het model dat de data het beste beschrijft krijgt de laagste WAIC, maar wanneer de WAIC waarden van twee modellen niet meer dan twee eenheden verschilt, dan betekent dit dat ze als even goed beschouwd mogen worden en kiest men bij voorkeur het meest eenvoudige model. Het meest eenvoudige model is het model met de minste

variabelen, of men kan kiezen voor het model waarin men het meeste geïnteresseerd is.
In deze studie werden voor elke test telkens zes verschillende modellen vergeleken. Deze vergelijking leert meteen ook iets over het belang van de geteste variabelen voor het beschrijven van de verzamelde data. Als men namelijk een variabele toevoegt aan het model, maar dit levert geen betere WAIC waarde op, dan helpt de toegevoegde waarde niet om de dataset beter te beschrijven en is hij niet belangrijk voor het voorspellen van de afhankelijke variabele (hier de sterftekans van een vis). Volgende zes modellen werden getest, en daaruit werd er per test één model geselecteerd:
    - Model met debiet en random effect voor herhalende testen
    - Model met debiet, vis lengte en random effect voor herhalende testen
    - Model met debiet, vis lengte, vis gewicht en random effect voor herhalende testen
    - Model met debiet en zonder random effect
    - Model met debiet, vis lengte en zonder random effect
2. Model met debiet, vis lengte, vis gewicht en zonder random effectVervolgens werd aan de hand van het geselecteerde model geëvalueerd of de variabelen een significant effect hebben op de sterftekans van een vis. Dit gebeurde door de geschatte parameters van de 95% betrouwbaarheidsintervallen te evalueren en dat wordt verder in dit rapport gerapporteerd als waarden en in een figuur. Daarbij is het zo dat als de betrouwbaarheidsintervallen het getal 0 bevatten, ze geen significant effect hebben op de sterftekans.
3. En tot slot werden aan de hand van het geselecteerde model voorspellingen gemaakt van de sterftekans van een vis voor een bepaald debiet en/of een bepaald debiet en vis lengte. Deze voorspelde sterftekans is de eindconclusie van het model en geeft een correct beeld van de echte sterftekans van een vis in deze situatie op basis van deze studie.

In een ideale situatie, waarbij alle geteste vissen teruggevangen worden, kan het uiteindelijke effect van de vijzels op vis uitsluitend afgeleid worden van de waargenomen proporties binnen iedere toestand en schadeklasse. In deze studie werden noch bij de pomp- als bij de turbineproeven alle ingevoerde vissen teruggevangen. Als eerste punt in de resultaten sectie van dit rapport worden de terugvangstpercentages per test weergegeven. Deze geven een idee van de proportie vissen waarvan de toestand en schade niet gekend was na passage door de vijzel.

Hoewel er dus een aandeel vissen was na iedere passage waarvan de toestand en schade niet gekend was en daarmee de uiteindelijke sterfte of het verlies zwaar onder- of overschat kon worden, was het toch mogelijk om een robuuste en correcte sterftekans te berekenen. Deze sterftekans houdt rekening met het lot van de niet-geobserveerde dieren door dit lot in te schatten o.b.v. bijkomende testen. Dit waren de testen waarbij dode vissen uitgezet werden onder de vijzels bij turbineren, en boven de vijzels bij het pompen. Van deze controle-vissen werd de vangstkans berekend. Deze vangstkans gaf een ruw idee van de proportie aan niet-teruggevangen dieren die dood waren, en dus van het lot van de niet-geobserveerde vissen. Specifiek werd verondersteld dat een heel laag terugvangstpercentage van dode controle dieren overeenkomt met een grote proportie aan niet-geobserveerde dieren die dood zijn en omgekeerd. Samen met de kennis over de vangstkans van vissen die ingevoerd werden in de vijzels, werd kennis over de vangstkans van de dode controle dieren als volgt gecombineerd om de algemene sterftekans voor vis die de vijzel ooit passeert te berekenen:

$$P(D) = \frac{P(D|V) * P(V)}{P(V|D)},$$

Waarin P(D) gelijk is aan de kans (P) op sterfte (D) van een vis die de vijzel ooit passeert; P(D|V) de kans is dat een geteste en teruggevangen vis (V) dood is; P(V) de kans is dat een geteste vis gevangen wordt; en P(D|V) de kans is dat een dode vis teruggevangen wordt. P(D|V) is gelijk aan de proportie dode vissen van alle teruggevangen vissen en leiden we dus af uit de teruggevangen vissen die de vijzel gedwongen passeerden. P(V) is het vangstpercentage van de vissen die de vijzel passeerden, en P(V|D) is gelijk aan het vangstpercentage van de dode controle dieren die onder of boven de vijzel ingevoerd werden bij respectievelijk de turbine- en de pompproeven.

Testen met dode controle vissen werden enkel uitgevoerd voor passages op 5 m³/s en enkel met de soorten blankvoorn, brasem en paling bij de turbineproeven, en enkel met paling bij de pompproeven. Enkel voor die proeven en soorten werd dan ook een algemene sterftekans berekend los van de observaties op basis van de teruggevangen individuen, omdat enkel voor deze testen alle onderdelen van het rechter deel van bovenstaande vergelijking bekend waren. Bovendien mochten terugvangstpercentages voor testen op 5 m³/s niet zomaar vergeleken worden met sterftekansen van individuen die op andere debieten getest werden, omdat niet gekend was of de terugvangstpercentages al of niet beïnvloed werden door het debiet waarop de vijzels draaiden.

3.3.2 Experimenten natuurlijke passage

Ten eerste werd bepaald hoeveel vissen de pompen en turbines passeerden. Deze aantallen werden omgerekend naar een densiteit, als aantal vis per volume verpompt of geturbineerd water. Vervolgens werd de toestand en schadegroep van de gepasseerde vissen geëvalueerd om een inschatting te kunnen maken van het sterfte- en verliespercentage.

De resultaten van deze proeven worden als absolute waarden weergegeven per schadegroep. Voor de 4 groepen (dood-zware schade-lichte schade-zichtbaar onbeschadigd) worden gewogen gemiddelden gegeven waarbij (24u) proeven met een hoger vangstaantal zwaarder wegen op de uitkomst. De groep sterfte betreft de direct waargenomen sterfte. Dit kunnen dus ook uitwendig onbeschadigde vissen zijn. Omgekeerd zijn niet alle zwaar beschadigde vissen dood.

3.3.3 Berekeningen toekomstscenario's

Om een inschatting te maken van de totale impact van de pomp- en waterkrachtcentrale op de aanwezige visfauna in het Albertkanaal, werden experimenten uitgevoerd met natuurlijke vispassage. Hieruit werd bepaald hoeveel biomassa aan vis er per volume water gemiddeld passeerde, rekening houdend met een correctie voor het terugvangstpercentage uit de experimenten met gedwongen passage. Extrapolatie van deze biomassa's en volumes water naar toekomstige volumes te verpompen of te turbineren water, kon een algemeen beeld geven van de verwachte toekomstige schade aan het visbestand.

Specifiek werd het aantal verpompte of geturbineerde vissen (als aantal per volume water en gecorrigeerd met het verwachte aantal niet teruggevangen vissen) vermenigvuldigd met de voorspelling van het jaarlijkse verpompte of geturbineerde debiet binnen elk scenario. De resulterende, geschatte jaarlijkse hoeveelheid geturbineerde vissen werd vervolgens vermenigvuldigd met het aandeel verlies dat werd vastgesteld door de sterfte bij natuurlijke passage, maar ook door de sterfte na de gedwongen passage. Beide sterftecijfers werden gebruikt als range waarbinnen het uiteindelijke verlies aan biomassa voor het Albertkanaal kon afgeleid worden. De schattingen van jaarlijks te verpompen of te turbineren debieten (de toekomstscenario's) werden overgenomen uit het MER (Verhaegen et al., 2009). De visbiomassa werd berekend door de gemiddelde biomassa van 2015 (meest recente data (Visser & Kroes, 2016)) te extrapoleren naar het hele Albertkanaal.

Het spreekt voor zich dat deze scenario's veel onzekerheden bevatten. Om te beginnen zijn de toekomstige scenario's qua waterverbruik, scheepvaartintensiteit en klimaat uit het MER al onzeker. Daarnaast werd er gerekend met getallen die ontstaan uit visbestandopnames en de proeven op natuurlijke passage. Deze data kunnen erg veel spatio-temporele variatie bevatten die niet vervat zitten in de huidig verzamelde datasets. De toekomstscenario's

werden berekend als algemene 'houvast' voor het afstemmen van het beheer en beleid, maar moeten dus met de nodige voorzichtigheid geïnterpreteerd worden.

3.3.4 Migratiestudie paling en zalm

Voor de evaluatie van de migratieroutes op niveau Albertkanaal (1D tracking) werden de detecties van gezenderde vissen geanalyseerd met de software VUE (Vemco). Daarvoor werden de aanwezigheden van de vissen in het studiegebied geëvalueerd a.d.h.v. hun detecties op de hydrofoons in het studiegebied. Deze gaven een idee van de uiteindelijke migratieroute naar zee.

Voor de precieze routekeuze van de gezenderde vissen ter hoogte van het sluiscomplex van Ham werden de 2D tracks bepaald a.d.h.v. de berekende visposities. Deze posities werden in eerste instantie door VEMCO berekend aan de hand van de ruwe detecties op de hydrofoons in het VPS netwerk. Nadien werden de berekende visposities door onszelf (INBO) verder geanalyseerd en gefilterd op fouten. De gefilterde visposities gaven een idee van de route die een vis binnen het VPS netwerk gezwommen heeft en de resterende fout hierop. De route die een vis zwom wordt ook vis track genoemd, en daarmee wordt dus naar het 2D track in het VPS netwerk verwezen en niet naar de migratieroutes in het hele studiegebied (Maas, Albertkanaal).

De informatie van de vis tracks werd gecombineerd met kennis o.b.v. detecties van hydrofoons die aanvullend op het VPS netwerk in de sluizen, in het toevoerkanaal naar de waterkrachtcentrale en stroomafwaarts van de sluizen geplaatst werden. Deze hydrofoons evalueerden enkel de aanwezigheid van de vissen en maakten geen onderdeel uit van het VPS netwerk om 2D tracks te generen. Ze gaven uitsluitsel over de uiteindelijke passage route die een gezenderde vis koos op zijn weg stroomafwaarts langs het sluizencomplex. De drie mogelijke routes die een vis hier kon nemen waren: de route langs de waterkrachtcentrale, langs de sluizen, of geen passage.

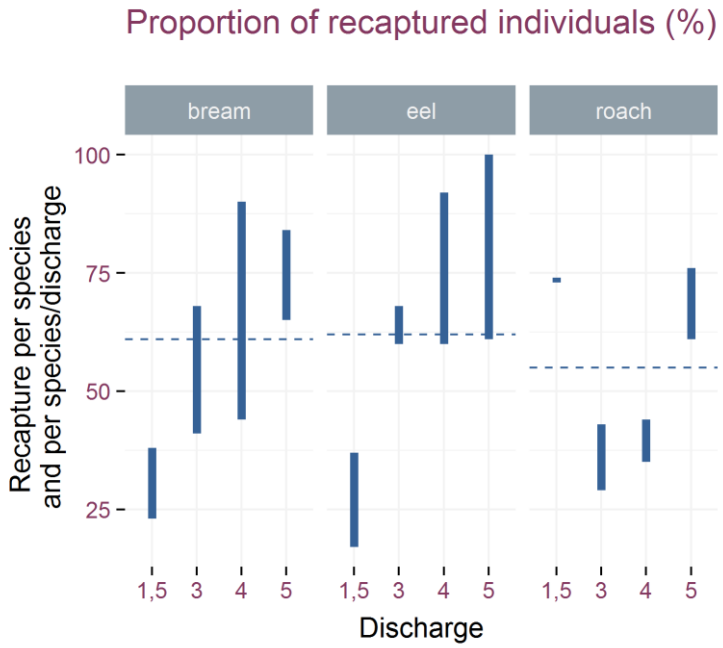
4 Resultaten

4.1 Experimenten gedwongen passage

4.1.1 Pompen

4.1.1.1 Terugvangstpercentages

Zoals eerder vermeld (sectie 3.3.1), werden niet alle ingevoerde vissen na passage door de vijzel teruggevangen. Gemiddeld genomen werden voor de proeven op passage door de pompen per soort telkens meer dan de helft van de ingevoerde vissen teruggevangen en geëvalueerd op sterfte en schade. De terugvangstpercentages verschilden echter tussen de debieten, waarbij de testen met de gesloten vijzel ruim beneden de helft scoren voor brasem en blankvoorn. Hetzelfde geldt voor de testen op 3 en 4 m³/s met blankvoorn (Figuur 19). Bovendien variëren de terugvangstpercentages sterk tussen de herhalende testen. Deze gegevens wijzen op problemen met de terugvangsten. Deze zijn mogelijks te wijten aan de mogelijkheid voor vissen om zich tussen de vijzels en de opvangconstructie in het omleidingskanaal schuil te houden voor sterke stroming, in luwe zones tussen de vijzels en vernauwing van het omloopkanaal. Dat zou meteen ook verklaren waarom de terugvangstpercentages het laagste zijn bij de testen met de gesloten vijzel. Deze vijzel is naast de drie open vijzels gepositioneerd, die tijdens deze proef niet draaien. Er is dus een ruim volume water dat niet stroomt tijdens het uitvoeren van de test en waar de vissen de mogelijkheid hebben om te blijven rondzwemmen zonder richting de opvangconstructie gedreven te worden.



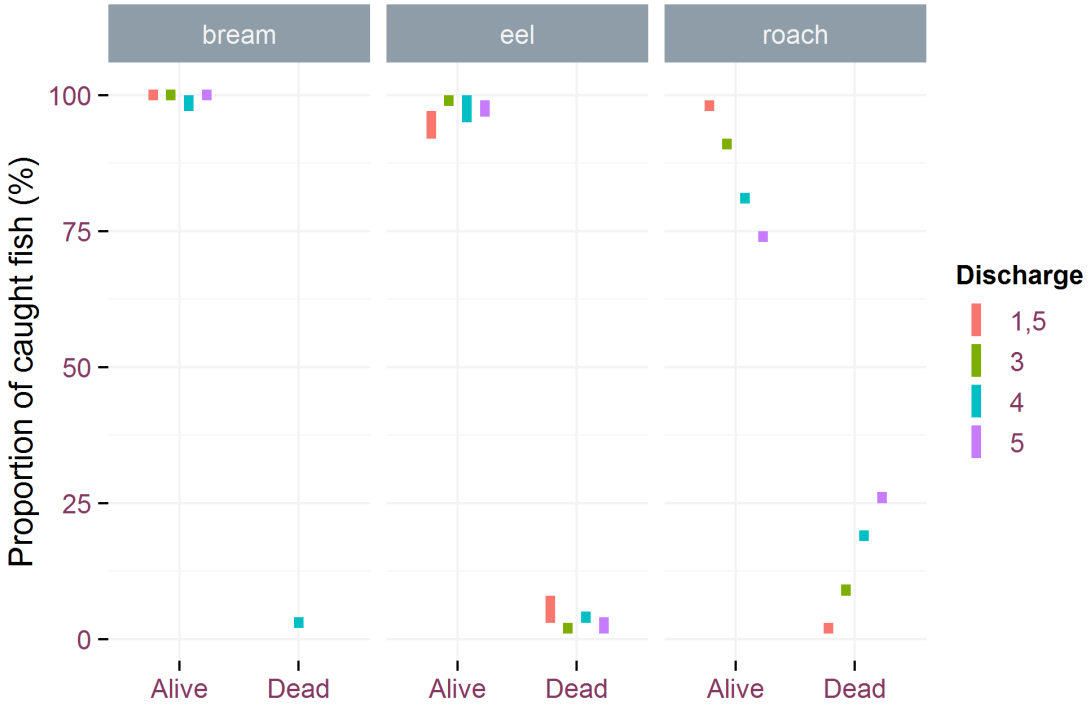
Figuur 19: Percentage terugvangst per soort en debiet als de range tussen het kleinste en grootste geobserveerde terugvangstpercentage over de drie herhalingen per getest debiet per soort (verticale waardebalken), en het gemiddelde terugvangstpercentage per soort over de debieten heen (horizontale stippellijn).

Tabel 6: Gemiddelde terugvangstpercentages per soort, en het kleinste en grootste geobserveerde terugvangstpercentage van alle proeven (herhalingen en debieten: 1,5 m³/s (gesloten vijzel), 3, 4 en 5 m³/s (open vijzels)) van de betreffende soort (de range).

	gemiddeld	range
brasem	60	23-90
paling	65	17-100
blankvoorn	53	29-76

4.1.1.2 Observaties toestand (sterfte)

Slechts 3 brasems van alle brasems die gedwongen werd de pompen te passeren stierven, en dat enkel bij de passage van de open vijzel op 4 m³/s (Figuur 20; Tabel 7). Het grootste percentage aan gestorven vissen na passage werd waargenomen voor blankvoorn die de open vijzels passeerde (Tabel 7). De directe sterfte van de 300 blankvoorns die verpompt werden met de gesloten vijzel bedroeg 2%, terwijl dit gemiddeld 19 % was voor de 3 x 300 individuen die verpompt werden met de open vijzels. Tussen de verschillende geteste debieten was het verschil in sterftepercentage het grootst voor blankvoorns, waarbij tot 26 % van de individuen stierf na passage op 5 m³/s terwijl dit slechts 9 % was bij de testen op 3 m³/s en 19 % bij de testen op 4 m³/s. Van de verpompte palingen stierven gemiddeld 3 % meer individuen (totaal 5 %) na passage door de gesloten vijzel dan door de open vijzels (Tabel 7).



Figuur 20: Het percentage levende ('alive'), en dode ('dead') dieren van het totaal aantal teruggevangen dieren na gedwongen passage door de pomp. Voor brasem en paling werden herhalende testen uitgevoerd, maar voor blankvoorn niet. De balkjes visualiseren de range tussen het kleinste en grootste percentage van de verschillende herhalende testen (bij brasem en paling) per debiet. De gesloten vijzel komt overeen met een debiet van 1,5 m³/s, de andere debieten betreffen passage door de open vijzels. Afwezigheid van een balkje betekent dat de proportie 0 % was binnen deze klasse.

4.1.1.3 Observaties schadegroepen (zware schade)

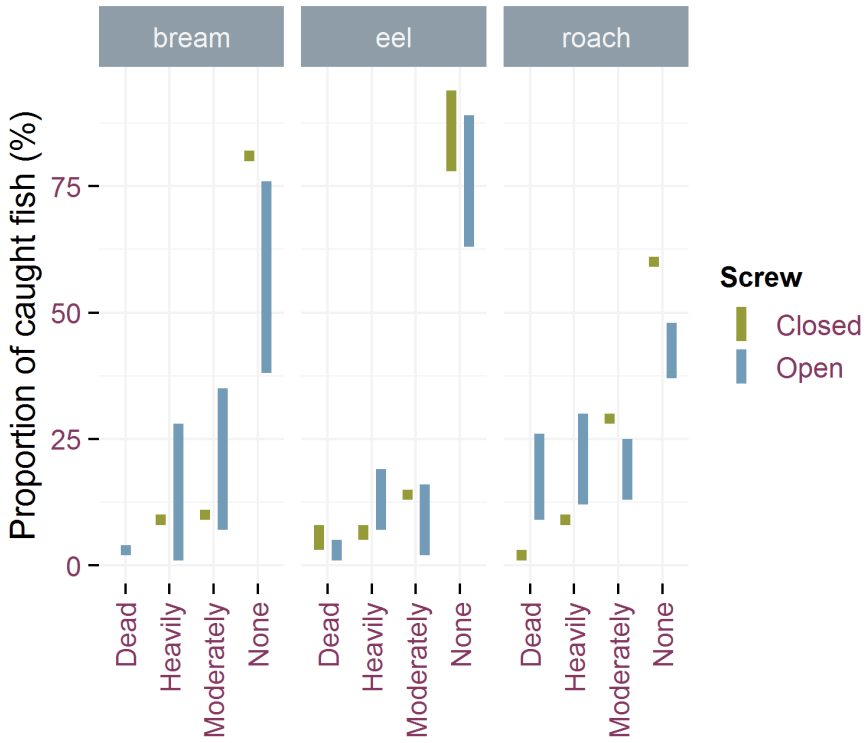
Wanneer het aandeel zwaar beschadigde dieren meegerekend wordt voor de bepaling van het negatieve effect van de pompen op de vissen, dan merken we dat voor de soorten brasem en blankvoorn de gesloten vijzel een kleiner negatief effect lijkt te hebben op de gepasseerde vissen, dan de open vijzels. Voor paling is het effect gelijkaardig (Figuur 21 en Tabel 7). Specifiek is er een gemiddeld verlies van 10 % van de palingen verpompt met de gesloten vijzel (met een maximum tot 16 %), en een gemiddeld verlies van 15 % (met een maximum tot 24 %) palingen die verpompt werden met de open vijzels, ongeacht het debiet (Tabel 7 en Figuur 21). Voor alle soorten is het aandeel zwaar beschadigde dieren altijd groter dan het aandeel dode dieren.

In tegenstelling tot wanneer enkel dode dieren geëvalueerd worden, is er nu wel een aandeel brasems waarvan kan verwacht worden dat ze zullen bezwijken aan hun verwondingen. Specifiek werden gemiddeld 9 % van de brasems die met de gesloten vijzel verpompt werden zwaar beschadigd. Bij verpompen met de open vijzels werden 14 % van de brasems (met observaties tot 28 % in één van de herhalende testen op 3 m³/s (Figuur 59)) zwaar beschadigd (Tabel 7).

Het grootste verlies aan vissen wordt geleden bij de blankvoorns, waarvan tot gemiddeld 38 % dood of zwaar beschadigd is na verpompt te zijn met een open vijzel op één van de drie mogelijke debieten. Na verpompt te zijn met de gesloten vijzel is 11 % van de blankvoorns dood of zwaar beschadigd, maar vooral zwaar beschadigd (Tabel 7).

Voor de testen met brasem en paling is er op de klasse niet-beschadigde brasems na, telkens overlap in de ranges van geobserveerde percentages tussen gesloten en open vijzels (Figuur 21). Er zijn tot 81 % brasems die niet beschadigd zijn na verpompen door de gesloten vijzel, terwijl de maximale waargenomen proportie voor de open vijzels (en dat is specifiek op een debiet van 3 m³/s (Figuur 58) 76 % bedraagt (met een gemiddelde van 47 % en een minimum van maar 38 % in één van de herhalende testen op 3 m³/s; Figuur 21 en Figuur 58).

De testen met blankvoorn (waar evenwel geen herhalingen voor werden uitgevoerd) geven weer dat er minder dode en zwaar beschadigde blankvoorns zijn wanneer ze verpompt worden met de gesloten vijzel, dan wanneer ze verpompt worden met de open vijzel (ongeacht het debiet waarop die open vijzel draait). Het omgekeerde is bovendien waar voor licht beschadigde en niet-beschadigde blankvoorns (Figuur 21).



Figuur 21: Het percentage dode ('dead'), en zwaar ('heavily'), lichte ('moderately') en niet ('none') beschadigde dieren van het totaal aantal teruggevangen dieren na gedwongen passage door de pomp per type vijzel (gesloten versus open). Voor brasem en paling werden herhalende testen uitgevoerd, maar voor blankvoorn niet. De balkjes visualiseren de range tussen het kleinste en grootste percentage van de verschillende (herhalende) testen (bij brasem en paling) per vijzeltype. De gesloten vijzel komt overeen met een debiet van 1,5 m^3/s, de open vijzels betreffen testen op 3, 4 en 5 m^3/s. Afwezigheid van een balkje betekent dat de proportie 0 % was binnen deze klasse.

De invloed van de draaisnelheid (debiet) van de open vijzels op het aandeel zware schade is niet hetzelfde voor de drie soorten. Bij paling overlappen de ranges tussen de drie debieten, terwijl voor brasem en blankvoorn geldt dat hoe trager de vijzels draaien, hoe groter het aandeel zware schade is (Figuur 58 in bijlage).

Tabel 7: Gemiddelde percentages en hun range (als kleinste en grootste waargenomen percentages over alle herhalende testen) dode, zwaar beschadigde, licht beschadigde en niet zichtbaar beschadigde vissen voor de 3 soorten en 3 debieten, waarbij het totaal verlies per soort (kolom 5 en 6) de som is van de categorieën dode dieren en zwaar beschadigde dieren.

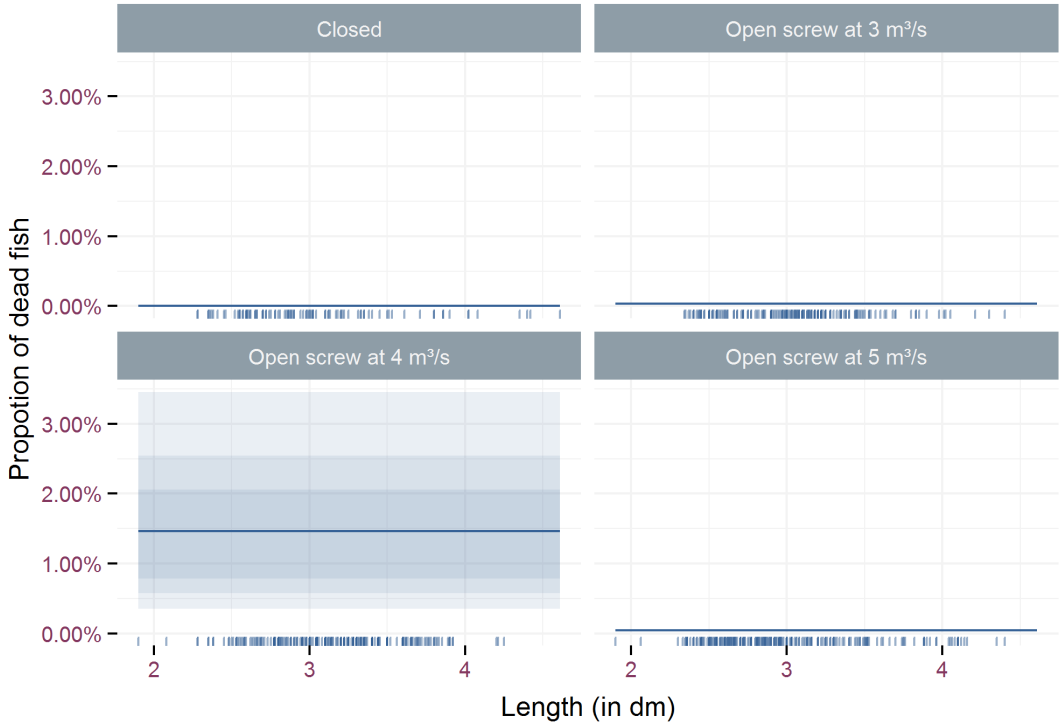
		Gemiddeld (en range) gesloten vijzel (%)	Gemiddeld (en range) open vijzel (%)	**Verlies gesloten vijzel (%)**	**Verlies open vijzel (%)**	**Gemiddelde (en range) 3 m³/s (%)**	**Gemiddelde (en range) 4 m³/s (%)**	**Gemiddelde (en range) 5 m³/s (%)**
brasem	dood	0	0 (0-3)	**9**	**14**	0	1 (0-3)	0
	zware schade	9	14 (1-28)			26 (17-28)	7 (1-11)	13
	lichte schade	10	32 (7-35)			27 (7-34)	35 (34-35)	32
	geen schade	81	54 (38-76)			47 (38-76)	57 (54-61)	55
paling	dood	5 (0-8)	2 (0-5)	**10**	**15**	1 (0-2)	3 (0-5)	2 (1-4)
	zware schade	5 (5-8)	13 (7-19)			14 (8-19)	11 (9-13)	14 (7-17)
	lichte schade	7 (0-14)	9 (2-16)			14 (12-16)	8 (5-13)	7 (2-10)
	geen schade	83 (79-94)	76 (63-89)			71 (63-76)	78 (73-80)	77 (72-89)
blankvoorn	dood	2	19 (9-26)	**11**	**38**	9	19	26
	zware schade	9	19 (12-30)			30	18	12
	lichte schade	29	20 (13-25)			13	21	25
	geen schade	60	42 (37-48)			48	42	37

4.1.1.4 Statistiek sterftekans en verlieskans

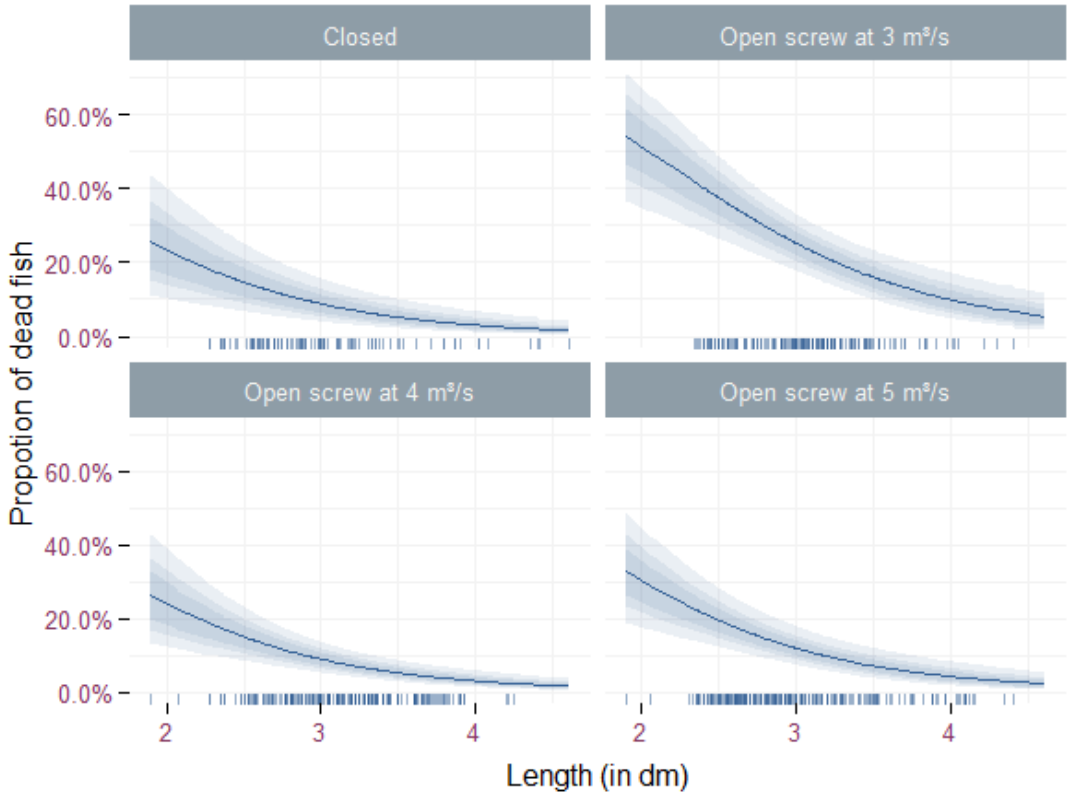
Op basis van de geobserveerde proporties aan sterfte en zware schade, werden statistische modellen gefit die een idee geven van de kans dat een vis van de betreffende soort (A) sterft en (B) verloren gaat (waarbij verlies gelijk is aan de proportie sterfte + de proportie zwaar beschadigden). Zoals uitgelegd in de materiaal en methode (sectie 3.3.1) werden telkens eerst verschillende statistische modellen gefit waaruit 1 model (het beste) geselecteerd werd om de uiteindelijke sterfte of verlieskansen te voorspellen. Een modelselectie verliep telkens zo dat het model met de laagste WAIC waarde geselecteerd werd, tenzij de WAIC waardes van verschillende modellen minder dan 2 eenheden van elkaar verschilden. In dat geval werd uitsluitend gekozen voor een model waarin rekening gehouden wordt met het potentiële effect van de manipulatie van de vissen op het eindresultaat. Bovendien wordt in dat geval telkens gekozen voor het meest eenvoudige model (enkel debiet als verklarende variabele), of voor een model met ook lengte in, als dit een betere WAIC waarde kent dan het model met enkel debiet. Verder in deze sectie komen we niet meer terug op de modelselectie, maar geven we uitsluitend de resultaten van de geselecteerde modellen per vissoort. Voor alle modellen die geselecteerd werden en die bijgevolg hieronder besproken worden, kunnen de parameters die tot de modelkeuze geleid hebben teruggevonden worden in de bijlage.

Of er een significant effect is van het vijzeltype op de sterftekans, en dus een significant verschil tussen de gesloten en open vijzels, werd statistische geëvalueerd per soort. Voor **brasem**, waarbij slechts 3 van alle geteste brasems gestorven zijn en dat allemaal bij de test met de open vijzel op 4 m³/s heeft een modellering weinig zin. Toch hebben we een test uitgevoerd en deze wees inderdaad uit dat een brasem 0% kans heeft om te sterven

wanneer hii opgepompt wordt met de gesloten vijzel en de open vijzels als deze op 3 en 5 m³/s draaien, en 1.5% wanneer verpompt met de open vijzel op 4 m³/s met een 80% betrouwbaarheid tot 3% kans op sterfte (Figuur 22). Het model dat de verlieskansen voorspelt voor verpompte brasem geeft wel een significant effect van lengte, waarbij kleinere brasems een grotere kans hebben om dood of zwaar beschadigd te zijn na passage door de pompen. De kans op verlies loopt bij kleine brasems op tot 20%. Er is hierbij ook een licht significant effect van de open pomp, die een iets hogere kans op sterfte of zware schade zou opleveren wanneer gepompt wordt op 3 m³/s (Figuur 22 b).



(a)

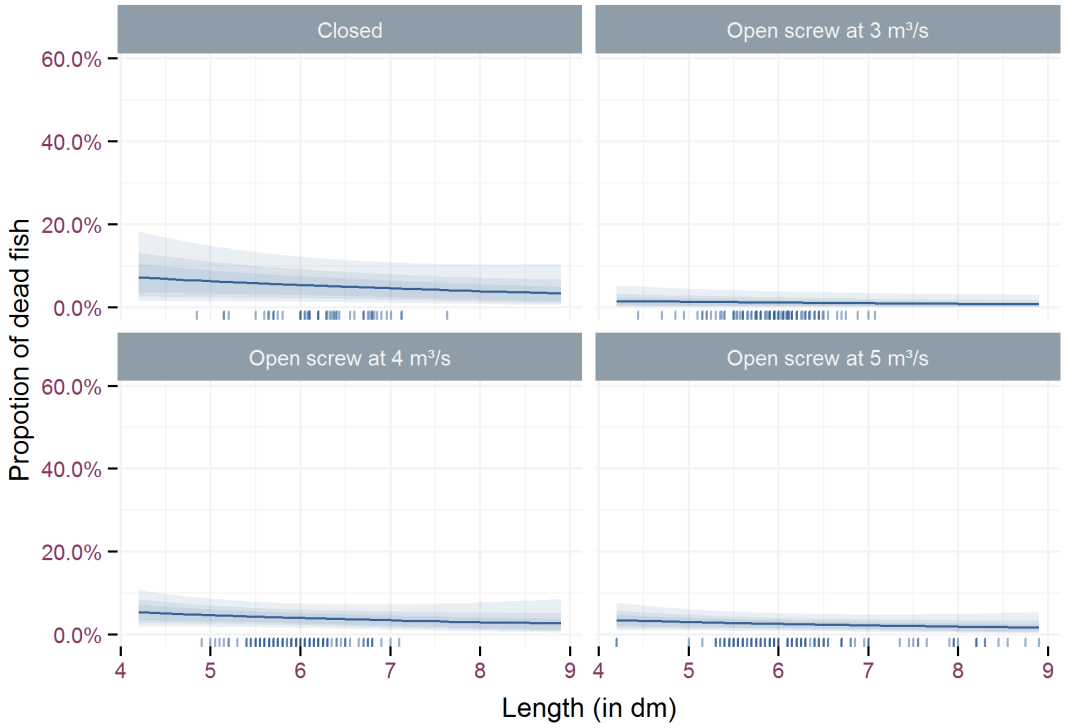


(b)

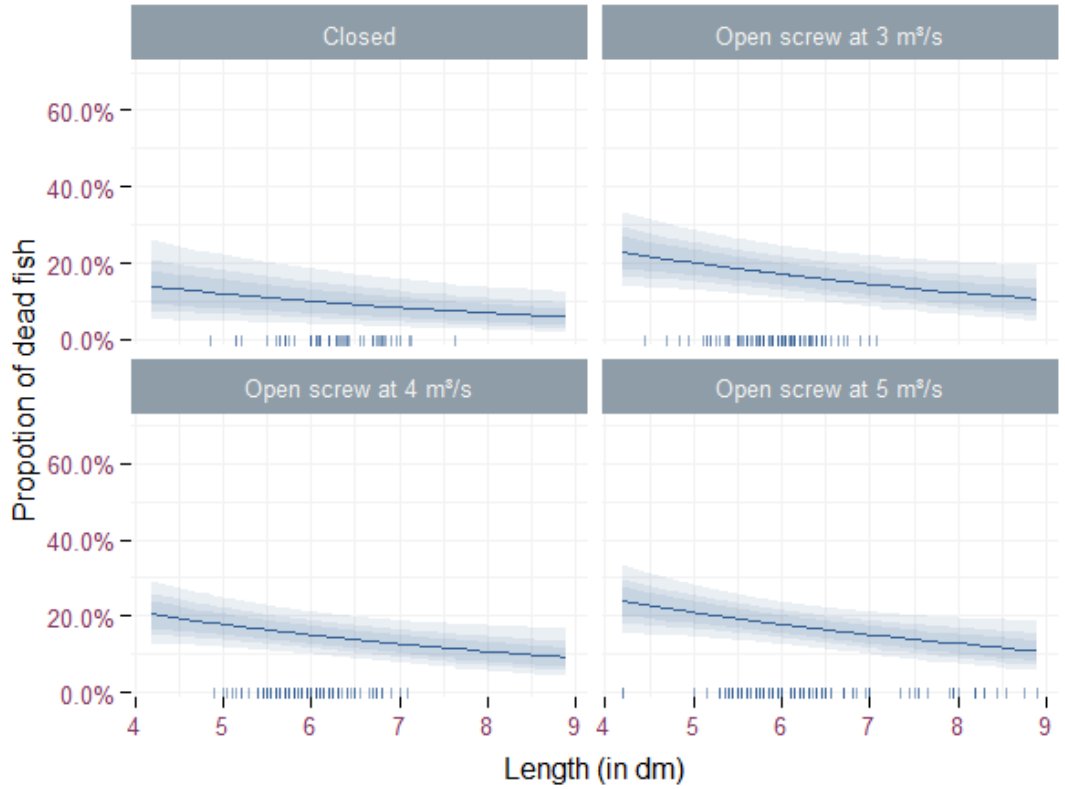
Figuur 22: (a) Voorspelde sterftekans en (b) voorspelde verlieskans (sterfte + zware schade) voor brasem die verpompt wordt met de gesloten vijzel (links boven), of met de open vijzel op 3 (rechts boven), 4 (links onder) of 5 m³/s (rechts onder)(donker blauwe lijn: gemiddelde sterftekans, licht blauwe arcering: 60% betrouwbaarheidsinterval, midden blauwe arcering: 80% betrouwbaarheidsinterval, donker blauwe arcering: 95% betrouwbaarheidsinterval).

Voor **paling** kon wel een statistisch model gefit worden voor de sterftekans, en dat model wijst op de afwezigheid van een significant effect van het vijzeltype op de sterftekans van paling. Met andere woorden een paling heeft ongeveer evenveel kans op sterfte of hij nu met een gesloten of open vijzel verpompt wordt en bij de open vijzels heeft het debiet daar verder ook geen significant effect op. Het model geeft wel weer dat paling een licht kleinere kans heeft om te sterven als hij verpompt wordt door de gesloten vijzel en de open vijzel (indien werking op 3 m³/s), maar dit effect is net niet significant. Daarnaast wijst het model er ook op dat er een licht kleinere kans is voor grotere palingen om te sterven na verpompen op eender welke vijzel, maar ook dit effect is niet significant (Figuur 23 en Figuur 65 in de bijlage). Specifiek voorspelt het geselecteerde model een zeer lage kans op sterfte die kleiner is dan 10%, zelfs met slechts 60% betrouwbaarheid en voor eender welke grootteorde van paling op eender welke vijzel (Figuur 23).

De kans om paling te verliezen, omdat ze ook zwaar beschadigd raakte door de pomp is zoals verwacht hoger (Figuur 22 b). De kans om paling te verliezen, zeker voor kleinere palingen is dit het geval, is groter dan 10%. Het model dat de verlieskans van paling voorspelt in functie van het debiet en de lengte geeft echter wel aan dat noch debiet, noch lengte een invloed hebben op de verlieskans.



(a)



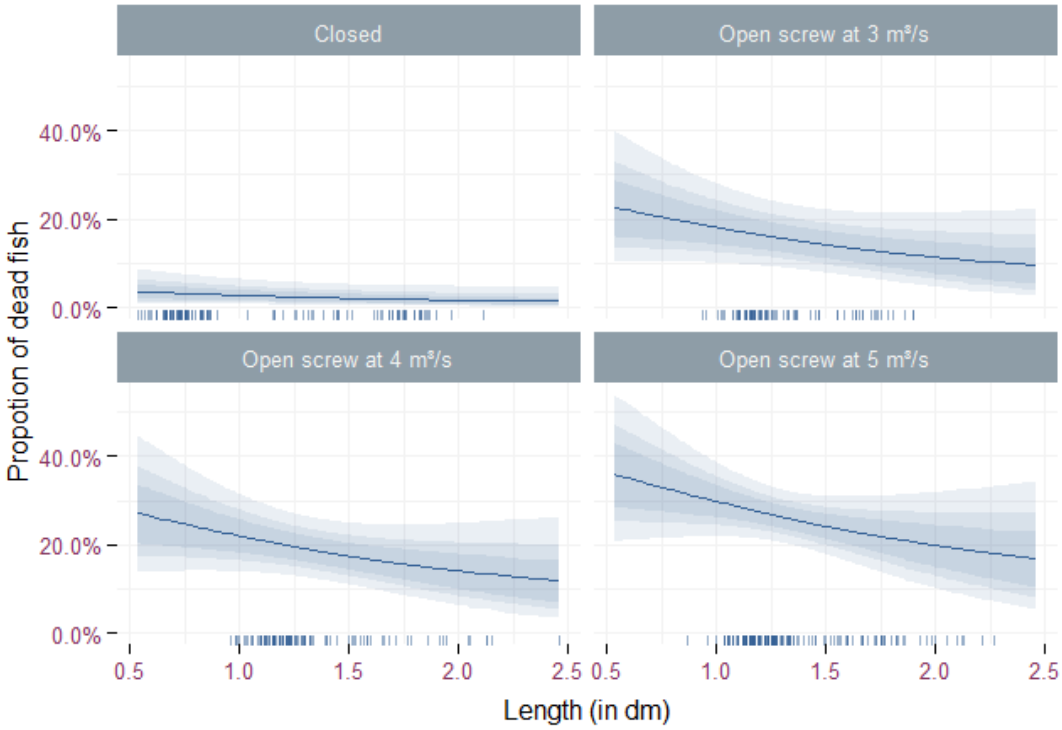
(b)

Figuur 23: (a) Voorspelde sterftekans en (b) voorspelde verlieskans voor paling die verpompt wordt met de gesloten vijzel (links boven), of met de open vijzel op 3 (rechts boven), 4 (links onder) of 5 m³/s (rechts onder) ten opzichte van de lengte (gemodelleerd in dm) van de paling. (donker blauwe lijn: gemiddelde sterftekans, licht blauwe arcering: 60%

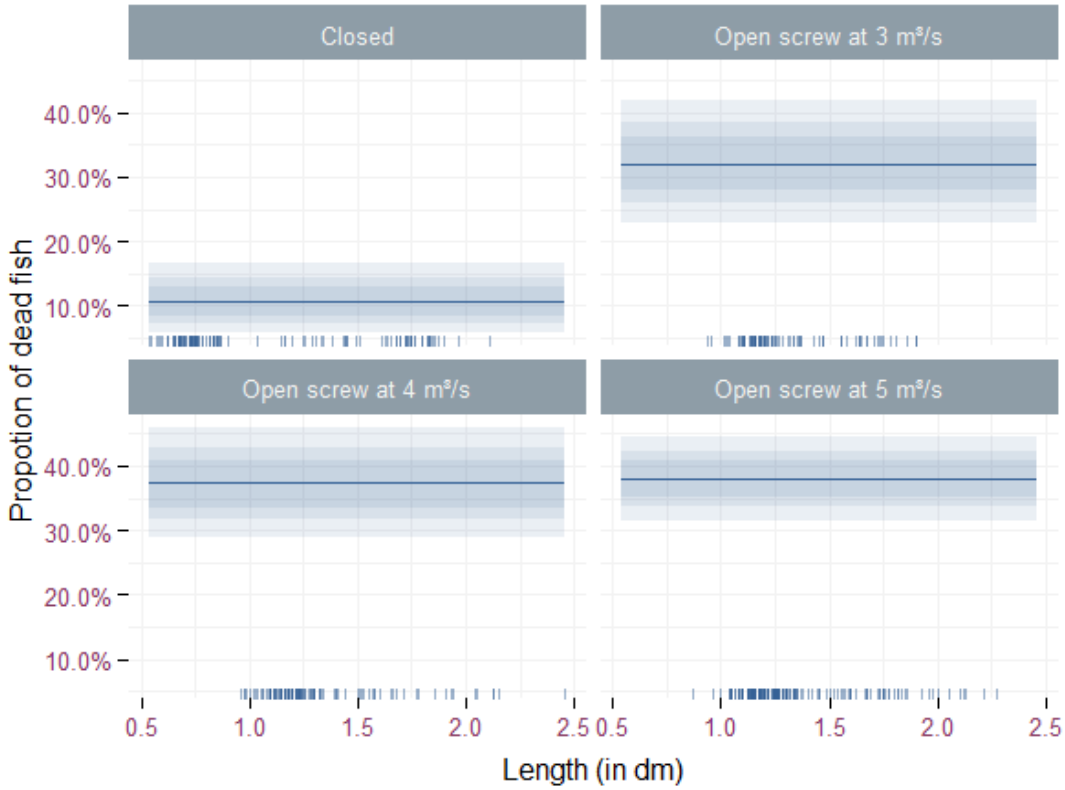
betrouwbaarheidsinterval, midden blauwe arcering: 80% betrouwbaarheidsinterval, donker blauwe arcering: 95% betrouwbaarheidsinterval).

Ook voor **blankvoorn** kon een goed statistisch model gefit worden. Dit model (met schroeftype en vis lengte, maar zonder random effect) geeft een significant effect van het vijzeltype op de sterftekans van verpompte blankvoorns (Figuur 68 in de bijlage). Specifiek heeft volgens het model blankvoorn significant minder kans op sterfte wanneer hij verpompt wordt door de gesloten vijzel ten opzichte van de open vijzels. Als een blankvoorn toch met de open vijzels verpompt wordt, dan heeft hij het minste kans op sterfte wanneer hij verpompt wordt op 3 m³/s, en het meeste bij 5 m³/s (Figuur 24). De lengte van de blankvoorn heeft geen significant effect op zijn sterftekans. Specifiek heeft een blankvoorn met een lengte van 13 cm (het gemiddelde van de geteste lengtes in deze studie) 2% kans om te sterven als hij verpompt wordt met de gesloten vijzel, terwijl dit 16% is bij een open vijzel die op 3 m³/s draait, 19% bij een open vijzel die op 4 m³/s draait, en 26% bij een open vijzel die op 5 m³/s draait.

Ook wanneer zware schade meegerekend wordt blijft de verlieskans afhankelijk van het type vijzel waarop blankvoorn verpompt wordt. Er is een significant kleinere kans dat blankvoorn verloren gaat wanneer hij verpompt wordt met de gesloten vijzel, dan wanneer hij verpompt wordt met de open vijzel (Figuur 24 b). Net zoals bij de kans op sterfte, speelt de lengte van de blankvoorn geen rol bij zijn voorspelde kans op verlies. De variabele lengte werd zelfs niet in het model weerhouden. Voor alle vijzeltypes geldt dat de verlieskans wel bijna verdubbeld ten opzichte van de sterftekans.



(a)



(b)

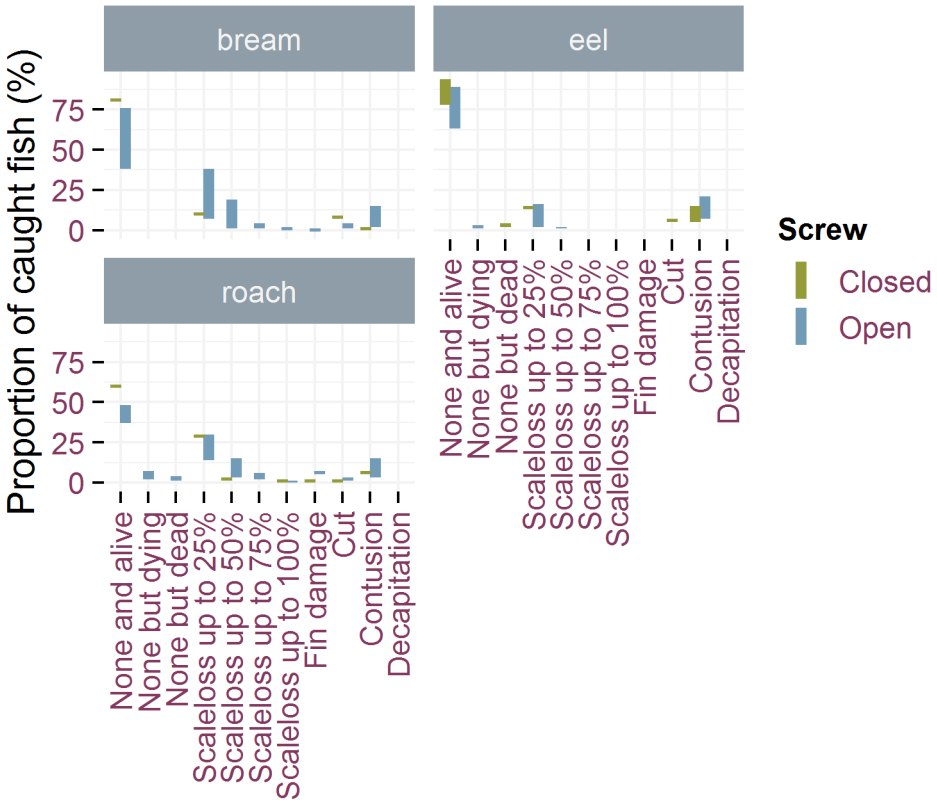
Figuur 24: (a) Voorspelde sterftekans en (b) voorspelde verlieskans voor blankvoorn die verpompt wordt met de gesloten vijzel (links boven), of met de open vijzel op 3 (rechts boven), 4 (links onder) of 5 m³/s (rechts onder) ten opzichte van de lengte (gemodelleerd in dm) van de blankvoorn. (donker blauwe lijn: gemiddelde sterftekans, licht blauwe arcering: 60% betrouwbaarheidsinterval, midden blauwe arcering: 80% betrouwbaarheidsinterval, donker blauwe arcering: 95% betrouwbaarheidsinterval). De lengte van de vis heeft geen significant effect op zijn sterftekans, maar het vijzeltype en debiet wel.

4.1.1.5 Observaties schadeklassen

Wanneer we kijken naar de meest voorkomende schadeklassen die tot zware schade gerekend worden, dan valt het op dat bij brasem en blankvoorn voornamelijk schubverlies tot 50 % van de lichaamsoppervlakte en kneuzingen optreden. Bij paling zijn dit bijna uitsluitend kneuzingen (Figuur 59, Figuur 60 en Figuur 61 in de bijlage). Onthoofdingen, doorsnijdingen, snijwonden en schubverlies tot 75 en 100 % van het lichaamsoppervlak komen weinig tot niet voor.

Voor alle soorten geldt dat de meeste vissen niet en licht beschadigd zijn, waarbij de licht beschadigde vissen vooral schubverlies hebben (of krassen bij paling) tot 25 % van het lichaamsoppervlak. Vinschade komt nauwelijks voor.

Ondanks het feit dat vissen in de gesloten vijzel niet meer tussen de schroef en de behuizing kunnen terecht komen, vertoonden toch gemiddeld 1% (brasem), 10% (paling) en 6 % (blankvoorn) kneuzingen na passage door de gesloten vijzel.



Figuur 25: Het percentage aan niet-beschadigde dieren (dood, stervend of levend) en dieren met schubverlies (tot 25, 50, 75 en 100% van hun lichaamsoppervlak), vinschade, snijwond(en), kneuzing(en) en onthoofding van het totaal aantal teruggevangen vissen na gedwongen passage door de pomp per vijzeltype (open of gesloten). De balkjes visualiseren de range tussen het kleinste en grootste percentage van de verschillende herhalende testen per debiet. De gesloten vijzel komt overeen met een debiet van 1,5 m³/s, de andere debieten betreffen passage door de open vijzels. Afwezigheid van een balkje betekent dat de proportie 0 % was binnen deze klasse.

4.1.1.6 Sterftekans ongeacht het ongekende lot van niet-geobserveerde vissen

Er werden 60 dode palingen uitgezet in de opvangbak van de pompen als blanco test, voor het inschatten van het lot van niet-geobserveerde palingen na passage door de pompen. Voor deze 60 dieren werd het vangstpercentage bepaald. Net voor vangst van de dieren draaiden de 3 open vijzels op 5 m³/s. In deze situatie werden 57 van de 60 palingen teruggevangen. Dat betekent dat de vangstkans van dode palingen 97 % is. Dat betekent ook dat er zeer weinig niet-teruggevangen palingen dood zijn en dat de uiteindelijke berekende sterftekans weinig tot niet verschilt van de proportie palingen die dood waren bij terugvangst (de geobserveerde sterfte).

Specifiek tonen de testen met paling aan dat er in het slechtste geval 2% kans is, dat een paling die verpompt wordt met de open vijzels (op 5 m³/s), dood is. Wanneer ook rekening gehouden wordt met het feit dat niet alle geteste vissen teruggevangen en geëvalueerd konden worden, dan stijgt deze sterftekans in het slechtste geval tot 2.1 %, daalt ze in het beste geval tot 0.4 % en is ze gemiddeld 1.3 % (Tabel 8).

Tabel 8: Sterftekans voor paling die verpompt wordt op 5 m³/s met een open vijzel. De rechter kolom geeft de uiteindelijke sterftekans. De formule en de waarden die daarin ingevuld moeten worden staan in kolommen 2 tot en met 5.

Soort	P(D|V) (%)	P(V) (%)	P(V|D) (%)	(P(D/V)*P(V))/P(D)	**P(D) (%)**
Paling	2	17-100	97	Beste geval: (2*17)/97=1,34 Slechtste geval: (2*100)/97=2,06	Beste geval: **1,3** Slechtste geval: **2,1**

4.1.1.7 Samenvatting sterfte en verlies

Tabel 9: Overzicht van de waargenomen sterfte en het waargenomen verlies per vissoort en debiet voor gedwongen passage door de pompen.

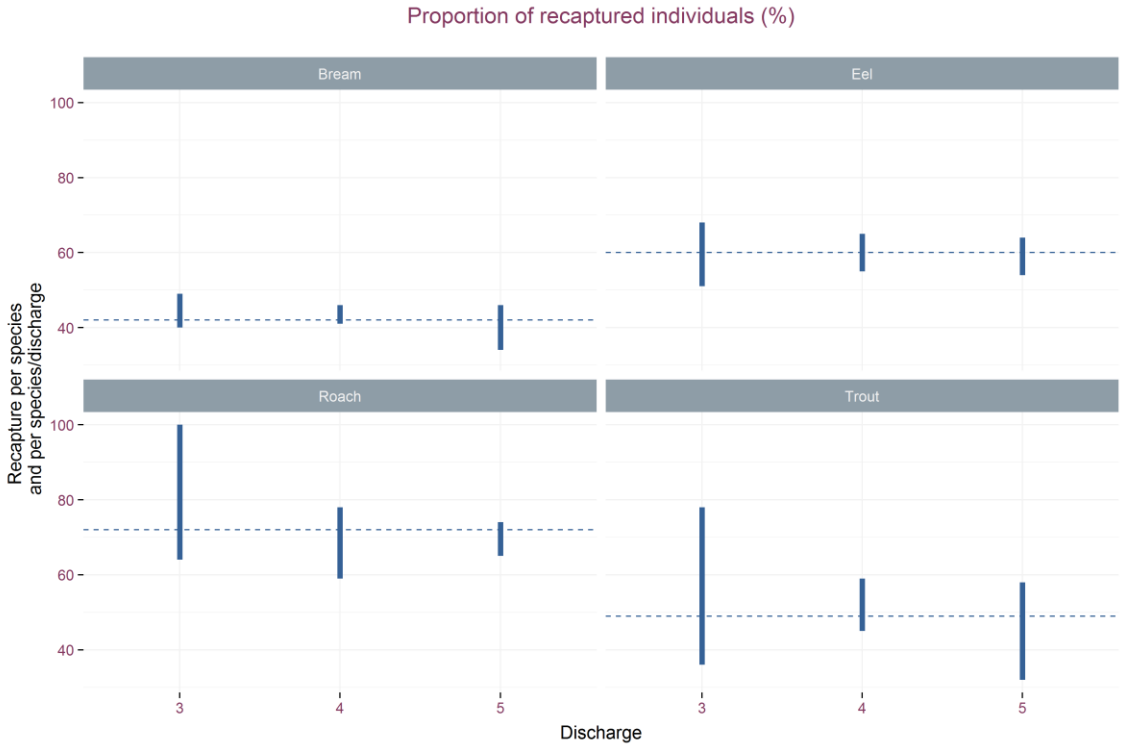
Test	**Observaties directe sterfte**				**Observaties verlies***				**Statistische kans op directe sterfte**				**Statistische kans op verlies***			
Pompen (Q in m³/s)	1,5	3	4	5	1,5	3	4	5	1,5	3	4	5	1,5	3	4	5
Brasem	0%	0%	1%	0%	**9%**	**26%**	**8%**	**13%**	0%	0%	1,5%	0%	16% (25cm) 5% (35cm)	39% (25cm) 17% (35cm)	16% (25cm) 6% (35cm)	20% (25cm) 8% (35cm)
Paling	5%	1%	3%	2% (1,3-2,1%) **	**10%**	**15%**	**14%**	**16%**	3%	3%	3%	3%	11-20% (55cm) 9-16% (65cm)	11-20% (55cm) 9-16% (65cm)	11-20% (55cm) 9-16% (65cm)	11-20% (55cm) 9-16% (65cm)
Blankvoorn	2%	9%	19%	26%	**11%**	**39%**	**37%**	**38%**	2%	16%	19%	26%	11% (16cm)	32% (16cm)	37% (16cm)	38% (16cm)

*) Verlies = sterfte + zware schade. **) sterftekans die rekening houdt met het lot van niet geobserveerde dieren.

4.1.2 Turbines

4.1.2.1 Terugvangstpercentages

Niet alle geteste vissen konden worden teruggevangen om hun toestand en schade te evalueren. De terugvangstpercentages (het aantal teruggevangen dieren op het totaal aantal geteste dieren per proef), verschilden ook tussen soorten. Bij de testen met blankvoorn werden er gemiddeld over alle testen (alle herhalingen bij alle debieten), 72% teruggevangen. Voor de testen met paling, brasem en forel was dit 60, 42 en 52 %, respectievelijk (Figuur 26 en Tabel 10).



Figuur 26: Percentage terugvangst per soort en debiet als de range tussen het kleinste en grootste geobserveerde terugvangstpercentage over de drie herhalingen per getest debiet per soort (verticale waardebalken), en het gemiddelde terugvangstpercentage per soort over de debieten heen (horizontale stippellijn).

Tabel 10: Gemiddelde terugvangstpercentages per soort, en het kleinste en grootste geobserveerde terugvangstpercentage van alle proeven (herhalingen en debieten: 3, 4 en 5 m³/s) van de betreffende soort (de range).

	gemiddeld	range
brasem	42	34-49
paling	60	51-68
blankvoorn	72	59-100
forel	52	32-78

4.1.2.2 Observaties toestand (sterfte)

Bij alle proeven, behalve bij forel, is het aandeel levende vissen na passage het grootst (Figuur 27). Paling heeft erg weinig directe sterfte (3%), terwijl brasem (42%) en vooral forel (53%) een erg hoge directe sterfte hebben. De resultaten van de 3 proeven van forel op 5m³ zijn erg verschillend. Bovendien werden er voor deze soort meer dode dieren geobserveerd zonder schade, dan bij de andere drie soorten. Het aandeel stervende dieren is bij alle proeven zeer laag (Figuur 27). Bij alle soorten, behalve bij brasem overlappen de ranges (minimale tot maximale waarde van de drie herhalende testen per proef) tussen de drie verschillende debieten. Bij forel zijn deze ranges wel opvallend groter dan bij de andere drie soorten, en zeker voor de proef bij 5 m³/s, waarbij er een verschil is tussen de herhalende testen van ongeveer 40%, zowel bij het aandeel levende als dode dieren (Figuur 27).

Figuur 27: Het percentage levende ('alive'), en dode ('dead') dieren van het totaal aantal teruggevangen dieren na gedwongen passage door de turbine. Per soort en debiet werden 3 herhalende testen met 100 vissen uitgevoerd. De balkjes visualiseren de range tussen het kleinste en grootste percentage van de drie testen.

De resultaten tonen dat er tot gemiddeld over alle debieten 41% brasems, 54% forellen, maar slechts 3% palingen en 18% blankvoorns dood zijn na passage (Tabel 11). Op de blankvoorns na ligt het hoogste gemiddelde sterftecijfer (gemiddeld over de herhalende testen) telkens bij de proeven op 5 m³/s, maar men dient wel rekening te houden met de range over de herhalende testen (Tabel 11). In de statistische testen naar het effect van debiet en lengte van de vis op de sterftekans per soort, wordt hier mee rekening gehouden. In Tabel 11 worden ter volledigheid zowel de gemiddelde waarden als hun bijhorende range weergegeven.

4.1.2.3 Observatie schadegroepen (zware schade)

Wanneer het aandeel zwaar beschadigde dieren meegerekend wordt voor de bepaling van het negatieve effect van de turbines op de vissen, dan merken we dat voor alle soorten het negatieve effect van de turbines ongeveer met een zelfde percentage stijgt. Specifiek is dat

voor blankvoorn +16%, voor paling +14%, voor brasem +13%, en bij de forellen werd relatief weinig zware schade vastgesteld (+6%)(Figuur 28, Tabel 11). In tegenstelling tot bij de experimenten op de pompen is het wel zo dat de proporties zware schade bij alle soorten veel kleiner zijn dan de proporties sterfte.

Figuur 28: Het percentage dode, zwaar beschadigde, licht beschadigde en niet zichtbaar beschadigde vissen na passage door de turbine van het totaal aantal teruggevangen dieren. De beschadigde dieren waren levend bij terugvangst, de groep dode dieren bevat naast dode dieren ook stervende dieren.

Tabel 11: Gemiddelde percentages 'dood', 'zware schade', 'lichte schade' en 'geen schade' voor de 4 soorten en 3 debieten, waarbij het totaal verlies per soort de som is van de categorieën 'dood' en 'zware schade'.

		Gemiddeld (en range) open vijzel (%)	**Verlies open vijzel (%)**	**Gemiddelde (en range) 3 m³/s (%)**	**Gemiddelde (en range) 4 m³/s (%)**	**Gemiddelde (en range) 5 m³/s (%)**
brasem	dood	42 (26-52)	**55**	46 (36-52)	48 (46-51)	30 (26-35)
	zware schade	13 (6-20)		12 (6-20)	11 (7-17)	17 (15-18)
	lichte schade	7 (4-12)		4 (4-5)	9 (7-12)	9 (9-9)
	geen schade	38 (22-49)		37 (22-47	32 (24-37)	45 (38-49)
paling	dood	3 (1-6)	**17**	2 (1-4)	3 (0-4)	4 (0-6)
	zware schade	14 (4-26)		15 (14-18)	11 (4-15)	16 (5-26)
	lichte schade	10 (5-17)		12 (7-17)	9 (6-12)	9 (5-12)
	geen schade	73 (61-82)		71 (67-76)	77 (75-82)	71 (61-77)
blank-voorn	dood	18 (12-27)	**34**	20 (18-27)	18 (14-21)	14 (12-16)
	zware schade	16 (7-25)		14 (8-18)	19 (15-21)	16 (7-25)
	lichte schade	31 (23-39)		33 (32-34)	29 (23-39)	31 (23-38)
	geen schade	36 (27-41)		33 (31-36)	35 (27-41)	39 (39-40)
forel	dood	53 (42-94)	**59**	51 (42-58)	48 (42-60)	60 (47-94)
	zware schade	6 (2-14)		8 (5-14)	3 (2-4)	5 (0-5)
	lichte schade	9 (2-14)		10 (9-14)	10 (7-14)	4 (0-9)
	geen schade	34 (6-46)		31 (28-36)	39 (29-46)	31 (6-40)

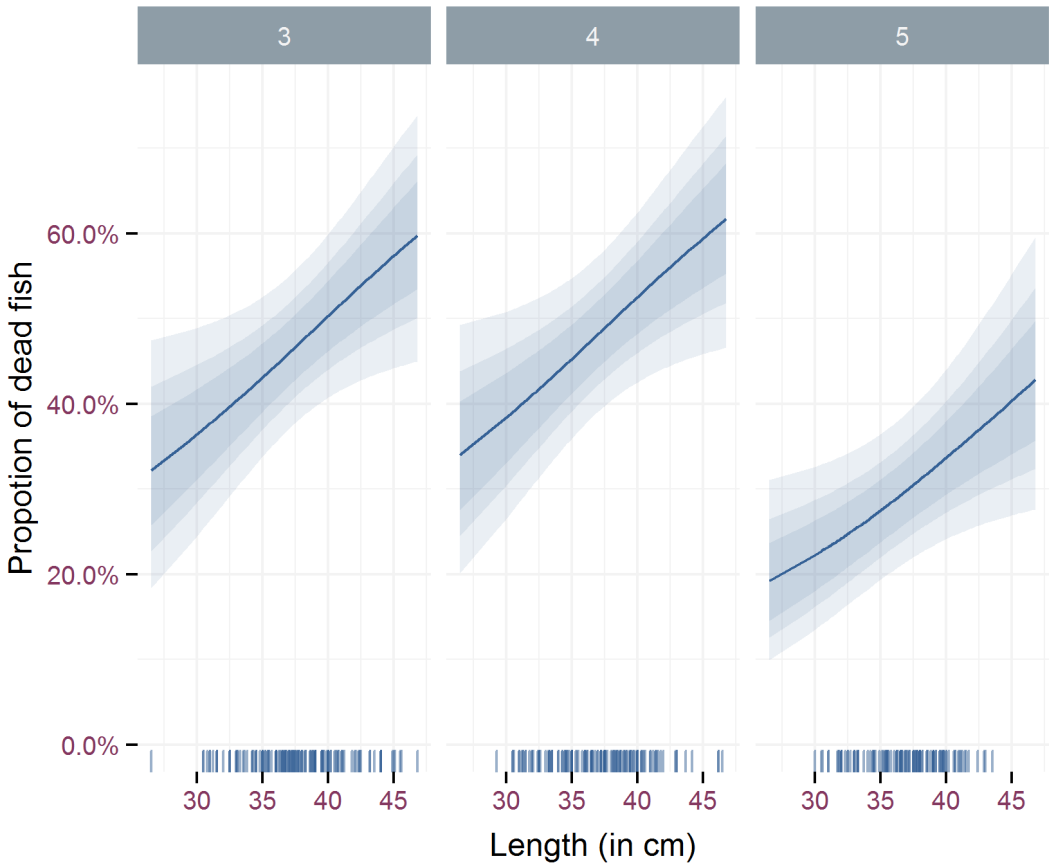
4.1.2.4 Statistiek sterftekans en verlieskans

Op basis van de geobserveerde proporties aan sterfte en zware schade, werden statistische modellen gefit die een idee geven van de kans dat een vis van de betreffende soort (A) sterft en (B) verloren gaat (waarbij verlies gelijk is aan de proportie sterfte + de proportie zwaar beschadigden). Zoals uitgelegd in de materiaal en methode (sectie 3.3.1) werden telkens eerst verschillende statistische modellen gefit waaruit 1 model (het beste) geselecteerd werd om de uiteindelijke sterfte of verlieskansen te voorspellen. Een modelselectie verliep telkens zo dat het model met de laagste WAIC waarde geselecteerd werd, tenzij de WAIC waardes van verschillende modellen minder dan 2 eenheden van elkaar verschilden. In dat geval werd uitsluitend gekozen voor een model waarin rekening gehouden wordt met het potentiële effect van de manipulatie van de vissen op het eindresultaat. Bovendien wordt in dat geval telkens gekozen voor het meest eenvoudige model (enkel debiet als verklarende variabele), of voor een model met ook lengte in, als dit een betere WAIC waarde kent dan het model met enkel debiet. Verder in deze sectie komen we niet meer terug op de modelselectie, maar geven we uitsluitend de resultaten van de geselecteerde modellen per vissoort. Voor alle modellen die geselecteerd werden en die bijgevolg hieronder besproken worden, kunnen de parameters die tot de modelkeuze geleid hebben teruggevonden worden in de bijlage.

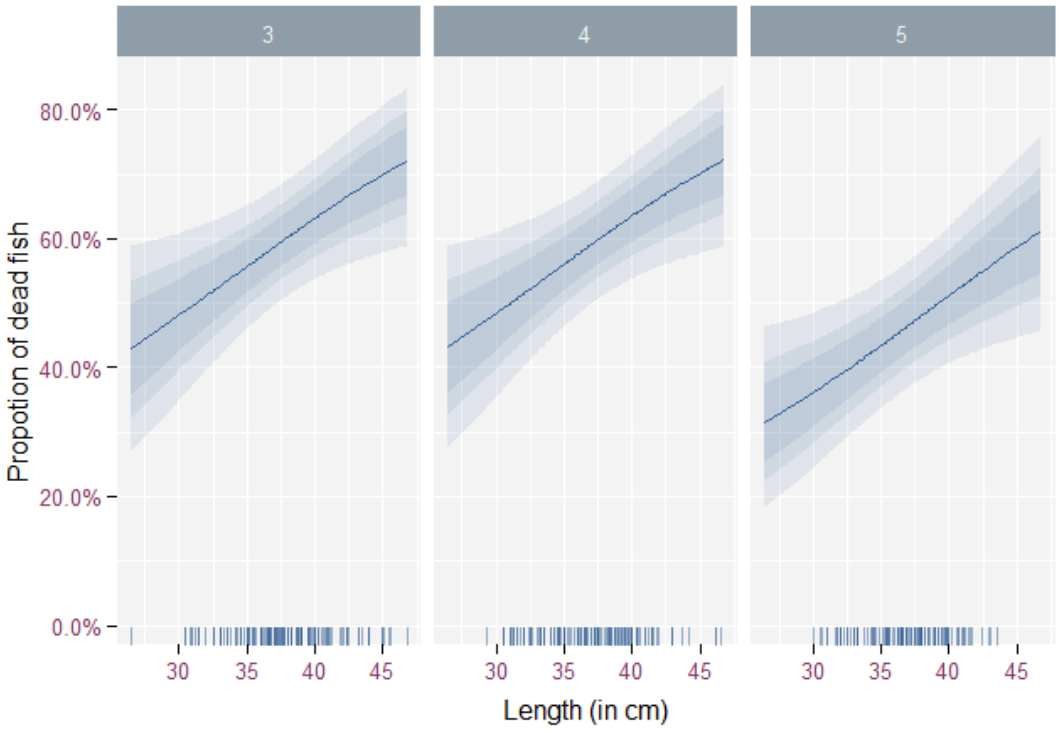
Het model voor **brasem** geeft weer dat een brasem een respectievelijk licht kleinere, en kleinere kans heeft op sterfte als hij geturbineerd wordt op 3 en 5 m³/s, en dit effect is significant. Daarnaast hebben grotere brasems meer kans op sterfte dan kleinere brasems, en ook dat effect is significant. Specifiek zal een brasem van rond de 34 cm, 42% kans hebben om te sterven wanneer hij op 3 m³/s geturbineerd wordt, terwijl dit 45% bij een debiet van 4 m³/s en slechts 27% bij een debiet van 5 m³/s. Op respectievelijk diezelfde debieten zal een brasem van rond de 40 cm, 51%, 53% en 34% kans hebben op sterfte

(Figuur 29). Dat is telkens ongeveer 10% meer kans op sterfte bij iedere 10 cm dat de vis groter is. En een brasem die dus op 5 m³/s (beste scenario) de turbines passeert zal ongeveer 18% meer kans hebben om de passage te overleven dan wanneer hij op 4 m³/s (slechtste scenario).

Het model dat ook rekening houdt met de geobserveerde zware schade verschilt enkel in de totale kans op verlies, die hoger ligt dan de kans op sterfte. De effecten van debiet en lengte van de brasems op deze verlieskans zijn gelijkaardig als bij de kans op sterfte en ook significant. Globaal genomen stijgt de kans op verlies met 10% t.o.v. de voorspelde kans op sterfte (Figuur 29 b).



(a)

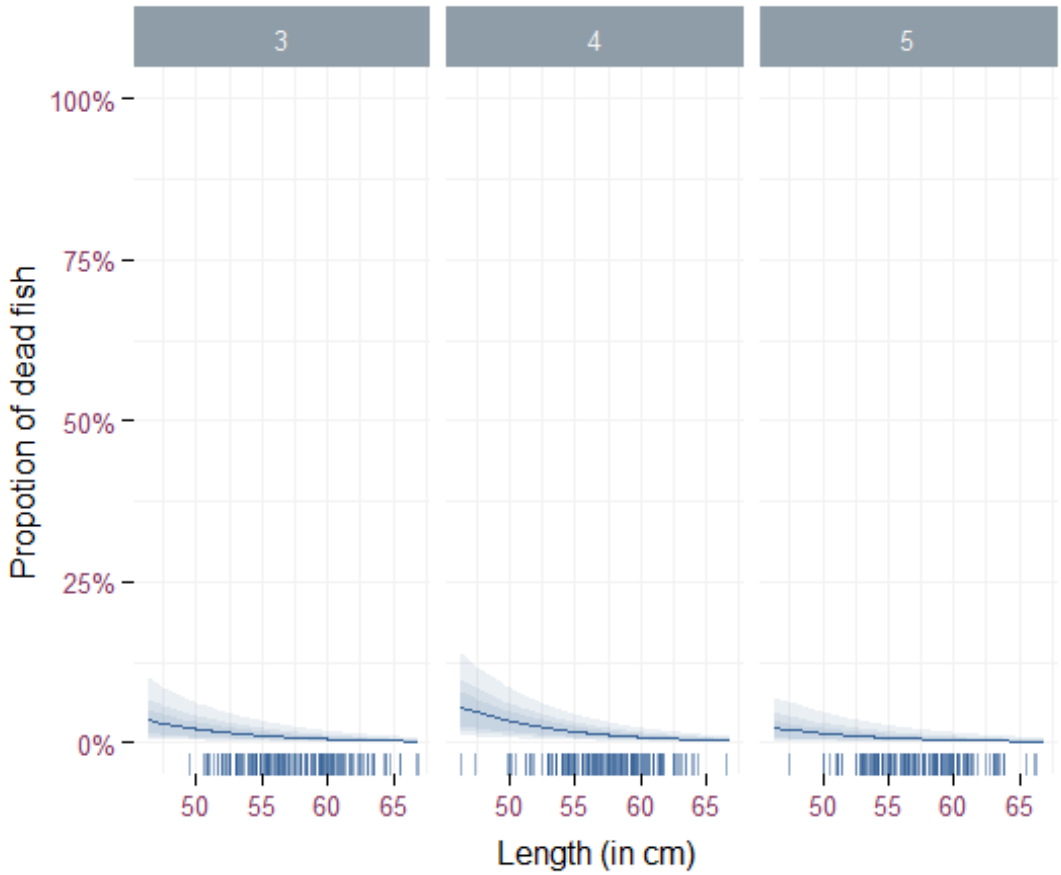


(b)

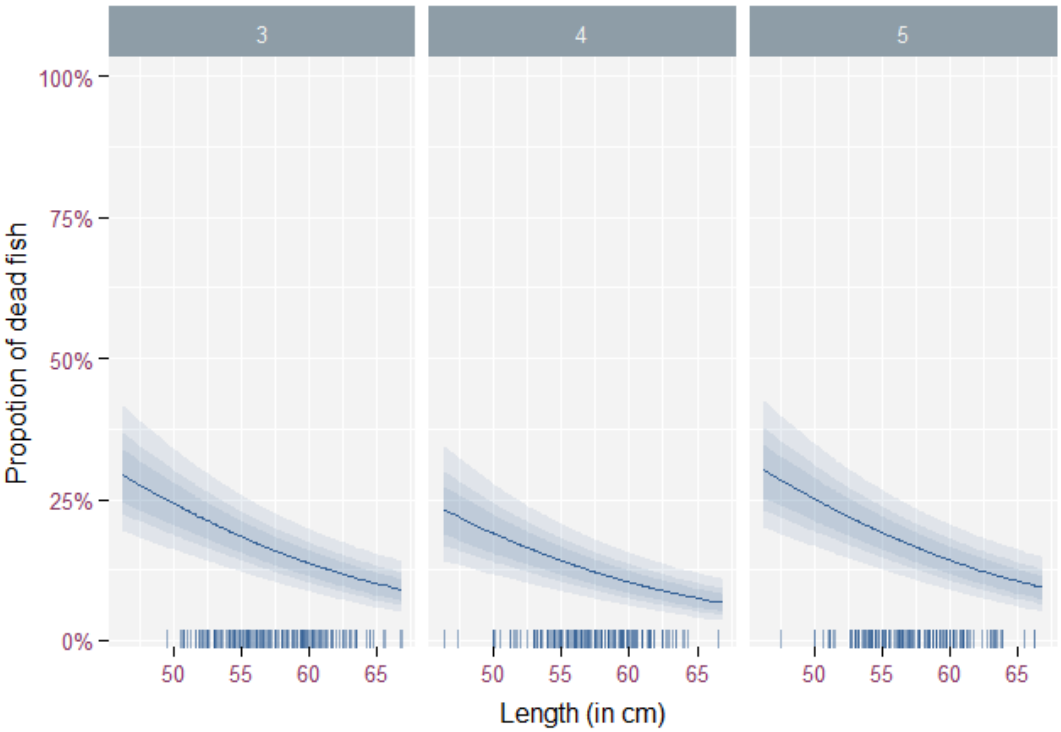
Figuur 29: (a) Voorspelde sterftekans en (b) voorspelde verlieskans voor brasem die geturbineerd wordt met de open vijzel op 3 (links), 4 (midden) of 5 m³/s (rechts) ten opzichte van de lengte (gemodelleerd in cm) van de brasems. (donker blauwe lijn: gemiddelde sterftekans, licht blauwe arcering: 60% betrouwbaarheidsinterval, midden blauwe arcering: 80% betrouwbaarheidsinterval, donker blauwe arcering: 95% betrouwbaarheidsinterval).

Het geselecteerde model voor **paling** geeft weer dat palingen een licht hogere kans hebben op sterfte als ze de turbines passeerden bij werking op 3 m³/s, dit effect is significant, maar is wel klein. Turbineren op 4 of 5 m³/s maakt geen verschil in sterftekans. Een grote paling zal daarnaast significant minder kans hebben op sterfte dan een kleinere paling (Figuur 30 en Figuur 75 in de bijlage). De sterftekansen voor paling die de vijzels bij turbinewerking passeren zijn volgens het model klein (Figuur 30). Specifiek zal een paling van rond de 50 cm respectievelijk: 2, 3 en 1% kans hebben op sterfte bij passage van de turbines op 3, 4 en 5 m³/s. Voor een paling die 5 cm groter is dalen deze kansen naar respectievelijk: 1, 2 en 1% kans. Tot slot zijn de sterftekansen voor een paling van rond de 60 cm respectievelijk: 1, 1en 0% kans voor passage van de turbines op 3, 4 en 5 m³/s.

Net zoals bij de brasems zien we dat wanneer zware schade meegerekend wordt, dit de kansen op verlies beduidend verhogen, bij paling zelfs met gemiddeld 25%. Maar de effecten van het debiet en de lengte van de vis blijven gelijk. Er is significant meer kans op verlies bij turbineren op 3 m³/s dan op de andere debieten en bovendien hebben grotere palingen minder kans om te sterven of zwaar beschadigd te geraken (Figuur 30 b).



(a)



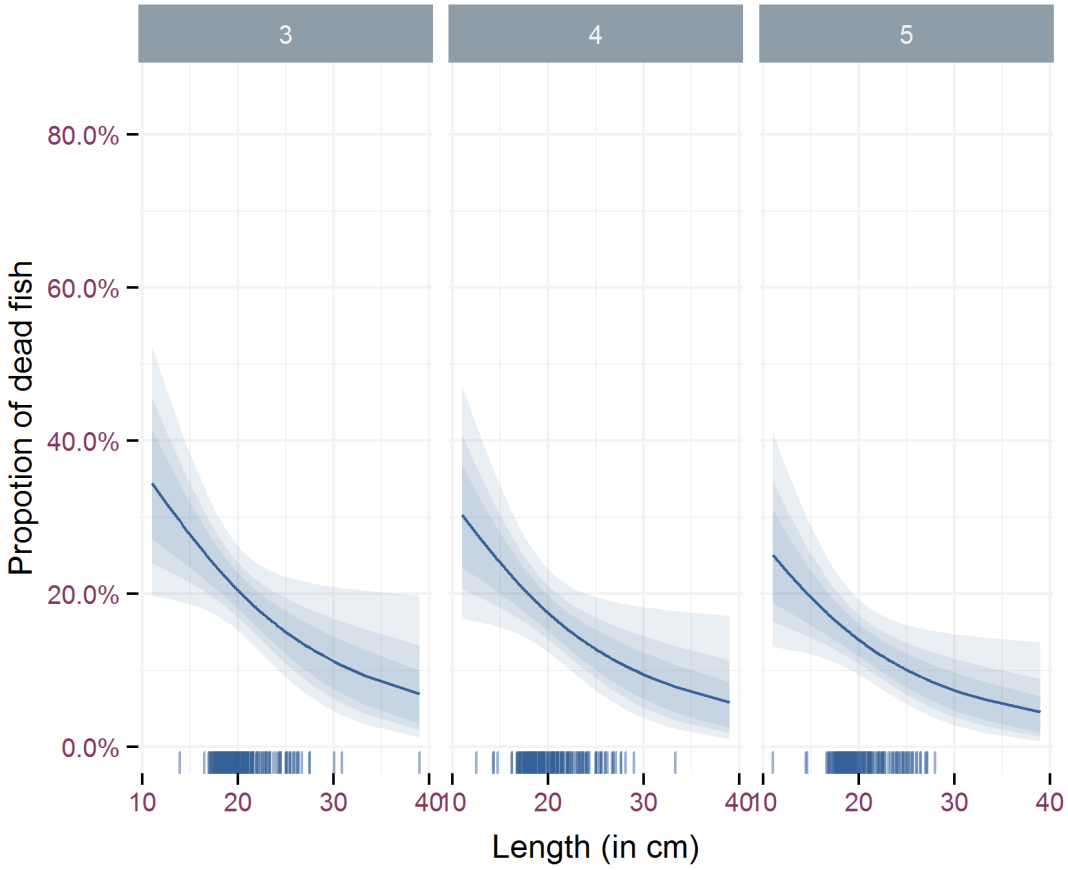
(b)

Figuur 30: (a) Voorspelde sterftekans en (b) voorspelde verlieskans voor paling die geturbineerd wordt met de open vijzel op 3 (links), 4 (midden) of 5 m³/s (rechts) ten opzichte van de lengte (gemodelleerd in cm) van de palingen. (donker blauwe lijn:

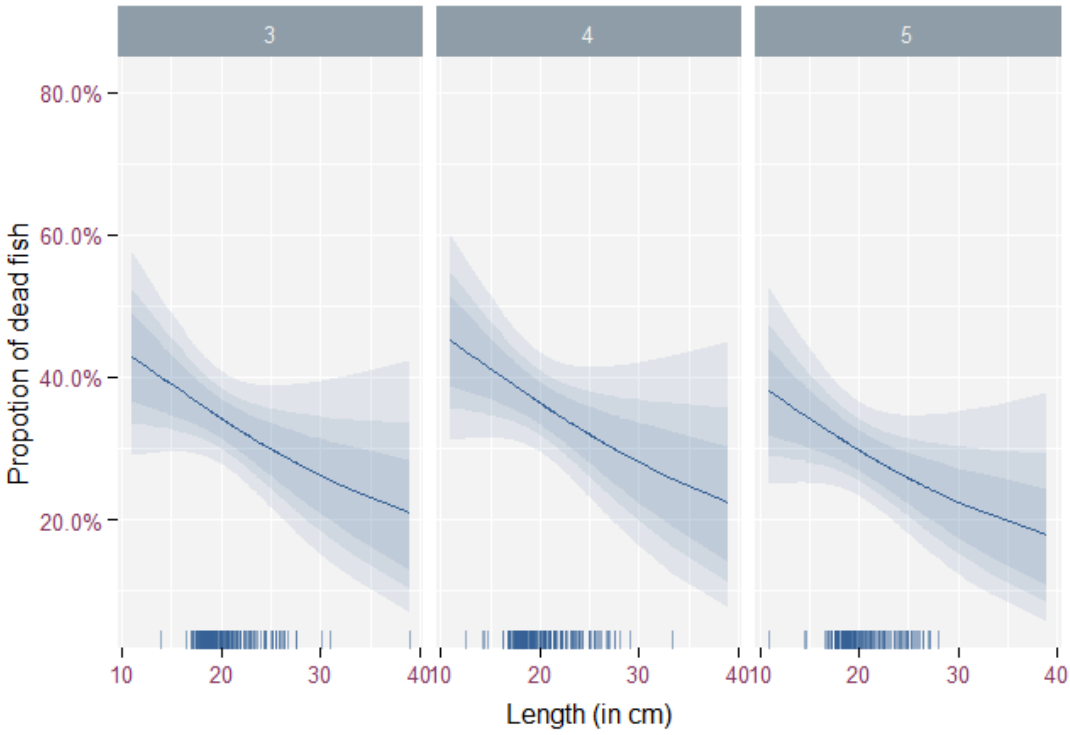
gemiddelde sterftekans, licht blauwe arcering: 60% betrouwbaarheidsinterval, midden blauwe arcering: 80% betrouwbaarheidsinterval, donker blauwe arcering: 95% betrouwbaarheidsinterval).

Het geselecteerde model voor **blankvoorn** toont ons geen significant effect van het debiet waarop geturbineerd wordt op de sterftekans voor een blankvoorn die de vijzel passeert. Wel is er een significant effect van de lengte van de vis op zijn kans om te sterven, waarbij een grotere blankvoorn meer kans heeft om een passage door de turbine te overleven. Het effect is echter redelijk klein (Figuur 31, en Figuur 79 in de bijlage). Specifiek heeft een blankvoorn van rond de 16 cm tussen ongeveer 18 en 25 % kans op sterfte wanneer hij de vijzels bij turbinewerking passeert, en het debiet speelt daarbij geen rol, ook al nemen we licht lagere kansen waar bij passage op 5 m³/s. Een blankvoorn van rond de 25 cm heeft tussen ongeveer 10 en 15% kans op sterfte.

Het model dat ook zware schade in rekening brengt en de verlieskansen voorspelt, voorspelt gemiddeld genomen 10% meer kans op verlies dan op sterfte (Figuur 31 b). Alleen is de verlieskans in tegenstelling tot de sterftekans niet significant afhankelijk van de lengte van de blankvoorn. Ook het debiet waarop geturbineerd wordt heeft geen significant effect op de kans om een blankvoorn te verliezen door turbinepassage.



(a)



(b)

Figuur 31: (a) Voorspelde sterftekans en (b) voorspelde verlieskans voor blankvoorn die geturbineerd wordt met de open vijzel op 3 (links), 4 (midden) of 5 m³/s (rechts) ten opzichte van de lengte (gemodelleerd in cm) van de blankvoorns. (donker blauwe lijn: gemiddelde sterftekans, licht blauwe arcering: 60% betrouwbaarheidsinterval, midden blauwe arcering: 80% betrouwbaarheidsinterval, donker blauwe arcering: 95% betrouwbaarheidsinterval).

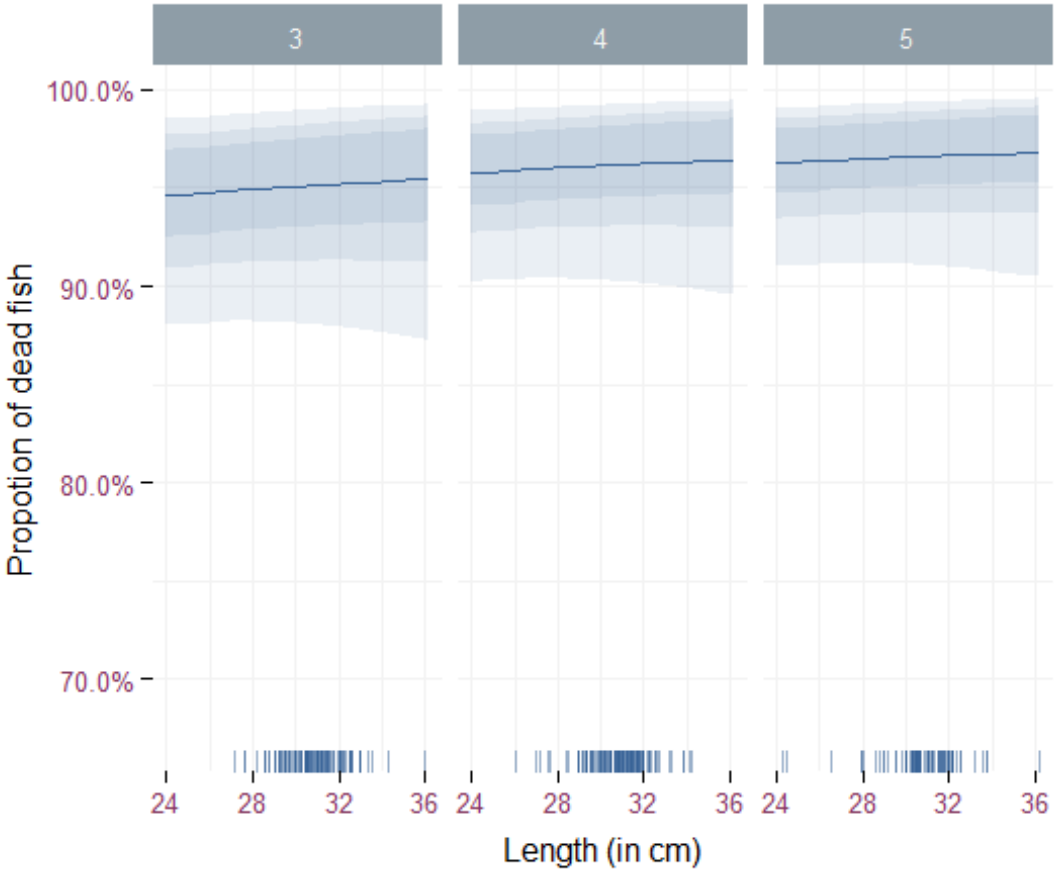
Bij het modelleren van de data voor **forel** werd duidelijk dat er een mogelijks effect was van het uitvoeren van de testen op de resultaten, en dat door de derde herhalende test op een debiet van 5 m³/s (Figuur 82 in bijlage; en dit is ook te zien aan de grote ranges voor deze test op Figuur 27). Het model dat dit effect aan het licht bracht was het model met de laagste WAIC waarde (Tabel 38 in de bijlage), en bevat de variabelen: debiet, vis lengte, vis gewicht en random effect voor herhalende test.

Er werd op basis van dit resultaat besloten om de verzamelde gegevens voor de betreffende herhalende test uit de analyse weg te laten. We vermoeden dat de manipulatie van de vissen voor deze herhalende test op 5m³/s te lang geduurd heeft, waardoor de sterftekans van deze forellen verhoogd werd enkel en alleen o.b.v. de manipulatie van de vissen en niet o.b.v. de test met gedwongen passage. De gegevens die in deze test verzameld werden, dienen dus uit de dataset verwijderd te worden alvorens een model te fitten. Het nieuwe gefitte model dat geselecteerd werd heeft de laagste WAIC waarde op het model zonder random effect na. Het model bevat de variabelen: debiet, vis lengte en vis gewicht en een random effect voor herhalende test (Tabel 39 in de bijlage). In dit model is er geen effect meer waar te nemen van het uitvoeren van de testen op de resultaten (Figuur 83 in de bijlage).

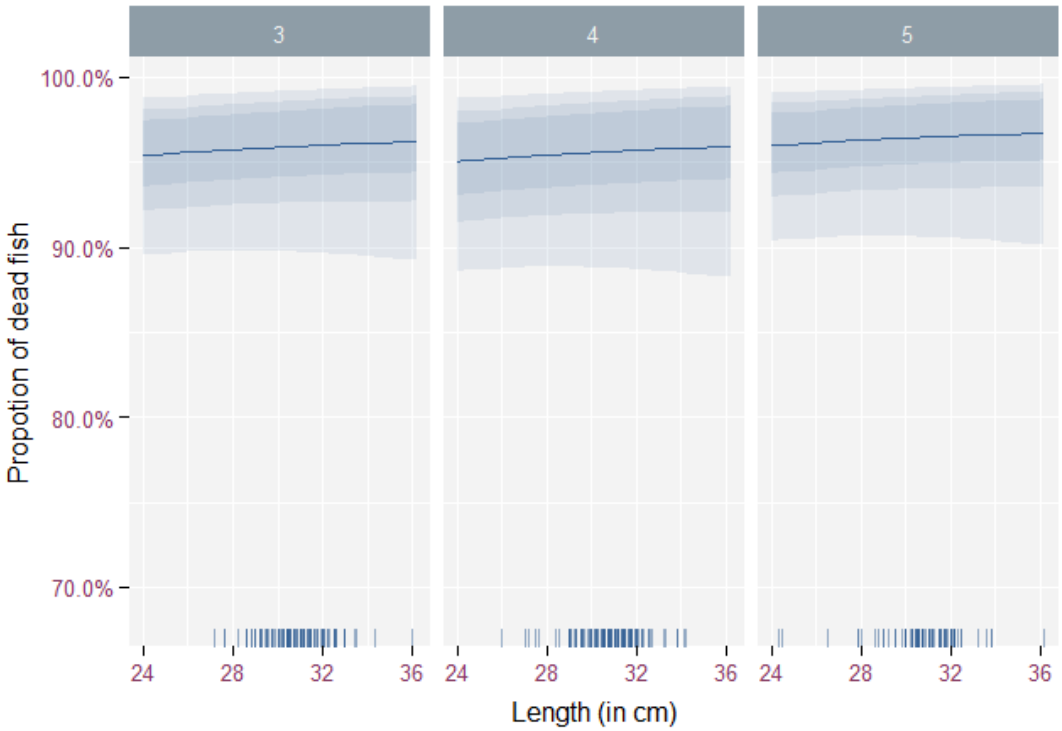
Het model leert ons dat er enkel een licht significant effect waar te nemen is van turbinewerking op 3 m³/s op de sterftekans van een forel die turbine passeert, en dat de kans op sterfte iets groter is dan bij passage op de andere debieten. Er is geen significant effect van de lengte van de forellen op hun kans om te sterven, maar wel een significant effect van gewicht (Figuur 32). Specifiek toont het model dat een forel van gemiddelde

lengte (30 cm) die de vijzel passeert bij turbinewerking, ongeacht het debiet en de lengte een 95% kans heeft om te sterven.

In tegenstelling tot de andere soorten is de voorspelde kans op verlies niet veel groter dan de voorspelde kans op sterfte van een forel die de turbines passeert. Er is wel nog steeds een lichte (maar significante) kans dat het verlies groter is wanneer de forel de turbine passeert op 3 m³/s dan op de andere debieten. Er is opnieuw geen invloed van de lengte van de forel op de kans dat hij sterft of zwaar beschadigd raakt.



(a)

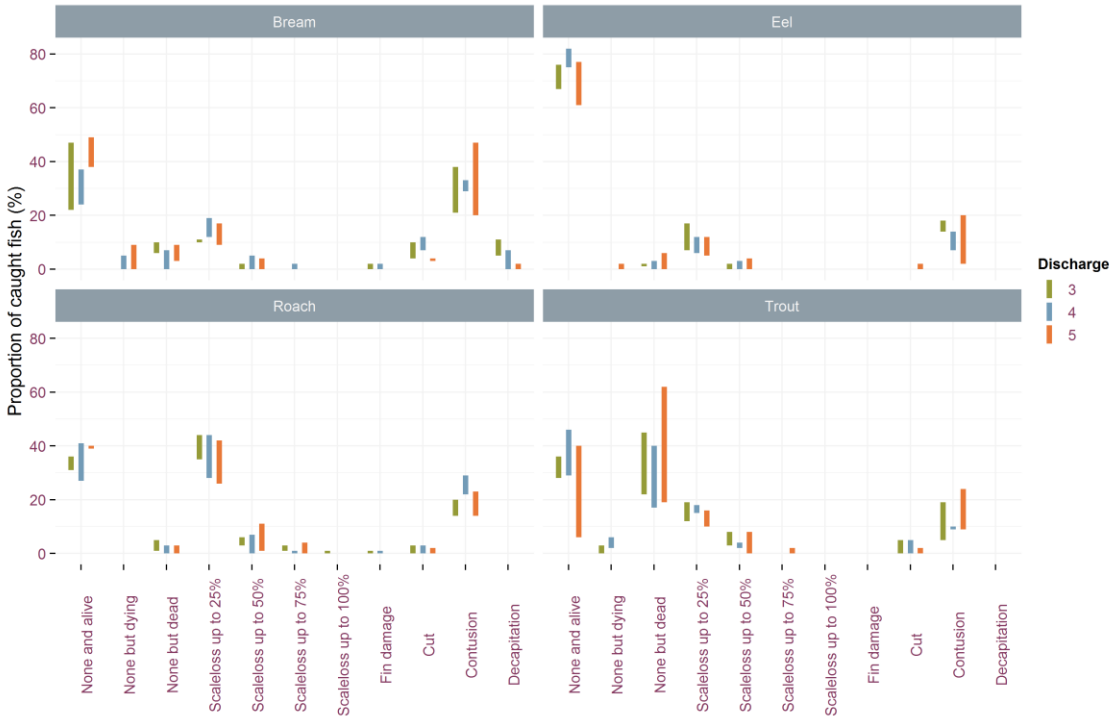


(b)

Figuur 32: (a) Voorspelde sterftekans en (b) voorspelde verlieskans voor forel die geturbineerd wordt met de open vijzel op 3 (links), 4 (midden) of 5 m³/s (rechts) ten opzichte van de lengte (gemodelleerd in cm) van de forellen op basis van een model met vis gewicht (WAIC = 486.56) (donker blauwe lijn: gemiddelde sterftekans, licht blauwe arcering: 60% betrouwbaarheidsinterval, midden blauwe arcering: 80% betrouwbaarheidsinterval, donker blauwe arcering: 95% betrouwbaarheidsinterval).

4.1.2.5 Observatie schadeklassen

De gewonde proefdieren vertoonden verschillende vormen van zware en/of lichte schade na doorvoer door de open vijzel. Figuur 33 geeft een beeld van de meest geobserveerde schadeklassen. De schadeklasse "niet zichtbaar beschadigd" werd nog extra onderverdeeld in drie subklassen: levend zonder schade, stervend zonder schade en dood zonder schade. Voor alle soorten geldt dat er vooral onbeschadigde vissen, of vissen met schubverlies tot 25% van de lichaamsoppervlakte waargenomen werden. De verdeling over levende, stervende en dode onbeschadigde vissen, verschilt wel tussen de soorten. Forel vertoonde het grootste aantal (en relatief groot aantal) onbeschadigde dode dieren, en paling net vooral onbeschadigde levende dieren. Ook bij blankvoorn en brasem werden vooral levende onbeschadigde vissen waargenomen. Voor alle soorten geldt ook dat er vooral kneuzingen waargenomen werden binnen de categorie van zware schade. Meer nog dan schubverlies tot 50% en dan snijwonden of schubverlies tot 75 en 100%. Onthoofdingen werden enkel bij Brasem sporadisch waargenomen (Figuur 88, bijlage).



Figuur 33: Het percentage aan niet-beschadigde dieren (dood, stervend of levend) en dieren met schubverlies (tot 25, 50, 75 en 100% van hun lichaamsoppervlak), vinschade, snijwond(en), kneuzing(en) en onthoofding van 3 herhalende testen per soort

Het relatieve voorkomen (%) van de verschillende schadeklassen wordt voorgesteld per soort (Figuur 88, Figuur 89, Figuur 90, Figuur 91 in bijlage). De klasse onbeschadigd wordt als 1 geheel weergegeven, zonder onderscheid van de toestand (levend, stervend of dood), maar het aantal dode dieren staat wel met een getal weergegeven boven de verticale balkjes.

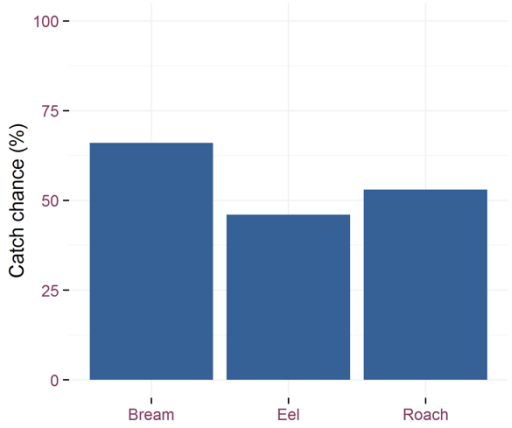
4.1.2.6 Sterftekans ongeacht het ongekende lot van niet-geobserveerde vissen

De terugvangstpercentages geven aan dat niet alle geteste individuen teruggevangen en geëvalueerd konden worden op toestand (levend of dood) en schadeklasse, en de bovenstaande grafieken en tabellen dus enkel betrekking hebben op de teruggevangen individuen. Toch willen we graag weten van de niet-teruggevangen dieren wat hun toestand was na doorvoer. Als zij niet teruggevangen werden omdat zij allemaal dood zijn, dan is de schade van de turbine in werkelijkheid veel groter dan bovenstaande grafieken en tabellen doen vermoeden. Om hier een beter beeld over te krijgen, werden proeven uitgevoerd waarbij dode dieren vrijgelaten werden onderaan de turbines. Deze dode dieren werden door de onderzoekers gedood (op ethisch verantwoorde wijze) en uitgezet en deze zijn de turbine dus nooit gepasseerd. Van dit gekend aantal dode dieren, werd het terugvangstpercentage bepaald.

Aan de hand van dit terugvangstpercentage, en aan de hand van gegevens over de wel teruggevangen, dode dieren, en het gekende terugvangstpercentage van alle geteste individuen, kan alsnog een sterftekans berekend worden voor eender welke blankvoorn, paling of brasem die in zijn leven de turbines zal passeren.

De formule voor het berekenen van deze sterftekans werd in detail besproken in het deel 'Methode' (sectie 3.3.1).

De kans dat een dode brasem, paling of blankvoorn gevangen wordt in de opvangconstructie bij een test op 5m³/s, is 66, 46 en 53 %, respectievelijk (Figuur 34). Dat geeft ook een idee van de kans dat een niet-teruggevangen, getest dier toch dood is, want dat is 100% min de onderstaande vangstkans van de betreffende soort. Door de vangstkans van dode vissen mee te nemen in de berekening van de sterftekans van een brasem, paling of blankvoorn die de turbine passeert, houdt men toch rekening met het lot van de niet-teruggevangen dieren (Tabel 12).



Figuur 34: Kans dat een dode brasem (Bream), paling (Eel) en blankvoorn (Roach) gevangen wordt in de opvangconstructie bij een test op 5 m³/s.

Op basis van de uitgevoerde gedwongen proeven kunnen we stellen dat een vis die de turbine passeert op 5 m³/s, 0-24 % kans heeft dat hij zal sterven. De sterftekans is echter wel afhankelijk van de soort en werd enkel getest voor brasem, blankvoorn en paling. Deze kans is groter voor brasem en blankvoorn dan voor paling. Specifiek wijzen de testen met gedwongen passage uit dat een brasem die de turbine passeert op 5 m³/s, 13-24 % kans heeft om te sterven, een blankvoorn 15-22 % kans en een paling 0-8 % kans.

Tabel 12: Sterftekans (P(D)) voor brasem, paling en blankvoorn die de turbine passeert. De rechter kolom geeft de uiteindelijke sterftekans. De formule en de waarden die daarin ingevuld moeten worden staan in kolommen 2 tot en met 5.

Soort	P(D|V) (%)	P(V) (%)	P(V|D) (%)	(P(D/V)*P(V))/P(D)	**P(D) (%)**
Brasem	26-35	34-46	66	Beste geval: (26*34)/66=13,4 Slechtste geval: (35*46)/66=24,4	Beste geval: **13** Slechtste geval: **24**
Paling	0-6	54-64	46	Beste geval: (0*54)/46=0 Slechtste geval: (6*64)/46=8,3	Beste geval: **0** Slechtste geval: **8**
Blankvoorn	12-16	65-74	53	Beste geval: (12*65)/53=15,7 Slechtste geval: (16*74)/53=22,3	Beste geval: **16** Slechtste geval: **22**

4.1.2.7 Samenvatting sterfte en verlies

Tabel 13: Overzicht van de waargenomen sterfte en het waargenomen verlies per vissoort en debiet voor gedwongen passage door de turbines.

Test	**Observaties directe sterfte**			**Observaties verlies***			**Statistische kans op directe sterfte**			**Statistische kans op verlies***		
Turbines	3m³/s	4m³/s	5m³/s	3m³/s	4m³/s	5m³/s	3m³/s	4m³/s	5m³/s	3m³/s	4m³/s	5m³/s
Brasem	46%	48%	30% (13-24%)**	**58%**	**59%**	**47%**	42% (34cm) 51% (40cm	45% (34cm) 53% (40cm)	27% (34cm) 34% (40cm)	55% (34cm) 64% (40cm)	55% (34cm) 64% (40cm)	43% (34cm) 52% (40cm)
Paling	2%	3%	4% (0-8%)**	**17%**	**14%**	**20%**	2% (50cm) 1% (60cm)	3% (50cm) 1% (60cm)	1% (50cm) 0% (60cm)	24% (50cm) 14% (60cm)	18% (50cm) 11% (60cm)	24% (50cm) 15% (60cm)
Blank-voorn	20%	18%	14% (16-22%)**	**34%**	**37%**	**30%**	18-25% (16cm) 10-15% (25cm)	18-25% (16cm) 10-15% (25cm)	18-25% (16cm) 10-15% (25cm)	30-36% (20cm)	30-36% (20cm)	30-36% (20cm)
Forel	51%	48%	60%	**59%**	**51%**	**65%**	95% (30cm)	95% (30cm)	95% (30cm)	96% (30cm)	96% (30cm)	96% (30cm)

**) sterftekans die rekening houdt met het lot van de niet-geobserveerde dieren.

4.2 Experimenten natuurlijke passage

4.2.1 Pompen

4.2.1.1 Open vijzels

Er werden 10 proeven uitgevoerd op natuurlijk passerende vissen, waarbij er telkens met 1 open vijzel gepompt werd met een debiet van 5m³/s (in totaal 4,3 mlj. m³ verpompt water). In totaal werden 296 vissen opgepompt. Gemiddeld werd er 8% directe sterfte vastgesteld. Slechts 5% van de gevangen levende vissen vertoonden zware verwondingen, waarvan wordt aangenomen dat deze tot sterfte zullen leiden (Tabel 14 en Tabel 15).

Tabel 14: Aantal gevangen vissen, schadegroepen (grijs, %) en schadeklassen (wit, absolute getallen) van de 10 natuurlijke passageproeven voor de open vijzels.

		Datum	30/03/2015	14/04/2015	16/04/2015	6/05/2015	8/05/2015	29/05/2015	10/06/2015	17/06/2015	9/10/2017	11/10/2017
Debiet 5 m³/s												
		Aantal vissen gevangen	**5**	**16**	**21**	**6**	**10**	**17**	**20**	**197**	**0**	**4**
%		dood	20	12	5	67	20	29	30	0	0	0
		zware schade	20	0	0	10	10	6	0	0	0	0
		lichte schade	0	12	5	0	0	0	35	0	0	0
		onbeschadigd	60	76	90	23	70	65	35	100	0	100
Aantal vissen		Snijwonde	1	1	0	0	0	4	0	0	0	0
		Vinschade	0	1	0	1	0	1	2	0	0	0
		Zwelling	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Kneuzing	2	0	0	1	1	2	0	0	0	0
		Bloeding	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Schubverlies (%)	0-25	0	2	1	1	0	3	5	0	0	0
		25-50	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0
		50-75	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
		75-100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabel 15: Gewogen gemiddelde voor de 4 schadegroepen voor de natuurlijke passage pompproeven met de open vijzel (5m³).

Gewogen gemiddelde (%)	dood		**8%**
	levend	zware schade	**5%**
		lichte schade	**4%**
		onbeschadigd	**83%**

4.2.1.2 Gesloten vijzel

Tijdens de 10 proeven op natuurlijk passerende vissen met de gesloten buisvijzel (130.000 m³ verpompt water) werden amper 17 vissen gevangen. Tijdens 3 proeven werd er niets gevangen en het maximaal aantal vissen op 1 proef bedroeg 4. Eén vis overleefde de passage niet waardoor de directe sterfte op 6% uitkomt (Tabel 16 en Tabel 16).

Tabel 16: Aantal gevangen vissen, schadegroepen (grijs, %) en schadeklassen (wit, absolute getallen) van de 10 natuurlijke passageproeven voor de gesloten vijzel.

			Datum	27/05/2015	19/06/2015	30/08/2017	4/09/2017	6/09/2017	11/09/2017	13/09/2017	18/09/2017	20/09/2017	25/09/2017
Debiet 1,5 m³/s													
Aantal vissen gevangen				**0**	**0**	**3**	**4**	**2**	**2**	**4**	**1**	**0**	**1**
%			dood	0	0	33	0	0	0	0	0	0	0
			zware schade	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			lichte schade	0	0	0	0	50	0	0	0	0	0
			onbeschadigd	0	0	67	100	50	100	100	100	0	100
Aantal vissen			Snijwonde	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			Vinschade	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			Zwelling	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			Kneuzing	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			Bloeding	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Schubverlies %		0-25	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
			25-50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			50-75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			75-100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabel 17: Gewogen gemiddelde voor de 4 schadegroepen voor de natuurlijke passage pompproeven met de gesloten vijzel (1,5m³).

Gewogen gemiddelde (%)	dood		**6%**
	levend	zware schade	**0%**
		lichte schade	**6%**
		onbeschadigd	**88%**

De gesloten pompvijzel heeft een vergelijkbaar direct sterftepercentage dan de open vijzels, maar verpompt ruim 5 keer minder vissen per volume-eenheid water. Per miljoen m³ opgepompt water worden er 13 vissen opgepompt door de buisvijzel, terwijl dat voor de open vijzel 69 bedraagt.

4.2.1.3 Illustraties waargenomen schade

Figuur 35 toont beschadigde blankvoorns na passage door de open vijzel in pompmodus; schubverlies (1), bloedingen (2) en snijwonde aan kieuwdeksel (4). Foto nummer 3 toont een brasem met schubverlies, kneuzing en een snijwonde net achter het kieuwdeksel.

Figuur 35: Enkele voorbeelden van pompschade door de open vijzel.

4.2.2 Turbines

Tijdens 4 proeven werden 144 vissen over 11 verschillende vissoorten gevangen. De overige 6 proeven na afdichting van de pompkelder konden wegens het erg droge weer in 2018 (lage Maasafvoer) niet uitgevoerd worden. Blankvoorn was veruit de meest gevangen vissoort, en samen met paling en baars vertegenwoordigen ze 86% van de vangstaantallen. Van de restfractie werden maar één of twee individuen gevangen.

De gemiddelde directe sterfte bedraagt 8%. Gemiddeld zijn meer dan de helft van de vissen zichtbaar onbeschadigd. Zoals bij de gedwongen proeven domineert ook bij natuurlijke passage de schadeklasse kneuzing bij de zware schadevormen en schubverlies kleiner dan 25% lichaamsoppervlakte bij de lichte schadevormen. Het totaal verlies (som dood en zware schade) bedraagt 25%.

Tabel 18: Aantal gevangen vissen, schadegroepen (grijs, %) en schadeklassen (wit, absolute getallen) van de 4 natuurlijke passageproeven voor de open vijzels.

		Datum	11/04/2018	26/04/2018	2/05/2018	16/05/2018
Debiet 15 m³/s						
		Aantal vissen gevangen	**55**	**16**	**19**	**54**
%		dood	5	13	26	4
		zware schade	20	6	32	13
		lichte schade	18	38	5	15
		onbeschadigd	56	44	37	69
Aantal vissen		Snijwonde	0	0	3	2
		Vinschade	2	0	1	1
		Zwelling	0	0	0	0
		Kneuzing	6	3	7	6
		Bloeding	0	0	0	0
	Schubverlies %	0-25	4	7	3	10
		25-50	4	0	2	4
		50-75	2	0	0	2
		75-100	0	0	0	0

Tabel 19: Gewogen gemiddelde voor de 4 schadegroepen voor de natuurlijke turbineproeven met 3 open vijzels (15m³).

Gewogen gemiddelde (%)		**dood**	**8%**
	levend	**zware schade**	**17%**
		lichte schade	**17%**
		onbeschadigd	**57%**

4.2.2.1 Illustraties waargenomen schade

Figuur 36: Voorbeelden van zware schade bij verschillende vissoorten na doorgang door een open vijzel in turbinemodus; schubverlies, vinschade en snijwonde open kieuwdeksel bij karper (1), schubverlies en kneuzing bij blankvoorn (2), schubverlies en snijwonde bij brasem (3), schubverlies, snijwonde en vinschade bij blankvoorn (4), kneuzingen bij paling (5) en decapitatie bij snoekbaars.

4.3 Berekenen toekomstscenario's

4.3.1 Pompen

Het aantal vissen dat gebruik maakt van de vijzels in pompmodus is beperkt (Tabel 14, Tabel 16). Specifiek observeerde we dat bij de experimenten 'natuurlijke' passage op de open en gesloten vijzels er respectievelijk, één vis per 14 527 m³ water passeerde, en één vis per 7 647 m³ water. Daarnaast is de directe sterfte van de open vijzels in pompmodus op natuurlijke passage niet erg hoog (8%, Tabel 15). Naast deze directe sterfte werd er bij de open vijzels ook 5% zware schade gemeten, waardoor het totale verlies 13% bedraagt, rekening houdend met de uitgestelde sterfte van deze verwondingen. De gedwongen passage voor brasem, paling en blankvoorn resulteerden in een gemiddeld verlies van 19% (gemiddeld over de drie soorten en de drie debieten met de open vijzels). We rekenen voor de toekomstscenario's dus met een verlies in de range van 13 tot 19%.

Doordat er slechts beperkt gebruik gemaakt wordt van de vijzels in pompmodus, is de impact op het visbestand van het Albertkanaal eerder beperkt. Het meest extreme scenario voor 2050 met een droog klimaat waar veel zou moeten gepompt worden, resulteert in een totale sterfte tussen 11 en 18% voor het hele kanaal als alle 6 de installaties tegelijk in werking zijn. Andere scenario's zorgen voor kleinere verliezen (Tabel 20).

Tabel 20: Geëxtrapoleerde sterfte range door jaarlijks pompen met de open vijzelinstallaties (rij 7). De pomptijd en het pompvolume zijn de gemeten (gemiddelde voor de periode 2015-2017) en verwachte aantallen (2020, 2050 nat jaar, 2050 droog jaar) voor de betreffende periodes. Het aantal vissen verpompt is het aantal vissen die voor het betreffende pompvolume verwacht worden te passeren, berekend o.b.v. het waargenomen aantal ongedwongen gepasseerde vissen per volume water tijdens de experimenten en gecorrigeerd voor het aandeel niet-teruggevangen vissen. De finale range aan mortaliteit, is het aandeel van de biomassa aan vis voor heel het Albertkanaal zoals geobserveerd in de studie van ANB (zie sectie 2.2).

	2015-2017		2020		2050 nat		2050 droog	
Pomptijd (%)	2		13		13		23	
Pompvolume (mjl.m³)	11		62		61		109	
Aantal vissen verpompt	1005		5778		5722		10124	
Aantal vissen verloren (range 13-19%)	131	221	751	1271	744	1259	1316	2227
Jaarlijkse sterfte per installatie (kg)	29	50	169	286	167	283	296	501
Jaarlijkse sterfte 6 installaties (kg)	147	249	845	1430	837	1416	1481	2506
range % mortaliteit biomassa op heel AK	**1,0%**	**1,8%**	**6,0%**	**10,2%**	**6,0%**	**10,1%**	**10,6%**	**17,9%**

Om het effect van de gesloten buisvijzel theoretisch te vergelijken (gerekend met evenveel debiet als de open vijzels, wat in de praktijk niet mogelijk is), gebruiken we het procentueel verlies uit de natuurlijke en de gedwongen passage, respectievelijk 6 en 10%. In geen enkel toekomstscenario zorgt pompen met gesloten buisvijzels voor meer dan 1,9% sterfte, waarbij in het meest extreme scenario 260 kg vissen sterven op heel het Albertkanaal door pompactiviteit van 6 sites (theoretisch voorzien van buisvijzels met een gezamenlijke capaciteit van 15m³).

Tabel 21: Geëxtrapoleerde sterfte range door jaarlijks pompen met de gesloten vijzelinstallatie (rij 7). De pomptijd en het pompvolume zijn de verwachte aantallen voor de betreffende periodes. Het aantal vissen verpompt is het aantal vissen die voor het betreffende pompvolume verwacht worden te passeren, berekend o.b.v. het waargenomen aantal ongedwongen gepasseerde vissen per volume water tijdens de experimenten en gecorrigeerd voor het aandeel niet-teruggevangen vissen. De finale range aan mortaliteit, is

het aandeel van de biomassa aan vis voor heel het Albertkanaal zoals geobserveerd in de studie van ANB (zie sectie 2.2).

	2020		2050 nat		2050 droog	
pomptijd (%)	13		13		23	
pompvolume (mjl.m³)	62		61		109	
aantal vissen verpompt	1321		1308		2315	
range aantal mortaliteit (6-10%)	79	132	79	131	139	231
Jaarlijkse sterfte per installatie (kg)	18	30	18	29	31	52
Jaarlijkse sterfte 6 installaties (kg)	89	149	88	147	156	260
range % mortaliteit biomassa op heel AK	**0,6%**	**1,1%**	**0,6%**	**1,0%**	**1,1%**	**1,9%**

4.3.2 Turbines

Van de teruggevangen vissen die op natuurlijke wijze door de turbine passeerden, observeerden we dat 25% de passage niet overleefde. Hiervan was 8% direct dood, terwijl 17% zwaar verwond werd. Tijdens de proeven passeerden vooral blankvoorn en paling de turbinevijzels. De gemiddelde sterftecijfers die voor deze soorten geobserveerd werden tijdens de experimenten met gedwongen passage, zijn respectievelijk 34 en 17%. Het waargenomen verlies bij de experimenten met ongedwongen ('natuurlijke') passage is dus van dezelfde grootteorde.

Het gemiddeld waargenomen verlies voor de paling (17%) was het laagst van alle onderzochte soorten. Het cumulatief effect over 6 installaties zou echter voor een verlies van meer dan 60% zorgen, indien alle schieralen via de turbines zouden migreren.

De impact van berekende toekomstscenario's op het gehele visbestand van het Albertkanaal is veel groter voor de turbines dan voor de pompen. Er werden minder vissen per volume water geturbineerd (één vis per 36 000 m³ water), maar de kans op verlies door sterfte of zware schade is wel groter dan bij pompen. Voor de simulatie van de verliezen bij de verschillende toekomstscenario's is er met een verliesrange van 25 tot 35% gerekend. Dit is het gemiddelde verlies, bekomen uit respectievelijk de experimenten op natuurlijke passage en gedwongen passage. De gemeten impact op de visfauna in heel het Albertkanaal tijdens de periode 2015-2017 ligt rond de 8-10% biomassaverlies. Afhankelijk van welk scenario de toekomst het best zal benaderen, wordt het totale verlies geraamd op 28-34%, als alle zes de installaties gelijktijdig in werking zijn (Tabel 22). In het meest extreme scenario zou er volgens deze berekeningen dan ruim 5 ton vis sterven door de waterkrachtcentrales.

Tabel 22: Geëxtrapoleerde sterfte range door jaarlijks turbineren (rij 7). De turbinetijd en het te turbineren volume water zijn de gemeten (2015-2017) en verwachte (2020, 2050 nat en 2050 droog) aantallen voor de betreffende periodes. Het aantal vissen geturbineerd is het aantal vissen die voor het betreffende geturbineerde volume verwacht worden te passeren, berekend o.b.v. het waargenomen aantal ongedwongen gepasseerde vissen per volume water tijdens de experimenten en gecorrigeerd voor het aandeel niet-teruggevangen vissen. De finale range aan mortaliteit, is het aandeel van de biomassa aan vis voor heel het Albertkanaal zoals geobserveerd in de studie van ANB (zie sectie 2.2).

	2015-2017		2020		2050 nat		2050 droog	
turbinetijd (%)	20		45		65		55	
turbinevolume (mjl.m³)	93		213		307		260	
aantal vissen geturbineerd	3725		8532		12297		10414	
range aantal mortaliteit (25-35%)	931	1267	2133	2901	3074	4181	2604	3451
Jaarlijkse sterfte per installatie (kg)	210	285	480	653	692	941	586	797
Jaarlijkse sterfte 6 installaties (kg)	1048	1425	2400	3263	3459	4704	2929	3984
range % mortaliteit biomassa op heel AK	**7,5%**	**10,2%**	**17,1%**	**23,3%**	**24,6%**	**33,5%**	**20,9%**	**28,4%**

4.4 Migratiestudie paling en zalm

4.4.1 Schieraal

4.4.1.1 Zeewaartse migratie doorheen het Albertkanaal

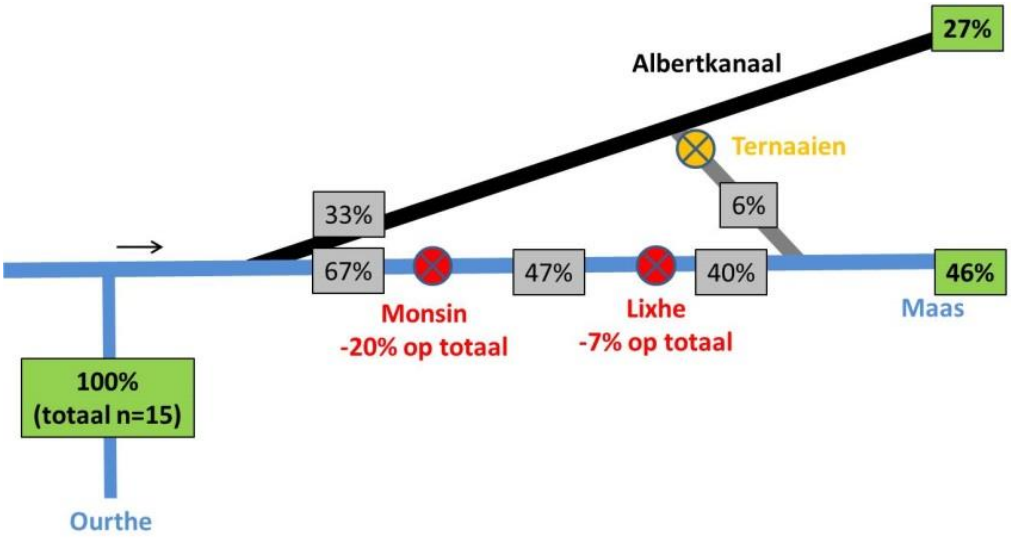
Om de migratie doorheen het Albertkanaal te bestuderen werden in totaal 70 schieralen gezenderd. Tabel 23 geeft een overzicht van de vangst- en uitzetlocaties (zie ook Figuur 13, Figuur 37 & Figuur 38).

Tabel 23: Aantallen, vangst- en uitzetlocaties van de schieralen die gezenderd zijn om de migratie doorheen het Albertkanaal te bestuderen.

Vangstlocatie	Uitzetlocatie	Aantal
Lorcé (Amblève)	monding Ourthe (Luik)	5
Vangconstructie Ham	monding Ourthe (Luik)	10
Sluiscomplex Genk	Sluiscomplex Genk	37
Sluiscomplex Diepenbeek	Sluiscomplex Diepenbeek	5
Sluiscomplex Hasselt	Sluiscomplex Hasselt	13
	Totaal	**70**

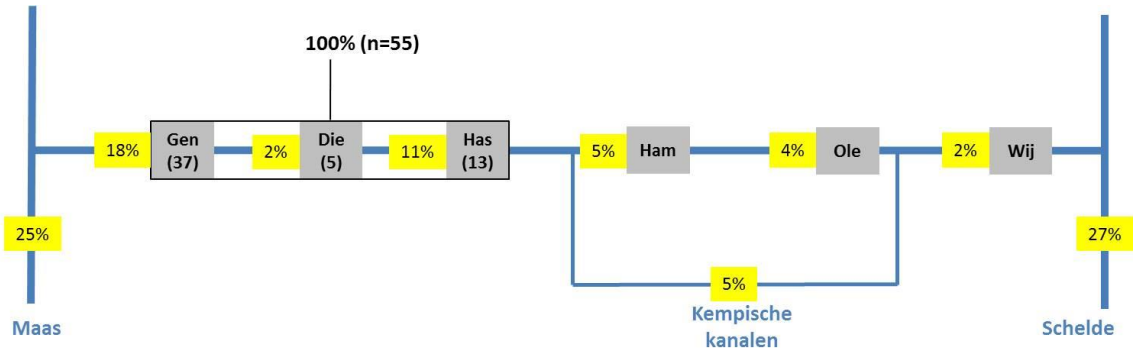
De 15 schieralen die vrijgelaten werden ter hoogte van de monding van de Ourthe werden allemaal gedetecteerd stroomafwaarts Luik. Bij de afsplitsing van het Albertkanaal koos één derde van de dieren voor de richting van het Albertkanaal. Van deze 5 schieralen passeerden er 4 het sluiscomplex van Genk richting Antwerpen, terwijl er 1 schieraal terugkeerde in Genk en via het sluiscomplex van Ternaaien de Maas stroomafwaarts Lixhe bereikte. Van de 10 schieralen die de Maasroute kozen, passeerden er 6 succesvol de waterkrachtcentrales van Monsin en Lixhe waarna ze vrij snel gedetecteerd werden ter hoogte van Borgharen en Afferden in Nederland (Figuur 13). Drie andere zijn vrijwel zeker direct gedood na doorgang door de Kaplan turbines van Monsin (2) en Lixhe (1). De laatste schieraal die deze route koos, werd nog 17 dagen na passage in Monsin gedetecteerd op twee detectiestations in het pand tussen Monsin en Lixhe. Vermoedelijk is ook deze schieraal bezweken aan verwondingen door de turbine. Er werd geen verband gevonden tussen de verdeling van het

debiet over het Albertkanaal en de Maas, en de keuze van de schieralen voor een bepaalde route. Figuur 37 geeft een schematisch overzicht van de verdeling van de 15 schieralen over de Maas en het Albertkanaal.



Figuur 37: Schematisch overzicht van de verdeling van 15 schieralen, uitgezet in de monding van de Ourthe (boven) en afsplitsing van het Albertkanaal ter hoogte van Monsin.

Daarnaast werden er 55 schieralen ingezet om de migratie doorheen het Albertkanaal zelf in kaart te brengen. Het merendeel hiervan (n=37) werd gevangen en weer vrijgelaten stroomopwaarts Genk, terwijl de andere gevangen en vrijgelaten werden stroomopwaarts van de complexen van Diepenbeek (n=5) en Hasselt (n=13). Van de groep van Genk migreerden 13 schieralen terug richting de Maas, waarvan 4 via het sluiscomplex van Ternaaien en 9 via de waterkrachtcentrale (of de stuw) van Monsin. Eén derde (n=3) overleefde de passage via Monsin echter niet. De overige 24 schieralen van Genk migreerden dus door het Albertkanaal richting Antwerpen, samen met 17 schieralen van Diepenbeek en Hasselt. Eén schieraal (uitgezet in Hasselt) slaagde er in om op drie dagen tijd de complexen van Diepenbeek en Genk in stroomopwaartse richting te passeren door de sluizen. Vervolgens zwom dit dier verder richting de Maas en passeerde drie dagen later de site van Monsin. De schieraal overleefde deze passage echter niet. Van de 41 schieralen die de Albertkanaalroute kozen, bereikte 34% de Antwerpse dokken of de Westerschelde (27% als de dieren die voor de Maasroute kozen vanuit Genk ook in rekening gebracht worden, zie Figuur 38). 17% van de groep passeerde meer dan twee sluiscomplexen maar geraakte niet voorbij Wijnegem en 10% passeerde slechts 1 of 2 sluiscomplexen. De resterende 39% passeerde geen enkel complex. Een overzicht van de verdeling van schieralen doorheen het Albertkanaal wordt getoond op Figuur 38.



Figuur 38: Verdeling van 55 schieralen die uitgezet werden in het Albertkanaal stroomopwaarts de sluiscomplexen van Genk (n=37, enkel schieralen die stroomafwaarts migreerden door het Albertkanaal), Diepenbeek (n=5) en Hasselt (n=13).

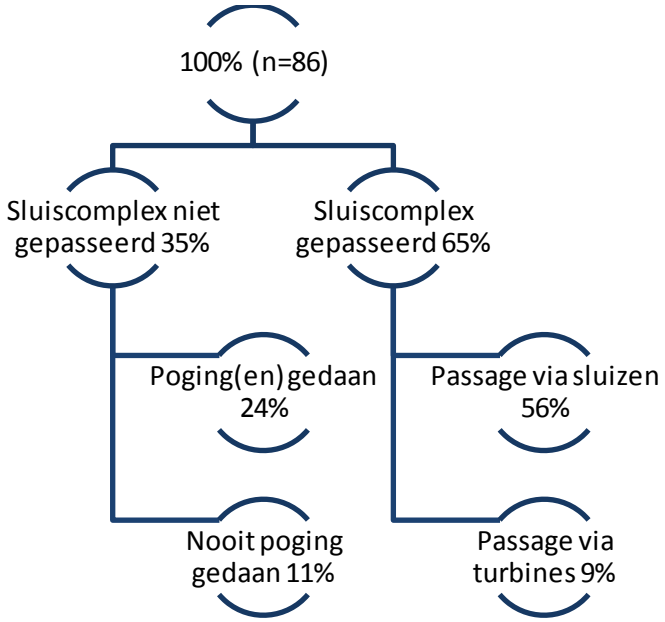
4.4.1.2 Routekeuze ter hoogte van sluiscomplex Ham

Voor deze onderzoeksvraag werden 86 schieralen gevangen in Genk en uitgezet halverwege tussen Hasselt en Ham. Tabel 24 geeft een overzicht van de verschillende zendertypes die hiervoor gebruikt werden.

Tabel 24: Aantallen, vangst- en uitzetlocatie en gebruikte zendertypes van 86 schieralen die ingezet werden voor detectie in het VPS netwerk in Ham.

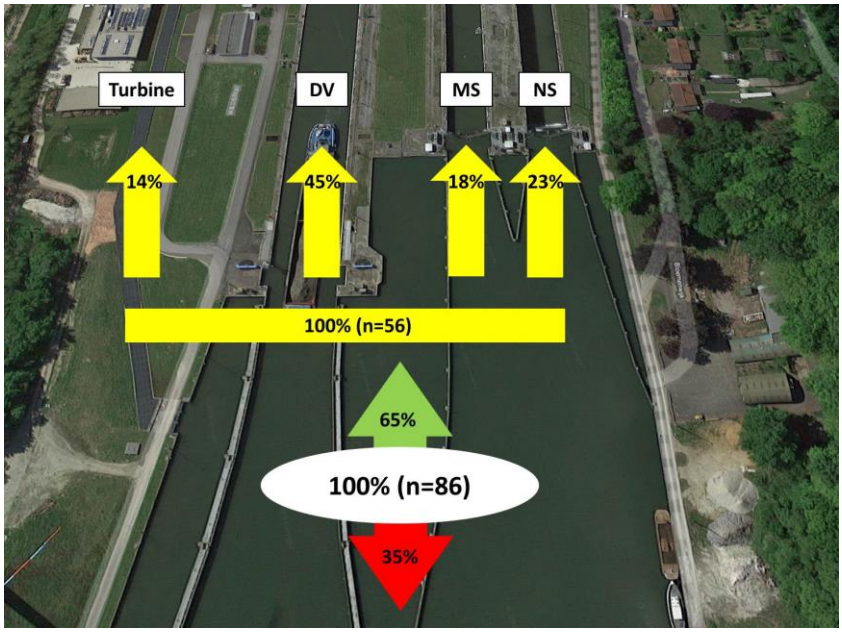
Vangstlocatie	Uitzetlocatie	Zendertype	Aantal
Sluiscomplex Genk	Genenbos	V13 korte delay druksensor	10
Sluiscomplex Genk	Genenbos	V13 korte delay accelerometer	10
Sluiscomplex Genk	Genenbos	V13 lange delay	14
Sluiscomplex Genk	Genenbos	V13 korte delay	41
Sluiscomplex Genk	Genenbos	V9 korte delay	11
		Totaal	**86**

Van deze groep bereikte 11% nooit het VPS netwerk aan het sluiscomplex van Ham. 24% van de schieralen lukte hier wel in, maar slaagde er niet in om het complex stroomafwaarts te passeren na één of meerdere pogingen. De overige 65% passeerde het sluiscomplex wel, waarbij in 86% van de gevallen gebruik werd gemaakt van sluisvullingen of inzwemmen van openstaande sluisdeuren. Slechts 9% van de 86 schieralen passeerde sluiscomplex Ham via werkende vijzelturbines (Figuur 39). Dit percentage stijgt echter tot 18% als enkel de schieralen in rekening gebracht worden die een poging deden om te passeren, en dat deden terwijl de turbine in werking was.



Figuur 39: Verdeling van 86 VPS schieralen. Alle percentages refereren aan het beginaantal van 86 schieralen.

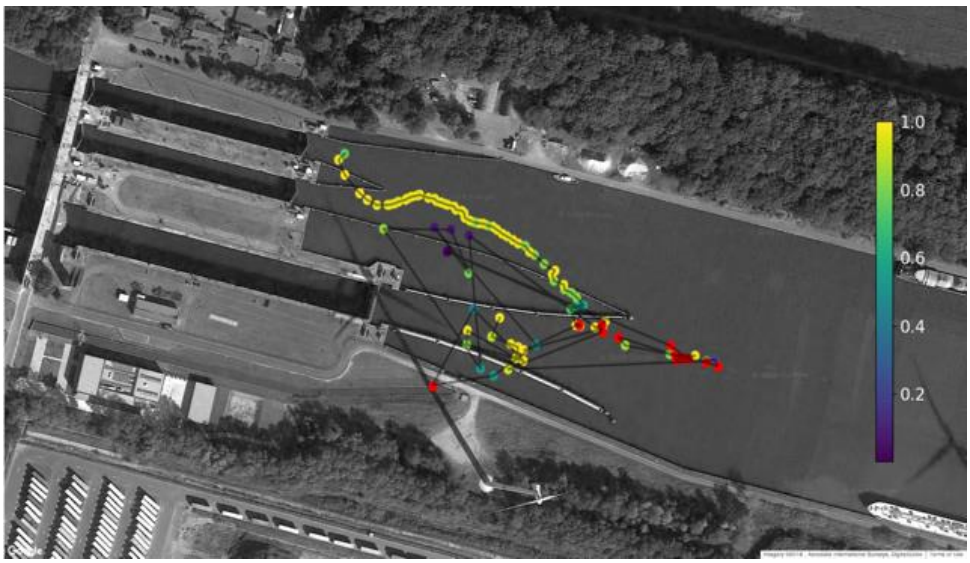
Dezelfde verdeling van schieralen wordt ook getoond in Figuur 40, waarbij de percentages in de gele pijlen zijn gerelateerd aan de groep van 56 schieralen (100%) die het sluiscomplex effectief passeerden. Hieruit blijkt dat 8 schieralen passeerden via de vijzelturbine. Uit de telemetrie-data blijkt dat 7 van deze 8 turbine-schieralen voorbij het sluiscomplex van Wijnegem gemigreerd zijn. Eén dier overleefde de passage van het sluiscomplex in Olen niet, en werd verder niet meer gedetecteerd. Het aantal schieralen dat passeert via de duwvaartsluis (45%) is meer dan de som van de dieren die de middensluis en de noordersluis gebruiken (41%).



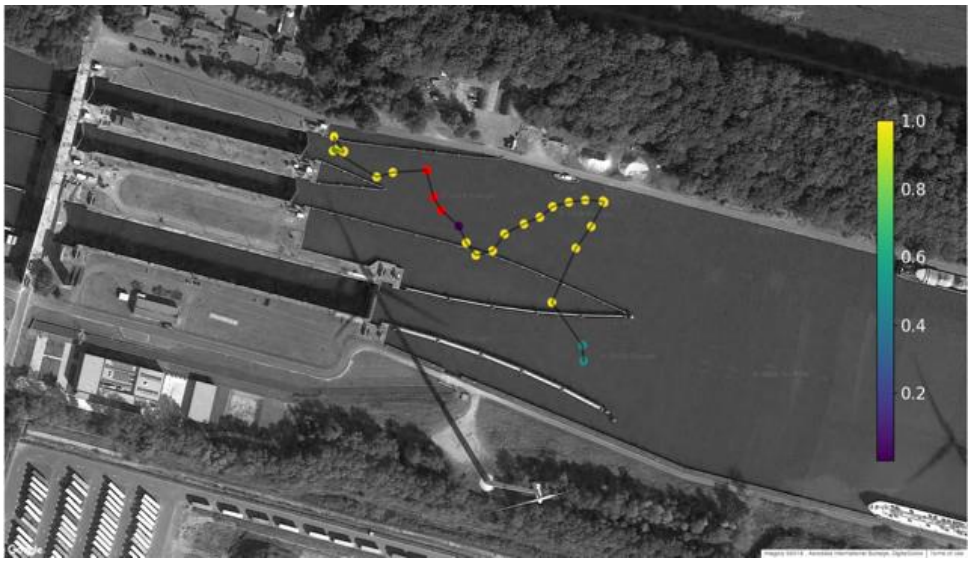
Figuur 40: Verdeling van 86 VPS schieralen ter hoogte van het sluiscomplex in Ham.

De specifieke zwemroute tijdens een passeerpoging wordt gevisualiseerd door de positieberekeningen te plotten op een kaart. In onderstaande figuren zijn routes geplot van

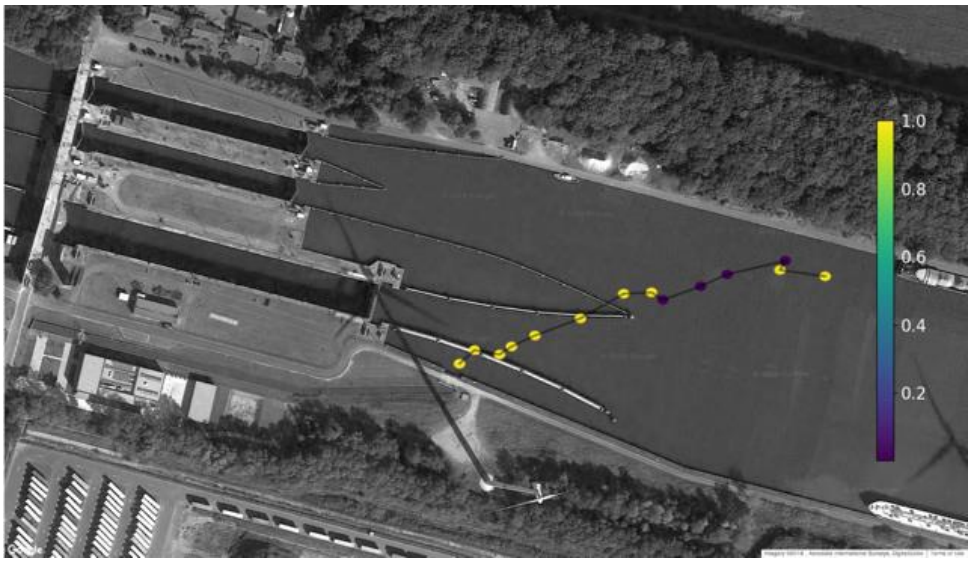
schieralen die passeerden via de noordersluis (105 en 38747) en via de turbine (47320). De kleuren van de dots geven een indicatie over de betrouwbaarheid van de positieberekening waarbij geel zeer goed is en rood minder betrouwbaar. Een minder betrouwbare positionering betekent dat de schieraal in werkelijkheid op een andere positie in het kanaal voorkwam, maar wel in de buurt van de berekende positie. De werkelijke positie kan echter enkele meters verschillen bij de rode kleur, terwijl deze fout bij een geelgekleurde positie veel kleiner is (< 1 m). Een passage via een sluis of de turbines werd behalve via de visroute ook bevestigd door detecties op hydrofoons die in de sluizen hingen. Detectie op de hydrofoon stroomafwaarts van het sluizencomplex, zonder detectie in één van de drie sluizen, wijst op een passage langs de waterkrachtcentrale.



Figuur 41: Passeerpoging van een schieraal met zendernummer 105, welke passeerde via de noordersluis. De kleuren van de dots geven een indicatie over de betrouwbaarheid van de positieberekening waarbij geel zeer goed is en rood minder betrouwbaar.



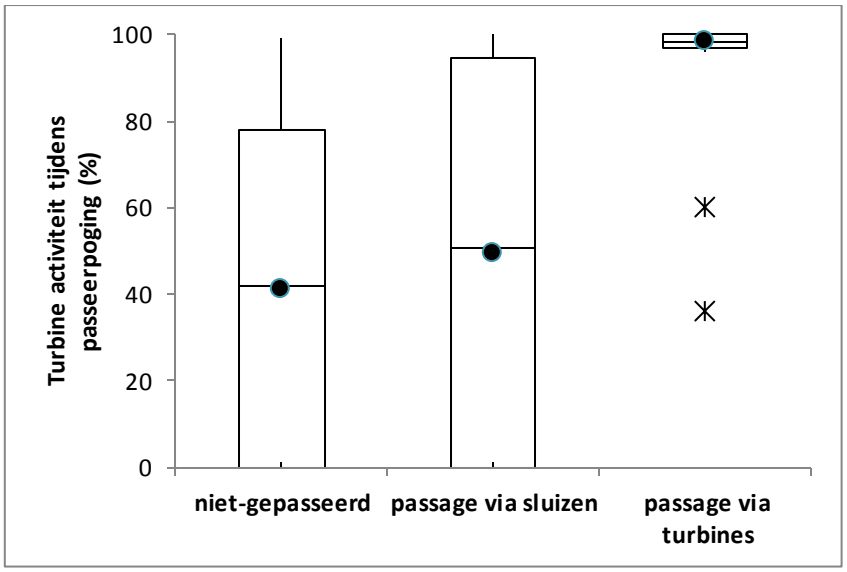
Figuur 42: Passeerpoging van een schieraal met zendernummer 38747, welke passeerde via de noordersluis. De kleuren van de dots geven een indicatie over de betrouwbaarheid van de positieberekening waarbij geel zeer goed is en rood minder betrouwbaar.



Figuur 43: Passeerpoging van een schieraal met zendernummer 47320, welke passeerde via de turbines. De kleuren van de dots geven een indicatie over de betrouwbaarheid van de positieberekening waarbij geel zeer goed is en rood minder betrouwbaar.

Om een idee te krijgen van de reden waarom een schieraal bij stroomafwaartse migratie de ene dan wel de andere route neemt aan het sluiscomplex, evalueerden we het percentage van de tijd dat de turbine in werking was tijdens het verblijf van de gezenderde vis in het VPS netwerk (verder een 'passagepoging' genoemd. Hiermee testten we de hypothese of een schieraal meer kans heeft om in het aanvoerkanaal naar de waterkrachtcentrale terecht te komen wanneer de turbine in werking is (en een deel van het debiet van het kanaal naar de waterkrachtcentrale gaat). Hieronder wordt deze hypothese preliminair onderzocht. Meer gedetailleerd onderzoek naar de passagekeuze ter hoogte van het sluizencomplex van Ham wordt verder uitgevoerd in een doctoraatsonderzoek.

Tijdens de 8 passagepogingen van de schieralen die uiteindelijk langs de turbine zwommen, was de turbine gemiddeld meer dan 85% van de tijd in werking, terwijl dat voor de dieren die niet passeerden (n=27) slechts 41% was, en 50% voor de schieralen die langs de sluizen passeerden (n=56). Passeerpogingen zijn alle pogingen die een dier moest ondernemen om te passeren en niet enkel de poging die tot succes leidde. Onsuccesvolle passeerpogingen kwamen ongeveer evenveel voor met turbinewerking (n=15) als zonder turbinewerking (n=12). Succesvolle passage via de sluizen gebeurde in 37 gevallen terwijl de turbine draaide en in 19 gevallen terwijl de turbine niet in werking was. Als we enkel de passeerpogingen in acht nemen wanneer de turbine in werking was, dan bedraagt het aandeel dat via de sluizen passeerde 82% en het aandeel van de turbinedoorgang 18% (Figuur 44). Deze getallen wijzen eerder op een keuze die niet beïnvloed wordt door het (relatief kleine) debiet van het kanaal dat naar de waterkrachtcentrale gaat. Dat is niet onlogisch gezien het effect van debiet dat naar de waterkrachtcentrale gaat op de stroming in het kanaal zeer klein is, en alleen voelbaar in de buurt van de inlaat van het toevoerkanaal naar de waterkrachtcentrale.



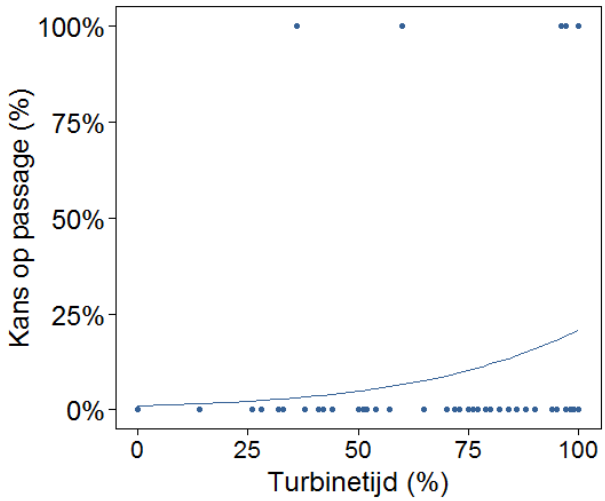
Figuur 44: Verdeling van de procentuele turbinetijd tijdens 91 passeerpogingen van schieralen aan het sluiscomplex van Ham. Zwarte bollen zijn de gemiddelden en sterretjes zijn uitbijters (1,5*IQR).

Omgekeerd geldt wel dat wanneer men voor de 8 pogingen van palingen die de waterkracht passeerden gaat kijken naar de tijd van hun aanwezigheid in de VPS dat de turbine aan stond, dan is dit telkens het merendeel van de tijd, in tegenstelling tot de pogingen van vissen die uiteindelijk niet passeerden of via de sluizen passeerden (Figuur 44). Alleen zijn er van deze laatste wel veel meer voorbeelden.

Door het grote verschil in voorbeelden in de twee groepen: passage langs de waterkracht (8 individuen) versus passage langs de sluizen of geen passage (81 individuen), is het moeilijk om correct statistisch te testen wat het effect is van percentage turbinetijd op de kans dat een vis de waterkracht zal passeren.

Een binomiaal model met turbinetijd als verklarende variabele, en passage door de waterkracht versus geen passage langs de waterkracht, wijst op een significant effect van turbinetijd op de kans op passage langs de waterkracht (p-waarde: 0.034473; Figuur 45). Maar de kans op passage van de turbines door een schieraal in het VPS netwerk is wel laag (Figuur 45).

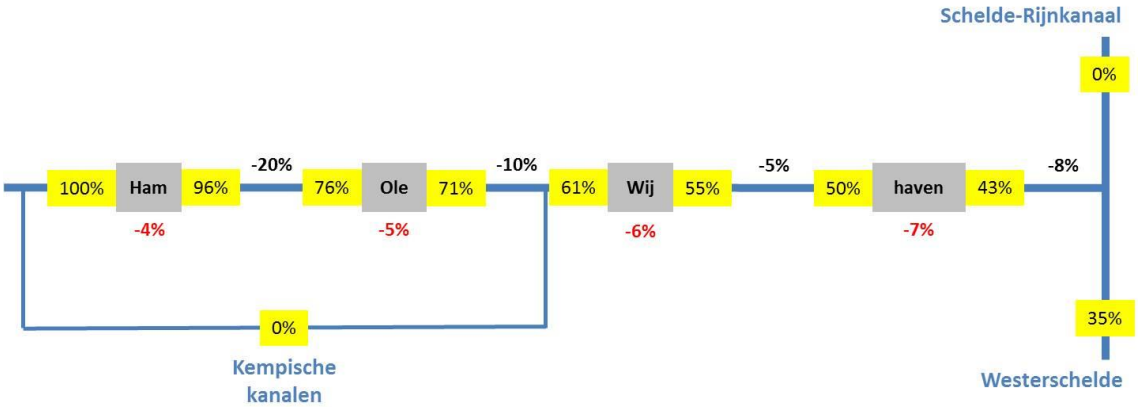
Een one-way anova test van het effect van de turbinetijd tijdens een passeerpoging op de passage (met als groepen: geen passage, sluispassage en turbinepassage), wijst op een significant verschil tussen de turbinepassage en de andere twee groepen (p-waarde anova: 0.026; p-waardes Tuckey test 0.019 voor turbinepassage versus geen passage, en 0.049 voor turbinepassage versus sluispassage), maar niet tussen de sluispassanten en de schieralen die niet passeerden (p-waarde Tuckey test: 0.665). Op die laatste twee groepen heeft het percentage turbinetijd dus geen effect gehad.



Figuur 45: De kans op passage van de waterkrachtcentrale van een schieraal in het VPS netwerk in functie van het percentage van zijn verblijftijd dat de turbines in werking waren.

4.4.1.3 Migratieverliezen vanaf sluiscomplex Ham

Het aantal detecties van stroomafwaarts migrerende schieralen daalt naarmate ze het estuarium naderen (Figuur 46). Dit verlies wordt enerzijds veroorzaakt door vissen die een sluiscomplex niet kunnen passeren (rode verliescijfers onder de symbolische sluiscomplexen in de figuur) en anderzijds door verliezen in elk pand (zwarte verliescijfers boven elk pand in de figuur). Deze laatste verliezen kunnen te wijten zijn aan sterfte na doorgang door de sluizen of de turbines, maar ook sterfte (natuurlijke of veroorzaakt door de operatie), predatie, gevangen door vissers,.. zijn mogelijke oorzaken van verlies. Het totaal verlies van migrerende schieraal (n=82) vanaf sluiscomplex Ham bedraagt 65%, waarvan 22% toe te wijzen is aan het niet kunnen passeren van de complexen en 43% aan verliezen na de passage van een complex. Door het sluiscomplex van Ham worden de minste schieralen opgehouden (-4%) ten opzichte van de stroomafwaarts gelegen sluiscomplexen, maar na passage van dit complex wordt wel het grootste verlies opgetekend (-20%; Figuur 46).



Figuur 46: Migratieverliezen van 82 schieralen vanaf het sluiscomplex in Ham. Zwarte verliescijfers zijn verliezen in het pand na passage door het stroomopwaartse complex, rode verliescijfers zijn verliezen te wijten aan het niet kunnen passeren van sluiscomplexen (geen detectie stroomafwaarts sluiscomplex).

4.4.2 Zalmsmolt

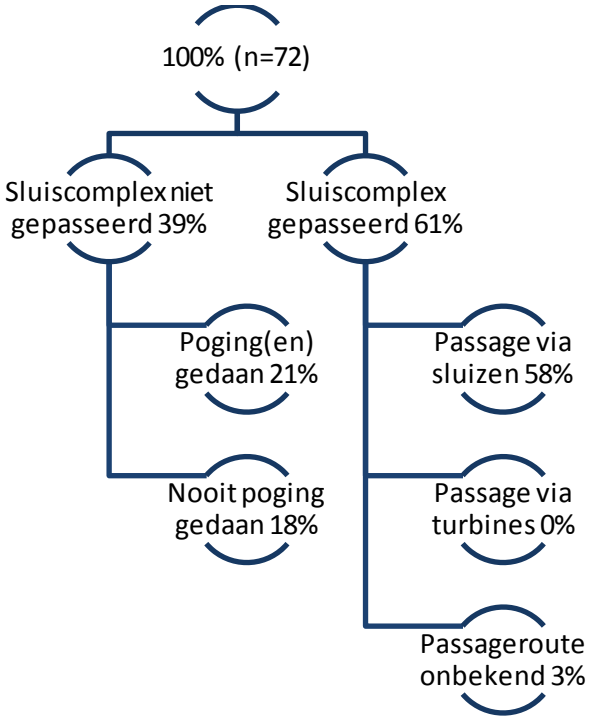
4.4.2.1 Routekeuze ter hoogte van sluiscomplex Ham

In april 2016 en 2017 werden in totaal 73 zalmsmolts voorzien van een V7 zender. In 2016 werden er op 6 en 11 april telkens 22 smolts vrijgelaten net stroomopwaarts van het VPS netwerk in Ham (Tabel 25). Slechts 2 van de 44 smolts werd niet gedetecteerd in het VPS netwerk. In een poging minder signaalbotsingen (bij aanwezigheid van veel dieren tegelijk in het netwerk die tegelijk een signaal uitsturen, waardoor het unieke signaal niet meer kan gedecodeerd worden door de ontvanger) te genereren, werden in 2017 29 smolts verspreid uitgezet in tijd en ruimte; een deel op dezelfde locatie dichtbij het netwerk en een ander deel op de uitzetlocatie van schieraal in Lummen in de periode van 30 maart en 18 april. Eén smolt verloor zijn tag bij de tijdelijke stockage en werd niet opgenomen in de dataset voor analyse.

Tabel 25: Aantallen, uitzetlocatie en -plaats van 72 VPS zalmsmolts.

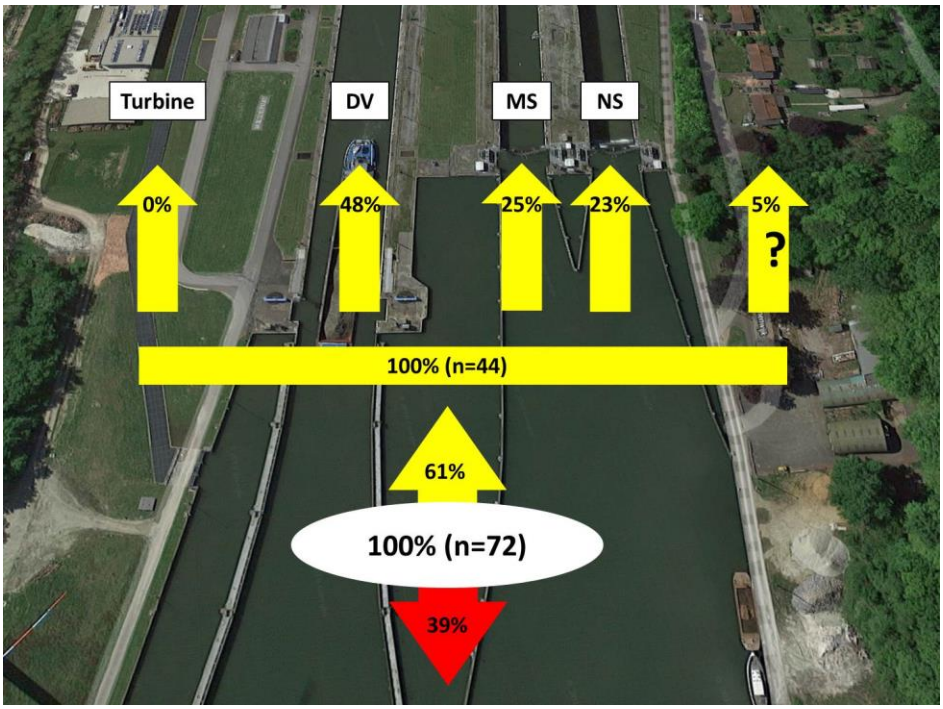
Uitzetdatum	Uitzetlocatie	Zendertype	Aantal
6/4/16	VPS netwerk	V7 normale delay	25
11/4/16	VPS netwerk	V7 korte delay	19
30/3/17	Genenbos	V7 korte delay	5
30/3/17	VPS netwerk	V7 korte delay	5
5/4/17	Genenbos	V7 korte delay	5
5/4/17	VPS netwerk	V7 korte delay	5
10/4/17	Genenbos	V7 korte delay	4
18/4/17	VPS netwerk	V7 korte delay	4
		Totaal	**72**

Van de 14 smolts die vrijgelaten werden in Genenbos, bereikten er slechts 5 het VPS netwerk in Ham. Figuur 47 toont de verdeling van 72 zalmsmolts. Drie kwart van de smolts die probeerden te passeren (n=59), slaagden daar ook effectief in (Figuur 47). Al deze vissen (n=44) passeerden via de sluizen.



Figuur 47: Verdeling van 72 VPS zalmsmolts.

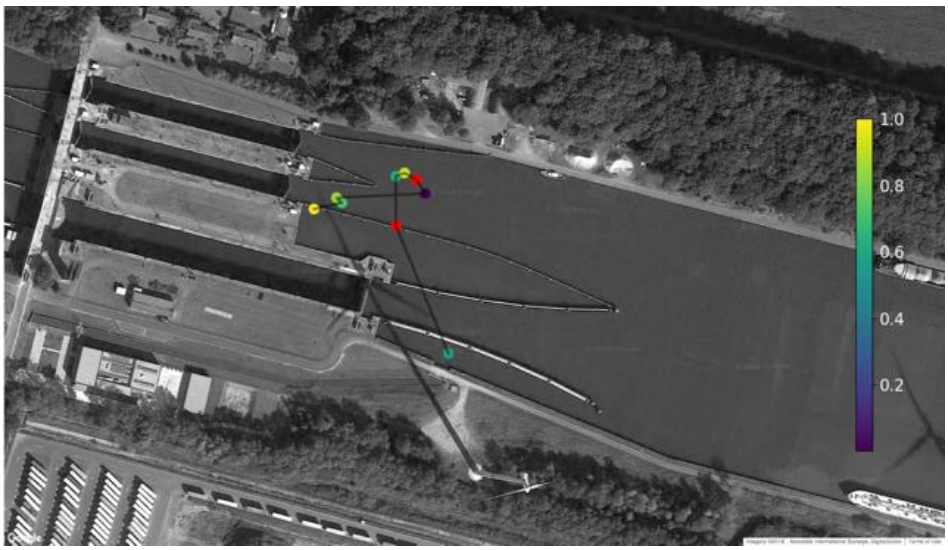
Van de smolts die het sluiscomplex van Ham passeerden, passeerde de helft via de duwvaartsluis (Figuur 48). Van 2 dieren kon de exacte passeerroute niet achterhaald worden, maar deze vissen zijn met zekerheid niet langs de turbine gepasseerd.



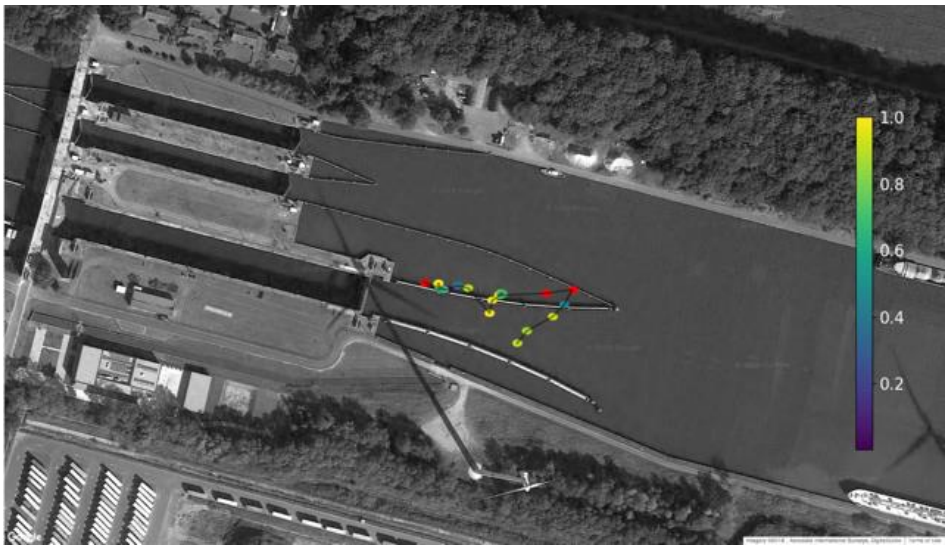
Figuur 48: Verdeling van 72 zalmsmolts ter hoogte van het sluiscomplex van Ham.

De zalmsmolts zwemmen sneller dan de schieralen waardoor de gegenereerde zwemtracks minder precies zijn omdat ze minder posities bevatten per lengte. Onderaan worden er

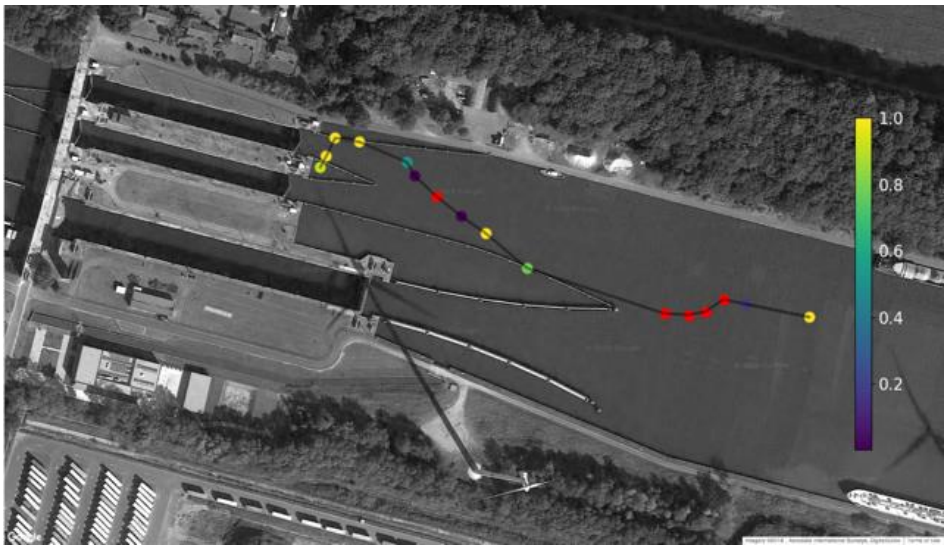
tracks weergegeven van drie verschillende smolts die elk door een andere sluis passeerden (Figuur 49, Figuur 50 en Figuur 51).



Figuur 49: Passeerpoging van een zalmsmolt met zendernummer 34434, welke passeerde via de vulopening van de middensluis. De kleuren van de dots geven een indicatie over de betrouwbaarheid van de positieberekening waarbij geel zeer goed is en rood minder betrouwbaar.

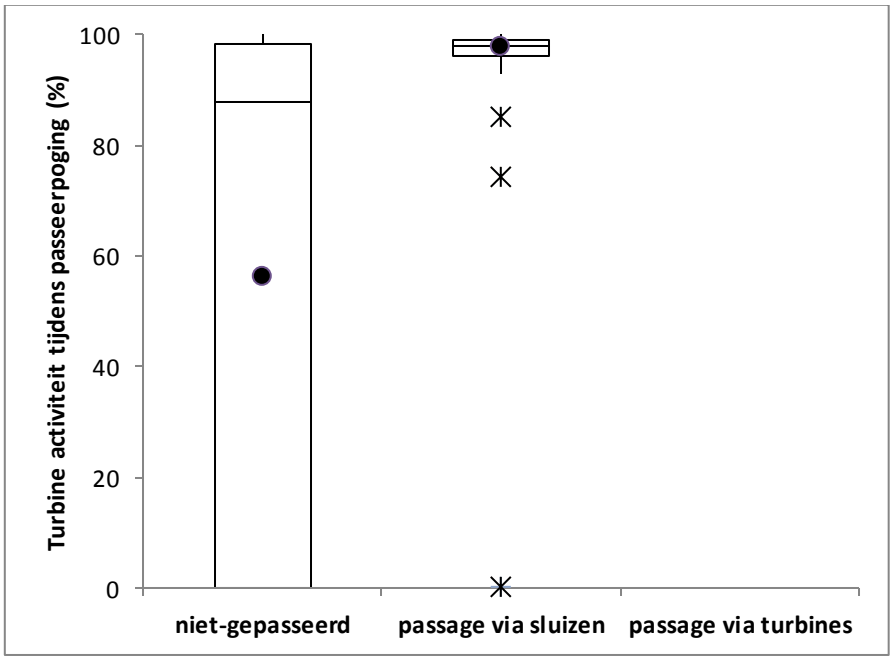


Figuur 50: Passeerpoging van een zalmsmolt met zendernummer 34437, welke passeerde via de vulopening van de duwvaartsluis. De kleuren van de dots geven een indicatie over de betrouwbaarheid van de positieberekening waarbij geel zeer goed is en rood minder betrouwbaar.



Figuur 51: Passeerpoging van een zalmsmolt met zendernummer 34519, welke passeerde via de vulopening van de noordersluis. De kleuren van de dots geven een indicatie over de betrouwbaarheid van de positieberekening waarbij geel zeer goed is en rood minder betrouwbaar.

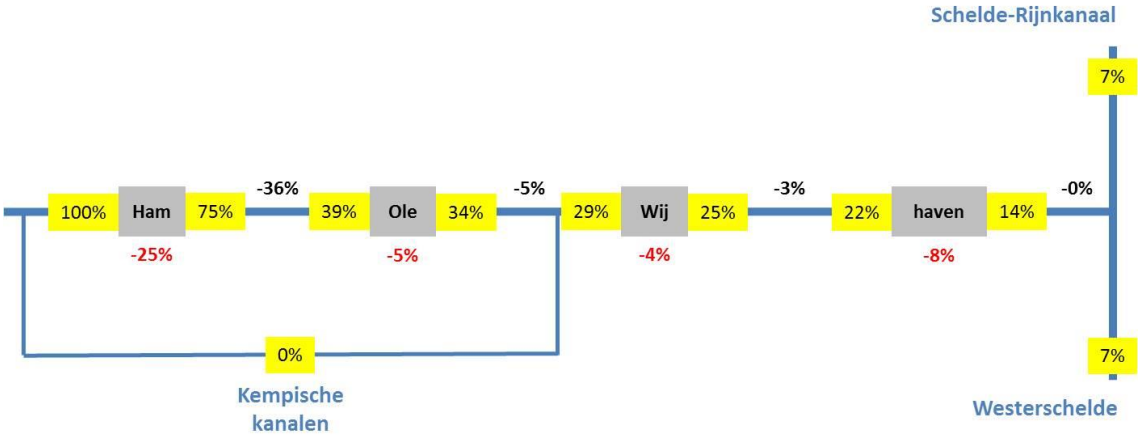
Ondanks het feit dat er geen enkele smolt via de vijzelturbines passeerde, waren de turbines tijdens 72 passeerpogingen gemiddeld 78% (mediaan 97%) actief. Tijdens de 15 mislukte passeerpogingen was de activiteit van de turbines gemiddeld 56%, terwijl dat tijdens de 44 gelukte pogingen 92% bedroeg (Figuur 52). Eén zalmsmolt zwom effectief het toevoerkanaal in bij werkende turbines, maar keerde na een half uur terug en passeerde het complex nooit meer.



Figuur 52: Verdeling van de procentuele turbinetijd tijdens 72 passeerpogingen van zalmsmolts aan het sluiscomplex van Ham. Zwarte bollen zijn de gemiddelden en sterretjes zijn uitbijters (1,5*IQR).

4.4.2.2 Migratieverliezen vanaf sluiscomplex Ham

Zoals bij de schieralen, daalt ook het aantal detecties van stroomafwaarts migrerende smolts naarmate ze het estuarium naderen (Figuur 53). Dit verlies wordt enerzijds veroorzaakt door vissen die een sluiscomplex niet kunnen passeren (rode verliescijfers) en anderzijds door verliezen in elk pand (zwarte verliescijfers). Deze laatste verliezen kunnen te wijten zijn aan sterfte na doorgang door de sluizen of de turbines, maar ook sterfte (natuurlijke of veroorzaakt door de operatie), predatie, gevangen door vissers, etc. zijn mogelijke oorzaken van verlies. Het totaal verlies van migrerende smolts (n=59) vanaf sluiscomplex Ham bedraagt 86%, waarvan 42% toe te wijzen is aan het niet kunnen passeren van de complexen en 44% aan verliezen na de passage van een complex. Het sluiscomplex van Ham blokkeert een kwart van alle smolts (-25%), en bovendien is er een groot verlies (-36%) na passage van dit complex. Vier smolts bereikten de Westerschelde via één van de drie getijdesluizen in de haven, terwijl 4 andere de route verder zetten richting Nederland via het Schelde-Rijnkanaal.



Figuur 53: Migratieverliezen van 59 zalmsmolts vanaf het sluiscomplex in Ham. Zwarte verliescijfers zijn verliezen in het pand na passage door het stroomopwaartse complex, rode verliescijfers zijn verliezen te wijten aan het niet kunnen passeren van sluiscomplexen.

4.4.2.3 Toetsing resultaten met het beoordelingskader van de MER

Tabel 26: Toetsing beoordelingskader MER aangaande vismigratie (Verhaegen et al., 2009).

MER beoordelingskader fauna/flora (vismigratie)				INBO evaluatie
Effect		Significantie		
Geïnduceerde mortaliteit bij passage bij pompwerking voor residente soorten	Aandeel van populatie	Er wordt geen maximum ingesteld, 0% is beter dan een bepaalde mortaliteit. Mortaliteit bij vitale residente populaties minder ernstig. Kan variëren van de efficiëntie van de werking van bepaalde onderdelen. ---: meer mortaliteit dan -- --: meer mortaliteit dan - -: slechter dan 0% mortaliteit 0: geen mortaliteit		**blankvoorn**: gemiddeld 38% verlies, dominant aanwezig in AK, beperkt gebruik van pompvijzels => negatieve impact beperkt **brasem**: gemiddeld 14% verlies, frequent aanwezig in AK, geen gebruik van pompvijzels => geen negatieve impact
Geïnduceerde mortaliteit bij passage bij turbinewerking voor residente soorten	Aandeel van populatie	Er wordt geen maximum ingesteld, 0% is beter dan een bepaalde mortaliteit. Mortaliteit bij vitale residente populaties minder ernstig. Kan variëren van de efficiëntie van de werking van bepaalde onderdelen. ---: meer mortaliteit dan -- --: meer mortaliteit dan - -: slechter dan 0% mortaliteit 0: geen mortaliteit		**blankvoorn**: gemiddeld 34% verlies, dominant aanwezig in AK, regelmatig gebruik van turbinevijzels => negatieve impact aanwezig (geen inschatting op populatieniveau) **brasem**: gemiddeld 55% verlies, frequent aanwezig in AK, maakt gebruik van turbinevijzels => negatieve impact aanwezig (geen inschatting op populatieniveau)
Geïnduceerde mortaliteit bij passage bij pompwerking voor migrerende soorten	% van migrerende populatie	Er wordt geen maximum ingesteld, 0% is beter dan een bepaalde mortaliteit. Mortaliteit bij migrerende soorten is zeer ernstig en laag aantal individuen maakt populatie gevoelig. Kan variëren van de efficiëntie van de werking van bepaalde onderdelen. ---: meer mortaliteit dan -- --: meer mortaliteit dan - -: slechter dan 0% mortaliteit 0: geen mortaliteit	Cumulatieve effecten van passage van de verschillende complexen eveneens te onderzoeken.	**gele paling**: gemiddeld 15% verlies, gebruik pompvijzels beperkt => effect per site minimaal, cumulatief (over 6 sites) effect aanwezig
Geïnduceerde mortaliteit bij passage bij turbinewerking voor migrerende soorten	% van migrerende populatie	Er wordt geen maximum ingesteld, 0% is beter dan een bepaalde mortaliteit. Mortaliteit bij migrerende soorten is zeer ernstig en laag aantal individuen maakt populatie gevoelig. Kan variëren van de efficiëntie van de werking van bepaalde onderdelen. ---: meer mortaliteit dan -- --: meer mortaliteit dan - -: slechter dan 0% mortaliteit 0: geen mortaliteit	Cumulatieve effecten van passage van de verschillende complexen eveneens te onderzoeken.	**schieraal**: gemiddeld 17% verlies, 18% gebruikt turbinevijzels => effect per site beperkt (3% verlies), cumulatief (over 6 sites) effect is 18% verlies **zalmsmolt**: verlies onbekend (onzekerheid forel data), geen gebruik turbinevijzels => effect per site minimaal, cumulatief (over 6 sites) effect is onbekend.

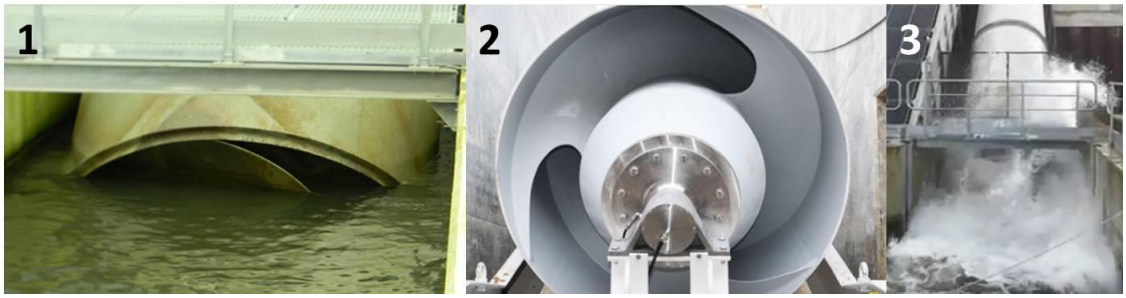
Passeerbaarheid van het sluizencomplex	Kwantitatieve beschrijving Passeerbaarheid	Passeerbaarheid in huidige situatie zeer laag. Geen aanpassing betekent negatieve effecten in toekomst. +: Lichte verbetering afwaarts ++: verbetering afwaarts, mogelijkheden opwaartse migratie +++: verbetering op- en afwaartse	Installaties die door hun configuratie of de ligging van de water intake de passeerbaarheid beïnvloeden. Vooral belangrijk bij afwaartse migratie, mogelijkheid eventueel te voorzien voor opwaartse migratie	**Stroomafwaartse migratie: schieraal**: algemene passeerbaarheid complex is 73%, turbinedoorgang bij werkende WKC is 18% **zalmsmolt**: algemene passeerbaarheid complex is 74%, geen turbinedoorgang bij werkende WKC
Vertraging door passage voor migrerende vissen	Vertraging relatief tot duur van de migratie	Duidelijkheid van afwaartse migratieroute en de permanente beschikbaarheid ervan: Relatieve verhouding beschikbaar debiet voor vismigratie en permanentie van dit debiet.	Verstoring veroorzaakt eventueel afschrikken van vissen tijdens migratie. Veelal durven vissen niet onmiddellijk in de installatie zwemmen.	Voor **schieraal** werd er geen verschil waargenomen in migratievertraging tussen dieren die langs de sluizen of langs de vijzelturbines passeerden.
Optreden van belangrijke tijdelijke effecten in aanlegfase tijdens migratieperiode	Aantal dagen in relatie tot voorkomen en duur van migratieperiode	Gezien de korte migratieperiode is een overlap met belangrijke en zeer verstorende werkzaamheden niet wenselijk.		nvt. (geen overlap tussen werken en evaluatie INBO)
Optreden van belangrijke tijdelijke effecten tijdens werkingsfase die migratie beïnvloeden	Aantal dagen in relatie tot voorkomen en duur van migratieperiode	Gezien de korte migratieperiode is een overlap met belangrijke en zeer verstorende werkzaamheden niet wenselijk.		nvt. (geen overlap tussen werken en evaluatie INBO)

5 Bespreking

5.1 Directe impact pompen

5.1.1 Gesloten buisvijzel

Gesloten buisvijzels worden aanzien als visveilig omdat er geen apart van elkaar bewegende delen in ronddraaien die vissen kunnen verwonden of doden. **Toch** werd er **wel schade en zelfs vissterfte vastgesteld** bij de experimenten met de gesloten vijzel in deze studie. De oorzaak van de waargenomen sterfte en schade is onzeker. Wel zijn er enkele kenmerken aan de geteste vijzel die afwijken van voorheen geteste visvriendelijke buisvijzels (http://fishflowinnovations.nl/wp-content/uploads/2016/11/Visveilig-Vijzelgemaal-Folder-Fishflow-Innovations.pdf). Allereerst is er de inslag van de eerste schroefbladen. Deze bladen zijn zoals een conventionele vijzel gemaakt, maar dan in een buis gelast. Hierdoor kunnen vissen nog steeds een slag krijgen bij het inzwemmen van de vijzel. In een ideaal geval neemt de breedte van de vijzelbladen gedurende de laatste windingen af, zodat de bladen teruglopen naar de buitenkant van de vijzel tot ze uiteindelijk op lijken te gaan in de buis rond de vijzel (axiaalwaaier, zie Figuur 54 (2)). De geteste vijzel in Ham bezit dit kenmerk niet (Figuur 54 (1)). Daarnaast draait de buisvijzel in Ham relatief snel, wat de impact van de inslag verder kan vergroten (Figuur 54 (3): buisvijzel van Ham in werking).



Figuur 54: (1) Foto van de inslag van de buisvijzel van Ham, (2) foto van een buisvijzel met een axiaalwaaier (bron: Fishflow Innovations), en (3) foto van de buisvijzel van Ham in werking.

De experimenten op de vijzels in pompwerking wijzen op een **verlies dat tot anderhalf keer lager is voor paling en brasem bij de gesloten vijzel, dan bij de open vijzels**. Voor **blankvoorn** was dit **verlies** zelfs **drie keer kleiner** bij de gesloten vijzel. Omgerekend naar de betekenis hiervan m.b.t. de totale impact van de pompen op de visbiomassa in het Albertkanaal (heel het kanaal en verondersteld dat alle 6 de installaties tegelijk werken) betekent dit dat er 8 tot 10 keer minder biomassaverlies zou optreden als al het toekomstig te pompen debiet met gesloten buisvijzels zou verpompt worden (zie ook sectie 5.3). Gezien een buisvijzel echter slechts een pompcapaciteit heeft van 1,5 m³/s versus 3, 4 of 5 m³/s voor open vijzels, zou er veel meer ruimte nodig zijn langs het kanaal voor de bouw van installaties met (meer) buisvijzels.

Dit verschil in verlies tussen buisvijzel en open vijzels is waarschijnlijk uitsluitend een gevolg van de lagere directe impact van de gesloten vijzel, want er werden **wel dubbel zoveel vissen per volume water opgepompt met de gesloten vijzel**, dan met de open vijzels tijdens de experimenten met ongedwongen ('natuurlijke') passage van vissen. Gezien de hogere turbulentie ter hoogte van de inlaat van de buisvijzel (in werking), is dit een eerder verrassend resultaat. Anderzijds gaat het in de hier uitgevoerde experimenten op 'natuurlijke passage' slechts om enkele testfases op een heel jaar en ook slechts over een relatief klein aantal vissen (296 bij de open vijzels, en 17 bij de gesloten vijzels) die opgepompt werden. Een groter aantal herhalingen van deze experimenten zou meer zekerheid kunnen geven

over deze resultaten en zouden ook kunnen aantonen dat er relatief minder vissen worden opgepompt door de gesloten vijzel. Dat laatste vonden ook De Boer & Kroes (2013). In hun studie passeerde geen enkele van 147 gemerkte schieralen een gesloten buisvijzel (max. debiet 0,32m³/s) om uit een polder te migreren. Maar de vijzel uit hun studie had dus een kleiner debiet, draaide mogelijks aan een andere snelheid, en/of had een ander type inlaat/inslag. Er is nog maar amper onderzoek gebeurd naar de visvriendelijkheid van gesloten buisvijzels en het gaat vaak over ex-situ experimenteel onderzoek met weinig en/of kleine vissen (Vriese, 2009). Bovendien zijn het meestal kleinere vijzels (tot 0,6m³/s) die een kleinere hellingsgraad en hoogteverschil hebben, die onderzocht werden. Verdere kennisopbouw over gesloten vijzelpompen lijkt dus noodzakelijk om de mate van visveiligheid ervan vast te stellen.

5.1.2 Open vijzels

In pompmodus zorgen de open vijzels voor **een gemiddeld verlies van 13%** voor de **vissen die ongedwongen ('natuurlijk') passeren**. Dit ligt lager dan het verlies bij de gedwongen proeven, wat te verklaren is door het grote aandeel kleine baarzen die ongedwongen passeerden. Grotere vissen hebben in theorie meer kans om geraakt te worden door draaiende onderdelen dan kleinere. Bovendien is baars een vissoort met erg taaie schubben zodat zelfs schubverlies amper voorkomt. Ook uit de gedwongen proeven blijkt dat de schadelijkheid kan verschillen per vissoort. Zo was de schade en de directe sterfte bij blankvoorn hoger in deze studie dan die bij brasem. Het uiteindelijk **gemiddeld verlies aan blankvoorn (38%)** is bijna 3 keer zo groot als het verlies aan brasem. Het geobserveerde gemiddelde verlies aan paling (15%), was vergelijkbaar met het verlies aan paling door een kleinere pompvijzel in een voorgaande studie in Boekhoute (Isabellagemaal, Baeyens et al., 2011). Er zijn geen andere studies bekend over pompvijzels met gelijkaardige hellingshoek, debiet en vervalhoogte.

De **draaisnelheid** (en dus de capaciteit van de vijzel, of m.a.w. **het debiet**) van de open vijzels in pompmodus heeft geen invloed op schade of sterfte bij paling. Bij brasem werden de meeste zware verwondingen veroorzaakt op het laagste toerental van de vijzel (3m³/s). De langere verblijftijd bij een lage draaisnelheid zou de kans op verwondingen kunnen verhogen, maar hier is verder geen zekerheid over. Gelijkaardige vaststellingen werden voorheen gedaan in Noord-Nederland op kleinere vijzels (Vis et al., 2013). De directe sterfte (en voor blankvoorn ook het totale verlies) is echter groter bij de hoogste draaisnelheid op 5m³/s. Mogelijks speelt hier het verrassingseffect van zich sneller verplaatsend water of heeft de sneller draaiende inslag van de vijzel een negatief effect (cf. de gesloten vijzel). Ook de relatief grote hellingshoek van de vijzel en het grote verval kunnen er voor zorgen dat vissen zich langer in de vijzel bevinden en andere krachten ervaren dan vissen in kortere en minder steile vijzels. Verder onderzoek kan hierover meer duidelijkheid brengen.

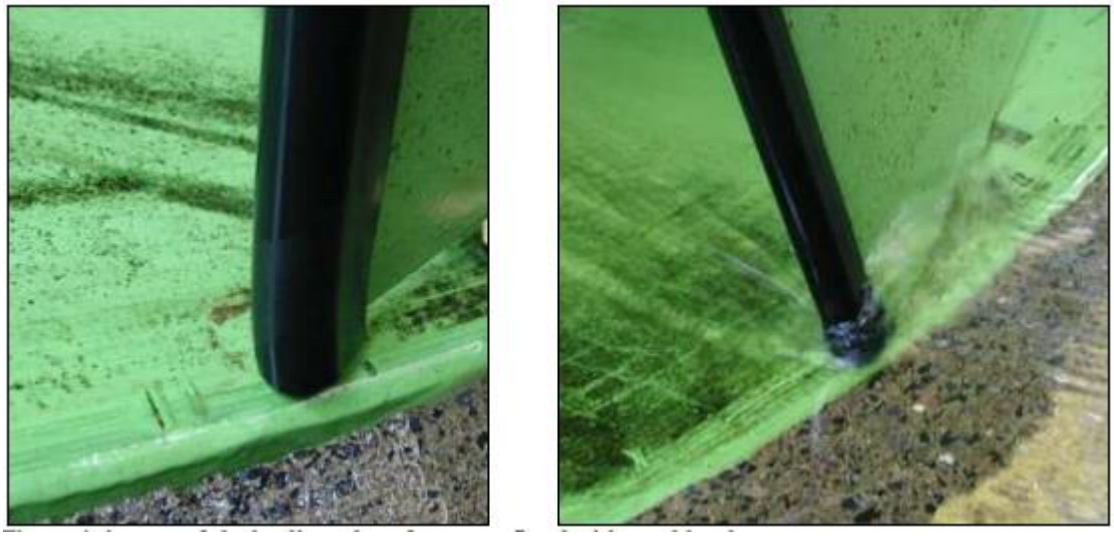
De meest voorkomende **zware verwondingen** zijn **kneuzingen**, waarbij er naast oppervlakkige schade (veel schubverlies, vinschade) ook soms inwendige breuken, bloedingen en snijwonden voorkomen. Voorgaand onderzoek naar pompvijzels heeft dit fenomeen al vaker vastgesteld (Baeyens et al., 2011, 2013; Vis et al., 2013). De reden voor dit type verwondingen is een knelling tussen het draaiend vijzelblad en de vaste behuizing waarin de vijzel draait. In tegenstelling tot oudere vijzels waarbij de ruimte tussen het vijzelblad en de behuizing vaak te groot was, is deze ruimte bij de vijzel van Ham erg klein. De aanpassing van de klassieke rechte vijzelinslag naar een taps toelopend begin van het vijzelblad (de zogenaamde 'De Wit aanpassing'), zorgt er echter voor dat wanneer het vijzelblad bijna op volle breedte is, er een ruimte ontstaat waartussen vissen gekneld kunnen geraken. Deze aanpassing werd al uitgebreid geëvalueerd op het Isabellagemaal in Boekhoute, waaruit bleek dat er geen wezenlijke verbetering optrad (Baeyens et al., 2013). Een klassieke inslag met dikke rubberen beschermingstrips (Figuur 55) of een axiaalpompwaaier (Figuur 54, foto 2) zouden betere resultaten kunnen geven, maar dit werd tot op heden nog niet onderzocht in veldexperimenten.

Het uiteindelijk **negatief effect** van de vijzels in pompmodus valt mee omdat er in Ham relatief weinig vissen gebruik maken van deze turbulente doorgang. Daarom resulteren de toekomstscenario's voor 2050 in een verlies voor het hele Albertkanaal tussen 1 en 15% van de visbiomassa als alle installaties tegelijk in werking zijn (enkel open vijzels).

De nood aan **mitigerende maatregelen** dringt zich hier niet direct op. De ervaring na het uitvoeren van de proeven leert wel dat het afsluiten van de pompbak met een kooi (de vangkooi die gebruikt werd voor de turbineproeven) met kleine maaswijdte (2x2cm) geen enkel probleem veroorzaakt voor de watertoevoer.

5.2 Directe impact turbines

De gemiddelde **directe sterfte** na ongedwongen ('natuurlijke') passage door de turbines was dezelfde als bij de pompen, namelijk 8%. Bij de experimenten met gedwongen passage was deze echter vele malen groter. De directe sterfte na gedwongen passage door de turbines bedroeg 21% over de soorten heen (brasem, paling en blankvoorn). De sterfte is gemiddeld heel hoog voor brasem (41%), blankvoorn (34%) en forel (54%) en laag voor paling (3%). De hoge sterfte bij forel kan echter niet gevaloriseerd worden omdat ze mogelijks beïnvloed werd door de manipulatie van de dieren tijdens het uitvoeren van het experiment. De proefdieren hadden veel stress van de verandering van waterkwaliteit (zuurstofgehalte), het overbrengen in netten en van het aanbrengen van een vinknip. Daarom kan er geen onderscheid gemaakt worden wat de precieze doodsoorzaak was en worden deze resultaten verder buiten beschouwing gelaten. Het aandeel **zware schade** voor de andere drie soorten was gelijkaardig voor de twee types experimenten (ongedwongen en gedwongen passage) en bedroeg respectievelijk 17 en 14. Gemiddeld voor alle vissoorten observeerden we een **verlies** tussen 25% (gebaseerd op de experimenten met ongedwongen passage) en 35% (experimenten met gedwongen passage). In de wetenschap dat vooral blankvoorn en paling gebruik maken van de vijzelturbines, kan er gesteld worden dat de resultaten van beide proeven vergelijkbaar zijn. De verliezen voor blankvoorn en paling bedragen namelijk respectievelijk 34% en 17%. Net zoals bij de resultaten van de pompproeven, bepalen ook hier zware **kneuzingen** het grootste aandeel in de groep van zware verwondingen. Rekening houdend met de kleine marge tussen de vijzelbladen en de behuizing, kan er verondersteld worden dat deze knijp- en/of slagschade veroorzaakt wordt aan de inlaat van de vijzel. Mogelijk ontstaan er situaties waarbij vissen tussen de openstaande waterinlaatklep en de draaiende vijzelbladen terecht komen. Het is onbekend of de opening tussen de vijzelbehuizing en de vijzelbladen kan vergroten als gevolg van doorbuiging. Mogelijk zorgen de conisch lopende 'De Wit'-aanpassingen van de vijzelinslag onbedoeld voor meer schade, terwijl ze net bedoeld zijn om de schade te beperken. Het werken met een inslag over de volledige breedte (zoals de klassieke vijzel geconfigureerd was) waarbij de vijzelinslag voorzien is van een dikke rubber, zou de schade kunnen beperken (Figuur 55 (Kibel & Coe, 2011)).



Figuur 55: Rubberen beschermstrip over de vijzelinslag.

De exacte locatie en oorzaak van deze zware verwondingen is niet gekend. In een bijkomend experiment (verder niet vermeld in dit rapport) werden daarom speciale sensoren in de turbines ingevoerd. Deze sensoren zijn beter gekend als 'barotrauma detectie sensoren'. Dit zijn cilindervormige sensoren (14 x 4 cm) die ingevoerd worden in de vijzel op dezelfde manier als de vissen. De sensoren meten en loggen continue druk en beweging gerelateerde parameters, zoals: druk (p), snelheid van drukverandering (dp/dt), het aantal keer dat de sensor een klap krijgt, 3D lineaire acceleratie, en 3D rotatie. De resultaten hiervan kunnen leiden naar functionele aanpassingen aan turbines en opvoerwerken, en werden in voorgaande studies al ingezet voor het bepalen van druk gerelateerde visschade bij turbines van de types Kaplan en Francis (Boys et al., 2018). De sensoren werden ontwikkeld door de Technische Universiteit van Tallin (Jeff Tuhtan) met ondersteuning van het H2020 Fithydro project (https://www.fithydro.eu/). De resultaten van dit experiment worden nog verder verwerkt en gepubliceerd, maar tonen alvast aan dat er geen één oorzaak is van het voorkomen van de waargenomen schade aan de vissen. Het is m.a.w. niet zo dat schade bijvoorbeeld enkel optreedt aan de inlaat van de turbines, maar ook tijdens de verdere passage kan de vis beschadigd raken. Bovendien geven de resultaten een indicatie dat schade niet veroorzaakt wordt door druk veranderingen, zoals wel het geval is bij Kaplan en Francis turbines.

Er kon geen verband aangetoond worden tussen het voorkomen van sterfte of schade en de **draaisnelheid** waarop de vijzels turbineren. Voor brasem en paling werd er een significant effect gevonden van de draaisnelheid op de kans op verlies, maar het effect was verschillend per soort. De verlieskans is het grootst voor een draaisnelheid die overeenkomt met een debiet van 4 m^3/s, terwijl dit voor paling bij 3 m^3/s is. Schade of verlies kan dus niet verminderd worden door een aangepast beheer toe te passen in termen van draaisnelheid (debiet), omdat het een verschillend effect heeft per soort. Bovendien waren de effecten niet groot.

5.3 Toekomstscenario's

De **impact van de pompen op het visbestand in het Albertkanaal is klein tot matig**. De berekende scenario's voor het geval dat alle zes de pompinstallaties tegelijk in werking zijn met open vijzels, geven een biomassa verlies aan vis aan van 15% in een droog jaar tegen 2050. Dat komt overeen met ongeveer 2 ton vis. Moest al het verwachte, toekomstig te pompen debiet verpompt worden met gesloten vijzels (buisvijzels) van het type dat onderzocht werd in deze studie, dan zou er slechts 2% biomassaverlies optreden. Dat komt overeen met slechts 260 kg visverlies. Echter, deze meer visvriendelijke vijzels hebben een

kleinere capaciteit (1,5 m³/s), waardoor er grotere installaties gebouwd zouden moeten worden. Bovendien werken deze vijzels niet als turbine. De impact van de pompinstallaties is minder groot dan die van de turbines, en is eerder gering volgens de resultaten van deze studie en bijhorende toekomstscenario's. Desalniettemin is het beste scenario om alle visschade te vermijden. Dat is mogelijk m.b.v. een degelijke viswering (zie volgende paragraaf).

De **impact van de turbines op het visbestand in het Albertkanaal** in de verschillende toekomstscenario's **is niet verwaarloosbaar**. Dit is het resultaat van een relatief grote 'directe' impact van de vijzels op passerende vissen. Het aantal vissen dat per volume water geturbineerd werd tijdens de experimenten is kleiner dan bij pompen, maar de volumes water die in de toekomst mogelijks geturbineerd worden, zijn groter. Het cumulatief effect van 6 gelijktijdig werkende waterkrachtcentrales in jaren met voldoende Maasafvoer kan oplopen tot een biomassa-afname van 34% per jaar in 2050. Dat komt overeen met ruim 5 ton vis per jaar. Een dergelijke negatieve impact op de vispopulatie van het Albertkanaal kan voorkomen worden door vissen te weren uit de waterkrachtcentrale. Dat kan op zijn beurt door er voor te zorgen dat er geen vissen in het toevoerkanaal terechtkomen m.b.v. viswering. **Viswering** kan op twee manieren bekomen worden; enerzijds via fysieke afscherming en anderzijds via afscherming op basis van het gedrag van vissen. Fysieke afscherming gebeurt door middel van fijnroosters, waardoor geen enkele vis kan passeren vanaf een bepaalde lengte. Gedragsbarrières zijn gebaseerd op stimuli die vissen afschrikken zoals licht, geluid, elektriciteit, luchtbellen, etc. Beide systemen hebben voor- en nadelen, maar de enige garantie voor een sluitende viswering voor alle vissoorten is een fijnrooster (Baeyens et al., 2017). Gedrag-gebaseerde weringen werken namelijk soortspecifiek en zelfs tussen levensstadia en verschillende locaties kunnen ze andere resultaten opleveren. Systemen die voor de ene soort goed werken, werken niet voor andere. Zo vonden Kroes & de Boer (2013) dat het gebruik van stroboscooplampen er voor zorgde dat er 145% meer brasem door een pompgemaal ging dan in de referentiesituatie (gemaal de Lange Weide, Nederland). In een ander gemaal werd tot 200% meer blankvoorn en brasem verpompt bij werkende stroboscooplichten, terwijl de gevangen aantallen van baars en pos lager werden. De effectiviteit van stroboscooplampen werd al meermaals onderzocht, waarbij de waarden variëren van 0% tot 90% effectieve afwering (Kroes & de Boer, 2013). De werking van een fijnrooster is al bewezen, maar heeft als nadelen dat de doorstroomoppervlakte moet vergroot worden om hetzelfde debiet te kunnen turbineren, en dat er een automatische reiniging moet geïnstalleerd worden. De bedrijfs- en de onderhoudskosten liggen daardoor aanzienlijk hoger. Idealiter worden vissen niet geweerd maar eerder afgeleid naar een veilig omloopsysteem aangezien sluisdoorgang ook niet visvriendelijk blijkt (zie ook Figuur 45).

5.4 Migratiestudie paling en zalm

5.4.1 Het Albertkanaal als migratieroute

Schieralen die in deze studie onderzocht werden, en de migratie naar zee aanvatten vanuit de het Maasbekken boven Luik of vanuit het kanaalpand stroomopwaarts van Genk, maakten ook voor een deel gebruik van het Albertkanaal als migratieroute. Specifiek gingen één derde van de **schieralen** die van de bovenstroomse Maas komen en twee derde van de dieren uit het bovenpand van het Albertkanaal langs het Albertkanaal richting zee. De overige schieralen gebruikten de Maasroute via de waterkrachtcentrales van Monsin en Lixhe, waar één derde de passages vermoedelijk niet overleefde. Op basis van de observaties veronderstellen we dat passage via Ternaaien visvriendelijker verliep. De verdeling van de schieralen ter hoogte van Luik wordt niet bepaald door het dominante afvoerdebiet. Schieralen kozen de route via het Albertkanaal ook op momenten dat 70% van de totale afvoer naar de Maas stroomde of ze kozen voor de Maasroute op een moment dat er slechts 16% waterafvoer naar de Maas stroomde (Baeyens, 2016). Deze resultaten lijken verrassend, maar de afvoer ter hoogte van de afsplitsing van het Albertkanaal is niet te vergelijken met unidirectionele stroming zoals in een rivier. De afvoer van het Albertkanaal verloopt grotendeels discontinu door het vullen van sluizen, waardoor water in twee

richtingen kan stromen en er translatiegolven ontstaan. Daarnaast kan er mogelijk een afschrikeffect zijn van draaiende Kaplan turbines in Monsin waardoor schieralen terugkeergedrag vertonen (Jansen et al., 2007). Van de schieralen die toch de Maasroute via Monsin kozen, stierf één derde voor ze Nederland bereikten. Onderzoek uitgevoerd door de Universiteit van Luik toonde al aan dat **zalmsmolts** het erg moeilijk hebben om in deze omstandigheden voorbij de waterkrachtcentrales op de Maas of tot in Genk te geraken. Naast de sterfte door de Kaplan turbines (-50%) hebben zalmsmolts mogelijks ook moeite om zich te oriënteren. Amper 10% van de smolts geraakt tot in Genk (1,4%) of voorbij Lixhe (8,3%) (ongepubliceerd onderzoek, M. Ovidio, Universiteit van Luik).

5.4.2 De rol van de sluiscomplexen in zeewaartse vismigratie

De migratie van schieraal doorheen het Albertkanaal verloopt niet zoals in (semi)natuurlijke rivieren, die gekenmerkt worden door een duidelijke netto stroming in één richting. Van de onderzochte **schieralen** die vanuit Limburg (sluiscomplexen Genk, Diepenbeek en Hasselt) vertrokken, geraakten slechts één derde in het estuarium van de Schelde. Op verschillende plaatsen in het Albertkanaal eindigde de migratie van verschillende van de onderzochte dieren. Het passeren van het sluiscomplex in Ham lukte voor slechts twee derde van de onderzochte dieren, die net stroomopwaarts van het sluiscomplex vrijgelaten werden. Bijna alle dieren deden wel een poging om het sluiscomplex te passeren. Er lijken verschillende redenen te zijn die er mogelijks voor zorgen dat de dieren het sluiscomplex niet kunnen passeren of sterk vertraagd worden. Het onderzoek hiervan is niet gemakkelijk omdat in deze onnatuurlijke, druk bevaren omgeving veel factoren de 'natuurlijke' omgeving van deze dieren beïnvloeden. De belangrijkste oorzaken situeren zich echter in de sterke beïnvloeding van het natuurlijke stroompatroon van het water, dat de dieren nodig hebben om hun weg naar zee te vinden. Het verhinderende effect van structuren die de waterafvoer wijzigen (dammen, waterkrachtcentrales en stuwen) op migrerende schieraal is al meermaals gedocumenteerd (Behrmann-Godel, J. & Eckmann, R., 2003; Gosset, C. et al., 2005; Winter et al., 2007). Daarnaast is ook gekend dat bepaalde constructies, zoals grof vuil roosters, een afschrikkend effect kunnen hebben op de vissen, waardoor de vissen vertragen of in de verkeerde richting wegzwemmen, waarna hun (zeewaartse) migratie volledig kan stilvallen (Piper et al. 2018). In Frankrijk werd een migratiestop vastgesteld bij 65% van de schieralen die verschillende dammen moesten passeren in de Frémur (Besson et al., 2016). Egg et al. (2017) merkten dat het optrekken van een sluisdeur zeer efficiënt werkte voor de passage van schieraal terwijl geen enkele van de 1323 schieralen het van roosters voorziene afleidingssyteem gebruikte. Een verhoogde stroomsnelheid en de afwezigheid van roosters waren de voornaamste redenen voor succesvolle passage. Schieralen die het sluiscomplex van Ham wel passeren, doen dit bij voorkeur via de duwvaartsluis. De vulling van deze sluis vraagt meer water dan die van de twee kleinere sluizen. De invloedssfeer bij sluisvulling rond de vulopeningen van de duwvaartsluis is ook groter, waardoor de kans groter is dat een schieraal zich in deze zone bevindt wanneer de sluis gevuld wordt (Vergeynst et al., 2018). Iets meer dan de helft van de schieralen die het sluiscomplex via de sluizen zelf passeren, doen dit via de vulopeningen van de sluizen. De andere gaan met de schepen mee door de open sluisdeuren. Buiten kleinere wervelstromingen van de deuren of een binnenvarend schip is er dan geen echte stroming waarvan schieraal gebruik van zou kunnen maken. Mogelijk zwemmen deze dieren in de buurt en twijfelen ze om de vulopeningen te gebruiken wegens de aanwezigheid van grof vuil roosters (Haro et al., 1998). De invloedssfeer rond de ingang van het toevoerkanaal naar de turbine is veel kleiner dan die van de sluizen, maar de toevoer verloopt meer continue. De vulling van een sluis gebeurt op 12 minuten tijd, terwijl de waterkrachtcentrale verschillende uren in werking kan zijn. De positie van het toevoerkanaal naar de waterkrachtcentrale in het kanaal (aan de zijkant) ligt net buiten de invloedssfeer van de vulopening van de duwvaartsluis. Dit zou kunnen verklaren waarom slechts 14% schieralen langs de waterkrachtcentrale passeerden ondanks het feit dat de turbines draaiden gedurende de helft van de tijd van 91 verschillende passagepogingen van palingen (18% turbinepassage voor passagepogingen met 100% activiteitsgraad van de turbines). Tijdens de turbinedoorgang van deze 8 schieralen was de activiteitsgraad

gemiddeld 86% (inclusief twee uitbijters). Van alle **zalmsmolts** passeerde zelfs geen enkel dier langs de waterkrachtcentrale, ondanks een turbine-activiteitsgraad van gemiddeld 78%. Eén zalm smolt zwom het toevoerkanaal van de turbine in, maar keerde na een half uur terug en passeerde het sluiscomplex niet. Ook de zalmsmolts gebruikten de duwvaartsluis in de helft van alle gevallen van sluispassage. Zoals bij de schieralen passeerden ook de smolts voor de helft via de sluisdeuren. Meer dan de helft van de smolts die niet konden passeren, deed één of meerdere pogingen.

Het gedrag en passagesucces van de gezenderde vissen ter hoogte van het sluiscomplex van Ham werd in detail onderzocht in de doctoraatsstudie van Jenna Vergeynst (UGent-INBO). In dit onderzoek werden de vistracks ook vergeleken met een hydraulisch model van de kanaalzone tot 400 m stroomopwaarts van het sluiscomplex van Ham. De studie wordt gepubliceerd in februari 2020 en in verschillende A1 publicaties, waaronder Vergeynst et al. 2018.

Twee derde van de **schieralen** die vanuit het pand Hasselt-Ham zeewaarts migreerden, bereikten nooit het estuarium. Dit **verlies** werd deels verklaard door het niet kunnen passeren van de sluiscomplexen (34%) en voor de rest door verliezen na passage van een sluiscomplex. Er is geen verschil qua sterfte tussen schieralen die langs de vulopeningen of langs de sluisdeuren passeerden. De oorzaken voor deze verliezen na sluisdoorgang zijn niet exact bekend, maar plotse drukverschillen bij vulling of de impact van fysieke botsingen lijken het meest voor de hand liggend. De **verliezen** vanaf Ham voor **smolt** na passage van sluiscomplexen zijn identiek aan die van schieraal, maar het verlies door migratieblokkering door een sluiscomplex zijn voor jonge zalmen dubbel zo groot. Hierdoor is het totaal verlies - 86% en komt dus slechts 14% terecht in het estuarium terecht. Specifiek onderzoek naar de impact van sluisdoorgang zou meer verduidelijking kunnen brengen en aanbevelingen kunnen doen voor meer visvriendelijk beheer.

5.4.3 De impact van werkende vijzelturbines op stroomafwaarts migrerende vissen

Visveilige turbines zouden voor stroomafwaarts migrerende vissoorten zoals paling en zalm goede alternatieven kunnen bieden in periodes van verhoogde afvoerdebieten. Grote vertragingen in migratie van schieraal in het Albertkanaal worden immers veroorzaakt door de sluiscomplexen en de discontinue waterafvoer (Verhelst et al., 2018). De vijzelturbine in Ham blijkt echter niet helemaal 'visveilig' voor **schieraal,** met een verlies van 17% voor dieren die langs de turbine passeren. Gesteld dat alle schieralen via werkende vijzelturbines zouden migreren naar zee, dan haalt minder dan de helft van deze dieren het sluiscomplex van Wijnegem na passage van de 5 voorgaande waterkrachtcentrales. In deze studie maakte bijna 1 op 5 schieralen gebruik van de turbinedoorgang als de turbines operationeel waren, en dat aantal zal mogelijks hoger zijn als er in de nabije toekomst meer geturbineerd zou worden, en als alle installaties gebouwd zijn. De resultaten van deze studie wijzen erop dat de turbines (in werking) verantwoordelijk zijn voor 3% van het verlies van alle schieralen per sluiscomplex. Dat betekent dat andere, vooralsnog onbekende factoren, verantwoordelijk zijn voor het resterende verliespercentage. Deze studie en de bovenvermelde doctoraatsstudie geven aan dat factoren gerelateerd aan sluispassages mogelijks een hogere kans op verlies inhouden dan de waterkrachtcentrale. Dit is een hypothese die nog niet verder onderzocht en dus bevestigd werd.

Zalmsmolts lijken noch de geringe lokstroom van het toevoerkanaal, noch de passage door de vijzels interessant te vinden. Bovendien zijn de huidige aantallen smolts die de route van het Albertkanaal kiezen niet groot. Bovendien lijkt het er net zoals bij de schieralen op, dat andere factoren, zoals mogelijks de sluisdoorgang, predatie, gebrek aan uniforme stroming, etc., een vrij grote verlieskans inhouden. De impact van de vijzelturbines op de migratie van zalmsmolts blijkt op basis van deze studie in alle geval erg klein.

6 Algemeen besluit

Het doel van deze studie was om de impact te bepalen van de pomp- en waterkrachtinstallatie in Ham op het milieu, specifiek op de aanwezige visfauna. Om de totale impact te kunnen bepalen werd ten eerste onderzocht wat de directe impact is van de pompen en turbines op passerende vissen. Ten tweede, werd geëvalueerd wat de totale impact is op het aanwezige visbestand in het kanaal door te evalueren hoeveel vissen de pomp- en waterkrachtcentrale passeren. Per onderzoeksluik werden onderstaande, specifieke onderzoeksvragen gesteld. De resultaten van deze studie bieden hierop volgende antwoorden.

Directe impact van de pomp- en waterkrachtcentrale op passerende vis

A. Hoe groot is **de kans dat een vis sterft** ten gevolge van een passage van de installatie bij pompwerking en bij turbinewerking?

Rekening houdend met zowel de observaties als de statistisch berekende kansen, ligt de gemiddelde sterfte voor brasem, paling en blankvoorn samen over de verschillende debieten bij pompen met de open vijzels tussen 7 en 13%, met de gesloten vijzel tussen 1,5 en 6%, en bij turbineren tussen 16 en 25%. Deze percentages zijn respectievelijk het kleinste en grootste gemiddelde over alle soorten die gedwongen werden de installatie te passeren op de twee types vijzels en alle mogelijke debieten, en zijn daarenboven wat geobserveerd werd op basis van de natuurlijk passerende vissen. Sterfte wordt gedefinieerd als de directe sterfte ten gevolge van de passage, en de uitgestelde sterfte ten gevolge van zware beschadiging, maar niet zware beschadiging zonder sterfte.

De sterfte- (en ook verlieskansen, zie verder) zijn voor de onderzochte soorten verschillend per soort. Ze zijn het hoogste voor blankvoorn (2% gesloten pompvijzel, 18-20% open pompvijzel en 10-25% turbinevijzel) en het laagste voor paling (3-5% gesloten pompvijzel, 1,5-3% open pompvijzel en 0,5-4% turbinevijzel). Paling heeft een opvallend lagere kans om direct te sterven ten gevolge van passage van de vijzels dan de andere soorten (blankvoorn, brasem en forel). De palingen hebben echter wel ook tussen de 3 en 20% kans om zwaar beschadigd te geraken tijdens hun passage door de vijzels.

Verder geldt dat de kans dat een vis sterft (of zwaar beschadigd raakt) (afhankelijk van de soort), beïnvloed wordt door het type vijzel waarop hij verpompt wordt. Voor sommige soorten is dit bovendien afhankelijk van het debiet waarop hij geturbineerd wordt. Bovendien kan ook de lengte van de vis een invloed hebben op de sterftekans. Toch kan er over de soorten heen geen eenduidig patroon gevonden worden in de effecten van debiet en/of vislengte, waardoor het niet mogelijk is om aanbevelingen te formuleren naar pomp- of turbinebeheer toe die de directe impact van de pomp- en waterkrachtcentrale op vis zou kunnen minimaliseren.

B. Hoe groot is de **kans dat een vis zwaar beschadigd geraakt** ten gevolge van een passage van de installatie bij pompwerking en bij turbinewerking?

De kans dat er zware verwondingen vastgesteld worden bij vissen na vijzeldoorgang bij pompen bedraagt gemiddeld tussen 5 en 15%, en bij turbineren tussen 14 en 17%.

De kansen op zware schade zijn gelijklopend aan de kansen op directe sterfte. Afhankelijk van de soort en het debiet waarop gepompt of geturbineerd wordt, kunnen ze wel groter of kleiner zijn dan de kans op directe sterfte. De kans op zware schade is wel telkens groter dan de kans op directe sterfte bij passage door de pompen, terwijl dit bij passage door de turbines niet zo is.

De directe impact van de vijzels in termen van verlies (sterfte of zware schade samen) hangt sterk af van de vissoort, maar gemiddeld over alle soorten en debieten ligt het verlies na pompen met de gesloten vijzel (buisvijzel) tussen 6 en 16%, met de open vijzels tussen 13 en 27%, en na turbineren tussen 25 en 44%. Deze getallen houden rekening met de observaties in de experimenten met gedwongen en ongedwongen passages en ook de statistische berekende kansen.

C. Welke **types schade** worden waargenomen bij vissen die de installatie passeren bij pompwerking en bij turbinewerking?

Er is geen verschil in schadetypes tussen pompen en turbineren. In beide gevallen bestaat de lichte schade vooral uit beperkt schubverlies, en de zware schade uit kneuzingen. De andere types schade komen nauwelijks voor. Ongeveer de helft tot meer dan de helft van de vissen zijn bovendien onbeschadigd en levend na passage door de pomp- en waterkrachtcentrale. De exacte proporties levende en onbeschadigde vissen verschillen van soort tot soort, maar zijn telkens het grootst voor paling.

Kneuzingen zijn een type schade dat ook wel 'knijpschade' genoemd wordt. Ze worden veroorzaakt doordat vissen ergens tussen gekneld raken. In het geval van Archimedes schroeven kunnen vissen gekneld raken tussen de vijzels zelf en hun behuizing, en dit zowel tijdens passage als op het moment dat ze in de vijzel terecht komen. Er kan uit deze studie verder niet afgeleid worden wat de kneuzingen in dit geval veroorzaakt. In een parallelstudie wordt getracht hier een idee van te krijgen met behulp van sensoren (barotrauma detectie sensoren) die o.a. druk en drukverschillen meten tijdens passage door de vijzels. De observatie van kneuzingen bij passage door de gesloten buisvijzel wijst er echter wel op dat er sowieso bij ingang in de vijzel beschadiging optreedt. Er zijn enkele technieken voorhanden die deze schade zouden kunnen beperken en daarmee de directe impact van dit type installatie zouden kunnen verkleinen. Deze technieken zijn bijvoorbeeld het aanbrengen van rubber aan de eerste schroeven van de vijzel, of een aanpassing van de vorm van deze schroeven naar een axiaalwaaier.

D. Is er een **verschil in kans** op sterfte en verlies door zware schade voor een vis die de open Archimedes vijzels passeert bij pompwerking en turbinewerking **naargelang het debiet** waarop de vijzels draaien? En is dit effect afhankelijk van de **lengte van de vis**?

Afhankelijk van de soort werden er wel of geen significante effecten gevonden van het debiet op de sterfte- en verlieskansen van vissen die de vijzels passeren, en dit zowel bij de pompen als de turbines. Hetzelfde gold voor de lengte van de vissen. Toch kan algemeen aangenomen worden dat zelfs wanneer een significant effect gevonden werd, dit effect niet erg groot was. Bovendien was er geen eenduidig patroon op te merken in de effecten, waardoor men bijvoorbeeld kan stellen dat pompen of turbineren op het ene of andere debiet altijd beter is. Dit betekent dat er op basis van deze studie geen concrete aanbevelingen gedaan worden met betrekking tot het beheer van de pompen en turbines wat het debiet betreft. Aanbevelingen die de directe impact van de installatie kunnen verkleinen situeren zich in technische aanpassingen van de vijzels zelf (zie boven).

E. Is er een significant kleinere kans op sterfte en verlies door zware schade voor een vis die de pompen passeert door de **gesloten Archimedes vijzel**, versus de **open Archimedes vijzels**?

Enkel blankvoorn heeft een significant kleinere kans op sterfte na passage door de gesloten Archimedes vijzel. Voor brasem en paling werd geen significant effect waargenomen. Hoewel zeer weinig brasems en palingen stierven ten gevolge van passage door de gesloten (en ook open vijzels) bij pompen, hadden ze wel een zekere kans op zware schade.

Totale impact van de pomp- en waterkrachtcentrale op de aanwezige visfauna in het Albertkanaal

F. **Hoeveel vissen passeren** de installatie bij pompwerking en hoeveel bij turbinewerking op 24u tijd?

Per miljoen m³ opgepompt water passeren er gemiddeld 131 vissen door de gesloten vijzel (buisvijzel) en 69 door een open vijzel. Per miljoen m³ geturbineerd water passeren er gemiddeld 28 vissen de vijzel.

G. **Hoeveel** van de gepasseerde vissen zijn **dood of zwaar beschadigd** (totaal verlies)?

Op basis van de berekeningen voor de toekomstscenario's betekent dit een verlies tussen 1 en 1.5% van het visbestand in het Albertkanaal als er in 2019 zes pominstallaties met open pompen tegelijk in werking zouden zijn. Voor turbineren is dat tussen 7,5 en 10% van het visbestand in het Albertkanaal. Deze getallen zouden overeenkomen met respectievelijk gemiddeld 180 kg (pompen) en 1 200 kg (turbineren) vis. In het slechtste geval loopt dit tegen 2050 bij pompen op tot 15% van het visbestand of 2 ton vis (droog jaar), en bij turbineren tot 33,5% van het visbestand of 5 ton vis (nat jaar).

H. Hoe verhoudt dit aandeel **sterfte en zware schade** (totaal verlies) zich tot de sterfte en schade die geobserveerd wordt in het onderzoeksluik naar de **directe impact** van de installatie op passerende vissen?

De gemiddelde sterfte en verliescijfers voor natuurlijke versus gedwongen passage wijzen op een kleinere sterfte en verlieskans voor natuurlijke passage. Echter, deze twee groepen mogen niet 1 op 1 met elkaar vergeleken worden, omdat bij de sterfte en verlieskansen op de gedwongen passage veel beter rekening gehouden kon worden met variaties op deze kansen, terwijl deze bij natuurlijke passage uitsluitend gebaseerd zijn op waarnemingen van enkele gepasseerde vissen.

I. Wat zijn de verliezen die in de toekomst verwacht kunnen worden o.b.v. de geobserveerde (en berekende) sterfte- en schade(kansen) van beide onderzoeksluiken in verhouding tot toekomstscenario's m.b.t. het volume water dat verpompt of geturbineerd zal/kan worden?

Zie antwoord op vraag G.

J. Wat is het aandeel migrerende paling en zalm dat op weg naar zee langs de waterkrachtcentrale passeert?

18% van de schieralen maken gebruik van de vijzels in turbinemodus (bij 100% activiteitsgraad van de WKC). Van de gezenderde zalmsmolts passeerde geen enkele langs de waterkrachtcentrale op zijn weg stroomafwaarts naar zee.

7 Referenties

Arnell, N. W. 2004. Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios. Global Environmental Change 14: 31–52.

Baeyens, R. 2016. Spawning migration onset of silver-stage eel (Anguilla anguilla) in the Albert Canal (Belgium). MSc thesis, Open Universiteit Nederland .

Baeyens, R., D. Buysse, A. Mouton, E. Gelaude, N. De Maerteleire, K. Robberechts, Y. Jacobs, T. Van den Neucker, M. Stevens, & J. Coeck. 2013. Evaluatie van een 'de Wit'-aanpassing bij een conventioneel vijzelgemaal: Isabellagemaal (Boekhoute). Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek .

Baeyens, R., D. Buysse, M. Stevens, A. Mouton, E. Gelaude, S. Martens, Y. Jacobs, & J. Coeck, 2011. Onderzoek naar de verwondingen bij vissen veroorzaakt door een gemaal met vijzels: Isabellagemaal (Boekhoute). INBO.R.2011.7 .

Baeyens, R., I. S. Pauwels, & J. Coeck. 2017. Monitoring van de effecten van de pompinstallatie en waterkrachtcentrale te Ham op het visbestand in het Albertkanaal. Voorlopige analyse van de visfauna-gegevens in functie van de aanleg van viswering. Voortgangsverslag januari .

Behrmann-Godel, J., & Eckmann, R. 2003. A preliminary telemetry study of the migration of silver European eel (Anguilla anguilla L.) in the River Mosel, Germany. Ecology of Freshwater Fish 12: 196–202.

Besson, M., T. Trancart, A. Acou, F. Charrier, V. Mazel, A. Legault, & E. Feunteun. 2016. Disrupted downstream migration behaviour of European silver eels (Anguilla anguilla, L.) in an obstructed river. Environmental Biology of Fishes .

Boys, C.A., Pflugrath, B.D., Mueller, M., Pander, J., Deng, Z.D., Geist, J. 2018. Physical and hydraulic forces experienced by fish passing through three different low-head hydropower turbines. Marine and Freshwater Research 69(12): 1934-1944. https://doi.org/10.1071/MF18100

Buysse, D., A. M. Mouton, M. Stevens, T. den Neucker, & J. Coeck. 2014. Mortality of European eel after downstream migration through two types of pumping stations. Fisheries Management and Ecology 21: 13–21.

Calles, O., Greenberg, L. 2009. Connectivity is a two-way street-the need for a holistic approach to fish passage problems in regulated rivers. River Research and Applications, 25: 1268-1286. DOI: 10.1002/rra.1228.

Coeck, J., S. Colazzo, P. Meire, & R. Verheyen. 2000. Herintroductie en herstel van kopvoornpopulaties (Leuciscus cephalus) in het Vlaamse Gewest. Wetenschappelijke opvolging van lopende projecten en onderzoek naar de habitatbinding in laaglandrivieren. Rapport Universiteit Antwerpen – UIA, dept. Biologie & Instituut voor Natuurbehoud IN.2000.15. Brussel .

de Boer, M. B. E., & M. J. Kroes. 2013. Onderzoek vispassage boezemgemaal Halfweg Monitoring en optimalisatie bedieningsprotocol vispassage: Najaarsmigratie (uittrek) 2012 en voorjaarsmigratie (intrek) 2013. Tauw .

Durif, C., S. Dufour, & P. Elie. 2005. The silvering process of Anguilla anguilla: a new classification from the yellow resident to the silver migrating stage. Journal of Fish Biology 66: 1025–1043.

Egg, L., M. Müller, J. Pander, J. Knott, & J. Geist. 2017. Improving European Silver Eel (Anguilla anguilla) downstream migration by undershot sluice gate management at a small-scale hydropower plant. Ecological Engineering 106: 349–357.

Freyhof, J., & E. Brooks. 2011. European Red List of Freshwater Fishes. Luxembourg: Publications Office of the European Union .

Gelman, A., J. Hwang, & A. Vehtari. 2014. Understanding predictive information criteria for Bayesian models. Statistics and Computing 24: 997–1016.

Gosset, C., Travade, F., Durif, C., Rives, J., & Elie, P. 2005. Tests of two types of bypass for downstream migration of eels at a small hydroelectric power plant. River Research and Applications 21: 1095–1105.

Haro, A., M. Odeh, J. Noreika, & T. Castro-Santos. 1998. Effect of Water Acceleration on Downstream Migratory Behavior and Passage of Atlantic Salmon Smolts and Juvenile American Shad at Surface Bypasses. Transactions of the American Fisheries Society 127: 118–127.

Illian, J.B., Sørbye, S.H., & Rue, H. 2012. A toolbox for fitting complex spatial point process models using integrated nested laplace approximations (INLA). The Annals of Applied Statistics, 6 (4): 1499–1530. JSTOR, www.jstor.org/stable/41713484.

Jansen, H., H. V. Winter, M. Bruijs, & H. Polman. 2007. Just go with the flow? Route selection and mortality during downstream migration of silver eels in relation to river discharge. ICES Journal of Marine Science 64:.

Kemper, J. H., & H. Vis. 2010. Sonaronderzoek naar het visbestand in het Albertkanaal in het Vlaamse Gewest (zomer 2010). VisAdvies BV, Nieuwegein. Projectnummer VA2010_21, 11 pag.

Kibel, P., & T. Coe, 2011. Archimedean Screw risk assessment: strike and delay probabilities. Fishtek Consulting .

Kroes, M. J., & M. B. E. de Boer. 2013. Onderzoek naar viswering en visgeleiding bij 7 gemalen in Nederland. Tauw.

Northcote, T. G. 1984. Mechanisms of Fish Migration in Rivers In McCleave, J. D., G. P. Arnold, J. J. Dodson, & W. H. Neill (eds), Mechanisms of Migration in Fishes. Springer US, Boston, MA: 317–355, https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2763-9_20.

Nzau Matondo, B., J. P. Benitez, A. Dierckx, J. C. Philippart, & M. Ovidio. 2016. Assessment of the Entering Stock, Migration Dynamics and Fish Pass Fidelity of European Eel in the Belgian Meuse River. River Research and Applications 33: 292–301.

Piper, A.T., Rosewarne, P.J., Wright, R.M., Kemp, P.S. 2018. The impact of an Archimedes screw hydropower turbine on fish migration in a lowland river. Ecological Engineering 118: 31-42. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.04.009.

R Core Team. 2019. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation f or Statistical Computing, Vienna, Austria. URL https://www.R-project.org/.

Van Thuyne, G. 2008. Visbestandopnames op het Albertkanaal. INBO.IR.2009.13 .

Vanfraechem, S. 2003. Goede nabuurschap?: de waterverdragen tussen België en Nederland 1960-2002. Academia Pess, Gent.

Vergeynst, J., R. Baeyens, J. Coeck, I. S. Pauwels, I. Nopens, A. Mouton, & T. De Mulder. 2018. Fish behaviour in the vicinity of a navigation lock complex: the challenges. International Symposium on Hydraulic Structures 8:.

Verhaegen, K., S. Weyns, K. Bluekens, M. Van Rompaey, I. Darras, N. Aerts, E. Kuijken, & B. Frederix. 2009. Project-Milieueffectenrapport voor de bouw een werking van pompinstallaties en waterkrachtcentrales op de sluizencomplexen van het Albertkanaal. Technum Hasselt .

Verhaegen, K., Bluekens, K., Van Rompaey, M., Darras, I., Aerts, N., Kuijken, E., & Frederix, B. 2009. Project-Milieueffectenrapport voor de bouw en werking van pompinstallaties en waterkrachtcentrales op de sluizencomplexen van het Albertkanaal. Technum, Hasselt.

Verhelst, P., R. Baeyens, J. Reubens, J. P. Benitez, J. Coeck, Goethals, P., M. Ovidio, J. Vergeynst, Moens, T., & A.M. Mouton. 2018. European silver eel (Anguilla anguilla L.) migration behaviour in a highly regulated shipping canal. Fisheries Research 206: 176–184.

Vis, H., Q. A. A. de Bruijn, & J. H. Kemper. 2013. Onderzoek naar de visoverleefbaarheid bij vijzelgemaal Ennemaborgh. .

Visser, E. C., & M. J. Kroes. 2016. Onderzoek naar het visbestand in het Albertkanaal 2012-2015. Eindrapport. Tauw.

Vriese, F. T. 2009. Onderzoek naar de visveilige axiaalpomp en buisvijzel. Visadvies .

Winter, H.V., Jansen, H.M., Bruijs, M.C.M. 2006. Assessing the impact of hydropower and fisheries on downstream migrating silver eel, Anguilla anguilla, by telemetry in the river Meus. Ecology of Freshwater Fish, 15 (2): 221-228.https://doi.org/10.1111/j.1600-0633.2006.00154.x

Winter, H. V., H. M. Jansen, & A. W. Breukelaar. 2007. Silver eel mortality during downstream migration in the River Meuse, from a population perspective. ICES Journal of Marine Science 64: 1444–1449.

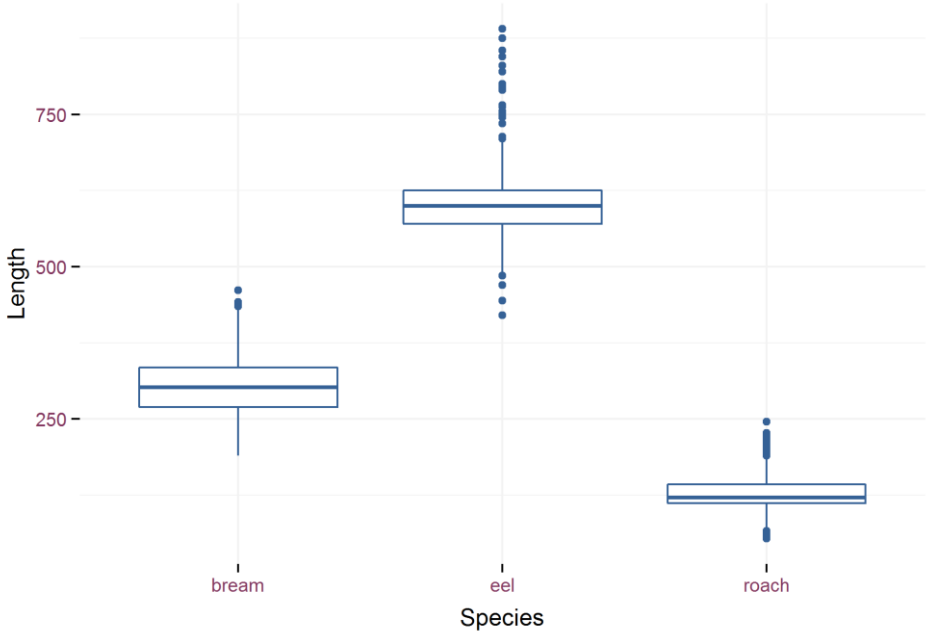
8 Bijlagen

8.1 Algemeen

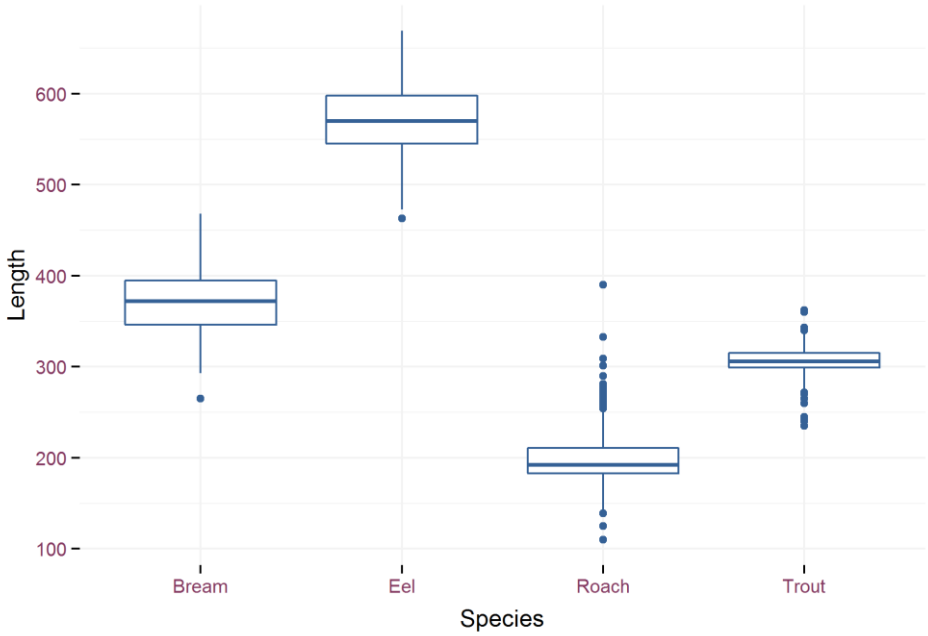
De **opvangconstructies** werden uit duurzame materialen gemaakt zodat ze later indien nodig ook nog op andere locaties ingezet kunnen worden. De metalen vangkooi en alle frames werden daarom ook gegalvaniseerd en gelakt. Het INBO heeft in samenwerking met zijn onderaannemer Fishflow Innovations/G.A.M. Manshanden Productie B.V., na een terreinbezoek, een fuikconstructie ontworpen voor de evaluatie van de turbinewerking, die ter goedkeuring werd voorgelegd aan de opdrachtgever, DVW. Het INBO en zijn onderaannemer Fishflow Innovations/G.A.M. Manshanden Productie B.V stonden in voor de productie van de fuiken.

Met betrekking tot het gebruik van proefdieren beschikt het INBO over een erkenning van de Ethische Commissie, conform aan de wetgeving van de proefdierkunde (erkenning: LA1400559). Er werd voor aanvang van de proeven een 'aanvraagdossier voor de ethische evaluatie van dierproeven' ter goedkeuring voorgelegd aan de Ethische Commissie. Dit aanvraagdossier werd goedgekeurd.

8.2 Lengteverdeling proefvissen experimenten gedwongen passage

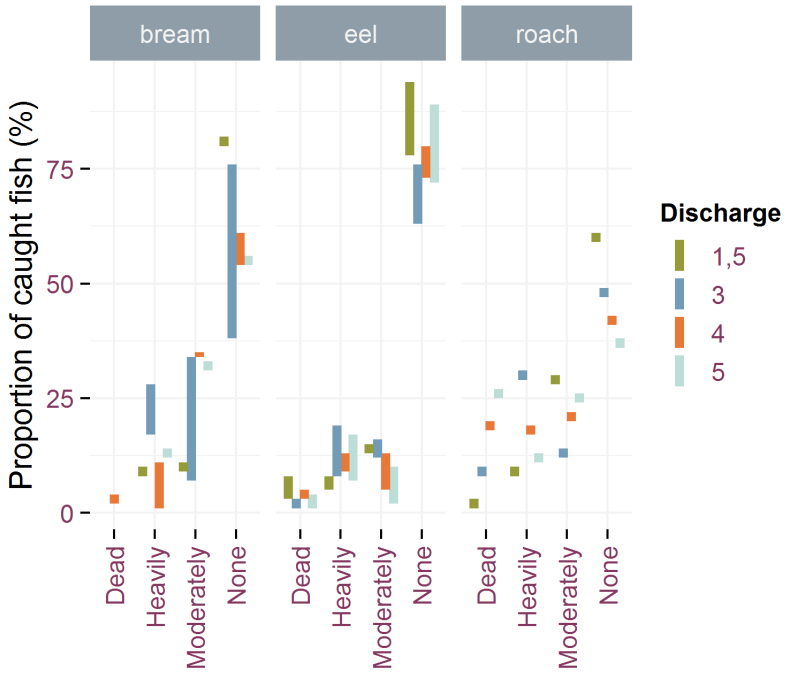


Figuur 56: Lengte (mm) verdeling van de geteste individuen per soort voor de experimenten met gedwongen passage bij pompwerking.

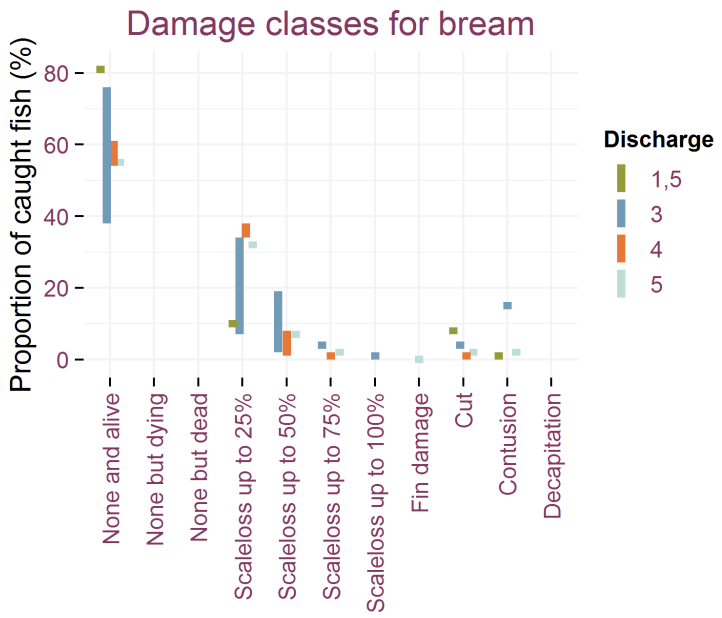


Figuur 57: Lengte (mm) verdeling van de geteste individuen per soort voor de experimenten met gedwongen passage bij turbinewerking.

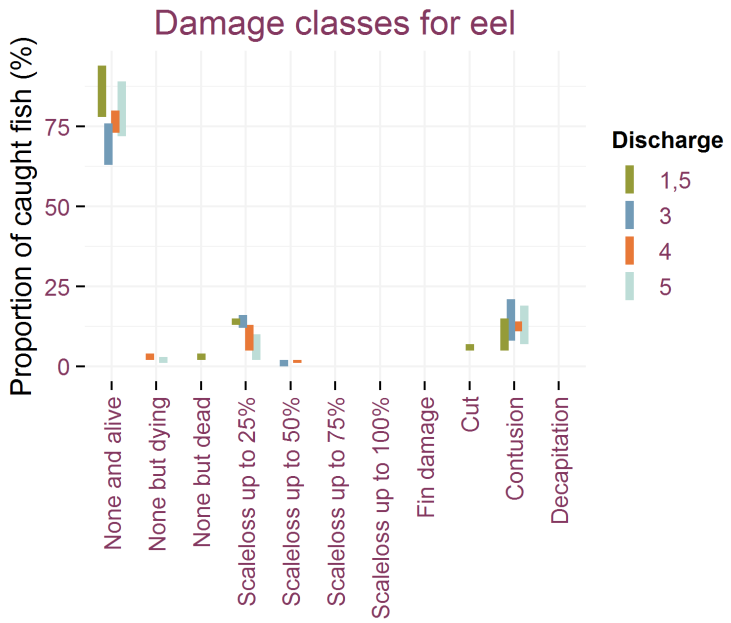
8.3 Schadegroepen en schadeklassen gedwongen passage pompen per debiet



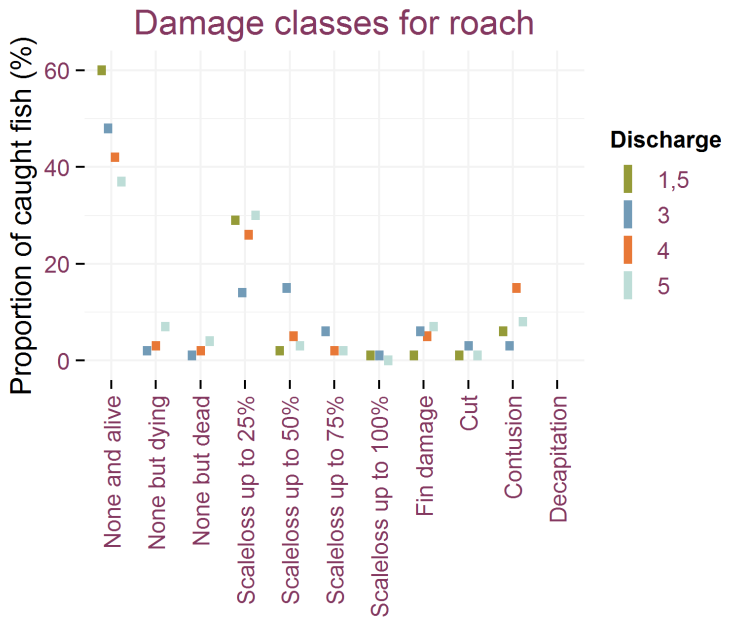
Figuur 58: Het percentage dode ('dead'), en zwaar ('heavily'), lichte ('moderately') en niet ('none') beschadigde dieren van het totaal aantal teruggevangen dieren na gedwongen passage door de pomp per debiet. Voor brasem en paling werden herhalende testen uitgevoerd, maar voor blankvoorn niet. De balkjes visualiseren de range tussen het kleinste en grootste percentage van de verschillende herhalende testen (bij brasem en paling) per debiet. De gesloten vijzel komt overeen met een debiet van 1,5 m³/s, de andere debieten betreffen passage door de open vijzels. Afwezigheid van een balkje betekent dat de proportie 0 % was binnen deze klasse.



Figuur 59: Het percentage aan niet-beschadigde dieren (dood, stervend of levend) en dieren met schubverlies (tot 25, 50, 75 en 100% van hun lichaamsoppervlak), vinschade, snijwond(en), kneuzing(en) en onthoofding van het totaal aantal teruggevangen brasems na gedwongen passage door de pomp per debiet. De balkjes visualiseren de range tussen het kleinste en grootste percentage van de verschillende herhalende testen per debiet. De gesloten vijzel komt overeen met een debiet van 1,5 m³/s, de andere debieten betreffen passage door de open vijzels. Afwezigheid van een balkje betekent dat de proportie 0 % was binnen deze klasse.



Figuur 60: Het percentage aan niet-beschadigde dieren (dood, stervend of levend) en dieren met schubverlies (tot 25, 50, 75 en 100% van hun lichaamsoppervlak), vinschade, snijwond(en), kneuzing(en) en onthoofding van het totaal aantal teruggevangen palingen na gedwongen passage door de pomp per debiet. De balkjes visualiseren de range tussen het kleinste en grootste percentage van de verschillende herhalende testen per debiet. De gesloten vijzel komt overeen met een debiet van 1,5 m^3/s, de andere debieten betreffen passage door de open vijzels. Afwezigheid van een balkje betekent dat de proportie 0 % was binnen deze klasse.



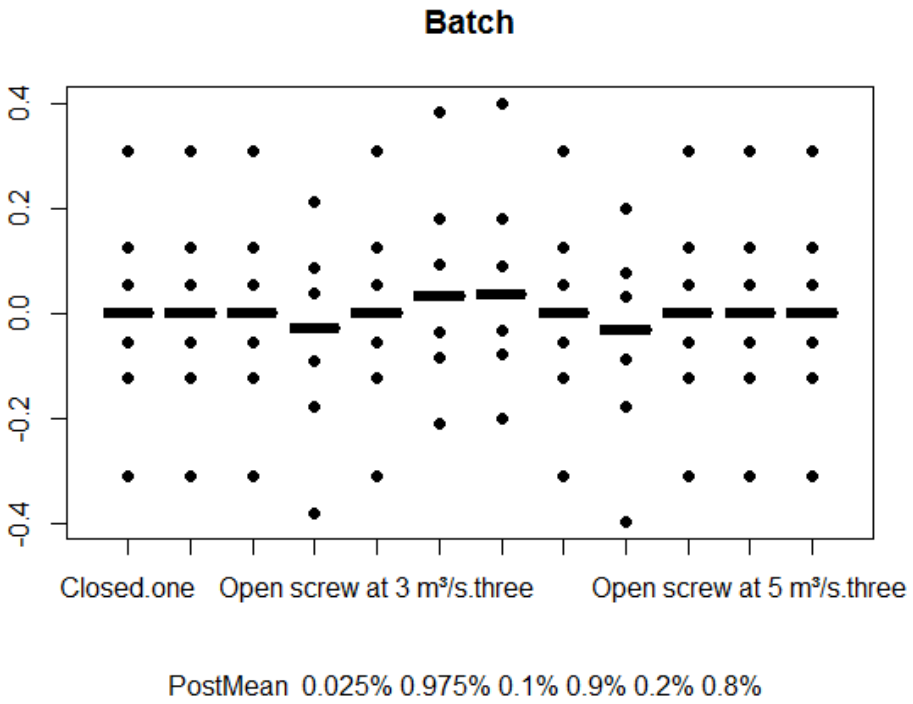
Figuur 61: Het percentage aan niet-beschadigde dieren (dood, stervend of levend) en dieren met schubverlies (tot 25, 50, 75 en 100% van hun lichaamsoppervlak), vinschade, snijwond(en), kneuzing(en) en onthoofding van het totaal aantal teruggevangen blankvoorns na gedwongen passage door de pomp per debiet. De balkjes visualiseren de range tussen het kleinste en grootste percentage van de verschillende herhalende testen per debiet. De gesloten vijzel komt overeen met een debiet van 1,5 m³/s, de andere debieten betreffen passage door de open vijzels. Afwezigheid van een balkje betekent dat de proportie 0 % was binnen deze klasse.

8.4 Statistische testen: parameterwaarden

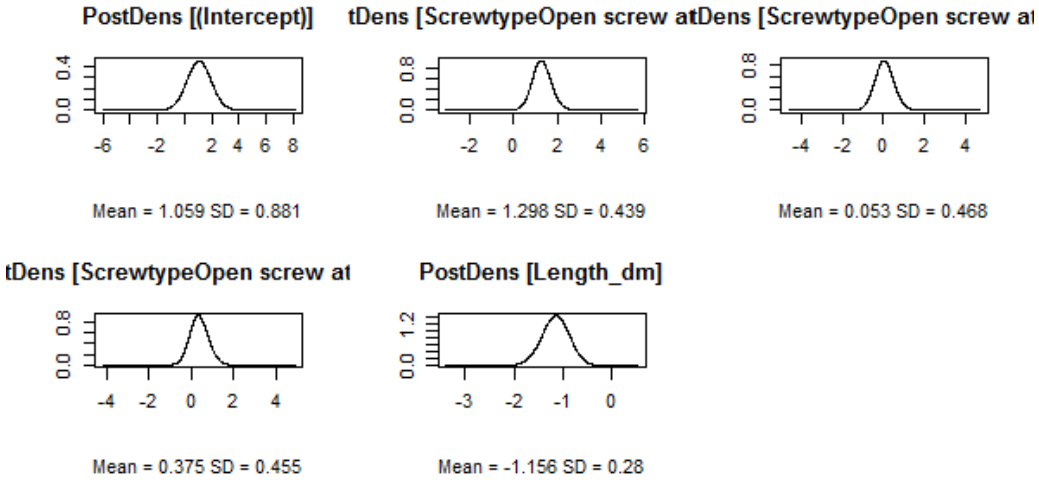
8.4.1 Statistische test verlieskans verpompte brasem

Tabel 27: WAIC waarden voor de zes geteste modellen voor brasem die gedwongen doorgevoerd werd door de gesloten vijzel en de open vijzels op 3, 4 en 5 m³/s. Kolom één geeft de variabelen die in het model getest werden, kolom twee geeft aan of er wel (random effect ja) of geen (random effect nee) rekening gehouden werd met een potentiële correlatie van resultaten binnen de herhalende testen, en kolom drie geeft de waarde voor WAIC waarbij het laagste getal op het beste model wijst, en een verschil tussen twee modellen van minder dan twee verwaarloosbaar is.

Model_variabelen	Random effect	WAIC
Vijzeltype	Ja	573.2982
Vijzeltype, vis lengte	Ja	556.8855
Vijzeltype, vis lengte, vis gewicht	Ja	556.2783
Vijzeltype	Nee	573.8691
Vijzeltype, vis lengte	Nee	556.9131
Vijzeltype, vis lengte, vis gewicht	Nee	556.2826



Figuur 62: Posterior gemiddelde (verticale zwarte lijnen), en de 25%, 97%, 10%, 90%, 20% en 80% quantielen van de betrouwbaarheidsintervallen (zwarte punten) per herhalende test voor de pompproef met brasem. Enkel bij grote onderlinge verschillen in deze waarden tussen de testen moet men een effect veronderstellen van het uitvoeren van de test op het eindresultaat van de hele proef.



Figuur 63: De densiteitsverdeling van de geschatte parameterwaarden van het model voor brasem bij pompwerking per geteste variabele (gesloten vijzel links boven, open vijzel op 3 m³/s midden boven, open vijzel op 4 m³/s rechts boven, open vijzel op 5 m³/s links onder en vis lengte rechts onder). Wanneer het cijfer 0 in minder dan 95%van de gevallen voorkomt (en dus buiten de curve valt), dan wijst dit op een significant effect van de betreffende variabele. In dit geval gebeurt dat bij geen enkele variabele, al is het op het

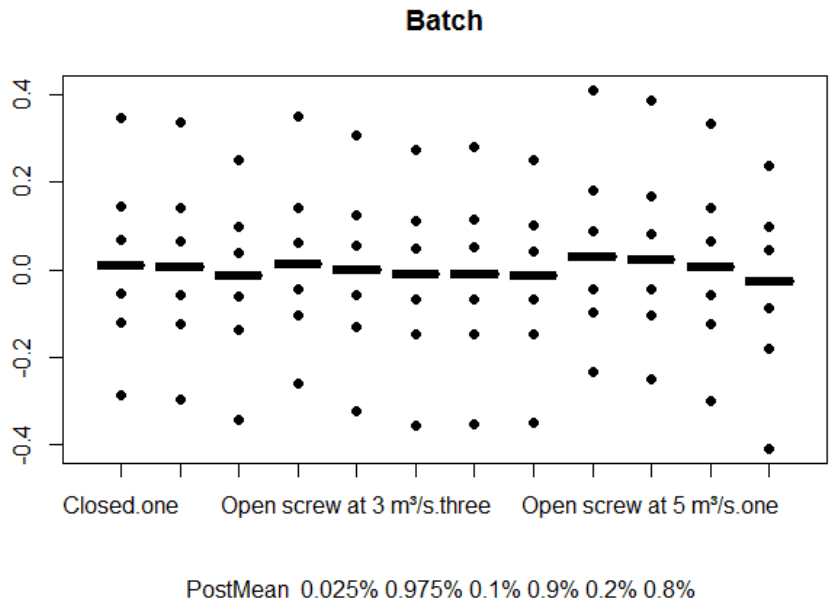
randje voor de gesloten vijzel en de open vijzel op 3 m³/s, die mogelijks een zeer licht negatief significant effect hebben op de sterftekans voor paling.

8.4.2 Statistische test sterftekans verpompte paling

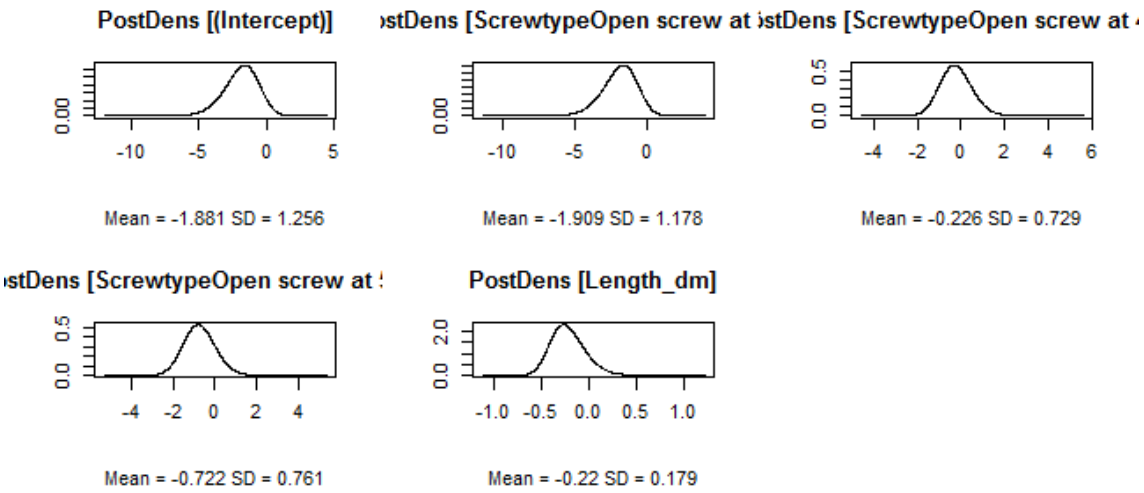
Hieronder worden de verdere details meegegeven van de statistische test voor paling bij pompwerking, die bepalend waren in de keuze van het beste model en het trekken van de conclusies.

Tabel 28: WAIC waarden voor de zes geteste modellen voor paling die gedwongen doorgevoerd werd door de gesloten vijzel en de open vijzels op 3, 4 en 5 m³/s. Kolom één geeft de variabelen die in het model getest werden, kolom twee geeft aan of er wel (random effect ja) of geen (random effect nee) rekening gehouden werd met een potentiële correlatie van resultaten binnen de herhalende testen, en kolom drie geeft de waarde voor WAIC waarbij het laagste getal op het beste model wijst, en een verschil tussen twee modellen van minder dan twee verwaarloosbaar is.

Model_variabelen	Random effect	WAIC
Vijzeltype	Ja	150.1098
Vijzeltype, vis lengte	Ja	151.3144
Vijzeltype, vis lengte, vis gewicht	Ja	151.3844
Vijzeltype	Nee	150.0446
Vijzeltype, vis lengte	Nee	151.2871
Vijzeltype, vis lengte, vis gewicht	Nee	151.3588



Figuur 64: Posterior gemiddelde (verticale zwarte lijnen), en de 25%, 97%, 10%, 90%, 20% en 80% quantielen van de betrouwbaarheidsintervallen (zwarte punten) per herhalende test voor de pompproef met paling. Enkel bij grote onderlinge verschillen in deze waarden tussen de testen moet men een effect veronderstellen van het uitvoeren van de test op het eindresultaat van de hele proef.

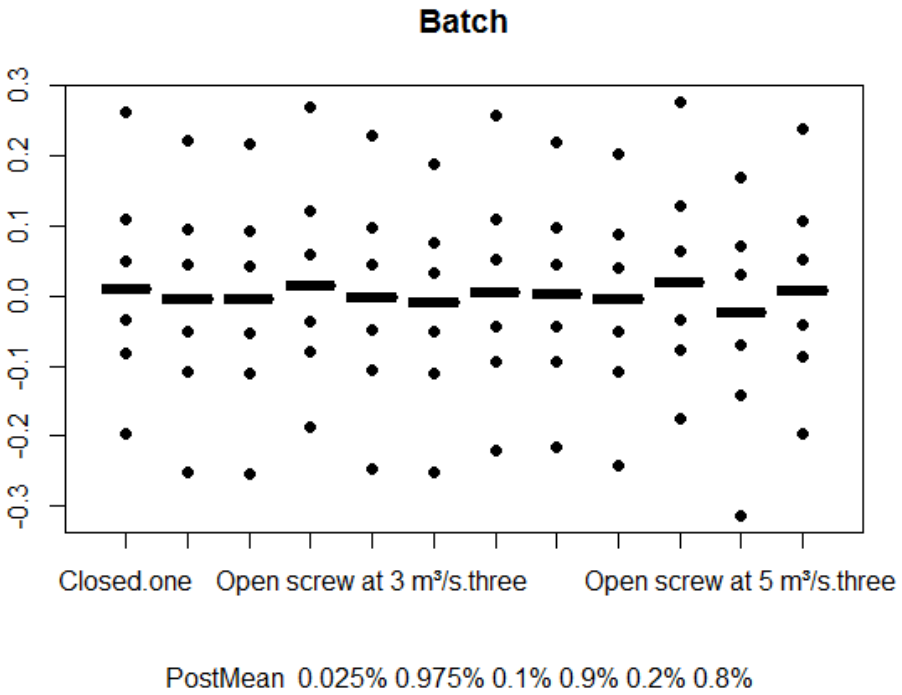


Figuur 65: De densiteitsverdeling van de geschatte parameterwaarden van het model voor paling bij pompwerking per geteste variabele (gesloten vijzel links boven, open vijzel op 3 m³/s midden boven, open vijzel op 4 m³/s rechts boven, open vijzel op 5 m³/s links onder en vis lengte rechts onder). Wanneer het cijfer 0 in minder dan 95%van de gevallen voorkomt (en dus buiten de curve valt), dan wijst dit op een significant effect van de betreffende variabele. In dit geval gebeurt dat bij geen enkele variabele, al is het op het randje voor de gesloten vijzel en de open vijzel op 3 m³/s, die mogelijks een zeer licht negatief significant effect hebben op de sterftekans voor paling.

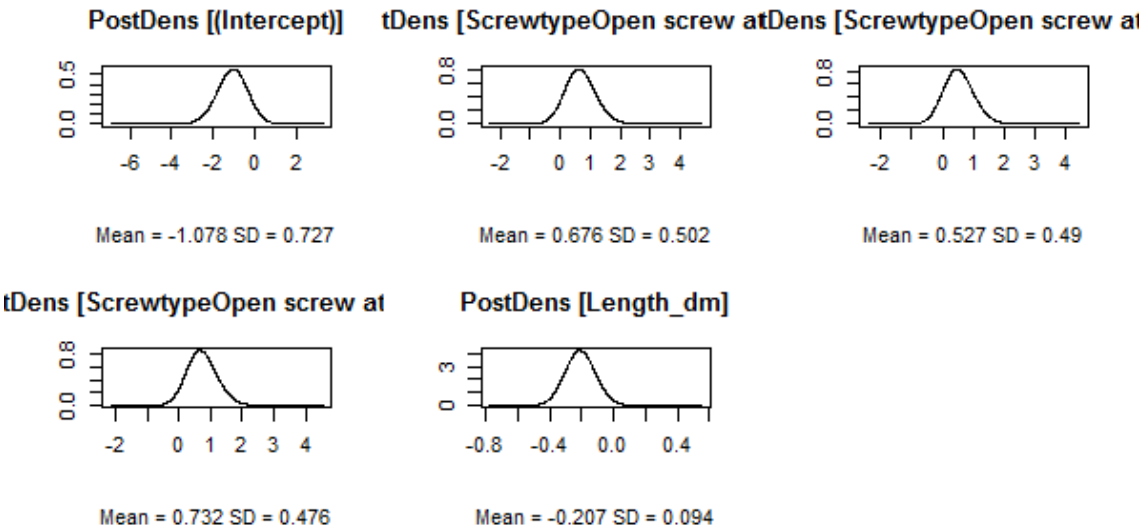
8.4.3 Statistische test verlieskans verpompte paling

Tabel 29: WAIC waarden voor de zes geteste modellen voor paling die gedwongen doorgevoerd werd door de gesloten vijzel en de open vijzels op 3, 4 en 5 m³/s. Kolom één geeft de variabelen die in het model getest werden, kolom twee geeft aan of er wel (random effect ja) of geen (random effect nee) rekening gehouden werd met een potentiële correlatie van resultaten binnen de herhalende testen, en kolom drie geeft de waarde voor WAIC waarbij het laagste getal op het beste model wijst, en een verschil tussen twee modellen van minder dan twee verwaarloosbaar is.

Model_variabelen	**Random effect**	**WAIC**
Vijzeltype	Ja	508.4655
Vijzeltype, vis lengte	Ja	506.1708
Vijzeltype, vis lengte, vis gewicht	Ja	506.1172
Vijzeltype	Nee	508.0213
Vijzeltype, vis lengte	Nee	505.6905
Vijzeltype, vis lengte, vis gewicht	Nee	505.6504



Figuur 66: Posterior gemiddelde (verticale zwarte lijnen), en de 25%, 97%, 10%, 90%, 20% en 80% quantielen van de betrouwbaarheidsintervallen (zwarte punten) per herhalende test voor de pompproef met paling. Enkel bij grote onderlinge verschillen in deze waarden tussen de testen moet men een effect veronderstellen van het uitvoeren van de test op het eindresultaat van de hele proef.



Figuur 67: De densiteitsverdeling van de geschatte parameterwaarden van het model voor paling bij pompwerking per geteste variabele (gesloten vijzel links boven, open vijzel op 3 m³/s midden boven, open vijzel op 4 m³/s rechts boven, open vijzel op 5 m³/s links onder en vis lengte rechts onder). Wanneer het cijfer 0 in minder dan 95%van de gevallen voorkomt (en dus buiten de curve valt), dan wijst dit op een significant effect van de betreffende variabele. In dit geval gebeurt dat bij geen enkele variabele, al is het op het

randje voor de gesloten vijzel en de open vijzel op 3 m³/s, die mogelijks een zeer licht negatief significant effect hebben op de sterftekans voor paling.

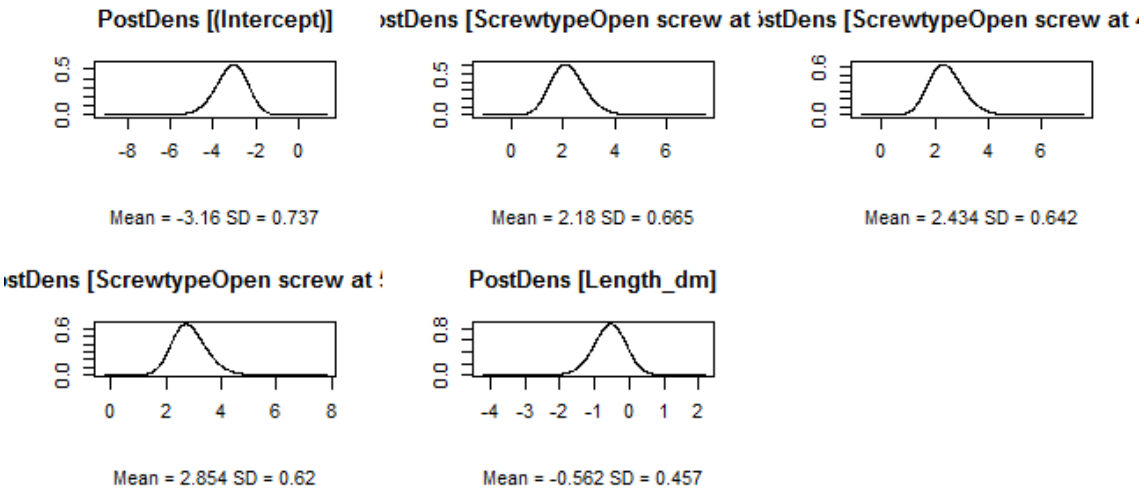
8.4.4 Statistische test sterftekans verpompte blankvoorn

Hieronder worden de verdere details meegegeven van de statistische test voor blankvoorn bij pompwerking, die bepalend waren in de keuze van het beste model en het trekken van de conclusies.

Bij de test met blankvoorn bij pompwerking, werden omwille van logistieke problemen geen herhalende testen uitgevoerd. Bijgevolg werden slechts drie modellen getest i.p.v. zes modellen bij de andere soorten, omdat modellen met een random effect nu niet mogelijk waren.

Tabel 30: WAIC waarden voor de drie geteste modellen voor blankvoorn die gedwongen doorgevoerd werd door de gesloten vijzel en de open vijzels op 3, 4 en 5 m³/s. Kolom één geeft de variabelen die in het model getest werden, en kolom drie geeft de waarde voor WAIC waarbij het laagste getal op het beste model wijst, en een verschil tussen twee modellen van minder dan twee verwaarloosbaar is. Er werden geen modellen getest met de variabele 'herhalende testen' als random effect (kolom twee) omdat voor deze soort geen herhalende testen uitgevoerd werden omwille van logistieke redenen.

Model_variabelen	Random effect	WAIC
Vijzeltype	Nee	469.2476
Vijzeltype, vis lengte	Nee	470.2007
Vijzeltype, vis lengte, vis gewicht	Nee	470.1896



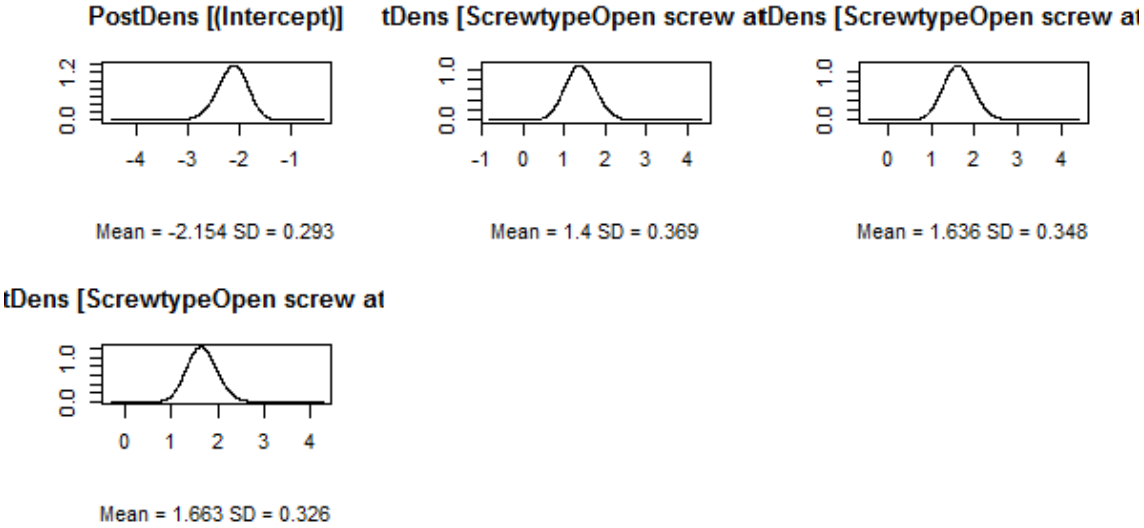
Figuur 68: De densiteitsverdeling van de geschatte parameterwaarden van het model voor blankvoorn bij pompwerking per geteste variabele (gesloten vijzel links boven, open vijzel op 3 m³/s midden boven, open vijzel op 4 m³/s rechts boven, open vijzel op 5 m³/s links onder en vis lengte rechts onder). Wanneer het cijfer 0 in minder dan 95%van de gevallen voorkomt (en dus buiten de curve valt), dan wijst dit op een significant effect van de betreffende variabele. In dit geval gebeurt dat bij alle variabelen (schroeftypes en debieten) behalve de lengte van de vis.

8.4.5 Statistische test verlieskans verpompte blankvoorn

Bij de test met blankvoorn bij pompwerking, werden omwille van logistieke problemen geen herhalende testen uitgevoerd. Bijgevolg werden slechts drie modellen getest i.p.v. zes modellen bij de andere soorten, omdat modellen met een random effect nu niet mogelijk waren.

Tabel 31: WAIC waarden voor de drie geteste modellen voor blankvoorn die gedwongen doorgevoerd werd door de gesloten vijzel en de open vijzels op 3, 4 en 5 m³/s. Kolom één geeft de variabelen die in het model getest werden, en kolom drie geeft de waarde voor WAIC waarbij het laagste getal op het beste model wijst, en een verschil tussen twee modellen van minder dan twee verwaarloosbaar is. Er werden geen modellen getest met de variabele 'herhalende testen' als random effect (kolom twee) omdat voor deze soort geen herhalende testen uitgevoerd werden omwille van logistieke redenen.

Model_variabelen	Random effect	WAIC
Vijzeltype	Nee	638.4257
Vijzeltype, vis lengte	Nee	640.1395
Vijzeltype, vis lengte, vis gewicht	Nee	639.9814



Figuur 69: De densiteitsverdeling van de geschatte parameterwaarden van het model voor blankvoorn bij pompwerking per geteste variabele (gesloten vijzel links boven, open vijzel op 3 m³/s midden boven, open vijzel op 4 m³/s rechts boven, open vijzel op 5 m³/s links onder en vis lengte rechts onder). Wanneer het cijfer 0 in minder dan 95%van de gevallen voorkomt (en dus buiten de curve valt), dan wijst dit op een significant effect van de betreffende variabele. In dit geval gebeurt dat bij alle variabelen (schroeftypes en debieten) behalve de lengte van de vis.

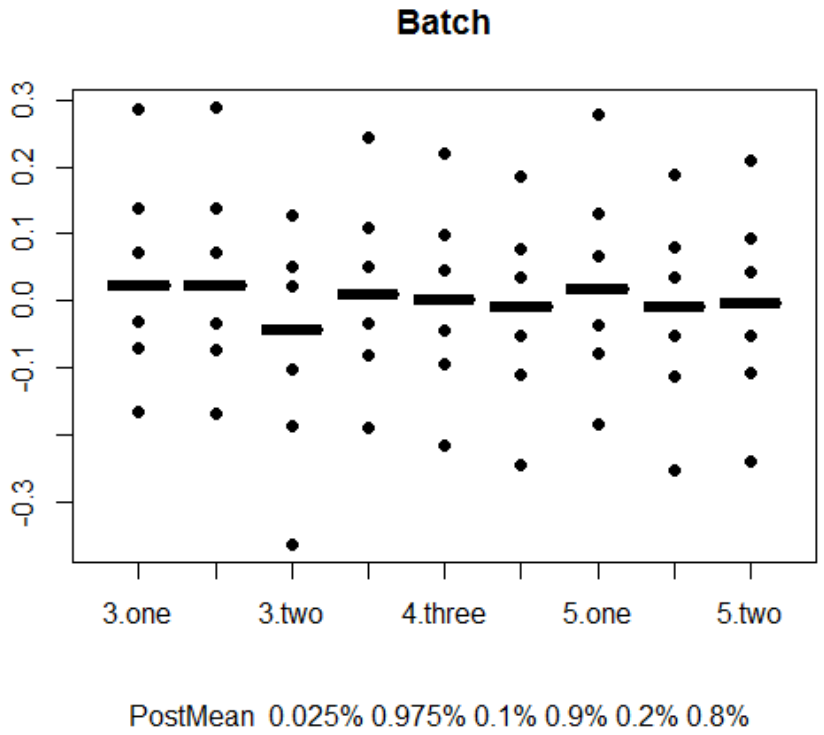
8.4.6 Statistische test sterftekans geturbineerde brasem

Hieronder worden de verdere details meegegeven van de statistische test voor brasem bij turbinewerking, die bepalend waren in de keuze van het beste model en het trekken van de conclusies.

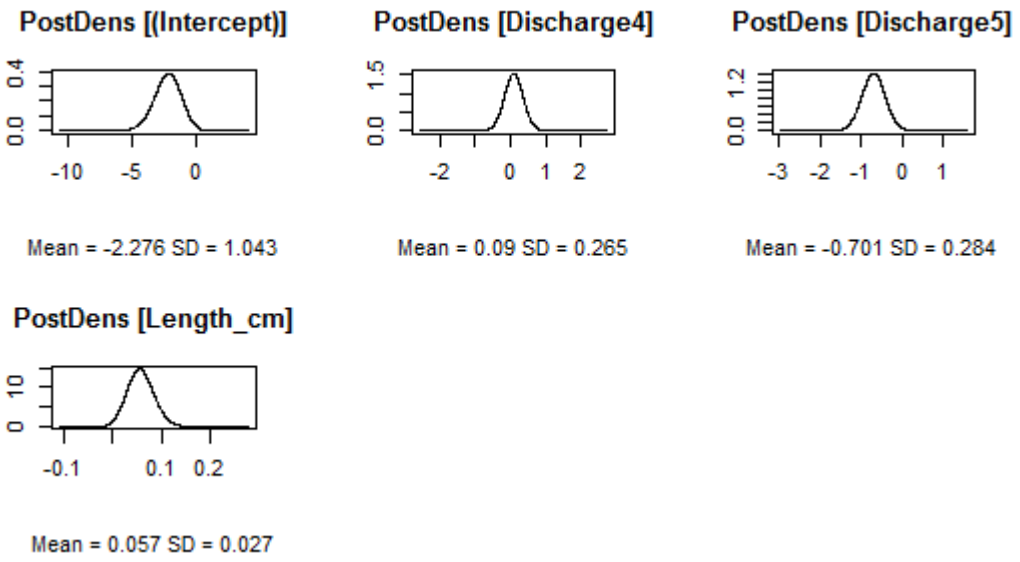
Tabel 32: WAIC waarden voor de zes geteste modellen voor brasem die gedwongen doorgevoerd werd door de open vijzels op 3, 4 en 5 m³/s bij turbinewerking. Kolom één geeft de variabelen die in het model getest werden, kolom twee geeft aan of er wel (random

effect ja) of geen (random effect nee) rekening gehouden werd met een potentiële correlatie van resultaten binnen de herhalende testen, en kolom drie geeft de waarde voor WAIC waarbij het laagste getal op het beste model wijst, en een verschil tussen twee modellen van minder dan twee verwaarloosbaar is.

Model_variabelen	**Random effect**	**WAIC**
Vijzeltype	Ja	512.5498
Vijzeltype, vis lengte	Ja	510.4031
Vijzeltype, vis lengte, vis gewicht	Ja	510.2879
Vijzeltype	Nee	512.1062
Vijzeltype, vis lengte	Nee	509.9840
Vijzeltype, vis lengte, vis gewicht	Nee	509.9127



Figuur 70: Posterior gemiddelde (verticale zwarte lijnen), en de 25%, 97%, 10%, 90%, 20% en 80% quantielen van de betrouwbaarheidsintervallen (zwarte punten) per herhalende test voor de turbineproef met brasem. Enkel bij grote onderlinge verschillen in deze waarden tussen de testen moet men een effect veronderstellen van het uitvoeren van de test op het eindresultaat van de hele proef.

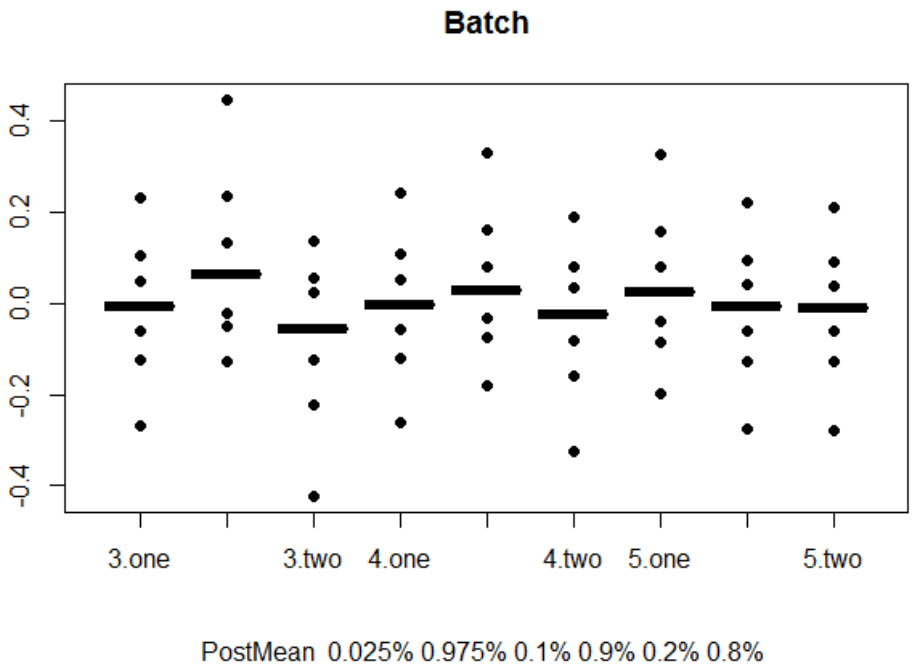


Figuur 71: De densiteitsverdeling van de geschatte parameterwaarden van het model voor brasem bij turbinewerking per geteste variabele (open vijzel op 3 m³/s links boven, open vijzel op 4 m³/s midden boven, open vijzel op 5 m³/s rechts boven en vis lengte links onder). Wanneer het cijfer 0 in minder dan 95%van de gevallen voorkomt (en dus buiten de curve valt), dan wijst dit op een significant effect van de betreffende variabele. In dit geval gebeurt dat bij de open vijzels op 3 en 5 m³/s in lichte mate, en de lengte van de vis.

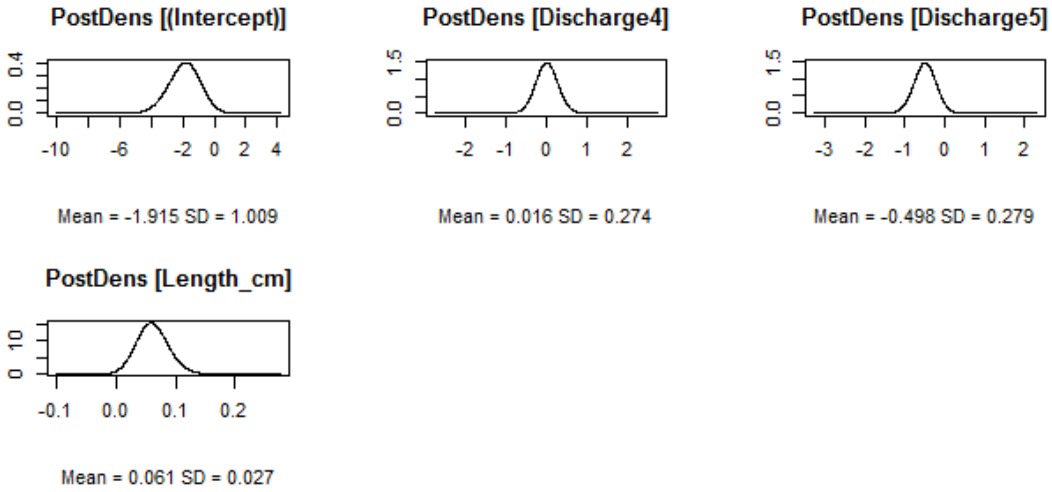
8.4.7 Statistische test verlieskans geturbineerde brasem

Tabel 33: WAIC waarden voor de zes geteste modellen voor brasem die gedwongen doorgevoerd werd door de open vijzels op 3, 4 en 5 m³/s bij turbinewerking. Kolom één geeft de variabelen die in het model getest werden, kolom twee geeft aan of er wel (random effect ja) of geen (random effect nee) rekening gehouden werd met een potentiële correlatie van resultaten binnen de herhalende testen, en kolom drie geeft de waarde voor WAIC waarbij het laagste getal op het beste model wijst, en een verschil tussen twee modellen van minder dan twee verwaarloosbaar is.

Model_variabelen	**Random effect**	**WAIC**
Vijzeltype	Ja	523.8946
Vijzeltype, vis lengte	Ja	520.4608
Vijzeltype, vis lengte, vis gewicht	Ja	523.6261
Vijzeltype	Nee	523.7347
Vijzeltype, vis lengte	Nee	520.3203
Vijzeltype, vis lengte, vis gewicht	Nee	523.4641



Figuur 72: Posterior gemiddelde (verticale zwarte lijnen), en de 25%, 97%, 10%, 90%, 20% en 80% quantielen van de betrouwbaarheidsintervallen (zwarte punten) per herhalende test voor de turbineproef met brasem. Enkel bij grote onderlinge verschillen in deze waarden tussen de testen moet men een effect veronderstellen van het uitvoeren van de test op het eindresultaat van de hele proef.

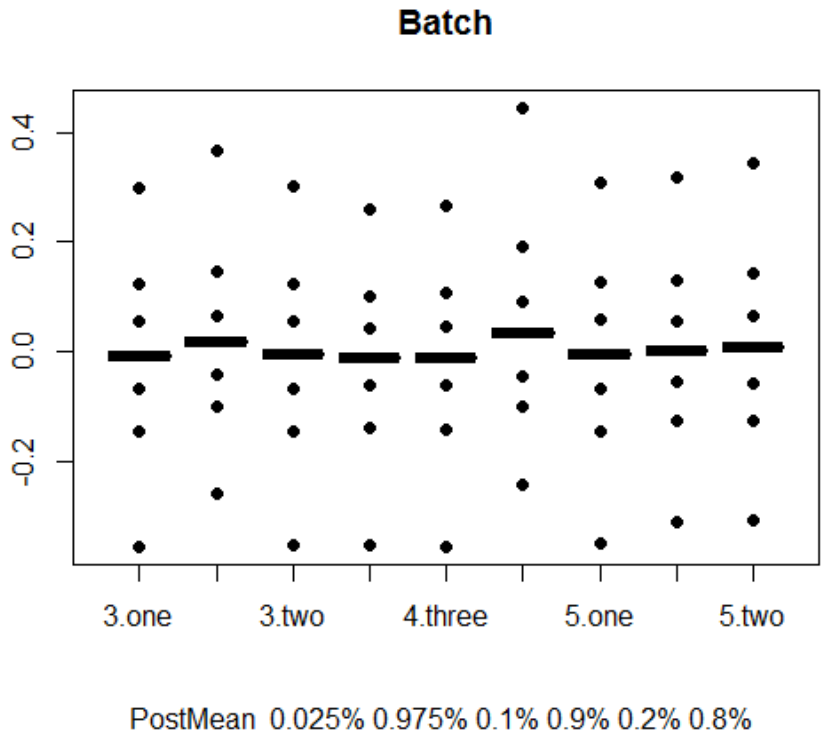


Figuur 73: De densiteitsverdeling van de geschatte parameterwaarden van het model voor brasem bij turbinewerking per geteste variabele (open vijzel op 3 m³/s links boven, open vijzel op 4 m³/s midden boven, open vijzel op 5 m³/s rechts boven en vis lengte links onder). Wanneer het cijfer 0 in minder dan 95%van de gevallen voorkomt (en dus buiten de curve valt), dan wijst dit op een significant effect van de betreffende variabele. In dit geval gebeurt dat bij de open vijzels op 3 en 5 m³/s in lichte mate, en de lengte van de vis.

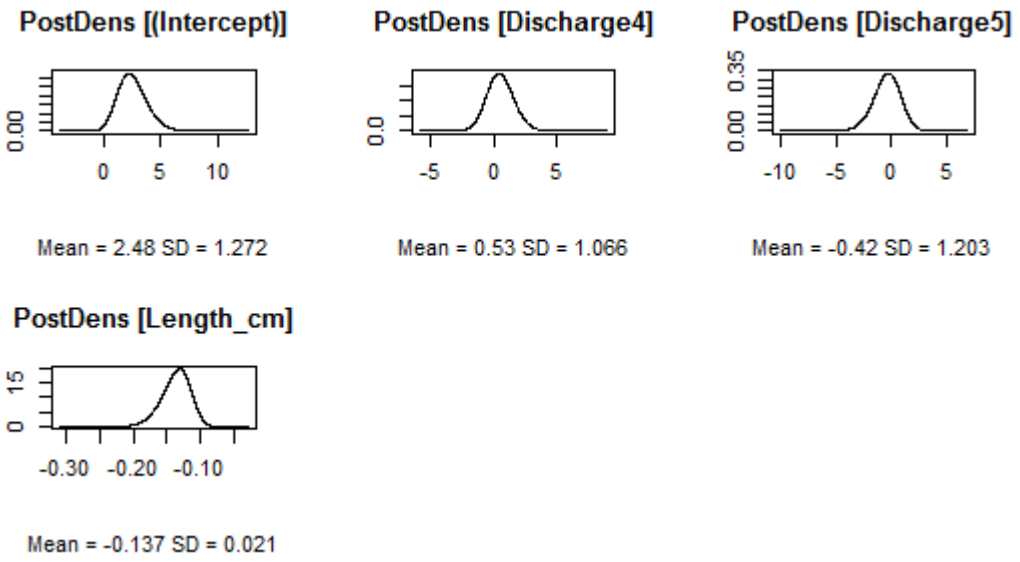
8.4.8 Statistische test sterftekans geturbineerde paling

Tabel 34: WAIC waarden voor de zes geteste modellen voor paling die gedwongen doorgevoerd werd door de open vijzels op 3, 4 en 5 m³/s bij turbinewerking. Kolom één geeft de variabelen die in het model getest werden, kolom twee geeft aan of er wel (random effect ja) of geen (random effect nee) rekening gehouden werd met een potentiële correlatie van resultaten binnen de herhalende testen, en kolom drie geeft de waarde voor WAIC waarbij het laagste getal op het beste model wijst, en een verschil tussen twee modellen van minder dan twee verwaarloosbaar is.

Model_variabelen	Random effect	WAIC
Vijzeltype	Ja	135.11370
Vijzeltype, vis lengte	Ja	63.40880
Vijzeltype, vis lengte, vis gewicht	Ja	63.33933
Vijzeltype	Nee	135.17270
Vijzeltype, vis lengte	Nee	63.42220
Vijzeltype, vis lengte, vis gewicht	Nee	63.34971



Figuur 74: Posterior gemiddelde (verticale zwarte lijnen), en de 25%, 97%, 10%, 90%, 20% en 80% quantielen van de betrouwbaarheidsintervallen (zwarte punten) per herhalende test voor de turbineproef met paling. Enkel bij grote onderlinge verschillen in deze waarden tussen de testen moet men een effect veronderstellen van het uitvoeren van de test op het eindresultaat van de hele proef.

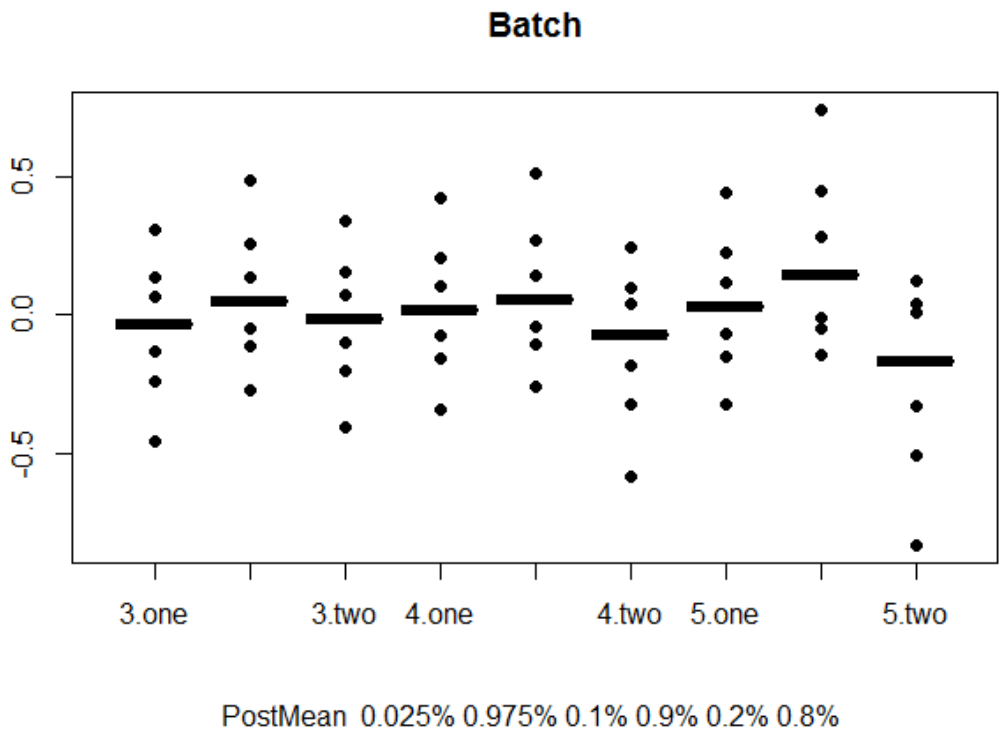


Figuur 75: De densiteitsverdeling van de geschatte parameterwaarden van het model voor paling bij turbinewerking per geteste variabele (open vijzel op 3 m³/s links boven, open vijzel op 4 m³/s midden boven, open vijzel op 5 m³/s rechts boven en vis lengte links onder). Wanneer het cijfer 0 in minder dan 95%van de gevallen voorkomt (en dus buiten de curve valt), dan wijst dit op een significant effect van de betreffende variabele. In dit geval gebeurt dat bij de open vijzel op 3 m³/s in lichte mate, en de lengte van de vis.

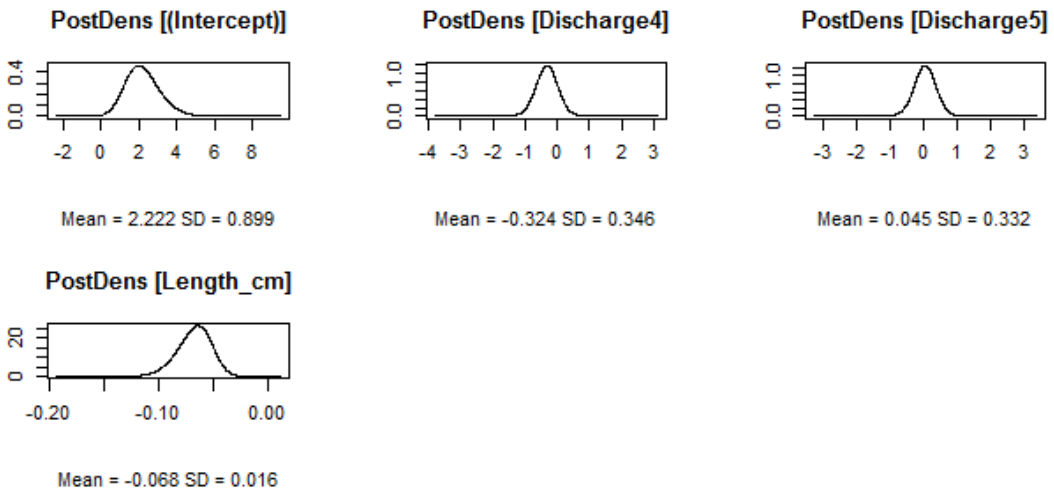
8.4.9 Statistische test verlieskans geturbineerde paling

Tabel 35: WAIC waarden voor de zes geteste modellen voor paling die gedwongen doorgevoerd werd door de open vijzels op 3, 4 en 5 m³/s bij turbinewerking. Kolom één geeft de variabelen die in het model getest werden, kolom twee geeft aan of er wel (random effect ja) of geen (random effect nee) rekening gehouden werd met een potentiële correlatie van resultaten binnen de herhalende testen, en kolom drie geeft de waarde voor WAIC waarbij het laagste getal op het beste model wijst, en een verschil tussen twee modellen van minder dan twee verwaarloosbaar is.

Model_variabelen	**Random effect**	**WAIC**
Vijzeltype	Ja	488.1875
Vijzeltype, vis lengte	Ja	457.4916
Vijzeltype, vis lengte, vis gewicht	Ja	456.0780
Vijzeltype	Nee	488.6904
Vijzeltype, vis lengte	Nee	458.7766
Vijzeltype, vis lengte, vis gewicht	Nee	457.3306



Figuur 76: Posterior gemiddelde (verticale zwarte lijnen), en de 25%, 97%, 10%, 90%, 20% en 80% quantielen van de betrouwbaarheidsintervallen (zwarte punten) per herhalende test voor de turbineproef met paling. Enkel bij grote onderlinge verschillen in deze waarden tussen de testen moet men een effect veronderstellen van het uitvoeren van de test op het eindresultaat van de hele proef.

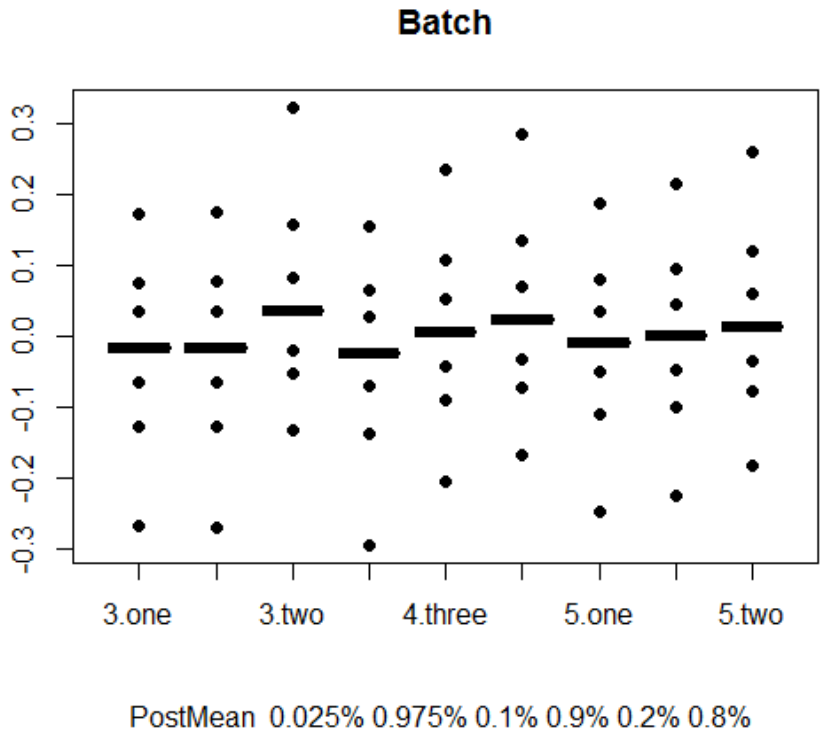


Figuur 77: De densiteitsverdeling van de geschatte parameterwaarden van het model voor paling bij turbinewerking per geteste variabele (open vijzel op 3 m³/s links boven, open vijzel op 4 m³/s midden boven, open vijzel op 5 m³/s rechts boven en vis lengte links onder). Wanneer het cijfer 0 in minder dan 95%van de gevallen voorkomt (en dus buiten de curve valt), dan wijst dit op een significant effect van de betreffende variabele. In dit geval gebeurt dat bij de open vijzel op 3 m³/s in lichte mate, en de lengte van de vis.

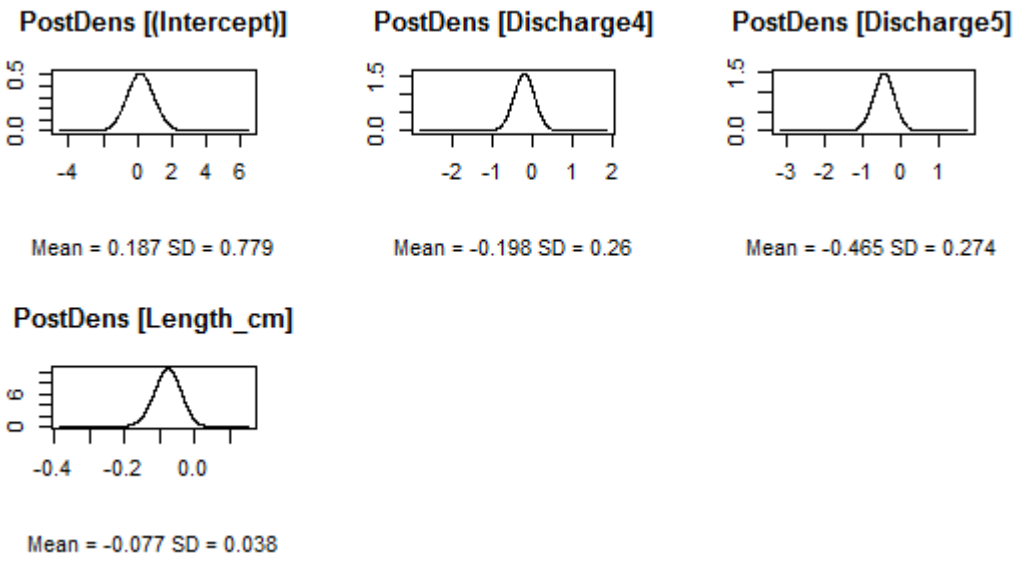
8.4.10 Statistische test sterftekans geturbineerde blankvoorn

Tabel 36: WAIC waarden voor de zes geteste modellen voor blankvoorn die gedwongen doorgevoerd werd door de open vijzels op 3, 4 en 5 m³/s bij turbinewerking. Kolom één geeft de variabelen die in het model getest werden, kolom twee geeft aan of er wel (random effect ja) of geen (random effect nee) rekening gehouden werd met een potentiële correlatie van resultaten binnen de herhalende testen, en kolom drie geeft de waarde voor WAIC waarbij het laagste getal op het beste model wijst, en een verschil tussen twee modellen van minder dan twee verwaarloosbaar is.

Model_variabelen	Random effect	WAIC
Vijzeltype	Ja	606.7193
Vijzeltype, vis lengte	Ja	604.8181
Vijzeltype, vis lengte, vis gewicht	Ja	605.2479
Vijzeltype	Nee	606.2233
Vijzeltype, vis lengte	Nee	604.3641
Vijzeltype, vis lengte, vis gewicht	Nee	604.8038



Figuur 78: Posterior gemiddelde (verticale zwarte lijnen), en de 25%, 97%, 10%, 90%, 20% en 80% quantielen van de betrouwbaarheidsintervallen (zwarte punten) per herhalende test voor de turbineproef met blankvoorn. Enkel bij grote onderlinge verschillen in deze waarden tussen de testen moet men een effect veronderstellen van het uitvoeren van de test op het eindresultaat van de hele proef.

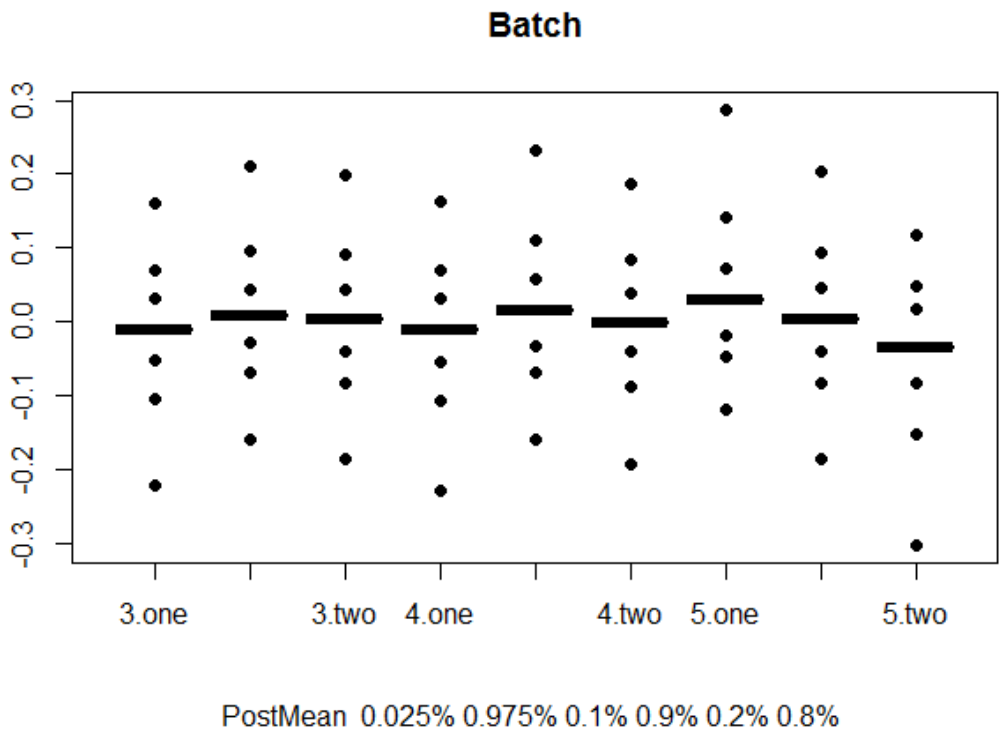


Figuur 79: De densiteitsverdeling van de geschatte parameterwaarden van het model voor blankvoorn bij turbinewerking per geteste variabele (open vijzel op 3 m³/s links boven, open vijzel op 4 m³/s midden boven, open vijzel op 5 m³/s rechts boven en vis lengte links onder). Wanneer het cijfer 0 in minder dan 95%van de gevallen voorkomt (en dus buiten de curve valt), dan wijst dit op een significant effect van de betreffende variabele. In dit geval gebeurt dat enkel bij de lengte van de vis in lichte mate.

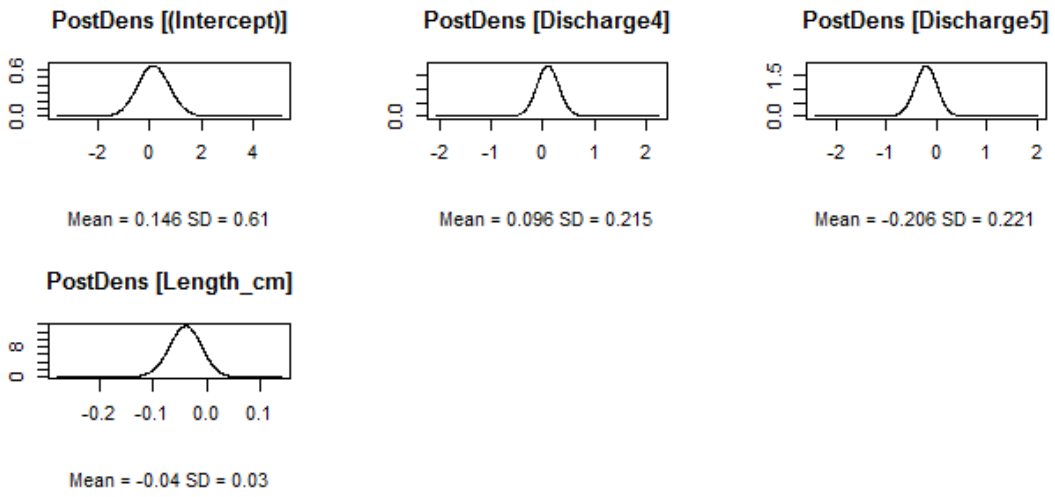
8.4.11Statistische test verlieskans geturbineerde blankvoorn

Tabel 37: WAIC waarden voor de zes geteste modellen voor blankvoorn die gedwongen doorgevoerd werd door de open vijzels op 3, 4 en 5 m³/s bij turbinewerking. Kolom één geeft de variabelen die in het model getest werden, kolom twee geeft aan of er wel (random effect ja) of geen (random effect nee) rekening gehouden werd met een potentiële correlatie van resultaten binnen de herhalende testen, en kolom drie geeft de waarde voor WAIC waarbij het laagste getal op het beste model wijst, en een verschil tussen twee modellen van minder dan twee verwaarloosbaar is.

Model_variabelen	**Random effect**	**WAIC**
Vijzeltype	Ja	831.6240
Vijzeltype, vis lengte	Ja	831.9436
Vijzeltype, vis lengte, vis gewicht	Ja	831.6070
Vijzeltype	Nee	831.0291
Vijzeltype, vis lengte	Nee	831.3579
Vijzeltype, vis lengte, vis gewicht	Nee	831.0310



Figuur 80: Posterior gemiddelde (verticale zwarte lijnen), en de 25%, 97%, 10%, 90%, 20% en 80% quantielen van de betrouwbaarheidsintervallen (zwarte punten) per herhalende test voor de turbineproef met blankvoorn. Enkel bij grote onderlinge verschillen in deze waarden tussen de testen moet men een effect veronderstellen van het uitvoeren van de test op het eindresultaat van de hele proef.

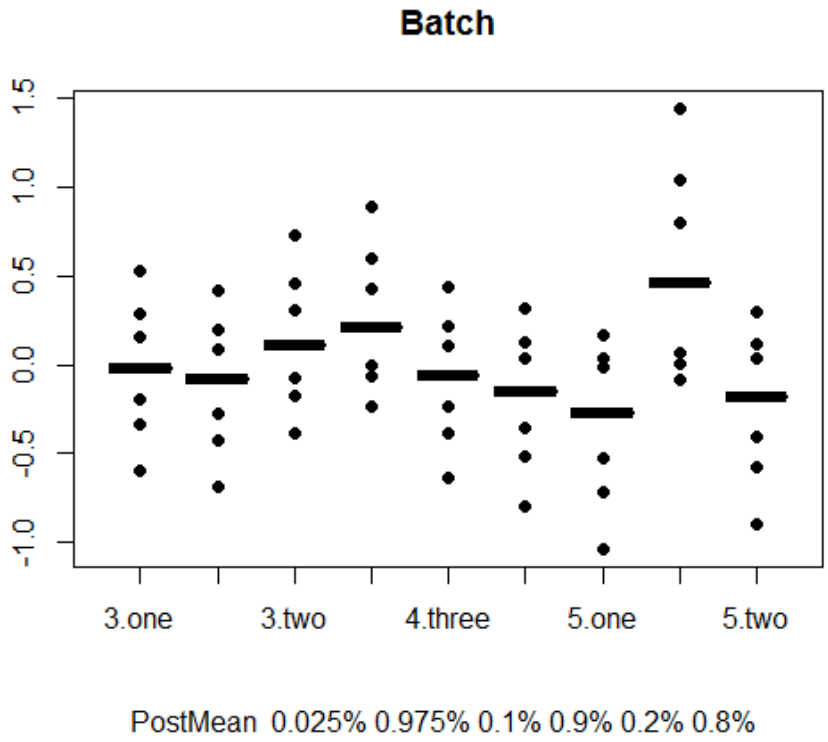


Figuur 81: De densiteitsverdeling van de geschatte parameterwaarden van het model voor blankvoorn bij turbinewerking per geteste variabele (open vijzel op 3 m³/s links boven, open vijzel op 4 m³/s midden boven, open vijzel op 5 m³/s rechts boven en vis lengte links onder). Wanneer het cijfer 0 in minder dan 95%van de gevallen voorkomt (en dus buiten de curve valt), dan wijst dit op een significant effect van de betreffende variabele. In dit geval gebeurt dat enkel bij de lengte van de vis in lichte mate.

8.4.12 Statistische test sterftekans geturbineerde forel

Tabel 38: WAIC waarden voor de zes geteste modellen voor forel die gedwongen doorgevoerd werd door de open vijzels op 3, 4 en 5 m³/s bij turbinewerking. Kolom één geeft de variabelen die in het model getest werden, kolom twee geeft aan of er wel (random effect ja) of geen (random effect nee) rekening gehouden werd met een potentiële correlatie van resultaten binnen de herhalende testen, en kolom drie geeft de waarde voor WAIC waarbij het laagste getal op het beste model wijst, en een verschil tussen twee modellen van minder dan twee verwaarloosbaar is.

Model_variabelen	Random effect	WAIC
Vijzeltype	Ja	597.4219
Vijzeltype, vis lengte	Ja	588.2759
Vijzeltype, vis lengte, vis gewicht	Ja	511.9665
Vijzeltype	Nee	611.9573
Vijzeltype, vis lengte	Nee	600.8213
Vijzeltype, vis lengte, vis gewicht	Nee	518.1357

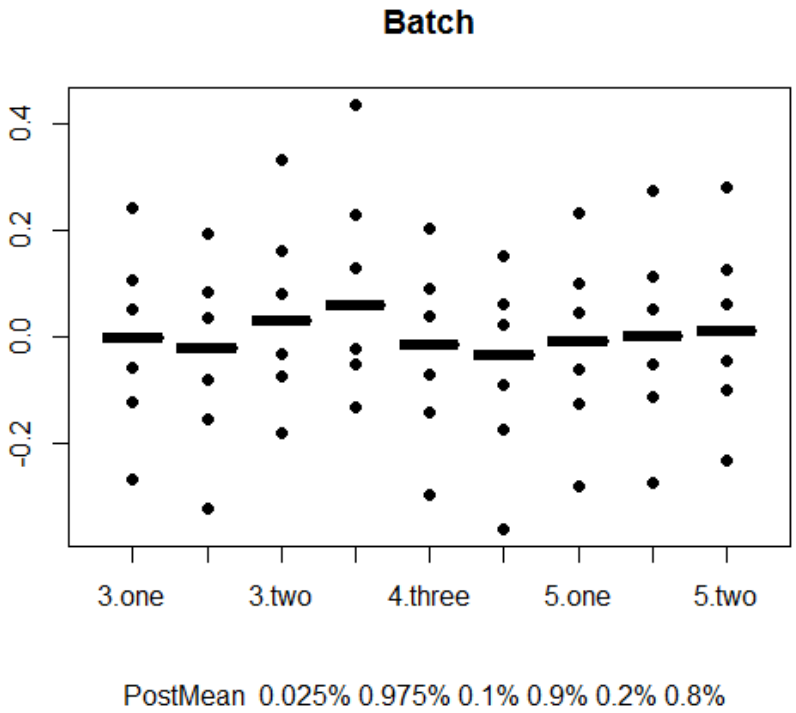


Figuur 82: Posterior gemiddelde (verticale zwarte lijnen), en de 25%, 97%, 10%, 90%, 20% en 80% quantielen van de betrouwbaarheidsintervallen (zwarte punten) per herhalende test voor de turbineproef met forel. Enkel bij grote onderlinge verschillen in deze waarden tussen de testen moet men een effect veronderstellen van het uitvoeren van de test op het eindresultaat van de hele proef.

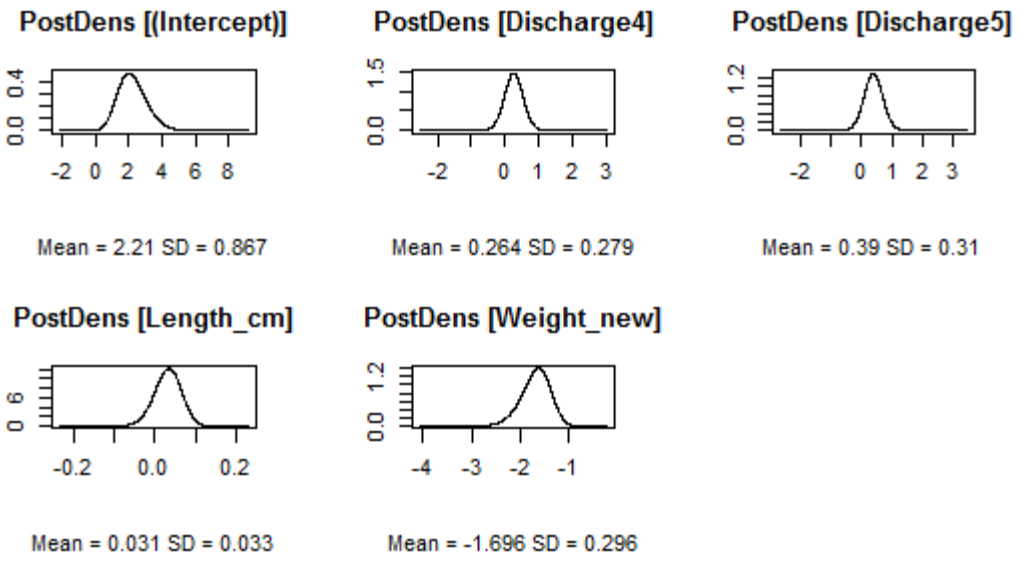
Tabel 39: WAIC waarden voor de zes geteste modellen voor forel die gedwongen doorgevoerd werd door de open vijzels op 3, 4 en 5 m³/s bij turbinewerking, en waarbij de resultaten van 1 van de herhalende testen op 5 m³/s verwijderd werden. Kolom één geeft de variabelen die in het model getest werden, kolom twee geeft aan of er wel (random effect ja) of geen (random effect nee) rekening gehouden werd met een potentiële correlatie van resultaten binnen de herhalende testen, en kolom drie geeft de waarde voor WAIC waarbij

het laagste getal op het beste model wijst, en een verschil tussen twee modellen van minder dan twee verwaarloosbaar is.

Model_variabelen	Random effect	WAIC
Vijzeltype	Ja	572.7167
Vijzeltype, vis lengte	Ja	526.4091
Vijzeltype, vis lengte, vis gewicht	Ja	486.5626
Vijzeltype	Nee	572.7921
Vijzeltype, vis lengte	Nee	562.3591
Vijzeltype, vis lengte, vis gewicht	Nee	486.3523



Figuur 83: Posterior gemiddelde (verticale zwarte lijnen), en de 25%, 97%, 10%, 90%, 20% en 80% quantielen van de betrouwbaarheidsintervallen (zwarte punten) per herhalende test voor de turbineproef met forel, en waarbij de resultaten van 1 van de herhalende testen op 5 m³/s verwijderd werden. Enkel bij grote onderlinge verschillen in deze waarden tussen de testen moet men een effect veronderstellen van het uitvoeren van de test op het eindresultaat van de hele proef.



Figuur 84: De densiteitsverdeling van de geschatte parameterwaarden van het model voor forel bij turbinewerking, waarbij de resultaten van 1 van de herhalende testen op 5 m³/s verwijderd werden, per geteste variabele (open vijzel op 3 m³/s links boven, open vijzel op 4 m³/s midden boven, open vijzel op 5 m³/s rechts boven en vis lengte links onder). Wanneer het cijfer 0 in minder dan 95%van de gevallen voorkomt (en dus buiten de curve valt), dan wijst dit op een significant effect van de betreffende variabele. In dit geval is dat het geval voor de open vijzel op 3 m³/s en het gewicht van de vis.

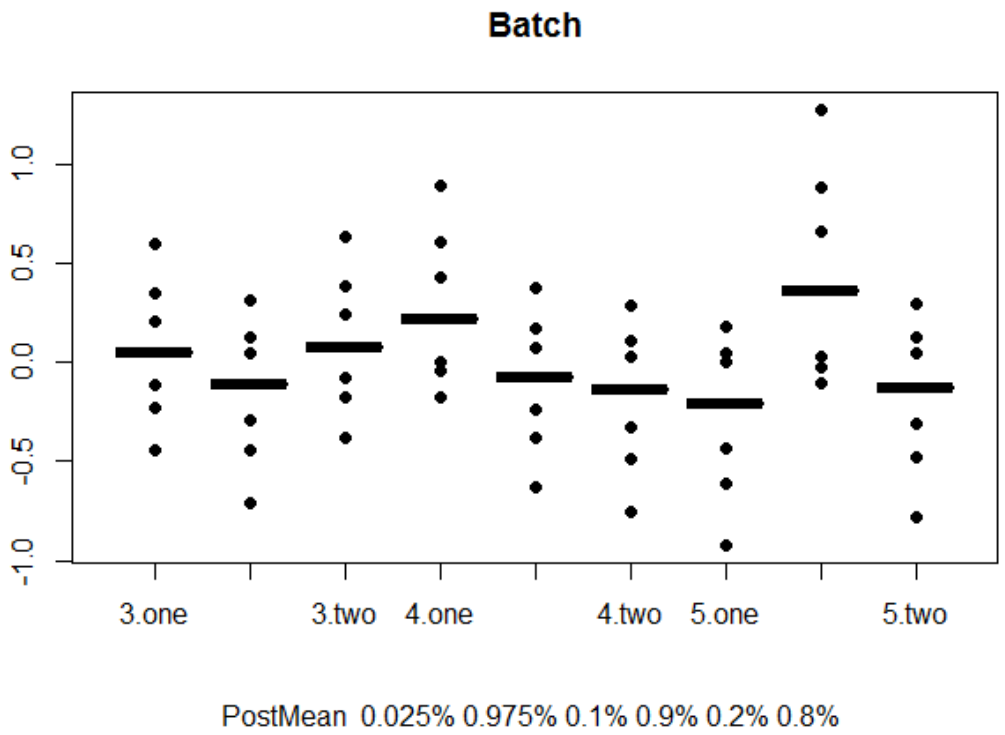
8.4.13Statistische test verlieskans geturbineerde forel

Voor de test met de herhalende test nummer 3 van de testen op 5 m³/s in:

Tabel 40: WAIC waarden voor de zes geteste modellen voor forel die gedwongen doorgevoerd werd door de open vijzels op 3, 4 en 5 m³/s bij turbinewerking. Kolom één geeft de variabelen die in het model getest werden, kolom twee geeft aan of er wel (random effect ja) of geen (random effect nee) rekening gehouden werd met een potentiële correlatie van resultaten binnen de herhalende testen, en kolom drie geeft de waarde voor WAIC waarbij het laagste getal op het beste model wijst, en een verschil tussen twee modellen van minder dan twee verwaarloosbaar is.

Model_variabelen	**Random effect**	**WAIC**
Vijzeltype	Ja	593.7707
Vijzeltype, vis lengte	Ja	587.7580
Vijzeltype, vis lengte, vis gewicht	Ja	522.9652
Vijzeltype	Nee	602.1680
Vijzeltype, vis lengte	Nee	594.4226
Vijzeltype, vis lengte, vis gewicht	Nee	527.8696

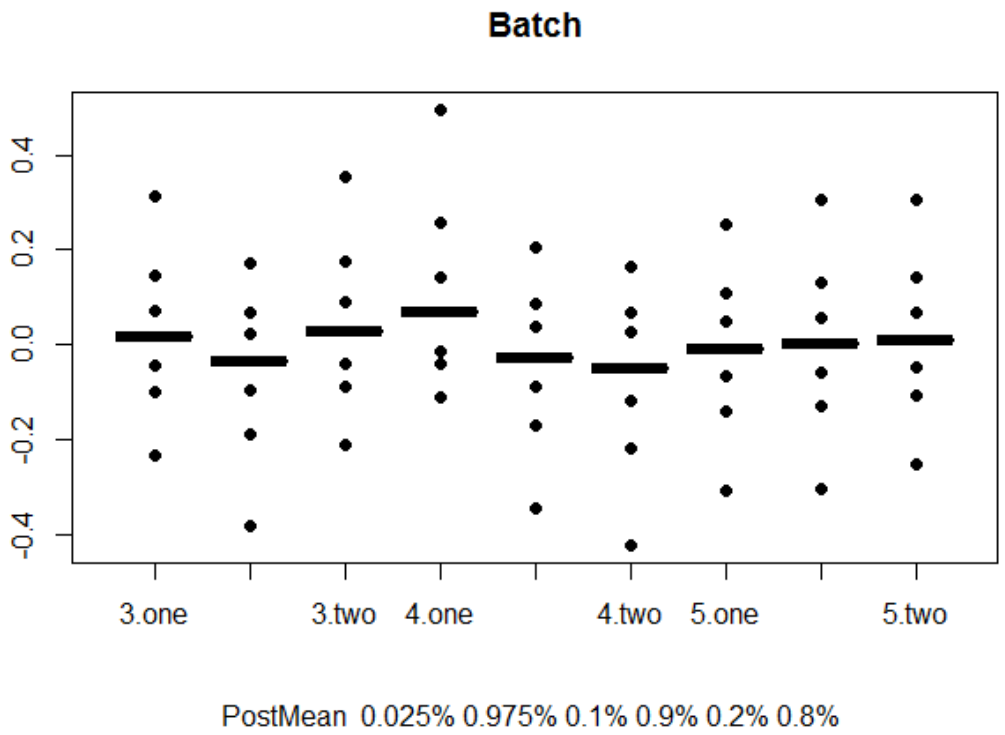
Zonder de test met de herhalende test nummer 3 van de testen op 5 m³/s in:



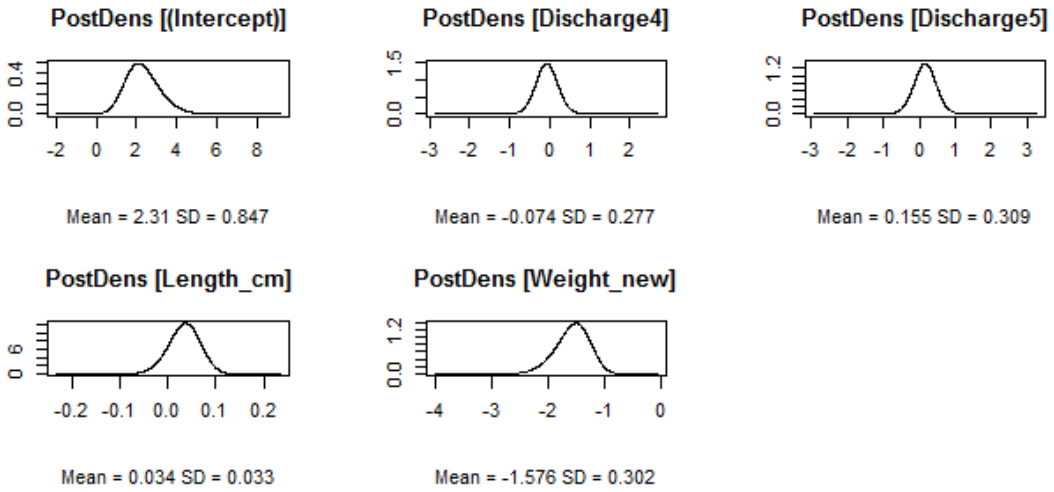
Figuur 85: Posterior gemiddelde (verticale zwarte lijnen), en de 25%, 97%, 10%, 90%, 20% en 80% quantielen van de betrouwbaarheidsintervallen (zwarte punten) per herhalende test voor de turbineproef met forel. Enkel bij grote onderlinge verschillen in deze waarden tussen de testen moet men een effect veronderstellen van het uitvoeren van de test op het eindresultaat van de hele proef.

Tabel 41: WAIC waarden voor de zes geteste modellen voor forel die gedwongen doorgevoerd werd door de open vijzels op 3, 4 en 5 m³/s bij turbinewerking, en waarbij de resultaten van 1 van de herhalende testen op 5 m³/s verwijderd werden. Kolom één geeft de variabelen die in het model getest werden, kolom twee geeft aan of er wel (random effect ja) of geen (random effect nee) rekening gehouden werd met een potentiële correlatie van resultaten binnen de herhalende testen, en kolom drie geeft de waarde voor WAIC waarbij het laagste getal op het beste model wijst, en een verschil tussen twee modellen van minder dan twee verwaarloosbaar is.

Model_variabelen	**Random effect**	**WAIC**
Vijzeltype	Ja	567.3784
Vijzeltype, vis lengte	Ja	560.3780
Vijzeltype, vis lengte, vis gewicht	Ja	499.5864
Vijzeltype	Nee	567.2565
Vijzeltype, vis lengte	Nee	560.1338
Vijzeltype, vis lengte, vis gewicht	Nee	499.6233



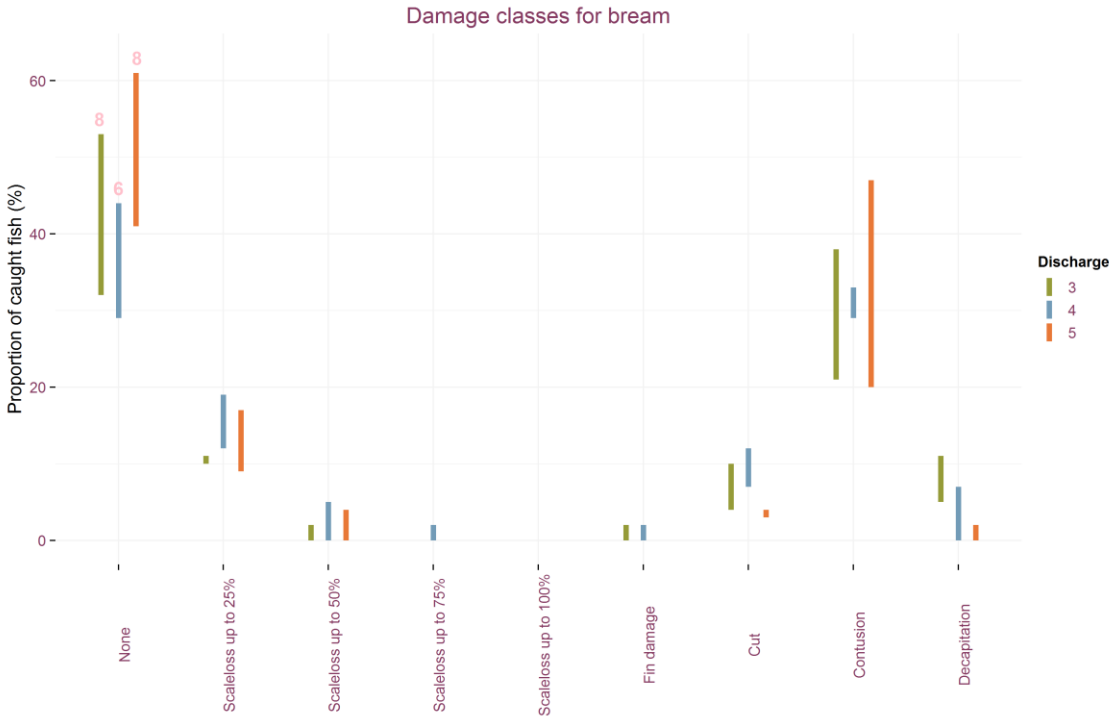
Figuur 86: Posterior gemiddelde (verticale zwarte lijnen), en de 25%, 97%, 10%, 90%, 20% en 80% quantielen van de betrouwbaarheidsintervallen (zwarte punten) per herhalende test voor de turbineproef met forel, en waarbij de resultaten van 1 van de herhalende testen op 5 m³/s verwijderd werden. Enkel bij grote onderlinge verschillen in deze waarden tussen de testen moet men een effect veronderstellen van het uitvoeren van de test op het eindresultaat van de hele proef.



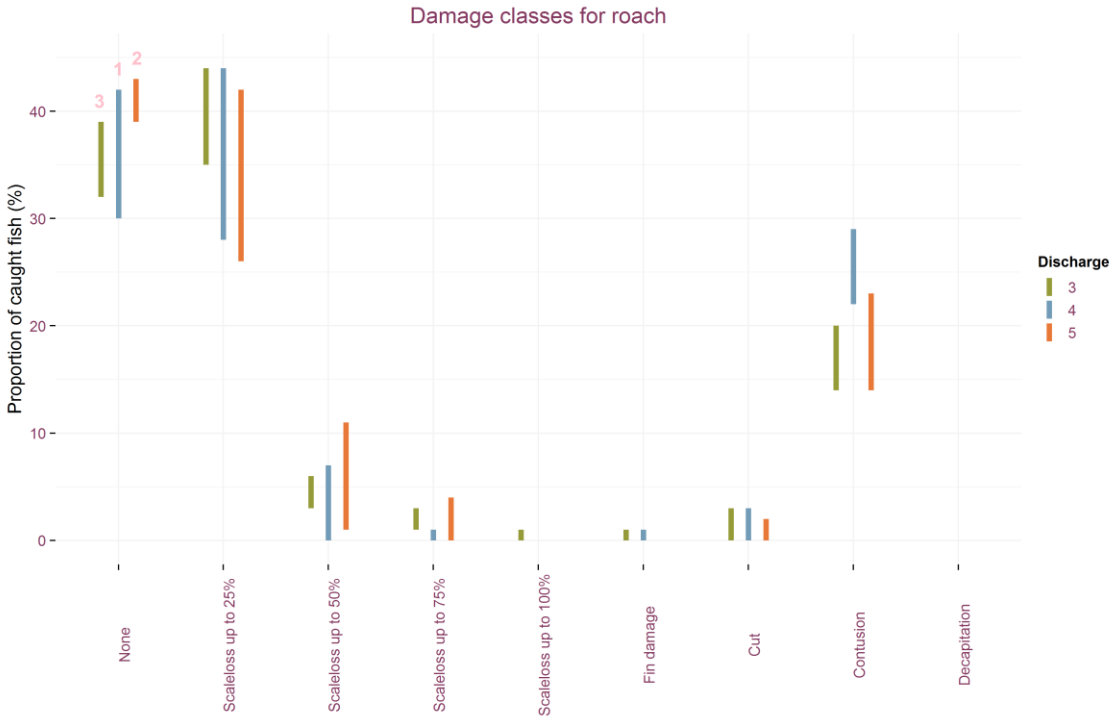
Figuur 87: De densiteitsverdeling van de geschatte parameterwaarden van het model voor forel bij turbinewerking, waarbij de resultaten van 1 van de herhalende testen op 5 m³/s verwijderd werden, per geteste variabele (open vijzel op 3 m³/s links boven, open vijzel op 4 m³/s midden boven, open vijzel op 5 m³/s rechts boven en vis lengte links onder). Wanneer het cijfer 0 in minder dan 95%van de gevallen voorkomt (en dus buiten de curve valt), dan

wijst dit op een significant effect van de betreffende variabele. In dit geval is dat het geval voor de open vijzel op 3 m³/s en het gewicht van de vis.

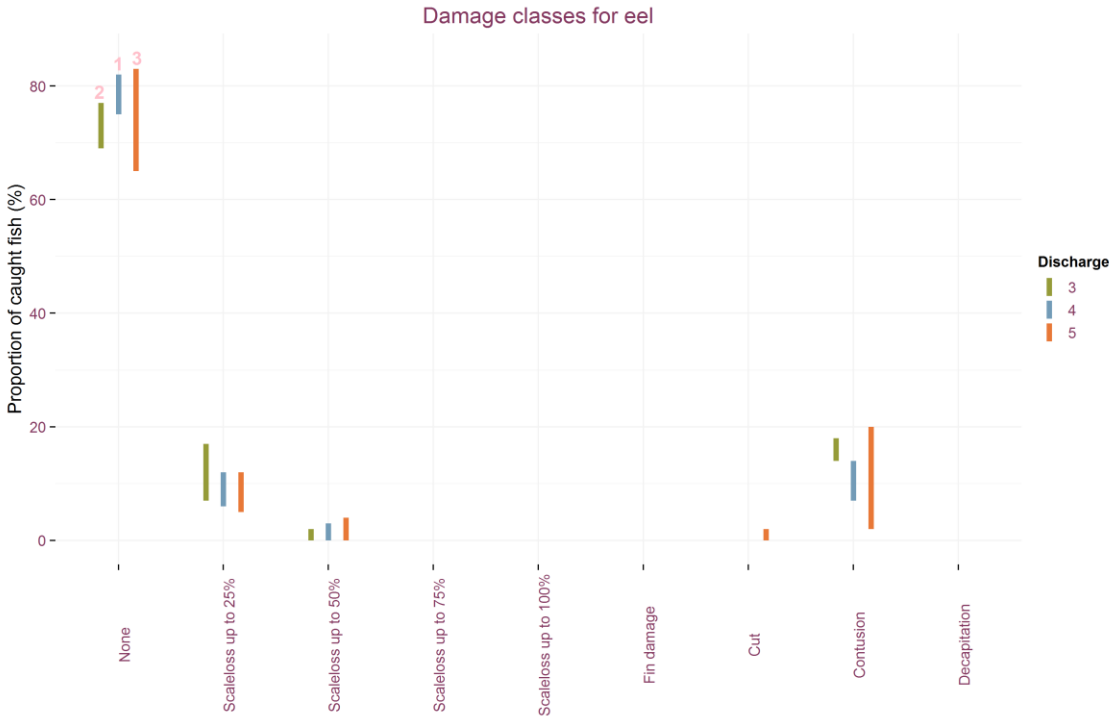
8.4.14 Figuren schadeklassen turbineproeven voor brasem, paling, blankvoorn en forel



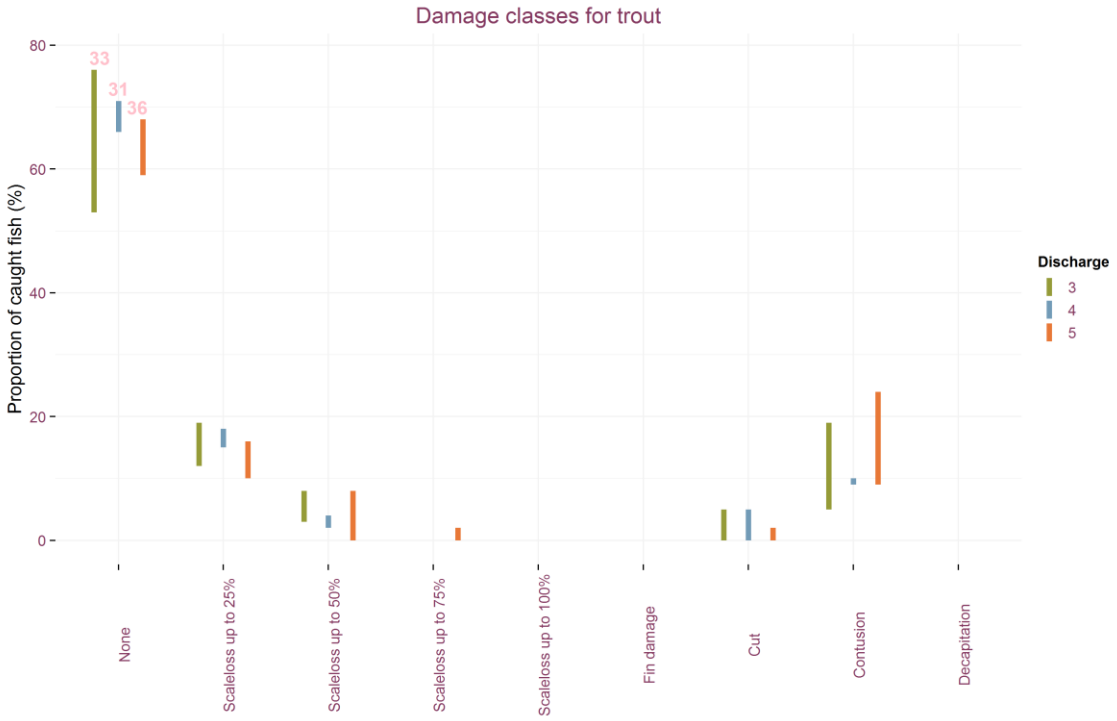
Figuur 88: Percentagebalken voor brasem; niet-beschadigde dieren (met aanduiding van dode + stervende individuen), schubverlies (25, 50, 75 en 100% van lichaamsoppervlakte), vinschade, snijwonde, kneuzing en onthoofding.



Figuur 89: Percentagebalken voor blankvoorn; niet-beschadigde dieren (met aanduiding van dode + stervende individuen), schubverlies (25, 50, 75 en 100% van lichaamsoppervlakte), vinschade, snijwonde, kneuzing en onthoofding.



Figuur 90: Percentagebalken voor paling; niet-beschadigde dieren (met aanduiding van dode + stervende individuen), schubverlies (25, 50, 75 en 100% van lichaamsoppervlakte), vinschade, snijwonde, kneuzing en onthoofding.



Figuur 91: Percentagebalken voor forel; niet-beschadigde dieren (met aanduiding van dode + stervende individuen), schubverlies (25, 50, 75 en 100% van lichaamsoppervlakte), vinschade, snijwonde, kneuzing en onthoofding.