

Vlaanderen
is wetenschap

Evaluatie van de visveiligheid van de VaHo axiaalpomp in het pompgemaal op de Stenensluisvaart in Woumen

Stijn Bruneel, Kaat Thienpont, Sarah Broos, Nico De Maerteleire, Simon Plaetinck, Mylan Lyssens, Johan Coeck, David Buysse

INSTITUUT
NATUUR- EN BOSONDERZOEK

Auteurs:
Stijn Bruneel, Kaat Thienpont, Sarah Broos, Nico De Maerteleire, Simon Plaetinck, Mylan Lyssens, Johan Coeck, David Buysse

Reviewers:
Niels De Troyer

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

Vestiging:
INBO Brussel, Herman Teirlinckgebouw, Havenlaan 88 bus 73, 1000 Brussel, België
vlaanderen.be/inbo

e-mail:
stijn.bruneel@inbo.be

Wijze van citeren:
Bruneel, S., Thienpont, K., Broos, S., De Maerteleire, N., Plaetinck, S., Lyssens, M., Coeck, J. & Buysse, D. (2026). Evaluatie van de visveiligheid van de VaHo axiaalpomp in het pompgemaal op de Stenensluisvaart in Woumen. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2026 (69). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel. DOI: 10.21436/inbor.158239472

D/2026/3241/345
Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek 2026 (69)
ISSN: 1782-9054

Verantwoordelijke uitgever:
Hilde Eggermont

Foto cover:
Pompschroef

Dit onderzoek werd uitgevoerd in opdracht van:
VMM; VAC Brussel - Herman Teirlinck; Havenlaan 88 bus 73; 1000 Brussel
Van Hooste; Kleistraat 3 9190 Stekene

Dit werk valt onder een Creative Commons Naamsvermelding 4.0 Internationaal-licentie.

INSTITUUT
NATUUR- EN
BOSONDERZOEK

EVALUATIE VAN DE VISVEILIGHEID VAN DE VAHO AXIAALPOMP IN HET POMPGEMAAL OP DE STENENSLUISVAART IN WOUMEN

Stijn Bruneel, Kaat Thienpont, Sarah Broos, Nico De Maerteleire, Simon Plaetinck, Mylan Lyssens, Johan Coeck, David Buysse

10.21436/inbor.158239472

Vlaanderen
is wetenschap

vlaanderen.be/inbo

Abstract

The pumping station on the Stenensluisvaart in Woumen discharges water from the Blankaart catchment area into the River Yser. Because this pumping station is situated on a key migratory route for fish, the obsolete and hazardous axial-flow pumps were replaced with new VaHo axial-flow pumps. Following earlier INBO research demonstrating that these pumps are safe for eel (Thienpont *et al.*, 2025), the safety for scaly fish (such as roach and common bream) larger than 10 cm was evaluated through the *in-situ* monitoring of natural, unconstrained passage in Woumen. Scaly fish are defined as all fish species excluding eel. Although the focus was primarily on scaly fish, several eels also passed through the pump during the study period. This investigation **reconfirmed passage safety for eel, with all 40 traversing individuals displaying zero injuries**.

The VaHo pumps were designed with the fundamental objective of enabling safe fish passage. In theory, this is pursued through a specific technical configuration in which a high volumetric discharge ($2\ \mathrm{m}^3/\mathrm{s}$ under a static gross head of 1.24 m) and a high hydraulic efficiency exceeding 80% go hand in hand with a relatively limited mechanical impact on the passing fish community. By employing a runner radius of 0.45 m and two blades with a thickness of 36 mm rotating at an operational speed of 250 rpm, a relatively spacious transit window is created that minimizes the probability of physical strike interactions.

The monitoring results confirm the relatively high scaly fish safety profile of the installation:

- **High uninjured passage:** Across the total scaly fish community, the vast majority of individuals (83%) traversed the installation completely uninjured. An additional 13% exhibited slight injuries, and 4% sustained severe injuries. **In summary, this resulted in an overall passage survival rate of** 96% for the scaly fish community.
- **Robust survival for large scaly fish:** Although natural downstream passage was predominantly composed of smaller individuals, the survival probability for larger fish remained remarkably high. The calibrated survival model estimates the absolute survival probability for a 50 cm scaly fish at approximately 76.9% (95% CI: $[65.3\% - 85.5\%]$).
- **Performing theory:** Realized in-situ survival was consistently and substantially higher than predicted a priori by the theoretical blade-strike model. Whereas the theoretical model projected survival rates dropping to 0% in the largest length classes, observed empirical survival remained robust across those upper brackets as well.

Statistical model selection demonstrated that passage survival is primarily driven by fork length. Larger fish face an increased risk of severe trauma. The odds of successful passage decline by 46.7% per 10 cm increase in fork length. Thanks to the high baseline safety profile of the pump design, this statistical decrease translates in practice into only a minor reduction in realized survival. For a 150 mm fish, the model predicts a survival rate of 96.8% (95% CI: $[95.6\% - 97.7\%]$), which decreases only marginally to 94.1% (95% CI: $[92.3\% - 95.6\%]$) at a substantial length increase to 250 mm. In common bream—the only scaly fish species captured in sufficient numbers across the entire size gradient to support statistically robust standalone conclusions—the negative effect of body length on survival was most evident. The volume and broad distribution of this specific sample enabled a reliable, representative characterization of length-dependent mortality, which was precluded in the other evaluated species due to sample size constraints. For European perch, roach, silver bream, rudd, and pikeperch, no statistically significant length effect on survival was detected across their observed catch ranges; their survival probabilities remained consistently high.

The nature and severity of injuries were also strongly linked to fish size and species:

- **Slight injury (Class 2):** Within this category, injury patterns were **uniform across all species**. Across the broader scaly fish community (97.0%), roach (95.7%), and common bream (97.0%), slight injury consisted almost exclusively of **superficial scratches or limited scale loss**, pointing to glancing interactions where fish brushed against channel or housing surfaces. There was no significant relationship between fork length and specific injury subcategories within Class 2.

- **Severe injury (Class 3):** Here, a clear size-dependent shift was observed. In larger specimens, particularly **common bream, severe injury was dominated by penetrating mechanical blade strikes, including deep lacerations and body severing (**78.6%). Conversely, in smaller scaly fish sustaining severe damage (such as roach), injuries were more frequently limited to extensive desquamation/scale loss (55.6%).

The monitoring campaign confirms that the VaHo pump at Stenensluisvaart performs relatively well regarding scaly fish safety. While an artificial obstacle inherently remains, the installation successfully reconciles mandatory drainage capacity with a relatively limited impact on passing scaly fish and no observable impact on migrating eel. Although larger scaly fish remain vulnerable to severe trauma, observed injury incidences in this study remain markedly lower than values reported in the literature for both conventional pumping installations and alternative fish-friendly axial-flow pump designs.

Samenvatting

Het pompgemaal op de Stenensluisvaart in Woumen voert water af van het Blankaartgebied naar de IJzer. Omdat dit gemaal op een belangrijke migratieroute voor vissen ligt, zijn de oude en schadelijke axiaalpompen vervangen door nieuwe VaHo-axiaalpompen. Nadat eerder INBO-onderzoek al aantoonde dat deze pompen veilig zijn voor paling (Thienpont *et al.*, 2025), is nu de veiligheid voor schubvissen (zoals blankvoorn en brasem) groter dan 10 cm onderzocht via monitoring van de natuurlijke passage in Woumen (*in-situ*). Schubvissen of *scaly fish* worden beschouwd als alle vissen behalve paling. Ondanks de focus op schubvissen, passeerden ook verschillende palingen de pomp tijdens de studie. Deze studie **bevestigde nogmaals de veiligheid voor paling doordat alle 40 individuen die de pomp passeerden geen schade vertoonden**.

De VaHo-pompen zijn oorspronkelijk ontworpen om vissen veilig te laten passeren. Dit wordt in theorie nagestreefd via een specifieke technische configuratie, waarbij een hoge waterafvoer (een debiet van 2 m³/s bij een opvoerhoogte van 1.24 m) en een hoog hydraulisch rendement van ruim 80% hand in hand zouden moeten gaan met een relatief beperkte mechanische impact op de visgemeenschap. Door het toepassen van een pomp-radius van 0.45 m en twee bladen met een dikte van 36 mm, die draaien met een toerental van 250 rpm, wordt verondersteld dat er een relatief ruime passage-opening ontstaat die de kans op fysieke interactie minimaliseert.

De resultaten van de monitoring bevestigen de relatief hoge schubvisveiligheid van de installatie:

- **Hoge schadevrije passage:** Binnen de totale schubvisgemeenschap passeerde de overgrote meerderheid van de schubvissen (83%) de installatie volledig ongeschonden. 13% vertoonde beperkte schade en 4% vertoonde ernstige schade. **Samengevat resulteerde dit in een overlevingspercentage van 96% voor de schubvisgemeenschap.**
- **Robuuste overleving voor grote schubvissen:** Hoewel de natuurlijke passage hoofdzakelijk uit kleinere schubvissen bestond, blijft de overlevingskans voor grotere individuen opmerkelijk hoog. Het overlevingsmodel schat de absolute overlevingskans voor een schubvis van 50 cm op circa 76.9% (95% BI: [65.3% - 85.5%]).
- **Beter dan de theorie:** De werkelijke overleving in het veld ligt consequent en aanzienlijk hoger dan wat het theoretische *blade-strike* model vooraf voorspelt. Waar het model voor de grotere lengteklassen overlevingskansen van 0% voorspelde, bleef de geobserveerde overleving in de praktijk ook daar robuust.

Statistische modelselectie toonde aan dat de overlevingskans vooral wordt bepaald door de vorklengte. Hoe groter de schubvis, hoe hoger het risico op ernstig letsel. De kansverhouding (odds) op een succesvolle passage neemt met 46.7% af per 10 centimeter extra vorklengte. Dankzij de hoge basisveiligheid van de pomp resulteert deze statistische afname in de praktijk echter in een minimaal verlies van de werkelijke overlevingskans. Het model voorspelt voor een schubvis van 150 mm een overleving van 96.8% $[95\%$ BI: $95.6\% - 97.7\%]$, wat bij een substantiële lengtetoename naar 250 mm slechts marginaal terugloopt naar 94.1% $[95\%$ BI: $92.3\% - 95.6\%]$. Bij de brasem — de enige schubvissoort die in voldoende aantallen over het gehele lengtespectrum voorkwam om een statistisch onderbouwde conclusie te trekken — is het negatieve effect van de vorklengte op de overleving het duidelijkst aanwezig. De omvang en brede spreiding van deze specifieke steekproef maakten het mogelijk om een betrouwbaar en representatief beeld van de lengte-afhankelijke mortaliteit te schetsen, wat bij de andere onderzochte soorten door databeperkingen onmogelijk was. Voor de baars, blankvoorn, kolblei, rietvoorn en snoekbaars werd over de geobserveerde range geen statistisch significant effect van de lengte op de overleving vastgesteld; hun overlevingskansen bleven consistent hoog.

Ook de aard en de ernst van de verwondingen hangen sterk samen met de grootte en de soort van de schubvis:

- **Beperkte schade (Klasse 2):** Binnen deze categorie is het schadebeeld **over alle soorten heen uniform**. Bij het merendeel van de schubvisgemeenschap (97.0%), blankvoorn (95.7%) en brasem (97.0%) bestaat de beperkte schade nagenoeg uitsluitend uit **lichte krassen of beperkt schubverlies**, wat duidt op een passage waarbij de schubvis de wanden schampt. Er is geen relatie tussen de vorklengte en het type letsel binnen deze klasse.

  Zware schade (Klasse 3): Hier is wel een duidelijke verschuiving zichtbaar. Bij grotere individuen, en dan met name bij **brasem, domineert penetrerend mechanisch letsel door de rotorbladen, zoals diepe insnijdingen en doorsnijdingen (78.6%)**. Bij kleinere schubvissoorten met ernstig letsel (zoals de blankvoorn) blijft het beeld daarentegen vaker beperkt tot louter grootschalig schubverlies (55.6%).

De monitoring bevestigt dat de VaHo-pomp bij de Stenensluisvaart relatief goed presteert op het vlak van schubvisveiligheid. Hoewel een fysieke barrière aanwezig blijft, slaagt de installatie erin om noodzakelijke waterafvoer te combineren met een relatief beperkte impact op de passerende schubvis en geen observeerbare impact op passerende paling. Hoewel grotere schubvissen gevoelig blijven voor het oplopen van ernstige verwondingen, liggen de geobserveerde incidenties in dit onderzoek beduidend lager dan de waarden die gerapporteerd worden voor zowel traditionele installaties als andere visvriendelijke axiaalpompen in de literatuur.

Résumé français

La station de pompage située sur le Stenensluisvaart à Woumen évacue les eaux du bassin versant du Blankaart vers l'Yser. Comme cette station de pompage se trouve sur un axe migratoire majeur pour les poissons, les anciennes pompes axiales, obsolètes et dangereuses pour la faune piscicole, ont été remplacées par de nouvelles pompes axiales VaHo. À la suite de recherches antérieures de l'INBO démontrant que ces pompes sont sûres pour l'anguille (Thienpont *et al.*, 2025), leur sécurité pour les poissons à écailles (tels que le gardon et la brème commune) d'une taille supérieure à 10 cm a été évaluée par un suivi *in situ* du franchissement naturel et non contraint à Woumen. Les poissons à écailles sont définis comme l'ensemble des espèces piscicoles à l'exclusion de l'anguille. Bien que l'étude ait principalement porté sur les poissons à écailles, plusieurs anguilles ont également transité par la pompe durant la période de suivi. Cette étude a **reconfirmé la sécurité de passage pour l'anguille, l'ensemble des** 40 individus ayant franchi l'installation sans aucune blessure.

Les pompes VaHo ont été conçues avec l'objectif fondamental de permettre un franchissement piscicole sûr. En théorie, cet objectif repose sur une configuration technique spécifique dans laquelle un débit volumique élevé (2 m^3/s sous une hauteur manométrique statique brute de $1,24$ m) et un rendement hydraulique supérieur à 80% s'accompagnent d'un impact mécanique relativement limité sur le peuplement piscicole en transit. Grâce à une roue d'un rayon de $0,45$ m équipée de deux pales d'une épaisseur de 36 mm tournant à une vitesse nominale de 250 tr/min, un espace de transit relativement spacieux est créé, minimisant la probabilité de collisions physiques.

Les résultats du suivi confirment le profil de sécurité relativement élevé de l'installation pour les poissons à écailles :

- **Taux élevé de passage sans blessure :** Sur l'ensemble de la communauté des poissons à écailles, la grande majorité des individus (83%) a franchi l'installation totalement indemne. En outre, 13% ont présenté des blessures légères et 4% ont subi des blessures graves. **En résumé, cela se traduit par un taux de survie global au franchissement de** 96% pour la communauté des poissons à écailles.
- **Survie robuste pour les grands poissons à écailles :** Bien que la dévalaison naturelle ait été majoritairement composée d'individus de petite taille, la probabilité de survie des poissons de grande taille est demeurée remarquablement élevée. Le modèle de survie calibré estime la probabilité de survie absolue d'un poisson à écailles de 50 cm à environ $76,9\%$ (IC à 95% : $[65,3\% - 85,5\%]$).
- **Performances supérieures aux prédictions théoriques :** La survie observée *in situ* s'est révélée systématiquement et nettement supérieure aux prédictions *a priori* du modèle théorique de collision avec les pales (*blade-strike model*). Alors que le modèle théorique prévoyait une chute des taux de survie jusqu'à 0% dans les classes de taille les plus élevées, la survie empirique observée est restée élevée même dans ces gammes supérieures.

La sélection de modèles statistiques a démontré que **la survie au passage est principalement déterminée par la longueur à la fourche**. **Les poissons de plus grande taille sont exposés à un risque accru de traumatismes graves.** Le rapport des cotes (*odds*) d'un passage réussi diminue de $46,7\%$ par tranche de 10 cm supplémentaires de longueur à la fourche. Grâce au niveau élevé de sécurité de base offert par la conception de la pompe, cette diminution statistique ne se traduit en pratique que par une réduction modérée de la survie réelle. Pour un poisson de 150 mm, le modèle prédit un taux de survie de $96,8\%$ (IC à 95% : $[95,6\% - 97,7\%]$), qui ne diminue que légèrement pour atteindre $94,1\%$ (IC à 95% : $[92,3\% - 95,6\%]$) lors d'une augmentation substantielle de la longueur jusqu'à 250 mm. Chez la brème commune — la seule espèce de poisson à écailles capturée en nombre suffisant sur l'ensemble du gradient de taille pour étayer des conclusions statistiques robustes à l'échelle de l'espèce — l'effet négatif de la longueur corporelle sur la survie s'est révélé le plus marqué. Le volume et la large distribution de cet échantillon spécifique ont permis une caractérisation fiable et représentative de la mortalité dépendante

de la taille, ce qui n'a pas été possible pour les autres espèces évaluées en raison de contraintes liées à la taille des échantillons. Pour la perche commune, le gardon, la brème bordelière, le rotengle et le sandre, aucun effet statistiquement significatif de la longueur sur la survie n'a été détecté dans les gammes de tailles observées ; leurs probabilités de survie sont restées constamment élevées.

La nature et la gravité des blessures étaient également étroitement liées à la taille et à l'espèce des poissons :

- **Blessures légères (Classe 2) :** Au sein de cette catégorie, les profils de blessures étaient **uniformes entre toutes les espèces**. À l'échelle de l'ensemble de la communauté des poissons à écailles ($97,0\%$), du gardon ($95,7\%$) et de la brème commune ($97,0\%$), les blessures légères consistaient presque exclusivement en **des éraflures superficielles ou une perte limitée d'écailles**, témoignant de contacts tangentiels où les poissons ont effleuré les parois du canal ou du carter. Aucune relation significative n'a été observée entre la longueur à la fourche et les sous-catégories spécifiques de blessures au sein de la Classe 2.
- **Blessures graves (Classe 3) :** Une nette évolution liée à la taille a été constatée dans cette catégorie. Chez les spécimens de grande taille, en particulier chez **la brème commune, les blessures graves étaient dominées par des impacts mécaniques pénétrants causés par les pales, incluant des lacérations profondes et des sectionnements corporels (**$78,6\%$). À l'inverse, chez les petits poissons à écailles présentant des dommages graves (tels que le gardon), les blessures se limitaient plus fréquemment à une desquamation/perte d'écailles étendue ($55,6\%$).

La campagne de suivi confirme que la pompe VaHo du Stenensluisvaart affiche des performances relativement satisfaisantes en matière de sécurité pour les poissons à écailles. Bien qu'un obstacle artificiel subsiste intrinsèquement, l'installation concilie avec succès les impératifs de capacité d'évacuation hydraulique avec un impact relativement limité sur les poissons à écailles en transit et aucun impact observable sur l'anguille en migration. Bien que les grands poissons à écailles demeurent vulnérables aux traumatismes graves, les incidences de blessures observées dans cette étude restent nettement inférieures aux valeurs rapportées dans la littérature, tant pour les stations de pompage conventionnelles que pour d'autres conceptions de pompes axiales dites « piscicoles ».

Aanbevelingen voor beheer

Op basis van de onderzoeksresultaten en de technische werking van de installatie formuleren we volgende aanbevelingen voor het beheer van het pompgemaal aan de Stenensluisvaart:

Optimalisatie van de bedrijfsvoering

- **Toerentalbeheer:** Handhaaf het nominale toerental op **250 rpm**, omdat de visveiligheid enkel bij deze snelheid is vastgesteld en relatief goed bleek. Vermijd, als de waterstanden het toelaten, het opschalen naar het maximale toerental van **310 rpm**, omdat een hogere botssnelheid de kans op ernstig letsel bij grotere vismaten statistisch verhoogt.
- **Sturing op basis van migratiepieken:** Hoewel schubvissen het hele jaar door actief zijn, kan overwogen worden om de pompactiviteit tijdens kritieke migratieperiodes (zoals de paaitrek in het voorjaar) af te stemmen op periodes met een lagere noodzaak tot intensieve afvoer.

Monitoring en onderhoud

- **Focus op grote schubvissoorten:** Omdat de overlevingskans afneemt bij grotere vissen, verdient de monitoring van soorten zoals de **brasem, snoekbaars en snoek** extra aandacht. Bij toekomstige controles is het raadzaam om specifiek te letten op mechanische schade zoals insnijdingen bij de grotere individuen. Vooral voor snoekbaars en snoek zijn bijkomende observaties wenselijk door het tekort aan data van grotere individuen.
- **Onderhoud van de bladranden:** De dikte van de bladrand (**36 mm**) draagt bij aan het beperken van de insnijdingen. Zorg bij regulier onderhoud dat deze randen vrij blijven van scherpe bramen of onregelmatigheden die de *mutilation ratio* (de ernst van het letsel) negatief kunnen beïnvloeden.

Ecologische connectiviteit

- **Behoud van het visveilige ontwerp:** Bij eventuele toekomstige vervanging of aanpassing van de rotor moet vastgehouden worden aan de configuratie met **twee bladen** en een ruime passage-opening die essentieel is voor de geobserveerde hoge overlevingscijfers van gemiddeld **96.0%**, behalve wanneer nieuwe inzichten zouden aangeven dat andere ontwerpen de mortaliteit nog verder kunnen beperken.
- **Transparante rapportage:** De vastgestelde visveiligheid, die beter scoort dan het theoretische ***blade-strike*-model**, kan dienen als referentiekader voor andere gemalen in het IJzerbekken. Het is aanbevolen deze *in-situ* resultaten te delen met relevante partners om het beleid rond visvriendelijk waterbeheer verder te onderbouwen.

Inhoudsopgave

Abstract 4
Samenvatting 6
Résumé français 8
Aanbevelingen voor beheer 10
Inhoudsopgave 11
Lijst van figuren 12
Lijst van tabellen 15
1 Inleiding 17
1.1 De impact van pompgemalen op schubvissen in Vlaanderen 17
2 Methodologie 19
2.1 Studiegebied 19
2.2 Methodiek: Monitoring van de natuurlijke passage 24
2.3 Methodiek: Theoretisch blade-strike model 28
3 Resultaten 30
3.1 Overzicht 30
3.2 Beschrijving van lengte- en gewichtsdistributies 31
3.3 Vergelijking met het theoretisch blade-strike model 35
3.4 Overleving en verwonding in functie van vorklengte 36
3.5 Overleving en verwonding in functie van vorklengte per soort 42
4 Bespreking 52
Referenties 56
Bijlagen 59
A Power-analyse 59
B Precisie-analyse 61
C Overzichtstabel 64
D Graad van verwonding en wondklasse per soort 69
E Vorklengte per wondklasse, schadeklasse en status per soort 72
F Overlevingsmodellen 76
F.1 Overlevingsmodellen met onderscheid tussen soorten 76

Lijst van figuren

Figure 2.1 Doorsnede van de pomp. 21
Figure 2.2 Buitenkant van de pomp. 22
Figure 2.3 Schema van het pompgemaal aan de Stenensluisvaart. 23
Figure 2.4 Locatie van het pompgemaal op de Stenensluisvaart te Woumen (bron: Germonpré et al., 1994) 23
Figure 2.5 Voorbeeld van een Noors leefnet bevestigd op een frame met vlotters dat aansluit op een fuik die op de uitstroomopening van een pomp is gemonteerd. (B) Na elke meting worden de vissen voorzichtig uit het Noors leefnet geschept met een schepnet (INBO). 24
Figure 2.6 Theoretische modellering van vispassage door de pomp conform EN 18110:2025. (A) De berekende botsingskans (P_{co}) als functie van de vislengte (L_f). (B) De totale voorspelde mortaliteit (P_m) voor schubvissen (doorgetrokken blauwe lijn) en paling (onderbroken groene lijn). De knik in de curves bij grotere vislengtes markeert het punt waarop de botssnelheid (v_{strike}) de kritische drempelwaarde (v_{crit}) overschrijdt. 29

Figure 3.1 Lengte-frequentieverdeling van de bemonsterde vispopulaties per soort. Hier worden vissen kleiner dan 10 cm nog weergegeven. 32
Figure 3.2 Gewicht-frequentieverdeling van de bemonsterde vispopulaties per soort. Hier worden vissen kleiner dan 10 cm nog weergegeven. 33
Figure 3.3 Boxplot van de vorklengte per vissoort (gesorteerd op mediane lengte) voor soorten met minimaal 20 waarnemingen. Hier worden vissen kleiner dan 10 cm niet meer weergegeven. 34
Figure 3.4 Gemiddelde overleving in functie van vorklengte zonder onderscheid tussen soorten schubvissen. 95% betrouwbaarheidsintervallen zijn weergegeven. 39
Figure 3.5 Geaggregeerde overlevingsanalyse van alle bemonsterde vissoorten bij passage door de pomp. De rode lijn geeft de logistische regressie (GLM) weer over de volledige dataset, inclusief het 95% betrouwbaarheidsinterval (grijs vlak). De zwarte onderbroken lijn toont de theoretische overleving volgens de EN 18110:2025 norm (gebaseerd op schubvissen). De blauwe cirkels representeren de waargenomen gemiddelde overleving per lengte-interval van 10 mm, waarbij de diameter van de cirkel de steekproefomvang (n) per interval aangeeft 39
Figure 3.6 Waarschijnlijkheidsverdeling van de wondklasse (geen, beperkt, ernstig) in functie van de vorklengte zonder onderscheid tussen soorten. De gekleurde vlakken geven de cumulatieve kansen weer op basis van een multinominaal logistisch model. De overgang van groen naar rood visualiseert de toenemende mechanische impact bij grotere vislengtes. 40
Figure 3.7 Proportionele samenstelling van de ernstige verwondingen (CEN-klasse 3) in functie van de vorklengte. 41
Figure 3.8 Gemiddelde overleving in functie van vorklengte voor baars. 95% betrouwbaarheidsintervallen zijn weergegeven. 42
Figure 3.9 Gemiddelde overleving in functie van vorklengte voor blankvoorn. 95% betrouwbaarheidsintervallen zijn weergegeven. 44
Figure 3.10 Gemiddelde overleving in functie van vorklengte voor brasem. 95% betrouwbaarheidsintervallen zijn weergegeven. 45
Figure 3.11 Gemiddelde overleving in functie van vorklengte voor kolblei. 95% betrouwbaarheidsintervallen zijn weergegeven. 46
Figure 3.12 Gemiddelde overleving in functie van vorklengte voor rietvoorn. 95% betrouwbaarheidsintervallen zijn weergegeven. 48

Figure 3.13 Gemiddelde overleving in functie van vorklengte voor snoekbaars. 95% betrouwbaarheidsintervallen zijn weergegeven. 50

Figure A.1 Gap-analyse van de bemonsteringsinspanning gerelateerd aan het theoretische overlevingsmodel (EN 18110:2025). Bovenste paneel: Vergelijking tussen de huidige gerealiseerde steekproefomvang (blauw histogram) en de theoretisch benodigde N voor een statistisch onderscheidend vermogen van 80% (rode stippellijn). Het oranje vlak identificeert het resterende tekort aan individuen per lengteklasse van 25 mm. Onderste paneel: De corresponderende theoretische overlevingscurve voor schubvissen, die de basis vormt voor de variërende bemonsteringsbehoefte in het bovenste paneel. 60

Figure B.1 Vereiste steekproefomvang voor de validatie van het theoretische overlevingsmodel per lengteklasse. De groene curve geeft het aantal individuen weer dat noodzakelijk is om een foutmarge van maximaal 10 percent te garanderen binnen een 95% betrouwbaarheidsinterval. De stijgende trend bij grotere vislengtes reflecteert de toenemende binomiale variantie naarmate de theoretische overlevingskans de 50% nadert. Er is een statistische ondergrens van n=10 gehanteerd voor klassen met een (nabij) volledige overleving. 61

Figure B.2 Gevoeligheidsanalyse van de modelbetrouwbaarheid op basis van de duur van de meetcampagne. De linksboven gepresenteerde plot toont de volledige dataset; opeenvolgende panelen tonen de cumulatieve impact bij het stapsgewijs inkorten van de onderzoeksperiode. De rode lijn (velddata GLM) wordt afgezet tegen de zwarte stippellijn (CEN-18110 referentie), waarbij de blauwe punten de geaggregeerde overleving per lengte-interval (100 mm) weergeven. 63

Figure D.1 Frequentieverdeling van de bemonsterde vispopulaties over de verschillende letselklassen (CEN-normering). De staafdiagrammen tonen de absolute aantallen per wondklasse voor alle soorten met een minimale steekproefomvang van 20 individuen. De kleurintensiteit correleert met de toenemende ernst van het letsel, waarbij klasse 1 staat voor 'geen schade' en hogere klassen duiden op progressief zwaardere beschadigingen. De vrije y-as per paneel maakt een gedetailleerde beoordeling van de schadeverdeling binnen elke soort mogelijk. 69

Figure D.2 Frequentieverdeling van de bemonsterde vispopulaties over de verschillende schade-klassen (CEN-normering). De staafdiagrammen tonen de absolute aantallen per wondklasse voor alle soorten met een minimale steekproefomvang van 20 individuen. 70

Figure D.3 Frequentieverdeling van de bemonsterde vispopulaties over de verschillende statussen (CEN-normering). De staafdiagrammen tonen de absolute aantallen per status voor alle soorten met een minimale steekproefomvang van 20 individuen. 'd' is dood en 'l' is levend. 71

Figure E.1 Boxplot van de vorklengte per vissoort met aanduiding van statistisch significante verschillen (Pairwise Wilcoxon-test met Bonferroni-correctie). 72

Figure E.2 Relatie tussen de vorklengte (mm) en de ernst van het toegebrachte letsel per vissoort ($n > 20$). De boxplots geven de mediaan en kwartielen weer van de lengteverdeling binnen elke wondklasse (CEN-normering). Rode cirkels markeren uitschieters (outliers), terwijl de individuele observaties zijn weergegeven via een jitter-plot om de datadichtheid te illustreren. De vrije schaalverdeling per paneel accentueert soortspecifieke trends in letselgevoeligheid gerelateerd aan lichaamsomvang. 73

Figure E.3 Relatie tussen de vorklengte (mm) en de schade code per vissoort ($n > 20$). De boxplots geven de mediaan en kwartielen weer van de lengteverdeling binnen elke schade code (CEN-normering). Rode cirkels markeren uitschieters (outliers), terwijl de individuele observaties zijn weergegeven via een jitter-plot om de datadichtheid te illustreren. De vrije schaalverdeling per paneel accentueert soortspecifieke trends in schadegevoeligheid gerelateerd aan lichaamsomvang. 74
Figure E.4 Relatie tussen de vorklengte (mm) en de status per vissoort ($n > 20$). De boxplots geven de mediaan en kwartielen weer van de lengteverdeling binnen elke wondklasse (CEN-normering). Rode cirkels markeren uitschieters (outliers), terwijl de individuele observaties zijn weergegeven via een jitter-plot om de datadichtheid te illustreren. De vrije schaalverdeling per paneel accentueert soortspecifieke trends in status gerelateerd aan lichaamsomvang. 'd' is dood en 'l' is levend. 75

Figure F.1 Vergelijking tussen de waargenomen veldoverleving en de theoretische CEN-18110:2025 norm per vissoort. De rode ononderbroken lijn geeft het logistische regressiemodel (GLM) weer op basis van individuele veldwaarnemingen, inclusief het 95% betrouwbaarheidsinterval (grijs vlak). De zwarte onderbroken lijn representeert de theoretische overleving volgens de CEN-standaard. De blauwe cirkels tonen de gemiddelde overleving per lengte-interval van 5 mm, waarbij de grootte van de cirkel proportioneel is aan het aantal geobserveerde individuen (n). 77
Figure F.2 Resultaten van de multinominale regressie voor de wondklasse-verdeling bij baars als functie van de vorklengte. De gekleurde vlakken representeren de voorspelde kans op een schadevrije passage (groen), beperkte verwondingen (geel) of ernstige verwondingen (rood). De lijnen tussen de kleurvlakken tonen de verschuiving in risicoprofiel naarmate de vislengte toeneemt. 78
Figure F.3 Resultaten van de multinominale regressie voor de wondklasse-verdeling bij blankvoorn als functie van de vorklengte. De gekleurde vlakken representeren de voorspelde kans op een schadevrije passage (groen), beperkte verwondingen (geel) of ernstige verwondingen (rood). De lijnen tussen de kleurvlakken tonen de verschuiving in risicoprofiel naarmate de vislengte toeneemt. 80
Figure F.4 Gedetailleerde verdeling van letseltypes binnen Klasse 3 (Ernstig letsel) voor blankvoorn. De vlakken tonen de voorspelde kans op specifieke zware beschadigingen, zoals ernstig schubverlies (3.1), mechanische insnijdingen (3.2) of verbrijzeling/kieuwschade (3.5/3.6), gerelateerd aan de vorklengte. 82
Figure F.5 Resultaten van de multinominale regressie voor de wondklasse-verdeling bij brasem als functie van de vorklengte. De gekleurde vlakken representeren de voorspelde kans op een schadevrije passage (groen), beperkte verwondingen (geel) of ernstige verwondingen (rood). De lijnen tussen de kleurvlakken tonen de verschuiving in risicoprofiel naarmate de vislengte toeneemt. 83
Figure F.6 Gedetailleerde verdeling van letseltypes binnen Klasse 3 (Ernstig letsel) voor brasem De vlakken tonen de voorspelde kans op specifieke zware beschadigingen, zoals ernstig schubverlies (3.1), mechanische insnijdingen (3.2) of verbrijzeling/kieuwschade (3.5/3.6), gerelateerd aan de vorklengte. 84
Figure F.7 Resultaten van de multinominale regressie voor de wondklasse-verdeling bij kolblei als functie van de vorklengte. De gekleurde vlakken representeren de voorspelde kans op een schadevrije passage (groen), beperkte verwondingen (geel) of ernstige verwondingen (rood). De lijnen tussen de kleurvlakken tonen de verschuiving in risicoprofiel naarmate de vislengte toeneemt. 85

Figure F.8 Resultaten van de multinominale regressie voor de wondklasse-verdeling bij rietvoorn als functie van de vorklengte. De gekleurde vlakken representeren de voorspelde kans op een schadevrije passage (groen), beperkte verwondingen (geel) of ernstige verwondingen (rood). De lijnen tussen de kleurvlakken tonen de verschuiving in risicoprofiel naarmate de vislengte toeneemt. 87
Figure F.9 Resultaten van de multinominale regressie voor de wondklasse-verdeling bij snoekbaars als functie van de vorklengte. De gekleurde vlakken representeren de voorspelde kans op een schadevrije passage (groen), beperkte verwondingen (geel) of ernstige verwondingen (rood). De lijnen tussen de kleurvlakken tonen de verschuiving in risicoprofiel naarmate de vislengte toeneemt. 89

Lijst van tabellen

Table 2.1 Schadeklassen volgens CEN 25

Table 3.1 Overzicht van de gevangen vissoorten tijdens de natuurlijke passage door de VaHo-pomp op de Stenensluisvaart, met vermelding van absolute aantallen, relatieve aandelen en het vorklengtebereik (in mm). 30
Table 3.2 Overzicht van steekproefomvang (n), gemiddelde overleving (veld vs. model), benodigd aantal (N) en de statistische vergelijking per lengte-interval. 35
Table 3.2 Overzicht van steekproefomvang (n), gemiddelde overleving (veld vs. model), benodigd aantal (N) en de statistische vergelijking per lengte-interval. 36
Table 3.3 Overleving per 50 mm voor alle schubvissen 38
Table 3.4 Overleving per 25 mm voor baars 42
Table 3.5 Overleving per 25 mm voor blankvoorn 43
Table 3.6 Overleving per 50 mm voor brasem 45
Table 3.7 Overleving per 50 mm voor kolblei 46
Table 3.7 Overleving per 50 mm voor kolblei 47
Table 3.8 Overleving per 50 mm voor rietvoorn 48
Table 3.9 Overleving per 50 mm voor snoekbaars 50
Table 3.9 Overleving per 50 mm voor snoekbaars 51

Table B.1 Validatie-targets: Benodigd aantal vissen (N) voor een precisie van +/- 10% vergeleken met de huidige vangst (n) per interval van 50 mm adhv een precisie-analyse. 61
Table B.1 Validatie-targets: Benodigd aantal vissen (N) voor een precisie van +/- 10% vergeleken met de huidige vangst (n) per interval van 50 mm adhv een precisie-analyse. 62

Table C.1 Overzicht van het totaal aantal individuen (N), het aantal sterfgevallen (Dood) en de mortaliteit, onderverdeeld per soort en lengteklasse. Individuen kleiner dan 10 cm zijn ter informatie opgenomen, maar blijven buiten beschouwing in de verdere statistische analyses. 64
Table C.1 Overzicht van het totaal aantal individuen (N), het aantal sterfgevallen (Dood) en de mortaliteit, onderverdeeld per soort en lengteklasse. Individuen kleiner dan 10 cm zijn ter informatie opgenomen, maar blijven buiten beschouwing in de verdere statistische analyses. 65
Table C.1 Overzicht van het totaal aantal individuen (N), het aantal sterfgevallen (Dood) en de mortaliteit, onderverdeeld per soort en lengteklasse. Individuen kleiner dan 10 cm zijn ter informatie opgenomen, maar blijven buiten beschouwing in de verdere statistische analyses. 66

Table C.1 Overzicht van het totaal aantal individuen (N), het aantal sterfgevallen (Dood) en de mortaliteit, onderverdeeld per soort en lengteklasse. Individuen kleiner dan 10 cm zijn ter informatie opgenomen, maar blijven buiten beschouwing in de verdere statistische analyses. 67
Table C.1 Overzicht van het totaal aantal individuen (N), het aantal sterfgevallen (Dood) en de mortaliteit, onderverdeeld per soort en lengteklasse. Individuen kleiner dan 10 cm zijn ter informatie opgenomen, maar blijven buiten beschouwing in de verdere statistische analyses. 68

Table F.1 Coëfficiënten van het logistische regressiemodel voor alle schubvissen 76
Table F.2 Coëfficiënten van het logistische regressiemodel voor baars 78
Table F.3 Multinomiale regressie voor de kans op een wondklasse bij baars (referentie = geen) 79
Table F.4 Coëfficiënten van het logistische regressiemodel voor blankvoorn 80
Table F.5 Multinomiale regressie voor de kans op een wondklasse bij blankvoorn (referentie = geen) 81
Table F.6 Multinomiale regressie voor de kans op een CEN-code bij blankvoorn (referentie = 2.1) 81
Table F.7 Multinomiale regressie voor de kans op een CEN-code bij blankvoorn (referentie = 3.1) 81
Table F.8 Coëfficiënten van het logistische regressiemodel voor brasem 82
Table F.9 Multinomiale regressie voor de kans op een wondklasse bij brasem (referentie = geen) 83
Table F.10 Multinomiale regressie voor de kans op een CEN-code bij brasem (referentie = 2.2) . 84
Table F.11 Multinomiale regressie voor de kans op een CEN-code bij brasem (referentie = 3.1) . 84
Table F.12 Coëfficiënten van het logistische regressiemodel voor kolblei 85
Table F.13 Multinomiale regressie voor de kans op een wondklasse bij kolblei (referentie = geen) 86
Table F.14 Coëfficiënten van het logistische regressiemodel voor rietvoorn 87
Table F.15 Multinomiale regressie voor de kans op een wondklasse bij rietvoorn (referentie = geen) 88
Table F.16 Multinomiale regressie voor de kans op een CEN-code bij rietvoorn (referentie = 3.1) 88
Table F.17 Coëfficiënten van het logistische regressiemodel voor snoekbaars 89
Table F.18 Multinomiale regressie voor de kans op een wondklasse bij snoekbaars (referentie = geen) 90

1 INLEIDING

In het pompgemaal op de Stenensluisvaart te Woumen (Diksmuide) wordt water vanuit het stroomgebied van de Blankaart naar de IJzer gepompt. Dit gemaal vormt een cruciale schakel in de migratieroute van vissen, waaronder de Europese paling op weg naar de Sargassozee. De oorspronkelijke, klassieke axiaalpompen waren zeer schadelijk voor passerende vissen. Onderzoek door Germonpré et al. (1994) documenteerde bij palingen ernstige en vaak lethale verwondingen na passage, variërend van kneuzingen en pletten tot schaafwonden en zwellingen (Germonpré *et al.*, 1994). Er werden destijds zelfs resten van palinghuid in de pompen aangetroffen. De zeer hoge sterfte van verschillende vissoorten na passage door klassieke axiaalpompen werd ook aangetoond, en resten van palinghuiden werden ook aangetroffen, bij onderzoek naar vispassage aan het Spiedamgemaal op de Avrijevaart in Ertvelde (Buysse *et al.*, 2010).

Op basis van deze bevindingen werd geadviseerd het gemaal te saneren. Inmiddels zijn de oude installaties vervangen door twee **VaHo-pompen** (ontworpen door de firma Van Hooste), waaraan visveilige eigenschappen worden toegeschreven. Met het visveiliger maken van dergelijke installaties streeft de Vlaamse Milieumaatschappij (VMM) de doelstellingen na uit de Europese Kaderrichtlijn Water, het decreet Integraal Waterbeleid, het Palingbeheerplan en de Benelux-beschikking inzake vrije vismigratie. Onderzoek in 2025 toonde aan dat deze pompen veilig zijn voor paling, maar hun veiligheid voor schubvissen moet nog worden vastgesteld (Thienpont *et al.*, 2025).

1.1 DE IMPACT VAN POMPGEMALEN OP SCHUBVISSEN IN VLAANDEREN

Naast paling zijn tal van andere inheemse vissoorten in Vlaanderen bedreigd of lokaal verdwenen door fragmentatie van hun leefgebied. Het herstel van de waterkwaliteit alleen volstaat niet; om gezonde populaties van soorten als blankvoorn of brasem te behouden, moeten migratieroutes worden hersteld. Aangepaste infrastructuur, zoals de ontwikkeling van visveilige pompen, is hierbij cruciaal om vissen een veilige passage doorheen pompgemalen te bieden.

1.1.1 De barrière van klassieke gemalen

Pompgemalen zijn een onmisbaar puzzelstuk in het herstel van vrije vismigratie. In Vlaanderen bevinden zich minstens 172 gemalen op openbare waterlopen, vaak beheerd door polders en wateringen. Onderzoek van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO) wijst uit dat klassieke installaties, met name schroef- en axiaalpompen (die 50% van alle Vlaamse pompgemalen beslaan), een hoge incidentie van beschadiging en sterfte veroorzaken bij passerende vissen (Baeyens *et al.*, 2011; Buysse *et al.*, 2010; Stevens *et al.*, 2011).

Hoewel veel aandacht uitgaat naar de zilverpaling in het najaar, zijn schubvissen gedurende het hele jaar actief en afhankelijk van vrije passage voor hun voortplanting en het vinden van voedsel- of schuilgebieden. Daarom zet de Vlaamse Milieumaatschappij (VMM) steeds vaker in op visveilige alternatieven die voldoen aan de norm **CEN 18110-2025** (CEN, 2025). Deze norm vereist dat de veiligheid wordt vastgesteld via dierproeven met zowel paling als representatieve schubvissoorten.

1.1.2 Onderzoeksfocus: Van laboratorium naar natuurlijke passage *in-situ*

Waar de voorgaande studie zich primair richtte op paling, ligt de prioriteit in de huidige fase op de visveiligheid voor **schubvissen** (Thienpont *et al.*, 2025). Visschubben zijn er in tal van vormen en

afmetingen (i.e. cycloïde en ctenoide schubben). De term 'schubvis' of '*scaly fish*' wordt in dit rapport gebruikt om het onderscheid te maken met paling (CEN, 2025; Griffioen & Tien, 2016). Palingen hebben ook schubben maar die kan je met het blote oog niet zien, ze zijn klein en liggen diep in de huid. De bestanden van snoekbaars, baars, blankvoorn, brasem, kolblei, pos en rietvoorn in de Stenensluisvaart worden hier gedefinieerd als 'schubvissen'. Voor paling is de VaHo-pomp reeds kwantitatief geëvalueerd via een gecontroleerde laboratoriumtest ter voorbereiding op de installatie in Woumen. Echter, omdat schubvissen fundamenteel verschillen in lichaamsbouw, zwemsnelheid en gevoeligheid voor drukverschillen, is een specifieke tweede onderzoeksfase noodzakelijk. In tegenstelling tot de laboratoriumtest voor paling, zal de visveiligheid voor schubvissen bepaald worden aan de hand van **natuurlijke passage *in-situ***. Dit betekent dat we de pomp evalueren in haar operationele omgeving, waarbij de werkelijke migratiestromen van lokale visgemeenschappen worden gemonitord.

> **Doelstelling:** Het doel van dit onderzoek is het kwantificeren van de effecten van de VaHo-pomp op schubvissen door middel van *in-situ* monitoring van de natuurlijke passage.

De visveiligheid van de VaHo-pomp voor schubvissen wordt geëvalueerd door de natuurlijke migratie vanuit de Stenensluisvaart naar de IJzer via het gemaal in Woumen te monitoren. In het kader van de visoverleefbaarheid staat de volgende onderzoeksvraag centraal: In welke mate treedt er schade of sterfte op bij schubvissen die de pomp ongedwongen passeren?

Voor dit onderzoek wordt gebruikgemaakt van een combinatie van biologische en technische data:

1. **Directe monitoring:** Evaluatie van vissen die via natuurlijke weg de pomp passeren.
2. **Blade-strike model:** Theoretische benadering van overleving bij passage doorheen de pomp.

2 METHODOLOGIE

2.1 STUDIEGEBIED

2.1.1 Geografische context: De Stenensluisvaart en het Blankaartgebied

De Stenensluisvaart vormt een cruciale verbinding binnen het IJzerbekken (Figuur 2.4); via het gelijknamige pompgemaal wordt water uit het stroomgebied van de Blankaart afgevoerd naar de IJzer (Declercq & Casteleyn, 1993).

2.1.1.1 Het natuurlijke wachtbekken: De Blankaart

De Blankaart is een laaggelegen moerasgebied dat fungeert als een natuurlijk overstromingsgebied en wachtbekken voor de IJzer (Provoost, 1997). De centrale Blankaartvijver is oorspronkelijk ontstaan door menselijke turfwinning. Tegenwoordig wordt de vijver gevoed door waterlopen zoals de Ronebeek en de Steenbeek, die water aanvoeren uit de hoger gelegen zandleemstreek.

Vanwege de grote waarde voor trekkende watervogels geniet het gebied sterke Europese bescherming als Natura 2000-gebied (Vogelrichtlijn 'IJzervallei') en als internationaal erkend Ramsargebied. Het beheer van de vijver, het moeras en de omliggende riet- en graslanden is sinds de tweede helft van de 20e eeuw in handen van Natuurpunt.

2.1.1.2 De IJzer: Van bron tot monding

De IJzer stroomt vanuit Frankrijk door België om in Nieuwpoort uit te monden in de Noordzee. De rivier kent twee karakteristieke delen:

- **De bovenloop:** Strekt zich uit van de Franse bron tot Diksmuide en is grotendeels gevormd door natuurlijke processen.
- **De benedenloop:** Loopt van Diksmuide tot de monding; dit traject is door de eeuwen heen sterk door menselijk ingrijpen bepaald.

Omdat de IJzer bij hevige neerslag een beperkte bergingscapaciteit heeft, is het risico op overstromingen reëel (Provoost, 1997). Hierin speelt het Blankaartgebied een vitale rol door overtollig water tijdelijk op te vangen.

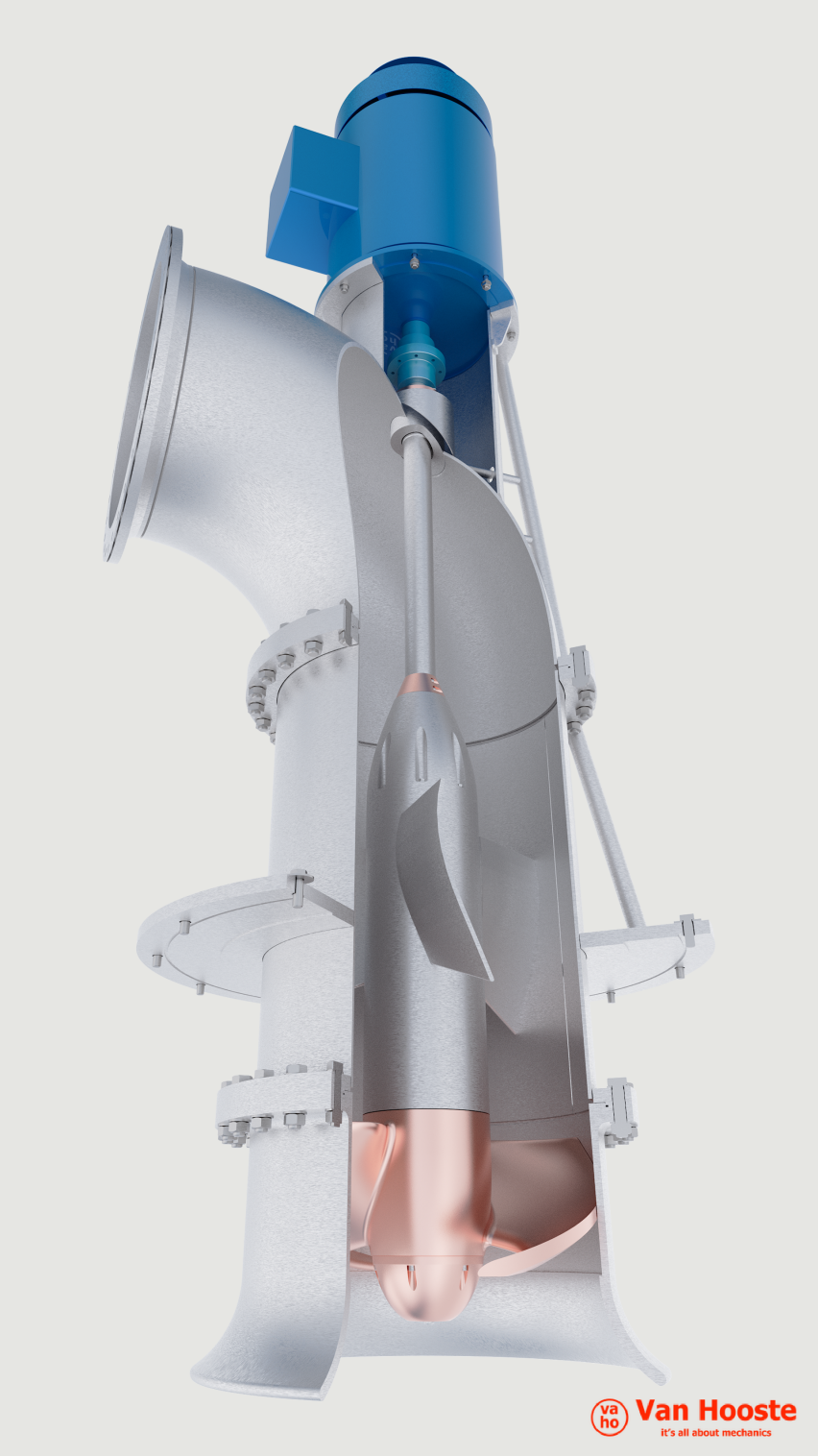
2.1.2 Historiek en modernisering van het pompgemaal Stenensluisvaart

Het pompgemaal op de Stenensluisvaart in Woumen is sinds 1953 in gebruik voor de waterafvoer van het Blankaartgebied naar de IJzer (Declercq & Casteleyn, 1993). Oorspronkelijk bediende dit gemaal zowel de Blankaartvijver als het bekken van de Engelendelft. Sinds de ingebruikname van een specifiek pompgemaal op de Engelendelft, is de installatie op de Stenensluisvaart uitsluitend nog verantwoordelijk voor het waterbeheer van de Blankaartvijver (Declercq & Casteleyn, 1993).

De oorspronkelijke configuratie van het gemaal bestond uit twee elektrisch aangedreven axiaalpompen. Onderzoek wees echter uit dat deze installaties zeer visonveilig waren (Germonpré *et al.*, 1994). Om vismigratie te verbeteren, zijn de oude pompen vervangen door twee moderne **VaHo-axiaalpompen**, ontwikkeld door de firma Van Hooste. Aan dit nieuwe type pomp worden visveilige eigenschappen toegeschreven door de firma, wat essentieel is voor de ecologische verbinding tussen het moerasgebied en de IJzer (Figuur 2.1, Figuur 2.2 en Figuur 2.3).

2.1.2.1 Technische specificaties: VaHo-pomp

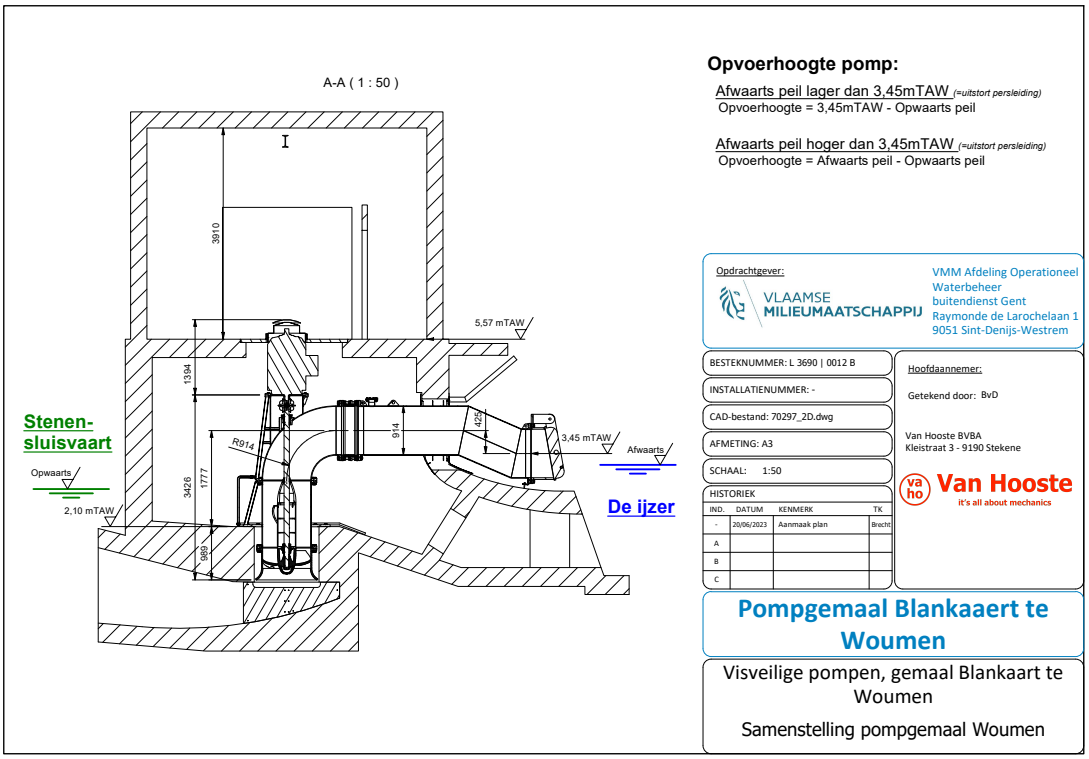
- **Debiet:** $2\ \mathrm{m}^3/\mathrm{s}$
- **Radius pomp:** 0.45 m
- **Aantal bladen:** 2
- **Dikte blad:** 0.036 m
- **Rendement:** $> 80\%$
- **Opvoerhoogte:** 1.24 m (inclusief leidingverliezen en overige weerstanden)
- **Toerental:**
  - **Nominaal:** 250 rpm (operationeel gedurende 90% van de tijd).
  - **Maximaal:** 310 rpm (bij een verhoogde opvoerhoogte, bijvoorbeeld door een hoge waterstand op de IJzer).



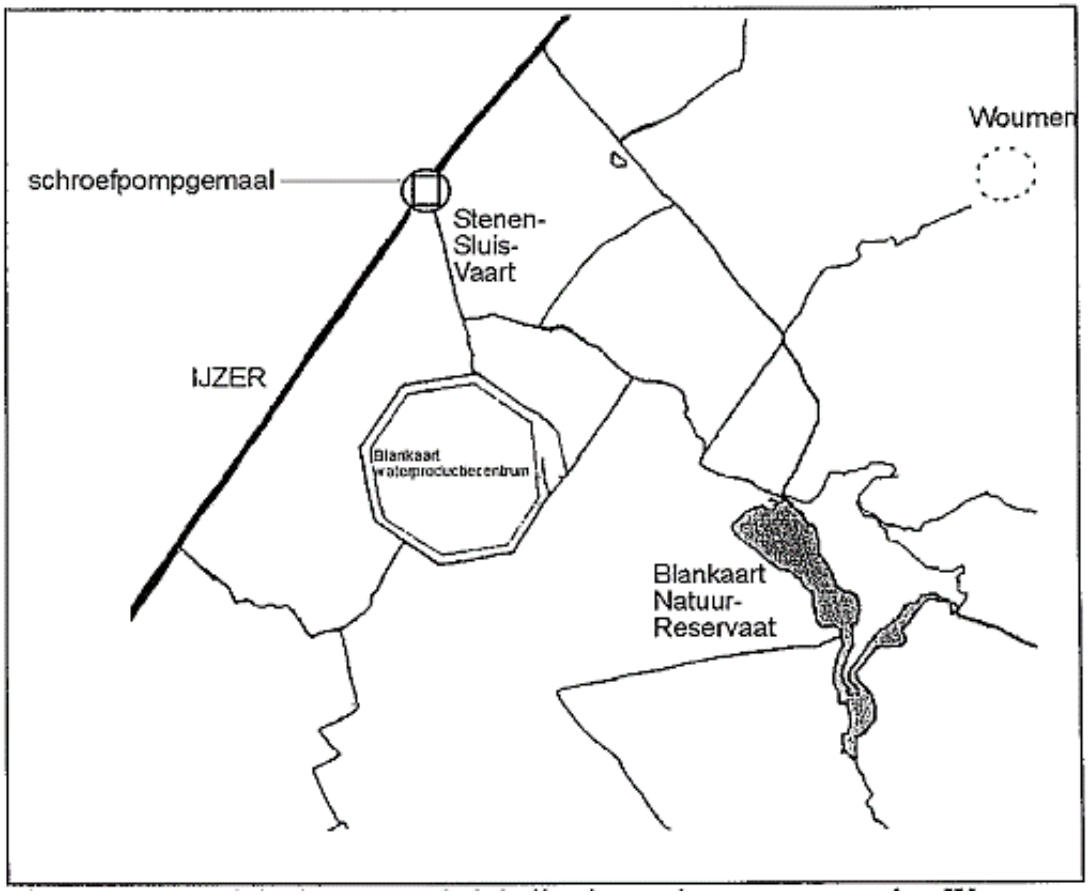
Figuur 2.1: Doorsnede van de pomp.



Figuur 2.2: Buitenkant van de pomp.



Figuur 2.3: Schema van het pompgemaal aan de Stenensluisvaart.



Figuur 2.4: Locatie van het pompgemaal op de Stenensluisvaart te Woumen (bron: Germonpré et al., 1994)

2.2 METHODIEK: MONITORING VAN DE NATUURLIJKE PASSAGE

De visveiligheid van de VaHo-pompen voor schubvissen wordt geëvalueerd door de natuurlijke migratie van de Stenensluisvaart naar de IJzer te monitoren. Om de fysieke impact van de pompen nauwkeurig vast te stellen, worden passerende vissen direct stroomafwaarts opgevangen met een speciaal ontworpen constructie tussen 1 oktober 2025 en 24 april 2026.

2.2.1 Opbouw van de opvanginstallatie

De installatie bestaat uit een robuust metalen geleidingskader waarop een verzamelnet (fuik) met een maaswijdte van 10 mm is bevestigd. Aan het uiteinde van deze fuik bevindt zich een Noors leefnet, waarin de vissen in een rustige, ruime omgeving worden opgevangen (Figuur 2.5).

Bij het ontwerp staat het welzijn van de vissen centraal:

- **Knooploos netmateriaal:** Het gebruik van knooploos garen voorkomt beschadigingen aan de slijmlaag of schubben door wrijving.
- **Drijvend frame:** Het leefnet is gemonteerd op een aluminium frame met vlotters. Dit zorgt ervoor dat de vissen veilig kunnen verblijven in de bovenste waterlaag en dat de collectie efficiënt kan plaatsvinden.



Figuur 2.5: Voorbeeld van een Noors leefnet bevestigd op een frame met vlotters dat aansluit op een fuik die op de uitstroomopening van een pomp is gemonteerd. (B) Na elke meting worden de vissen voorzichtig uit het Noors leefnet geschept met een schepnet (INBO).

2.2.2 Pompwerking gedurende het onderzoek

Tijdens de proefperiode worden de pompen automatisch geactiveerd zodra het waterpeil in de polder een vooraf ingesteld niveau bereikt, het zgn. aanslagpeil van de pompen. Wanneer het peil na het pompen voldoende is gezakt (het zgn. afslagpeil van de pompen), schakelt het systeem de pompen weer uit. Om aanvullende data te verzamelen over de schadelijkheid van de VaHo-axiaalpompen, vindt er daarnaast een handmatige aansturing plaats op vaste tijdstippen. Afhankelijk van de beschikbaarheid van water wordt er op maandag-, woensdag- en vrijdagochtend gedurende een vijftal minuten gepompt. Na afloop worden de vissen uit het onderzoeksnet direct onderzocht en nadien vrijgelaten indien er geen schade was of de schade beperkt was.

2.2.3 Beoordelingsmethodiek visschade

De visschade wordt vastgesteld aan de hand van de schadeklassen uit de CEN-richtlijn (EN 18110:2025 (E)) (CEN, 2025). Vissen die volgens de CEN-richtlijn in categorie 3 vallen, dienen geëuthanaseerd te worden met een overdosis verdovingsmiddel.

De verpompte vissen worden met een schepnet uit het Noorse leefnet verzameld en overgebracht naar een continu beluchte transportbak. Hier vindt een eerste controle plaats op afwijkend zwemgedrag, zoals bovendrijven of rugzwemmen.

Vervolgens wordt elke vis individueel geïnspecteerd op schade, schubverlies en mortaliteit. De schadebepaling geschiedt conform de CEN-richtlijn. Van elk individu worden de vorklengte (mm) en het gewicht (g) geregistreerd. Bij vissen uit de CEN-schadecategorieën 2, 3 en 4 wordt de schade gedocumenteerd met een detailfoto.

Vissen die worden ingedeeld in CEN-schadeklasse 3 of hoger, worden geëuthanaseerd door middel van een overdosis kruidnagelolie (Clove oil, Sigma-Aldrich). Hierbij wordt een concentratie van 3 ml/l gehanteerd met een blootstellingsduur van minimaal één uur om een snelle en pijnloze dood te garanderen.

Gezonde en licht beschadigde vissen (tot en met CEN-schadeklasse 2), hebben een goede overlevingskans en worden na verwerking weer vrijgelaten in de IJzer. De gerapporteerde overlevingspercentages hebben betrekking op de directe overleving direct na passage. Vertraagde sterfte (bijvoorbeeld na 48 tot 72 uur door osmotische stress of infecties) kon binnen deze veldopstelling niet worden opgevolgd. Om overschatting van de overleving te vermijden, volgden we echter de conservatieve benadering van de EN 18110-norm: vissen met ernstige letsels (CEN-schadeklasse 3) werden in de analyses direct meegerekend als sterfte. Daarmee is de belangrijkste component van vertraagde sterfte door acute trauma's al verrekend in de gerapporteerde overlevingspercentages.

Kleine vissen werden niet meegenomen in de analyse omdat er voor kleine vissen een relatief groot risico is dat de behandeling en niet de eigenlijke pomppassage voor schade zorgt. De grens werd aanvankelijk gelegd op 50 mm, maar de resultaten van de data-analyse suggereerden dat het beter was om **vissen kleiner dan 100 mm niet mee te nemen in de analyse** (zie verder).

Tabel 2.1: Schadeklassen volgens CEN

Klasse	Schadeomschrijving	Status	Protocol
1	**Gezonde, onbeschadigde vis**	**Levend**	**Terugzetten**
2	**Licht beschadigde vis**	**Levend**	**Terugzetten**
2.1	Rode en/of beschadigde ogen	Levend	-
2.2	Rode en/of beschadigde vinnen	Levend	-
2.3	Lichte krassen, kneuzingen en/of schubverlies <20%	Levend	-
3	**Zwaar (terminaal) beschadigde vis**	**Levend**	**Euthanasie**
3.1	Aanzienlijk schubverlies >20%	Levend	-
3.2	Insnijdingen, doorsnijdingen, afgesneden lichaamsdelen	Levend	-
3.3	Breuken	Levend	-
3.4	Zwaar beschadigde of ontbrekende ogen	Levend	-
3.5	Zwaar beschadigde kieuwen/kieuwdeksels	Levend	-
3.6	Zware kneuzingen en/of bloedingen	Levend	-
3.7	Abnormaal zwemgedrag	Levend	-
4	**Dode vis**	**Dood**	**Afvoeren**

2.2.4 Bepaling van de benodigde aantallen

Om de statistische zeggingskracht van de visveiligheidsstudie te bepalen, is een power- en precisie-analyse uitgevoerd. Er is hier in eerste instantie bewust voor gekozen om de verschillende soorten schubvissen als één functionele groep te behandelen. Hoewel de ecologisch relevante lengtelimieten per soort variëren (van 250 mm voor pos tot 1000 mm voor snoekbaars), noodzaakt de statistische robuustheid tot een geaggregeerde aanpak.

Deze keuze is ingegeven door twee cruciale factoren:

- **Representativiteit van natuurlijke passage**: Zoals de geobserveerde distributies aantonen, bestaat de natuurlijke passage tijdens de studieperiode hoofdzakelijk uit kleinere individuen. Omdat de vangst van grote exemplaren in deze *in-situ* setting inherent beperkt is, zou een soortspecifieke opsplitsing de steekproefomvang (n) per lengteklasse zodanig reduceren dat betrouwbare uitspraken over de gehele lengterange onmogelijk worden.
- **Statistische efficiëntie en bereik**: Uit de analyse van de lengteverdelingen bleek dat de geobserveerde pieken (vaak rond 100 mm) ver verwijderd liggen van de geïdentificeerde maximale lengtelimieten (zoals de 350-500 mm voor baars en brasem). Een soortspecifieke analyse zou leiden tot een onrealistisch hoge behoefte aan extra meetgegevens om deze volledige range te dekken. Door alle schubvissen te aggregeren, wordt de beschikbare data maximaal benut om de relatie tussen vislengte en overlevingskans met de vereiste precisie vast te stellen over de volledige relevante gradiënt.

Deze geaggregeerde aanpak garandeert dat de resulterende statistische analyses voldoende robuust zijn voor validatie tegen de **EN 18110:2025** norm, waarbij de statistische onzekerheid over de gehele lengterange tot aan de theoretische limieten tot een aanvaardbaar minimum wordt beperkt.

2.2.4.1 Power-analyse: Vergelijking met het theoretisch blade-strike model

Om het benodigd aantal vissen per lengteklasse in te schatten, werd in eerste instantie gewerkt met het theoretisch blade-strike model (Van Esch & Spierts, 2014) (zie Paragraaf 2.3). In plaats van de logistische velddata-modellen te gebruiken als referentie werd ervoor gekozen om een hypothetische overlevingskans te gebruiken die 15% verschilde van de overlevingskans van het theoretisch model (Cohen, 1988).

Per lengte-interval van 50 mm is de minimaal benodigde steekproefomvang (N) berekend om een statistisch significant verschil aan te tonen tussen de CEN-norm (S_{CEN}) en een hypothetische veldwaarneming ($S_{veld,hypo}$).

De hypothetische overlevingskans werd gedefinieerd als:

$$S_{veld,hypo} = \max(0, \min(1, S_{CEN} - \Delta S))$$

waarbij ΔS de vooraf gedefinieerde effectmarge van 0.15 (15%) vertegenwoordigt.

Er is uitgegaan van een betrouwbaarheidsniveau van 95% ($\alpha = 0,05$) en een onderscheidend vermogen (power) van 80% ($1 - \beta = 0,80$). De effectgrootte is berekend middels Cohen's h (Cohen, 1988), gebaseerd op de arcsinus-transformatie van de proporties:

$$h = |2 \cdot \arcsin(\sqrt{S_{CEN}}) - 2 \cdot \arcsin(\sqrt{S_{veld,hypo}})|$$

De benodigde N is vervolgens bepaald via een tweezijdige proportietoets voor twee onafhankelijke groepen (Cohen, 1988).

De feitelijke vangstgegevens (n) zijn gecategoriseerd in identieke lengte-intervallen van 50 mm (bins). Door de data op deze wijze te groeperen, kon een directe numerieke vergelijking worden gemaakt tussen de statistische behoefte en de werkelijke inspanning per lengteklasse.

Het statistische tekort per lengteklasse (N_{tekort}) is gekwantificeerd als het positieve verschil tussen de theoretisch benodigde steekproef (N_{nodig}) en de reeds gerealiseerde vangst (n_{huidig}):

$$N_{tekort} = \max(0, N_{nodig} - n_{huidig})$$

Deze parameter fungeert als een objectieve maatstaf voor de prioritering van aanvullend veldwerk. Lengteklassen waarbij $N_{tekort} > 0$ duiden op zones waar het huidige overlevingsmodel een verhoogde onzekerheid vertoont door een gebrek aan empirische data.

De resultaten van deze power analyse zijn weergegeven in de Resultaten (Tabel 3.2) en Appendix (Figuur A.1).

2.2.4.2 Precisie-analyse: Inschatting gemiddelde overleving per lengteklasse

Naast de power-analyse is een precisie-analyse uitgevoerd om te bepalen of de omvang van de huidige dataset volstaat om de overlevingskans per lengte-interval met voldoende nauwkeurigheid te schatten. Waar de power-analyse zich richt op het vermogen om verschillen te detecteren, richt de precisie-analyse zich op de betrouwbaarheid (de foutmarge) van de schatting zelf. Opnieuw is ervoor gekozen om te werken met het theoretische blade-strike model als referentie.

2.2.4.2.1 Statistisch kader

De berekening van de benodigde steekproefomvang (N) is gebaseerd op de standaardformule voor de foutmarge (*Margin of Error*) bij een binomiale proportie: $n = \frac{Z^2 \cdot p \cdot (1-p)}{E^2}$

Waarbij:

- Z: De z-score behorende bij het gewenste betrouwbaarheidsniveau. Voor deze analyse is uitgegaan van een **95% betrouwbaarheidsinterval** ($Z = 1,96$).
- p: De verwachte overlevingskans (S_{CEN}), afgeleid van het theoretische model uit de EN 18110:2025 norm.
- E: De maximaal toelaatbare foutmarge. In dit onderzoek is een strikte precisie-eis gehanteerd van $\pm 10\%$ ($E = 0,10$).

2.2.4.2.2 Relatie tussen overleving en variantie

De methodiek houdt rekening met de binomiale variantie, die inherent varieert met de vislengte. Volgens de theoretische curve daalt de overlevingskans naarmate de vislengte toeneemt. Statistisch gezien bereikt de variantie ($p \cdot (1-p)$) haar maximum wanneer de overlevingskans 50% bedraagt. Dit betekent dat voor lengteklassen waar de voorspelde overleving de 50% nadert, een grotere steekproefomvang noodzakelijk is om dezelfde precisie van 10% te garanderen dan voor klassen waar de overleving nagenoeg 0% of 100% is.

2.2.4.2.3 Parameters en randvoorwaarden

- **Minimale drempelwaarde**: Om statistische robuustheid te garanderen in klassen waar de overleving (nabij) volledig is ($p \approx 1$), is een ondergrens van $n = 10$ gehanteerd. Zelfs indien de formule een lagere waarde suggereert, wordt dit minimum aangehouden om toevallige resultaten uit te sluiten.
- **Aggregatie**: Voor de tabelmatige weergave is de data geaggregeerd in intervallen van **50 mm**. Per interval is de gemiddelde theoretische overlevingskans berekend om de bijbehorende N te bepalen.
- **Statusbepaling**: Door de berekende doelstellingen (N) te vergelijken met de werkelijke vangstgegevens (n) uit de veldmonitoring, is per lengte-interval de status ("voldoende" of "tekort") bepaald.

Deze analyse dient als kwaliteitscontrole voor de validatiestudie; het identificeert objectief in welke segmenten van de populatie de huidige data-input volstaat om uitspraken te doen binnen de gestelde onzekerheidsmarges van de Europese norm.

De resultaten van deze precisie-analyse zijn weergegeven in de Appendix (Figuur B.1 en Tabel B.1).

2.3 METHODIEK: THEORETISCH BLADE-STRIKE MODEL

De theoretische overlevingskansen van vissen bij passage door de pomp zijn berekend conform de richtlijnen in Hoofdstuk 7 van de Europese norm **EN 18110:2025**. Het model berekent de totale mortaliteit (P_m) als een functie van de botsingskans (P_{co}) en de mate van letsel bij impact, uitgedrukt als de *mutilation ratio* (f_{MR}).

2.3.1 Botsingskans (P_{co})

De kans dat een vis in contact komt met de rotorbladen is bepaald op basis van de geometrie van de pomp en de bewegingsvectoren van zowel het water als de vis. De hoeksnelheid (ω) van de as is afgeleid van het toerental (n) volgens:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}$$

De botsingskans (P_{co}) wordt berekend, rekening houdend met de effectieve vislengte in zowel het meridionale vlak ($L_{eff,m}$) als de tangentiële richting ($L_{eff,t}$):

$$P_{co} = \frac{L_{eff,m} \cdot |\omega \cdot r_m - v_m \cdot \tan(\alpha) - w_f \cdot \sin(\alpha)|}{\max(\frac{2\pi \cdot r_m}{N_r} - L_{eff,t}, 0.0001) \cdot |v_m + w_f \cdot \cos(\alpha)|}$$

Waarbij v_m de waterstroomsnelheid is, r_m de straal op de botsingslocatie en N_r het aantal bladen.

2.3.2 Mutilation ratio (f_{MR})

De ernst van de impact is afhankelijk van de verhouding tussen de effectieve vislengte (L_f) en de dikte van de intredende bladrand (d_m), en de lokale botssnelheid (v_{strike}).

De botssnelheid is berekend als de resultante van de vloeistof- en rotatievectoren:

$$v_{strike} = \sqrt{(v_m + w_f \cdot \cos(\alpha))^2 + (\omega \cdot r_m - v_m \cdot \tan(\alpha) - w_f \cdot \sin(\alpha))^2}$$

Er treedt alleen letsel op indien de botssnelheid de kritische drempelwaarde (v_{crit}) overschrijdt. Deze drempelwaarde is soortspecifiek:

- **Schubvissen:** v_{crit} wordt bepaald door de lengte-dikte verhouding. De f_{MR} volgt een logaritmisch verloop:
$$f_{MR} = (a \cdot \ln(\frac{L_f}{d_m}) + b) \cdot (v_{strike} - v_{crit})$$
- **Paling (*Anguilla anguilla*):** v_{crit} is vastgesteld op 8 m/s. De f_{MR} volgt hier een lineair verloop:
$$f_{MR} = (a \cdot \frac{L_f}{d_m}) \cdot (v_{strike} - v_{crit})$$

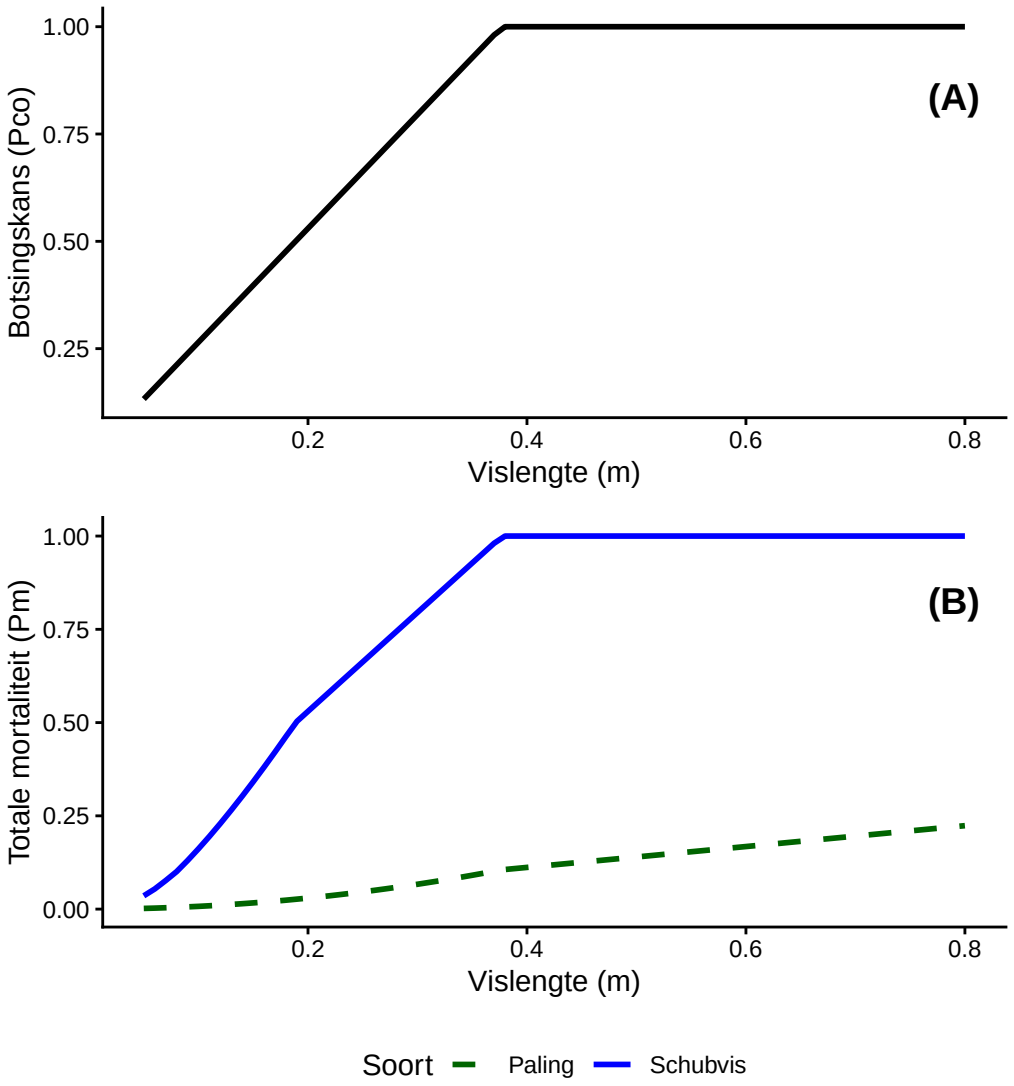
2.3.3 Totale mortaliteit en overleving

De uiteindelijke theoretische mortaliteit per lengteklasse wordt berekend volgens de gecombineerde kans:

$$P_m = f_{MR} \cdot P_{co}$$

De theoretische overleving (S_{CEN}), welke gebruikt is als referentiekader voor de velddata-validatie, is gedefinieerd als $1 - P_m$. Alle berekende kansen zijn begrensd tussen 0 en 1 conform de restricties van de norm.

Deze theoretische modellen worden visueel weergegeven in Figuur 2.6.



Figuur 2.6: Theoretische modellering van vispassage door de pomp conform EN 18110:2025. (A) De berekende botsingskans (P_{co}) als functie van de vislengte (L_f). (B) De totale voorspelde mortaliteit (P_m) voor schubvissen (doorgetrokken blauwe lijn) en paling (onderbroken groene lijn). De knik in de curves bij grotere vislengtes markeert het punt waarop de botssnelheid (v_{strike}) de kritische drempelwaarde (v_{crit}) overschrijdt.

3 RESULTATEN

3.1 OVERZICHT

In totaal werden 2465 vissen en 18 vissoorten verpompt van de Stenensluisvaart naar de Ijzer tussen 1 oktober 2025 en 24 april 2026. Daarvan werden 1245 individuen met een lengte kleiner dan 10 cm uitgesloten van de verdere analyse (zie Paragraaf 3.4). De definitieve statistische analyses zijn uitgevoerd op de resterende 1220 vissen groter dan 10 cm, een steekproef die vertegenwoordigd werd door 15 verschillende vissoorten (Tabel C.1). De resultaten van het veldexperiment worden in de komende secties nader toegelicht aan de hand van de beschikbare lengteverdelingen, logistische overlevingsmodellen en een toetsing aan het theoretische blade -strike model. Vanwege de unieke morfologische kenmerken van de paling — die resulteren in een specifiek theoretisch blade-strike model — en het feit dat alle individuen de installatie schadevrij passeerden (zonder beperkt of ernstig letsel), is deze soort buiten beschouwing gelaten in de onderstaande analyses. Aangezien de steekproefomvang voor deze soort wel ruim voldoende was voor een statistisch onderbouwde evaluatie, worden de resultaten voor de paling wel expliciet opgenomen in de soortspecifieke bespreking.

Tabel 3.1: Overzicht van de gevangen vissoorten tijdens de natuurlijke passage door de VaHo-pomp op de Stenensluisvaart, met vermelding van absolute aantallen, relatieve aandelen en het vorklengtebereik (in mm).

	Vangstkarakteristieken		Vorklengte		
Vissoort	Aantal	Aandeel (%)	Min (mm)	Mediaan (mm)	Max (mm)
blankvoorn	590	23.9	33	110	221
brasem	526	21.3	18	99	491
rietvoorn	405	16.4	45	95	167
snoekbaars	267	10.8	72	92	645
baars	231	9.4	70	96	236
kolblei	172	7.0	68	162	314
pos	165	6.7	70	85	137
paling	40	1.6	358	548	811
zeelt	19	0.8	47	125	428
giebel	18	0.7	117	198	380
vetje	15	0.6	34	46	62
zonnebaars	5	0.2	78	97	105
snoek	4	0.2	298	458	615
riviergrondel	2	0.1	130	130	130
zwartbekgrondel	2	0.1	72	97	122
blauwband	1	0.0	60	60	60
driedoornige stekelbaars	1	0.0	44	44	44
karper	1	0.0	585	585	585
schubkarper	1	0.0	550	550	550
Totaal	**2465**	**100.0**	**18**	**100**	**811**

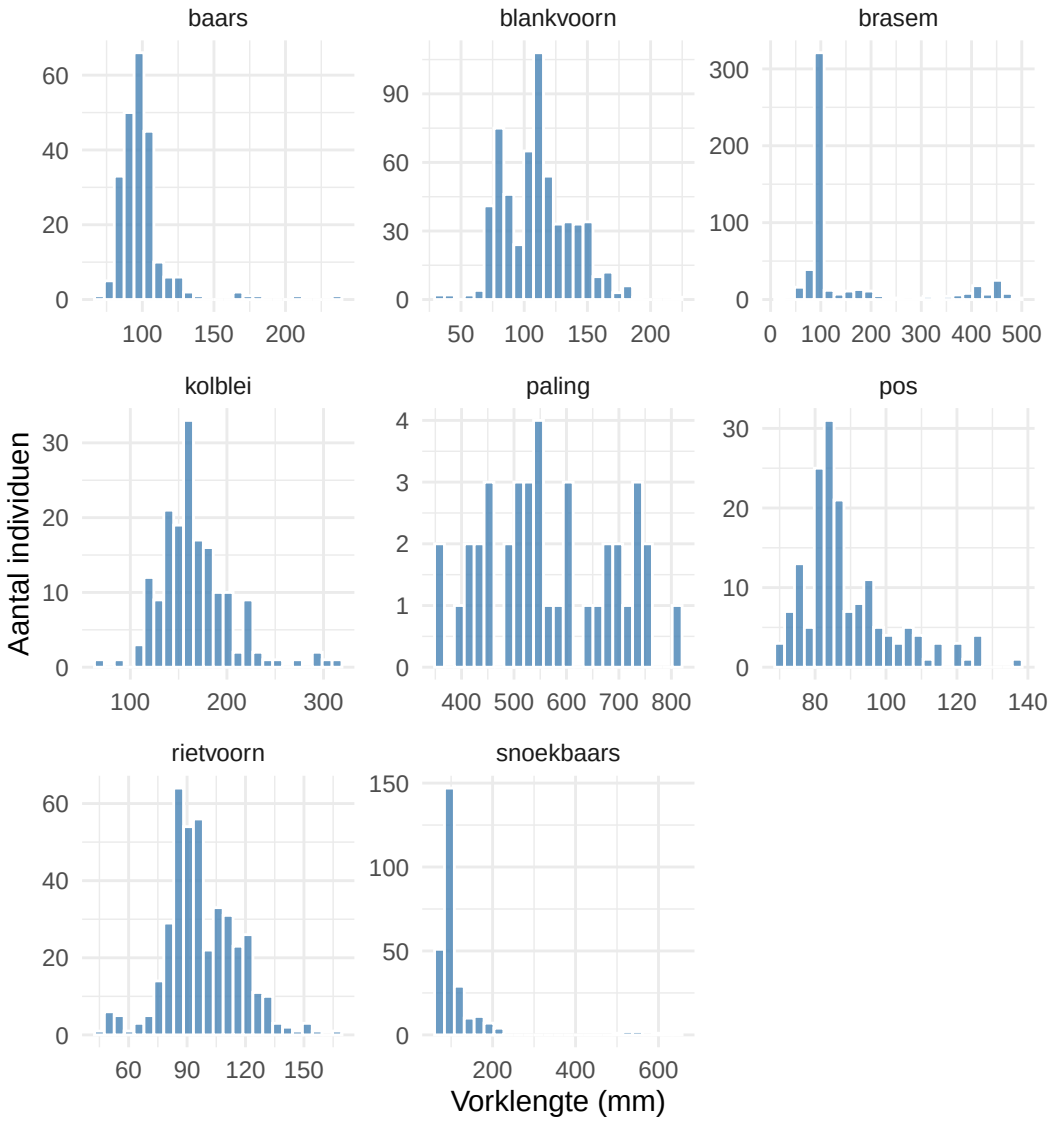
3.2 BESCHRIJVING VAN LENGTE- EN GEWICHTSDISTRIBUTIES

Op basis van de resultaten worden de lengte- en gewichtsdistributies van de bemonsterde vispopulaties hieronder beschreven. De verdelingen zijn gebaseerd op soorten met een minimale steekproefomvang van 20 individuen ($n \geq 20$). De data tonen aan dat de populaties voornamelijk bestaan uit kleinere individuen, wat typerend is voor natuurlijke passage bij dergelijke installaties (Figuur 3.1 en Figuur 3.2). Voor de verdere modellering en de validatie van de visveiligheid zijn per soort specifieke lengtelimieten geïdentificeerd (Beekman & Lange, 2003). Deze limieten markeren de maximale lengtes die als relevant worden beschouwd voor de lokale populatiedynamiek en de technische evaluatie van de pomp.

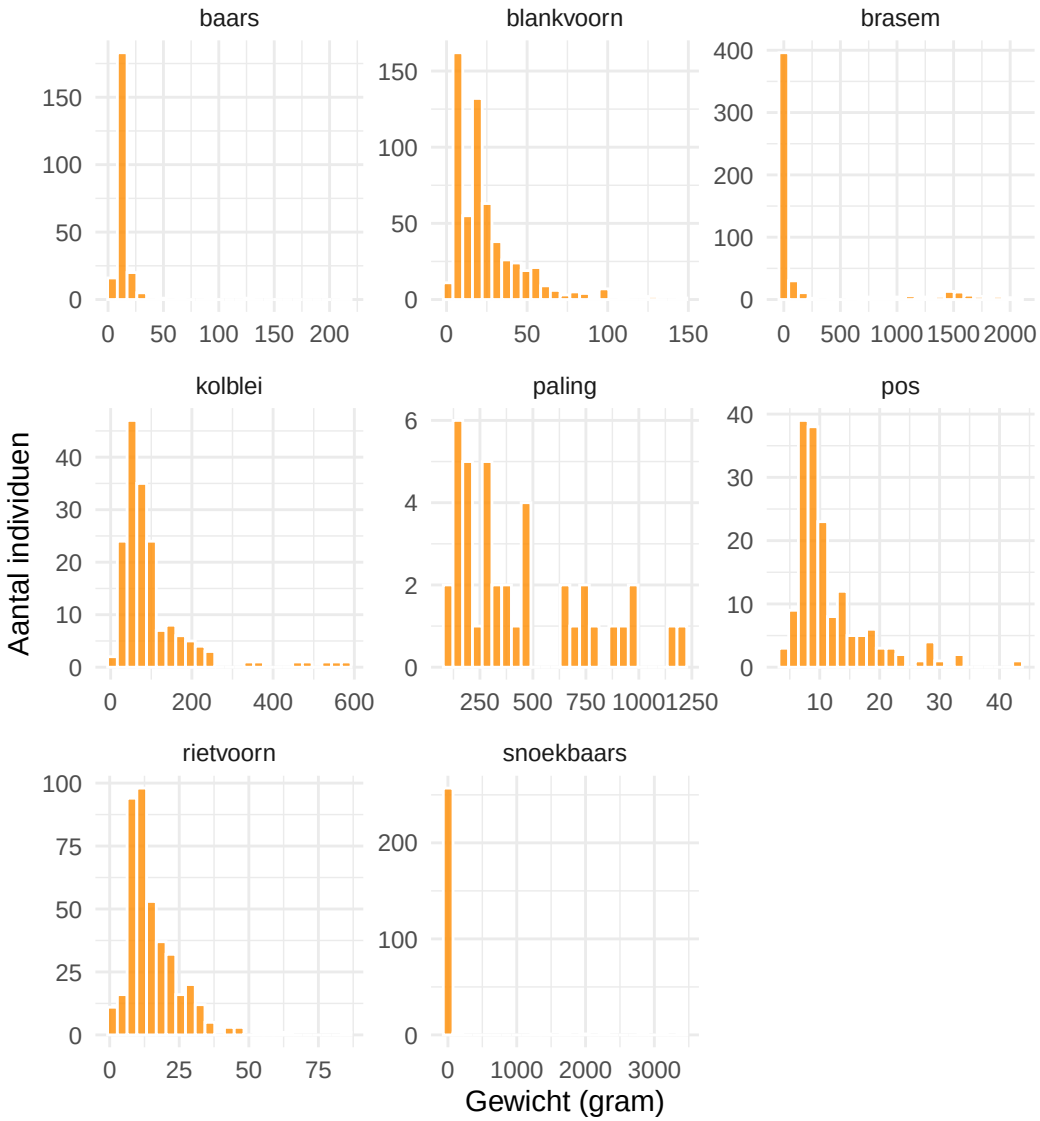
- **Baars**: De populatie bestaat hoofdzakelijk uit vissen tussen 80 en 110 mm, met een scherpe piek rond de 100 mm. Het bijbehorende gewicht ligt meestal tussen 10 en 20 gram. De geïdentificeerde relevante lengtelimiet voor deze soort bedraagt 350 mm.
- **Blankvoorn**: Vertoont een brede lengteverdeling tussen 30 en 190 mm, met een duidelijke piek in de klassen 80 tot 120 mm. Het gewicht concentreert zich voornamelijk tussen 15 en 25 gram. De relevante lengtelimiet voor de analyse is vastgesteld op 350 mm.
- **Brasem**: Hoewel de meeste individuen rond de 100 mm groot zijn, vertoont deze soort de grootste spreiding met uitschieters tot 250 mm. De gewichtsdistributie is hierdoor ook meer gespreid, van enkele grammen tot boven de 200 gram. Voor brasem is een hogere lengtelimiet van 500 mm gedefinieerd. **Brasem is de enige relatief grote soort waarvan er bij deze lengtelimiet voldoende vissen zijn om een statistisch onderbouwde effectbepaling van vorklengte op overleving te bepalen.**
- **Kolblei**: Vertoont een piek in vorklengte rond de 140 mm, met een spreiding tussen 60 en 220 mm. De gewichten variëren overwegend tussen 25 en 100 gram. De gehanteerde lengtelimiet voor deze soort is 350 mm.
- **Pos**: Heeft een zeer compacte lengteverdeling, geconcentreerd tussen 70 en 100 mm. Dit is de lichtste soort in de selectie, met gewichten die zelden de 15 gram overschrijden. De relevante limiet bedraagt 150 mm.
- **Rietvoorn**: Kent een spreiding in vorklengte van 50 tot 160 mm, waarbij de meeste individuen zich in de range 80-110 mm bevinden. Het gewicht piekt rond de 10-20 gram. De limiet voor de visveiligheidsevaluatie is hier 250 mm.
- **Snoekbaars**: Bestaat voornamelijk uit jonge exemplaren tussen 70 en 110 mm. Het gewicht bevindt zich bijna volledig in de klasse onder de 25 gram. Voor deze soort is een aanzienlijke lengtelimiet van 850 mm als theoretisch relevant geïdentificeerd.

Deze limieten fungeren als essentieel referentiepunt in de bepaling van de benodigde steekproefgrootte, aangezien ze de range bepalen waarbinnen de overlevingskansen statistisch robuust moeten worden onderbouwd. Voor overige soorten waarvoor minder data beschikbaar was ($n < 20$), zoals snoek (1100 mm) en zeelt (600 mm), zijn eveneens limieten vastgesteld op basis van hun specifieke groeipotentieel in de Stenensluisvaart.

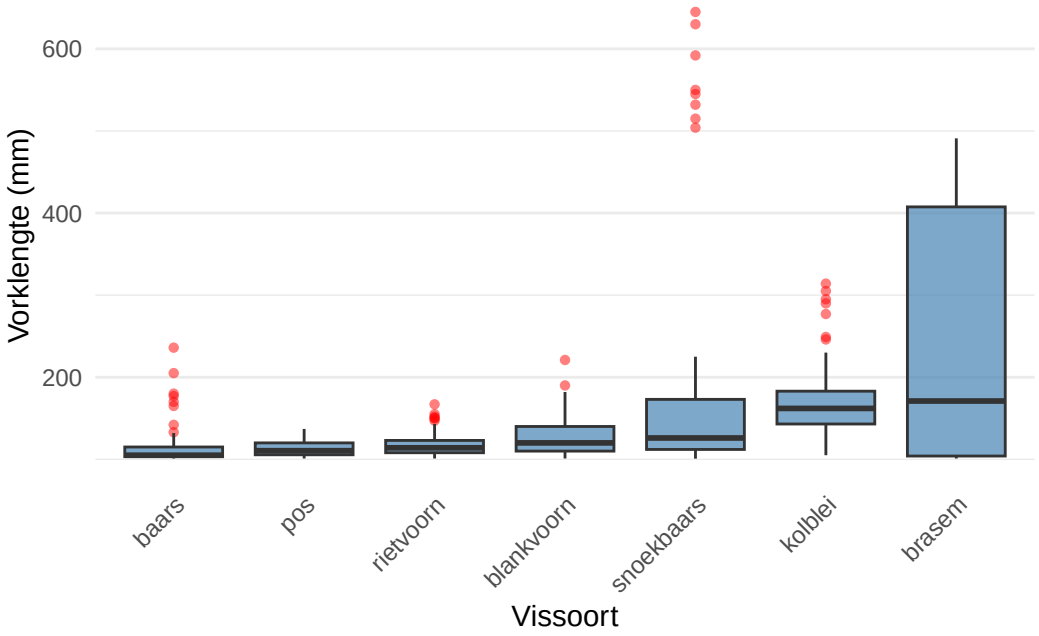
Tussen soorten waren duidelijke verschillen in de lengteverdeling (Figuur 3.3), waarbij de mediaan zelfs in de meeste gevallen significant verschillend was (Figuur E.1). Voor deze boxplots werden vissen kleiner dan 10 cm niet weergegeven, in tegenstelling tot de twee voorgaande barplots. De barplots (Figuur 3.1 en Figuur 3.2) hebben immers als doel om de lengtedistributie van de natuurlijk passerende vissen aan te geven, terwijl de boxplots ((Figuur 3.3 en Figuur E.1) als doel hebben om de gebruikte dataset voor de pompevaluatie te karakteriseren (zie Paragraaf 3.4).



Figuur 3.1: Lengte-frequentieverdeling van de bemonsterde vispopulaties per soort. Hier worden vissen kleiner dan 10 cm nog weergegeven.



Figuur 3.2: Gewicht-frequentieverdeling van de bemonsterde vispopulaties per soort. Hier worden vissen kleiner dan 10 cm nog weergegeven.



Figuur 3.3: Boxplot van de vorklengte per vissoort (gesorteerd op mediane lengte) voor soorten met minimaal 20 waarnemingen. Hier worden vissen kleiner dan 10 cm niet meer weergegeven.

3.3 VERGELIJKING MET HET THEORETISCH BLADE-STRIKE MODEL

Uit de analyse bleek een **aanzienlijk tekort aan individuen groter dan 20 cm**. Hierdoor ontbrak in de lengteklassen boven de 200 mm de statistische power om met voldoende betrouwbaarheid vast te stellen of de predicties van het theoretische model significant afwijken van de geobserveerde velddata (Figuur A.1 en Tabel 3.2). Deze conclusie dient natuurlijk met de nodige voorzichtigheid bekeken te worden aangezien de werkelijke power sterk afhankelijk is van de onderliggende datastructuur, die door de beperkte vangst van grote individuen niet volledig gekend is. Een meer gedetailleerde beschrijving is voorzien in Bijlage A.

De meest opvallende vaststelling is dat de **werkelijke overleving in het veld consequent en significant hoger ligt dan wat het theoretische model voorspelt.** In vrijwel alle lengteklassen waarvoor voldoende data beschikbaar is om een toets uit te voeren ($n \geq 5$), wordt de status "Werkelijke overleving groter dan model" toegekend.

- **Kleine vissen (100 - 150 mm):** In deze klassen is de steekproefomvang zeer groot ($n > 800$). De geobserveerde overleving is hier nagenoeg maximaal (97.3%), terwijl het model voor de klasse 100-150 mm al een daling naar 75% voorspelde.
- **Middelgrote vissen (150 - 400 mm):** Ondanks een daling in het aantal gevangen vissen, blijft de overleving in het veld hoog (tussen 77.8% en 93%). Het theoretische model is hier veel conservatiever en voorspelt overlevingskansen die dalen van 55.9% naar slechts 20%.
- **Grote vissen (> 400 mm):** Hoewel de aantallen hier beperkt zijn, is de geobserveerde overleving (veelal >60%) nog steeds aanzienlijk hoger dan de theoretische predictie van 0%.

Tabel 3.2: Overzicht van steekproefomvang (n), gemiddelde overleving (veld vs. model), benodigd aantal (N) en de statistische vergelijking per lengte-interval.

Interval	n (veld)	Overleving veld (%)	Overleving model (%)	N (nodig)	Tekort	Status	Model vs Veld
100 - 150 mm	809	97.3	75	152	0	voldoende	Werkelijke overleving groter
150 - 200 mm	206	97.1	55.9	173	0	voldoende	Werkelijke overleving groter
200 - 250 mm	48	97.9	40.4	153	105	tekort	Werkelijke overleving groter
250 - 300 mm	10	80	27	106	96	tekort	Werkelijke overleving groter
300 - 350 mm	9	77.8	13.8	28	19	tekort	Werkelijke overleving groter
350 - 400 mm	21	85.7	2	195	174	tekort	Werkelijke overleving groter
400 - 450 mm	40	82.5	0	/	/	/	Werkelijke overleving groter
450 - 500 mm	24	83.3	0	/	/	/	Werkelijke overleving groter
500 - 550 mm	4	75	0	/	/	/	Onvoldoende data
550 - 600 mm	5	60	0	/	/	/	Werkelijke overleving groter

Tabel 3.2: Overzicht van steekproefomvang (n), gemiddelde overleving (veld vs. model), benodigd aantal (N) en de statistische vergelijking per lengte-interval.

Interval	n (veld)	Overleving veld (%)	Overleving model (%)	N (nodig)	Tekort	Status	Model vs Veld
600 - 650 mm	3	100	0	/	/	/	Onvoldoende data
650 - 700 mm	0	/	0	/	/	/	Onvoldoende data
700 - 750 mm	0	/	0	/	/	/	Onvoldoende data

3.4 OVERLEVING EN VERWONDING IN FUNCTIE VAN VORKLENGTE

De geobserveerde overleving voor alle schubvissen varieerde van 97.4% voor vissen tussen de 100 en 150 mm tot 60.0% voor vissen tussen de 550 en 600 mm (Tabel 3.3). De grootste aantallen werden gevangen in de kleinere lengteklassen en een dalende trend met lengte wordt geobserveerd (Figuur 3.4).

Om de robuustheid van de analyse te maximaliseren, is in eerste instantie onderzocht of de overlevingskans soortafhankelijk is. Hiervoor is een globaal logistisch (logit) model opgesteld met 'soort', 'vorklengte', 'morphotype'en de interactie tussen deze factoren als predictoren. Met behulp van een stapsgewijze modelselectie op basis van het *Akaike Information Criterion* (AIC) werden de variabelen 'soort' en 'vorklengte' als enige factoren weerhouden. Er waren echter geen statistisch significant verschillen tussen de soorten. **Vorklengte was de enige significante factor en deze had een negatief effect op de overleving.** Wel moet worden opgemerkt dat de mediane lengte van de meeste vissoorten onderling significant verschilt (Figuur E.1, Pairwise Wilcoxon-test, $p < 0.05$). Deze sterke samenhang tussen soort en lengte maakt het complex om een eventueel lengte-effect op de mortaliteit te ontkoppelen van het eventueel verschil tussen soorten. Om die reden is een aanvullende analyse per soort uitgevoerd, waarin ook anatomische en gedragskenmerken worden meegenomen (zie Paragraaf 3.5).

Op basis van dit resultaat is een gecombineerd overlevingsmodel opgesteld voor alle schubvissen samen, dat wordt afgezet tegen het theoretische *blade-strike* model (Figuur 3.5). Deze aanpak compenseert bovendien voor de beperkte aantallen en de ongelijke lengteverdeling bij individuele soorten. Voor soorten waarbij de dataomvang dit toelaat, wordt aanvullend een soortspecifiek model gepresenteerd. In gevallen waar een model vanwege data-beperkingen niet zinvol of valide blijkt, wordt volstaan met een beschrijvende statistische analyse, waarbij de specifieke redenen voor het achterwege laten van de modellering worden toegelicht.

De modelresultaten suggereren dat kleinere vissen een hogere overlevingskans hebben in vergelijking met grotere exemplaren. Deze bevinding is in lijn met de verwachting dat grotere vissen mogelijk meer kwetsbaar zijn voor letsel die hun overleving kunnen beïnvloeden. Het model geeft aan dat de lengte een belangrijke voorspeller is voor de overlevingskans, waarbij elke toename in vorklengte geassocieerd is met een afname in de kans op overleving. Hoewel de formele diagnostische tests (KS-test, dispersie en outliers) geen significante afwijkingen vertonen ($p > 0.05$), duiden de visuele residu-patronen op een lokale afwijking van het lineaire logit-model. Dit wijst erop dat de overlevingskans niet strikt lineair afneemt met de lengte, maar mogelijk een drempelwaarde vertoont. Gezien de beperkte data in de hogere lengteklassen en het feit dat een *Generalized Additive Model* (GAM) geen significante verbetering bood, is ervoor gekozen om de logistische regressie als hoofdmodel te behouden voor verdere analyses en interpretaties.

Om een beter inzicht te krijgen in de onderliggende oorzaken van deze modelafwijking, werd wel een gesegmenteerde regressie uitgevoerd. Deze statistische techniek, ook wel *breakpoint analysis* genoemd, is bij uitstek geschikt om te bepalen vanaf welke specifieke lengte de dynamiek van de visoverleving verandert. De analyse identificeert een significant kantelpunt bij een vorklengte van 10 cm.

Vóór dit breekpunt vertoont de data een opvallende trend: de overlevingskans neemt aanvankelijk toe naarmate de vissen in lengte toenemen. Dit effect kan naar alle waarschijnlijkheid worden toegeschreven aan een afnemende gevoeligheid voor de bemonsteringsmethode bij grotere vissen. Hoewel bij de aanvang van de data-analyse expliciet is getracht dit te beperken door de allerkleinste individuen ($lengte < 50mm$) buiten beschouwing te laten, blijft de interactie met het vistuig en de handelingen tijdens de metingen (zoals het vangen in fuiken en de fysieke manipulatie) een onvermijdelijke stressfactor. In een praktijkgerichte veldtest is het immers uiterst complex om met absolute zekerheid vast te stellen of een specifieke verwonding (bv. schubverlies) of sterfte louter aan de pomppassage moet worden toegewezen, dan wel aan de cumulatieve belasting van de behandeling.

Vanaf het breekpunt van 10 cm zien we de trend ombuigen naar een negatief verloop. Hierbij wordt aangenomen dat de vis fysiologisch robuust genoeg is om de behandeling te doorstaan, waardoor de werkelijke mechanische impact van de pomp de overhand krijgt in de overlevingstatistieken. Deze gesegmenteerde benadering laat zien dat de pomp-impact een gradueel proces is: naarmate vissen groter worden dan de drempelwaarde van 10 cm, neemt de kans op fatale mechanische interactie met de installatie gestaag toe.

Dit verklaart waarom de *odds* (of kansverhouding) op overleving gemiddeld met 0.53% per millimeter afnemen voor vissen groter dan 10 cm. Indien de kleinere individuen (tussen 50 en 100 mm) wel in de berekening worden betrokken, wordt dit effect verwaterd tot een gemiddelde afname van 0.31% per millimeter, aangezien de positieve trend bij de kleinste vissen de globale daling van de grotere groep deels maskeert.

Op basis van deze inzichten is besloten om voor de verdere **data-analyse uitsluitend vissen groter dan 10 cm** te selecteren. De gesegmenteerde regressie suggereert immers dat de invloed van behandelingsstress vanaf deze lengte minimaal is, waardoor de geobserveerde effecten met een grotere mate van zekerheid kunnen worden toegeschreven aan de eigenlijke pomppassage. Hoewel niet kan worden uitgesloten dat sterfte en verwondingen bij kleinere vissen deels het gevolg zijn van pomp-gerelateerde factoren zoals *shear stress*[1] of barotrauma[2], laat de huidige onderzoeksopstelling door de eerder genoemde beperkingen niet toe om dit onderscheid met voldoende zekerheid te maken.

Na het uitsluiten van individuen kleiner dan 10 cm vertonen de model-residuen (geëvalueerd via DHARMa-diagnostiek) geen significante afwijkingen meer op het gebied van verdeling, dispersie of uitschieters. Dit bevestigt dat de overleving van de resterende populatie accuraat wordt beschreven door het logistische model en dat de eerdere afwijkingen inderdaad werden veroorzaakt door de specifieke kwetsbaarheid van de kleinste lengteklassen voor de bemonsteringsmethode.

[1] Shear stress (afschuifspanning) treedt op wanneer aangrenzende waterlagen met sterk verschillende snelheden langs elkaar stromen, bijvoorbeeld vlakbij de pompwanden of de bladranden. Vissen die in deze turbulente grenslagen terechtkomen, worden blootgesteld aan destructieve rotatie- en trekkrachten. Dit kan leiden tot het losscheuren van het operculum (kieuwdeksel), beschadiging van de ogen of subtiel schubverlies. Omdat kleinere vissen minder spiermassa hebben om zich tegen deze hydraulische krachten te verzetten en sneller worden meegesleurd in microscopische wervels (turbulente eddies), zijn zij hier doorgaans gevoeliger voor dan grotere, krachtigere individuen.

[2] Barotrauma ontstaat daarentegen door de abrupte drukveranderingen binnen de pompbehuizing, waar vissen in fracties van een seconde worden blootgesteld aan een opeenvolging van hoge druk (compressie) en extreme onderdruk (decompressie). Deze plotse decompressie zorgt ervoor dat interne gassen uitzetten, wat kan resulteren in het scheuren van de zwemblaas, inwendige bloedingen (embolie) of het falen van vitale organen.

Volgens het finale overlevingsmodel voor **schubvissen (zonder onderscheid van soort)** groter dan 100 mm was de **kans op overleving significant lager bij grotere lengtes** (Figuur 3.5). Bij **25, 50, en 75 cm daalde de gemodelleerde overleving van 94.1% [95% BI: 92.3% - 95.6%], naar 76.9% [95% BI: 65.3% - 85.5%] en 41.0% [95% BI: 20.2% - 65.6%]**. Dit was beduidend hoger dan de gemodelleerde overleving volgens het theoretische blade strike model dat bij 25, 50, en 75 cm respectievelijk een overleving inschatte van 35, 0 en 0 %.

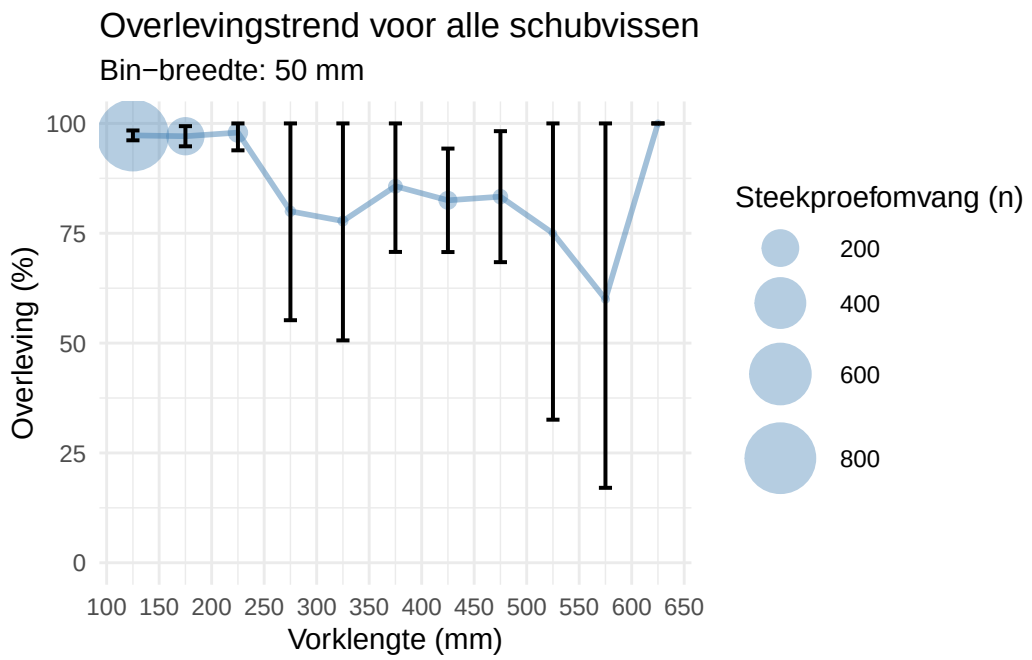
De logistische regressie resulteert in een coëfficiënt van -0.0063 voor de variabele vorklengte ($p < 0.001$). Dit getal vertaalt zich naar een uiterst stabiele trend waarbij de overlevingskansen voor grotere vissen slechts zeer geleidelijk afnemen. Concreet impliceert dit een gemiddelde daling van de kansverhouding (odds) op overleving met 0.63% per millimeter, wat overeenkomt met een afname van 6.1% per centimeter. Over een groter lengte-interval van 10 centimeter resulteert dit in een cumulatieve daling van de odds met 46.7% (Odds Ratio ≈ 0.53). Door de zeer hoge basisveiligheid van de pomp resulteert deze statistische afname in de praktijk echter in een minimaal verlies van de werkelijke overlevingskans. Ter illustratie: het model voorspelt voor een vis van 150 mm een overleving van circa 96.8% [95% BI: 95.6% - 97.7%], wat bij een substantiële lengtetoename van 10 centimeter (naar 250 mm) slechts marginaal terugloopt naar circa 94.1% [95% BI: 92.3% - 95.6%]. Hoewel de kansverhouding statistisch gezien met ruim veertig procent afneemt, blijft de feitelijke impact op de overleving binnen de visgemeenschap hiermee uiterst beperkt.

Het is hierbij belangrijk op te merken dat de gepresenteerde modelsimulaties beperkt blijven tot individuen tot 500 mm. Vanwege het lage aantal van vissen groter dan 500 mm in de velddata, kunnen voorspellingen boven deze grens niet statistisch gevalideerd worden. Door de analyse te begrenzen op dit bereik, blijven de conclusies gebaseerd op de waargenomen lengteverdeling en wordt onbetrouwbare extrapolatie vermeden.De empirische resultaten onderstrepen dat de pompinstallatie een **hoge mate van visveiligheid biedt binnen het geëvalueerde vislengtespectrum**, waarbij de gemodelleerde overlevingskans robuust blijft voor individuen tot en met 500 mm. Hoewel grotere vissen in het systeem aanwezig zijn, zorgt deze begrenzing ervoor dat conclusies strikt gekoppeld blijven aan de feitelijk waargenomen lengteverdeling en wordt onbetrouwbare extrapolatie vermeden.

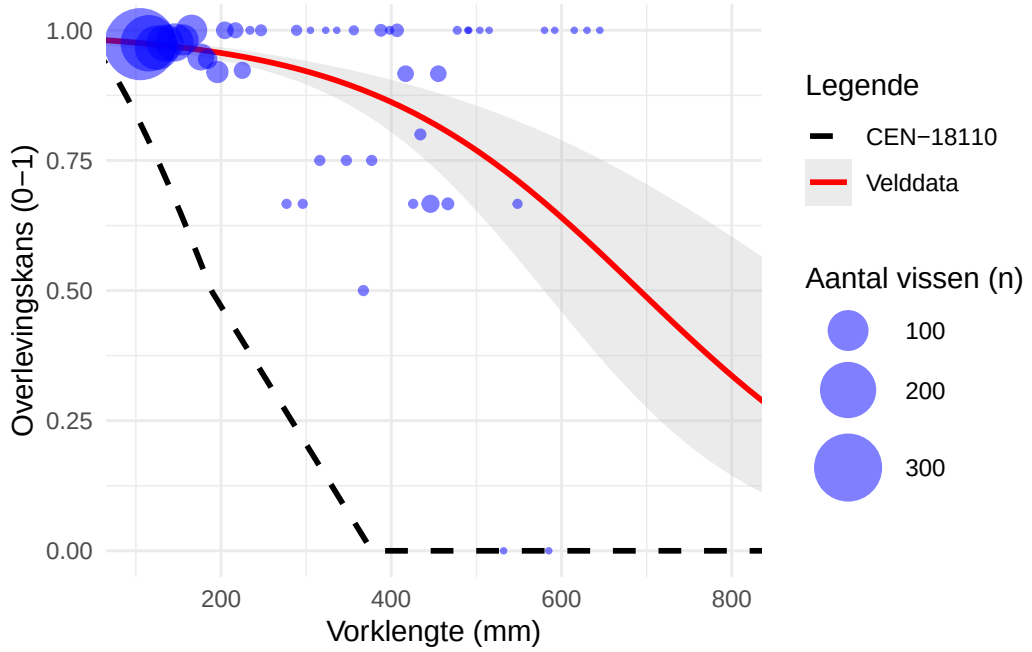
Tabel 3.3: Overleving per 50 mm voor alle schubvissen

Interval	Aantal (n)	Overleving (%)	95% BI Laag	95% BI Hoog
100 - 150 mm	809	97.3	96.2	98.4
150 - 200 mm	206	97.1	94.8	99.4
200 - 250 mm	48	97.9	93.9	100.0
250 - 300 mm	10	80.0	55.2	100.0
300 - 350 mm	9	77.8	50.6	100.0
350 - 400 mm	21	85.7	70.7	100.0
400 - 450 mm	40	82.5	70.7	94.3
450 - 500 mm	24	83.3	68.4	98.2
500 - 550 mm	4	75.0	32.6	100.0
550 - 600 mm	5	60.0	17.1	100.0
600 - 650 mm	3	100.0	100.0	100.0

Voor de analyse van de wondklassen is gebruikgemaakt van een multinominale logistische regressie. Hoewel de schade-index een natuurlijke ordening kent (geen, beperkt, ernstig), wees de *nominal test* uit dat de invloed van vislengte niet proportioneel verdeeld was over de verschillende categorieën. Daardoor kon een ordinale regressie niet gebruikt worden. Door te kiezen voor een multinominaal model worden de kansen op de specifieke schade-niveaus onafhankelijk van elkaar berekend, wat leidt tot een nauwkeuriger en statistisch valideerbaar beeld van de werkelijke impact (Figuur 3.6). De acht vissen die dood waren maar geen observeerbare wondklasse hadden, werden niet meegenomen in de analyse van de wondklassen.



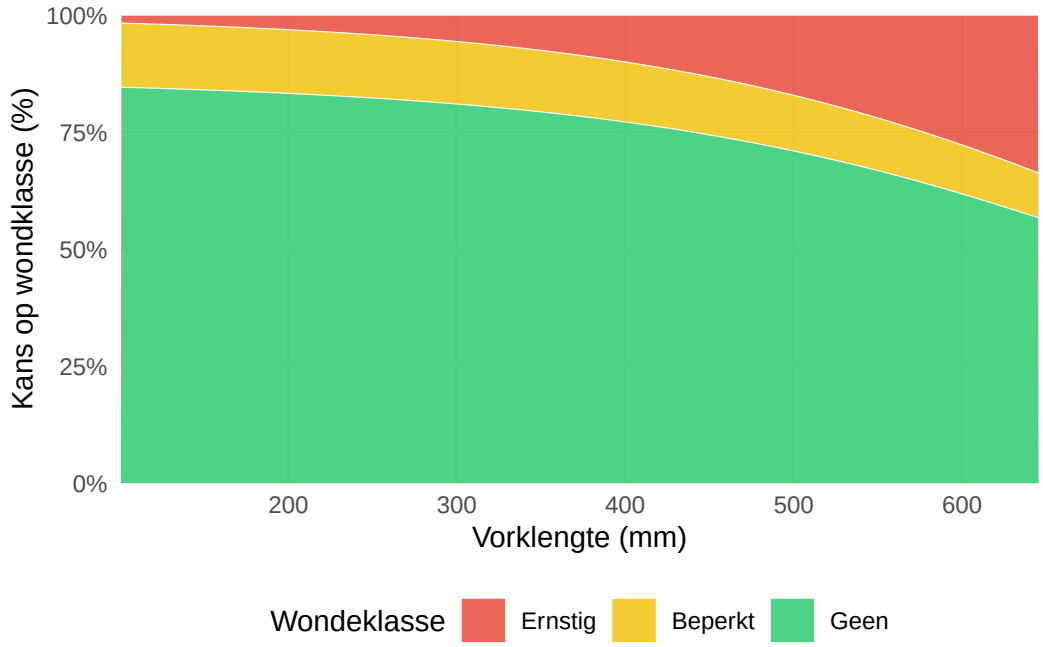
Figuur 3.4: Gemiddelde overleving in functie van vorklengte zonder onderscheid tussen soorten schubvissen. 95% betrouwbaarheidsintervallen zijn weergegeven.



Figuur 3.5: Geaggregeerde overlevingsanalyse van alle bemonsterde vissoorten bij passage door de pomp. De rode lijn geeft de logistische regressie (GLM) weer over de volledige dataset, inclusief het 95% betrouwbaarheidsinterval (grijs vlak). De zwarte onderbroken lijn toont de theoretische overleving volgens de EN 18110:2025 norm (gebaseerd op schubvissen). De blauwe cirkels representeren de waargenomen gemiddelde overleving per lengte-interval van 10 mm, waarbij de diameter van de cirkel de steekproefomvang (n) per interval aangeeft

```
Voorspelde overleving bij 500 mm: 96.8% [95% BI: 95.6% - 97.7%]
```

Zoals verwacht **stijgt de kans op ernstige verwondingen significant met de lichaamslengte, terwijl de kans op een passage zonder observeerbaar letsel afneemt**. Opvallend is dat de kans op ernstig letsel veel sneller stijgt dan de kans op beperkt letsel (coëfficiënt 0.0062 versus 0.00001). Dit duidt erop dat grotere vissen niet zozeer vaker 'beperkte' schade oplopen, maar bij interactie met de installatie direct in de categorie 'ernstig letsel' terechtkomen. Hierdoor wordt het aandeel vissen met beperkte schade bij de grootste lengteklassen verdrongen door een dominant risico op fatale of ernstige mechanische impact.



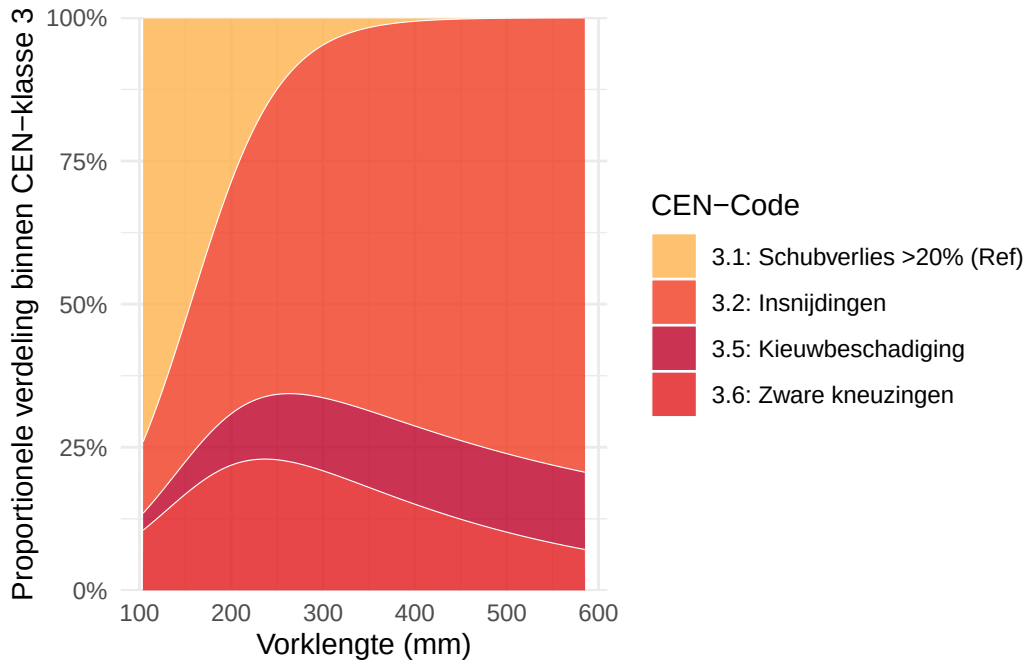
Figuur 3.6: Waarschijnlijkheidsverdeling van de wondklasse (geen, beperkt, ernstig) in functie van de vorklengte zonder onderscheid tussen soorten. De gekleurde vlakken geven de cumulatieve kansen weer op basis van een multinominaal logistisch model. De overgang van groen naar rood visualiseert de toenemende mechanische impact bij grotere vislengtes.

Binnen de groep vissen met **ernstige verwondingen** (CEN-klasse 3) is een duidelijke kwalitatieve verschuiving in het wondtype zichtbaar naarmate de vorklengte toeneemt (Figuur 3.7). De analyse vergelijkt de kans op directe mechanische trauma's (zoals insnijdingen en kneuzingen) met de referentiecategorie **aanzienlijk schubverlies (3.1)**. Uit de resultaten blijkt dat bij kleinere individuen binnen Klasse 3 het beeld wordt gedomineerd door schubverlies (>20%). Echter, met toenemende vorklengte stijgt de kans op specifiek mechanisch letsel aanzienlijk sneller:

- De kans op **insnijdingen en doorsnijdingen (3.2)** vertoont de sterkste stijging (coëfficiënt: 0.022).
- Ook de incidentie van **zware kieuwbeschadigingen (3.5) en zware kneuzingen (3.6)** neemt fors toe ten opzichte van enkelvoudig schubverlies.

Dit duidt op een schaal-effect: waar kleine vissen bij een ongunstige passage vooral oppervlakkige (doch ernstige) schubschade oplopen, resulteert de grotere fysieke omvang van grotere individuen vaker in directe snijwonden (insnijdingen) veroorzaakt door de waaierschoepen of zware impact op de vitale kopelementen.

Voor de beperkte verwondingen (CEN-klasse 2) is eveneens geanalyseerd of de aard van het letsel—rode ogen (2.1), rode vinnen (2.2) of lichte krassen/schubverlies (2.3)—varieert met de vorklengte. In tegenstelling tot bij de ernstige verwondingen, kon voor de **beperkte letsels geen significant lengte-effect** worden aangetoond. Hoewel de modelcoëfficiënten een lichte toename suggereren van letsels aan de



Figuur 3.7: Proportionele samenstelling van de ernstige verwondingen (CEN-klasse 3) in functie van de vorklengte.

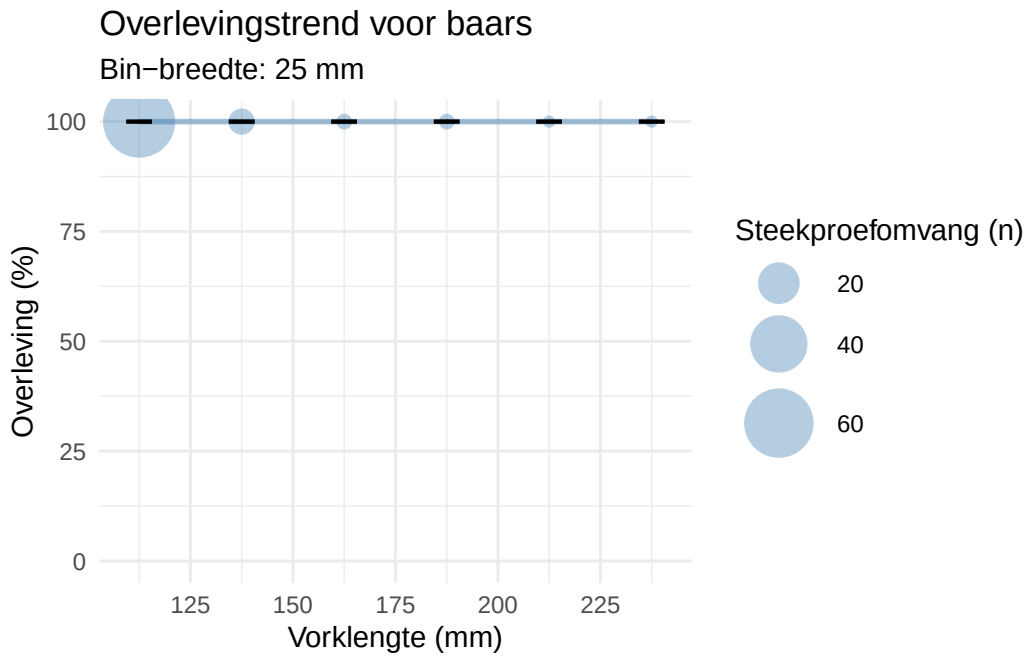
vinnen en de huid bij grotere vissen, zijn de standaardfouten van deze schattingen zeer hoog. Deze resultaten worden verklaard door de **sterke dominantie van lichte krassen en schubverlies (klasse 2.3), wat 97%** van de waarnemingen binnen deze categorie vertegenwoordigt. De overige letseltypes, zoals vinletsel (2.2; 2%) en oogletsel (2.1; 1%), komen in vergelijking hiermee slechts marginaal voor.

3.5 OVERLEVING EN VERWONDING IN FUNCTIE VAN VORKLENGTE PER SOORT

3.5.1 Baars

Zoals weergegeven in Figuur 3.8 en Tabel 3.4, bleef de overlevingskans voor baars over alle beschouwde lengteklassen consistent zeer hoog, met nagenoeg geen geregistreerde sterfte.

Voor baars werd over het gehele lengtebereik **geen ernstige schade (klasse 3)** vastgesteld en ook beperkte schade kwam zelden voor (2.6 %). De analyse beperkt zich daarom tot het onderscheid tussen een schadevrije passage en beperkte verwondingen (klasse 2). Hoewel het model een lichte toename van beperkte schade suggereert bij grotere individuen (coëfficiënt 0.029), blijft de absolute impact voor deze soort gering vergeleken met de grotere vissoorten in de studie (Figuur F.2).



Figuur 3.8: Gemiddelde overleving in functie van vorklengte voor baars. 95% betrouwbaarheidsintervallen zijn weergegeven.

Tabel 3.4: Overleving per 25 mm voor baars

Interval	Aantal (n)	Overleving (%)	95% BI Laag	95% BI Hoog
100 - 125 mm	65	100	100	100
125 - 150 mm	7	100	100	100
150 - 175 mm	2	100	100	100
175 - 200 mm	2	100	100	100
200 - 225 mm	1	100	100	100
225 - 250 mm	1	100	100	100

10.21436/inbor.158239472

3.5.2 Blankvoorn

In navolging van de resultaten bij baars, vertoonde ook blankvoorn geen significant lengte-effect op de overlevingskans binnen de onderzochte lengteklassen. In tegenstelling tot baars werden er echter wel enkele fatale verwondingen geregistreerd Figuur 3.9 en Tabel 3.5.

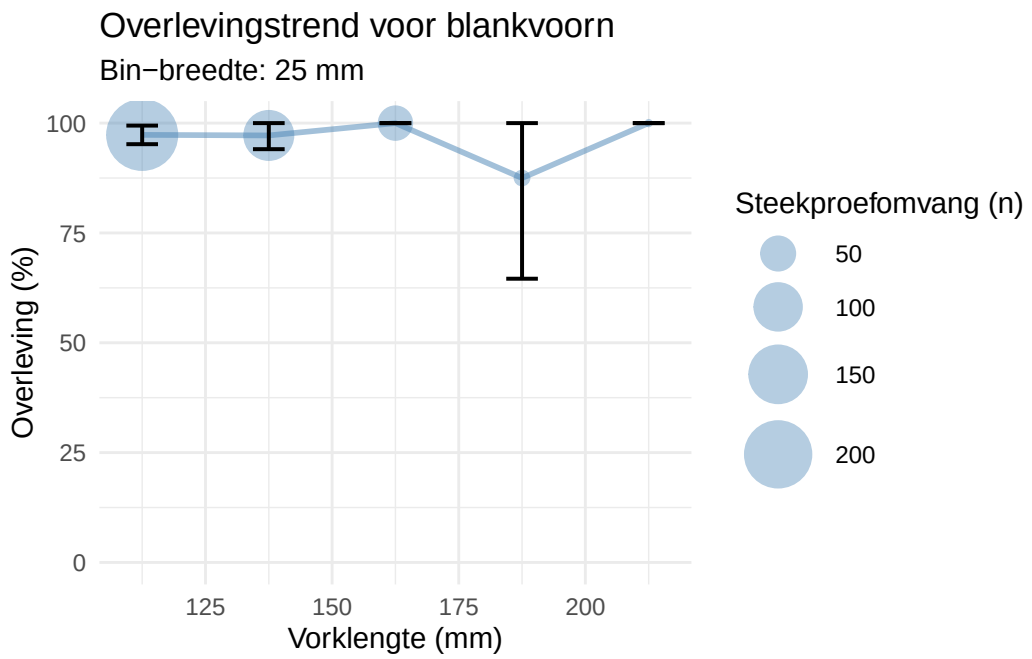
Bij de blankvoorn is ook gekeken of grotere vissen meer of ernstigere schade oplopen dan kleinere exemplaren (Figuur F.3). Uit de cijfers blijkt dat de blankvoorn het over het algemeen erg goed doet bij de passage: bijna 80% van de vissen komt er volledig zonder kleerscheuren ("geen schade") doorheen. Ongeveer 18% loopt lichte schade op en slechts een heel klein deel (2.3%, oftewel 9 vissen) raakt ernstig gewond. Het multinomiale model laat zien dat de lengte van de vis bij deze soort geen doorslaggevende rol speelt bij het type schade. De coëfficiënten voor beperkte schade (0.00454) en ernstige schade (0.00360) zijn erg klein en de statistische onzekerheid (de standaardfout) is simpelweg te groot om van een echte trend te spreken. Voor de blankvoorn blijft de kans op schade dus over de gehele linie stabiel en laag, onafhankelijk van hoe lang de vis is.

Binnen de groep blankvoorns met beperkte verwondingen is schubverlies of een lichte kras (2.3) met 95.7% veruit de meest voorkomende schade. Vinschade (2.2) en oogschade (2.1) komen met respectievelijk 2.9% en 1.4% nauwelijks voor. De modelresultaten laten zien dat de lengte van de vis geen enkele invloed heeft op het type lichte schade dat ontstaat. Het multinomiale model (met oogschade als basis) berekent weliswaar coëfficiënten voor vinschade (-0.03983) en schubverlies (0.01593), maar de statistische onzekerheid (de standaardfout) is veel te groot om betrouwbaar te zijn. Omdat er in totaal maar twee blankvoorns met vinschade en slechts één met oogschade zijn gevangen, is er simpelweg te weinig data om een echte trend aan te tonen. De kans op elk type lichte schade blijft voor kleine en grote blankvoorns dan ook gelijk.

Bij de kleine groep blankvoorns met ernstige verwondingen ($n = 9$) zien we dat de schade meestal bestaat uit aanzienlijk schubverlies (3.1). Dit was in 55.6% van de gevallen de belangrijkste reden om de vis in de categorie 'ernstig' in te delen. Andere ernstige verwondingen, zoals diepe snijwonden (3.2; 11.1%), kieuwschade (3.5; 11.1%) en zware kneuzingen (3.6; 22.2%), kwamen veel minder vaak voor. Het multinomiale model (met schubverlies als basis) laat zien dat de lengte van de vis geen voorspellende waarde heeft voor het exacte type zware schade. Hoewel de cijfers voor snijwonden (coëfficiënt 0.02768) en kneuzingen (coëfficiënt 0.00854) heel licht stijgen bij grotere vissen, zijn de standaardfouten veel te hoog om van een echte trend te kunnen spreken. Omdat er in totaal maar zo weinig vissen met zware schade zijn gevangen, is er simpelweg te weinig data voor harde uitspraken over de invloed van lengte (Figuur F.4). Het is wel duidelijk dat zware mechanische schade zoals doorsnijding bij de blankvoorn veel minder vaak voorkomt dan grootschalig schubverlies.

Tabel 3.5: Overleving per 25 mm voor blankvoorn

Interval	Aantal (n)	Overleving (%)	95% BI Laag	95% BI Hoog
100 - 125 mm	224	97.3	95.2	99.4
125 - 150 mm	107	97.2	94.1	100.0
150 - 175 mm	48	100.0	100.0	100.0
175 - 200 mm	8	87.5	64.6	100.0
200 - 225 mm	1	100.0	100.0	100.0



Figuur 3.9: Gemiddelde overleving in functie van vorklengte voor blankvoorn. 95% betrouwbaarheidsintervallen zijn weergegeven.

3.5.3 Brasem

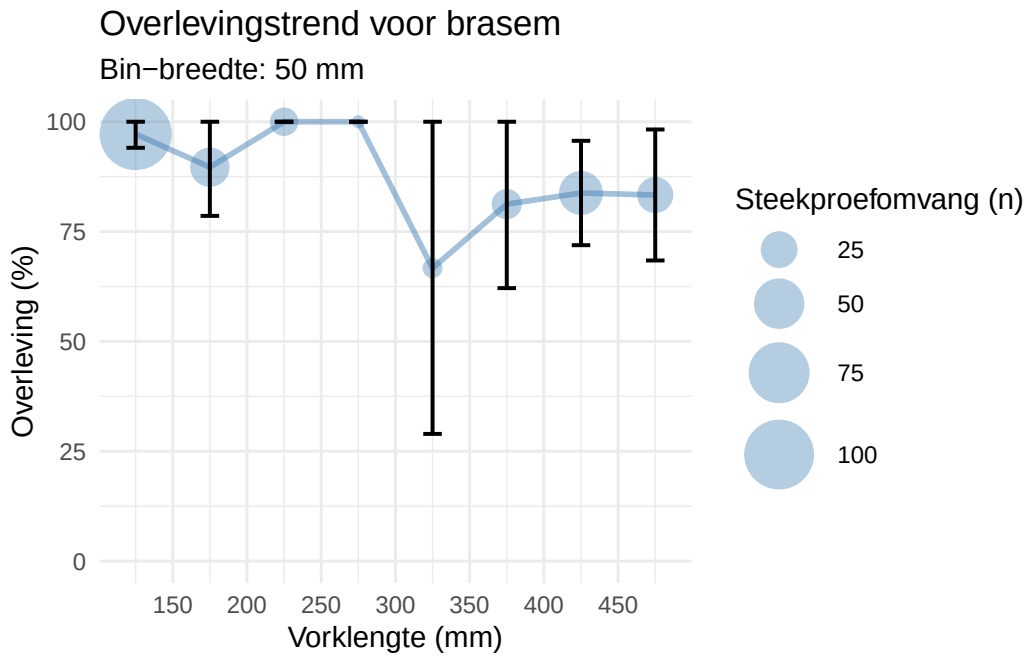
Brasem is een cruciale soort voor de analyse omdat dit **de enige soort is waarvoor over de hele lengterange relatief grote aantallen vissen werden geobserveerd** (Figuur 3.1).

Voor de brasem werd een aanzienlijk hogere mortaliteit vastgesteld dan voor de baars en de blankvoorn. Dit strookt met de verwachting, aangezien de specifieke, eerder stijve morfologie van de brasem — gekenmerkt door een grote lengte en een hoge lichaamsbouw — de vis kwetsbaarder maakt voor mechanische impact (Figuur 3.10 en Tabel 3.6). Het model toont een statistisch significant negatief effect van de lengte op de overleving ($\beta = -0.00538$; $p = 0.00121$). Concreet nemen de kansverhoudingen (odds) op een succesvolle passage met 41.6% af per 10 centimeter extra vislengte (Odds Ratio $= 0.584$ per 10 cm). Om dit te illustreren met de modelvoorspellingen: waar een brasem van 150 mm een overlevingskans van circa 95.4% heeft, daalt dit bij een groter exemplaar van 350 mm naar 87.6%, en bij de grootste individuen van 500 mm naar ongeveer 75.9%.

Op het vlak van verwondingen vertoont de brasem ($n = 228$) een opvallend tweedelig risicoprofiel (Figuur F.5). Terwijl de kans op beperkte verwondingen (klasse 2) met 14.5% constant blijft over het gehele lengtebereik (coëfficiënt = -0.00023), vertoont de kans op ernstige verwondingen (klasse 3; 6.1%) een sterke lengte-afhankelijke stijging (coëfficiënt = 0.00618). Dit suggereert dat grotere brasems niet vaker 'licht' gewond raken, maar dat zij bij een ongunstige passage direct een veel hoger risico lopen op zware letsels. Voor kleinere individuen is de passage relatief veilig (79.4% passeert zonder schade), maar bij een toenemende vorklengte wordt de 'veilige zone' direct verdrongen door ernstige letsels in plaats van door een tussenfase van beperkte schade.

De beperkte schade bij brasem wordt nagenoeg volledig gekenmerkt door lichte krassen en schubverlies (2.3), wat 97.0% van de waarnemingen binnen deze klasse vertegenwoordigt. De overige vormen van beperkt letsel, zoals aan de vinnen (2.2; 3.0%), zijn marginaal. Vanwege deze extreme uniformiteit in het schadebeeld en de hoge standaardfouten (SE $= 0.02896$ op een coëfficiënt van -0.02120 ten opzichte van de referentiecategorie 2.2) kan voor de brasem geen zinvol lengte-effect worden aangetoond binnen Klasse 2; ongeacht de grootte van de vis resulteert een milde impact vrijwel uitsluitend in oppervlakkige schubschade.

Bij de brasem wordt het beeld van de ernstige verwondingen (Klasse 3; $n = 14$) zeer sterk gedomineerd door insnijdingen en doorsnijdingen (3.2), die in maar liefst 78.6% van de gevallen werden vastgesteld. Dit wijst op een hoge frequentie van direct mechanisch contact met de bewegende delen van de installatie. Uit het multinominale model (met schubverlies 3.1 als referentiecategorie) blijkt dat de kans op deze ernstige snijwonden (3.2) fors toeneemt met de lichaamslengte (coëfficiënt = 0.02369) (Figuur F.6). Waar kleinere individuen binnen Klasse 3 nog schubschade vertonen, verschuift het letselprofiel bij grotere brasems onmiskenbaar naar diepere mechanische trauma's. De incidentie van zware kieuwbeschadiging (3.5) omvat 7.1% van de ernstige schadegevallen en vertoont een vergelijkbare positieve coëfficiënt (0.02019), hoewel de lage absolute aantallen hier de statistische power beperken.



Figuur 3.10: Gemiddelde overleving in functie van vorklengte voor brasem. 95% betrouwbaarheidsintervallen zijn weergegeven.

Tabel 3.6: Overleving per 50 mm voor brasem

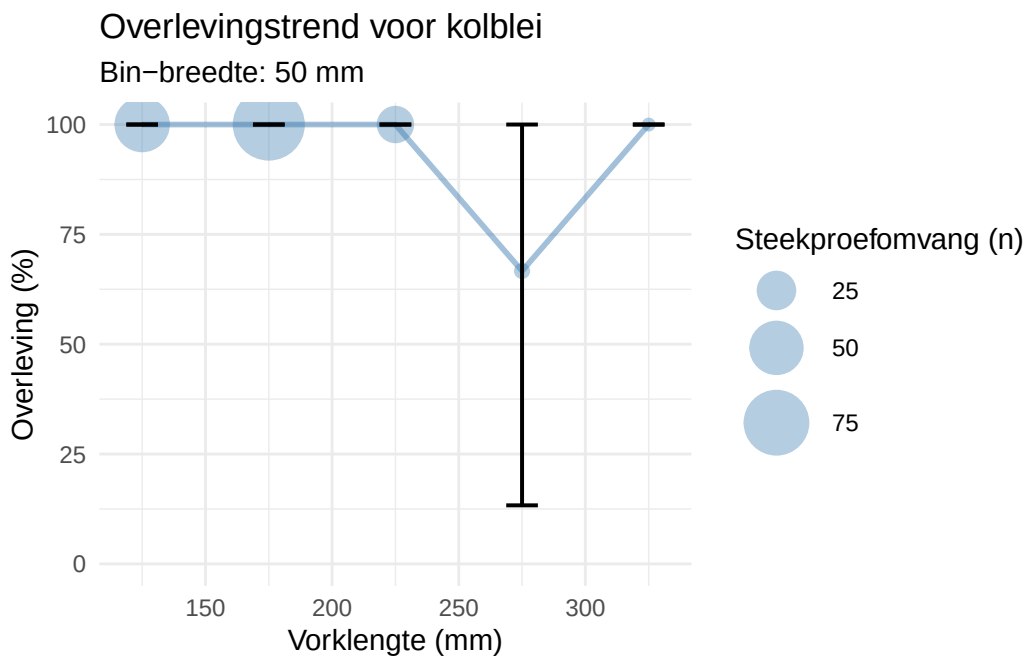
Interval	Aantal (n)	Overleving (%)	95% BI Laag	95% BI Hoog
100 - 150 mm	107	97.2	94.1	100.0
150 - 200 mm	29	89.7	78.6	100.0
200 - 250 mm	14	100.0	100.0	100.0
250 - 300 mm	2	100.0	100.0	100.0
300 - 350 mm	6	66.7	28.9	100.0
350 - 400 mm	16	81.2	62.1	100.0
400 - 450 mm	37	83.8	71.9	95.7
450 - 500 mm	24	83.3	68.4	98.2

3.5.4 Kolblei

Bij de kolblei ($n = 170$) werd een opmerkelijk hoge basisveiligheid vastgesteld. In tegenstelling tot bij de brasem toont de logistische regressie binnen het onderzochte lengtespectrum van kolblei geen statistisch significant effect van de vorklengte op de overleving ($\beta = -0.04152$; Odds Ratio $= 0.959$ per mm; $p = 0.06707$). Hoewel de modelcurve een lichte dalende tendens vertoont bij de grootste exemplaren, blijft de voorspelde overlevingskans over vrijwel het volledige vangstbereik uitzonderlijk hoog — variërend van nagenoeg 100% bij exemplaren van 120–150 mm tot circa 97.7% bij een lengte van 250 mm. Dit bevestigt dat de pompconfiguratie voor deze specifieke soort binnen het waargenomen grootteberek als bijzonder visveilig kan worden beschouwd (Figuur 3.11 en Tabel 3.7).

Ook op het vlak van uiterlijke schade scoort de kolblei erg gunstig: maar liefst 88.8% van de individuen passeerde de installatie volledig ongeschonden. De resterende 11.2% ($n = 19$) liep uitsluitend beperkte verwondingen (klasse 2) op; er werd in het geheel geen ernstig letsel (klasse 3) geregistreerd (Figuur F.7). De multinomiale regressie met 'geen schade' als referentiecategorie toont voor de beperkte verwondingen een flauw positieve coëfficiënt van 0.00936. Deze trend wordt echter overschaduwd door de standaardfout (0.00576) en is statistisch niet significant. Dit wijst erop dat de kans op het oplopen van milde schade over de gehele linie laag en stabiel blijft, ongeacht de vorklengte van de vis.

Wat betreft de aard van het letsel bleken mechanische interacties zoals insnijdingen, doorsnijdingen of oog- en vinbeschadigingen volledig afwezig bij deze soort. De waargenomen schade binnen de categorie 'beperkt' bestond in alle gevallen uitsluitend uit lichte krassen en oppervlakkig schubverlies (code 2.3). Dit uniforme en milde schadebeeld onderbouwt de conclusie dat de kolblei door zijn specifieke morfologie of gedrag effectief wegblijft van de kritieke drempels voor terminale of diepe mechanische impact.



Figuur 3.11: Gemiddelde overleving in functie van vorklengte voor kolblei. 95% betrouwbaarheidsintervallen zijn weergegeven.

Tabel 3.7: Overleving per 50 mm voor kolblei

Interval	Aantal (n)	Overleving (%)	95% BI Laag	95% BI Hoog
100 - 150 mm	52	100.0	100.0	100
150 - 200 mm	91	100.0	100.0	100
200 - 250 mm	22	100.0	100.0	100

Tabel 3.7: Overleving per 50 mm voor kolblei

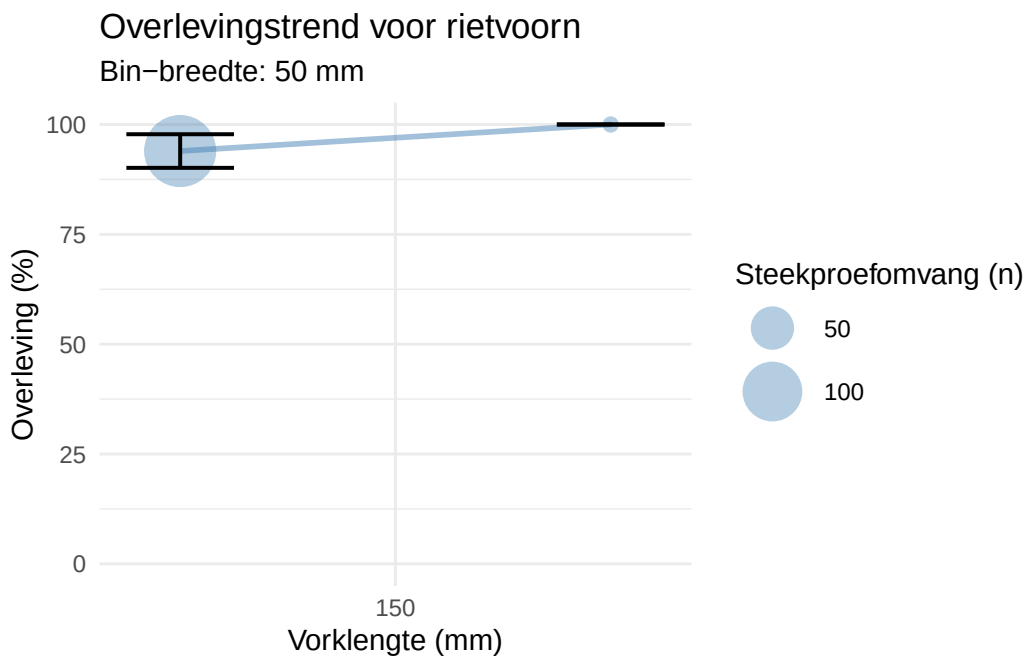
Interval	Aantal (n)	Overleving (%)	95% BI Laag	95% BI Hoog
250 - 300 mm	3	66.7	13.3	100
300 - 350 mm	2	100.0	100.0	100

3.5.5 Rietvoorn

In vergelijking met soorten zoals de brasem en de kolblei is de rietvoorn een relatief kleine vissoort. De overlevingskans binnen de onderzochte opstelling is consistent hoog (Figuur 3.12 en Tabel 3.8). Er werd in de modelselectie geen effect van de lichaamslengte op de overleving weerhouden, wat wijst op een uniform hoge visveiligheid voor deze soort over het gehele geteste lengtespectrum.

Bij de rietvoorn ($n = 152$) passeert het merendeel van de individuen (75.0%) de installatie volledig schadevrij. Opvallend is het relatief hoge aandeel beperkte verwondingen (20.4%), dat over de gehele lengterange vaker voorkomt dan bij de nauw verwante blankvoorn. De multinomiale regressie laat echter zien dat er geen statistisch significant lengte-effect aanwezig is voor de twee schadeklassen (Figuur F.8). De modelcoëfficiënten voor zowel beperkte schade ($\beta = 0.00490$) als ernstige schade ($\beta = 0.00131$) ten opzichte van de referentiecategorie 'geen schade' worden volledig overschaduwd door hun hoge standaardfouten (respectievelijk 0.01686 and 0.03307).

Dit resultaat weerlegt een lengte-afhankelijkheid van het risico; de verhouding tussen de letselcategorieën blijft stabiel voor verschillende vorklengtes. Dat de kans op lichte schade (klasse 2) constant relatief hoog is, wijst erop dat de rietvoorn bij passage weliswaar frequent fysiek of hydraulisch contact maakt met de installatie, maar dat deze interactie ongeacht de vorklengte nagenoeg altijd beperkt blijft tot subletaal letsel. Net als bij de kolblei bestond de geobserveerde schade binnen beide klassen uitsluitend uit schub-gerelateerde letsels (codes 2.3 en 3.1).



Figuur 3.12: Gemiddelde overleving in functie van vorklengte voor rietvoorn. 95% betrouwbaarheidsintervallen zijn weergegeven.

Tabel 3.8: Overleving per 50 mm voor rietvoorn

Interval	Aantal (n)	Overleving (%)	95% BI Laag	95% BI Hoog
100 - 150 mm	149	94	90.1	97.8
150 - 200 mm	5	100	100.0	100.0

3.5.6 Paling

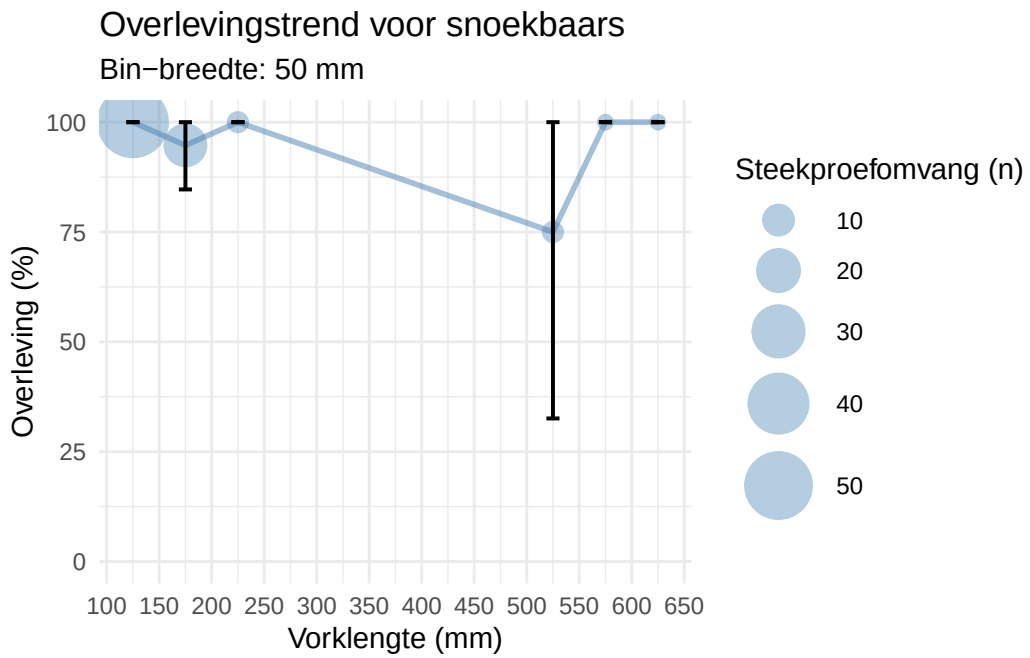
Voor de veertig geobserveerde palingen werd noch ernstige, noch beperkte schade vastgesteld. De overlevingskans bedroeg bijgevolg 100%, wat bevestigt dat de pompconfiguratie als volledig visveilig kan worden beschouwd voor deze specifieke soort.

3.5.7 Snoekbaars

De overlevingskans voor kleinere snoekbaarzen is consistent hoog. Door de grote steekproefomvang in de lagere lengteklassen is deze inschatting zeer betrouwbaar. Voor de middenklasse ontbraken echter waarnemingen, terwijl de grotere lengteklassen minder sterk vertegenwoordigd waren. Het logistische regressiemodel toont aan dat er voor de snoekbaars geen statistisch significant lengte-effect op de overlevingskans aanwezig is ($\beta = -0.00540$; $p = 0.106$). De trend verloopt weliswaar flauw negatief, maar door de hoge basisoverleving binnen de steekproef blijft de overlevingskans over het gehele geteste lengtespectrum statistisch stabiel (Figuur 3.13 en Tabel 3.9).

De snoekbaars vertoont een opmerkelijk hoge schadevrije passage: maar liefst 98.8% van de individuen ($n = 84$) passeert de installatie zonder enig uitwendig letsel. Een uniek kenmerk in de resultaten voor deze soort is de volledige afwezigheid van beperkte verwondingen (Klasse 2). De waargenomen schade beperkt zich uitsluitend tot de categorie 'ernstig', waarin slechts één enkel individu werd geregistreerd (1.2%).

Hoewel de multinomiale regressie met 'geen schade' als referentiecategorie een positieve coëfficiënt van 0.01000 schat voor de variabele vorklengte, is dit effect door de hoge standaardfout (0.00670) statistisch niet significant. Het schijnbare binaire risicoprofiel — waarbij de passage tot een bepaalde lengte risicoloos lijkt en daarna direct in ernstig letsel resulteert — kan door deze extreme data-asymmetrie ($n = 1$ in klasse 3) niet statistisch worden hardgemaakt. De resultaten wijzen er primair op dat schade bij de snoekbaars onder de huidige pompcondities een absolute zeldzaamheid is, al zorgt de discontinuïteit in de lengtegradiënt ervoor dat de exacte overgangszone naar mechanische interactie onderbelicht blijft.



Figuur 3.13: Gemiddelde overleving in functie van vorklengte voor snoekbaars. 95% betrouwbaarheidsintervallen zijn weergegeven.

Tabel 3.9: Overleving per 50 mm voor snoekbaars

Interval	Aantal (n)	Overleving (%)	95% BI Laag	95% BI Hoog
100 - 150 mm	55	100.0	100.0	100
150 - 200 mm	19	94.7	84.7	100
200 - 250 mm	4	100.0	100.0	100
500 - 550 mm	4	75.0	32.6	100
550 - 600 mm	2	100.0	100.0	100

Tabel 3.9: Overleving per 50 mm voor snoekbaars

Interval	Aantal (n)	Overleving (%)	95% BI Laag	95% BI Hoog
600 - 650 mm	2	100.0	100.0	100

4 BESPREKING

De belangrijkste resultaten van dit onderzoek tonen een hoge mate van visveiligheid aan, waarbij voor **gemiddeld 96% van de schubvisgemeenschap geen ernstige schade** werd geobserveerd. De belangrijkste resultaten van dit onderzoek tonen een opmerkelijk hoge mate van visveiligheid aan voor de geteste pompconfiguratie, waarbij voor de totale gemeenschap schubvissen groter dan 10 cm een robuuste overleving werd geregistreerd. Het overgrote merendeel van de vissen (83%) passeerde de installatie volledig ongeschonden, terwijl 13% beperkte schade opliep. 4% liep ernstige schade op. Hoewel de natuurlijke passage hoofdzakelijk uit kleinere vissen bestond, bleef de overlevingskans voor grotere individuen opmerkelijk hoog: het finale overlevingsmodel schat de absolute overlevingskans voor een vis van 50 cm op circa 76.9% [95% BI: 65.3% - 85.5%].

Hoewel de focus van dit onderzoek primair op schubvissen lag, passeerden gedurende de studieperiode ook verschillende palingen. De resultaten bevestigen opnieuw de visveiligheid voor deze soort: **alle veertig geobserveerde palingen passeerden de pomp volledig schadevrij, wat resulteert in een overlevingspercentage van 100%**.

Statistische modelselectie wees uit dat de **overlevingskans primair wordt gedreven door de vorklengte.** Hoewel er indicaties waren voor soortspecifieke variatie, bleken de onderlinge verschillen tussen de vissoorten statistisch niet significant. De specifieke vergelijking tussen brasem en snoekbaars biedt het meest waardevolle ecologische inzicht binnen het grotere lengtespectrum. In tegenstelling tot vergelijkingen met kleinere soorten zoals de blankvoorn, waar een gebrek aan overlappende lengteranges zou leiden tot statistisch onverantwoorde extrapolatie, stelt de data van brasem en snoekbaars ons in zekere maat in staat om de invloed van functionele eigenschappen te evalueren. Snoekbaars vertoont hierbij een hogere overlevingskans dan brasem. Dit waargenomen contrast kan mogelijk verklaard worden door fundamentele verschillen in lichaamsbouw, schubben en zwemgedrag tussen beide soorten. Ten eerste biedt de hoge, zijdelings sterk afgeplatte bouw van de brasem een relatief groot frontaal en lateraal oppervlak in de pompstroom, wat een plausibele verklaring vormt voor een verhoogde theoretische trefkans (*blade strike*). De gestroomlijnde, spoelvormige morfologie van de snoekbaars verkleint daarentegen vermoedelijk de kans op een directe impact. Ten tweede bezit de brasem als cyprinide relatief delicate cycloïdeschubben die bij hydraulische afschuifspanning (*shear stress*) gemakkelijker kunnen loslaten, met een verhoogd risico op osmotische stress en secundaire infecties tot gevolg, terwijl de stevige en diep verankerde ctenoïdeschubben van de snoekbaars mogelijk een betere mechanische bescherming bieden tegen schampend contact met wanden of schoepen. Ten derde beschikt de snoekbaars als actieve roofvis met een fijngevoelig zijlijnorgaan vermoedelijk over een sterkere stroomoriëntatie en stuurreflexen in turbulente zones. Dit kan er hypothetisch toe bijdragen dat snoekbaarzen zich vaker gestroomlijnd door de behuizing manoeuvreren, terwijl brasems bij sterke turbulentie mogelijk sneller hun oriëntatie verliezen en dwars door de waaier worden meegevoerd. Aangezien deze hydraulische en gedragsmatige interacties binnen deze veldopstelling niet rechtstreeks met sensoren of camerabeelden konden worden geregistreerd, moeten deze mechanismen worden beschouwd als plausibele hypotheses die aansluiten bij de eco-hydraulische literatuur. Bovendien blijft methodologische voorzichtigheid geboden: door het relatief beperkte aantal grote snoekbaarzen in de natuurlijke intrek bezit deze vergelijking een lagere statistische power, waardoor soorteffecten en lengte-effecten niet volledig ontward kunnen worden. Een geringe toename van grote, zwaar beschadigde snoekbaarzen zou de geobserveerde trend kunnen wijzigen, wat het belang onderstreept van continue monitoring en het groeperen van data op basis van functionele morfotypen.

De mediaanvorklengte tussen de schubvissoorten verschilt onderling significant. Omdat bepaalde groepen in de vangsten uitsluitend grotere of juist kleinere lengteklassen vertegenwoordigen, fungeert de factor 'vorklengte' in de algemene analyse deels — want er spelen mogelijks ook andere factoren zoals hierboven aangehaald — als een statistische vervanger voor het onderliggende soortspecifieke effect. Alleen voor brasem was de dataomvang en de lengtespreiding toereikend om een representatieve analyse uit te voeren naar het lengte-effect. De vorklengte bleek voor deze soort een significant effect op de overlevingskans te hebben. Om te voorkomen dat unieke soortspecifieke kenmerken worden gemaskeerd, is de globale trend waar mogelijk getoetst aan afzonderlijke analyses per soort.

Hierbij kwam een belangrijk methodologisch onderscheid in de databeschikbaarheid aan het licht. Voor brasem, die een voldoende grote omvang en brede spreiding over het lengtespectrum had, kon een valide, eigen regressiemodel worden opgesteld. Voor soorten waarbij grotere individuen in de natuurlijke vangsten ondervertegenwoordigd waren of waarbij simpelweg geen enkele mortaliteit optrad — zoals de kolblei en de rietvoorn — ontbrak de statistische variantie en power voor een eigen overlevingsmodel. Voor deze groepen fungeert de geaggregeerde schubvissenanalyse als het meest betrouwbare referentiekader.

Het overlevingsmodel voor alle schubvissen samen laat zien dat de **overlevingskansen voor grotere schubvissen slechts zeer geleidelijk afnemen**. Hoewel de kansverhouding op overleving daalt bij een toenemende lengte, blijft de feitelijke impact op de gemeenschap uiterst beperkt door de hoge basisveiligheid van de pomp. Ter illustratie: de modelmatig voorspelde overleving loopt bij een substantiële lengtetoename van 10 cm (van 150 mm naar 250 mm) slechts marginaal terug van 96.8% naar 94.1%.

Deze bevindingen zijn verkregen onder de specifieke operationele condities van de VaHo-axiaalpompen, die werken met een debiet van 2 m³/s bij een toerental van 250 rpm. De technische configuratie van de pomp — gekenmerkt door een radius van 0.45 m en een rotor met twee bladen van 36 mm dik — creëert een relatief ruime passage-opening. In combinatie met een relatief beperkte opvoerhoogte van 1.24 m en een hydraulisch rendement van ruim 80%, wijst de data uit dat deze pompconfiguratie een hoge waterafvoer combineert met een relatief beperkte mechanische impact op de passerende schubvisgemeenschap.

i Wat zegt de literatuur over visoverleving bij passage door visvriendelijke axiaalpompen?

De resultaten van deze monitoring laten zien dat het pompgemaal aan de Stenensluisvaart **relatief goed scoort op vlak van visoverleving in vergelijking met andere studies naar visvriendelijke installaties**. Eerdere in-situ evaluaties van visvriendelijke pompen rapporteren overlevingskansen die variëren tussen 22.2% en 72.4% (Bierschenk *et al.*, 2018). Deze brede range is toe te schrijven aan het gedeeld belang van verschillende factoren zoals pompdesign, operationele instellingen, vissoort en individuele vislengte (Bruneel *et al.*, 2024). Diezelfde variabiliteit komt ook in deze studie tot uiting, met waargenomen overlevingskansen die — afhankelijk van de soort en lengteklasse — uiteenlopen van 50.0% tot 100.0% (waarbij dus pompdesign en operationele instellingen constant bleven).
Hoewel deze sterke variatie inherent is aan dergelijke installaties, blijft het aantal studies dat deze dynamiek écht probeert te capteren door het testen van meerdere soorten en vorklengtes, zeer beperkt (Bierschenk *et al.*, 2018; Mueller *et al.*, 2017; Vriese, 2009). De Europese norm (CEN) schrijft voor cypriniden (karperachtigen) bijvoorbeeld een restrictieve vorklengte van slechts 20 tot 25 cm voor (CEN, 2025). Daarmee gaat de norm echter voorbij aan het disproportioneel grote ecologische belang van grotere individuen voor de gemeenschap. Waar veel studies daardoor een blinde vlek hebben voor grotere vissen, konden binnen dit onderzoek bijvoorbeeld 77 brasems met een vorklengte van meer dan 35 cm na passage worden geëvalueerd. In dat opzicht is de huidige studie uitzonderlijk robuust onderbouwd. Bij vergelijkingen met andere pompen — die zich in de praktijk dikwijls beperken tot de minimale eisen van de CEN — moet deze uitgebreide biologische reikwijdte nadrukkelijk worden erkend.

Naast de overlevingscijfers vertoont de **aard van de geregistreerde letsels bij de totale schubvisgemeenschap een duidelijke lengte-afhankelijkheid**. Uit de schade-analyse blijkt dat een toenemende vorklengte de kans op beperkte schade nauwelijks beïnvloedt. In de totale gemeenschapbeschouwing wordt het aandeel schubvissen met beperkte schade bij de grootste lengteklassen echter verdrongen; niet omdat dit risico afneemt, maar omdat het dominante risico op ernstige mechanische impact bij grotere individuen alle andere scenario's overschaduwt. Waar kleinere individuen hoofdzakelijk oppervlakkig schubverlies vertonen, verschuift het ernstige schadebeeld bij **grotere schubvissen naar directe mechanische trauma's, waaronder diepe insnijdingen (2.2%) en zware kieuwbeschadigingen of kneuzingen**. Dit weerspiegelt een schaaleffect waarbij de grotere fysieke omvang van de schubvis resulteert in een hogere trefkans door de rotorbladen.

Wanneer de relatie tussen vorklengte en overleving per soort afzonderlijk wordt geëvalueerd, vallen de volgende specifieke patronen op:

- **Brasem**: Bij deze soort is het negatieve effect van lengte op de overleving het duidelijkst aanwezig. De kans op een succesvolle passage neemt stapsgewijs af bij een grotere lengte, waarbij de kansverhouding met 41.6% afneemt per 10 cm lengtetoename. Modelmatig zakt de overlevingskans van 95.4% bij 150 mm naar 75.9% bij de grootste individuen van 500 mm. Kwalitatief wordt de ernstige schade bij brasem met 78.6% extreem sterk gedomineerd door insnijdingen en doorsnijdingen. Hoewel brasem de enigste soort is waarbij een negatief effect van lengte werd vastgesteld, moet genoteerd worden dat dit de enige soort is die in voldoende aantallen over een brede lengterange voorkwam om statistisch onderbouwde conclusies te kunnen trekken.

- **Baars en blankvoorn**: Voor deze soorten werd binnen de onderzochte lengteklassen geen effect van de lengte op de overlevingskans vastgesteld; de overleving bleef over de gehele geobserveerde range consistent hoog. Specifiek voor blankvoorn bleek bovendien dat de vorklengte geen invloed heeft op de kans op schade of het type letsel, wat te wijten is aan het feit dat de overgrote meerderheid van de blankvoorns (79.7%) volledig onbeschadigd passeert.

- **Kolblei en rietvoorn**: Voor kolblei ($n = 170$) werd eveneens een uitzonderlijk hoge overleving vastgesteld, zonder statistisch significant effect van de vorklengte ($p = 0.067$; modelmatige overleving variërend van $> 99.9\%$ bij 150 mm tot 97.7% bij 250 mm). Wat de uitwendige verwondingen betreft, bleef 88.8% van de kolbleien volledig ongeschonden en liep 11.2% slechts lichte schade op. Voor de rietvoorn werd eveneens een consistent hoge overleving geregistreerd zonder lengte-effect. De analyses toonden voor beide soorten aan dat de kans op schade stabiel blijft over de lengteklassen.

- **Snoekbaars**: De overlevingsanalyse toont aan dat er voor snoekbaars geen effect van de lengte op de overlevingskans aanwezig is, waardoor de overleving over de gehele linie robuust en stabiel blijft. Kwalitatief passeert snoekbaars met 98.8% nagenoeg altijd volledig ongeschonden. Beperkte verwondingen ontbreken volledig, en de categorie 'ernstige schade' omvat slechts één enkel individu (1.2%) , waardoor er ook geen sprake is van een schade-trend over de lengteklassen. Voor snoekbaars konden, net als voor brasem, individuen over een brede lengterange verzameld worden. Een belangrijke limitatie was echter dat, in tegenstelling tot brasem, het aantal grotere individuen sterk beperkt was en dat de statistische power om een lengte-effect te ontwarren daardoor dan ook relatief laag was.

- Voor de overige soorten (waaronder blauwband, driedoornige stekelbaars, giebel, karper, pos, riviergrondel, snoek, vetje, zeelt, zonnebaars en zwartbekgrondel) was de dataomvang te beperkt om op soortniveau conclusies te trekken.

Wat zegt de literatuur over het effect van vislengte op overleving bij passage door visvriendelijke axiaalpompen?

Het in deze studie vastgestelde **negatieve effect van vislengte op de overleving** van soorten waarvan over een voldoende grote range voldoende vissen beschikbaar waren, zoals brasem, sluit consistent aan bij de bestaande hydraulische en biologische literatuur omtrent pompdynamiek. Volgens de *blade strike*-waarschijnlijkheidsmodellen is de kans dat een schubvis effectief geraakt wordt door een rotorblad direct proportioneel met de totale vislengte (Van Esch & Spierts, 2014; Zhu *et al.*, 2022). Hoewel drukgerelateerde trauma's verschillende lengteklassen wisselend beïnvloeden, neemt het absolute risico op een fatale fysieke collisie met de bewegende machineonderdelen exponentieel toe naarmate een vis groter is (Cox *et al.*, 2023; Zitek *et al.*, 2026). Dit verklaart waarom de overlevingskansen in de hogere lengteklassen een dalende trend vertonen.

De specifieke aard van de verwondingen verschilt fundamenteel per schadecategorie, maar toont een grote uniformiteit tussen de soorten:

- **Beperkte schade**: Binnen deze categorie is het schadebeeld over alle soorten heen extreem uniform. Bij het merendeel van de visgemeenschap (97.0%), blankvoorn (95.7%) en brasem (97.0%) bestaat de beperkte schade nagenoeg uitsluitend uit lichte krassen of beperkt schubverlies. Er kon binnen deze klasse voor geen enkele soort een relatie worden aangetoond tussen de vislengte en het type letsel.
- **Zware schade**: Hier is wel een duidelijke fysiologische verschuiving zichtbaar tussen de soorten. Bij grotere individuen, en dan met name bij brasem, domineert penetrerend mechanisch letsel zoals diepe insnijdingen (78.6%). Bij kleinere vissoorten met ernstig letsel (zoals de blankvoorn) blijft het beeld daarentegen vaker beperkt tot louter grootschalig schubverlies (55.6%), terwijl ingrijpende doorsnijdingen (11.1%) daar een uitzondering vormen.

Wat zegt de literatuur over het type verwondingen bij passage door visvriendelijke axiaalpompen?

Het type ernstige verwondingen (CEN-code 3) verandert naargelang de visgrootte, wat direct te herleiden is naar de mechanische werking binnen de pompbehuizing. Grotere individuen, die statistisch een veel hogere trefkans hebben, bezwijken voornamelijk aan penetrerend mechanisch letsel zoals diepe insnijdingen en amputaties. B*lade strikes* bij deze grotere vismaten leiden tot diepe dermale laesies en acute hemorrhaging (Bierschenk *et al.*, 2018; Cox *et al.*, 2023). Daarnaast observeerden Zhu et al. dat extreme interne afschuifspanningen (*shear stress*) het kieuwdeksel (operculum) kunnen laten scheuren, wat direct bewijs levert voor de in dit onderzoek geregistreerde zware kieuwbeschadigingen (Zhu *et al.*, 2022).
Bij kleinere cypriniden zoals de blankvoorn blijft Klasse 3-schade daarentegen hoofdzakelijk beperkt tot grootschalig schubverlies. Cycloïde schubben van karperachtigen zijn hier extreem gevoelig voor; tijdens conventionele pomptesten verloren cypriniden frequent tot 90% van hun totale lichaamsoppervlak (Bierschenk *et al.*, 2018). Hoge drukgradiënten en *shear forces* strippen de schubben van de huid (Zhu *et al.*, 2022), wat vaak leidt tot indirecte, vertraagde mortaliteit door secundaire bacteriële infecties. Dit verklaart tevens het sterke contrast met de baars, die door zijn robuustere ctenoïde (kam)schubben nagenoeg immuun is voor dit grootschalige schubverlies, maar bij zware impact juist gevoeliger is voor vinbeschadiging (Bierschenk *et al.*, 2018).
In tegenstelling tot de zware trauma's vertonen de beperkte verwondingen (CEN-code 2) een opvallende uniformiteit over alle soorten heen: het schadebeeld bestaat vrijwel uitsluitend uit lichte krassen en minimaal schubverlies. Bierschenk et al. bevestigen dat dit type milde schade standaard voorkomt in nagenoeg elke pomptest (Bierschenk *et al.*, 2018). Zij benadrukken echter dat dergelijke oppervlakkige laesies vaak niet exclusief aan de pomp zelf te wijten zijn, maar het cumulatieve resultaat zijn van de noodzakelijke handelingen na de passage, zoals het vangen met vistuig en het verblijf in fuiken.

Referenties

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 vijzels: Isabellagemaal (Boekhoute). Brussel.

Beekman J. & Lange M.C. de (2003). Visstandbeheerplan Bergse Plassen 2003-2013. OVB [etc.], Nieuwegein. https://edepot.wur.nl/181509.

Bierschenk B.M., Pander J., Mueller M. & Geist J. (2018). Fish injury and mortality at pumping stations: a comparison of conventional and fish-friendly pumps. Marine and Freshwater Research 70 (3): 449–458. https://doi.org/10.1071/MF18116.

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

Buysse 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. Spiedamgemaal (Rieme). Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek. Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek.

CEN (2025). Standard - Water quality – Assessment of damage to fish passing through pumping stations and hydropower plants – Methods based on live fish passage survival test and blade strike model SS-EN 18110:2025 - Swedish Institute for Standards, SIS.

Cohen J. (1988). Statistical power analysis for the behavioral sciences. 2. ed., reprint ed. Psychology Press, New York, NY.

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

Declercq G. & Casteleyn J. (1993). De problematiek rond het Blankaartbekken. West-Vlaanderen Werkt. https://www.kenniswest.be/file/article/50410/70878/WVLW1993_4_DeproblematiekrondhetBlankaartbekken.pdf.

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. Groenendaal.

Griffioen A.B. & Tien N.S.H. (2016). Sterfte van schubvis als discards in de grotefuikvisserij in het IJsselmeer en Markermeer: een deskstudie. https://agris.fao.org/search/en/providers/122575/records/66d9bd07f995ef9c0425b4d8.

Mueller M., Pander J. & Geist J. (2017). Evaluation of external fish injury caused by hydropower plants based on a novel field-based protocol. Fisheries Management and Ecology 24 (3): 240–255. https://doi.org/10.1111/fme.12229.

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

Stevens M., Buysse D., Van den Neucker T. & others (2011). Wetenschappelijke ondersteuning van de uitvoering van het palingbeheerplan - Inventarisatie pompgemalen. Brussel.

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. Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek. https://doi.org/10.21436/inbor.133682596.

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): 1910–1923. https://doi.org/10.1139/cjfas-2014-0035.

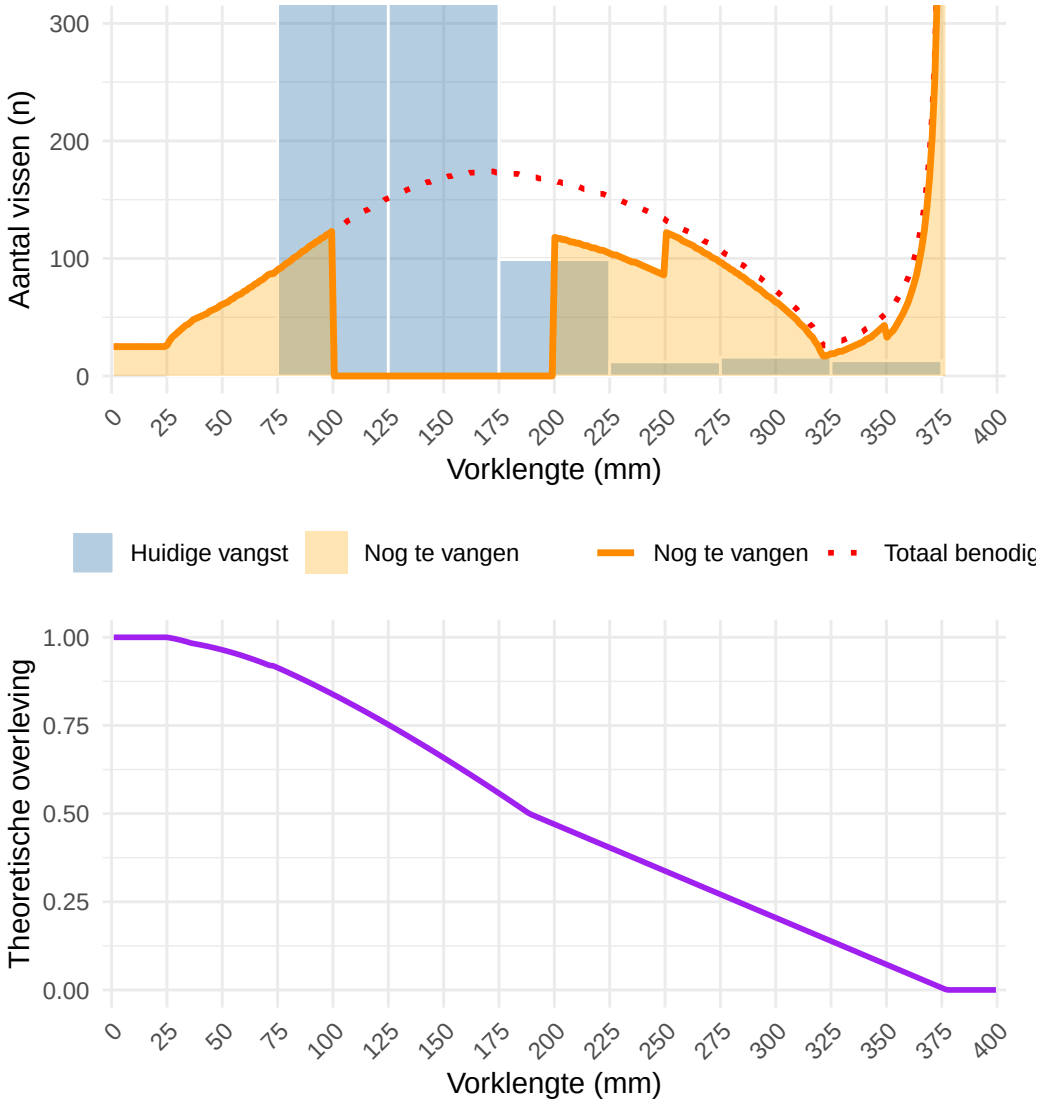
Vriese F.T. (2009). Onderzoek naar de visveilige axiaalpomp en buisvijzel. http://www.VisAdvies.nl.

Zhu L., Zhang F., Shi X., Adu-Poku K.A., Zhang J. & Yuan S. (2022). A Systematic Investigation on the Damage Characteristics of Fish in Axial Flow Pumps. Processes 10 (11): 2228. https://doi.org/10.3390/pr10112228.

Zitek A., Gessl W., Mehlmauer P., Ratschan C., Schletterer M. & Schneider J. (2026). Sensitivity of larval and juvenile fish with different swim bladder morphology to barotrauma with a special focus on Cypriniformes. Scientific Reports 16 (1): 2798. https://doi.org/10.1038/s41598-025-32670-y.

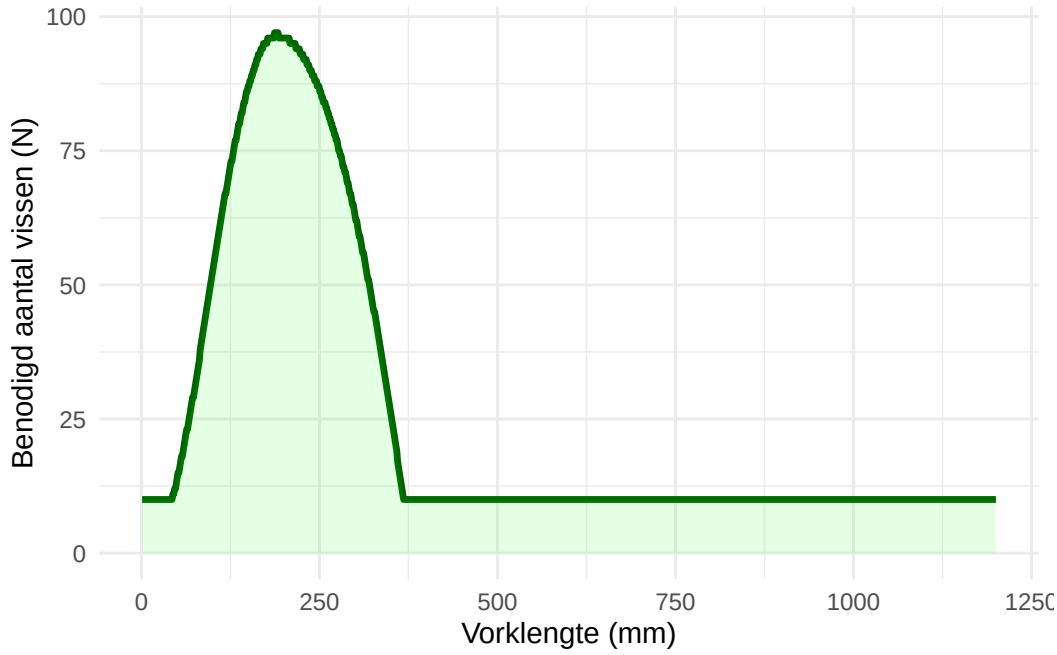
A POWER-ANALYSE

Uit de analyse bleek een aanzienlijk tekort aan individuen groter dan 20 cm. Hierdoor ontbrak in de lengteklassen boven de 200 mm de statistische power om met voldoende betrouwbaarheid vast te stellen of de predicties van het theoretische model significant afwijken van de geobserveerde velddata (Figuur A.1 en Tabel 3.2). Deze conclusie dient natuurlijk met de nodige voorzichtigheid bekeken te worden aangezien de werkelijke power sterk afhankelijk is van de onderliggende datastructuur, die door de beperkte vangst van grote individuen niet volledig gekend is. Er is immers expliciet voor gekozen om de logistische modellen uit de velddata niet als referentie te gebruiken voor deze analyse. Omdat er een gebrek is aan waarnemingen in de hogere lengteklassen, zijn de huidige veldmodellen onvoldoende betrouwbaar om als 'waarheid' te dienen. Het gebruik van deze mogelijk inaccurate modellen zou leiden tot een misleidende schatting van de power. Om dit gebrek aan betrouwbare veldreferenties op te vangen, is gewerkt met een hypothetische overlevingskans die 15% verschilt van het theoretische model. Dit dient echter louter als een gevoeligheidstest. De werkelijke statistische power kan in de praktijk hoger of lager uitvallen, afhankelijk van hoe de werkelijke sterftekanscurve eruitziet in de zones waar nu data ontbreekt. Juist vanwege deze onzekerheid in de modelgevoeligheid is er aanvullend voor gekozen om de statistische significantie van alle afzonderlijke lengteklassen te evalueren. Door per klasse te toetsen in hoeverre de verzamelde data afwijken van de theoretische verwachting, wordt een extra laag van validatie toegevoegd die minder afhankelijk is van de (onzekere) vorm van een globaal logistisch model. De power-analyse dient in dit rapport niet als een definitief bewijs van nauwkeurigheid, maar als een instrument om de grenzen van de huidige dataset te identificeren. De geaggregeerde aanpak en de focus op significantie per lengteklasse maximaliseren de bruikbaarheid van de data, maar kunnen de fundamentele onzekerheid die gepaard gaat met een gebrek aan grote individuen in een in-situ setting niet volledig wegnemen.



Figuur A.1: Gap-analyse van de bemonsteringsinspanning gerelateerd aan het theoretische overlevingsmodel (EN 18110:2025). Bovenste paneel: Vergelijking tussen de huidige gerealiseerde steekproefomvang (blauw histogram) en de theoretisch benodigde N voor een statistisch onderscheidend vermogen van 80% (rode stippellijn). Het oranje vlak identificeert het resterende tekort aan individuen per lengteklasse van 25 mm. Onderste paneel: De corresponderende theoretische overlevingscurve voor schubvissen, die de basis vormt voor de variërende bemonsteringsbehoefte in het bovenste paneel.

B PRECISIE-ANALYSE



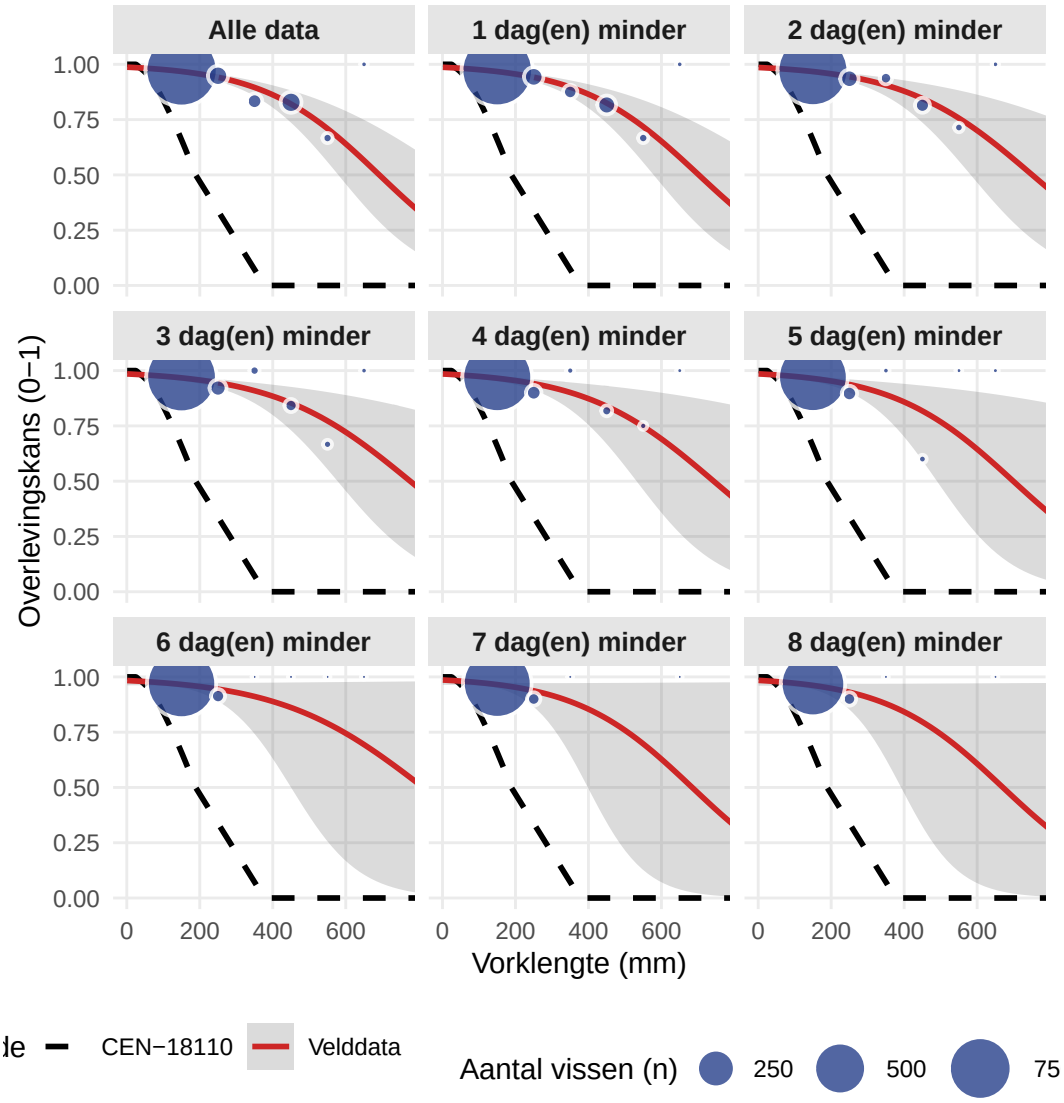
Figuur B.1: Vereiste steekproefomvang voor de validatie van het theoretische overlevingsmodel per lengteklasse. De groene curve geeft het aantal individuen weer dat noodzakelijk is om een foutmarge van maximaal 10 percent te garanderen binnen een 95% betrouwbaarheidsinterval. De stijgende trend bij grotere vislengtes reflecteert de toenemende binomiale variantie naarmate de theoretische overlevingskans de 50% nadert. Er is een statistische ondergrens van n=10 gehanteerd voor klassen met een (nabij) volledige overleving.

Tabel B.1: Validatie-targets: Benodigd aantal vissen (N) voor een precisie van +/- 10% vergeleken met de huidige vangst (n) per interval van 50 mm adhv een precisie-analyse.

Interval	Voorspelde Overleving (CEN)	Huidig aantal (n)	Benodigd (N)	Tekort (bij te vangen)	Status
50 - 100 mm	0.91	0	32	32	tekort
100 - 150 mm	0.75	809	73	0	voldoende
150 - 200 mm	0.56	206	95	0	voldoende
200 - 250 mm	0.40	48	93	45	tekort
250 - 300 mm	0.27	10	76	66	tekort
300 - 350 mm	0.14	9	47	38	tekort

Tabel B.1: Validatie-targets: Benodigd aantal vissen (N) voor een precisie van +/- 10% vergeleken met de huidige vangst (n) per interval van 50 mm adhv een precisie-analyse.

Interval	Voorspelde Overleving (CEN)	Huidig aantal (n)	Benodigd (N)	Tekort (bij te vangen)	Status
350 - 400 mm	0.02	21	10	0	voldoende
400 - 450 mm	0.00	40	10	0	voldoende
450 - 500 mm	0.00	24	10	0	voldoende
500 - 550 mm	0.00	4	10	6	tekort
550 - 600 mm	0.00	5	10	5	tekort
600 - 650 mm	0.00	3	10	7	tekort
650 - 700 mm	0.00	0	10	10	tekort
700 - 750 mm	0.00	0	10	10	tekort



Figuur B.2: Gevoeligheidsanalyse van de modelbetrouwbaarheid op basis van de duur van de meetcampagne. De linksboven gepresenteerde plot toont de volledige dataset; opeenvolgende panelen tonen de cumulatieve impact bij het stapsgewijs inkorten van de onderzoeksperiode. De rode lijn (velddata GLM) wordt afgezet tegen de zwarte stippellijn (CEN-18110 referentie), waarbij de blauwe punten de geaggregeerde overleving per lengte-interval (100 mm) weergeven.

C OVERZICHTSTABEL

Tabel C.1: Overzicht van het totaal aantal individuen (N), het aantal sterfgevallen (Dood) en de mortaliteit, onderverdeeld per soort en lengteklasse. Individuen kleiner dan 10 cm zijn ter informatie opgenomen, maar blijven buiten beschouwing in de verdere statistische analyses.

Soort	Lengteklasse (mm)	N	Dood	Mortaliteit (%)
baars	(60,70]	1	0	0.0
baars	(70,80]	5	0	0.0
baars	(80,90]	51	0	0.0
baars	(90,100]	96	1	1.0
baars	(100,110]	50	0	0.0
baars	(110,120]	12	0	0.0
baars	(120,130]	7	0	0.0
baars	(130,140]	2	0	0.0
baars	(140,150]	1	0	0.0
baars	(160,170]	2	0	0.0
baars	(170,180]	2	0	0.0
baars	(200,210]	1	0	0.0
baars	(230,240]	1	0	0.0
blankvoorn	(30,40]	2	2	100.0
blankvoorn	(40,50]	2	1	50.0
blankvoorn	(50,60]	2	1	50.0
blankvoorn	(60,70]	7	2	28.6
blankvoorn	(70,80]	77	5	6.5
blankvoorn	(80,90]	81	6	7.4
blankvoorn	(90,100]	31	2	6.5
blankvoorn	(100,110]	100	4	4.0
blankvoorn	(110,120]	106	1	0.9
blankvoorn	(120,130]	48	2	4.2
blankvoorn	(130,140]	42	1	2.4
blankvoorn	(140,150]	46	1	2.2
blankvoorn	(150,160]	23	0	0.0
blankvoorn	(160,170]	12	0	0.0
blankvoorn	(170,180]	6	0	0.0
blankvoorn	(180,190]	4	1	25.0
blankvoorn	(220,230]	1	0	0.0
blauwband	(50,60]	1	0	0.0
brasem	(10,20]	1	0	0.0
brasem	(50,60]	2	2	100.0
brasem	(60,70]	16	6	37.5
brasem	(70,80]	18	2	11.1
brasem	(80,90]	50	7	14.0
brasem	(90,100]	204	11	5.4
brasem	(100,110]	94	2	2.1

Tabel C.1: Overzicht van het totaal aantal individuen (N), het aantal sterfgevallen (Dood) en de mortaliteit, onderverdeeld per soort en lengteklasse. Individuen kleiner dan 10 cm zijn ter informatie opgenomen, maar blijven buiten beschouwing in de verdere statistische analyses.

Soort	Lengteklasse (mm)	N	Dood	Mortaliteit (%)
brasem	(110,120]	4	0	0.0
brasem	(140,150]	9	1	11.1
brasem	(150,160]	5	1	20.0
brasem	(160,170]	5	0	0.0
brasem	(170,180]	10	1	10.0
brasem	(180,190]	3	0	0.0
brasem	(190,200]	7	1	14.3
brasem	(200,210]	5	0	0.0
brasem	(210,220]	1	0	0.0
brasem	(220,230]	3	0	0.0
brasem	(230,240]	1	0	0.0
brasem	(240,250]	3	0	0.0
brasem	(280,290]	1	0	0.0
brasem	(290,300]	1	0	0.0
brasem	(310,320]	3	1	33.3
brasem	(320,330]	1	0	0.0
brasem	(340,350]	3	1	33.3
brasem	(350,360]	2	0	0.0
brasem	(360,370]	4	2	50.0
brasem	(370,380]	2	1	50.0
brasem	(380,390]	5	0	0.0
brasem	(390,400]	2	0	0.0
brasem	(400,410]	6	0	0.0
brasem	(410,420]	12	1	8.3
brasem	(420,430]	1	0	0.0
brasem	(430,440]	5	1	20.0
brasem	(440,450]	15	5	33.3
brasem	(450,460]	12	1	8.3
brasem	(460,470]	6	2	33.3
brasem	(470,480]	2	0	0.0
brasem	(480,490]	1	0	0.0
brasem	(490,500]	1	0	0.0
driedoornige stekelbaars	(40,50]	1	0	0.0
giebel	(110,120]	1	1	100.0
giebel	(120,130]	4	0	0.0
giebel	(130,140]	1	0	0.0
giebel	(140,150]	1	0	0.0
giebel	(170,180]	1	0	0.0
giebel	(190,200]	3	1	33.3
giebel	(210,220]	1	0	0.0
giebel	(220,230]	1	1	100.0
giebel	(270,280]	2	0	0.0
giebel	(280,290]	2	0	0.0
giebel	(370,380]	1	0	0.0
karper	(580,590]	1	1	100.0
kolblei	(60,70]	1	0	0.0

Tabel C.1: Overzicht van het totaal aantal individuen (N), het aantal sterfgevallen (Dood) en de mortaliteit, onderverdeeld per soort en lengteklasse. Individuen kleiner dan 10 cm zijn ter informatie opgenomen, maar blijven buiten beschouwing in de verdere statistische analyses.

Soort	Lengteklasse (mm)	N	Dood	Mortaliteit (%)
kolblei	(80,90]	1	0	0.0
kolblei	(100,110]	3	0	0.0
kolblei	(110,120]	7	0	0.0
kolblei	(120,130]	9	0	0.0
kolblei	(130,140]	16	0	0.0
kolblei	(140,150]	22	0	0.0
kolblei	(150,160]	21	0	0.0
kolblei	(160,170]	31	0	0.0
kolblei	(170,180]	14	0	0.0
kolblei	(180,190]	9	0	0.0
kolblei	(190,200]	11	0	0.0
kolblei	(200,210]	8	0	0.0
kolblei	(210,220]	7	0	0.0
kolblei	(220,230]	5	0	0.0
kolblei	(240,250]	2	0	0.0
kolblei	(270,280]	1	1	100.0
kolblei	(280,290]	1	0	0.0
kolblei	(290,300]	1	0	0.0
kolblei	(300,310]	1	0	0.0
kolblei	(310,320]	1	0	0.0
paling	(350,360]	1	0	0.0
paling	(360,370]	1	0	0.0
paling	(390,400]	1	0	0.0
paling	(410,420]	2	0	0.0
paling	(420,430]	1	0	0.0
paling	(430,440]	1	0	0.0
paling	(440,450]	1	0	0.0
paling	(450,460]	2	0	0.0
paling	(480,490]	2	0	0.0
paling	(500,510]	1	0	0.0
paling	(510,520]	2	0	0.0
paling	(520,530]	2	0	0.0
paling	(530,540]	1	0	0.0
paling	(540,550]	4	0	0.0
paling	(560,570]	1	0	0.0
paling	(580,590]	1	0	0.0
paling	(600,610]	3	0	0.0
paling	(630,640]	1	0	0.0
paling	(650,660]	1	0	0.0
paling	(670,680]	1	0	0.0
paling	(680,690]	2	0	0.0
paling	(690,700]	1	0	0.0
paling	(720,730]	1	0	0.0
paling	(730,740]	2	0	0.0
paling	(740,750]	1	0	0.0
paling	(750,760]	2	0	0.0

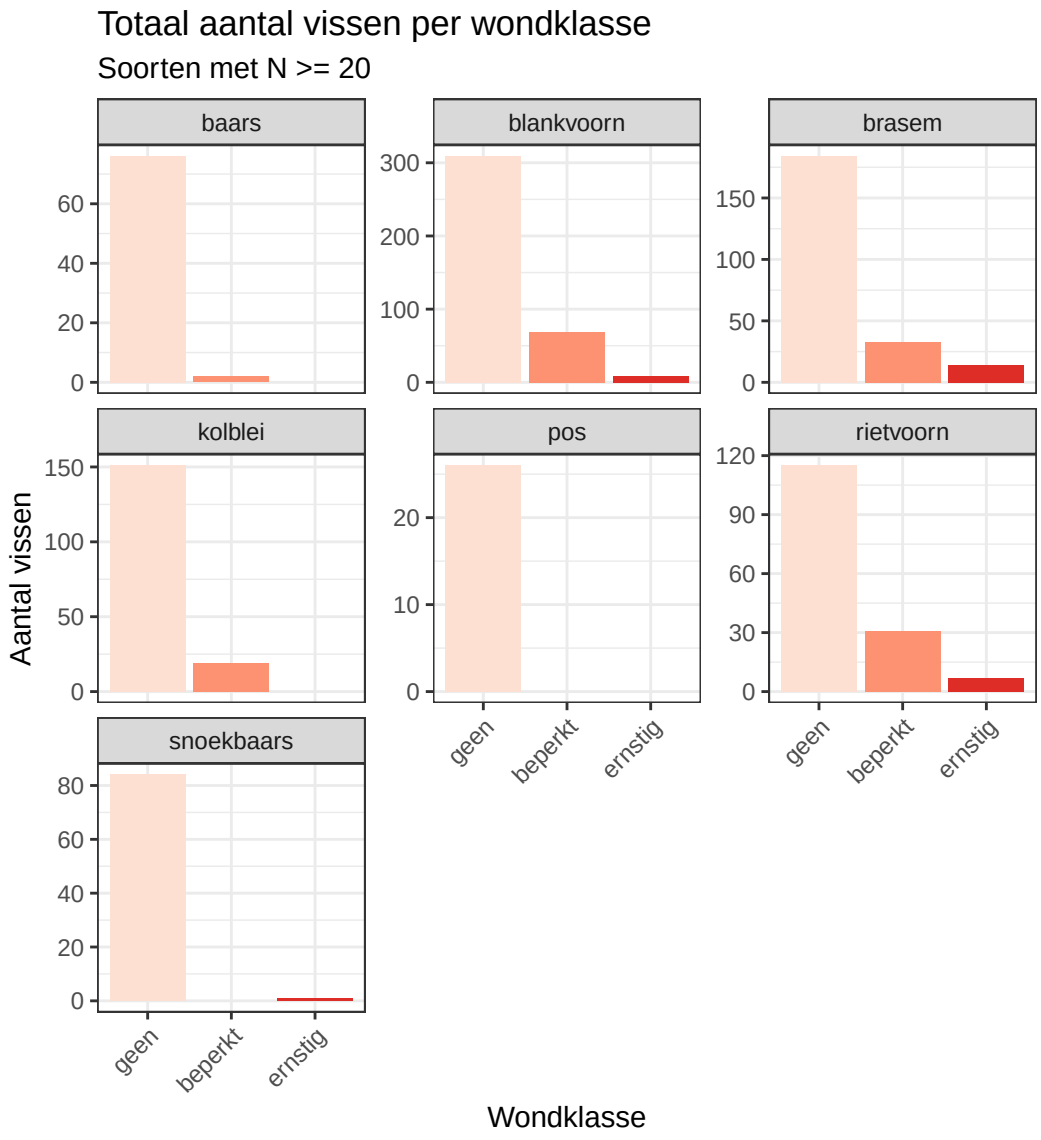
Tabel C.1: Overzicht van het totaal aantal individuen (N), het aantal sterfgevallen (Dood) en de mortaliteit, onderverdeeld per soort en lengteklasse. Individuen kleiner dan 10 cm zijn ter informatie opgenomen, maar blijven buiten beschouwing in de verdere statistische analyses.

Soort	Lengteklasse (mm)	N	Dood	Mortaliteit (%)
paling	(810,820]	1	0	0.0
pos	(60,70]	2	0	0.0
pos	(70,80]	37	0	0.0
pos	(80,90]	73	0	0.0
pos	(90,100]	27	0	0.0
pos	(100,110]	13	0	0.0
pos	(110,120]	7	0	0.0
pos	(120,130]	5	0	0.0
pos	(130,140]	1	0	0.0
rietvoorn	(40,50]	3	0	0.0
rietvoorn	(50,60]	10	1	10.0
rietvoorn	(60,70]	6	1	16.7
rietvoorn	(70,80]	26	1	3.8
rietvoorn	(80,90]	105	10	9.5
rietvoorn	(90,100]	101	7	6.9
rietvoorn	(100,110]	56	3	5.4
rietvoorn	(110,120]	46	3	6.5
rietvoorn	(120,130]	34	2	5.9
rietvoorn	(130,140]	10	1	10.0
rietvoorn	(140,150]	5	0	0.0
rietvoorn	(150,160]	2	0	0.0
rietvoorn	(160,170]	1	0	0.0
riviergrondel	(120,130]	2	0	0.0
schubkarper	(540,550]	1	1	100.0
snoek	(290,300]	1	1	100.0
snoek	(330,340]	1	0	0.0
snoek	(570,580]	1	0	0.0
snoek	(610,620]	1	0	0.0
snoekbaars	(70,80]	22	1	4.5
snoekbaars	(80,90]	95	1	1.1
snoekbaars	(90,100]	64	1	1.6
snoekbaars	(100,110]	20	0	0.0
snoekbaars	(110,120]	17	0	0.0
snoekbaars	(120,130]	8	0	0.0
snoekbaars	(130,140]	8	0	0.0
snoekbaars	(140,150]	2	0	0.0
snoekbaars	(150,160]	3	0	0.0
snoekbaars	(160,170]	4	0	0.0
snoekbaars	(170,180]	6	1	16.7
snoekbaars	(180,190]	2	0	0.0
snoekbaars	(190,200]	4	0	0.0
snoekbaars	(210,220]	2	0	0.0
snoekbaars	(220,230]	2	0	0.0
snoekbaars	(500,510]	1	0	0.0
snoekbaars	(510,520]	1	0	0.0
snoekbaars	(530,540]	1	1	100.0

Tabel C.1: Overzicht van het totaal aantal individuen (N), het aantal sterfgevallen (Dood) en de mortaliteit, onderverdeeld per soort en lengteklasse. Individuen kleiner dan 10 cm zijn ter informatie opgenomen, maar blijven buiten beschouwing in de verdere statistische analyses.

Soort	Lengteklasse (mm)	N	Dood	Mortaliteit (%)
snoekbaars	(540,550]	2	0	0.0
snoekbaars	(590,600]	1	0	0.0
snoekbaars	(620,630]	1	0	0.0
snoekbaars	(640,650]	1	0	0.0
vetje	(30,40]	6	0	0.0
vetje	(40,50]	7	6	85.7
vetje	(50,60]	1	0	0.0
vetje	(60,70]	1	1	100.0
zeelt	(40,50]	2	0	0.0
zeelt	(50,60]	1	0	0.0
zeelt	(60,70]	1	0	0.0
zeelt	(90,100]	1	0	0.0
zeelt	(100,110]	1	0	0.0
zeelt	(110,120]	1	0	0.0
zeelt	(120,130]	3	0	0.0
zeelt	(130,140]	1	0	0.0
zeelt	(220,230]	1	0	0.0
zeelt	(340,350]	1	0	0.0
zeelt	(350,360]	1	0	0.0
zeelt	(370,380]	1	0	0.0
zeelt	(380,390]	1	0	0.0
zeelt	(400,410]	1	0	0.0
zeelt	(420,430]	2	1	50.0
zonnebaars	(70,80]	1	0	0.0
zonnebaars	(80,90]	1	0	0.0
zonnebaars	(90,100]	1	0	0.0
zonnebaars	(100,110]	2	0	0.0
zwartbekgrondel	(70,80]	1	0	0.0
zwartbekgrondel	(120,130]	1	0	0.0

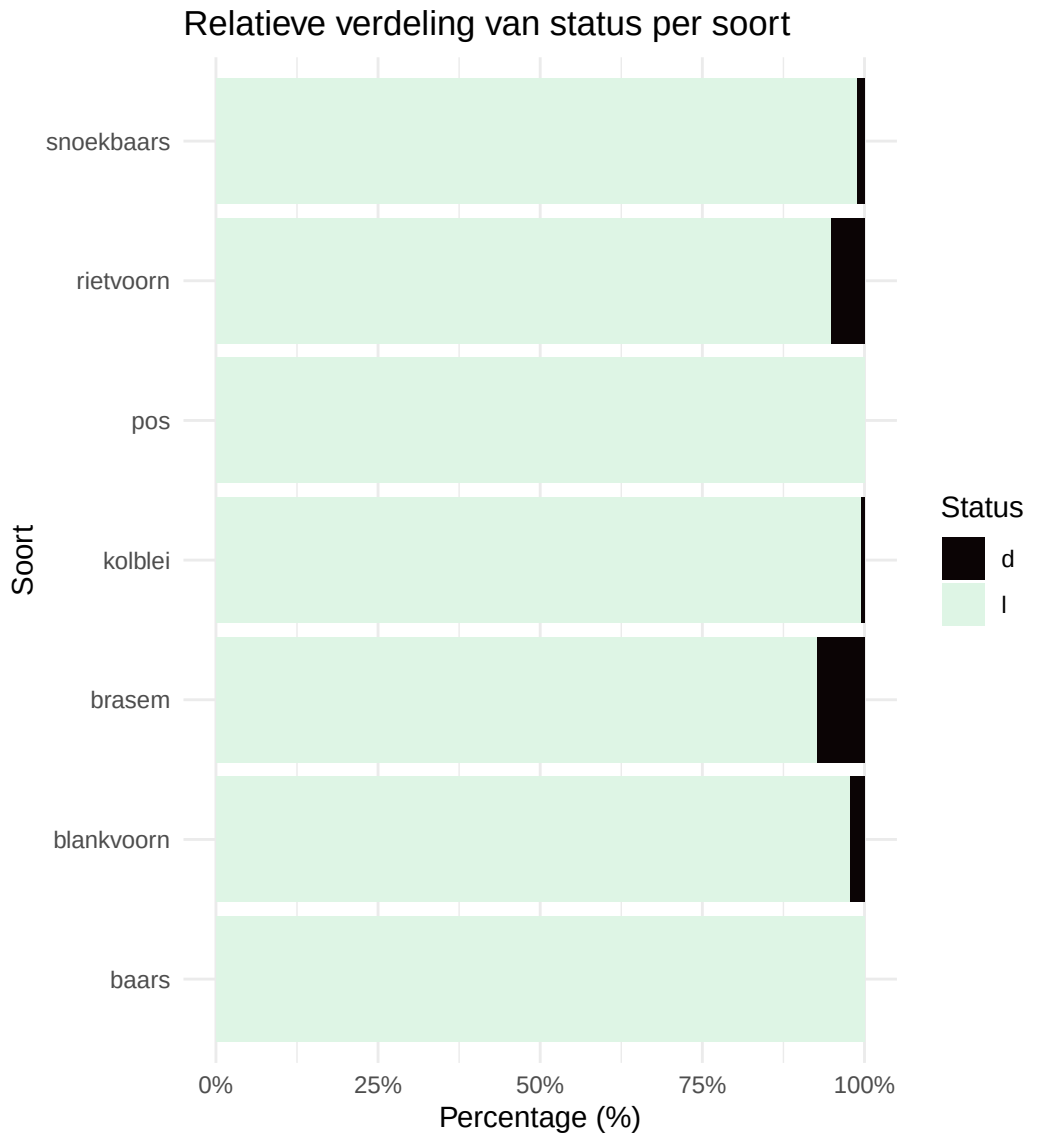
D GRAAD VAN VERWONDING EN WONDKLASSE PER SOORT



Figuur D.1: Frequentieverdeling van de bemonsterde vispopulaties over de verschillende letselklassen (CEN-normering). De staafdiagrammen tonen de absolute aantallen per wondklasse voor alle soorten met een minimale steekproefomvang van 20 individuen. De kleurintensiteit correleert met de toenemende ernst van het letsel, waarbij klasse 1 staat voor 'geen schade' en hogere klassen duiden op progressief zwaardere beschadigingen. De vrije y-as per paneel maakt een gedetailleerde beoordeling van de schadeverdeling binnen elke soort mogelijk.

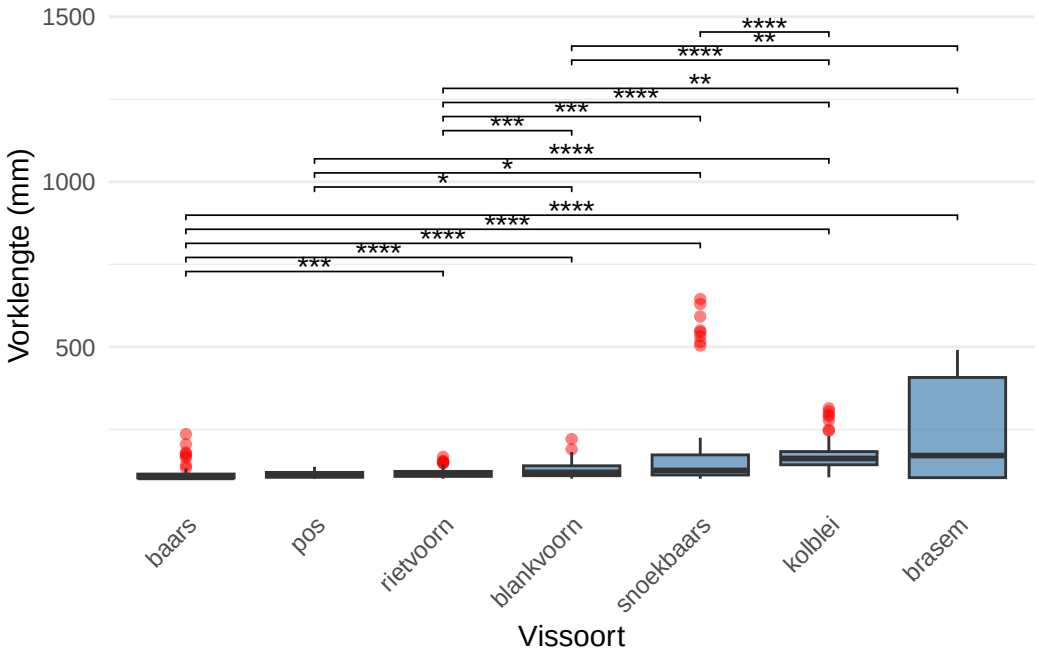


Figuur D.2: Frequentieverdeling van de bemonsterde vispopulaties over de verschillende schade-klassen (CEN-normering). De staafdiagrammen tonen de absolute aantallen per wondklasse voor alle soorten met een minimale steekproefomvang van 20 individuen.

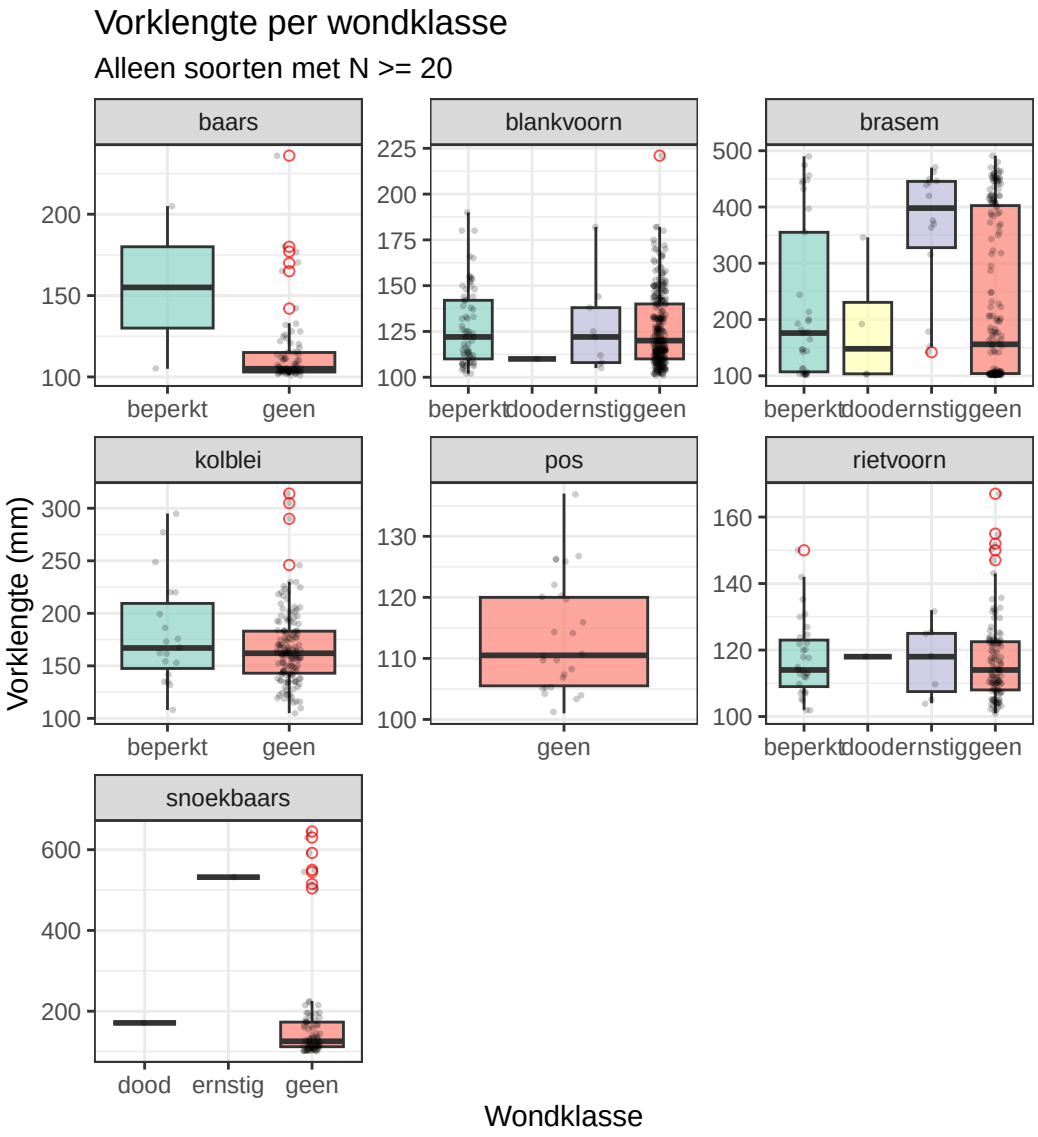


Figuur D.3: Frequentieverdeling van de bemonsterde vispopulaties over de verschillende statussen (CEN-normering). De staafdiagrammen tonen de absolute aantallen per status voor alle soorten met een minimale steekproefomvang van 20 individuen. 'd' is dood en 'l' is levend.

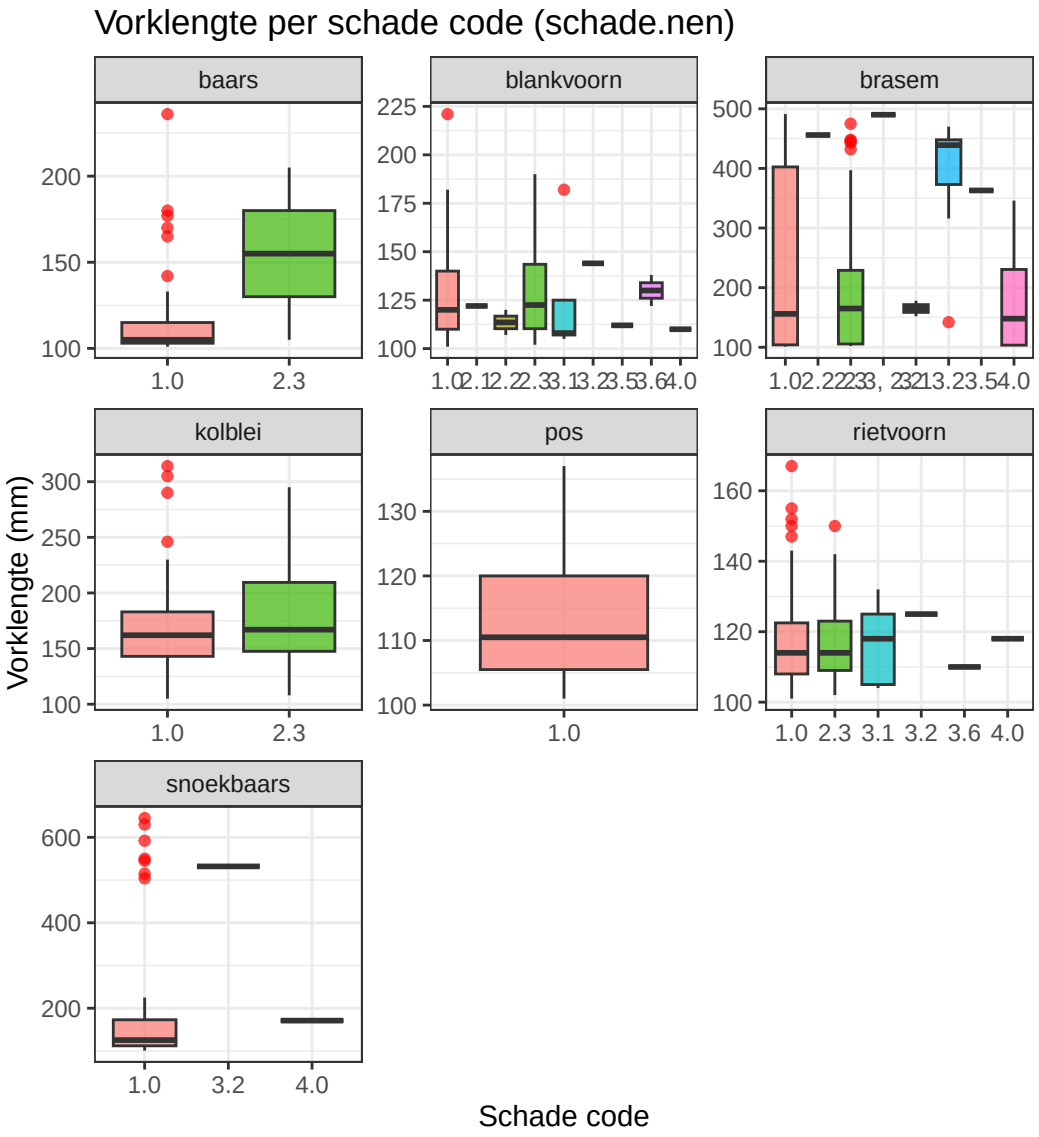
E VORKLENGTE PER WONDKLASSE, SCHADEKLASSE EN STATUS PER SOORT



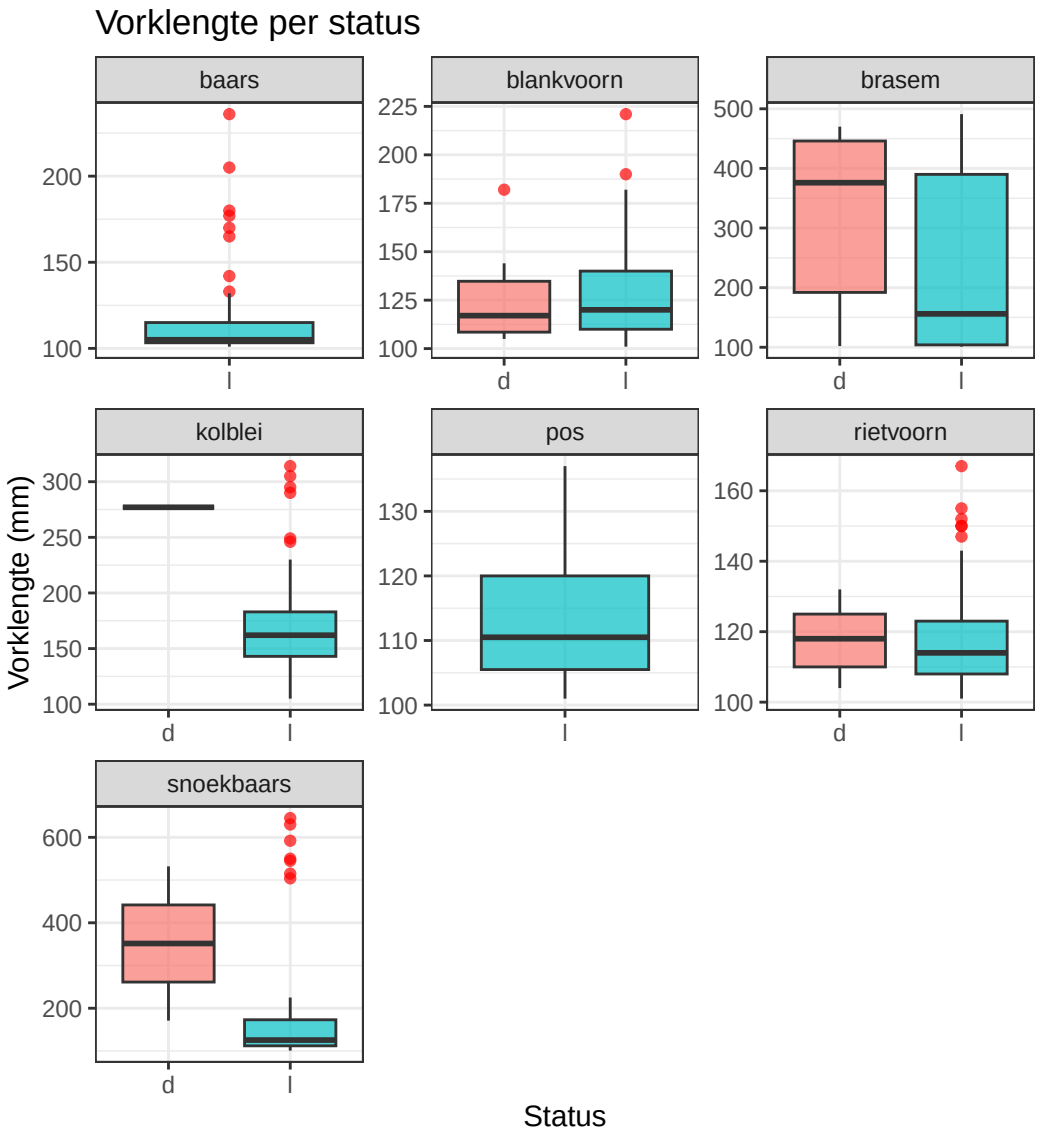
Figuur E.1: Boxplot van de vorklengte per vissoort met aanduiding van statistisch significante verschillen (Pairwise Wilcoxon-test met Bonferroni-correctie).



Figuur E.2: Relatie tussen de vorklengte (mm) en de ernst van het toegebrachte letsel per vissoort ($n > 20$). De boxplots geven de mediaan en kwartielen weer van de lengteverdeling binnen elke wondklasse (CEN-normering). Rode cirkels markeren uitschieters (outliers), terwijl de individuele observaties zijn weergegeven via een jitter-plot om de datadichtheid te illustreren. De vrije schaalverdeling per paneel accentueert soortspecifieke trends in letselgevoeligheid gerelateerd aan lichaamsomvang.



Figuur E.3: Relatie tussen de vorklengte (mm) en de schade code per vissoort ($n > 20$). De boxplots geven de mediaan en kwartielen weer van de lengteverdeling binnen elke schade code (CEN-normering). Rode cirkels markeren uitschieters (outliers), terwijl de individuele observaties zijn weergegeven via een jitter-plot om de datadichtheid te illustreren. De vrije schaalverdeling per paneel accentueert soortspecifieke trends in schadegevoeligheid gerelateerd aan lichaamsomvang.



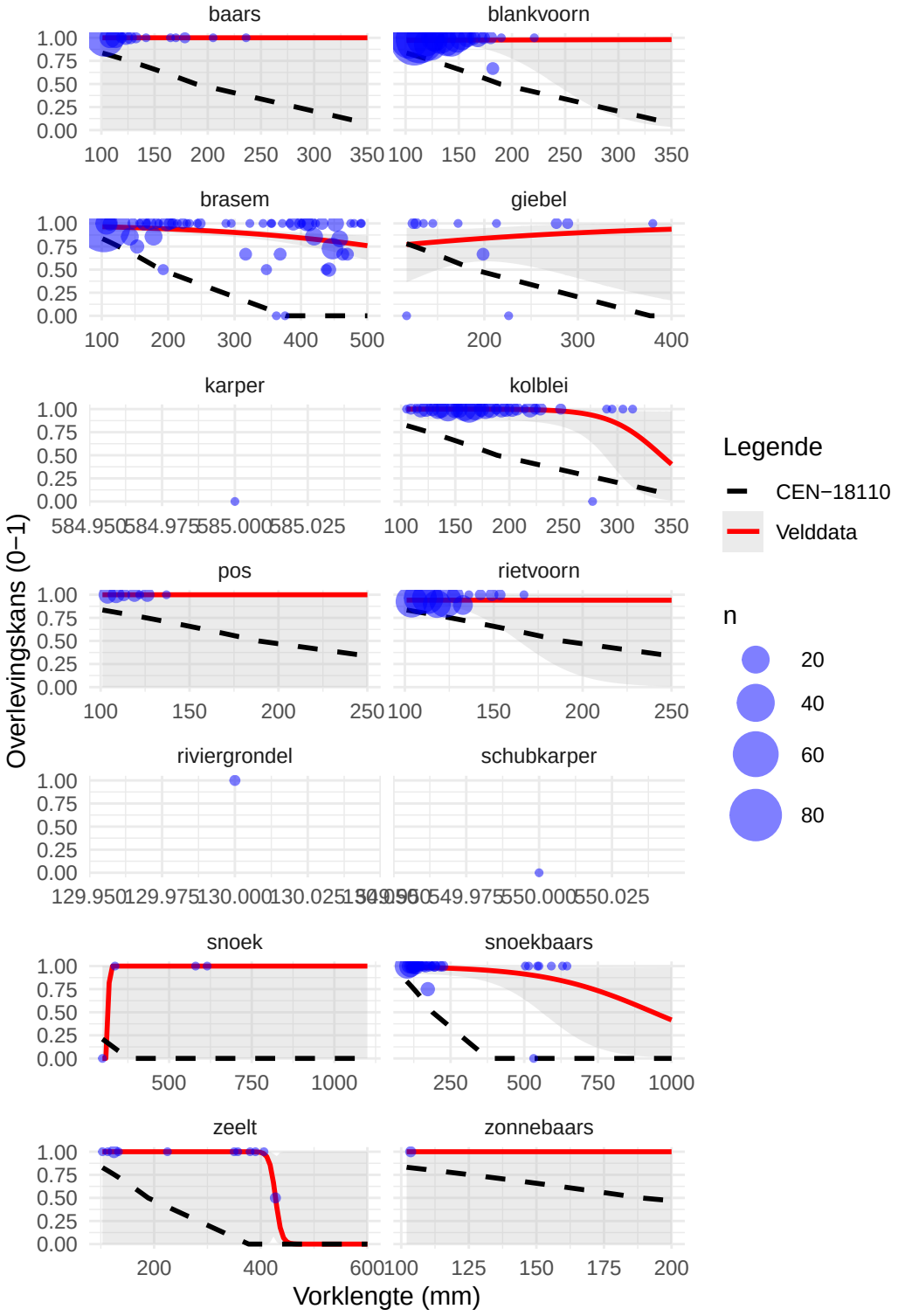
Figuur E.4: Relatie tussen de vorklengte (mm) en de status per vissoort ($n > 20$). De boxplots geven de mediaan en kwartielen weer van de lengteverdeling binnen elke wondklasse (CEN-normering). Rode cirkels markeren uitschieters (outliers), terwijl de individuele observaties zijn weergegeven via een jitter-plot om de datadichtheid te illustreren. De vrije schaalverdeling per paneel accentueert soortspecifieke trends in status gerelateerd aan lichaamsomvang. 'd' is dood en 'l' is levend.

F OVERLEVINGSMODELLEN

Tabel F.1: Coëfficiënten van het logistische regressiemodel voor alle schubvissen .

Variabele	Log-Odds	Odds Ratio	Std. Error	95% BI Laag	95% BI Hoog	p-waarde
(Intercept)	19.21184	2.205955e+08	737.49426	0.00000	1.578621e+109	0.97922
vorklengte	-0.00553	9.944800e-01	0.00149	0.99144	9.973100e-01	< 0.001
soortblankvoorn	-14.87784	0.000000e+00	737.49431	0.00000	1.194072e+08	0.9839
soortbrasem	-15.32290	0.000000e+00	737.49434	0.00000	7.651502e+07	0.98342
soortkolblei	-13.12921	0.000000e+00	737.49492	0.00000	6.862202e+08	0.9858
soortpos	-0.01536	9.847600e-01	1476.35621	0.00000	7.924078e+11	0.99999
soortrietvoorn	-15.78376	0.000000e+00	737.49432	0.00000	4.826068e+07	0.98293
soortsnoekbaars	-14.10626	0.000000e+00	737.49468	0.00000	6.148729e+07	0.98474

F.1 OVERLEVINGSMODELLEN MET ONDERSCHEID TUSSEN SOORTEN

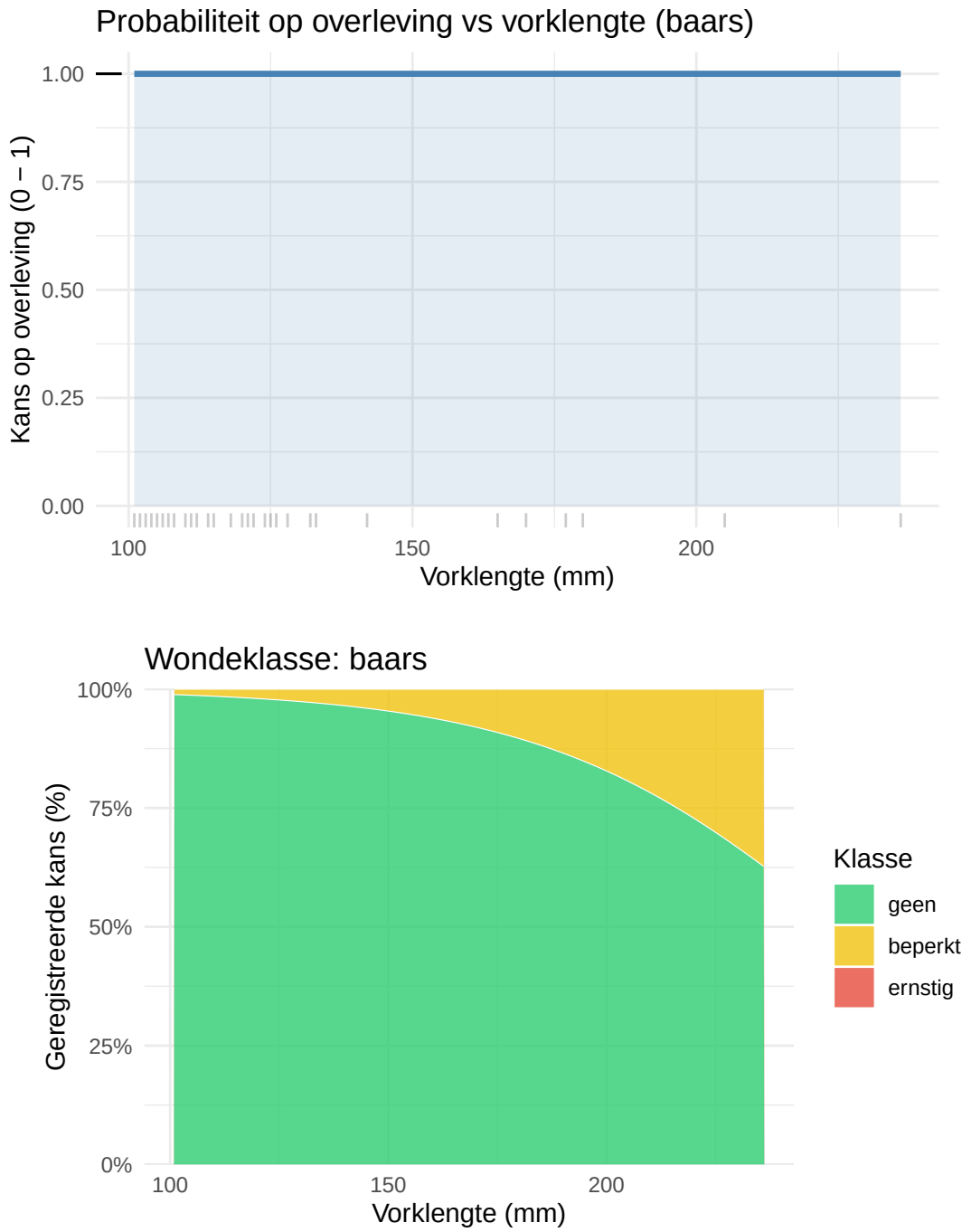


Figuur F.1: Vergelijking tussen de waargenomen veldoverleving en de theoretische CEN-18110:2025 norm per vissoort. De rode ononderbroken lijn geeft het logistische regressiemodel (GLM) weer op basis van individuele veldwaarnemingen, inclusief het 95% betrouwbaarheidsinterval (grijs vlak). De zwarte onderbroken lijn representeert de theoretische overleving volgens de CEN-standaard. De blauwe cirkels tonen de gemiddelde overleving per lengte-interval van 5 mm, waarbij de grootte van de cirkel proportioneel is aan het aantal geobserveerde individuen (n).

F.1.1 Overlevingsmodel baars

Tabel F.2: Coëfficiënten van het logistische regressiemodel voor baars .

Variabele	Log-Odds	Odds Ratio	Std. Error	95% BI Laag	95% BI Hoog	p-waarde
(Intercept)	26.56607	344744300657	40323.11	0	Inf	0.99947



Figuur F.2: Resultaten van de multinominale regressie voor de wondklasse-verdeling bij baars als functie van de vorklengte. De gekleurde vlakken representeren de voorspelde kans op een schadevrije passage (groen), beperkte verwondingen (geel) of ernstige verwondingen (rood). De lijnen tussen de kleurvlakken tonen de verschuiving in risicoprofiel naarmate de vislengte toeneemt.

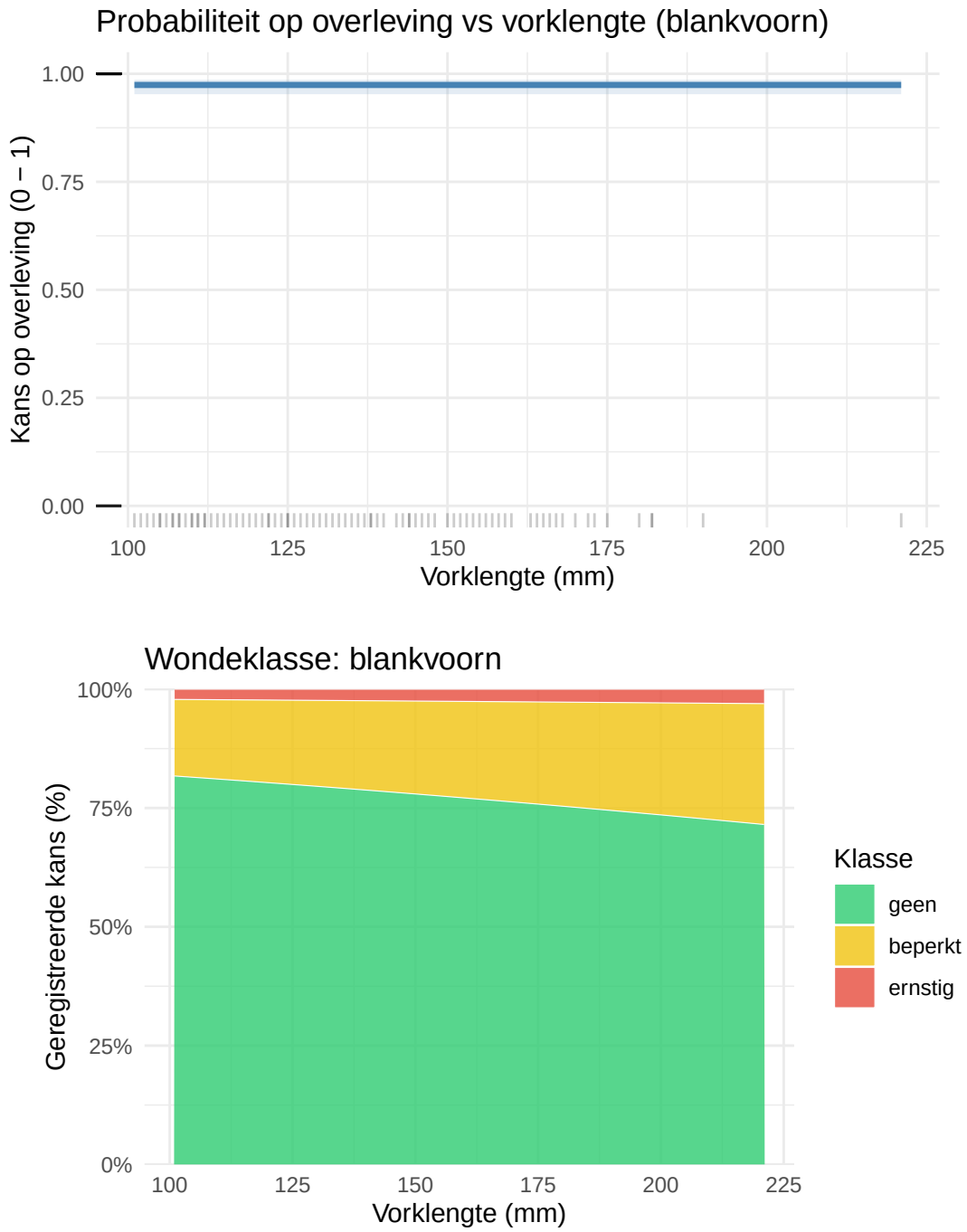
Tabel F.3: Multinomiale regressie voor de kans op een wondklasse bij baars (referentie = geen)

categorie	term	estimate	std_error	z_value	p_value	odds_ratio
beperkt	(Intercept)	-7.409	2.440	-3.037	0.002	0.001
beperkt	vorklengte	0.029	0.016	1.857	0.063	1.030

F.1.2 Overlevingsmodel blankvoorn

Tabel F.4: Coëfficiënten van het logistische regressiemodel voor blankvoorn .

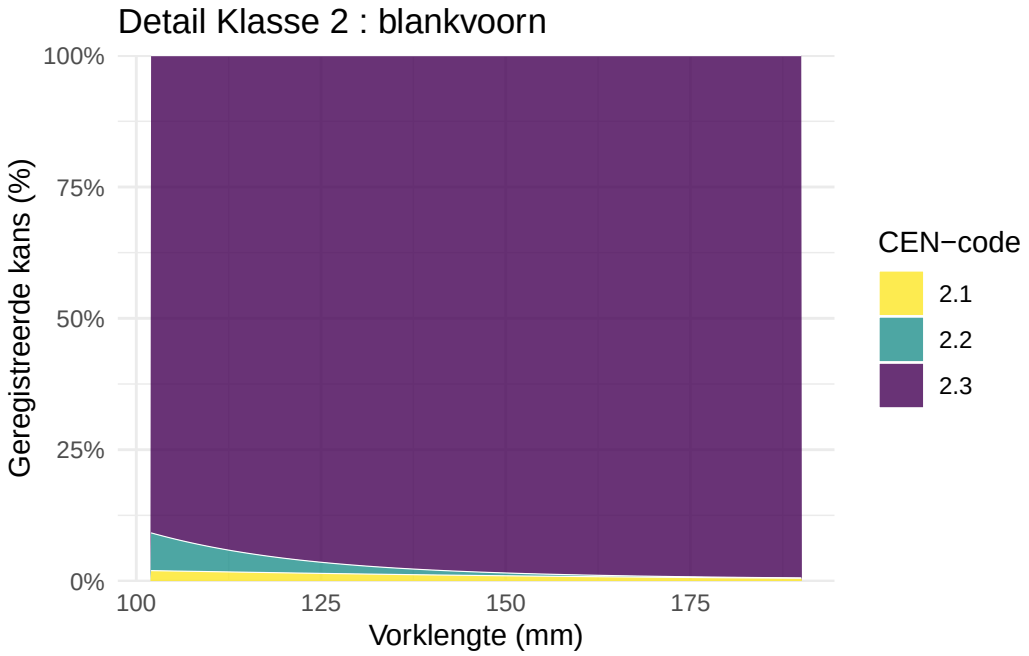
Variabele	Log-Odds	Odds Ratio	Std. Error	95% BI Laag	95% BI Hoog	p-waarde
(Intercept)	3.63231	37.8	0.32038	21.34096	75.93799	< 0.001



Figuur F.3: Resultaten van de multinominale regressie voor de wondklasse-verdeling bij blankvoorn als functie van de vorklengte. De gekleurde vlakken representeren de voorspelde kans op een schadevrije passage (groen), beperkte verwondingen (geel) of ernstige verwondingen (rood). De lijnen tussen de kleurvlakken tonen de verschuiving in risicoprofiel naarmate de vislengte toeneemt.

Tabel F.5: Multinomiale regressie voor de kans op een wondklasse bij blankvoorn (referentie = geen)

categorie	term	estimate	std_error	z_value	p_value	odds_ratio
beperkt	(Intercept)	-2.120	0.841	-2.521	0.012	0.120
ernstig	(Intercept)	-4.039	2.134	-1.892	0.058	0.018
beperkt	vorklengte	0.005	0.007	0.752	0.452	1.005
ernstig	vorklengte	0.004	0.017	0.240	0.810	1.004

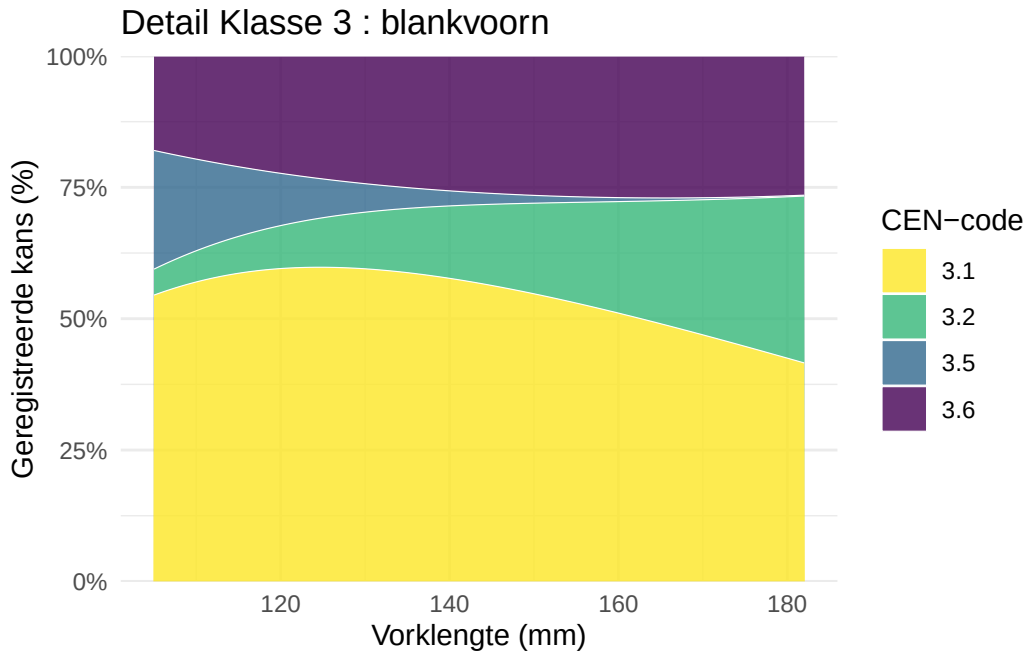


Tabel F.6: Multinomiale regressie voor de kans op een CEN-code bij blankvoorn (referentie = 2.1)

categorie	term	estimate	std_error	z_value	p_value	odds_ratio
2.2	(Intercept)	5.353	9.982	0.536	0.592	211.337
2.3	(Intercept)	2.202	6.934	0.318	0.751	9.046
2.2	vorklengte	-0.040	0.084	-0.471	0.637	0.961
2.3	vorklengte	0.016	0.056	0.283	0.777	1.016

Tabel F.7: Multinomiale regressie voor de kans op een CEN-code bij blankvoorn (referentie = 3.1)

categorie	term	estimate	std_error	z_value	p_value	odds_ratio
3.2	(Intercept)	-5.306	5.881	-0.902	0.367	0.005
3.5	(Intercept)	5.479	12.311	0.445	0.656	239.531
3.6	(Intercept)	-2.006	4.698	-0.427	0.669	0.135
3.2	vorklengte	0.028	0.042	0.665	0.506	1.028
3.5	vorklengte	-0.061	0.109	-0.558	0.577	0.941
3.6	vorklengte	0.009	0.036	0.237	0.812	1.009

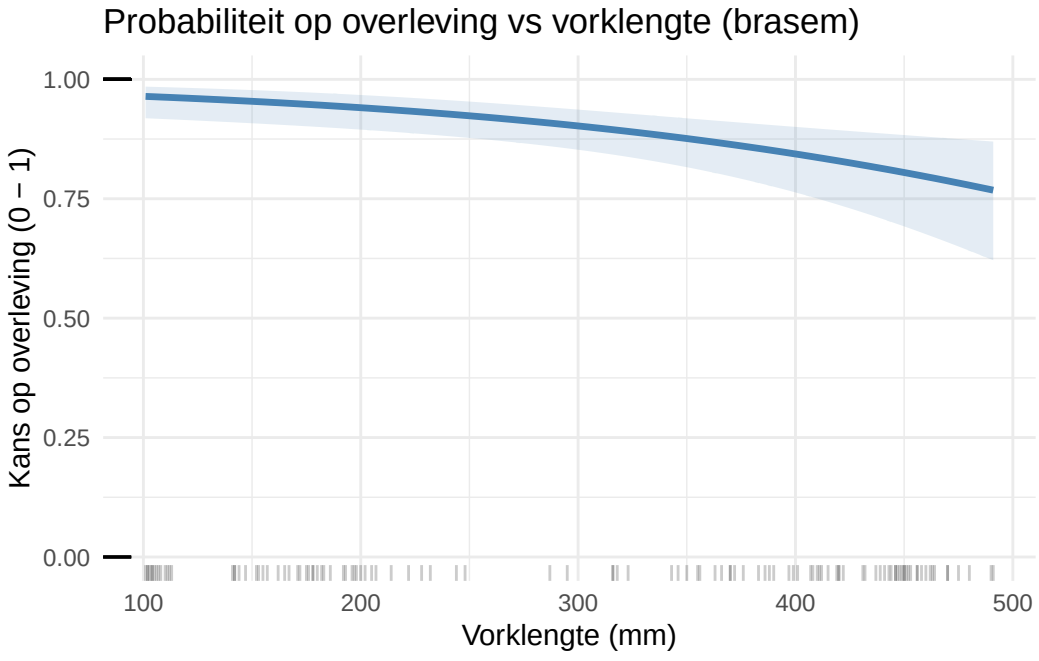


Figuur F.4: Gedetailleerde verdeling van letseltypes binnen Klasse 3 (Ernstig letsel) voor blankvoorn. De vlakken tonen de voorspelde kans op specifieke zware beschadigingen, zoals ernstig schubverlies (3.1), mechanische insnijdingen (3.2) of verbrijzeling/kieuwschade (3.5/3.6), gerelateerd aan de vorklengte.

F.1.3 Overlevingsmodel brasem

Tabel F.8: Coëfficiënten van het logistische regressiemodel voor brasem .

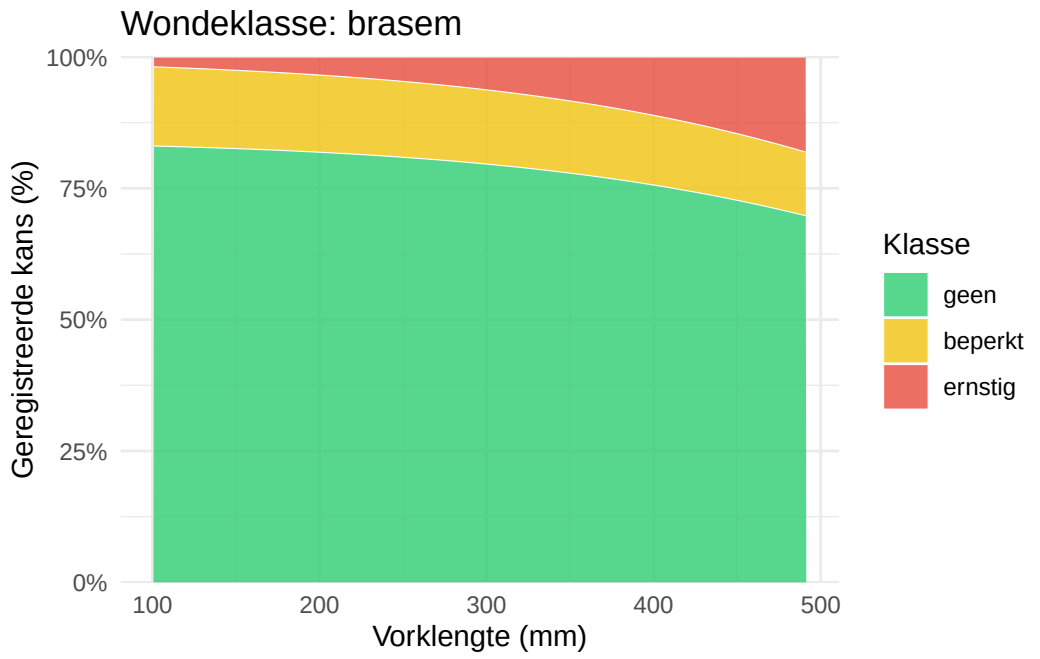
Variabele	Log-Odds	Odds Ratio	Std. Error	95% BI Laag	95% BI Hoog	p-waarde
(Intercept)	3.83884	46.47139	0.59462	16.20976	172.59666	< 0.001
vorklengte	-0.00538	0.99463	0.00166	0.99118	0.99776	0.00121



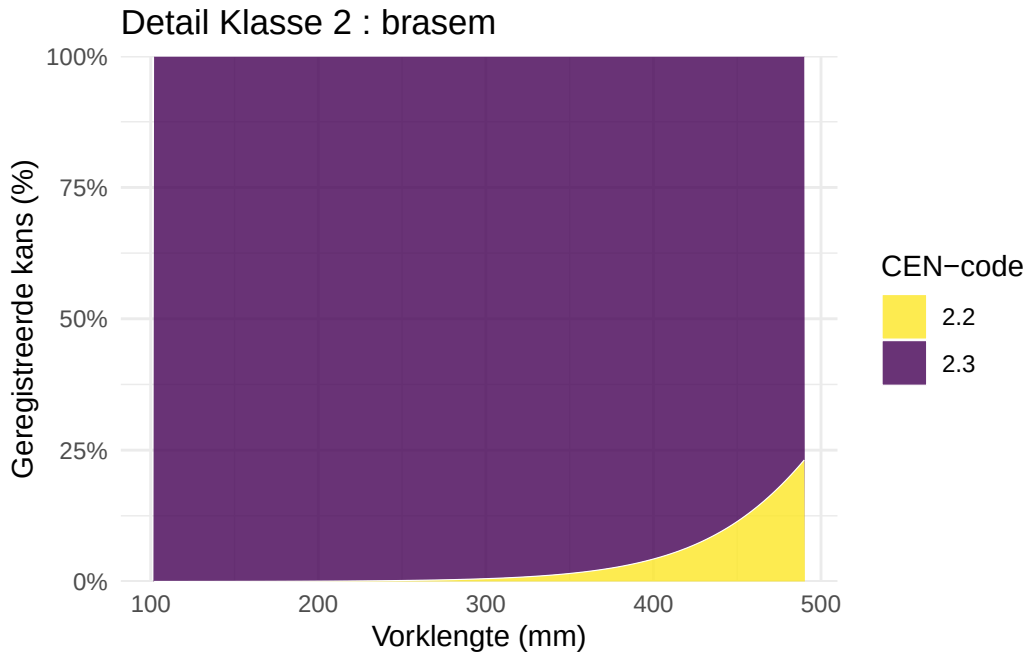
10.21436/inbor.158239472

Tabel F.9: Multinomiale regressie voor de kans op een wondklasse bij brasem (referentie = geen)

categorie	term	estimate	std_error	z_value	p_value	odds_ratio
beperkt	(Intercept)	-1.695	0.357	-4.753	0.000	0.184
ernstig	(Intercept)	-4.417	0.799	-5.528	0.000	0.012
beperkt	vorklengte	0.000	0.001	-0.085	0.932	1.000
ernstig	vorklengte	0.006	0.002	2.929	0.003	1.006

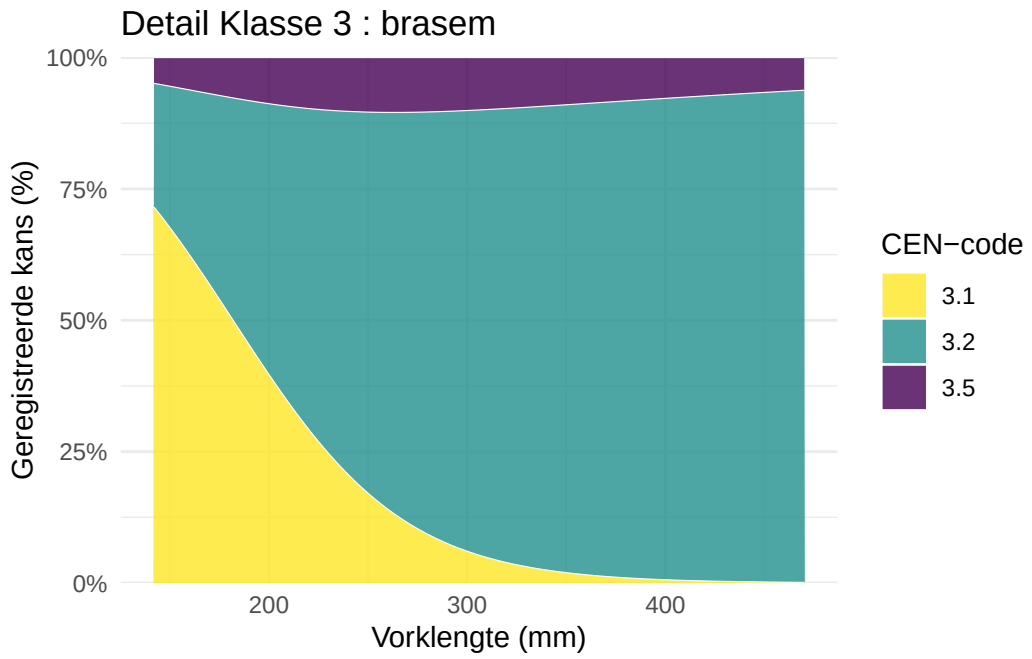


Figuur F.5: Resultaten van de multinominale regressie voor de wondklasse-verdeling bij brasem als functie van de vorklengte. De gekleurde vlakken representeren de voorspelde kans op een schadevrije passage (groen), beperkte verwondingen (geel) of ernstige verwondingen (rood). De lijnen tussen de kleurvlakken tonen de verschuiving in risicoprofiel naarmate de vislengte toeneemt.



Tabel F.10: Multinomiale regressie voor de kans op een CEN-code bij brasem (referentie = 2.2)

categorie	term	estimate	std_error	z_value	p_value	odds_ratio
2.3	(Intercept)	11.587	13.188	0.879	0.380	107684.073
2.3	vorklengte	-0.021	0.029	-0.732	0.464	0.979



Figuur F.6: Gedetailleerde verdeling van letseltypes binnen Klasse 3 (Ernstig letsel) voor brasem De vlakken tonen de voorspelde kans op specifieke zware beschadigingen, zoals ernstig schubverlies (3.1), mechanische insnijdingen (3.2) of verbrijzeling/kieuwschade (3.5/3.6), gerelateerd aan de vorklengte.

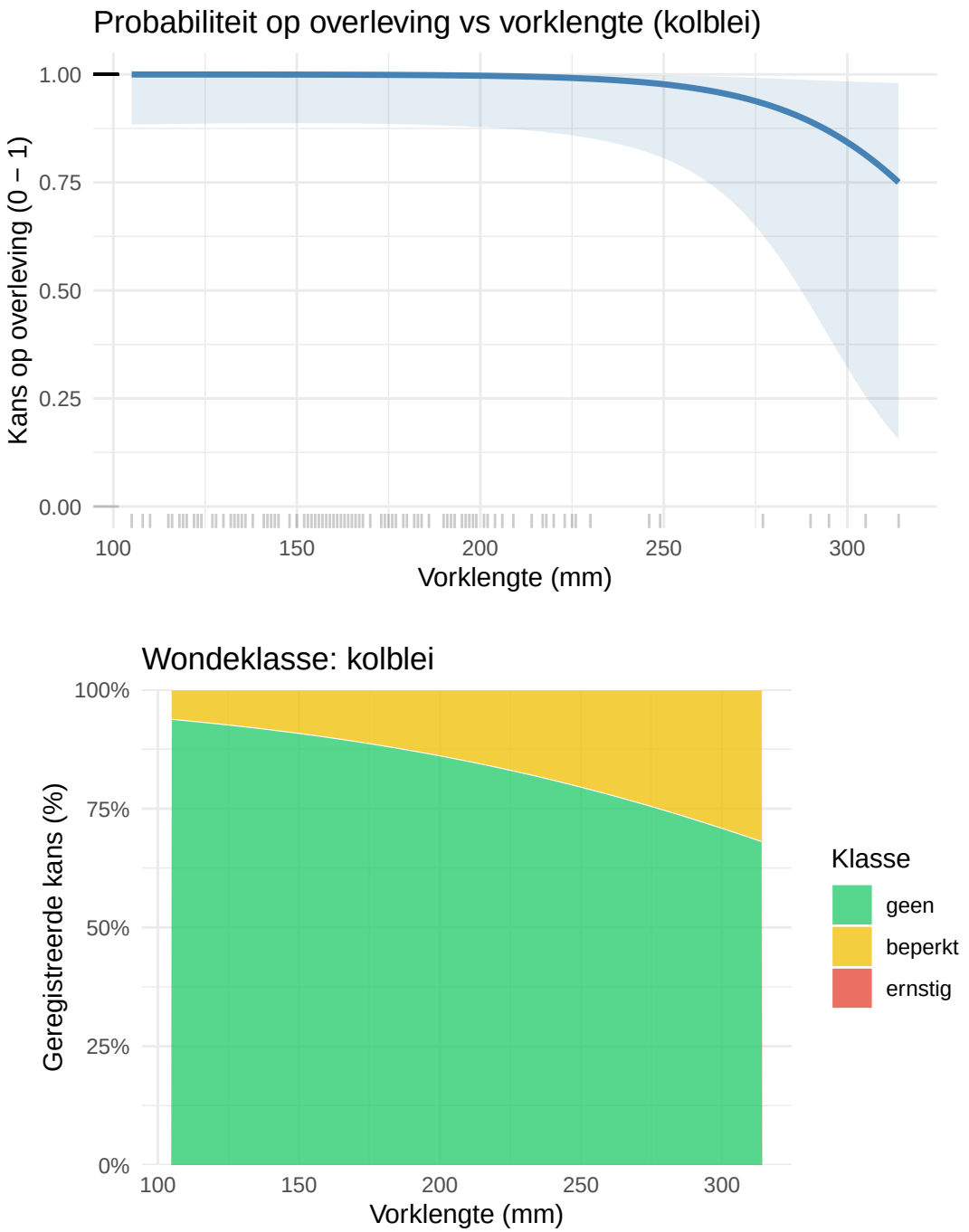
Tabel F.11: Multinomiale regressie voor de kans op een CEN-code bij brasem (referentie = 3.1)

categorie	term	estimate	std_error	z_value	p_value	odds_ratio
3.2	(Intercept)	-4.475	3.321	-1.348	0.178	0.011
3.5	(Intercept)	-5.547	4.590	-1.208	0.227	0.004
3.2	vorklengte	0.024	0.017	1.413	0.158	1.024
3.5	vorklengte	0.020	0.019	1.078	0.281	1.020

F.1.4 Overlevingsmodel kolblei

Tabel F.12: Coëfficiënten van het logistische regressiemodel voor kolblei .

Variabele	Log-Odds	Odds Ratio	Std. Error	95% BI Laag	95% BI Hoog	p-waarde
(Intercept)	14.13780	1.380283e+06	6.27717	296.82192	3.594579e+16	0.02431
vorklengte	-0.04152	9.593300e-01	0.02267	0.88546	9.952900e-01	0.06707



Figuur F.7: Resultaten van de multinominale regressie voor de wondklasse-verdeling bij kolblei als functie van de vorklengte. De gekleurde vlakken representeren de voorspelde kans op een schadevrije passage (groen), beperkte verwondingen (geel) of ernstige verwondingen (rood). De lijnen tussen de kleurvlakken tonen de verschuiving in risicoprofiel naarmate de vislengte toeneemt.

Tabel F.13: Multinomiale regressie voor de kans op een wondklasse bij kolblei (referentie = geen)

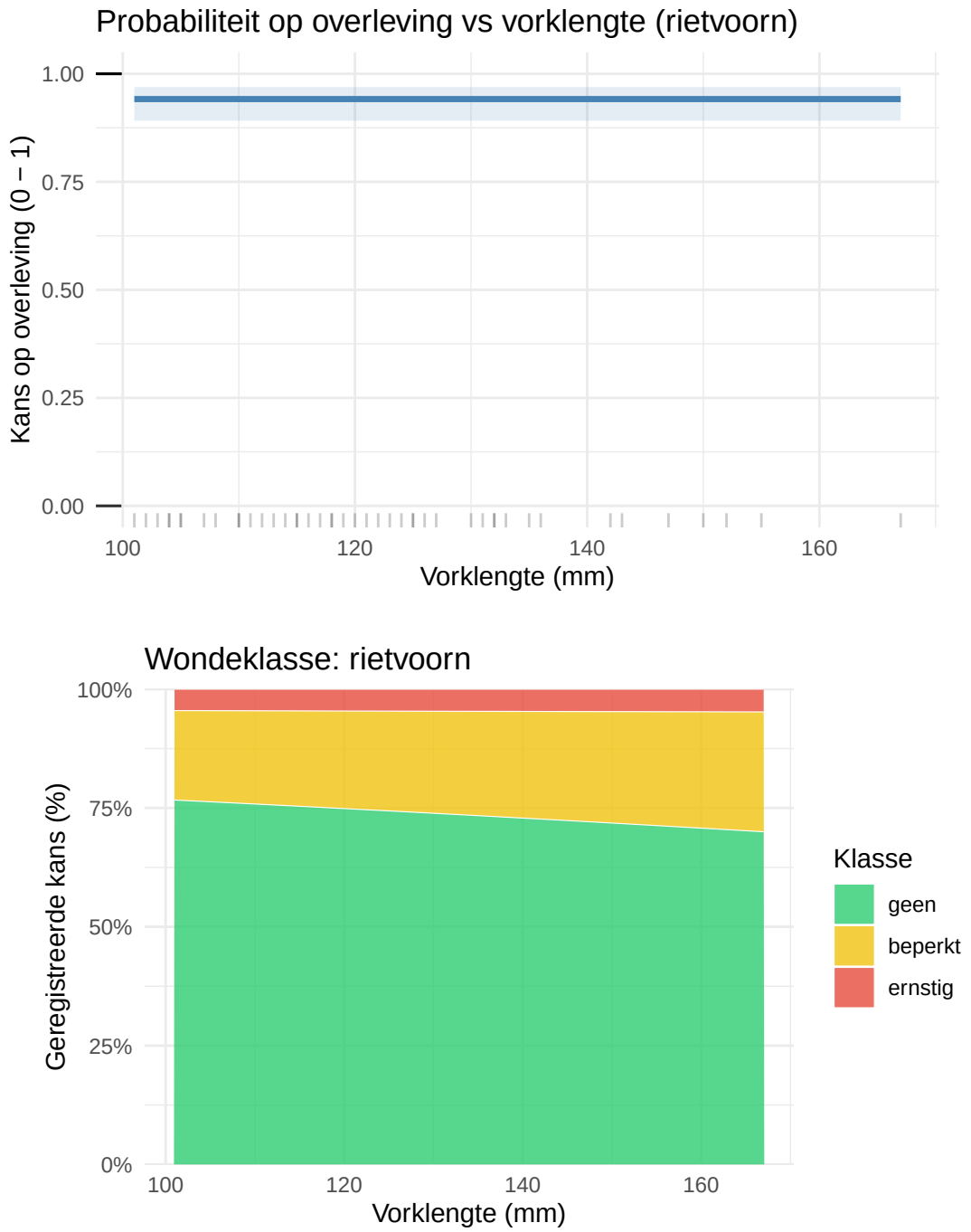
categorie	term	estimate	std_error	z_value	p_value	odds_ratio
beperkt	(Intercept)	-3.694	1.058	-3.492	0.000	0.025
beperkt	vorklengte	0.009	0.006	1.623	0.104	1.009

10.21436/inbor.158239472

F.1.5 Overlevingsmodel rietvoorn

Tabel F.14: Coëfficiënten van het logistische regressiemodel voor rietvoorn .

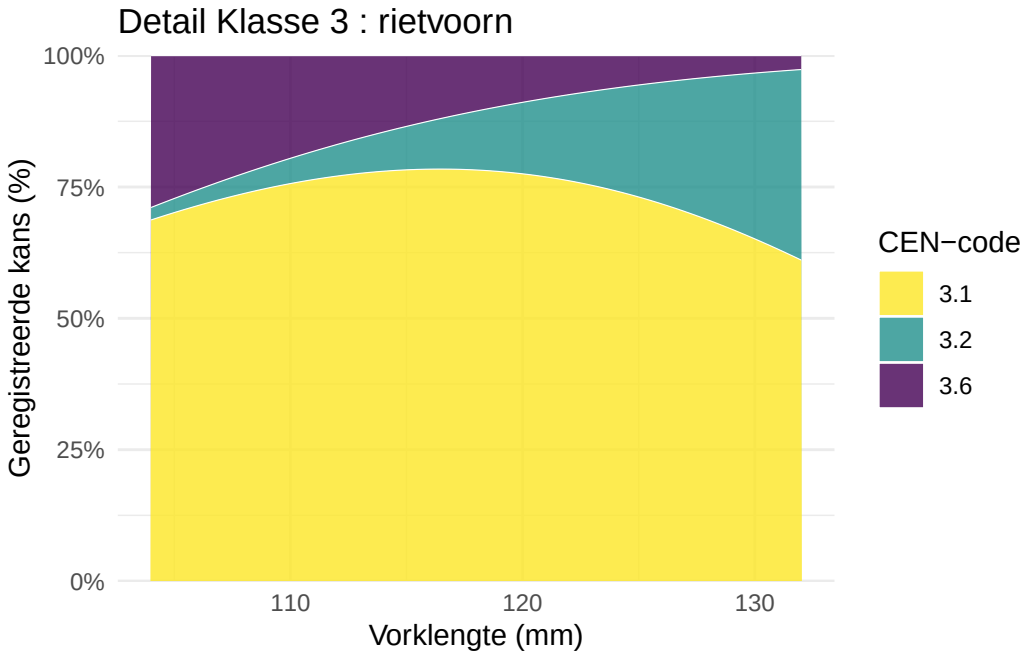
Variabele	Log-Odds	Odds Ratio	Std. Error	95% BI Laag	95% BI Hoog	p-waarde
(Intercept)	2.77951	16.11111	0.34352	8.72066	34.06646	< 0.001



Figuur F.8: Resultaten van de multinominale regressie voor de wondklasse-verdeling bij rietvoorn als functie van de vorklengte. De gekleurde vlakken representeren de voorspelde kans op een schadevrije passage (groen), beperkte verwondingen (geel) of ernstige verwondingen (rood). De lijnen tussen de kleurvlakken tonen de verschuiving in risicoprofiel naarmate de vislengte toeneemt.

Tabel F.15: Multinomiale regressie voor de kans op een wondklasse bij rietvoorn (referentie = geen)

categorie	term	estimate	std_error	z_value	p_value	odds_ratio
beperkt	(Intercept)	-1.992	1.975	-1.009	0.313	0.136
ernstig	(Intercept)	-3.068	3.857	-0.795	0.426	0.047
beperkt	vorklengte	0.006	0.017	0.348	0.728	1.006
ernstig	vorklengte	0.002	0.033	0.070	0.944	1.002



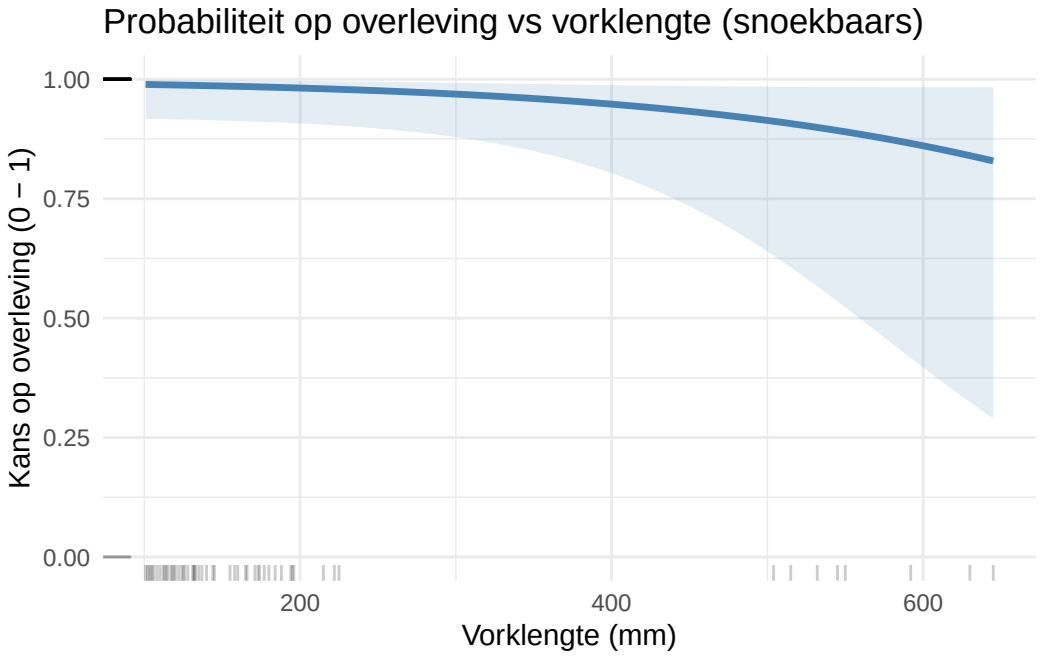
Tabel F.16: Multinomiale regressie voor de kans op een CEN-code bij rietvoorn (referentie = 3.1)

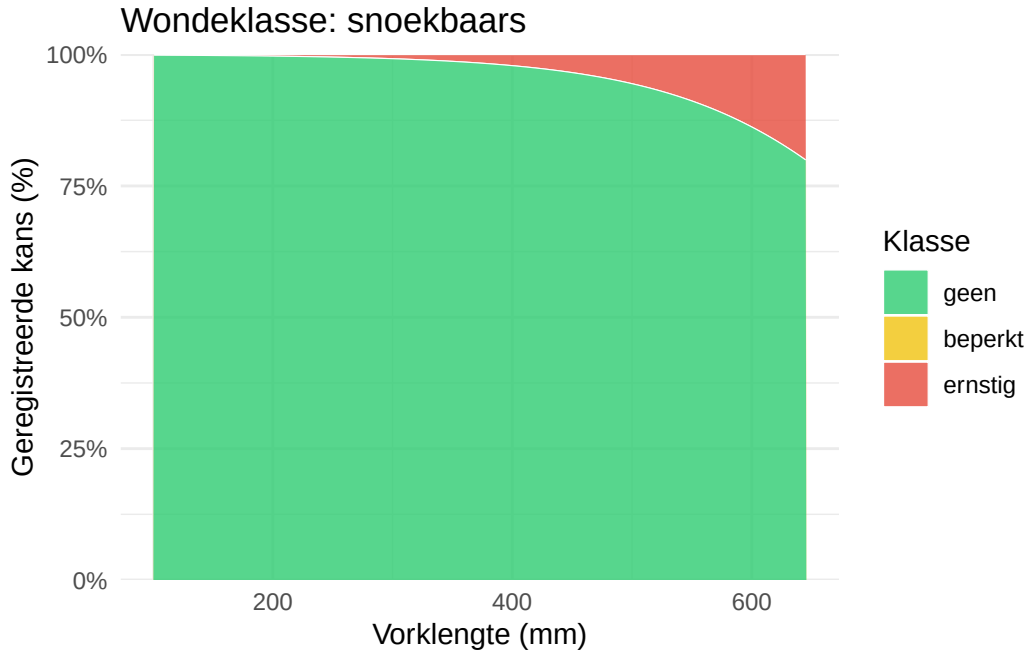
categorie	term	estimate	std_error	z_value	p_value	odds_ratio
3.2	(Intercept)	-13.925	18.314	-0.760	0.447	0.000
3.6	(Intercept)	7.580	15.213	0.498	0.618	1958.131
3.2	vorklengte	0.102	0.147	0.689	0.491	1.107
3.6	vorklengte	-0.081	0.137	-0.593	0.553	0.922

F.1.6 Overlevingsmodel snoekbaars

Tabel F.17: Coëfficiënten van het logistische regressiemodel voor snoekbaars .

Variabele	Log-Odds	Odds Ratio	Std. Error	95% BI Laag	95% BI Hoog	p-waarde
(Intercept)	5.05916	157.45831	1.34519	18.75110	6278.26873	< 0.001
vorklengte	-0.00540	0.99462	0.00334	0.98735	1.00217	0.10651





Figuur F.9: Resultaten van de multinominale regressie voor de wondklasse-verdeling bij snoekbaars als functie van de vorklengte. De gekleurde vlakken representeren de voorspelde kans op een schadevrije passage (groen), beperkte verwondingen (geel) of ernstige verwondingen (rood). De lijnen tussen de kleurvlakken tonen de verschuiving in risicoprofiel naarmate de vislengte toeneemt.

Tabel F.18: Multinomiale regressie voor de kans op een wondklasse bij snoekbaars (referentie = geen)

categorie	term	estimate	std_error	z_value	p_value	odds_ratio
ernstig	(Intercept)	-7.847	3.655	-2.147	0.032	0.00
ernstig	vorklengte	0.010	0.007	1.497	0.134	1.01

10.21436/inbor.158239472