



Vlaanderen
is wetenschap



Evaluatie van de visveiligheid van de VaHo pomp voor paling

Voor de plaatsing in het pompemaal op de Stenensluisvaart in Woumen

Kaat Thienpont, Sarah Broos, David Buysse, Nico De Maerteleire, Simon Plaetinck,
Diederik Rosseel, Pieterjan Verhelst, Stijn Bruneel, Ine Pauwels, Isaac Vermeulen,
Mylan Lyssens en Johan Coeck

Auteurs:

Kaat Thienpont , Sarah Broos , David Buysse , Nico De Maerteleire, Simon Plaetinck, Diederik Rosseel, Pieterjan Verhelst , Stijn Bruneel , Ine Pauwels , Isaac Vermeulen , Mylan Lyssens en Johan Coeck 

Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek

Reviewers:

Lore Vandamme

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

Vestiging:

Herman Teirlinckgebouw
INBO Brussel
Havenlaan 88, 1000 Brussel
vlaanderen.be/inbo

e-mail:

kaat.thienpont@inbo.be

Wijze van citeren:

Thienpont K., Broos S., Buysse D., De Maerteleire N., Plaetinck S., Rosseel D., Verhelst P., Bruneel S., Pauwels I., Vermeulen I., Lyssens M. & Coeck J.,(2025). Evaluatie van de visveiligheid van de VaHo pomp voor paling: Voor de plaatsing in het pompgemaal op de Stenensluisvaart in Woumen. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2025 (60). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.
DOI: doi.org/10.21436/inbor.133682596

D/2025/3241/396

Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2025 (60)

ISSN: 1782-9054

Verantwoordelijke uitgever:

Hilde Eggermont

Foto cover:

De VaHo-pomp op de site bij de firma Van Hooste (©Van Hooste)

Dit onderzoek werd uitgevoerd in opdracht van:

Van Hooste



Dit werk valt onder een [Creative Commons Naamsvermelding-GelijkDelen 4.0 Internationaal-licentie](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

EVALUATIE VAN DE VISVEILIGHEID VAN DE VAHO-POMP VOOR PALING

Voor de plaatsing in het pompgemaal op de Stenensluisvaart in Woumen

Kaat Thienpont, Sarah Broos, David Buysse, Nico De Maerteleire, Simon
Plaetinck, Diederik Rosseel, Pieterjan Verhelst, Stijn Bruneel, Ine Pauwels, Isaac
Vermeulen, Mylan Lyssens & Johan Coeck
m.m.v. Jeffrey Andrew Tuhtan (TalTech University – Estland)

doi.org/10.21436/inbor.133682596

Samenvatting

Verscheidene vissoorten migreren gedurende hun levensloop tussen zoet- en zoutwaterhabitats. Een zeer gekend voorbeeld hiervan is de Europese paling (*Anguilla anguilla*). Palingen worden geboren in de Sargassozeë en ondernemen een lange tocht van 6500 km als glasaal (jonge aal) naar het Europese continent. Hier aangekomen migreren de glasalen in waterlopen zoals rivieren en polders om op te groeien. Na een periode van 5-15 jaar migreren de volwassen palingen terug naar zee om te gaan paaien in de Sargassozeë.

Tijdens hun migratie tussen de verschillende waterlopen of waterlichamen komen palingen en andere vissoorten verscheidende obstakels tegen zoals stuwen, pompgemalen, sluizen en waterkrachtcentrales. Hierdoor kunnen de vissen gehinderd of gekwetst geraken. De migratie van vissen tussen bepaalde habitats is echter vaak noodzakelijk om hun levenscyclus te voltooien, zoals het geval is bij de Europese paling. Om de kritisch bedreigde paling en andere vissoorten te helpen om deze obstakels veilig te passeren, schakelt de Vlaamse Milieumaatschappij (VMM) als waterbeheerder steeds vaker over op visveiligere pompen en vijzels. Hierbij komt men tegenmoet aan de doelstellingen geformuleerd in de Europese Kaderrichtlijn Water, het Decreet Integraal Waterbeleid, het Palingbeheerplan en de Beneluxbeschikking inzake vrije vismigratie.

In het stroomgebied van de Blankaart te Woumen (Diksmuide) bevindt zich een pompgemaal op de Stenensluisvaart dat water naar de IJzer pompt, waarlangs ook vissen migreren. Dit gemaal had twee schroef- of axiaalpompen die zeer schadelijk waren voor passerende vissen. Naar aanleiding van de overschakeling naar visveiligere pompen en vijzels ontwikkelde de firma 'Van Hooste' een axiaalpompe, de VaHo-pompe, waaraan visveilige kenmerken werden toegeschreven. Twee VaHo-pompen werden geïnstalleerd om de oude visonveilige pompen in het pompgemaal op de Stenensluisvaart te vervangen.

De Nederlandse Normcommissie 390 020 "Milieukwaliteit" heeft een norm ontworpen voor standaardisatie van proeven voor evaluaties van 'Visveiligheid van pompen en turbines' (NEN 8775+C1). Deze norm beschrijft een algemene, gestandaardiseerde methode die uitgevoerd moet worden bij het testen van pompen, turbines en vijzels op visveiligheid.

Het doel van deze studie was om een kwantitatieve evaluatie uit te voeren van de effecten van de werking van de VaHo-pompe op palingen. In deze studie werd de schadeklasse en mortaliteit van palingen die door de pompe werden gevoerd, vergeleken met palingen uit de controlegroep. Deze proef werd uitgevoerd bij een toerental van 250 rpm.

Bovenop de testen met palingen werd er ook gebruik gemaakt van BDS-sensoren (Barotrauma Detection System), ontwikkeld door het Centre for Biorobotics, Dept. of Computer Systems, TalTech University (Estland). De BDS-sensoren werden ingezet om de negatieve impacts te onderzoeken van de abrupte fysische veranderingen die vissen moeten ondergaan bij passage door de pompe. Specifiek meten de sensoren welke soorten impact, drukverschillen, versnellingen en rotaties vissen ondergaan. Bij passage door de pompe kunnen vissen een klap krijgen van de snel draaiende waaiersbladen of botsen met de leischoppen in de pompe. Daarnaast kunnen vissen ook verwond raken door 'hydraulic shear', cavitatie en plotse drukdalingen.

Om de schade op te meten aan de palingen die door de pompe werden gevoerd en om de sensoren te recupereren, werd er stroomafwaarts een opvangkooi geïnstalleerd. De schadebepaling van de palingen, zowel van doorgevoerde als controle-individuen, werd vastgesteld volgens de schadeklassen in de NEN-richtlijn (NEN 8775+C1).

Bij visveiligheid wordt, zo veel mogelijk, gestreefd naar lage schade en lage sterftepercentages. De mortaliteit van individuen die door de VaHo-pompe werden gevoerd was 1 %. Bij de controlegroep bedroeg dat 2 %. De grote meerderheid van alle individuen die door de pompe werden gevoerd kwam zonder uitwendige schade uit de proef. Zes individuen vertoonden lichte niet-lethale verwondingen, waarvan bij twee individuen sterk vermoed werd dat deze schade veroorzaakt werd door de opvangkooi. Slechts één individu uit de doorvoerproef werd zwaar beschadigd gerecupereerd. Het individu had een insnijding in de kop, een breuk in het schedeldak en het linkeroog was zwaar beschadigd. Van de controlegroep werden alle individuen zonder uitwendige schade opgevangen in de kooi. De lengte van de palingen had geen significant effect op hun sterftetkans.

Voor de evaluatie van de sensor werd de biologische gevoeligheid voor sterfte van inheemse soorten op de Stenensluisvaart in Woumen opgezocht, waarna de grenswaarden voor drukgerelateerde verwondingen en sterfte werden overgenomen uit de literatuur, indien beschikbaar. Op basis van de in deze studie gehanteerde drukgerelateerde grenswaarden werd geen geschat risico op meer dan 10 % door decompressie vastgesteld. De 1 % mortaliteit en waargenomen schade bij de doorvoerproef zijn dus niet te linken aan druk, maar aan mechanische processen zoals bladinslag.



Door de waterbeheerder, de Vlaamse Milieumaatschappij (VMM), werd opgelegd dat sterfte bij paling na passage door de nieuw te plaatsen axiaalpompen in het pompemaal op de Stenensluisvaart in Woumen niet hoger mag zijn dan 10 %. Met een sterftepercentage van 1 % bij 250 rpm tonen de testen aan dat de VaHo-pomp aan deze eis voldoet, en zodanig als palingveilig bestempeld kan worden. Een uitspraak over de visveiligheid van de VaHo-pomp voor andere vissoorten kan in dit rapport niet worden gedaan. Het is sterk aanbevolen om de visveiligheid van de VaHo-pomp voor andere vissoorten te evalueren aangezien eerder onderzoek aantoonde dat een pomp wel palingveilig, maar daarom niet per definitie ook als visveilig beschouwd kan worden.

Aanbevelingen voor het beheer en het beleid worden gegeven op de volgende pagina.



Aanbevelingen voor beheer en/of beleid

Vervangen van klassieke axiaalpompen in visveiligere axiaalpompen verhoogt de overleving van paling.

Op de openbare waterlopen in Vlaanderen zijn er meer dan 172 pompgemalen, waarvan de helft uitgerust is met schroef- of axiaalpompen. De klassieke, heel vaak verouderde axiaalpompen die in de Vlaamse pompgemalen zijn ingebouwd behoren tot de meest dodelijke pomptypes voor vissen. Daarom moeten deze pompen zo veel mogelijk uit bedrijf genomen worden en vervangen worden door visveiligere alternatieven. Deze studie toont dat de VaHo-pomp, ontwikkeld door de Firma Van Hooste, een beperkte mortaliteit veroorzaakt van 1 % bij palingen na doorvoer door de pomp bij 250 rpm. Dit voldoet aan de eis opgelegd door de Vlaamse Milieumaatschappij (VMM) dat de maximale mortaliteit bij palingen na passage door de pomp niet meer dan 10 % mag bedragen. Dit wil zeggen dat het vervangen van klassieke axiaalpompen naar visveiligere axiaalpompen een gunstig effect heeft op de overleving van paling. Het loont dus om de visonveilige pompgemalen in Vlaanderen te saneren en op die manier tegemoet te komen aan de richtlijnen geformuleerd in de Europese palingverordening, waarbij lidstaten de nodige maatregelen moeten treffen om ervoor te zorgen dat op termijn minstens 40 % van de volwassen zilverpalingen de open zee kan bereiken om zich voort te planten.

Selecteer een pomp met een zo laag mogelijk toerental.

Het toerental van een axiaalpomp is afhankelijk van de opvoerhoogte en dus het waterpeil. Voor het pompgemaal in Woumen zal naar schatting de pomp 90 % van de tijd op een laag toerental (250 rpm) draaien, maar bij hoge waterstanden door hevige regenval, kan een hogere opvoerhoogte optreden waardoor de pomp op een hoger toerental overschakelt (maximaal 310 rpm). Het verhoogd toerental gaat gepaard met een hogere afvoer, wat de ideale condities zijn voor palingen om naar zee te migreren en waarbij er veel uittrek is van zilverpaling uit het gebied. De mortaliteit van paling na passage door de pomp bij 310 rpm werd niet getest, maar eerder onderzoek toonde wel aan dat hogere toerentalen hogere sterfte percentages veroorzaken. Daarom is het aangeraden de pomp zoveel mogelijk op het toerental van 250 te laten draaien, of meer onderzoek uit te voeren op hogere toerentalen.

Kies voor een pomp met een zo groot mogelijke doorsnede.

Bij het bouwen of saneren van axiaalpompgemalen dient, in de mate van het mogelijke, de voorkeur te worden gegeven aan pompen met een zo groot mogelijke doorsnede, zodat de ruimte voor vissen om te passeren groter is en de kans om geraakt te worden door de waaierbladen of te botsen met de leischoppen kleiner wordt. Zo is het naar visveiligere passage toe bijvoorbeeld beter om een grote pomp te plaatsen die aan een lager toerental draait dan twee kleinere pompen met een hoger toerental.

Let op: de bevindingen uit deze studie gelden voor de gebruikte pomp in de geteste situaties. Afwijkingen in de specifieke condities, bijvoorbeeld een andere dimensie of opvoerhoogte en dus toerental, kunnen leiden tot een ander resultaat.

Visveiligheid evaluaties vereist onderzoek naar meerdere vissoorten.

In deze studie werd enkel paling bestudeerd en konden we concluderen dat de pomp veilig is voor palingen, maar dit kan niet veralgemeend worden naar 'visveilig' voor andere vissoorten. Het NEN 8775+C1 adviseert om naast testen met paling ook testen uit te voeren met karperachtigen zoals brasem, kolblei of blankvoorn, aangezien uit ander onderzoek met pompen blijkt dat paling een lager sterftepercentage heeft dan andere vissoorten. Een uitspraak over de visveiligheid van de VaHo-pomp voor andere vissoorten kan op basis van dit onderzoek niet worden gedaan. Het is dan ook sterk aanbevolen om de visveiligheid van de VaHo-pomp ook voor andere vissoorten te evalueren.

Wetenschappelijke onderbouwde normen voor visveiligheid zijn nodig.

In België is er geen norm over hoe de visveiligheid getest moet worden. Nederland heeft echter wel een dergelijke norm die gekend is als NEN 8775+C1. NEN 8775+C1 bepaalt dat de visveiligheid van pompen en turbines dient te worden vastgesteld door een dierproef, waarbij een bepaald aantal vissen van verschillende soorten (doorgaans paling en andere vissoorten) gedwongen door de pomp of turbine zwemmen. Net zoals er geen norm is over hoe visveiligheid getest moet worden, is er ook geen norm voor visveiligheid. In deze studie is de norm, die bepaald werd door de VMM, vastgelegd op een maximale mortaliteit van 10 % bij paling na doorvoer doorheen de pomp. Om op een uniforme, wetenschappelijke manier visveiligheid te bepalen, valt het aan te bevelen dat er in de toekomst wetenschappelijk onderbouwde normen worden vastgelegd.



Inhoudstafel

1	Inleiding en doelstellingen	11
2	Materiaal en methode	13
2.1	De Stenensluisvaart in het stroomgebied de Blankaart	13
2.2	Het pompgemaal op de Stenensluisvaart	13
2.3	Testen met gedwongen doorvoer van paling	14
2.3.1	Ethisch gebruik van de proefdieren	14
2.3.1.1	Ethische commissie	14
2.3.1.2	Keuze van vissoorten	14
2.3.1.3	Herkomst van de vissoort	14
2.3.1.4	Aantal proefdieren	14
2.3.1.5	Verantwoording van het aantal te gebruiken proefdieren	14
2.3.2	Testopstelling	16
2.3.3	Handelingen	17
2.3.3.1	Acclimatisatie	17
2.3.3.2	Overbrengen van vissen naar de invoerlocatie	18
2.3.3.3	Invoeren van de vissen in de pompkelder	18
2.3.3.4	Collecteren van verpompte vissen	19
2.3.3.5	Controlegroepen	19
2.3.3.6	Bepalen van verwondingen	19
2.3.3.7	Fotodatabank	20
2.3.3.8	Euthanasie	21
2.3.3.9	Uitgestelde sterfte	21
2.3.3.10	Uitzetten van de vissen na afloop van de proeven	21
2.3.4	Data analyses	21
2.4	Testen met sensoren	22
2.4.1	Autonome sensor: Barotrauma detection system (BDS)	22
2.4.2	Paling met sensor: backpacksensoren	24
2.4.3	Data analyses sensoren	25
2.4.3.1	Event identificatie met behulp van druksensor-tijdreeksen	25
2.4.3.2	Berekening van druk parameters	25
2.4.3.3	Relevantie van grenswaarden voor de vispopulatie te Stenensluisvaart	26
2.4.3.4	Opstellen van grenswaarden	27
2.4.3.5	Statistische analyse	28
2.5	Inschatting van slagschade met Van Esch blade strike model	28
3	Resultaten	30
3.1	Testen met gedwongen doorvoer van paling	30
3.1.1	Aantallen en lengtefrequentieverdeling	30
3.1.2	Overleefbaarheid	31
3.1.2.1	Sterftekans	32
3.1.2.2	Verwondingskans	32

3.1.3	Waterkwaliteit	32
3.2	Testen met sensoren	33
3.3	Blade strike model	34
4	Bespreking.....	35
4.1	Testen met gedwongen doorvoer van paling	35
4.1.1	Hervangstpercentages	35
4.1.2	Lengteklassen.....	35
4.1.3	Mortaliteit en verwonding	36
4.2	Testen met sensoren	37
4.2.1	Risico op mortaliteit door snelle decompressie	37
4.2.2	Invloed van gedrag op decompressie bij passage doorheen de VaHo-pomp.	38
4.3	Blade strike model: Risico op mortaliteit door bladinslag	38
5	Besluit	39



Lijst van figuren

- Figuur 1:** Steekproefgrootte om zowel het halen (groen) als het overschrijden (rood) van een norm statistisch te kunnen aantonen, voor vier verschillende normen (0,2 %, 1,0 %, 5,0 % en 10,0 % max aantal beschadigde vissen). 16
- Figuur 2:** Schematische weergave en dimensies van de BDS-sensor, met aanduiding van de locaties van de drie drukomzetteren en de IMU. Links: zijzicht van de sensor. Rechts: bovenaanzicht van de halfronde dop die de linkse (L), middelste (M) en rechtse (R) drukgaten toont. De assen worden als groene pijlen weergegeven. De Hoeken van Euler: 'pitch' (z-as), 'roll' (y-as) en 'yaw' (x-as) (Tuhtan JA.). 23
- Figuur 3: (A)** Laboratoriumdrukttestopstelling. Maximaal 20 BDS en 30 A-tags kunnen gelijktijdig onder druk worden getest tot 500 kPa (50 m H₂O) in de drukkamer. De HOBO-sensor werd gebruikt voor validatie. **(B)** Voorbeeld van een testdataset die het op- en aflopen van de statische drukttest laat zien en verschillende snelle gebeurtenissen voor dynamische drukttesten. 23
- Figuur 4:** Vergelijking van de Vis+BDS impact-'handtekening' (links, in blauw) en de BDS-sensor alleen (rechts, in rood) wanneer deze valt van een verticale hoogte van 1 m op een stalen plaat ('contact'). De lineaire accelerometer uitlezing in de verticale richting (Y-as) wordt genomen als de impact handtekening. De impactgebeurtenis voor de Vis+BDS was kort en werd elastisch geabsorbeerd ('deformation, shock absorption'), daar waar de BDS-sensor na het raken van de plaat verschillende keren inelastisch opbotst op de staalplaat ('sensor bouncing on steel plate') vooraleer op zijn zijde en stil te vallen ('at rest'). De zwarte rubberen dichtingsring van de BDS-sensor dempt ook de initiële impact wanneer de sensor verticaal op de staalplaat valt. Het opbotsen van de sensor op de staalplaat toont hogere lineaire acceleraties (Tuhtan JA.). 24
- Figuur 5: A)** Tijdreeks van BDS-druksensoren tijdens een typische turbinepassage. **B)** De drie drukgerelateerde fysische parameters die worden gebruikt om het risico op sterfte onder vissen als gevolg van snelle decompressie te evalueren, zijn de NADIR-druk, de drukveranderingssnelheid (ROC) en de logverhouding van de drukverandering (LRP). 26
- Figuur 6:** Lengtefrequentieverdelingen van de gebruikte palingen per scenario, namelijk de doorvoerproef en de controlegroep, in **(A)** absolute aantallen en **(B)** relatieve aantallen (= densiteit). 30
- Figuur 7:** Sterfte- en overlevingspercentages na de proef voor alle individuen die door de pomp zijn gegaan bij toerental 250 rpm versus de controledieren. Het overlevingspercentage werd berekend volgens formules uit de NEN-richtlijn (NEN 8775+C1). 32
- Figuur 8:** Boxplots van de drie fysische parameters (namelijk NADIR (hPa), ROC (hPa/s), LRP) en de passage tijd (s), vergeleken tussen backpack- en bds-sensoren. De boxen visualiseren de interkwartielafstand, namelijk van het 25ste tot het 75ste percentiel. De zwarte lijn visualiseert de mediaan en de zwarte bollen representeren outliers. De gele en rode lijn, respectievelijk voor paling en Cypriniden (witvis), visualiseren de grenswaarden voor elke fysische parameter waarbij er een mortaliteit van meer dan 10 % kan optreden indien deze overschreden worden. 34



Lijst van foto's

Foto 1: Kaart van de lokalisatie van het pompemaal op de Stenensluisvaart te Woumen (uit Germonpré <i>et al.</i> , 1994).	13
Foto 2: (A) Testopstelling met stroomafwaarts van de pomp een kooi die de vissen opvangt en (B) de kooi met afmetingen 2x2x2 m.	17
Foto 3: Trechter voor invoer van de vissen in de pompkelder	17
Foto 4: (A) Invoer van de proefdieren in de pompkelder via een trechter en (B) de flexibele buis met verbreed uiteinde om achtergebleven vissen richting de pomp te geleiden.	18
Foto 5: Na de proef werden de palingen via een afvoer aan de kooi verzameld in een schepnet en verdeeld over meerdere kuipen.	19
Foto 6: Paling na passage door de pomp met een insnijding aan de kop, breuk in het schedeldak en het linkeroog zwaar beschadigd (schadeklasse categorie 3.2, 3.3 en 3.4) en een individuele fotocode (2208).	21
Foto 7: Voorbeeld van een BDS-sensor van de Universiteit van Tallinn.	22
Foto 8: Twee voorbeelden van sensortags bevestigd aan de dorsale vin van levende palingen.	25



Lijst van tabellen

Tabel 1: 95 % Betrouwbaarheidsintervallen rondom het percentage dode vissen (x) in relatie tot het totaal aantal doorgevoerde vissen (N) door de installatie (x = aantal successen, in ons geval aantal dode vis (schade);	15
Tabel 2: Indeling in schadeklassen volgens NEN-richtlijn (NEN 8775+C1)	20
Tabel 3: Overzicht van endemische families en geselecteerde vissoorten in de Stenensluisvaart te Woumen op basis van de datarecords voor de Stenensluisvaart op VIS (vis informatie systeem) (Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, 2012), met vermelding van de beschikbaarheid van gepubliceerde fysische grenswaarden uit eerdere studies en hun biologische gevoeligheid voor sterfte. Als er grenswaarden beschikbaar zijn, zijn de specifieke parameters en hun waarden opgenomen in het overzicht van fysische parameters in Tabel 10 - Tabel 12. De biologische gevoeligheidsklassen en scores zijn afkomstig uit (van Treeck <i>et al.</i> , 2020).	27
Tabel 4: Soortafhankelijke kenmerken van het blade strike model volgens Van Esch.	29
Tabel 5: Pompenkenmerken van de geteste VaHo-pomp voor het blade strike model volgens Van Esch.	29
Tabel 6: Overzicht van de lengtes (en standaardafwijking) van de gebruikte palingen bij de doorvoerproef en de controlegroep.	30
Tabel 7: Overzicht van het aantal palingen per scenario (doorvoerproef en controle), hun toestand onmiddellijk en tot 48h na de proef, de eventueel vastgestelde schadeklasse en hun overlevings/sterftepercentage bij een toerental van 250 rpm. Het overlevingspercentage werd berekend volgens formules uit de NEN-richtlijn (NEN 8775+C1).	31
Tabel 8: Dagelijkse meting van de temperatuur, pH en zuurstofsaturatie in de testopstelling voor aanvang van de proeven 's ochtends.	32
Tabel 9: Gemiddelde waarden van de drie fysische parameters (\pm standaarddeviatie) veroorzaakt door drukveranderingen, die werden gemeten door de bds- en backpacksensoren, en de gemiddelde passage tijd.	33
Tabel 10: Overzicht van de grenswaarde van het drukdieptepunt (NADIR) (kPa) voor verschillende vissoorten op basis van literatuur.	44
Tabel 11: Overzicht van de grenswaarde van de logratio drukverandering (LRP) voor verschillende vissoorten op basis van literatuur.	45
Tabel 12: Overzicht van de grenswaarde van de drukveranderingssnelheid (ROC) voor verschillende vissoorten op basis van literatuur.	46



1 INLEIDING EN DOELSTELLINGEN

In het pompemaal op de Stenensluisvaart te Woumen (Diksmuide) wordt water van het stroomgebied van de Blankaart naar de IJzer gepompt. Langs dit pompemaal passeren ook vissen, waaronder palingen, die (lethaal) verwond konden geraken door de oude klassieke axiaalpompen in het gemaal die als zeer visonvriendelijk beschouwd worden. Eerder onderzoek van het pompemaal te Woumen documenteerde bij palingen verwondingen zoals kneuzingen, schaafwonden, pletten, en zwellingen na passage door de klassieke axiaalpompen (Germonpré *et al.*, 1994). Ook werden er restanten van palinghuid aangetroffen in de pomp (Germonpré *et al.*, 1994). Ondanks de beperkte staalname van de studie werd er geadviseerd om het pompemaal te saneren, aangezien het een belangrijke migratieroute is van zilverpalingen die richting de Sargassozee trekken (Germonpré *et al.*, 1994). De klassieke axiaalpompen in het pompemaal op de Stenensluisvaart werden vervangen door twee axiaalpompen, de VaHo-pomp (ontworpen door de firma Van Hooste), waaraan visvriendelijke kenmerken worden toegemeten.

Door het (deels) visveilig¹ maken van pompgemalen wil de waterbeheerder, de Vlaamse Milieumaatschappij (VMM), tegemoet komen aan de doelstellingen geformuleerd in de Europese Kaderrichtlijn Water, het decreet integraal waterbeleid, het palingbeheerplan en de Benelux beschikking inzake vrije vismigratie.

Europese Kaderrichtlijn Water (KRW):

De Europese Kaderrichtlijn Water verplicht lidstaten (i.c. waterbeheerders) ecologische doelen voor hun oppervlaktewateren op te stellen en te realiseren. De lidstaten moeten doelen formuleren voor algen, waterplanten en macrofauna, maar ook voor soorten en aantallen vissen die horen bij een ecologisch goed functionerend watersysteem. Indien de huidige visstand niet voldoet aan de gestelde doelen, worden de waterbeheerders verondersteld van maatregelen te nemen.

Palingbeheerplan:

De Europese ministerraad heeft in 2007 de palingverordening uitgevaardigd (EG/1100/2007) om de dramatische achteruitgang van de bestanden van de Europese paling (*Anguilla anguilla*) te stoppen (European Council, 2007). De verordening verplichtte alle lidstaten om tegen eind 2008 voor elk stroomgebied een beheerplan op te maken voor de bescherming en het herstel van de palingbestanden. De lidstaten moeten de nodige maatregelen treffen om ervoor te zorgen dat op termijn minstens 40 % van de volwassen zilverpaling de open zee kan bereiken om zich voort te planten (Anoniem, 2009).

Vrije vismigratie:

Naast paling zijn er ook veel andere vissoorten in Vlaanderen bedreigd of zelfs verdwenen, omdat hun migratiemogelijkheden worden/werden beperkt. Het is duidelijk dat een verbetering van de waterkwaliteit niet voldoende is om het visbestand in Vlaanderen te herstellen. Willen we de vissoorten in onze waterlopen kansen geven, dan moeten de migratieroutes terug open gemaakt worden en moeten we zorgen voor betere leefgebieden. Dit kan o.a. door het verwezenlijken van groenere infrastructuurwerken: ontwikkelen van visveilige pompen moeten vissen in staat stellen om pompgemalen veilig te passeren.

Pompgemalen vormen een belangrijk puzzelstuk in het herstel van vrije vismigratie. In het kader van de opvolging van het palingbeheerplan (Anoniem, 2009) werd een inventaris opgemaakt van tenminste 172 pompgemalen op openbare waterlopen in Vlaanderen. Het grootste deel van deze pompgemalen wordt beheerd door polders en wateringen. Deze gemalen pompen niet alleen water weg uit laaggelegen poldergebieden, ook buiten de polders bevinden zich een aantal pompgemalen. Uit onderzoek van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO) blijkt dat er veel vissen beschadigd en/of gedood worden bij de passage van klassieke pompgemalen. De helft van de 172 pompgemalen zijn uitgerust met schroefpompen of axiaalpompen, welke ook de meest schadelijke pomptypes zijn. De andere gemalen zijn uitgerust met vijzels (23 %), centrifugaalpompen (16 %) en dompelpompen (12 %) (Buysse *et al.*, 2010; Baeyens *et al.*, 2011; Stevens *et al.*, 2011). De pompwerking is het hoogst in het voor- en het najaar. Bijna de helft van de jaarlijkse pompwerking valt samen met de periode van stroomafwaartse migratie van zilverpaling. Palingen trekken naar zee bij verhoogde afvoer en dus pompwerking, dit kan al vanaf april bij verhoogde afvoermomenten en duurt tot december (Buysse *et al.*, 2015). Pompgemalen hebben dan ook potentieel een zeer

¹ In evaluaties en rapportages van vismigratie door pompgemalen wordt vaak gesproken over visvriendelijkheid. In dit rapport wordt naar analogie met NEN 8775+C1 gekozen voor de term visveiligheid, omdat visvriendelijkheid niet definieerbaar is in deze context. Met visveiligheid wordt bedoeld de fractie onbeschadigde vissen ten opzichte van het totaal aantal gepasseerde vissen per soort en per lengteklasse.

grote impact op de naar zee trekkende zilverpalingen (Stevens *et al.*, 2011). Daarom schakelt de VMM als waterbeheerder steeds vaker over op visveilige pompen en vijzels. In de ontwikkeling van deze alternatieve pompen is het belangrijk dat ze getest worden op een gestandaardiseerde wijze. In België is er geen norm over hoe de visveiligheid getest moet worden, echter heeft Nederland wel een dergelijke norm die gekend is als NEN 8775+C1. NEN 8775+C1 bepaalt dat de visveiligheid van pompen en turbines dient te worden vastgesteld door een dierproef, waarbij een bepaald aantal vissen van verschillende soorten (doorgaans paling en overige vissoorten) gedwongen door de pomp of turbine zwemmen.

Het doel van deze studie is een kwantitatieve evaluatie uit te voeren van de effecten van de werking van de VaHo-pomp op palingen. Deze studie, in laboratoriumomstandigheden, wordt uitgevoerd voorafgaand aan de uiteindelijke productie en installatie in Woumen. In een tweede fase moet in situ ook de visveiligheid van de pomp voor andere vissoorten getest worden. Dit aanvullend onderzoek maakt geen deel uit van dit rapport.

Net zoals er geen norm is over hoe visveiligheid getest moet worden, is er ook geen norm voor visveiligheid. In deze studie is de norm, die bepaald werd door de VMM, vastgelegd op een maximale mortaliteit van 10 % bij paling na doorvoer doorheen de pomp. De visveiligheid van de VaHo-pomp zal geëvalueerd worden in termen van visoverleefbaarheid en vispasseerbaarheid. De visoverleefbaarheid is de mate waarin schade en sterfte optreden aan een vis bij pogingen om de pompen te passeren. De schade en verwondingen die mogelijks optreden bij het passeren door de pomp worden veroorzaakt door botsing met de schoepen of andere bewegende of stilstaande delen, snelle drukverschillen, turbulentie en stroomsnelheid (hydraulische shear) en cavitatie. De vispasseerbaarheid is de mate van migratie doorheen de pomp die mogelijk is. Dit wordt bepaald door fysische factoren (grof vuil rooster en afmetingen, beïnvloeding van stroomsnelheden) enerzijds en gedragsfactoren (geluid, trilling, licht) anderzijds.

In functie van de visoverleefbaarheid werd onderzocht:

- of er eventueel schade of sterfte bij paling optreedt die door de pomp passeren;
- of grote palingen de pomp schadeloos kunnen passeren;
- of er uitgestelde sterfte optreedt tot 24 uur na passage door de pomp;
- welke impacts, drukverschillen, versnellingen en rotaties palingen ondergaan bij passage door de pomp door gebruik te maken van sensoren (BDS-sensoren en Fish Backpack sensoren die op levende palingen bevestigd worden).

2 MATERIAAL EN METHODE

2.1 De Stenensluisvaart in het stroomgebied de Blankaart

De Stenensluisvaart is gelegen in het IJzerbekken en verbindt het stroomgebied van de Blankaart met de IJzer (Declercq & Casteleyn, 1993). Via het pompemaal op de Stenensluisvaart wordt water afkomstig van de Blankaartvijver afgevoerd in de IJzer (Declercq & Casteleyn, 1993).

De Blankaart is een laaggelegen moerasgebied dat zich in het overstromingsgebied van de IJzer bevindt (Natuurpunt, z.d.; VLM, 2022). Dit natuurgebied is een hotspot voor trekkende watervogels en werd hierdoor erkend als een Ramsargebied en een Natura2000-gebied (EU-Vogelrichtlijn 'IJzervallei' BE2500831), bijgevolg is het gebied dus Europees beschermd (Integraal Waterbeleid, z.d.; VLM, 2022). De Blankaartvijver werd destijds door de mens gecreëerd als gevolg van turfwinning (Natuurpunt, z.d.). Sinds 1959 is de Blankaartvijver en het omliggende moeras in beheer van Natuurpunt, en in 1979 kwam ook het aanliggende overstroombare riet- en grasland in beheer van Natuurpunt (Natuurpunt, z.d.). De Blankaartvijver wordt gevoed door waterlopen zoals de Ronebeek en de Steenbeek, uit de hoger gelegen zandleemstreek (Integraal Waterbeleid, z.d.).

De IJzer is een rivier die door Frankrijk en België stroomt en uitmondt in de Noordzee te Nieuwpoort. De IJzer kan worden onderverdeeld in een boven- en benedenloop. De bovenloop gaat van de bron in Frankrijk tot Diksmuide en heeft zich ontwikkeld door natuurlijke processen. De benedenloop gaat van Diksmuide tot aan de monding in de Noordzee, hiervan is de ontwikkeling sterk gestuurd door menselijk toedoen. De IJzer heeft een te lage bergingscapaciteit bij zware neerslag waardoor deze kan overstromen (Provoost, 1997). Het Blankaartgebied is één van de overstromingsgebieden van de IJzer en fungeert als natuurlijk wachtbekken (Natuurpunt, z.d.; Provoost, 1997).

2.2 Het pompemaal op de Stenensluisvaart

Het pompemaal Stenensluisvaart in Woumen is in werking sinds 1953, en voert water af van het Blankaartgebied in de IJzer (Declercq & Casteleyn, 1993) (Foto 1). Vroeger zorgde dit pompemaal voor waterafvoer van zowel de Blankaartvijver als het bekken van de Engelendelft (Declercq & Casteleyn, 1993). Na de bouw van een nieuw pompemaal op de waterloop Engelendelft, zorgt het pompemaal Stenensluisvaart enkel nog voor de waterafvoer van de Blankaartvijver (Declercq & Casteleyn, 1993, VLM, 2022).

Het pompemaal Stenensluisvaart bezat twee elektrisch aangedreven axiaalpompen die visonveilig waren (Germonpré *et al.*, 1994), deze zijn vervangen door twee VaHo-axiaalpompen waaraan visveilige kenmerken werden toegemeten. Deze nieuwe pompen werden ontwikkeld door de firma Van Hooste.

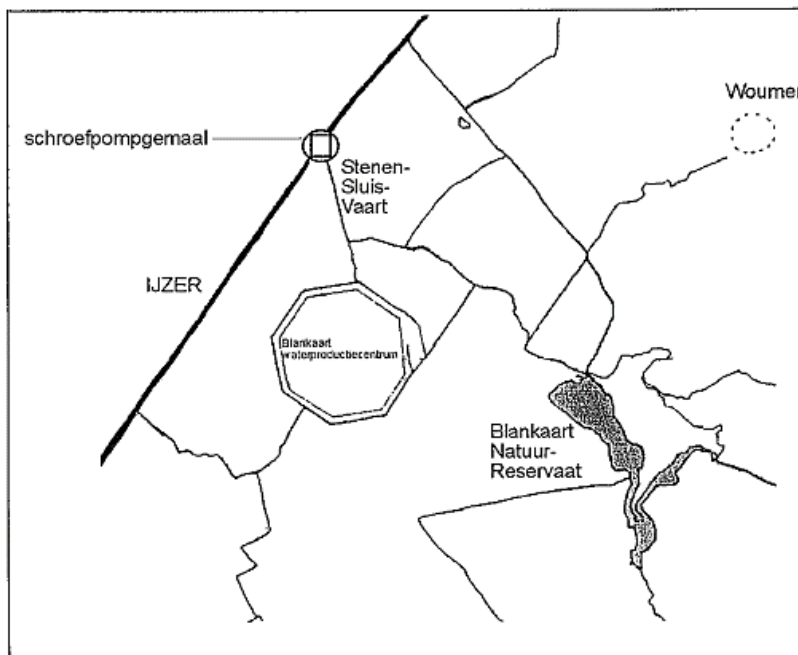


Foto 1: Kaart van de lokalisatie van het pompemaal op de Stenensluisvaart te Woumen (uit Germonpré *et al.*, 1994).

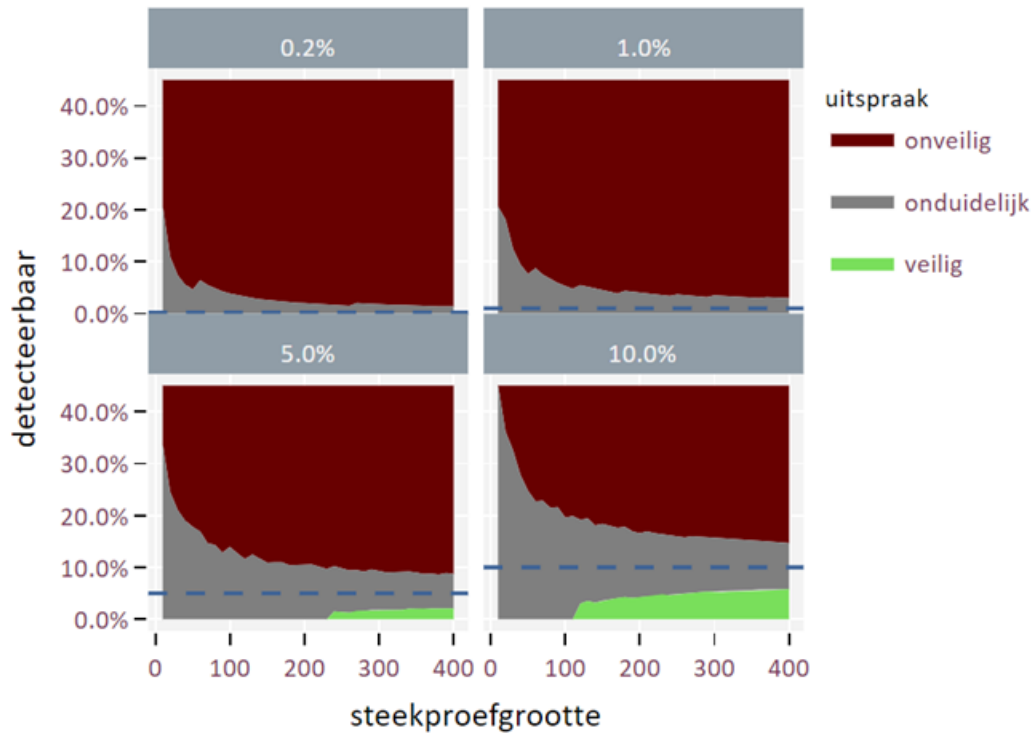
per lengteklasse. Visveiligheidsproeven met minder dan 100 vissen per testscenario, per vissoort en per lengteklasse resulteren statistisch gezien in geringere accuraatheid en dat is onwenselijk.

Wanneer het 95 % betrouwbaarheidsinterval wordt uitgerekend, met 100 vissen per soort, dan kan in onderstaande tabel de onder- en bovengrens van het interval afgelezen worden. Als er op de 100 gepasseerde dieren geen enkele vis met lethale schade is, is het schade interval 0,00 % - 3,62 %. Dit interval houdt in dat als de proef opnieuw zou worden uitgevoerd er 95 % kans is dat de geconstateerde schade wederom binnen deze grenzen ligt. Wanneer er één vis een lethale schade oploopt, is dit interval 0,03 % - 5,45 % en wanneer twee vissen lethaal beschadigd zijn, is dit interval 0,24 % - 7,04 %. Wanneer drie vissen lethaal beschadigd zijn dan is dit interval ten slotte 0,62 % - 8,52 % (Tabel 1). In Tabel 1 zijn ook grotere aantallen vis opgenomen, zodat gezien kan worden dat de bepaling nauwkeuriger wordt wanneer met meer vissen wordt gewerkt.

Wanneer men 200 vissen per soort test, zit er op een norm van 1 % maximaal beschadigd aandeel vissen een fout van 2,57 %. Deze fout reduceert naar 1,69 % wanneer er 300 vissen getest worden, enz. Figuur 1 toont grafisch het aantal proefvissen dat nodig is om het halen of overschrijden van een norm statistisch aan te tonen. Het aantal proefvissen wordt getoond voor vier verschillende normen, nl. 0,2 %, 1,0 %, 5,0 % en 10 % van de vissen die zwaar beschadigd zijn na passage door de pomp. De figuur toont dat het aantonen van een norm van 10 %, zoals gevraagd door VMM, al haalbaar is met 100 proefvissen. Om een strengere norm aan te tonen moeten echter minstens 200 vissen van dezelfde soort getest worden.

Tabel 1: 95 % Betrouwbaarheidsintervallen rondom het percentage dode vissen (x) in relatie tot het totaal aantal doorgevoerde vissen (N) door de installatie (x = aantal successen, in ons geval aantal dode vis (schade); N = totaal aantal gepasseerde vissen (vissen door de pomp); BinomLow = ondergrens van het betrouwbaarheidsinterval; BinomHigh = bovengrens van het betrouwbaarheidsinterval; Proportie = schadeproportie; % = schadepercentage)(bron: NEN 8775+C1).

Dode vis x	aantal gepasseerd N	Schade ligt met 95% zekerheid tussen ondergrens en bovengrens						
		95%	BinomLow	BinomHigh	Proportie	%	Schade%ondergrens	Schade%bovengrens
0	100	0,025	0,0000	0,0362	0,0000	0,0	0,00	3,62
1	100	0,025	0,0003	0,0545	0,0100	1,0	0,03	5,45
2	100	0,025	0,0024	0,0704	0,0200	2,0	0,24	7,04
3	100	0,025	0,0062	0,0852	0,0300	3,0	0,62	8,52
4	100	0,025	0,0110	0,0993	0,0400	4,0	1,10	9,93
5	100	0,025	0,0164	0,1128	0,0500	5,0	1,64	11,28
6	100	0,025	0,0223	0,1260	0,0600	6,0	2,23	12,60
7	100	0,025	0,0286	0,1389	0,0700	7,0	2,86	13,89
8	100	0,025	0,0352	0,1516	0,0800	8,0	3,52	15,16
9	100	0,025	0,0420	0,1640	0,0900	9,0	4,20	16,40
10	100	0,025	0,0490	0,1762	0,1000	10,0	4,90	17,62
0	150	0,025	0,0000	0,0243	0,0000	0,0	0,00	2,43
1	150	0,025	0,0002	0,0366	0,0067	0,7	0,02	3,66
2	150	0,025	0,0016	0,0473	0,0133	1,3	0,16	4,73
0	200	0,025	0,0000	0,0183	0,0000	0,0	0,00	1,83
1	200	0,025	0,0001	0,0275	0,0050	0,5	0,01	2,75
2	200	0,025	0,0012	0,0357	0,0100	1,0	0,12	3,57
0	300	0,025	0,0000	0,0122	0,0000	0,0	0,00	1,22
1	300	0,025	0,0001	0,0184	0,0033	0,3	0,01	1,84
2	300	0,025	0,0008	0,0239	0,0067	0,7	0,08	2,39
0	400	0,025	0,0000	0,0092	0,0000	0,0	0,00	0,92
1	400	0,025	0,0001	0,0138	0,0025	0,3	0,01	1,38
2	400	0,025	0,0006	0,0179	0,0050	0,5	0,06	1,79
0	500	0,025	0,0000	0,0074	0,0000	0,0	0,00	0,74
1	500	0,025	0,0001	0,0111	0,0020	0,2	0,01	1,11
2	500	0,025	0,0005	0,0144	0,0040	0,4	0,05	1,44
0	1000	0,025	0,0000	0,0037	0,0000	0,0	0,00	0,37
1	1000	0,025	0,0000	0,0056	0,0010	0,1	0,00	0,56
2	1000	0,025	0,0002	0,0072	0,0020	0,2	0,02	0,72
0	2000	0,025	0,0000	0,0018	0,0000	0,0	0,00	0,18
1	2000	0,025	0,0000	0,0028	0,0005	0,1	0,00	0,28
2	2000	0,025	0,0001	0,0036	0,0010	0,1	0,01	0,36
0	5000	0,025	0,0000	0,0007	0,0000	0,0	0,00	0,07
1	5000	0,025	0,0000	0,0011	0,0002	0,0	0,00	0,11
2	5000	0,025	0,0000	0,0014	0,0004	0,0	0,00	0,14



Figuur 1: Steekproefgrootte om zowel het halen (groen) als het overschrijden (rood) van een norm statistisch te kunnen aantonen, voor vier verschillende normen (0,2 %, 1,0 %, 5,0 % en 10,0 % max aantal beschadigde vissen).

2.3.2 Testopstelling

De proef werd uitgevoerd in een speciaal ontworpen testopstelling bij de firma Van Hooste. In tegenstelling tot de praktijk, is een pomp in labo-omgeving niet ingebouwd in een gemaal. De geteste pomp in de testopstelling heeft wel een identiek concept van waaier en status als de uiteindelijke VaHo-pomp die in Woumen geïnstalleerd werd, namelijk: debiet: 2 m³/s, rendement > 80 %, toerental van 250 rpm en een opvoerhoogte van 1,24 m (inclusief leidingverliezen, etc.).

Om de visveiligheid van de pomp te testen werden de palingen naar de basis van de pomp geleid via een trechter verbonden aan een buis (Foto 3). Vissen die de pomp passeerden werden stroomafwaarts opgevangen via een kooi (Foto 2: A/B). De tussenafstand van de spijlen van de kooi bedroeg 1,5 cm.



Na de eerste testdag bleek dat sommige proefdieren uit de opvangkooi konden ontsnappen, vermoedelijk buigen de spijlen ietwat open waardoor sommige palingen zich tussen de spijlen konden wringen. Dit werd bij de vervolgprouven aangepast door aanbrengen van extra verticale dwarslatten die doorbuiging van de spijlen verder kon beperken.



Foto 2: (A) Testopstelling met stroomafwaarts van de pomp een kooi die de vissen opvangt en (B) de kooi met afmetingen 2x2 m.



Foto 3: Trechter voor invoer van de vissen in de pompkelder

2.3.3 Handelingen

2.3.3.1 Acclimatisatie

Om te acclimatiseren aan het water in de testopstelling en om te bekomen van eventuele stress ten gevolge van het transport werden de proefdieren minstens 24 uur bijgehouden in drie beluchte kuubvaten alvorens de proeven op te starten (Foto 4). Direct na de proeven werden de vissen ook nog gestockeerd in de kuubvaten, maar gedurende de nacht werden de vissen ruimer gestockeerd in knooploze (Noorse) leefnetten die werden opgehangen in de testopstelling (Foto 5). De netten werden geplaatst in de proefopstelling stroomafwaarts van de pomp, zonder dat de pomp in werking was. De densiteiten in de leefnetten en kuubvaten waren vergelijkbaar met deze bij de viskwekerij. De waterkwaliteit in de leefnetten werd iedere dag gecontroleerd door de parameters temperatuur, pH en zuurstofsaturatie te meten.





Foto 4: Drie beluchte kuubvaten voor stockage van de proefdieren overdag.



Foto 5: Één van de leefnetten, opgehangen in het water van de testopstelling, in functie van de stockage van de proefdieren gedurende de nacht. Het leefnet wordt hier in uit het water gelifte toestand getoond.

2.3.3.2 *Overbrengen van vissen naar de invoerlocatie*

Nadat de vissen uit de kuubvaten geschept werden met een schepnet, werden ze in goed beluchte kuipen overgezet.

2.3.3.3 *Invoeren van de vissen in de pompkelder*

Voorafgaand aan de invoer in de pompkelder werden alle palingen nauwkeurig onderzocht op aanwezige schade en werden beschadigde vissen uitgesloten van de proeven. Die schade kunnen ze opgelopen hebben in de kwekerij. Via een trechter, verbonden aan een buis, konden de vissen voorzichtig ingebracht worden in de pompkelder (Foto 4A). De vissen werden met een schepnet uit de kuipen geschept en vervolgens met de hand ingevoerd in de trechter, 90 proefdieren werden met de kop eerst ingevoerd en 88 proefdieren met de staart eerst. Na de invoer van de proefdieren via de trechter, werd een andere flexibele buis met verbreed uiteinde in de trechter geduwd om de mogelijke overgebleven proefdieren richting de pompkelder te drijven (Foto 4B). Achter de pomp werden de opgepompte vissen opgevangen in een kooi. Het invoeren van de proefdieren nam slechts enkele minuten in beslag.



Foto 4: (A) Invoer van de proefdieren in de pompkelder via een trechter en (B) de flexibele buis met verbreed uiteinde om achtergebleven vissen richting de pomp te geleiden.



2.3.3.4 *Collecteren van verpompte vissen*

Na elke proef werden de vissen opgevangen in een kooi. Vervolgens werd de kooi door middel van een kraan uit het water getild. De bodem van de kooi bestond uit een gladde en schuin aflopende volle plaat met korte opstaande wanden langs de vier zijden. Daardoor behield de kooi een beperkt volume water waarin de palingen vrij konden rondzwemmen. Dit water werd samen met de verpompte vissen via een korte afvoeropening geloosd in schepnetten en verdeeld over verschillende kuipen (Foto 5). Enkele proefdieren raakten gekneld tussen de spijlen van de opvangkooi (zie bijlage 4), deze knelschade van de kooi werd niet meegerekend als schade veroorzaakt door de pomp aangezien de kooi uitsluitend onderdeel is van de testopstelling.



Foto 5: Na de proef werden de palingen via een afvoer aan de kooi verzameld in een schepnet en verdeeld over meerdere kuipen.

2.3.3.5 *Controlegroepen*

Een aantal vissen wordt ter controle getest op eventuele negatieve effecten van de hele behandeling van de studiedieren voor en na het doorvoeren in de pomp. Het nut om controlevissen in te zetten is vooral afhankelijk van de aard van de vangconstructie aan het einde van de pomp. Wanneer vissen in de vangconstructie gewond zouden kunnen raken, dan worden daar controlevissen toegevoegd die niet door de pomp passeerden. Van deze vissen wordt ook geëvalueerd of ze gewond zijn of niet. Bovendien worden de controledieren ook gedurende de nacht gestockeerd in de leefnetten om eventuele negatieve effecten van het stockeren van de vissen te evalueren. In het totaal waren er 51 controledieren.

2.3.3.6 *Bepalen van verwondingen*

We halen de vissen uit de kooi met een schepnet en brengen ze over naar een transportbak die continu wordt belucht. Alvorens de vissen te meten, controleren we de vissen in de transportbak op afwijkend zwemgedrag (bovendrijven, 'rugzwemmers'). De lengte van alle vissen werd tot op de millimeter nauwkeurig gemeten en alle vissen werden één voor één grondig geïnspecteerd op schade en/of sterfte. De visschadebepaling werd gedaan op zowel de doorvoerproef- als de controledieren.

De visschadebepaling werd gedaan volgens de indeling in schadeklassen zoals vastgelegd in de NEN-richtlijn (NEN 8775+C1) (Tabel 2).



Tabel 2: Indeling in schadeklassen volgens NEN-richtlijn (NEN 8775+C1)

		<u>Categorie</u>
1.		Gezonde, onbeschadigde vis
2.		Licht beschadigde vis
	2.1	Rode en/of beschadigde ogen
	2.2	Rode en/of beschadigde vinnen
	2.3	Lichte krassen, kneuzingen en/of schubverlies <20 %
3.		Zwaar (terminaal) beschadigde vis
	3.1	Aanzienlijk schubverlies >20 %
	3.2	Insnijdingen, doorsnijdingen, afgesneden lichaamsdelen
	3.3	Breuken
	3.4	Zwaar beschadigde of ontbrekende ogen
	3.5	Zwaar beschadigde kieuwen/kieuwdeksels
	3.6	Zware kneuzingen en/of bloedingen
	3.7	Abnormaal zwemgedrag
4.		Dode vis

De overlevingspercentages per scenario (doorvoerproef of controle) werden berekend volgens onderstaande formules uit de NEN-richtlijn (NEN 8775+C1):

- Overlevingspercentage van de controlegroep:

$$S_c = \frac{c}{N_c}$$

met:

S_c = overleving van de controledieren

c = aantal hervangen, levende controledieren na de proef (na uitgestelde sterfte)

N_c = het totaal aantal hervangen controledieren na de proef (levend en dood)

- Overlevingspercentage van de doorgevoerde proefdieren:

$$S_T = \frac{t \times N_c}{N_T \times c}$$

met:

S_T = overleving van de doorgevoerde proefdieren

c = aantal hervangen, levende controledieren na de proef (na uitgestelde sterfte)

t = het totaal aantal hervangen, levende doorgevoerde proefdieren (na uitgestelde sterfte)

N_c = het totaal aantal hervangen controledieren na de proef (levend en dood)

N_T = het totaal aantal hervangen proefdieren na de proef (levend en dood)

Op basis van de overlevingspercentages werden de sterftepercentages berekend, namelijk:

Sterftepercentage = 1 – overlevingspercentage.

2.3.3.7 Fotodatabank

Van de meeste vissen met een schadeprofiel uit categorie 2, 3 en 4 van de NEN-richtlijn (NEN 8775+C1) (Tabel 2) werd een detailfoto gemaakt. Elke vis kreeg een unieke individuele fotocode (Foto 6).





Foto 6: Paling na passage door de pomp met een insnijding aan de kop, breuk in het schedeldak en het linkeroog zwaar beschadigd (schadeklasse categorie 3.2, 3.3 en 3.4) en een individuele fotocode (2208).

2.3.3.8 Euthanasie

Vissen met schadeklasse 3 en meer (Tabel 2) werden geëthanaseerd door toedienen van een overdosis kruidnagelolie (Clove oil, Sigma-Aldrich): 3 ml/l gedurende 1 uur. Eugenol is het werkzame bestanddeel. Kruidnagelolie is een natuurlijke stof die niet kankerverwekkend is.

2.3.3.9 Uitgestelde sterfte

Na het doorlopen van de proef werden de gezonde dieren, onbeschadigde vis en de licht beschadigde vis (tot en met schadeklasse 2 – zie Tabel 2) waarvan de verwachting was dat deze ze zouden overleven, gestockeerd in de kuubvaten/leefnetten. De proefdieren uit de 'kop eerst' groep worden na 24 uur en 48 uur opnieuw gecontroleerd op afwijkend gedrag en uitgestelde sterfte. Hetzelfde doen we met de controlevissen. De individuen uit de 'staart eerst' groep werden enkel na 24 uur gecontroleerd op afwijkend gedrag en uitgestelde sterfte.

2.3.3.10 Uitzetten van de vissen na afloop van de proeven

We zetten de vissen die na 48 uur (of 24 uur in geval van de 'staart eerst' groep) gezond zijn uit in een geschikt water. Voor het uitzetten van de vissen werd toestemming gevraagd aan het Agentschap voor Natuur en Bos (ANB). De gezonde proefdieren worden vrijgelaten in de Stekense Vaart.

2.3.4 Data analyses

Voor elk scenario, doorvoerproef en controlegroep, werd de lengteverdeling berekend. Een Shapiro-Wilk test werd gebruikt om na te gaan of deze lengteverdelingen een normale verdeling hadden. Aangezien beide groepen normaal verdeeld waren, werd een t-test uitgevoerd om na te gaan of de lengteverdelingen significant verschillen tussen doorvoer- en controlegroep.

Om na te gaan in welke mate de sterftetekans afhankelijk was van het scenario (doorvoerproef of controle) en/of de lengte, werden logistische modellen opgesteld. De respons variabele was de toestand van de paling (levend of dood) met als predictorvariabelen het scenario, de lengte en hun interactie. Er werd een stapsgewijze modelselectie op basis van AIC uitgevoerd om het beste model te vinden.

Om na te gaan in welke mate de verwondingskans afhankelijk was van het scenario (doorvoerproef of controle) en/of de lengte werden multinomiale modellen opgesteld. De respons variabele was het verwondingstype van de paling (geen, lichte of zware verwonding) met als predictorvariabelen het scenario, de lengte en hun interactie. Ook hier werd een stapsgewijze modelselectie op basis van de AIC uitgevoerd. De lengtemetingen werden gestandaardiseerd (i.e. het gemiddelde aftrekken en delen door de standaardafwijking). Er werden geen betrouwbaarheidsintervallen per scenario opgesteld voor de sterfte- en verwondingskans aangezien het effect van het scenario niet significant was bij beide modellen.



Voor de statistische analyse werden de statistische software R (versie 4.4.1) en R-studio (versie 2024.04.2+764) gebruikt.

2.4 Testen met sensoren

Vissen kunnen verwondingen oplopen of sterven wanneer ze doorheen hydraulische kunstwerken zoals pompen migreren. De verwondingen of sterfte zijn een gevolg van de hydraulische omgeving, zoals cavitatie, drukdalingen, bladinslagen en/of schuifspanning (Cada *et al.*, 1999; Colotelo *et al.*, 2016; Pracheil *et al.*, 2016). Om deze hydraulische condities die kunnen leiden tot verwonding en sterfte te kwantificeren, kunnen waterdichte autonome sensoren of bio-loggers ingezet worden om informatie te verzamelen over de drukveranderingen die vissen ervaren (Deng *et al.*, 2014). Door gebruik te maken van herhaalde metingen, kunnen de druktijdsreeksen uit gemiddeld worden. Op deze manier wordt een data gestuurde weergave gemaakt van de verwachte fysische condities die vissen ervaren tijdens de passage doorheen het pompgemaal (Schneider *et al.*, 2017).

In deze studie werden, via een samenwerking met het Centre for Biorobotics van de TalTech University (Tallinn, Estland) gebruik gemaakt van barotrauma detectie sensoren (BDS) en backpacksensoren om de fysische condities te bepalen voor de axiale VaHo-pomp werkende op 250 rpm. De dimensies van een pomp kunnen de fysische condities beïnvloeden. De dimensies van de geëvalueerde pomp zijn terug te vinden in Tabel 5.

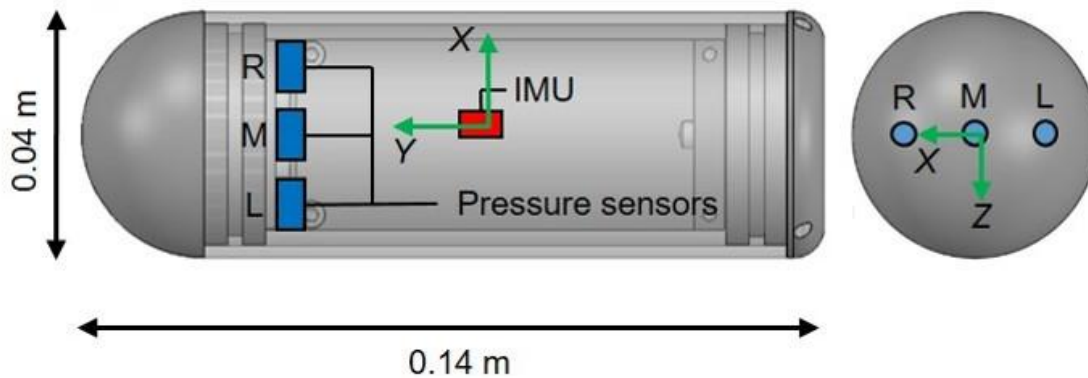
Op basis van de druktijdsreeksen werden drie fysische parameters waarvan bekend is dat ze een verhoogd risico op verwonding of sterfte veroorzaken, geëvalueerd: het drukdieptepunt net na pomppassage (NADIR) (Deng *et al.*, 2014; Deng *et al.*, 2017), de drukveranderingssnelheid (ROC) (Boys *et al.*, 2018) en de logratio drukverandering (LRP) (Boys *et al.*, 2016). De sensorgegevens werden vergeleken met grenswaarden van elke parameter op basis van de literatuur om het risico op paling of schubvis sterfte van meer dan 10 % in te schatten (Kanton AG-BE-SO, 2014).

2.4.1 Autonome sensor: Barotrauma detection system (BDS)

De behuizing van de BDS-sensor bestaat op de uiteinden uit twee POM plastic dopjes en een polycarbonaat plastic buis met een diameter van 4 cm, met een totale lengte van 12 cm en een gewicht van 143 g. Neutraal drijfvermogen van de BDS wordt bekomen door de watertemperatuur in te schatten bij gebruik van de sensor (± 5 °C) en door de lengte van de sensor manueel aan te passen door de platte plastic dop aan het uiteinde in- of uit te draaien om zo het totale sensorvolume aan te passen. De halfronde dop aan het andere uiteinde bezit drie digitale drukomzetter (MS5837-2BA, TE Connectivity, Zwitserland) met een gevoeligheid van 0,0021 kPa (0,21 mm waterkolom) en zijn lineair ingeschaald voor 25 m waterdiepte. De sensoren kunnen echter worden ingezet tot een waterdiepte van 45 m met behulp van een niet-lineaire correctie op basis van laboratoriumkalibratie. Elke drukomzetter is uitgerust met een eigen 'on-chip' temperatuur sensor die toelaat om bij alle drukmetingen real-time temperatuur correcties uit te voeren waarbij een 2de orde algoritme wordt gebruikt (Figuur 3). Alle sensoren werden getest tegen een HOB0-referentiedruksensor onder statische en dynamische omstandigheden in een laboratoriumdrukkamer van 100 kPa tot 500 kPa (Foto 7, Figuur 2) (Tuhtan *et al.*, 2018).



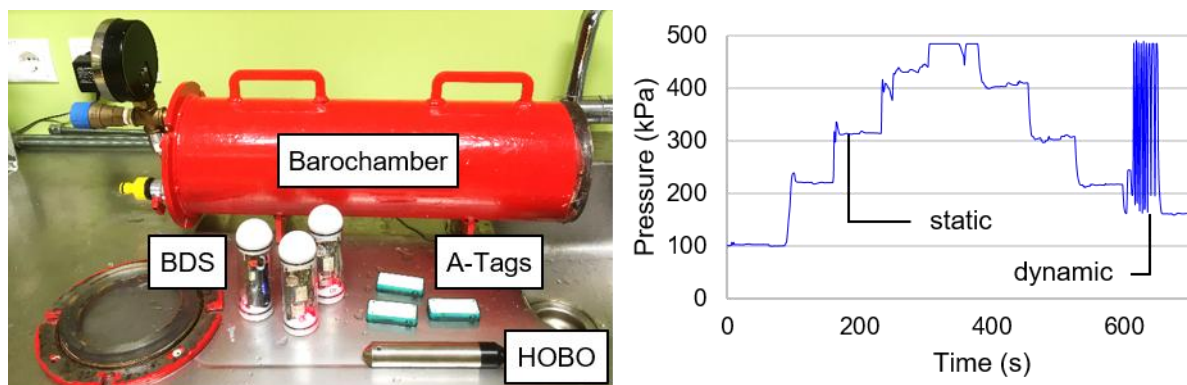
Foto 7: Voorbeeld van een BDS-sensor van de Universiteit van Tallinn.



Figuur 2: Schematische weergave en dimensies van de BDS-sensor, met aanduiding van de locaties van de drie drukomzetter en de IMU. Links: zijzicht van de sensor. Rechts: bovenaanzicht van de halfronde dop die de linkse (L), middelste (M) en rechtse (R) drukgaten toont. De assen worden als groene pijlen weergegeven. De Hoeken van Euler: 'pitch' (z-as), 'roll' (y-as) en 'yaw' (x-as) (Tuhtan JA.).

Alle BDS-sensoren zijn uitgerust met een atmosferisch auto-kalibratie algoritme. Van zodra de sensoren geactiveerd zijn met behulp van een magnetische schakelaar worden de data van elke drukomzetter gelogd voor 15 seconden. De atmosferische druk wordt intern geregistreerd. Naderhand worden alle drie de drukomzetter ingesteld op een 'default' waarde van 100,00 kPa bij lokale atmosfeer. Onmiddellijk voorafgaand aan elke ingebruikname worden alle sensoren ge-autokalibreerd aan lokale veranderingen in atmosferische druk die optreden gedurende de dag. Dit kenmerk zorgt ervoor dat de noodzaak om de drukregistraties van de sensor manueel te corrigeren, vervalt.

Na het testen van de elektronica en de mechanische montage werden alle drukomzetter gekalibreerd tegen een commerciële waterpeillogger (U20-001-02, HOBO) van atmosferische omstandigheden > 450 kPa (> 45 m waterkolom). Het HOBO-drukreferentieapparaat werd gekozen omdat het een bekend commercieel verkrijgbaar apparaat is, identiek aan het apparaat dat door de PNNL "Sensor Fish" wordt gebruikt voor drukkalibratie. De drukomzetter hadden een nauwkeurigheid van < 2 % relatieve fout. Van de 93 (3 x 30 BDS + 3 A-Tags) transducers die werden getest, voldeden er 2 niet aan het 2 % foutcriterium. De drukkamer die gebruikt werd voor alle drukexperimenten is een op maat gemaakt apparaat dat gebruikt wordt voor maritieme testtoepassingen. Het bestaat uit een 0,5 m lange gelaste stalen buis met een buitendiameter van 0,158 m en een wanddikte van 0,005 m. Eén uiteinde van het apparaat kan worden verwijderd en verzegeld met een o-ring en bevat een glazen kijkvenster. Voorafgaand aan de druktest werd de kamer aan één kant gekanteld en werd er gedurende 30 seconden water door het systeem gespoeld om ingesloten lucht te verwijderen.

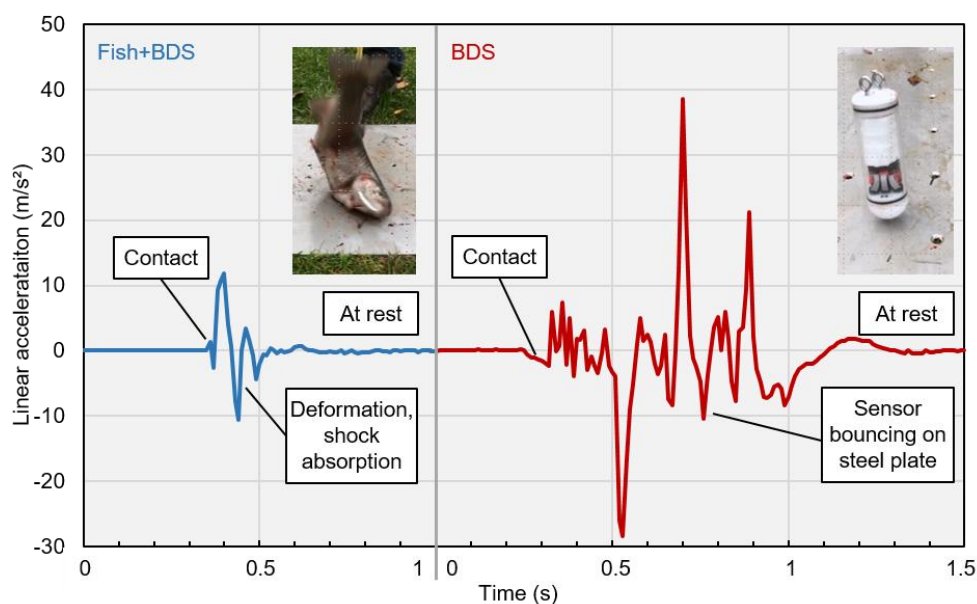


Figuur 3: (A) Laboratoriumdruktestopstelling. Maximaal 20 BDS en 30 A-tags kunnen gelijktijdig onder druk worden getest tot 800 kPa (80 m H₂O) in de drukkamer. De HOBO-sensor werd gebruikt voor validatie. (B) Voorbeeld van een testdataset die het op- en aflopen van de statische druktest laat zien en verschillende snelle gebeurtenissen voor dynamische druktesten.

Ter aanvulling op de drie drukomzetters bezit de BDS sensor ook een digitale 9 DOF IMU (BNO055, Bosch Sensortec, Germany) die een lineaire accelerometer, een gyroscoop en een magnetometer sensor incorporeert. Een gedetailleerd overzicht van de mogelijkheden, instellingen en specificaties van de IMU is te vinden op de datasheet op de website van de fabrikant Bosch. In de sensorfusiemodus worden alle variabelen opgeslagen met een snelheid van 100 Hz, met uitzondering van de magnetometer, die wordt geëxporteerd met een maximale snelheid van 20 Hz.

2.4.2 Paling met sensor: backpacksensoren

De belangrijkste parameters die een invloed hebben op impacts zijn de relatieve lichaamssnelheid, effectieve contactstijfheid en het lichaamsgewicht. Omdat BDS-sensoren een vaste afmeting en stijfheid hebben is het belangrijk om te erkennen dat impact gebeurtenissen op sensoren fundamenteel heel verschillend zijn dan deze die op levende organismen optreden, zoals ook duidelijk geïllustreerd wordt in Figuur 4. Een vissenlichaam is namelijk flexibel en beweegt, terwijl de BDS-sensoren hard en passief zijn. Daarom werden er in dit onderzoek ook een beperkt aantal levende palingen voorzien van een veel kleinere sensor genaamd de backpacksensor. De backpacksensoren zijn kleine en robuuste druk- en inertiebiologgers die ontworpen zijn om aan de rugvin van vissen te worden bevestigd. Ze worden gebruikt om de zwemactiviteit van vissen te monitoren en kunnen door kunstwerken zoals, pompstations worden geleid (Tuhtan *et al.* 2018).



Figuur 4: Vergelijking van de Vis+BDS impact-'handtekening' (links, in blauw) en de BDS-sensor alleen (rechts, in rood) wanneer deze valt van een verticale hoogte van 1 m op een stalen plaat ('contact'). De lineaire accelerometer uitlezing in de verticale richting (Y-as) wordt genomen als de impact handtekening. De impactgebeurtenis voor de Vis+BDS was kort en werd elastisch geabsorbeerd ('deformation, shock absorption'), daar waar de BDS-sensor na het raken van de plaat verschillende keren inelastisch opbotst op de staalplaat ('sensor bouncing on steel plate') vooraleer op zijn zijde en stil te vallen ('at rest'). De zwarte rubberen dichtingsring van de BDS-sensor dempt ook de initiële impact wanneer de sensor verticaal op de staalplaat valt. Het opbotsen van de sensor op de staalplaat toont hogere lineaire acceleraties (Tuhtan JA.).

Om het gewicht van de backpacksensoren zo licht mogelijk te maken heeft dit type sensor maar 1 drukomzetter in plaats van drie, zoals bij de BDS-sensoren. Bovendien wordt de drukmetingen van de backpacksensoren niet automatisch gekalibreerd. Om de BDS- en backpack sensoren te kunnen vergelijken moet deze kalibratie bij de dataverwerking worden uitgevoerd. Verder bezitten de backpacksensoren over een FDS-IMU (type Bosch BMX160 IMU) uitgebreid met FDS-HG voor hoge (+/- 400 g) versnellingsmetingen. Hiermee kan de backpack sensor dezelfde parameters meten als de BDS-sensor, waardoor data verkregen met de BDS-sensoren kan vergeleken worden met data verkregen via backpacksensoren die bevestigd waren aan palingen bij passage van de pomp.

Via een kleine chirurgische ingreep en met behulp van chirurgische hechtingsdraad werden de backpacksensoren vastgehecht aan de dorsale vin van de palingen (Foto 8). Alle palingen werden voorafgaand verdoofd in een goed beluchte watertank met 0,3 ml L-1 kruidnagelolie. Na bevestiging van de sensor en voorafgaand aan de pompproof werden de palingen overgebracht in een quarantaine tank tot ze opnieuw normaal zwemgedrag vertoonden (~30 min). Na terugvangst van paling in de kooi werd de sensor losgemaakt door de hechtingsdraden netjes te verwijderen uit de paling. Vervolgens werden de dieren uitgezet in de acclimatisatie-bewaarnetten voorafgaand aan hun vrijlating.



Foto 8: Twee voorbeelden van sensortags bevestigd aan de dorsale vin van levende palingen.

2.4.3 Data analyses sensoren

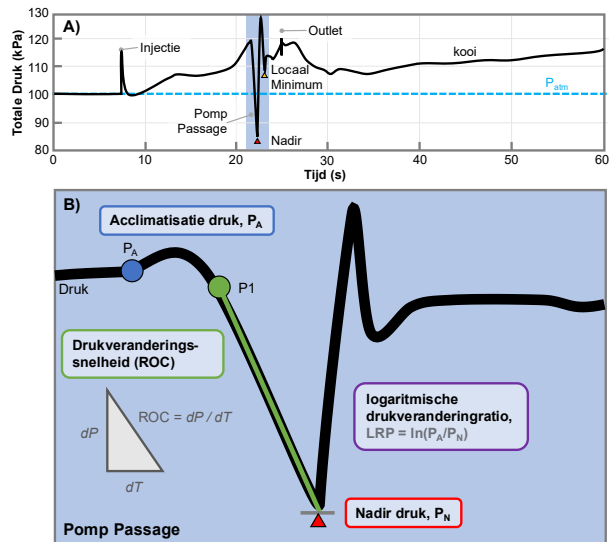
2.4.3.1 Event identificatie met behulp van druksensor-tijdreeksen

Op basis van zowel BDS data als backpack data werden druktijdreeksen opgesteld (Figuur 5A). Voor de BDS data werd het gemiddelde van de drie druksensormetingen op elk tijdstip berekend om een gemiddelde druktijdreeks te maken. De tijdreeksen werden gevisualiseerd in R (R core team, 2023) en gebeurtenissen werden geïdentificeerd aan de hand van de tijdsaanduidingen voor de injectie (I), de NADIR-druk (N) en tillen van de kooi (K) (Figuur 5A). De injectietijd voor de pomp werd bepaald aan de hand van de eerste druksensoraflezing die hoger was dan de atmosferische referentiedruk van 100,0 kPa. Dit injectietijdstip verwijst naar het moment waarop de BDS of de vis in contact kwam met het wateroppervlak. Bij contact treedt een plotselinge drukstijging op boven - 100,0 kPa. Het NADIR-tijdsaanduidingen komt overeen met de laagste drukwaarde na de injectie en representeert de passage van de propeller van de pomp. Het tillen van de kooi uit het water wordt gekenmerkt door een trage druk daling tot atmosferische druk. Verder werd ook het acclimatisatiepunt in het water (Pa) bepaald. Dit punt vertegenwoordigt de druk, bestaande uit de atmosferische druk en de waterdruk op de diepte waar de ingang van de pomp is. Tot slot werd ook de hoogste druk gemeten tijdens het interval van 1,0 s direct voorafgaand aan de NADIR-gebeurtenis (P1) geïdentificeerd (Figuur 5A).

2.4.3.2 Berekening van druk parameters

Samen met de druktijdreeksen werd de drukveranderingssnelheid (ROC) berekend op basis van de snelste drukdaling vlak voor het optreden van het drukdieptepunt (NADIR). De ROC werd berekend door het drukdieptepunt af te trekken van de hoogste druk direct voorafgaand aan de NADIR-gebeurtenis (P1) (Fu *et al.*, 2016). De ROC vertegenwoordigt de maximale tijdsveranderingssnelheid tijdens decompressie, met fysische eenheden van hPa/s. Ook werd de logaritmische drukveranderingsratio (LRP) berekend door het logaritme van de verhouding van de acclimatisatie druk (P_A) tot het drukdieptepunt (NADIR), beide zijn een weergave van de absolute druk. De LRP geeft de mate van decompressie weer en is dimensieloos. Tot slot werd de passagetijd berekend door de injectie tijdaanduiding af te trekken van de tijdsaanduiding voor de hoogste druk direct voorafgaand aan de NADIR-gebeurtenis (P1).





Figuur 5: A) Tijdreeks van BDS-druksensoren tijdens een typische turbinepassage. B) De drie drukgerelateerde fysische parameters die worden gebruikt om het risico op sterfte onder vissen als gevolg van snelle decompressie te evalueren, zijn de NADIR-druk, de drukveranderingssnelheid (ROC) en de logverhouding van de drukverandering (LRP).

2.4.3.3 Relevantie van grenswaarden voor de vispopulatie te Stenensluisvaart

Riviersystemen zijn onderhevig aan natuurlijke verstoringen door overstromingen en droogtes en typische riviervissoorten hebben levensgeschiedenissenkenmerken ontwikkeld om veerkrachtig te worden tegen deze verstoringen. In 2020 publiceerden van Treeck *et al.* een uitgebreide analyse van de populatiegevoeligheid voor sterfte voor 168 Europese zoetwatervissen (van Treeck *et al.*, 2020). De studie analyseerde de veerkracht van Europese vissoorten op basis van 15 levensgeschiedenissenkenmerken, waaronder de maximale lengte, het migratietype, sterfte, vruchtbaarheid, leeftijd bij volwassenheid en generatietijd. Over het algemeen bleek dat populaties van diadrome, rheofiele (stroominnend) en lithofiele (geassocieerd met stenig substraat) soorten met een groot lichaam, zoals de Europese paling, zeer gevoelig zijn voor volwassen sterfte. Kleine, limnofiele (voorkeur voor stilstaand water) en fytofiele (plantminnende) soorten met snelle generatiecycli hebben een lage gevoeligheid. Een overzicht van de biologische gevoeligheid voor sterfte per familie en soort wordt weergegeven in Tabel 3 voor de soorten aanwezig in de Stenensluisvaart te Woumen. Daarnaast wordt voor elke opgenomen soort aangegeven of er hydraulische grenswaarden beschikbaar zijn om de specifieke risico's op verwonding en sterfte ten gevolgen van een hydraulisch kunstwerk te beoordelen. Deze grenswaarden zijn in meer detail opgenomen in Bijlage 1, Tabel 10 - Tabel 12 en worden in dit rapport verder gebruikt om het risico op overschrijding van een sterftekans van 10 % te beoordelen.

Tabel 3: Overzicht van endemische families en geselecteerde vissoorten in de Stenensluisvaart te Woumen op basis van de datarecords voor de Stenensluisvaart op VIS (vis informatie systeem) (Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, 2012), met vermelding van de beschikbaarheid van gepubliceerde fysische grenswaarden uit eerdere studies en hun biologische gevoeligheid voor sterfte. Als er grenswaarden beschikbaar zijn, zijn de specifieke parameters en hun waarden opgenomen in het overzicht van fysische parameters in Tabel 10 - Tabel 12. De biologische gevoeligheidsklassen en scores zijn afkomstig uit (van Treeck *et al.*, 2020).

Familie	Soort	Gepubliceerde grenswaarde	Biologische gevoeligheidsklassen	Biologische gevoeligheidsscore	Beschermingsstatuut
Anguillidae	Europese paling (<i>Anguilla anguilla</i>)	Ja	Hoog	3,67	Palingbeheerplan
Cobitidae	kleine modderkruiper (<i>Cobitis taenia</i>)	Nee	Laag	2,42	Habitatrichtlijnsoort
Cyprinidae	Bittervoorn (<i>Rhodeus amarus</i>)	Nee	Laag	2,25	Habitatrichtlijnsoort
	Blankvoorn (<i>Rutilus rutilus</i>)	Ja	Matig	3,17	
	Blauwband (<i>Pseudorasbora parva</i>)	Nee	Laag	2,17	Invasieve exoot
	Brasem (<i>Abramis brama</i>)	Nee	Matig	3,25	
	giebel (<i>Carassius gibelio</i>)	Nee	Matig	2,58	
	Karper (<i>Cyprinus carpio</i>)	Nee	Matig	3,17	
	Kolblei (<i>Blicca bjoerkna</i>)	Nee	Matig	2,67	
	rietvoorn (<i>Scardinius erythrophthalmus</i>)	Nee	Matig	3,33	
	riviergrondel (<i>Gobio gobio</i>)	Nee	Matig	2,58	
	Vetje (<i>Leuciscus delineatus</i>)	Nee	NA	NA	
	Zeelt (<i>Tinca tinca</i>)	Nee	Matig	3,42	
Esocidae	Snoek (<i>Esox lucius</i>)	Nee	Matig	3,00	
Gasterosteidae	tiendoornige stekelbaars (<i>Pungitius pungitius</i>)	Nee	Laag	2,33	
Percidae	Baars (<i>Perca fluviatilis</i>)	Ja	Matig	3,08	
	pos (<i>Gymnocephalus cernua</i>)	Nee	Matig	2,58	

2.4.3.4 Opstellen van grenswaarden

In het kader van onderzoek naar het risico op verwonding en sterfte bij vissen die stroomafwaarts door hydraulische constructies migreren, worden verschillende vissoorten en levensstadia blootgesteld aan drukveranderingen in een barotraumakamer. Bijlage 1 geeft een overzicht van de grenswaarden op basis van literatuur over dit soort onderzoek. De tabellen (10-12) tonen een grote variëteit in grenswaarden. Bovendien zijn deze grenswaarden soort- en levensstadia specifiek. Zo valt op te merken uit Tabel 3 dat paling minder gevoelig is voor drukveranderingen dan witvis (Cypriniden). Aan de hand van deze grenswaarden werd met de drukparameters het risico op 10 % sterfte door decompressie geëvalueerd.



Blootstelling aan snelle decompressie is een van de vele stressors die vissen ervaren bij passage van hydraulische kunstwerken (Cox *et al.*, 2023). Bij ernstige blootstelling kan barotrauma optreden dewelke potentieel dodelijk kan zijn. De expansie van de zwemblaas die optreedt bij snelle decompressie is een van de drijvende krachten van barotrauma. Daarom stelt Brown *et al.* (2012a;b) dat het snel verwijderen van gas uit de zwemblaas een mogelijkheid is om barotrauma te vermijden. Het gas in de zwemblaas van vissen volgt de Wet van Boyle en heeft een omgekeerd proportionele relatie met de druk. Dit betekent dat als de druk met de helft verminderd wordt, het gas in de zwemblaas zal verdubbelen in omvang (aangenomen dat de temperatuur constant blijft en zonder fysiologische beperkingen).

Daarom is de verhouding van de acclimatisatie druk (P_A) tot de laagste druk waaraan een vis wordt blootgesteld (drukdieptepunt of 'NADIR pressure', P_N) een directe weergave van de factor waarmee de zwemblaas uitzet tijdens decompressie. Deze verhouding is beter gekend als de verhouding van drukverandering (RPC) (Stephenson *et al.*, 2010; Brown *et al.*, 2012a; b). Bijvoorbeeld, een vis die geacclimatiseerd is aan een diepte van 10 m ($P_A \approx 200$ kPa) en gedecomprimeerd wordt tot 50 kPa (P_N), wordt blootgesteld aan een RPC van 4 ($200 / 50 = 4$) en het gas in de zwemblaas zal verviervoudigen in omvang. Deze methode heeft onderzoekers in staat gesteld om duidelijke relaties te ontwikkelen tussen mortaliteit of verwondingen en RPC. Dit laat toe een voorspelling te kunnen maken van de waarschijnlijkheid dat een vis sterft of gewond raakt bij blootstelling aan een specifieke decompressie (Brown *et al.*, 2012a; Pflugrath *et al.*, 2019).

Op basis van literatuuronderzoek (Bijlage 1, Tabel 11) werd een grenswaarde voor LRP van 0,5 gekozen voor witvis omdat dit een conservatieve waarde is voor het geschatte risico van meer dan 10 % sterfte door snelle decompressie. Voor paling werd op basis van de literatuur de grenswaarde op 1,5 gezet. Waarden groter dan deze grenswaarde kunnen leiden tot een sterfte van 10 % of meer. Voor het drukdieptepunt (NADIR) werd de grenswaarde voor witvis op 400 hPa gezet en voor paling op 27 hPa (Bijlage 1, Tabel 10). Waarden kleiner dan deze grenswaarden kunnen leiden tot een sterfte van 10 % of meer.

Een andere manier om de impact van drukveranderingen te kwantificeren is de 'pressure rate of change' (pressure ROC) of de snelheid waarmee de druk verandert over een specifieke periode (dT) zoals bijvoorbeeld de snelheid waarmee de druk verandert bij passage door de pomp. Zoals in onderstaande figuur wordt voorgesteld is de ROC gelijk aan dP/dT en wordt deze berekend op basis van de grootste of maximale drukverandering die optreedt tijdens passage van de pomp, gecentreerd rond het drukdieptepunt. Voor elke sensor werd enkel de maximale ROC gebruikt. Op basis van de literatuurstudie (Bijlage 1, Tabel 12) werd de grenswaarde voor ROC voor witvis op 2500 hPa/s en voor paling op 5500 hPa/s gezet. Waarden groter dan deze grenswaarde kunnen leiden tot een sterfte groter dan 10 %.

2.4.3.5 Statistische analyse

ROC, LRP en NADIR en passage tijd werden vergeleken tussen BDS- en backpack sensoren. Gezien de data niet normaal verdeeld is, werd gebruik gemaakt van de Kruskal-Wallis test. Op basis van boxplots werd er visueel nagegaan of de drukparameters de grenswaarden overschreden.

2.5 Inschatting van slagschade met Van Esch blade strike model

Het 'blade strike model' werd oorspronkelijk ontworpen om de kans te berekenen op een botsing tussen een vis en de waaierbladen bij passage door een turbine (Ploskey & Carlson, 2004). Dit model is doorheen de jaren aangepast naar verschillende pomptypes (Ploskey & Carlson, 2004). Het blade strike model van 'van Esch' (2012) voorspelt de sterftetekans van paling na doorvoer door de axiaalpompe. In het model worden enkele aannames gedaan, namelijk dat vissen de pomp benaderen met dezelfde snelheid en richting als de stroom en dat de vis uniform verdeeld is over de ingang van de pomp (van Esch, 2012). Het model berekent de overlevingskans op basis van de tijd die de vis heeft om doorheen de opening tussen twee bladen te passeren ten opzichten van de tijd die een vis er theoretisch overdoet om de afstand af te leggen om doorheen de twee bladen te geraken. De theoretische tijd om doorheen twee vijzelbladen te geraken wordt bepaald door de pompkenmerken in Tabel 5. De tijd die een vis nodig heeft wordt bepaald door de soort, de lengte en de breedte. De voorspelling van de sterftetekans van paling na doorvoer door de pomp werd berekend met het blade strike model volgens de formules uit van Esch (2012).



Tabel 4: Soortafhankelijke kenmerken van het blade strike model volgens Van Esch.

Parameter	Symbool	Waarde	Extra info
Totale lichaamslengte	L_f	0,656	Lengte gemeten van het voorste punt van het lichaam van de vis tot het uiteinde van de staartvin.
Lichaamshoogte	W	0,038	Maximale hoogte van het lichaam van de vis, waarbij de hoogte van de rugvin buiten beschouwing wordt gelaten.
Slagsnelheid waarbij er geen sterfte is (m/s)	v_0	4,800	De laagste relatieve bladslagsnelheid waarbij geen sterfte door inslagen werd waargenomen.

Tabel 5: Pompenkenmerken van de geteste VaHo-pomp voor het blade strike model volgens Van Esch.

Parameter	Symbool	Waarde
Aantal bladen	n	2
Toerental (rpm)	N	250
Debiet (m^3/s)	Q	2,000
Blad straal (m)	r	0,450
Blad dikte (m)	d	0,036



3 RESULTATEN

3.1 Testen met gedwongen doorvoer van paling

3.1.1 Aantallen en lengtefrequentieverdeling

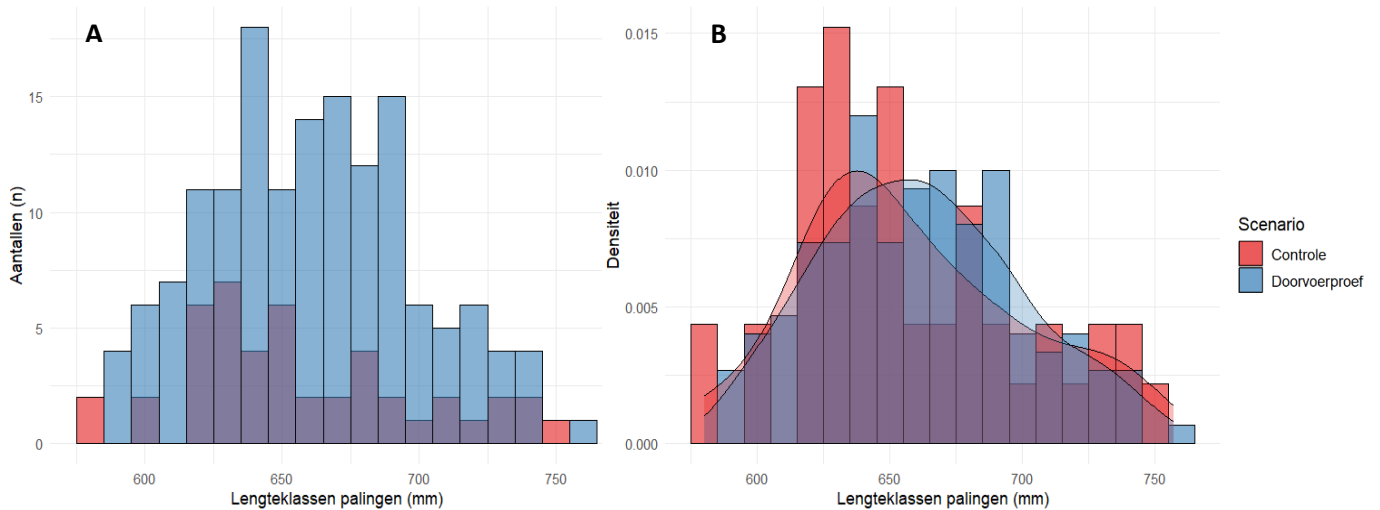
Om de visveiligheid van de VaHo-pomp te testen bij een toerental van 250 rpm werd een groep van 178 palingen (bestaande uit 90 'kop eerst' en 88 'staart eerst' individuen) door de pomp gevoerd. Verder werd er een controlegroep van 51 individuen ingezet. Bij de doorvoerproef werd 85 % van de individuen teruggevangen na de proef (Tabel 7). Bij de controlegroep bedroeg het hervangstpercentage 90 % (Tabel 7).

De gemiddelde lengte van de hervangen individuen uit de doorvoerproef bedroeg 662 ± 38 mm, met een minimale lengte van 586 mm en een maximale lengte van 757 mm. Voor de individuen uit de controlegroep bedroeg de gemiddelde lengte 658 ± 42 mm, met een minimale lengte van 580 mm en een maximale lengte van 746 mm. In beide groepen had de grote meerderheid van de individuen een lengte groter dan 600 mm (Tabel 6).

Tabel 6: Overzicht van de lengtes (en standaardafwijking) van de gebruikte palingen bij de doorvoerproef en de controlegroep.

	Pomp 250 rpm	Controle
# proefdieren	151	46
min. lengte (mm)	586	580
max. lengte (mm)	757	746
gem. lengte (mm)	662	658
SD lengte (mm)	38	42
# ind. > 600 mm	143	43
# ind. > 700 mm	23	8

De lengtefrequentieverdelingen zijn normaal verdeeld voor beide groepen, namelijk de doorvoerproef (Shapiro-test, $W = 0,99$, $p = 0,14$) en de controlegroep (Shapiro-test, $W = 0,96$, $p = 0,11$) (Figuur 6 A/B). Er is geen significant verschil tussen de gemiddelde lengtes van de doorvoerproef en de controlegroep (t-test, $p = 0,60$) en de gebruikte proefdieren van beide groepen bevinden zich in gelijke lengteklassen en lengterange (580 mm - 760 mm) (Figuur 6 A/B)



Figuur 6: Lengtefrequentieverdelingen van de gebruikte palingen per scenario, namelijk de doorvoerproef en de controlegroep, in (A) absolute aantallen en (B) relatieve aantallen (= densiteit).

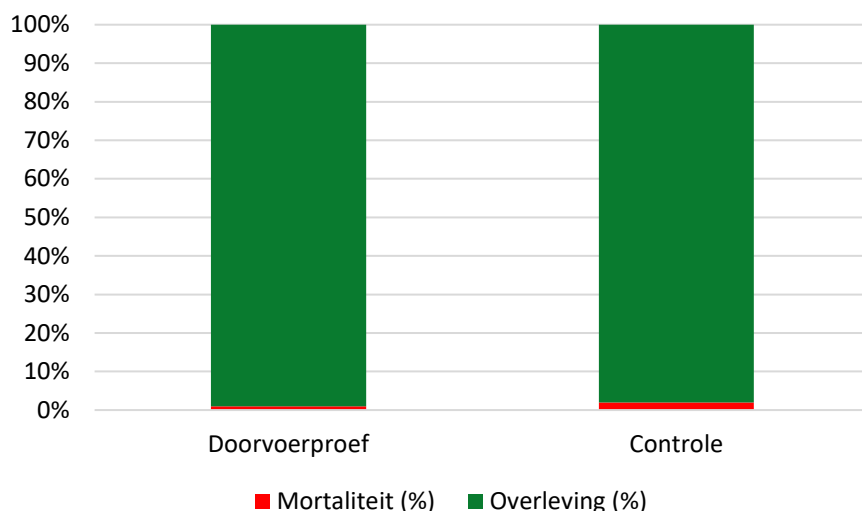
3.1.2 Overleefbaarheid

Van de 151 palingen uit de doorvoerproef had 99 % geen uitwendige schade. Deze palingen kwamen dus onbeschadigd uit de proef. Zes van de 151 individuen vertoonden lichte verwondingen uit de schadeklasse 2.3 (i.e. lichte krassen, kneuzingen en/of schubverlies < 20 %), waarvan bij twee individuen sterk vermoed werd dat deze schade veroorzaakt werd door de opvangkooi. Ook was er één individu uit de doorvoerproef dat zwaar beschadigd gerecupereerd werd. Het individu had een insnijding in de kop, een breuk in het schedeldak en het linkeroot was zwaar beschadigd, dit proefdier werd onmiddellijk geëuthanaseerd na het uitvoeren van de proef. Alle individuen uit de controlegroep werden zonder uitwendige schade opgevangen in de kooi (Tabel 7, zie foto's uit bijlage 3: Schadeprofiel paling). Zowel bij de doorvoergroep als de controlegroep werd een beperkte uitgestelde sterfte vastgesteld (Tabel 7). Na de bepaling van de uitgestelde sterfte was het sterftepercentage van de individuen uit de doorvoerproef 1 % en de controlegroep 2 % (berekend volgens formules uit NEN 8775+C1, zie eerder 2.3.3.6 bepalen van verwondingen) (Tabel 7, Figuur 7).

Tabel 7: Overzicht van het aantal palingen per scenario (doorvoerproef en controle), hun toestand onmiddellijk en tot 48h na de proef, de eventueel vastgestelde schadeklasse en hun overlevings/sterftepercentage bij een toerental van 250 rpm. Het overlevingspercentage werd berekend volgens formules uit de NEN-richtlijn (NEN 8775+C1).

	<u>Doorvoerproef</u>	<u>Controle</u>
code	HF + TF	C
# totaal proefdieren	178	51
# hervangsten	151	46
hervangstpercentage (%)	85	90
<u>TOESTAND</u>		
# levend	150	46
# stervend (euthanasie)	1	0
# dood	0	0
Uitgestelde sterfte (24u)	4	1
Uitgestelde sterfte (48u)	0	0
<u>SCHADEKLASSE</u>		
# onbeschadigd	144	46
# licht beschadigd	6	0
# zwaar beschadigd	1	0
<u>RESULTAAT</u>		
Mortaliteit (%)	1	2
Overleving (%)	99	98





Figuur 7: Sterfte- en overlevingspercentages na de proef voor alle individuen die door de pomp zijn gegaan bij toerental 250 rpm versus de controledieren. Het overlevingspercentage werd berekend volgens formules uit de NEN-richtlijn (NEN 8775+C1).

3.1.2.1 Sterftেকans

Het logistisch model met als respons variabele de toestand van de paling (levend of dood) en als predictorvariabelen het scenario (doorvoerproef of controle), de lengte en de interactie, werd gebruikt om te kijken of deze predictorvariabelen een effect hadden op de sterftেকans van de paling. Er was geen significant effect van het scenario waartoe de proefdieren behoorden ($p = 0,36$), hun lengte ($p = 0,37$) of de interactie ($p = 0,35$) op de toestand (en dus de sterftেকans) van de paling.

3.1.2.2 Verwondingskans

Het multinomiaal model met als respons variabele het verwondingstype van de paling (geen, lichte of zware verwonding), en als predictorvariabelen het scenario (doorvoerproef of controle), de lengte en de interactie, kon niet worden opgesteld aangezien er maar één zwaargewonde paling was. Hierdoor kon het model onvoldoende betrouwbaar getraind worden voor zware verwondingen.

3.1.3 Waterkwaliteit

Tijdens de avond en nacht werden de dieren in leefnetten gehouden in de testopstelling. Op dinsdagmorgen 17/09/2024 bedroeg de watertemperatuur 16,3 °C en de pH 8,3 in het bassin van de testopstelling. De zuurstofsaturatie werd die dag niet opgemeten. Op woensdagmorgen 18/09/2024 was de watertemperatuur 15,6 °C, de pH 8,5 en de zuurstofsaturatie 72,5 %. Op donderdagmorgen 19/09/2024 was de watertemperatuur 19,3 °C, de pH 8,5 en de zuurstofsaturatie 68,5 % (Tabel 8).

Tabel 8: Dagelijkse meting van de temperatuur, pH en zuurstofsaturatie in de testopstelling voor aanvang van de proeven 's ochtends.

Datum van opmeting	Temperatuur (°C)	pH	O ₂ (%)
17/09	16,3	8,3	Niet opgemeten
18/09	15,6	8,5	72,5
19/09	19,3	8,5	68,5

3.2 Testen met sensoren

Van de 35 ingezette BDS-sensoren werden 20 bruikbare datasets gerecupereerd. Ook werden 30 palingen met een backpacksensor voorzien en doorheen de pomp gevoerd, wat 25 bruikbare datasets opleverde. Tussen de bruikbare datasets was één individu zwaar beschadigd met insnijding in de kop, een breuk in het schedeldak en een beschadigd linkeroog. De fysische parameters dat dit individu ervaarde werden uitgelicht naast de gemiddelde waarden voor de fysische parameters waargenomen met de BDS- en backpacksensor.

De drie fysische parameters (NADIR, ROC, LRP) die veroorzaakt worden door drukveranderingen in de pomp, werden geëvalueerd door het gemiddelde van deze waarden te berekenen voor zowel backpack- als BDS-sensoren (Tabel 9). Deze gemiddelde waarden werden vergeleken met de grenswaarden voor paling en witvis die bekomen werden uit de literatuur (Bijlage 1, Tabel 10 -Tabel 12). De grenswaarden representeren de waarde waarbij er een mortaliteit van meer dan 10 % kan optreden indien deze overschreden worden (Figuur 8). Verder werd ook de passagetijd van zowel de backpack- als BDS sensoren berekend (Tabel 9, Figuur 8).

Het drukdieptepunt net na de pomppassage (NADIR) bedroeg gemiddeld 899,08 hPa bij de backpacksensoren en 969,84 hPa bij de BDS-sensoren (Tabel 9). Deze waarden zijn groter dan de grenswaarden voor het drukdieptepunt. Dit wil zeggen dat de grenswaarde van 27 hPa voor paling en 400 hPa voor witvis niet overschreden werden (Figuur 8). Er was geen significant verschil tussen de drukdieptepuntverdelingen van de BDS- en backpack sensoren ($p = 0,26$). Het drukdieptepunt dat de zwaar verwonde paling ervaarde, had een waarde van 1076,67 hPa. Dit is hoger dan het gemiddelde voor de backpacksensoren (Tabel 9).

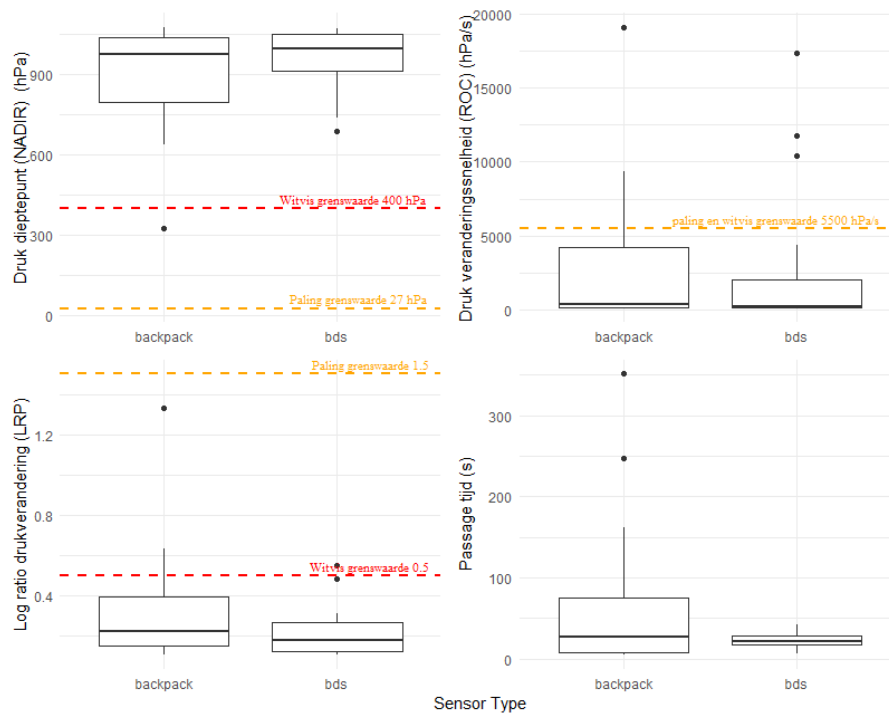
De drukveranderingssnelheid (ROC) bedroeg gemiddeld 2751 hPa/s en 2493,08 hPa/s voor respectievelijk de backpack- en BDS-sensoren (Tabel 9). De grenswaarden voor paling en witvis voor de drukveranderingssnelheid werden niet overschreden door de gemiddelde ROC waarden (Figuur 8). Bovendien waren de ROC verdelingen niet significant verschillend tussen de BDS- en backpacksensoren ($p = 0,45$). De standaarddeviaties zijn groter dan het gemiddelde, wat duidt op een grote variatie in de data. Deze variatie valt ook op te merken in de boxplot in Figuur 8. In deze figuur valt het op dat deze variatie voornamelijk in het derde kwartiel zit. Dit derde kwartiel overschrijdt wel de grenswaarde voor witvis. De ROC waarde van de zwaar verwonde paling is opmerkelijk laag met een waarde van 113,78 hPa/s (Tabel 9).

De logratio drukverandering (LRP) bedroeg gemiddeld 0,33 bij de backpacksensoren en 0,22 bij de BDS-sensoren (Tabel 9). Beide gemiddeldes liggen onder de grenswaarde van 1,5 en 0,5 voor respectievelijk paling en witvis (Figuur 8). Bovendien was er geen significant verschil tussen de LRP verdelingen van de BDS- en backpack ($p = 0,12$). Ook de LRP waarde van de zwaar verwonde paling is opmerkelijk laag met een waarde van 0,11 (Tabel 9).

De passage tijd duurde drie keer langer voor de palingen met backpacksensor ten opzichte van de BDS-sensoren. Gemiddeld was de passage tijd 63,49 s en 22,86 s voor respectievelijk de backpacksensoren en de BDS-sensoren (Tabel 9). De verdelingen van de passagetijd tussen BDS- en backpacksensor waren echter niet significant verschillend ($p = 0,36$). Opvallend is de grote standaarddeviatie bij de backpacksensoren. Uit de boxplot valt af te leiden dat de grote standaarddeviatie veroorzaakt wordt doordat de palingen uit twee groepen bestaan (Figuur 8). Enerzijds een groep die in minder dan 30 s de pomp passeert en anderzijds een groep palingen die er langer dan 30 s over doet met een maximale passage tijd van 351 s. Opmerkelijk is dat de zwaar verwonde paling een zeer korte passage tijd heeft van 5,29 s (Tabel 9).

Tabel 9: Gemiddelde waarden van de drie fysische parameters (\pm standaarddeviatie) veroorzaakt door drukveranderingen, die werden gemeten door de bds- en backpacksensoren, en de gemiddelde passage tijd.

(Fysische) parameter \pm standaarddeviatie	Backpack (n = 25)	BDS (n = 20)	Zwaar beschadigde paling (n = 1)
Gemiddelde NADIR (hPa)	899,08 \pm 186,12	969,84 \pm 107	1076,67
Gemiddelde ROC (hPa/s)	2751,83 \pm 4513,40	2493,08 \pm 4753,48	113,78
Gemiddelde LRP	0,33 \pm 0,27	0,22 \pm 0,12	0,11
Gemiddelde passage tijd (s)	63,49 \pm 86,43	22,86 \pm 9,06	5,29



Figuur 8: Boxplots van de drie fysische parameters (namelijk NADIR (hPa), ROC (hPa/s), LRP) en de passage tijd (s), vergeleken tussen backpack- en bds-sensoren. De boxen visualiseren de interkwartielafstand, namelijk van het 25ste tot het 75ste percentiel. De zwarte lijn visualiseert de mediaan en de zwarte bollen representeren outliers. De gele en rode lijn, respectievelijk voor paling en Cypriniden (witvis), visualiseren de grenswaarden voor elke fysische parameter waarbij er een mortaliteit van meer dan 10% kan optreden indien deze overschreden worden.

3.3 Blade strike model

Het blade strike model van 'van Esch' (2012) schat een mortaliteit van 23% bij paling na doorvoer door de pomp. Ook schat het model dat de geteste palingen 0,141 s nodig hebben om door de opening tussen twee waaiersbladen te passeren.

4 BESPREKING

4.1 Testen met gedwongen doorvoer van paling

4.1.1 Hervangstpercentages

Bij beide scenario's was er geen 100 % hervangst. Van de dieren die door de pomp zijn gevoerd werd 85 % hervangen en van de controlegroep werd 90 % hervangen. Er zijn twee mogelijke verklaringen hiervoor.

Ten eerste is er een grote waarschijnlijkheid dat de palingen zich ergens in de testopstelling kunnen verschuilen zonder verpompt te worden. Door de firma Van Hooste werd een camera in de testopstelling geïnstalleerd om de palingen waar te nemen in de zone van de inzuigopening van de pomp, maar door de troebelheid van het water was op de beelden niets zichtbaar. Ook andere onderzoeken waarbij vissen verpompt werden, toonden aan dat vissen, waaronder paling, zich in de luwe zones van een pompkelder kunnen verschuilen en enkele dagen later in goede conditie hervangen kunnen worden (Broos *et al.*, 2024; Buysse *et al.*, in druk; Spierts, 2015; van de Ven, 2018). In een visveiligheidstest van het ATKB waarbij de ECO FISH 700A pomp van Xylen Water Solutions getest werd, was er een hervangstpercentage van 95 % (van de Ven, 2018). De niet-hervangen palingen werden na het uitschakelen van de pomp en beëindigen van de test teruggevonden in het water van de pompkelder (van de Ven, 2018). Ook zag Spierts (2015) in een studie dat schieralen bij invoer in de proefopstelling de neiging vertonen om tegen de waterstroomrichting in te zwemmen, in de aanvoerbuis. In onze proefopstelling werd dit verhinderd door een flexibele buis met verbreed uiteinde door de invoerbuis te duwen om achtergebleven palingen richting de bodem van de testopstelling en dus naar de nabijheid van de pomp te geleiden.

Ten tweede bleek de tussenafstand van 1,5 cm tussen de horizontale spijlen van de opvangkooi voor sommige individuen niet nauw genoeg waardoor ze konden ontsnappen. Na de eerste testdag was er immers een lagere hervangst dan verwacht in de gesloten proefopstelling. Het niet kunnen realiseren van een 100 % hervangstpercentage, ook bij de controlegroep, toonde aan dat dieren uit de opvangkooi konden ontsnappen. Deze palingen konden ontsnappen doordat de kracht van het water tijdens het pompen mogelijk de spijlen van de vangkooi open duwde. Om dit op te lossen werden er extra verticale verstevigingslatten aan de kooi bevestigd zodat de horizontale spijlen minder konden open buigen. De kooi met extra versteviging werd getest met proefdieren van de vorige dag en resulteerde in een hervangst van 29 van de 30 dieren. Van de palingen die ontsnapten uit de opvangkooi tijdens de testen werd een groot deel nog hervangen op andere testdagen en bij het napompen. Deze dieren werden waarschijnlijk door een onderstroom in de gesloten proefopstelling naar de pomp geleid waardoor ze een extra keer door de pomp zijn gevoerd. Kortom werd het hervangstpercentage van de doorvoerproef niet enkel beïnvloed door het verschuilen in de testopstelling direct na invoer via de invoerbuis, maar ook door ontsnapte individuen.

Van de 15 % niet-hervangen palingen bij de doorvoerproef, zijn er sterke aanwijzingen dat ze zich schuilhouden in de pompkelder of ontsnapt zijn uit de kooi. Ontsnapping uit de aangepaste en verstevigde kooi werd bevestigd door de waarneming van een tweetal levende palingen die bij het liften van de kooi gekneld zaten tussen de horizontale spijlen. Uit andere studies bleek dat de individuen die zich schuilhielden in de pompkelder enkele dagen later in levende toestand verpompt werden (Broos *et al.*, 2024; Buysse *et al.*, in druk), daarom gaan we er vanuit dat de ontbrekende individuen vitale dieren zijn. Hierdoor werden de sterftepercentages in deze studie berekend op basis van de hervangen individuen.

4.1.2 Lengteklassen

In de NEN-richtlijn wordt voorgesteld om testen uit te voeren met palingen tussen 70 en 90 cm (NEN 8775+C1). Dit is naar onze mening een heel grote lengteklasse. Palingen groter dan 80 cm zijn niet te verkrijgen bij palinghandelaars. De palingen gebruikt in deze studie benaderen wel de voorgestelde lengteklasse: de gemiddelde lengte voor de individuen uit de doorvoerproef bedroeg 66,2 cm en 65,8 cm voor de controlegroep. De meeste gebruikte proefdieren hadden dus een iets kleinere lengte dan de voorgestelde paling-lengteklasse door de NEN. Desondanks waren er zowel in de doorvoerproef als de controlegroep individuen met een lengte groter dan 70 cm, respectievelijk 23 en 8 individuen. Uit het model dat de sterftetekans van paling bepaalde, bleek de lengte geen significant effect te hebben op hun sterftetekans (levend of dood). Uit het model dat de verwondingskans van paling bepaalde, bleek dat grotere dieren meer kans hadden om lichte verwondingen op te lopen dan geen verwondingen. Verder bleek dat de lengte geen significant effect had op de kans op zware verwondingen versus geen verwondingen. Echter wordt dit niet-significante effect van lengte bij zware verwondingen vermoedelijk veroorzaakt door een kleine steekproefgrootte aangezien er maar één individu zwaar beschadigd uit de proef kwam.



4.1.3 Mortaliteit en verwonding

Bij het testen van de palingveiligheid van een pomp wordt er zo veel mogelijk gestreefd naar lage schade en sterftepercentages. Om te voldoen aan de voorwaarden van de VMM voor de installatie van de pomp, mag het sterftepercentage van palingen niet meer dan 10 % bedragen.

Bij de controledieren werden alle palingen onbeschadigd gerecupereerd. Er werden geen controledieren met lichte of zware verwondingen aangetroffen. Bij de doorvoerproef kwam de grote meerderheid van alle individuen zonder uitwendige schade uit de proef. Zes individuen waren licht beschadigd, waarvan bij twee individuen sterk vermoed werd dat deze schade veroorzaakt werd door de opvangkooi. Één individu uit de doorvoerproef kreeg een klap, vermoedelijk van de bewegende delen van de axiaalpompe, waardoor deze zwaar beschadigd uit de proef kwam met een insnijding in de kop, een breuk in het schedeldak en een zwaar beschadigd linker oog. Van de controlegroep werden alle individuen zonder uitwendige schade gerecupereerd.

Uitgestelde sterfte werd in beperkte mate vastgesteld bij zowel controle als doorvoerproef. Uitgestelde sterfte kan veroorzaakt worden door de nasleep van schade veroorzaakt door de proef of doordat de dieren reeds in mindere of slechte conditie waren bij levering. Een verminderde conditie is niet altijd even gemakkelijk vast te stellen. Dieren met opvallend mindere conditie werden bij aanvang uitgesloten van de proeven. Het gestorven controledier had een zwaar ontstoken staart en lichte ontsteking op de onderkaak, wat duidt op een verzwakt dier. Van de gestorven dieren die door de pomp zijn gevoerd, was er één individu met een licht verzwakte conditie. De overige drie hadden vooraf een goede conditie en vertoonden geen uitwendige schade na de proef. Een mogelijke verklaring voor de sterfte van deze individuen zou kunnen zijn dat de waterkwaliteit in de testopstelling afneemt gedurende de stockage van de proefdieren gedurende de nacht. Echter, werden er geen alarmerende waarden van pH, temperatuur en zuurstofgehalte gemeten. Er werd geen autopsie uitgevoerd op de gestorven dieren, dus potentiële inwendige schade kon niet worden vastgesteld.

Rekening houdende met de uitgestelde sterfte is de mortaliteit van de palingen uit de doorvoerproef en de controlegroep respectievelijk 1 % en 2 %. Het verschil in mortaliteit tussen controle en doorvoerproef is verwaarloosbaar. Het toont aan dat de palingen een zeer grote kans hebben op overleven als ze door de VaHo-pomp bij 250 rpm gevoerd worden. Dit wordt ook bevestigd door het logistisch model waarbij er geen significant effect is van het scenario (doorvoerproef of controle) op de sterftkans. Echter kon door de zeer lage mortaliteit (1 %) het logistisch model mogelijks onvoldoende getraind worden om te voorspellen wanneer sterfte optreedt. Het multinomiaal model om de verwondingskans in te schatten kon niet worden opgesteld aangezien er maar één paling met zware verwonding was. Hierdoor kon het model onvoldoende betrouwbaar getraind worden voor zware verwondingen.

Met een mortaliteit van 1 % na doorvoer scoort de pomp zeer goed in vergelijking met de klassieke axiaalpompen. Een onderzoek van het Spiedamgemaal in Rieme rapporteerde een mortaliteit van 98 % bij de natuurlijke uittrek van zilverpalingen doorheen een klassieke axiaalpompe (Buysse *et al.*, 2010). Uit deze bevindingen kunnen we concluderen dat de VaHo-pomp bij 250 rpm voor palingen van de geteste lengtes voldoet aan de veiligheidsnorm van 10% mortaliteit opgelegd door de VMM.

Deze stelling over palingveiligheid van de VaHo-pomp bij 250 rpm kunnen we echter niet veralgemenen naar visveiligheid aangezien er in deze studie enkel paling werd getest. Andere vissoorten kunnen een verschillend sterfte- en/of verwondingspercentage hebben vanwege een andere lichaamsbouw (Cook *et al.*, 2003; EPRI, 2011; van Esch, 2012). Bruneel *et al.* (2024) vonden een zeer laag sterftepercentage bij paling ten opzichte van twee karperachtigen (i.e. brasem en blankvoorn) bij het doorvoeren door een "visveilige" axiaalpompe. In het NEN (8775+C1) wordt daarom voorgesteld om naast paling ook een aantal karperachtigen zoals brasem, kolblei en/of blankvoorn te testen.

Bovendien hebben de dimensies van de pomp en het toerental ook een invloed op de visveiligheid. Eerder onderzoek toonde al aan dat hogere toerentallen de kans op mortaliteit en verwondingen verhoogt (van Esch, 2012; Bruneel *et al.*, 2024). Het toerental is afhankelijk van de opvoerhoogte (die voornamelijk bepaald wordt door het verschil tussen stroomop- en afwaartse waterstand). Voor het pompgeheel in Woumen zal de pomp (naar schatting) in 90 % van de tijd aan een toerental van 250 rpm draaien om de opvoerhoogte van 1.24 m te overbruggen. Op momenten met een hogere opvoerhoogte, bijvoorbeeld door een hogere waterstand van de IJzer, zal de pomp aan een hoger toerental draaien (maximaal 310 rpm). Het verhoogde toerental gaat gepaard met een hogere afvoer, wat de ideale condities zijn voor palingen om naar zee te migreren (Buysse *et al.*, 2015). De mortaliteit van paling na passage door de pomp bij hogere toerentallen werd niet getest. Eerder onderzoek toonde reeds aan dat hogere toerentallen ook hogere sterftepercentages veroorzaken (van Esch, 2012; Bruneel *et al.*, 2024).

4.2 Testen met sensoren

Hoewel er informatie uit publiek beschikbare studies beschikbaar is over de verwonding- en sterftetekens voor specifieke vissoorten en levensstadia, zijn veel van de inheemse soorten die voorkomen in de Stenensluisvaart in de buurt van het pompgebied te Woumen niet vertegenwoordigd in bestaande studies. Door het ontbreken van grenswaarden voor de meeste inheemse soorten uit Tabel 3, werden de waarden voor de druk parameters geselecteerd op basis van studies over levende vissen en sensoren uit de literatuur. Aangezien dit onderzoek zich snel ontwikkelt, moet worden benadrukt dat de grenswaarden voor geschat sterfterisico dat kan worden gerelateerd aan druk die in dit rapport worden gebruikt, in de toekomst kunnen wijzigen op basis van studies met inheemse vissoorten.

4.2.1 Risico op mortaliteit door snelle decompressie

De mate van decompressie bepaalt in welke mate de zwemblaas uitzet. Expansie van de zwemblaas is één van de drijvende krachten van barotrauma bij vissen. De gevoeligheid voor de snelheid van decompressie is afhankelijk van het type zwemblaas dat de vis bezit. Paling behoort tot de physostomen. Deze groep vissen hebben een kanaal (ductus pneumaticus) tussen hun zwemblaas en slokdarm waarmee ze de hoeveelheid gas in de zwemblaas kunnen verminderen als respons op drukveranderingen (Pavlov & Kirillov, 2003). Dit maakt hen minder vatbaar voor barotrauma. Dat paling minder gevoelig is voor decompressie is op te merken in de grenswaarden die veel hoger liggen voor paling dan voor witvis.

Het drukdieptepunt (NADIR) van de VaHo-pomp bij 250 rpm lag op basis van de BDS-sensoren (970 ± 107 hPa) en de backpacksensoren (899 ± 186 hPa) ver onder de grenswaarde van 27 hPa en 400 hPa (Tabel 9). Deze grenswaarden werden gebruikt om het risico op meer dan 10 % sterfte door snelle decompressie voor respectievelijk paling en witvis in te schatten. Ter vergelijking, de resultaten van een eerder geteste palingveilige axiaalpompe had een gelijkaardige drukdieptepunt meting met BDS-sensoren van 964 ± 137 hPa bij 468 rpm en 933 ± 126 hPa bij 550 rpm (Bruneel *et al.*, 2024). Deze drukdieptepunten zijn ook vergelijkbaar met die van BDS-metingen ($n = 30$) van een natuurlijke waterval met dalingen van 5 tot 15 m (933 hPa) en 1 tot 5 m (915 hPa) (Tuhtan & Toming, 2019). Het drukdieptepunt van de klassieke axiaalpompe in het duivelsputgebied met een toerental van 585 rpm ligt lager (854 ± 164 hPa) (Bruneel *et al.*, 2024).

Net als bij de drukdieptepunten kwamen de drukveranderingssnelheden (ROC) voor de VaHo-pomp bij 250 rpm op basis van de BDS-sensoren (2493 ± 4753 hPa/s) en de backpacksensoren (2751 ± 4513 hPa/s) niet in de buurt van de grenswaarde van 5500 hPa/s. Deze resultaten zijn in lijn met een eerder geteste palingveilige axiaalpompe, waar een ROC-waarde werd gemeten met BDS-sensoren van 2657 ± 7604 hPa bij 468 rpm en 2501 ± 5248 hPa bij 550 rpm (Bruneel *et al.*, 2024). De ROC-waarde van de klassieke axiaalpompe in het duivelsputgebied met een toerental van 585 rpm ligt met 4008 ± 4118 hPa veel hoger (Bruneel *et al.*, 2024). Opmerkelijk is de grote variatie in de ROC-waarden, met enkele uitschieters die met een maximale waarde van 17328 hPa/s voor BDS- en 19092 hPa/s voor backpacksensoren ver boven de grenswaarde zit. In enkele uitzonderlijke gevallen zouden verwondingen ten gevolge van snelle decompressie kunnen optreden. Echter blijkt voor paling deze kans op verwonding verwaarloosbaar gezien de doorvoerproeven een sterftepercentage van 1 % aantonen.

De lage totale opvoerhoogte (1,24 m) wordt weerspiegeld in de lage logratio drukverandering (LRP) voor de VaHo-pomp bij 250 rpm op basis van de BDS-sensoren ($0,22 \pm 0,12$ hPa) en de backpacksensoren ($0,33 \pm 0,27$ hPa). Zowel de BDS- als de backpacksensoren hadden LRP-waarden die kleiner waren dan de LRP-grenswaarden 1,5 en 0,5 die werden voorgesteld om het risico op een sterfte voor respectievelijk paling en witvis van meer dan 10 % te schatten. Deze waarden zijn op analoge wijze getest bij het palingveilige pompgebied in Duivelsput. Er werden wel enkele uitschieters boven de grenswaarde voor witvis gemeten met zowel de BDS- als backpack sensoren. De backpacksensoren hebben de grootste uitschieter gemeten met een waarde van 1,33. Omdat de backpacksensoren op palingen bevestigd waren, wordt deze uitschieter mogelijks door het gedrag van de paling veroorzaakt. Dit maakt de uitschieter minder relevant voor inschattingen voor witvis. De grootste uitschieter van de BDS-sensoren bedroeg 0,55, wat er op duidt dat in enkele uitzonderlijke gevallen witvis zou kunnen sterven ten gevolge van snelle decompressie.

Gezien de palingen net voor de geforceerde doorvoerproef bewaard werden in een kuip en ze de pomp niet op een natuurlijke manier kunnen benaderen is hun acclimatisatie druk gelijk aan de atmosferische druk. De atmosferische druk werd daarom gebruikt voor de LRP berekeningen. Echter, in natuurlijke situaties hebben vissen een acclimatisatie druk die hoger is dan de atmosferische druk door hun positie in de waterkolom. In de Stenensluisvaart ligt het waterpeil meestal tussen 2,7 en 2,8mTAW. De pompinlaat zit op een peil van ongeveer 1,1mTAW, hierdoor is de acclimatisatiediepte in natuurlijke omstandigheden ongeveer 1,7m, of 1170 hPa absolute druk. Het verschil tussen geteste en natuurlijke acclimatisatie druk zorgt mogelijks voor een onderschatting van de LRP en bijhorende risico op



verwonding en sterfte. In een onderzoek met BDS-sensoren naar de drukveranderingen in een Noorse waterval die een natuurlijk gevaar vormt voor stroomafwaarts migrerende zalm en forel, werden de LPR-waarden verwaarloosbaar geacht. De reden hiervoor is dat de acclimatisatiediepte van vissen die de waterval afdaalden, verondersteld werd zich op of nabij het wateroppervlak te bevinden (Tuhtan & Toming, 2019). Kortom het risico op verwonding en sterfte bij pompen moet niet alleen worden geschat op basis van de opvoerhoogte, maar ook de acclimatisatiediepte.

4.2.2 Invloed van gedrag op decompressie bij passage doorheen de VaHo-pomp.

Tussen BDS- en backpacksensoren is er geen significant verschil voor het drukdieptepunt (NADIR), de drukveranderingssnelheden (ROC) en de logratio drukverandering (LRP). Wat wel opvalt is de grotere variatie in passagetijd van de backpacksensordata ten opzichte van de BDS-sensor data. Gezien de variatie groter is bij de backpacksensoren is het mogelijk dat gedrag of individuele kenmerken een invloed hebben op hoeveel decompressie palingen ervaren tijdens passage doorheen een pomp. Een van die gedragskenmerken is het zwemgedrag van de vis. Een vis kan tegen de stroom in of met de stroom mee zwemmen doorheen de pomp, wat de passagetijd beïnvloedt. De gemiddelde duur van de passagetijd voor palingen met backpacksensoren ($63,49 \pm 86,43$ s) was bijna drie keer trager dan de passagetijd van BDS-sensoren ($22,86 \pm 9,06$ s). Desondanks het grote verschil was het verschil niet significant. Dit wordt mogelijk veroorzaakt door de grote variatie in passagetijd voor palingen met backpacksensoren. Vermoedelijk wordt de langere passagetijd van de backpacksensoren veroorzaakt door palingen die proberen weg te zwemmen van de pomp. Uit dit onderzoek kon niet worden afgeleid hoe het verschil in passagetijd en dus zwemgedrag het risico op verwondingen beïnvloedt. Er is nog extra onderzoek nodig om na te gaan welke individuele kenmerken de visveiligheid en passeerbaarheid beïnvloeden.

4.3 Blade strike model: Risico op mortaliteit door bladinslag

Het blade strike model (van Esch, 2012) voorspelde een mortaliteit van 23 % bij paling na doorvoer door de pomp. Uit deze studie, uitgevoerd met levende proefdieren, bleek echter dat de mortaliteit 1 % bedroeg bij de doorvoerproef.

Uit vergelijkingen tussen de voorspelde mortaliteit door het model en de mortaliteit bij experimenten, blijkt dat het blade strike model vaak een overschatting van de mortaliteit berekent (Ploskey & Carlson, 2004; van Esch, 2012). Een overschatting van het model kan veroorzaakt worden door het onvoorspelbare gedrag van vissen bij passage door een pomp (Čada *et al.*, 1997). Om deze overschatting te corrigeren, werd er aan het oorspronkelijke model van Von Raben (1957) een correctiefactor toegevoegd, genaamd de mutilatie ratio (Ploskey & Carlson, 2004; van Esch, 2012). In het blade strike model van 'van Esch' (2012) is de mutilatie ratio afhankelijk van de lengte van de vis, het toerental en de dikte van de waaierbladen.

Deze studie toonde aan dat de correctiefactor (i.e. mutilatie ratio) de overschatting onvoldoende corrigeert. Mogelijks valt dit te verklaren doordat in het model enkele aannames worden gedaan over hoe vissen de pomp benaderen, maar in realiteit kunnen vissen ander gedrag vertonen zoals wegzwemmen van de pomp of de pomp vanuit verschillende hoeken benaderen. Dit zou kunnen leiden tot andere mortaliteitscijfers (van Esch, 2012). Het voorspellen van de mortaliteit op basis van modellen is een nuttige tool om een indicatie van de schadelijkheid te kunnen geven. Echter tonen deze resultaten dat het belangrijk blijft om studies uit te voeren met levende proefdieren om zo accuraat mogelijke resultaten te bekomen. Nauwkeurige resultaten leiden tot gerichter advies voor onder andere het beleid.



5 BESLUIT

Voorafgaand aan de plaatsing van twee nieuwe pompen in het pompgebied op de Stenensluisvaart in Woumen werd de VaHo-pomp geëvalueerd. De Vlaamse milieumaatschappij (VMM) eist namelijk dat de pompen voldoen aan de veiligheidsnorm van maximum 10 % mortaliteit bij paling.

De geforceerde doorvoerproeven met palingen door de VaHo-pomp bij 250 rpm, toonde een sterftepercentage van 1 % aan. Uit deze studie kunnen we dan ook concluderen dat de VaHo-pomp bij 250 rpm voor palingen van de geteste lengtes, voldoet aan de veiligheidsnorm van maximum 10 % mortaliteit opgelegd door de VMM. De bevindingen uit deze studie gelden voor de gebruikte pomp in de geteste situaties. Afwijkingen in de specifieke condities, bijvoorbeeld andere dimensies of toerentallen en dus opvoerhoogte, kunnen mogelijk leiden tot een ander resultaat.

Voor de sensorevaluatie werd de biologische gevoeligheid voor sterfte van inheemse soorten te Stenensluisvaart in Woumen opgezocht, waarna de grenswaarden voor drukgerelateerde verwondingen en sterfte werden overgenomen uit de literatuur, indien beschikbaar. Op basis van de drukgerelateerde grenswaarden die in deze studie werden gebruikt, werd geen geschat risico op vissterfte van meer dan 10 % door decompressie waargenomen. De 1 % mortaliteit en waargenomen schade van de doorvoerproef zijn dus niet te linken aan druk, maar aan mechanische processen zoals bladinslag.

Een uitspraak over de visveiligheid van de VaHo-pomp voor andere vissoorten, zoals witvis kan op basis van dit rapport niet worden gedaan. Het is sterk aanbevolen om de visveiligheid van de VaHo-pomp voor andere vissoorten te evalueren aangezien eerder onderzoek al aantoonde dat een pomp palingveilig, maar niet visveilig kan zijn.



Referenties

Archenbach, E. (1968). Distribution of local pressure and skin friction around a circular cylinder in cross-flow up to $Re = 5 \times 10^6$. *Journal of Fluid Mechanics* 34 (4): 625-639.

Baeyens R., Buysse D., Stevens M., Mouton A., Gelaude E., Martens S., Jacobs Y. & Coeck J. (2011). Onderzoek naar de verwondingen bij vissen veroorzaakt door een gemaal met vizzels: Isabellagemaal (Boekhout). Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2011 (INBO.R.2011.7). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.

Baeyens R., Pauwels I., Buysse D., Mouton A., 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

Baumgartner L.J., Thorncraft G., Phonekhampheng O., Boys C., Navarro A., Robinson W., Brown R. & Deng Z.D. (2017). High fluid shear strain causes injury in silver shark: Preliminary implications for Mekong hydropower turbine design. *Fisheries Management and Ecology* 24 (3): 193-198. <https://doi.org/10.1111/fme.12213>.

Becker J.M., Abernethy C.S. & Dauble D.D. (2003). Identifying the effects on fish of changes in water pressure during turbine passage. *Hydro Review* 22 (5): 32-42.

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 Res.* 69, 1934–1944. <https://doi.org/10.1071/MF18100>

Boys C.A., Robinson W., Miller B., Pflugrath B., Baumgartner L.J., Navarro A., Brown R. & Deng Z. (2016). A piecewise regression approach for determining biologically relevant hydraulic thresholds for the protection of fishes at river infrastructure. *J. Fish Biol.* 88: 1677–1692. <https://doi.org/10.1111/jfb.12910>

Broos S., Bruneel S., Buysse D., Pauwels I., Verhelst P., De Maerteleire N., Pieters S., Gelaude E., Vanden Houten J., De Pauw B., Rosseel D., Plaetinck S., Vandamme L. & Coeck J. (2024). Evaluatie van de visveiligheid van een pompgemaal met ‘open stormvizzels’ en ‘gesloten buisvizzels’. Het Pompgemaal Groot Schijn (PGGS) op de rivier Groot Schijn in Deurne. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2024 (10). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel. DOI: doi.org/10.21436/inbor.102152346

Brown R.S., Carlson T.J., Gingerich A.J., Stephenson J.R., Pflugrath B.D., Welch A.E., Langeslay M.J., Ahmann M.L., Johnson R.L., Skalski J.R., Seaburg A.G. & Townsend R.L. (2012). Quantifying Mortal Injury of Juvenile Chinook Salmon Exposed to Simulated Hydro-Turbine Passage. *Transactions of the American Fisheries Society* 141 (1): 147-157. <https://doi.org/10.1080/00028487.2011.650274>.

Brown RS., Pflugrath BD., Colotelo AH., Brauner CJ., Carlson TJ., Daniel Deng Z., Seaburg AG., Deng ZD. & Seaburg AG. (2012a). Pathways of barotrauma in juvenile salmonids exposed to simulated hydro-turbine passage: Boyle’s law vs. Henry’s law. *Fisheries Research* 121–122: p. 43– 50.

Brown R.S., Walker R.W. & Stephenson J.R. (2016). A Preliminary Assessment of Barotrauma Injuries and Acclimation Studies for Three Fish Species. Nr. PNNL-24720. Pacific Northwest National Lab. (PNNL), Richland, WA (United States). <https://doi.org/10.2172/1237809>.

Brown RS., Carlson TJ., Gingerich AJ., Stephenson JR., Pflugrath BD., Welch AE., Langeslay MJ., Ahmann ML., Johnson RL., Skalski JR., Seaburg AG. & Townsend RL. (2012b). Quantifying Mortal Injury of Juvenile Chinook Salmon Exposed to Simulated Hydro-Turbine Passage. 141: p. 147–157.

Bruneel , S. Pauwels I., Broos S., Vandamme L., Van Wichelen J., Coeck J., Toming G., Tuhtan JA. & Buysse D. (2024). A fish-friendly Fairbanks Nijhuis axial flow pump turns out to be eel safe , roach unfriendly and bream unsafe. *Scientific Reports* 14 (1): 30234. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81095-6>

Buysse D., De Maerteleire N., Pieters S., Gelaude E., Van Damme L., Baeyens R., Van Wichelen J., Robberechts K., Pauwels I., Coeck J. m.m.v. Jeffrey Andrew Tuhtan & Gert Toming (TalTech University – Estland) (In druk). Evaluatie van de visveiligheid van een pompgemaal met twee verschillende types axiaalpompen. Het Duivelspuutgemaal op de Oude Kale in Vinderhout. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek. Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.

Buyse D., Mouton AM., Baeyens R. & Coeck J. (2015). Evaluation of downstream migration mitigation actions for eel at an Archimedes screw pump pumping station. *Fisheries Management and Ecology* 22: 286–294.

Buyse, D., Stevens, M., Mouton, A., Gelaude, E., Baeyens, R., Martens, S., Jacobs, Y. & Coeck, J. (2010). Onderzoek naar de verwondingen bij vissen veroorzaakt door een gemaal met schroefpompen. Spiedangemaal (Rieme). Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2010 (INBO.R.2010.44). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.

Čada G., Carlson T., Ferguson J., Richmond M., Sale M. (1999). Exploring the Role of Shear Stress and Severe Turbulence in Downstream Fish Passage. *Waterpower '99: Hydro's Future: Technology, Markets, and Policy*.

Čada GF. (2001). The Development of Advanced Hydroelectric Turbines to Improve Fish Passage Survival. *Fisheries* 26: p. 14–23.

Čada G. F., Coutant C. C. & Whitney R. W. (1997). Development of biological criteria for the design of advanced hydropower turbines. Nr. DOE/ID--100578, 1218126, 3738. <https://doi.org/10.2172/1218126>.

Carlson T.J., Brown R.S., Stephenson J.R., Pflugrath B.D., Colotelo A.H., Gingerich A.J., Benjamin P.L., Langeslay M.J., Ahmann M.L., Johnson R.L., Skalski J.R., Seaburg A.G. & Townsend R.L. (2012). The Influence of Tag Presence on the Mortality of Juvenile Chinook Salmon Exposed to Simulated Hydroturbine Passage: Implications for Survival Estimates and Management of Hydroelectric Facilities. *North American Journal of Fisheries Management* 32 (2): 249-261. <https://doi.org/10.1080/02755947.2012.661384>.

Christian, EA. (1973). The effects of underwater explosions on swimbladder fish.

Cox R.X., Kingsford R.T., Suthers I. & Felder S. (2023). Fish Injury from Movements across Hydraulic Structures: A Review. *Water* 15 (10): 1888. <https://doi.org/10.3390/w15101888>.

Cook, T.C., Hecker, G.E., Amaral, S.V., Stacy, P.S., Lin, F., and Taft, E.P. (2003). Final Report — Pilot scale tests Alden/Concepts NREC Turbine. Alden Research Lab. Inc., Holden, Mass

Colotelo AH., Goldman AE., Wagner KA., Brown RS., Deng ZD., Richmond MC. (2016). A comparison of metrics to evaluate the effects of hydro-facility passage stressors on fish. *Environ. Rev.* 25, 1–11.

Colotelo A.H., Pflugrath B.D., Brown R.S., Brauner C.J., Mueller R.P., Carlson T.J., Deng Z.D., Ahmann M.L. & Trumbo B.A. (2012). The effect of rapid and sustained decompression on barotrauma in juvenile brook lamprey and Pacific lamprey: Implications for passage at hydroelectric facilities. *Fisheries Research* 129-130: 17-20. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2012.06.001>.

Declercq, G., Casteleyn, J. (1993). De problematiek rond het Blankaartbekken. West-Vlaanderen Werkt. https://www.kenniswest.be/file/article/50410/70878/WVLW1993_4_DeproblematiekrondbetBlankaartbekken.pdf?v=3

Deng Z.D., Duncan J.P., Arnold J.L., Fu T., Martinez J., Lu J., Titzler P.S., Zhou D & Mueller R.P. (2017). Evaluation of Boundary Dam spillway using an Autonomous Sensor Fish Device. *J. Hydro-Environ. Res.* 14: 85–92.

Deng Z.D., Lu J., Myjak M.J., Martinez J.J., Tian C., Morris S.J., Carlson T.J., Zhou D. & Hou H. (2014). Design and implementation of a new autonomous sensor fish to support advanced hydropower development. *Review of Scientific Instruments* 85 (11): 115001. <https://doi.org/10.1063/1.4900543>

Electric Power Research Institute (EPRI). (2011). Fish Passage Through Turbines: Application of Conventional Hydropower Data to Hydrokinetic Technologies (Report No. 1024638). Report by Electric Power Research Institute (EPRI).

Doyle K.E., Ning N., Silva L.G.M., Brambilla E.M., Deng Z.D., Fu T., Boys C., Robinson W., du Preez J.A. & Baumgartner L.J. (2022). Survival estimates across five life stages of redbfin (*Perca fluviatilis*) exposed to simulated pumped-storage hydropower stressors. *Conservation Physiology* 10 (1): coac017. <https://doi.org/10.1093/conphys/coac017>.

Doyle K.E., Ning N., Silva L.G.M., Brambilla E.M., Boys C.A., Deng Z.D., Fu T., du Preez J.A., Robinson W. & Baumgartner L.J. (2020). *Gambusia holbrooki* Survive Shear Stress, Pressurization and Avoid Blade Strike in a Simulated Pumped Hydroelectric Scheme. *Frontiers in Environmental Science* 8. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.563654>.

//

European Council. (2007). Council Regulation (EC) No 1100/2007 of 18 September 2007 establishing measures for the recovery of the stock of European eel. Official Journal of the European Union 248: p. 17–23.

Fu T., Deng Z.D., Duncan J.P., Zhou D., Carlson T.J., Johnson G.E. & Hou H. (2016). Assessing hydraulic conditions through Francis turbines using an autonomous sensor device. *Renew. Energy* 99: 1244–1252. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.029>

Germonpré E., Denayer B., Belpaire C. & Ollevier F. (1994). Inventarisatie van pompgemalen in het vlaamse gewest en preliminair onderzoek naar schade van diverse pomptypes op vissen na gedwongen blootstelling. Rapporten van het instituut voor bosbouw en wildbeheer - sectie visserij 1994(021). Instituut voor Bosbouw en Wildbeheer: Groenendaal: Belgium, 63 p.

Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek. (2020). Vis Informatie Systeem (VIS). Geraadpleegd in december 2024 op <https://vis.inbo.be/Pages/Common/Default.aspx>.

Integraal Waterbeleid. (z.d.). Blankaart waterlopen. Geraadpleegd op 21 oktober 2024, van <https://www.integraalwaterbeleid.be/nl/bekkens/ijzerbekken/gebiedsgerichte-werking/gebieden/blankaart-waterlopen>

Kanton AG-BE-SO. (2014). Interkantonaal Aareplaning: Strategische Planung Sanierung Fischgängigkeit Fischwanderhilfen bei Aarekraftwerken. Einheitliche Grundsätze Kantone. p. 1-6. Version 1.1 / 15.08.2014.

Lewis, JA. (1996). Effects of Underwater Explosions on Life in the Sea. Aust. Dep. Def. Sci. Technol. Organ. Aeronaut. Marit. Res. Lab.

Natuurpunt. (z.d.). Blankaart waterlopen. Geraadpleegd op 21 oktober 2024, van <https://www.natuurpunt.be/natuurgebieden/de-blankaart>

NEN 8775+C1. (2022). Visveiligheid van pompen, vijzels en drukturbines die worden gebruikt in gemalen en waterkrachtcentrales (Fish safety of pumps, Archimedean screws and pressure turbines used in pumping stations and hydroelectric plants). Delft.

Neitzel D.A., Dauble D.D., Čada G.F., Richmond M.C., Guensch G.R., Mueller R.P., Abernethy C.S. & Amidan B. (2004). Survival Estimates for Juvenile Fish Subjected to a Laboratory-Generated Shear Environment. *Transactions of the American Fisheries Society* 133 (2): 447-454. <https://doi.org/10.1577/02-021>.

Neitzel D.A., Richmond M.C., Dauble D.D. & Mueller R.P. (2000). Laboratory Studies on the Effects of Shear on Fish. Pacific Northwest National Laboratory.

Odeh M. (1999). A Summary of Environmentally Friendly Turbine Design Concepts. EERE Publication and Product Library, Washington, D.C. (United States). <https://doi.org/10.2172/1218115>.

Pan Q., Shi W., Zhang D., Esch B. van & Zhao R. (2020). Fish-friendly design of an axial flow pump impeller based on a blade strike model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* 234 (2): 173-186. <https://doi.org/10.1177/0957650919849768>.

Pavlov D. & Kirillov P. I. (2003). Adaptational ability of salmonids, cyprinids, and percids to changes in hydrostatic pressure. *J. Ichthyol.* 43, p. 237–242.

Pflugrath B.D., Harnish R., Rhode B., Beirao B., Engbrecht K., Stephenson J.R. & Colotelo A.H. (2021). American eel state of buoyancy and barotrauma susceptibility associated with hydroturbine passage. *Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems* (420): 20. <https://doi.org/10.1051/kmae/2019012>.

Pflugrath B.D., Harnish R.A., Rhode B., Engbrecht K., Beirão B., Mueller R.P., McCann E.L., Stephenson J.R. & Colotelo A.H. (2019). The Susceptibility of Juvenile American Shad to Rapid Decompression and Fluid Shear Exposure Associated with Simulated Hydroturbine Passage. *Water* 12 (2): 586. <https://doi.org/10.3390/w12020586>.

Pflugrath B.D., Harnish R., Rhode B., Beirao B., Engbrecht K., Stephenson J.R. & Colotelo A.H. (2019). American eel state of buoyancy and barotrauma susceptibility associated with hydroturbine passage. *Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems* (420): 20. <https://doi.org/10.1051/kmae/2019012>.

Ploskey G.R. & Carlson T.J. (2004). Comparison of blade-strike modeling results with empirical data. Nr. PNNL-14603. EERE Publication and Product Library, Washington, D.C. (United States). <https://doi.org/10.2172/1218123>.



Pracheil B.M., DeRolph C.R., Schramm M.P. & Bevelhimer M.S. (2016). A fish-eye view of riverine hydropower systems: the current understanding of the biological response to turbine passage. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 26 (2): 153-167. <https://doi.org/10.1007/s11160-015-9416-8>.

Provoost, T. (1997). De IJzer: Een kleine stroom met een groot verleden. West-Vlaamse Vereniging voor de Vrije Tijd v.z.w., Water 97.

Schneider J., Ratschan C., Heisey P.G., Avalos C., Tuhtan J., Haas C., Reckendorfer W., Schletterer M. & Zitek A. (2017). Flussabwärts gerichtete Fischwanderung an mittelgroßen Fließgewässern in Österreich. *Wasserwirtschaft* 107 (12): 39-44. <https://doi.org/10.1007/s35147-017-0207-0>

Spierts ILY.. (2015). Visveiligheidsproef Flygt Eco-Fish pomp Xylem Water Solutions Netherlands. Rapport in opdracht van Xylem Water Solutions Netherlands. ATKB projectnummer 20141033.

Stephenson JR., Gingerich AJ., Brown RS., Pflugrath BD., Deng Z., Carlson TJ., Langeslay MJ., Ahmann ML., Johnson RL. & Seaburg AG. (2010). Assessing barotrauma in neutrally and negatively buoyant juvenile salmonids exposed to simulated hydro-turbine passage using a mobile aquatic barotrauma laboratory. *Fisheries Research* 106: p. 271–278.

Stevens M., Buysse D., Van den Neucker T., Gelaude E., Baeyens R., Jacobs Y., Mouton A., Coeck J. & van Vessem J.(2011). Wetenschappelijke ondersteuning van de uitvoering van het palingbeheerplan - Inventarisatie pompgemalen en inventarisatie van de technische karakteristieken en waterbeheersaspecten van prioritair zout-zoetovergangen. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2011 (38). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.

Tuhtan JA., Fuentes-Pérez JF., Angerer T. & Schletterer M. (2018). Monitoring upstream fish passage through a bypass pipe and drop at the fish lift Runserau: comparing dynamic pressure measurements on live fish with passive electronic fish surrogates. *International Conference on Ecohydraulics*. Tokyo, Japan., p. 4–7.

Tuhtan J.A. & Toming G. (2019). Assessment of Fish Injury and Mortality Risk during Downstream Passage at the Rafoss Waterfall, Kvinesdal, Norway.

Tuhtan J.A. & Toming G. (2023) Overshot and Undershot Weir and Turbine Passage Sensor Measurements at the Bannwil Hydropower Station, September 2021. Tallinn University of Technology

van Esch, B. P. M. (2012). Fish injury and mortality during passage through pumping stations. *Journal of Fluids Engineering* 134.

van Esch, B. P.M. & Spierts, I. L. Y. (2014). Validation of a model to predict fish passage mortality in pumping stations. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 71 (12).

van de Ven M. (2018). Visveiligheidstest ECO FISH 700A pomp Xylem. Testopstelling Kwakernaak B.V. te Groot-Ammers. Rapport in opdracht van Xylem Water Solutions Belgium. ATKB projectnummer 20180508/rap04.

van Treeck R., Van Wichelen J. & Wolter C. (2020). Fish species sensitivity classification for environmental impact assessment, conservation and restoration planning. *Sci. Total Environ.* 708: 135173. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135173>

Vriese, F.T. (VisAdvies), (2009). Onderzoek naar de visveilige axiaalpompe en buisvijzel. VisAdvies BV, Nieuwegein. Projectnummer VA2009_19, 23 p.

VLM. (2022, Juni). De Blankaart. Vlaamse Landmaatschappij. Geraadpleegd op 21 oktober 2024, van <https://www.vlm.be/nl/projecten/Paginas/DeBlankaart.aspx>

Yang C., Zhang Q., Yu Y., Zheng Y. & Ren Z. (2024). Design optimization of an axial turbine and study on its fish passing characteristics. *Physics of Fluids* 36 (3): 035132. <https://doi.org/10.1063/5.0186547>.



Bijlage 1: Overzicht van de grenswaarden voor drukparameters op basis van wetenschappelijke literatuur.

Bij in situ sensor- en vistesten kan de oorzaak van de mortaliteit en/of verwonding ook aan andere factoren dan de gemeten druk liggen, bijvoorbeeld de impact door de propeller. Daarom zijn de weergave van de in situ testen enkel indicatief. De grenswaarden werden gebruikt om het risico op vissterfte in te schatten bij een overschrijding van 10 % tijdens de passage van de VaHo-pomp.

Tabel 10: Overzicht van de grenswaarde van het drukdieptepunt (NADIR) (kPa) voor verschillende vissoorten op basis van literatuur.

In situ/ labo	Vissoort / studiegebied	Grenswaarde Drukdieptepunt (NADIR) [hPa]	Grenswaarde drukdieptepunt (NADIR) gebruikt in deze studie	referentie	
Labo acclimatisatie aan oppervlakte	sneep (L1, 0+) (<i>Chondrostoma nasus</i>) blankvoorn (L6/J1) (<i>Rutilus rutilus</i>)	500 (enkele verwondingen)	Paling 27 hPa, witvis 400 hPa Waarden kleiner dan deze grenswaarde kunnen leiden tot een sterfte groter dan 10%	Schneider <i>et al.</i> , 2017; Tuhtan & Toming, 2023	
	baars (0+) (<i>Perca fluviatilis</i>)	400 (enkele verwondingen)			
	baars (L6/J1) (<i>Perca fluviatilis</i>) blankvoorn (0+) (<i>Rutilus rutilus</i>)	200 - 250 (enkele verwondingen)			
	baars (L1) (<i>Perca fluviatilis</i>) vlagzalm (L1/2) (<i>Thymallus thymallus</i>)	150 (enkele verwondingen)			
Labo acclimatisatie op 251 kPa	vlagzalm (0+) (<i>Thymallus thymallus</i>)	420 (94% sterfte)			
Labo	Chinookzalm (<i>Oncorhynchus tshawytscha</i>)	700 (geen verwondingen)			Yang <i>et al.</i> , 2024
	blauwkieuw zonnebaars (<i>Lepomis macrochirus</i>)	700 (49,1% verwondingen)			
Labo	Chinookzalm (<i>Oncorhynchus tshawytscha</i>)	20 - 100 (enkele sterftes)			Becker <i>et al.</i> , 2003
	regenboogforel (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	20 - 100 (enkele verwondingen)			
	blauwkieuw zonnebaars (<i>Lepomis macrochirus</i>)	500 (enkele sterftes)			
in situ sensor en vistesten (duivelsputge maal)	Amerikaanse paling (<i>Anguilla rostrata</i>) Levensfase: gele paling Levensfase: zilverpaling	24 (geen sterftes) 27 (geen sterftes)		Pflugrath <i>et al.</i> , 2019	
	Europese paling (<i>Anguilla anguilla</i>)	933 (geen sterfte)		Bruneel <i>et al.</i> , 2024	
	blankvoorn (<i>Rutilus rutilus</i>)	933 (30 % sterfte)			
	brasem < 340 mm (<i>Abramis brama</i>)	964 (33 % sterfte)			
	brasem > 340 mm (<i>Abramis brama</i>)	933 (73 % sterfte) 964 (82 % sterfte)			

Tabel 11: Overzicht van de grenswaarde van de logratio drukverandering (LRP) voor verschillende vissoorten op basis van literatuur.

In situ/ labo	Vissoort / studiegebied	Grenswaarde Log ratio drukverandering (LRP)	Grenswaarde Log ratio drukverandering (LRP) gebruikt in deze studie	referentie	
Labo, acclimatisatie aan oppervlakte	sneep (L1, 0+) (<i>Chondrostoma nasus</i>)	1,0 (enkele verwondingen)	Paling 1,5, witvis 0,5 <i>Waarden groter dan deze grenswaarde kunnen leiden tot een sterfte groter dan 10 %</i>	Schneider <i>et al.</i> , 2017; Tuhtan & Toming, 2023	
	blankvoorn (L6/J1) (<i>Rutilus rutilus</i>)				
	baars (0+) (<i>Perca fluviatilis</i>)	1,5 (enkele verwondingen)			
	baars (L6/J1) (<i>Perca fluviatilis</i>)	2,0 (enkele verwondingen)			
Labo, acclimatisatie op 251 kPa	blankvoorn (0+) (<i>Rutilus rutilus</i>)	0,9 (47 % sterfte)			
Labo	vlagzalm (0+) (<i>Thymallus thymallus</i>)	1,8 (94 % sterfte)			Carlson <i>et al.</i> , 2012
Labo	Chinookzalm juveniel (<i>Oncorhynchus tshawytscha</i>)	0,92 (10 % sterfte)			Brown <i>et al.</i> , 2016
Labo	Breedbekbaars (<i>Sander vitreus</i>)	0,94 (10 % sterfte)			
Labo	Amerikaanse snoek (muskellunge) (<i>Esox lucius X E. Masquinongy</i>)	0,82 (10 % sterfte)			Pflugrath <i>et al.</i> , 2020
Labo	Amerikaanse elft juveniel (<i>Alosa sapidissima</i>)	0,82 (10 % sterfte)			Pflugrath <i>et al.</i> , 2019
in situ sensor en vistesten (duivelsputgem aal)	Amerikaanse paling (<i>Anguilla rostrata</i>)	2,23 (geen sterfte, 13,3 % verwondingen)		Bruneel <i>et al.</i> , 2024	
	Europese paling (<i>Anguilla anguilla</i>)	0,079 (geen sterfte)			
	blankvoorn (<i>Rutilus rutilus</i>)	0,079 (30 % sterfte)			
	brasem < 340 mm (<i>Abramis brama</i>)	0,048 (33 % sterfte) 0,079 (73 % sterfte)			
	brasem > 340 mm (<i>Abramis brama</i>)	0,079 (82 % sterfte)			



Tabel 12: Overzicht van de grenswaarde van de drukveranderingssnelheid (ROC) voor verschillende vissoorten op basis van literatuur.



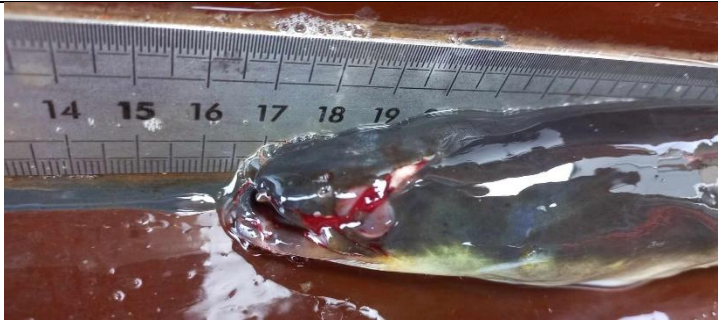
In situ/ labo	Vissoort / studiegebied	Grenswaarde Druk veranderingssnelheid (ROC) [hPa/s]	Grenswaarde druk veranderingssnelheid (ROC) gebruikt in deze studie	referentie
Labo	beekprik (<i>Lampetra richardonii</i>)	10,5 hPa/s (geen sterfte)	Paling en witvis 5500 hPa/s <i>Waarden groter dan deze grenswaarde kunnen leiden tot een sterfte groter dan 10 %</i>	Colotelo <i>et al.</i> , 2012
	pacifische prik (<i>Entosphenus tridentatus</i>)	7,3 hPa/s (geen sterfte)		
in situ enkel sensor testen	Bonneville Dam	620 hPa/s		Brown <i>et al.</i> , 2012
	Ice Harbor Dam	57847 hPa/s		
richtlijnen	ARL visvriendelijke turbine richtlijnen	< 5503 hPa/s (geen verwonding) ≥ 11006 hPa/s (verwonding wordt verwacht)		
in situ sensor en vistesten (duivelsputge maal)	Europese paling (<i>Anguila anguila</i>)	2654 hPa/s (geen sterfte)		Bruneel <i>et al.</i> , 2024
	blankvoorn (<i>Rutilus rutilus</i>)	2654 hPa/s (30 % sterfte)		
	brasem < 340 mm (<i>Abramis brama</i>)	2654 hPa/s (33% sterfte) 2501 hPa/s (73% sterfte)		
	brasem > 340 mm (<i>Abramis brama</i>)	2501 hPa/s (82% sterfte)		

Bijlage 2: Dagen van de proeven voor elke groep.

	<u>Maandag 16/09/2024</u>	<u>dinsdag 17/09/2024</u>	<u>woensdag 18/09/2024</u>	<u>donderdag 19/09/2024</u>	<u>donderdag 19/09/2025</u>
	Levering & Acclimatisatie				
Proef	5 palingen: 4 HF, 1 controle	<ul style="list-style-type: none"> 70 palingen HF 50 palingen controlegroep 	<ul style="list-style-type: none"> 75 palingen TF 30 palingen voor test nieuwe kooi 	In verschillende beurten napompen tijdens BDS runs	Finaal 15 minuten op max toerental (310 rpm) napompen



Bijlage 3: Schadeprofielen bij paling na passage door de pomp

		Categorie	
1. Gezonde, onbeschadigde vis			
			
2. Licht beschadigde vis			
	2.1	Rode en/of beschadigde ogen	n.v.t.
	2.2	Rode en/of beschadigde vinnen	n.v.t.
	2.3	Lichte krassen, kneuzingen en/of schubverlies < 20 %	
3. Zwaar (terminaal) beschadigde vis			
	3.1	Aanzienlijk schubverlies > 20 %	n.v.t.
	3.2	Insnijdingen, doorsnijdingen, afgesneden lichaamsdelen	Zie foto bij 3.4
	3.3	Breuken	Geen foto
	3.4	Zwaar beschadigde of ontbrekende ogen	

	3.5	Zwaar beschadigde kieuwen/kieuwdeksels	n.v.t.
	3.6	Zware kneuzingen en/of bloedingen	n.v.t.
	3.7	Abnormaal zwemgedrag	n.v.t.
4. Dode vis			
Geen foto			



Bijlage 4: Knelschade bij paling door opvangkooi

Knelschade veroorzaakt door de opvangkooi

