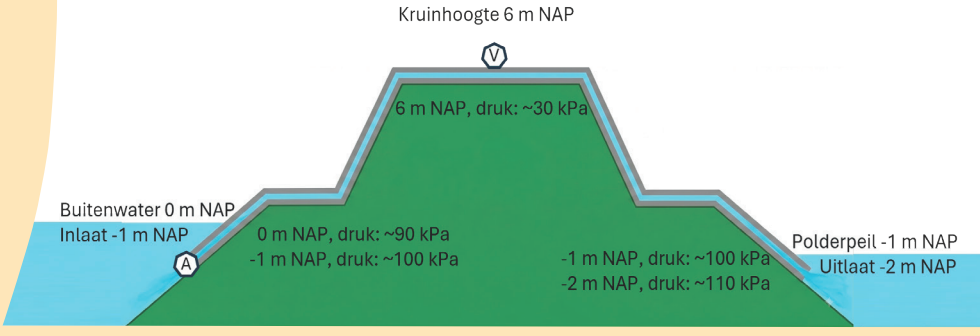
Drukverschil in hevelleidingen en tolerantie van vis

Literatuurstudie in het kader van vismigratie-voorzieningen

Martijn Schiphouwer & Maurice Kooiman





RAVON

Drukverschil in hevelleidingen en tolerantie van vis

Literatuurstudie in het kader van vismigratievoorzieningen

Martijn Schiphouwer & Maurice Kooiman

RAVON

Colofon

Status uitgave:	Definitief
Datum uitgave:	16-9-2026
Titel:	Drukverschil in hevelleidingen en tolerantie van vis
Subtitel:	Literatuurstudie in het kader van vismigratievoorzieningen
Wijze van citeren:	Schiphouwer, M. & M. Kooiman, 2026. Drukverschil in hevelleidingen en tolerantie van vis; Literatuurstudie in het kader van vismigratievoorzieningen. Projectnummer 2026.211. RAVON, Nijmegen.
Samenstellers:	Martijn Schiphouwer & Maurice Kooiman
Projectnummer:	2026.211
Projectleider:	Martijn Schiphouwer
Naam en adres opdrachtgever(s):	Waterschap Hollandse Delta T.a.v. Rien Stolk Handelsweg 100 2988 DC Ridderkerk
Referentie opdrachtgever(s):	AK207307
Akkoord voor uitgave:	Maurice Kooiman

© 2026 RAVON, Nijmegen

Inhoud

Samenvatting 6

1 Inleiding 8
1.1 Aanleiding en probleemstelling 8
1.2 Doelstelling 8
1.3 Vraagstelling 8
1.4 Aanpak en leeswijzer 9

2 Hevels in vismigratievoorzieningen en hydraulische kenmerken 10
2.1 Heveltoepassingen in vismigratievoorzieningen 10
2.1.1 Permanente hevels 10
2.1.2 Cyclische hevels 11
2.1.3 Vissluis met hevel 12
2.2 Hydraulische kenmerken van hevels 12
2.2.1 Omschrijving referentiesituatie 12
2.2.2 Druk in hevels 13
2.2.3 Stroming in hevels 16

3 Tolerantie, voorkeur en gedrag van vissen ten aanzien van drukverschillen 17
3.1 Effect van drukverschillen op vis 17
3.1.1 Zwemblaas en acclimatisatie 17
3.1.2 Negatieve effecten van drukveranderingen op vissen 18
3.2 Tolerantie van vissen voor drukverschillen 19
3.2.1 Normaal gedrag -*free vertical range* 19
3.2.2 Schade en sterfte door drukverlaging 20
3.3 Afgeleide drempelwaardes voor drukverlaging 21

4 Beschouwing toepassing van hevels in vismigratievoorzieningen 24

Literatuur 25

Bijlage 1: Hydraulische berekening hevel 28

Bijlage 2: Hydraulische berekening hevel met opvoerpomp 30

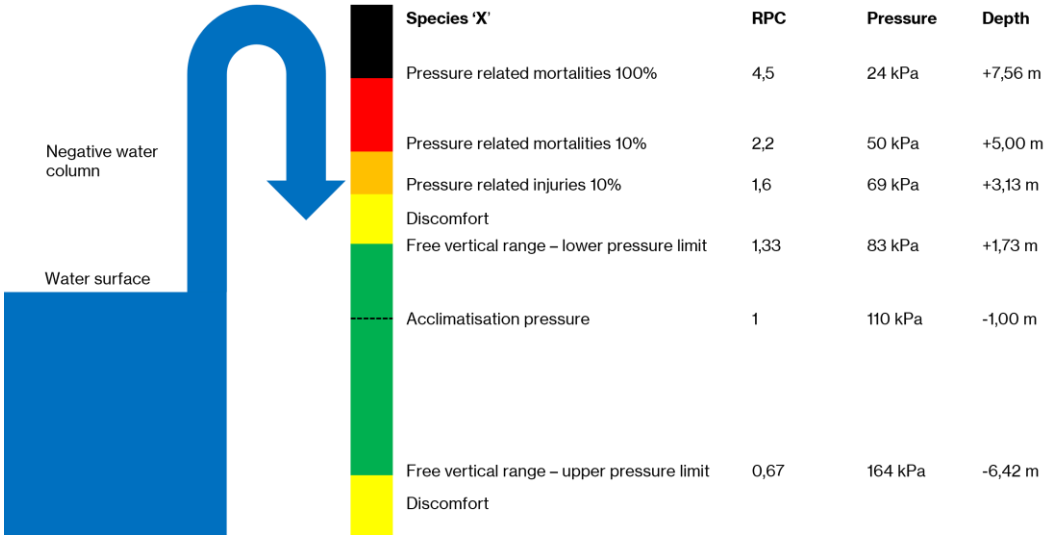
Bijlage 3: Overzicht berekeningen verschillende hevelsituaties 32

Samenvatting

Hevels en andere type leidingen waar een drukverlaging heerst, bieden toepassingen in vismigratievoorzieningen om vissen vrijwillig (zelfstandig) of onvrijwillig (meespoelend met een sterke retourstroom) een hoogte te laten overbruggen tussen twee verschillende peilen. Bij dergelijke toepassingen is er tijdelijk (seconden of minder) sprake van een drukverlaging ten opzichte van de druk waaraan een vis geacclimatiseerd is bij het inzwemmen. Drukverlagingen worden uitgedrukt als *ratio of pressure change* (RPC) waarbij de acclimatisatiedruk (in kPa) wordt gedeeld door de laagst optredende druk. Een hevelhoogte van 8 meter kan een RPC van meer dan 5 opleveren, dat betekent dat een gesloten zwemblaas tijdens blootstelling 5 keer in volume toeneemt. De daadwerkelijke drukverschillen in hevels zijn sterk afhankelijk van het ontwerp met betrekking tot onder andere hoogte, weerstand, stroomsnelheid, pompen en afsluiters. Hydraulische doorrekening is daarom belangrijk. Voor waterbeheerders en ontwerpers van vismigratievoorzieningen geldt dat bij gebruik van onderdruk in vismigratievoorzieningen rekening gehouden moet worden met de soorten en stadia die potentieel gebruik maken van de voorziening. Het blijkt dat er grote verschillen zijn tussen individuen, vissoorten en stadia in de mate waarin negatief effect ondervonden wordt van tijdelijke (seconden of minder) drukverlaging. Al bij een RPC van 1,6 treedt er voor verschillende soorten en stadia enige sterft op, dit geldt in het bijzonder voor jonge karperachtigen. Voor andere soorten, waaronder aal en driedoornige stekelbaars, blijkt dat deze een RPC van boven de 8 kunnen verdragen.

Voor het vrijwillig overbruggen van drukverschillen geldt afhankelijk van de diepte van acclimatisatie en snelheid van acclimatisatie een *free vertical range (FVR)*. Deze FVR biedt verschillende soorten met een zwemblaas zonder langdurige acclimatisatie verticale bewegingsruimte tot een drukverhoging van circa 50% en een drukverlaging van circa 25% (RPC = 1,33) (Afbeelding S.1). Daarbuiten moet eerst acclimatisatie plaatsvinden (tientallen minuten tot uren) of ondervinden vissen ongemak, zoals gaan drijven bij drukverlaging.

Op kleinere zout-zoet overgangen waar uitsluitend jonge aal, driedoornige stekelbaars en soorten als brakwatergrondel en bot migreren, kunnen hoge hevels (>8m) nog geschikt zijn om vis via onvrijwillige migratie effectief en vitaal over te zetten. Andersom zou schieraal ook (op onvrijwillige basis) met een dergelijke hevel kunnen migreren. Dergelijke oplossingen kunnen daarom op bepaalde locaties en migratiemomenten bij aanbod van robuuste doelsoorten worden ingepast. Op plaatsen waar andere soorten migreren (zoals karperachtigen, zalmachtigen en baarsachtigen), zijn dergelijke hoge hevels onwenselijk, aangezien er dan vrijwel zeker visschade optreedt aan deze soorten door beschadiging van zwemblaas of omliggende weefsels.



Afbeelding S.1: Samenvattend schematisch overzicht van de kritieke grenzen van vissoort 'X' die korte tijd (seconden) wordt blootgesteld aan verschillende drukken in de waterkolom. De weergegeven waarden hebben geen betrekking op een specifieke soort, maar vallen binnen waarden die voor verschillende physoclisten en physostomen gevonden zijn. Per situatie, soort en stadium zal deze weergave echter uniek zijn (afbeelding: RAVON).

Bij een groter soortenspectrum mag de drukverlaging minder hoog zijn, omdat er snel schade ontstaat aan o.a. karperachtigen en baarsachtigen in verschillende levensstadia. Ingeschat wordt dat leidinghoogten van hevels ten opzichte van het laagste peil onder de circa 2 meter (RPC < 1,3) moeten blijven voor volledige schadevrije onvrijwillige migratie en tot rond de 1 meter (RPC < 1,25) voor volledig effectieve vrijwillige migratie. Dit houdt in dat bij primaire waterkeringen bij vismigratie voor een breed spectrum aan soorten en stadia semi-horizontale leidingen, zonder te grote hoogte met 'hangend' water, door de kering een voorwaarde zijn voor het effectief, onbeschadigd en vitaal laten migreren van vis. Hogere hevels bieden, met de huidige beperkte kennisbasis, onzekerheden met betrekking tot effectiviteit en schade voor verschillende soorten en stadia.

Tabel S.2: Overzicht inschatting van veilige drempelwaarden voor drukverlagingen voor verschillende typen vismigratie en doelsoorten. Voor verschillende specifieke soorten en stadia kunnen deze waarden hoger liggen dan hier weergegeven.

Type vismigratie:	**Vrijwillig**	**Onvrijwillig**
Doelsoorten	*RPC*	*RPC*
Alle soorten en stadia	1,25	1,3
Aal (alle stadia)	?	8,0
Driedoornige stekelbaars (adult)	?	8,0

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en probleemstelling

Waterschap Hollandse Delta (WSHD) realiseert voorzieningen ten behoeve van vismigratie in lijn met de doelstellingen uit o.a. de Kaderrichtlijn Water en het Nederlandse Aalbeheerplan. Bij gemalen en andere waterwerken waar hoge primaire keringen (o.a. dijken) liggen, zijn er verschillende uitdagingen met betrekking tot de aanleg van deze voorzieningen. In het kader van waterveiligheid is er niet altijd de mogelijkheid voor een leiding dwars door de kering. In dergelijke gevallen moet een relatief grote hoogte (soms >6 meter) worden overbrugd met leidingen via vacuümpompen en/of hevelprincipes. Omdat leidingen dan als een zogenaamde 'kattenrug' boven het waterniveau over het dijklichaam liggen, ontstaan er drukverschillen en heerst er onderdruk. Grote drukverschillen en hoge stroomsnelheden in leidingen kunnen van invloed zijn op de gezondheid en het gedrag van vissen. Op dit moment zijn er nauwelijks kennisregels beschikbaar die de ecologische randvoorwaarden beschrijven ten aanzien van druk in leidingen en tolerantie van vis in voorkomende situaties in Nederland. Deze informatie is mede van belang om een afweging te maken tussen voorzieningen over een dijktafel heen en vanuit waterveiligheid minder wenselijke alternatieven die door de kering zijn aangelegd.

1.2 Doelstelling

Bij WSHD zijn verschillende varianten van vismigratievoorzieningen inpasbaar om hoogteverschillen tot maximaal 7 meter tussen dijktafel (maximaal 6m +NAP) en polderpeil (minimaal 1m -NAP) te overbruggen. Deze uitwerking heeft als doel de kennis over optredende drukverschillen en stroomsnelheden in perspectief te plaatsen tot wat er bekend is over toleranties en voorkeuren van de verschillende vissoorten en levensstadia die hier migreren. Ook wordt dit afgezet tegen alternatieven die door de kering heen worden aangelegd, waardoor minder grote hoogtes overbrugd hoeven worden. De uitwerking biedt daarmee inzicht in hydraulische en ecologische kaders die gebruikt kunnen worden om vismigratievoorzieningen effectief te ontwerpen of alternatieven te overwegen.

1.3 Vraagstelling

Binnen de scope van de doelstelling zijn door WSHD en RAVON verschillende vragen gedefinieerd om structuur te geven aan de uitwerking van

- Welke eigenschappen hebben verschillende toepassingen van vishevels over een dijklichaam ten aanzien van druk, stroomsnelheid voor vismigratie en hoe verhoudt zich dit tot leidingen door een dijklichaam?
- Wat is er bekend over tolerantie, visschade, voorkeuren, gedrag en randvoorwaarden ten aanzien van drukverschillen voor te verwachten soorten en levensstadia (of vergelijkbare modelsoorten)?
- Welke ontwerpgrenzen zijn er ten aanzien van hevels voor vismigratie en welke technisch haalbare alternatieven zijn er voor situaties boven die grenzen?

1.4 Aanpak en leeswijzer

Op basis van vloeistofmechanica en literatuurstudie van beschikbare relevante informatie uit binnen- en buitenland, wordt in een beknopte rapportage een overzicht gegeven en daarmee antwoorden geformuleerd op de onderzoeksvragen binnen de gegeven scope. Indien vragen niet beantwoord kunnen worden of nadere studie behoeven, dan wordt dit aangeduid als kennislacune. In het rapport wordt ook een samenvatting opgenomen welke oplossingen voorkeur hebben boven andere oplossingen en wat de onderbouwing daarvan is.

- Hoofdstuk 2: geeft een uitwerking van toe te passen vismigratievoorzieningen en de hydraulische kenmerken van hevels.
- Hoofdstuk 3: geeft een overzicht van voorkeur en tolerantiegrenzen van verschillende vissoorten om drempelwaarden voor hevels te kunnen afleiden
- Hoofdstuk 4: geeft een samenvattende beschouwing van de inzichten in vismigratiemogelijkheden door hevels en welke implicaties dit heeft ten aanzien van het ontwerpen van vismigratievoorzieningen voor verschillende situaties en doelen.

2 Hevels in vismigratievoorzieningen en hydraulische kenmerken

2.1 Heveltoepassingen in vismigratievoorzieningen

Hevels worden in vismigratievoorzieningen toegepast om twee waterpeilen permanent, periodiek of tijdelijk te verbinden. Er is een groot scala aan mogelijk toepassingen in verschillende ontwerpen van vismigratievoorzieningen. De basisprincipes worden daarom op een rij gezet, met een beknopte toelichting op het toepassingsbereik en bijkomende risico's op het functioneren.

2.1.1 Permanente hevels

Een permanente hevel is zo toegepast dat het water blijft stromen door een open of door een pomp opgevoerde leiding van het hoge naar het lage peil. Deze wordt enkelvoudig toegepast als 'vishevel' bij stuwen of inlaatpunten of als onderdeel van een vismigratievoorziening met 'continue retourstroom'. Hieronder zijn vier verschillende toepassingen beschreven.

Vishevel
Water in zogenaamde vishevels wordt vrijwel altijd gereguleerd met afsluiters, schotten of luchtbellen. Een voorbeeld is de vishevel van Fishflow Innovations bij stuwen, gericht op tweezijdige (vrijwillige) vismigratie. Hierin wordt water afgeremd door schotten met doorzwemvensters (zoals in een De Wit vispassage) en wordt de stroomsnelheid ook gereguleerd met een luchtbel bovenin. Dit type is alleenstaand niet geschikt voor toepassing bij gemalen, omdat de stroming voor oriëntatie van vis in de verkeerde richting loopt en de ruime dimensionering voor een grote retourstroom zorgt. Risico's in dergelijke toepassingen zijn het verstopt raken van de doorzwemvensters en een defect aan de vacuüminstallatie, waardoor de hevel droog kan vallen.

Permanente inlaat
Door waterbeheerders en agrariërs wordt in verschillende situaties water over de dijk geheveld via een leiding. Een voorbeeld zijn de vele hevels over de IJsselmeerdijk (4,6 m NAP) naar de polder van de Wieringermeer (-4 m NAP), waarlangs ook (jonge) aal ongeschonden naar binnen komt (Schiphouwer & Kooiman, 2021).

Continue retourstroom – vrije hevel
Toepassingen van permanente hevels in retourstroompassages zijn gericht op het eenzijdig (onvrijwillig) meevoeren van vis uit een verzamelkamer aan de zijde van het hoge peil. Op deze verzamelkamer is een tweede leiding aangesloten waar een grotere lokstroom geboden wordt, zodat de kamer naar het buitenwater een netto lokstroom levert. Vis die zich ophoopt in de verzamelkamer wordt (op basis van kans) ingezogen door de retourstroomleiding en zodoende overgezet naar het lage peil. Dit type kan worden toegepast bij niet al te grote peilverschillen en lage peilfluctuaties (geen getij of hoger gelegen opvangbak) omdat de retourstroom zich tot de lokstroom moet blijven verhouden (enigszins te reguleren met een schuif of door de lokstroom aan te passen) en de stroomsnelheid in de retourleiding niet te hoog mag zijn in verband met schade aan vis. Ook is de dimensionering van leidingen over het algemeen klein, omdat de stroomsnelheid voldoende hoog moet zijn bij een lager debiet, zodat vis onvrijwillig wordt meegevoerd en

niet actief terug kan zwemmen (Esselink et al., 2003). Zodoende is dit type meestal geschikt voor kleinere vissen (zoals glasaal en driedoornige stekelbaars). Risico's in dergelijke toepassingen zijn het aangroeien en verstopt raken van de hevel en een defect aan de vacuüminstallatie, waardoor de hevel droog kan vallen. Dit type is, in varianten die bij laag water tijdelijk niet volledig functioneren (semi-permanent), voor glasaal en driedoornige stekelbaars succesvol toegepast in hevelpassages op Texel en Tholen (Wintermans, 1999; Kooiman & Ploegaert, 2022).

Continue retourstroom - Visveilige opvoerpomp
In veel gevallen is het niet mogelijk een vrije hevel toe te passen in een continue retourstroompassage door wisselende waterpeilen (o.a. getij) of de overbrugging van een groter peilverschil of grote leidingweerstand, waardoor een vrije hevel een te groot of te klein debiet krijgt. In dergelijke gevallen kan het leidingdebiet gereguleerd worden met een visveilige pomp, eventueel gereguleerd met niveau- en/of flowmeters, om water aan te zuigen en vis onvrijwillig mee te voeren. Dit zijn gezien de relatief lage debieten en leidingdiameters doorgaans kleinere pompen, die alleen geschikt zijn voor kleinere vissen. Risico's in dergelijke toepassingen zijn het aangroeien en verstopt raken van de hevel, defect aan de opvoerpomp en een defect aan de vacuüminstallatie, waardoor de hevel droog kan vallen.

2.1.2 Cyclische hevels

Hevelvispassage
Hevelvispassages, zoals beschreven in Kroes & Monden (2004), werken op basis van een verzamelkamer waarin vis zich op een lokstroom verzamelt, waarna de kamer wordt afgesloten en vis onvrijwillig wordt overgeheveld. De hevel wordt hiertoe periodiek met de vacuümpomp vol getrokken, waarna water met daarin de vis door de hevel stroomt totdat kamer leeg is en de hevel droogvalt. Vervolgens wordt de kamer weer gevuld en vindt met de lokstroompomp aantrekking van vis plaats, waarna na enige tijd het proces herhaald wordt. Afhankelijk van de aanleg, kunnen bij dit type hevel hoge stroomsnelheden optreden en is er kans dat er vis in contact komt met de leidingen. Dit is met name aan de orde op het laatst gehevelde water, wanneer de hoogste stroomsnelheid bereikt is en de leiding abrupt droogvalt. Verder is het technisch complex om de volledige verzamelkamer leeg te hevelen, waardoor de kans bestaat dat er vis achterblijft. Dit type hevel is voornamelijk geschikt voor kleine vis, zoals driedoornige stekelbaars en glasaal. Risico's in dergelijke toepassingen zijn het aangroeien en verstopt raken van de hevel, defecten aan de schuiven en een defect aan de vacuüminstallatie, waardoor de hevel droog kan vallen of niet op gang komt.

Periodieke inlaathevel
Een hevel kan als periodieke inlaat worden ingezet om vis onvrijwillig mee te voeren, bijvoorbeeld na bemaling, of vanuit een verzamelkamer. Dit kan plaatsvinden door een hevelbuis te vullen met een vacuümpomp, waarna na enige tijd het vacuüm onderbroken wordt en de hevel droogvalt. Ook kan dit, bijvoorbeeld bij een permanent gevulde hevel, ingeregeld worden door een afsluiter te openen en na enige tijd te sluiten. Bij dergelijke constructies is de optredende stroomsnelheid een aandachtpunt. Risico's in dergelijke toepassingen zijn defecten aan de schuiven of een defect aan de vacuüminstallatie, waardoor de hevel droog kan vallen.

2.1.3 Vissluis met hevel

Een hevel kan onderdeel zijn van een vissluis. Vissluizen werken cyclisch, waarbij eerst een lokstroom wordt opgewekt bij de buitenste schuif aan de hoge zijde, vervolgens opent deze schuif en wordt een lokstroom opgewekt bij de schuif aan de binnenzijde. Vis wordt dan de tussenkamer in gelokt. Vervolgens sluit de buitenste schuif en opent de binnenste schuif, waarna vis door kan zwemmen naar het lage peil. Er zijn veel verschillende varianten op vissluizen. Wanneer een permanent gevulde hevel onderdeel is van de vispassage kan dat in de basis op drie locaties:

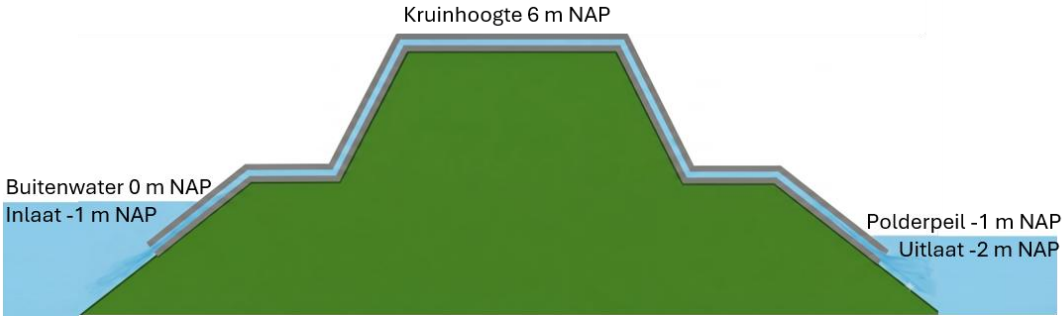
- Vissluis met tweezijdig regelwerk (schuif aan hoge en lage zijde), waarbij de hevel de tussenkamer vormt waar vis vrijwillig in door moet zwemmen.
- Vissluis met regelwerk lage zijde (polderzijde), waarbij beide schuiven en de tussenkamer aan de lage zijde zijn gepositioneerd en vis vrijwillig de vissluis kan bereiken via de hevel als doorzwemleiding waarin een lokstroom is opgewekt.
- Vissluis met regelwerk hoge zijde (buitenwater), waarbij beide schuiven en de tussenkamer aan de hoge zijde zijn gepositioneerd en vis vrijwillig de lage zijde kan bereiken via de hevel als doorzwemleiding.

Risico's in dergelijke toepassingen zijn het aangroeien en verstopt raken van de hevel, defecten aan de schuiven en een defect aan de vacuüminstallatie, waardoor de hevel droog kan vallen.

2.2 Hydraulische kenmerken van hevels

2.2.1 Omschrijving referentiesituatie

Een hevel bestaat uit een leiding die over de kruin van de dijk een verbinding legt tussen het buitenwater en het binnenwater. Afbeelding 2.1 geeft een schematische weergave van een hevel over een hoge dijk met een kruinhoogte van 6 meter boven NAP, een buitenwater gelijk aan NAP en een polderpeil -1 m NAP. Deze situatie wordt in dit onderzoek als referentiesituatie gehanteerd. De openingen van de hevels zijn hier als uitgangspunt 1 meter beneden het normale waterpeil gesitueerd, omdat er rekening met peilfluctuaties moet worden gehouden en de hevel geen lucht aan mag zuigen. Op het buitenwater kunnen peilfluctuaties onder andere afkomstig zijn van getij, rivierafvoer, scheefstand door windwerking en golven, hier optredende peilverschillen kunnen in sommige situaties ook groter zijn dan 1 m. Het polderpeil kan fluctueren door gemaalwerking, peilregulatie (zomer- en winterpeil), neerslag of droogte, dergelijke peilverschillen blijven doorgaans ruim binnen de marge van 1 m. Bij hogere primaire keringen en diepere polders kunnen de hoogteverschillen groter zijn, echter binnen WSHD komen deze situaties waarschijnlijk niet voor.



Afbeelding 2.1: Schematische doorsnede van een hevel over een dijklichaam (kering) die in deze uitwerking als referentie dient met daarin een vacuümpomp (schets RAVON bewerkt met Gemini AI).

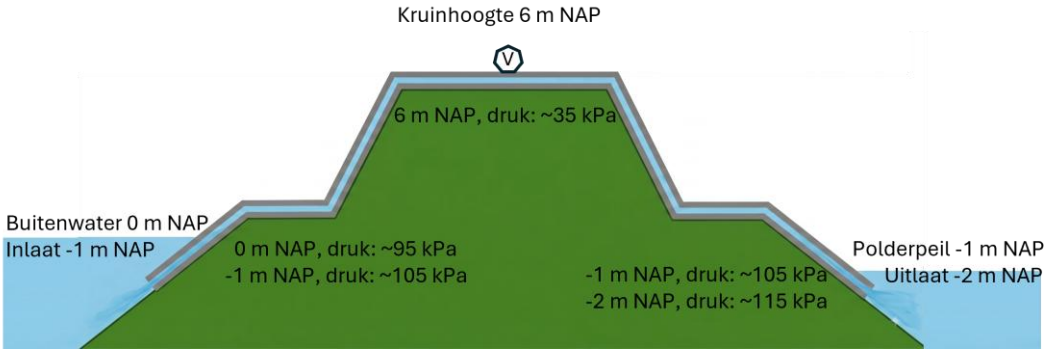
Op het hoogste punt van de hevel is een vacuümpomp noodzakelijk om in de onderdruk te voorzien die nodig is om een waterkolom te creëren boven het bestaande waterpeil. Theoretisch is dit mogelijk tot maximaal 10,33 meter, omdat vanaf dat punt de druk daadwerkelijk het vacuüm bereikt (0 kPa) en er dan geen sprake kan zijn van een met vloeistof gevulde leiding. In de praktijk kan water niet in vloeistof op een vacuüm komen, omdat het even daarvoor (~2,3 kPa) al gaat koken en verdampt (dampdruk). Met een stuwende opvoerpomp die continu extra druk genereert, is het overigens wel mogelijk een leiding boven deze hoogte te vullen. De vacuümpomp dient ook voor het wegvoeren van gassen die, bij lagere stroomsnelheden, boven in de buis ophopen door meegevoerde luchtbellen en door het ontgassen van water bij drukverlaging. Indien de hevel volledig gevuld is met water, en de leiding aan beide zijden open is, stroomt er water van het hoogste waterniveau naar het laagste waterniveau.

2.2.2 Druk in hevels

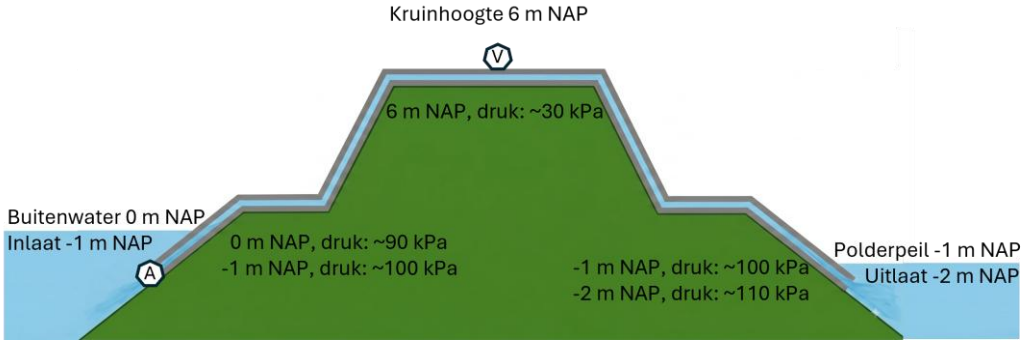
De onderdruk (op basis van statische druk) die in negatieve waterkolom (zoals in een hevel) boven de normale waterspiegel optreedt, daalt iedere meter met 9,81 kPa (kilo Pascal) gelijk aan ~0,1 Bar ten opzichte van de gemiddelde atmosferische druk van 101,3 kPa (gelijk aan ~1 Bar). Naar beneden toe neemt druk toe met 9,81 kPa per meter. Zodoende kan een negatieve waterkolom tot bijna maximaal tot ~10 m reiken totdat de dampdruk bereikt is en heerst er op een diepte van 10 meter een druk van 199,4 kPa (~2 bar). Om drukwaarden gemakkelijk interpreteerbaar te houden wordt druk in dit rapport afgerond naar verschillen van 10 kPa per meter waterkolom en is de atmosferische druk afgerond naar 100 kPa. Drukverschillen worden uitgedrukt in de ratio van drukverandering die optreedt op de laagste druk ten opzichte van de acclimatisatiedruk (RPC; *ratio of pressure change*), aangezien dit een veelgebruikte maat is in relatie tot het uitdrukken van barotrauma op vis. Een tijdelijke drukverlaging van 100 kPa naar 50 kPa geeft een RPC van 2 (100/50).

Hevels worden op verschillende manieren toegepast in vismigratievoorzieningen (zie voorgaande paragraaf) waarbij onderscheid kan worden gemaakt tussen hevels die aan beide zeiden open zijn (soms gereguleerd met schuiven, schotten of luchtbellen), hevels die cyclisch werken met behulp van schuiven en hevels waarbij water gecontroleerd wordt ingevoerd door een (visveilige) pomp. De druk die in de hevel optreedt, is mede afhankelijk van welk waterpeil als referentievlak dient. In afbeeldingen 2.2 – 2.3 is schematisch weergegeven welke druk er in verschillende hevel situaties optreedt. Hierin is een afsluiter getekend aan één van beide zijdes, zoals dit bijvoorbeeld in een vissluis kan worden

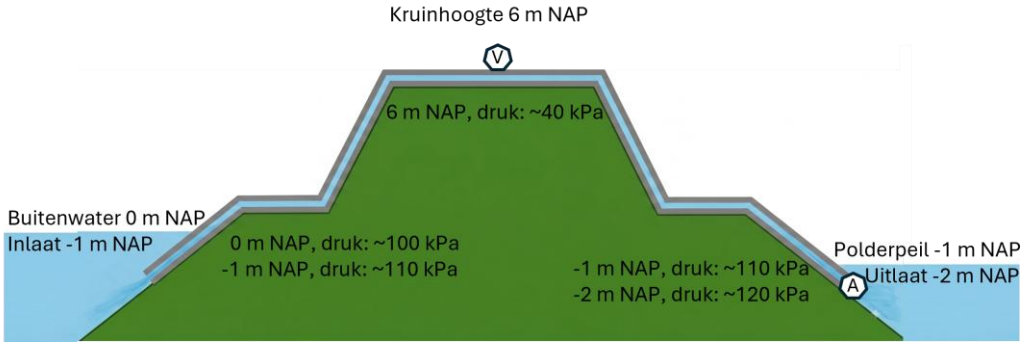
toegepast. Druk in hevels, of leidingen, met andere hoogtes kan worden afgelezen in tabel 2.1.



Afbeelding 2.2: Globaal drukverloop in open hevel met vacuümpomp (v) over een dijklichaam, waarbij water vrij van buitenwater (boven) naar polderwater (beneden) stroomt. Verondersteld wordt, dat de druk zich uitmiddelt ten opzichte van beide waterpeilen als referentievlak, dynamisch drukverlies door wrijving (Bijlage 1) is hier niet meegenomen. Voordat een vis de leiding betreedt en nadat een vis de leiding verlaat, heerst er op 1 m diepte een omgevingsdruk van 110 kPa.



Afbeelding 2.3: Globaal drukverloop in hevel met vacuümpomp (V) over een dijklichaam, waarbij een afsluiter (A) de hevel afsluit aan de buitenwaterzijde (boven). In dit geval fungeert de polderzijde (beneden) als referentievlak voor de heersende druk.



Afbeelding 2.4: Globaal drukverloop in hevel met vacuümpomp (V) over een dijklichaam, waarbij een afsluiter (A) de hevel afsluit aan de polderzijde (beneden). In dit geval fungeert de buitenwaterzijde (boven) als referentievlak voor de heersende druk.

Tabel 2.1: Drukverschillen op basis van statische druk in een stilstaande leiding voor hevels en semi-horizontale leidingen, afgerond op 10 kPa.

Leidinghoogte (m)*	Hoogste druk**	Laagste druk***	RPC****
9 meter	110	10	11,00
8 meter	110	20	5,50
7 meter	110	30	3,67
6 meter	110	40	2,75
5 meter	110	50	2,20
4 meter	110	60	1,83
3 meter	110	70	1,57
2 meter	110	80	1,38
1 meter	110	90	1,22

*T.o.v. laagste waterpeil

**Opening lage zijde op 1 m diepte

***Met lage zijde als referentievlak voor druk

**** Ratio of pressure change

In stromende hevels is er sprake van wrijving waardoor enig drukverlies (dynamische druk) optreedt, dit drukverlies is in de situatieschets van Afbeelding 2.2 niet meegenomen aangezien hier geredeneerd is vanuit een ruimere leiding met weinig dynamisch drukverlies. Er kan echter bij lange leidingen met een diameter (zoals de vishevel op Texel, beschreven door Wintermans, 1999), veel weerstand optreden. Deze veroorzaakt een dynamisch drukverlies ook wel leidingverlies genoemd (Darcy-Weisbach). De absolute druk in een stromende hevel kan hierdoor een stuk lager uitvallen dan in een stilstaande hevel. In bijlage 1 is een rekenvoorbeeld gegeven waarin de druk in een 100m lange hevel met een buisdiameter van 125 mm, een verval van 1 meter en een hoogte van 6 meter, op het hoogste punt 5 kPa lager uitvalt vanwege weerstand en drukverlies.

In situaties met een opvoerpomp geldt een ander drukverloop, daarbij is het pomptype bepalend in welke druk er rondom de pomp optreedt en het drukverloop in de hevel. Als de opvoerpomp effectief energie toevoegt aan de leiding, dan stijgt de stroomsnelheid en neemt de druk over de volledige lengte toe. In bijlage 2 is een rekenvoorbeeld gegeven voor toevoeging van een lichte opvoerpomp (30 kPa) in de hevel die in bijlage 1 is omschreven. Te zien is dat de druk in een nauwe leiding de druk op de top een stuk hoger uitvalt (37,2 kPa versus 51,5 kPa). In een ruimere leiding zijn de verschillen minder prominent (aangezien er minder dynamisch drukverlies optreedt). Een overzicht voor verschillende situaties is gegeven in Bijlage 3. Dit maakt duidelijk dat om optredende drukverschillen in specifieke situaties te duiden een hydraulische berekening noodzakelijk is, of in bestaande situaties met sensoren kan worden bepaald.

Waterschap Hollandse Delta heeft ook gewezen op de aanwezigheid van 'kattenrug' leidingen bij gemaalpompen, die een hoogte hebben van enkele meters maar waarbij in veel gevallen weinig schade aan vis is waargenomen (Kroon & Van Wijk, 2018). De drukverlaging in dergelijke situaties als gevolg van de kattenrug, wordt echter tenietgedaan door de druk die wordt toegevoegd door de gemaalpomp zelf die doorgaans een extra druk genereert van meer dan >20 kPa (Van Esch, 2012). In dergelijke situaties is over de gehele leiding sprake van beperkte drukverschillen tussen de 90 en 130 kPa (Evans et al., 2012), een tijdelijke drukverhoging levert doorgaans geen schade op aan vis (zie Hoofdstuk 3). Er

is overigens wel enige drukverlaging nabij de gemaalpomp zelf door aanzuiging (o.a. Evans et al., 2025). Hoeveel die drukverlaging bedraagt in onderhavige gevallen, is echter niet bekend, maar blijkt meestal van beperkte ordegrootte (Evans et al., 2012; Van Esch, 2012).

2.2.3 Stroming in hevels

De stroming die in een open hevel optreedt is afhankelijk van het hoogteverschil tussen buiten en binnenwater en de wrijving. De wrijving wordt o.a. opgebouwd door de diameter en lengte van de buis, wandruwheid, bochten en andere zaken die weerstand geven, zoals schuiven, schotten en luchtbellen. De overbruggingshoogte van de hevel heeft, behalve de grotere benodigde lengte, geen directe invloed op de stroomsnelheid. De theoretische stroming (zonder weerstand) wordt berekend met de wet van Toricelli op basis van het verval (hoogteverschil tussen beide peilen). Wanneer de stroming voor een vrije hevel met een binnendiameter van 50cm wordt berekend voor een verval van 1 m, 2 m en 3 m en met een realistische weerstand (Cd ~ 0,6) , dan worden waarden verkregen in de ordegrootte van 3 m/s (0,6 m^3/s) voor 1 m verval, 4 m/s (0,8 m^3/s) voor 2 m verval en 5 m/s (1 m^3/s) voor 3 m verval. Er is daarmee in het perspectief van vismigratie en waterbeheer sprake van zeer hoge stroomsnelheden en debieten. Bij kleinere buisdiameters, zoals toegepast bij Cocksdorp (130 mm) en Gemaal de Noord (125 mm), zijn lagere stroomsnelheden waargenomen (verval in range van 1-3 m) variërend van 0,45 m/s tot 1,7 m/s (Kooiman & Ploegaert, 2021; Vriese & Hop, 2015; Wintermans, 1999). Deze lagere stroomsnelheid komt door de grotere weerstand in deze lange leidingen (>80 m).

Bij hoge stroomsnelheden en turbulentie in combinatie met nauwe leidingen kan schade bij vis optreden als gevolg van schade door botsingen en grote stroomsnelheidsverschillen (Cox et al., 2023; Vriese & Hop, 2015). Uiterste limieten voor stroomsnelheid en visschade zijn sterk situatie-afhankelijk en niet systematisch vastgelegd (Cox et al., 2023). Toepassing van aanvullende weerstand of regulering met afsluiters of pompen is daarom in veel gevallen bij een hoger verval nodig. Deze weerstand kan het best in het aflopende deel van de hevel worden geplaatst, om drukverlies in oplopende richting (naar de top) van de hevel te voorkomen.

De stroomsnelheid die optreedt in hevels die zijn gereguleerd met afsluiters of pompen, is sterk afhankelijk van het ontwerp (zie Bijlage 3). Ook het instellen van een korte cyclus van het functioneren kan verhinderen dat de maximale stroomsnelheid wordt bereikt. Indien er in de hevel verlies optreedt van onderdruk door een lek of als de inlaat boven het waterpeil komt te liggen, dan stroomt de hevel met hoge snelheid leeg en komt droog te staan. Ook daarbij kan visschade optreden (o.a. Schiphouwer et al., 2023). Evenals voor het drukverloop, is een hydraulische berekening voor stroomsnelheid in een specifieke situatie van belang om in te schatten of er knelpunten optreden voor vismigratie of visschade.

3 Tolerantie, voorkeur en gedrag van vissen ten aanzien van drukverschillen

3.1 Effect van drukverschillen op vis

3.1.1 Zwemblaas en acclimatisatie

Vissen leven, afhankelijk van de diepte, onder een bepaalde druk. Vissoorten die op of nabij de bodem leven hebben vaak geen zwemblaas of zijn dusdanig geacclimatiseerd dat ze een licht negatief drijfvermogen hebben. Vissen die in de waterkolom leven zijn qua drijfvermogen meestal neutraal of hebben een licht negatief drijfvermogen wat gecompenseerd wordt door opwaartse beweging tijdens het zwemmen. Om het drijfvermogen te reguleren, maken veel vissoorten gebruik van een zwemblaas die met gas gevuld is en waarin, afhankelijk van de acclimatisatie aan een bepaalde diepte, gas wordt toegevoegd of verwijderd.

Onder de vissen met een zwemblaas, zijn er vanuit de evolutie twee groepen te onderscheiden; de physoclisten met een gesloten zwemblaas waarbij gasuitwisseling vanuit de zwemblaas via het bloed loopt en de physostomen met een open zwemblaas die met een kanaaltje op de slokdarm is aangesloten (Brown et al., 2014). Onder de physostomen bestaan er soorten waarvan de zwemblaas uit een enkele kamer bestaat en soorten (zoals karperachtigen) die twee kamers hebben (Zitek et al., 2026). In tabel 3.1 is voor een aantal Nederlandse soort en soortgroepen weergegeven tot welke groep ze behoren.

Tabel 3.1: Nederlandse vissoorten ingedeeld op basis van zwemblaas.

Gesloten zwemblaas (Physoclisten)
Europese aal (na ontwikkeling zwemblaas)
Driedoornige stekelbaars
Dik- en dunlipharder
Baarsachtigen (o.a. baars, snoekbaars, pos)
Open zwemblaas (Physostomen)
Europese aal (glasaal tijdens ontwikkeling zwemblaas)
Karperachtigen (o.a. brasem, blankvoorn, winde)
Snoek
Europese meerval
Zalmachten (o.a. zalm, spiering en forel)
Haringachtigen (o.a. fint, elft en haring)
Modderkruipers (o.a. kleine en grote modderkruiper)
Geen zwemblaas
Europese aal (glasaal vroeg stadium)
Bot
Rivierdonderpad
Prikken (o.a. zeeprik en rivierprik)
Grondels (o.a. brakwatergrondel en zwartbekgrondel)

Bij drukverschillen verandert het volume van de zwemblaas. De uitzetting van de zwemblaas is direct gerelateerd aan de druk (wet van Boyle), als de druk halveert dan

verdubbelt het volume van de zwemblaas. Een verdubbeling in volume treedt op als vissen van 10 meter diepte (200 kPa) naar de oppervlakte worden gehaald (100 kPa). Dat gebeurt ook na acclimatisatie aan de oppervlakte (100 kPa), als vissen vervolgens door een 5 meter hoge hevel (50 kPa) gaan. In beide gevallen is de ratio van drukverandering (RPC; *ratio of pressure change*) gelijk aan 2.

Physostomen met een open zwemblaas worden geacht sneller te kunnen acclimatiseren en minder gevoelig te zijn voor grote drukverschillen, omdat ze makkelijker kunnen ontgassen (boeren) of de zwemblaas opnieuw kunnen vullen (Brown et al., 2014; Vriese & Hop, 2015; Van Esch, 2012). Physoclysten met een gesloten zwemblaas hebben relatief veel tijd nodig om te acclimatiseren aan drukverschillen, aangezien gaswisselingen vanuit de zwemblaas met het bloed moeten plaatsvinden. De acclimatisatie voor physoclisten aan drukverschillen van enkele meters waterkolom kunnen afhankelijk van de soort tientallen minuten, uren tot zelfs dagen duren (o.a. Pavlov et al., 2002; Brown et al., 2014).

De gevoeligheid en aanpassingsvermogen voor drukverschillen kan sterk per soort, per stadium en zelfs per individu verschillen (o.a. Brown et al., 2014; Zitek et al., 2026). Daarbij valt op dat jonge karperachtigen die een open zwemblaas hebben met twee kamers, toch bijzonder kwetsbaar zijn ten aanzien van drukverlaging (Zitek et al., 2026).

3.1.2 Negatieve effecten van drukveranderingen op vissen

Vissen lopen vrijwel geen schade op door abrupte drukverhogingen, dat geldt ook voor vissen met een zwemblaas omdat deze wordt samengedrukt en er geen vervolgschade optreedt aan weefsels. Na drukverhoging moet echter wel acclimatisatie plaatsvinden, doorgaans een periode waarbinnen verschillende soorten gestrest of apathisch gedrag vertonen (Pavlov, 2002).

Voor abrupte tijdelijke (seconden of minder) drukverlagingen (met als laagste punt z.g. *nadir pressure*), zoals in hevels, zijn vissen met een zwemblaas veel gevoeliger, terwijl vissen zonder zwemblaas dat vrijwel niet zijn. Dat komt doordat de zwemblaas bij een drukverlaging direct uitzet (wet van Boyle) en er daardoor allerlei soorten schade (barotrauma) kan ontstaan aan de zwemblaas zelf en omliggende weefsels en organen (Brown et al., 2014). Ook wordt door het uitzetten van de zwemblaas het drijfvermogen beïnvloed, waarbij een vis in het ergste geval niet op eigen kracht meer beneden komt (o.a. Silva et al, 2019). Vissen kunnen door barotrauma directe sterfte ondervinden of dodelijk verwond raken, maar ook lichte verwondingen oplopen die ze kunnen overleven (Pflugrath et al., 2018). Vissen die licht verwond of versuft zijn, hebben verhoogd risico om gepredeerd te worden of kunnen in beginsel problemen ondervinden, zoals het zelf zoeken van voedsel (Pflugrath et al., 2018).

Naast het uitzetten van gassen, kan ook het uit oplossing komen van gassen een probleem vormen bij drukverlagingen. Dat geschiedt onder de wet van Henry, waarbij onder hoge druk meer gas (onder compressie) in het water kan oplossen en onder lage druk minder gas. Bij drukverlaging treedt decompressie op en komt gas uit oplossing (heersende supersaturatie, denk aan frisdrank met belletjes) en vormt vervolgens bellen in vloeistoffen en weefsels, waardoor bij vissen schade kan ontstaan. Bij mensen is dit bekend als decompressieziekte bij duikers. Ook als vissen tijdelijk een drukverhoging ondergaan kan de supersaturatie in weefsels en vloeistoffen optreden, waarna vervolgens bij decompressie bellen ontstaan in vloeistoffen en weefsels. In tegenstelling tot de wet van Boyle, hebben

processen onder de wet van Henry meer tijd nodig om op te treden (denk opnieuw aan een glas frisdrank). Als vissen kort (seconden) een drukverhoging of een drukverlaging ondergaan, is de kans op schade door dit mechanisme klein (Brown et al., 2014).

3.2 Tolerantie van vissen voor drukverschillen

3.2.1 Normaal gedrag - *free vertical range*

De range qua diepte of druk waarbinnen een vis zich vrij verticaal kan verplaatsen zonder last te krijgen van drukverschillen of te hoeven acclimatiseren, wordt de *free vertical range* (FVR) genoemd (Silva et al., 2019; Stensholt et al., 2002). Voor weinig soorten is deze range goed beschreven, voor de enkele physoclisten waar onderzoek naar is verricht ligt de FVR-bovengrens aan drukverlaging op 25% (RPC = 1,33) voor kabeljauw (*Gadus morhua*) en 29% (RPC = 1,41) voor het vlaggenbaarsje (*Anthias anthias*) (Silva et al., 2019; Stensholt et al., 2002). Voor drukverhoging ligt bij kabeljauw de grens op ongeveer 50% (Stensholt et al., 2002). De FVR is van groot belang voor vrijwillige vismigratie door hevels, aangezien binnen deze range vissen 'comfortabel' kunnen zwemmen. Buiten deze range is voor vissen met een gesloten zwemblaas eerst langdurige acclimatisatie (~ uren) nodig of ontstaat bij het verlaten van de range kans op ongemak (bijv. gaan drijven) of schade.

Er is vrijwel geen onderzoek gedaan aan drukverlaging in relatie tot vrijwillige migratie door vissen. Uitsluitend een onderzoek aan Silver perch (*Bidyanus bidyanus*) laat zien dat juvenielen van ongeveer 4 cm zelfstandig een hevel passeren van 2 meter hoog (RPC = 1,25) (Jeremy et al., 2025). De bovengrens aan de FVR is hiermee nog niet vastgesteld, al zal die voor deze soort waarschijnlijk niet veel hoger liggen (zie kader 3.1). Verwacht wordt dat voor veel soorten (waaronder karperachtigen en baars) een RPC rond de 1,25 (mogelijk lager!) een absolute bovengrens zal vormen voor de FVR en daarmee normaal gedrag en migratiemogelijkheden op vrijwillige basis. Terwijl voor dit voor verschillende physostomen met een zwemblaas die uit een enkele kamer bestaat en tolerante physoclisten veel hoger kan liggen. Bijvoorbeeld voor alen is de FVR-range waarschijnlijk veel groter door een flexibele zwemblaas bij drukverlaging en lang behoud van negatief drijfvermogen en het tevens goed kunnen functioneren met een negatief drijfvermogen bij drukverhoging (Pelster, 2023; Pflugrath et al., 2019).

Kader 3.1: Drukverlaging en sterfte, schade en vrijwillige doortrek bij Silver perch
De Australische zilverbaars (Silver perch - *Bidyanus bidyanus*) is een relatief goed onderzochte straalvinnige vis met gesloten zwemblaas zonder nauwe verwantschap met Nederlandse soorten. De soort is ten aanzien van drukverlagingen relatief robuust vergeleken met een aantal Nederlandse soorten zoals sneep, blankvoorn en baars die bij een lagere RPC voor juvenielen en larven een hogere mortaliteit kennen (Zitek et al., 2026). Bij een RPC van ongeveer 1,3 blijkt de kans op schade aan weefsels van juvenielen (circa 8 cm) van Silver perch 10%, terwijl bij een RPC van ongeveer 3,3 een aandeel van 10% dodelijk verwond is (Pflugrath et al., 2018). Onderzoek aan juvenielen van circa 4 cm, laat zien dat deze vrijwillig een hevel passeren van 2 meter hoog (RPC = 1,25) (Jeremy et al., 2025). De FVR waarbinnen vrijwillige migratie plaatsvindt ligt in dit geval dus op of boven een RPC van 1,25, echter zal niet veel hoger liggen aangezien er vanaf 1,3 de eerste schade plaatsvindt.

3.2.2 Schade en sterfte door drukverlaging

Voor veruit de meeste Nederlandse soorten en levensstadia is er geen specifieke kennis beschikbaar met betrekking tot tolerantie ten aanzien voor tijdelijke drukverlagingen. Voor een aantal uiteenlopende vissoorten in binnen- en buitenland is wel literatuur beschikbaar waarin schade en/of sterfte wordt beschreven ten aanzien van drukverlagingen, doorgaans vanuit onderzoek naar schade door pompen of turbines en door visserij. In tabel 3.2 is een overzicht gegeven, waarbij is gefocust op soorten die in Nederland voorkomen of relevante modelsoorten. Hierbij is *walleye* vanwege verwantschap een model voor snoekbaars en baars; Chinookzalm voor spiering; Amerikaanse aal voor Europese aal en tijger muskie voor snoek. Voor de vergelijkbaarheid van drukverlagingen waarbij schade of sterfte optreedt, is gekozen om gevonden waarden uit te drukken of te benaderen als RPC (*ratio of pressure change*: acclimatisatiedruk / laagste druk).

Tabel 3.2: Overzicht van waarden (gerangschikt op ratio of pressure change, RPC) uit verschillende onderzoeken ten aanzien van schade en sterfte aan diverse vissoorten en stadia als gevolg van blootstelling aan drukverlaging. Verschillende onderzoeken geven gedetailleerde dosis response curves, deze zijn in deze tabel samengevat in enkele kengetallen. Zwemblaastypen zijn weergegeven als G = physoclist, gesloten zwemblaas, O = physostoom, open zwemblaas, 1 of 2 = zwemblaas bestaande uit 1 of 2 kamers.

Vissoort	Zwemblaas	Stadium	Sterfte	RPC	Opmerkingen	Bron
Silver perch (B. bidyanus)	G	Juveniel	0%	1,3	10% kans op letsel door barotrauma	Pflugrath et al., 2018
Sneep (C. nasus)	O2	Juveniel 0+	0%	1,6	Sterfte: aandeel dodelijk verwond	Zitek et al., 2026
Baars (P. fluviatilis)	G	Juveniel 0+	0%	1,6	Sterfte: aandeel dodelijk verwond	Zitek et al., 2026
Baars (P. fluviatilis)	G	Larve	0%	1,6	Sterfte: aandeel dodelijk verwond	Zitek et al., 2026
Sneep (C. nasus)	O2	Larve	15%	1,6	Sterfte: aandeel dodelijk verwond	Zitek et al., 2026
Blankvoorn (R. rutilus)	O2	Larve/juveniel 0-	15%	1,6	Sterfte: aandeel dodelijk verwond	Zitek et al., 2026
Walleye (S. vitreus)	G	Adult	0%	1,6	10% kans op letsel door barotrauma	Schreer et al. 2009
Walleye (S. vitreus)	G	Adult	10%	1,8	Sterfte: aandeel dodelijk verwond	Schreer et al. 2009
Europese aal (A. anguilla)	G	Rode aal	0%	2,3	Sterfte: aandeel dodelijk verwond (a)	Evans et al., 2025
Chinook zalm (O. tshawytscha)	O1	Juveniel	10%	2,5	Sterfte: aandeel dodelijk verwond	Brown et al., 2012
Walleye (S. vitreus)	G	Adult	10%	2,5	Sterfte: aandeel dodelijk verwond (b)	Brown et al., 2016
Baars (P. fluviatilis)	G	Larve	5%	2,7	Sterfte: aandeel dodelijk verwond	Zitek et al., 2026
Tijger muskie (E. lucius X masquinongy)	O	Adult	10%	2,7	Sterfte: aandeel dodelijk verwond (b)	Brown et al., 2016
Baars (P. fluviatilis)	G	Juveniel 0+	28%	2,7	Sterfte: aandeel dodelijk verwond	Zitek et al., 2026
Blankvoorn (R. rutilus)	O2	Larve/juveniel 0-	45%	2,7	Sterfte: aandeel dodelijk verwond	Zitek et al., 2026
Sneep (C. nasus)	O2	Larve	48%	2,7	Sterfte: aandeel dodelijk verwond	Zitek et al., 2026
Sneep (C. nasus)	O2	Juveniel 0+	55%	2,7	Sterfte: aandeel dodelijk verwond	Zitek et al., 2026
Europese aal (A. anguilla)	G	Glasaal	0%	2,9	Sterfte: geen schade door drukverschil (c)	Deitelzweig Senior et al., 2026
Driedoornige stekelbaars (G. aculeatus)	G	Adult	0%	2,9	Sterfte: geen schade door drukverschil (c)	Deitelzweig Senior et al., 2026
Silver perch (B. bidyanus)	G	Juveniel	10%	3,3	Sterfte: aandeel dodelijk verwond	Pflugrath et al., 2018
Chinook zalm (O. tshawytscha)	O1	Juveniel	50%	4,4	Sterfte: aandeel dodelijk verwond	Brown et al., 2012
Baars (P. fluviatilis)	G	Larve	15%	4,5	Sterfte: aandeel dodelijk verwond	Zitek et al., 2026
Europese aal (A. anguilla)	G	Pootaal	0%	10	Geen schade waargenomen	Wintermans, 1999 (f)
Amerikaanse aal (A. rostrata)	G	Schieraal	0%	9,3	Sterfte: direct, 13% intern verwond (d)	Pflugrath et al., 2019
Europese aal (A. anguilla)	G	Glasaal	0%	10	Geen schade gerapporteerd	Wintermans, 1999 (f)
Driedoornige stekelbaars (G. aculeatus)	G	Adult	0%	10	Geen schade gerapporteerd	Wintermans, 1999 (f)
Amerikaanse aal (A. rostrata)	G	Rode aal	0%	10,2	Sterfte: direct, 11% intern verwond (e)	Pflugrath et al., 2019

(a) RPC: o.b.v. grootste drukverschil
(b) RPC: o.b.v. geplotte voorlopige curve
(c) RPC: Inschatting o.b.v. statische druk, in afwachting van metingen druksensor
(d) RPC: range van 3,0-16,1
(e) RPC: range van 3,1-21,4,
(f) RPC geschat o.b.v. dijkhoogte van 8,5 m NAP (Esselink et al., 2003) en polderpeil van ca. -0,5 m NAP

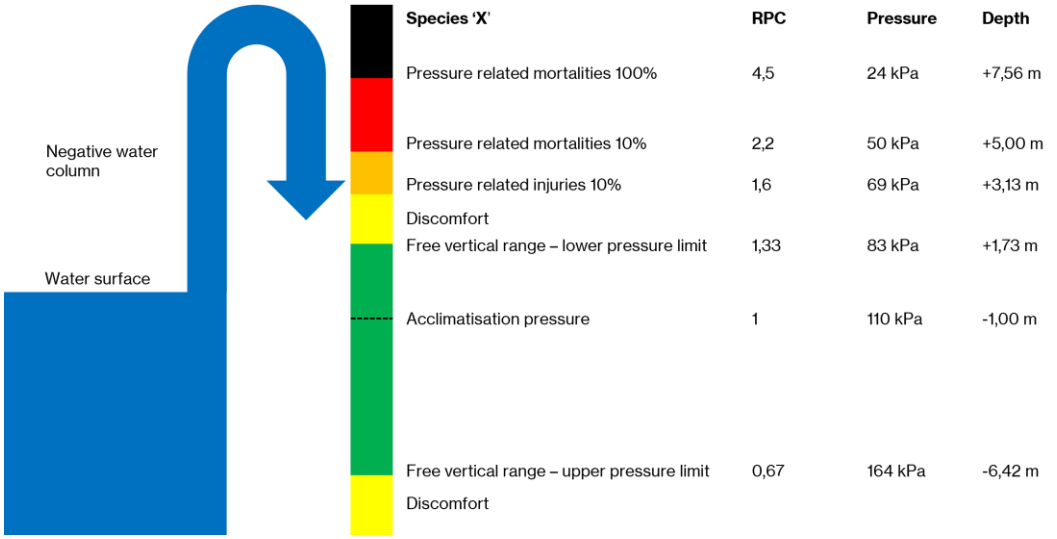
Het beeld dat hieruit naar voren komt is dat er grote verschillen zijn tussen soorten, o.a. afhankelijk van zwemblaastype en robuustheid van de bouw van de vissoorten (Brown et al., 2014). Ook zijn er binnen soorten verschillen tussen individuen en levensstadia, waarbij bij de ene soort juvenielen kwetsbaarder zijn en bij de andere soort juist de adulten.

Opvallend is ook dat driedoornige stekelbaars en aal, die nota bene een gesloten zwemblaas hebben, zeer goed bestand zijn tegen sterke drukverlagingen. Bij een 8,5 m hoge hevel op Texel werd ook geen sterfte of schade gerapporteerd aan de doelsoorten glasaal en driedoornige stekelbaars (Wintermans, 1999; Vriese & Hop, 2015).

Hoewel in veel studies gekeken is naar sterfte en dodelijke verwondingen, komt schade of verminderd functioneren vaak al voor bij lagere drukverschillen dan die voor sterfte zijn gerapporteerd (Pflugrath et al., 2018 & 2020; Schreer et al., 2011). Ook de blootstelling aan drukverlaging speelt een rol, hoe langzamer de opbouw verloopt, hoe minder schadelijk, hoe langer het verblijf in een tijdelijke drukverlaging, hoe schadelijker (Brown et al., 2014).

3.3 Afgeleide drempelwaardes voor drukverlaging

Drempelwaardes voor tijdelijke (seconden) drukverlaging zijn te vinden in de literatuur, echter deze zijn generiek gesteld als waarde waarbij de onderzochte soorten geringe sterfte ondervinden, een niveau dat toelaatbaar wordt geacht voor waterwerken zoals waterkrachtcentrales. Zo beschrijven Vriese & Hop (2015) op basis van meerdere bronnen (o.a. Van Esch, 2012) en Boys et al. (2014) een drukverlaging van 40% (RPC = 1,66) als acceptabel voor physoclisten die ze gevoeliger achten dan physostomen. Pflughrath et al. (2020) laten zien in hoeverre directe mortaliteit, uitgestelde mortaliteit en schade optreden bij een groot aantal vissoorten, dit laat grote verschillen zien tussen verschillende soorten. Bij een RPC 1,66 is er bij veel Australische en Amerikaanse soorten reeds enige sprake van individuen met beschadiging en dit neemt vanaf die waarde ook sterk toe. In tabel 3.2 is echter te zien dat bij een dergelijke drukverlaging voor juveniele, larvale en adulte stadia van verschillende soorten op dat punt al enige schade of sterfte optreedt. In afbeelding 3.1 is de specifieke respons op een tijdelijke drukverlaging van een fictieve vissoort samengevat. Voor de Nederlandse soorten is soort en stadium specifieke informatie op dit detailniveau niet voorhanden.



Afbeelding 3.1: Samenvattend schematisch overzicht van de kritieke grenzen van vissoort 'X' die korte tijd wordt blootgesteld aan verschillende drukken in de waterkolom. De weergegeven waarden hebben geen betrekking op een specifieke soort, maar vallen binnen waarden die voor verschillende physoclisten en physostomen gevonden zijn. Per situatie, soort en stadium zal deze weergave echter uniek zijn (afbeelding: RAVON).

Voor vismigratievoorzieningen, die als doel hebben de vis onbeschadigd en volledig vitaal te laten migreren, is het van belang passende eisen te stellen ten aanzien van de doelsoorten. Bij robuuste soorten kunnen die eisen minder streng zijn, dan bij minder robuuste soorten of kwetsbare levensstadia. In het geval van vismigratievoorzieningen waar een vis vrijwillig doorheen moet zwemmen, is het van belang om na te gaan of de omstandigheden binnen de *free vertical range* (FVR) vallen.

Hoewel de kengetallen voor soorten en stadia sterk uiteenlopen en er veel onbekend is, is in onderstaande tabel (3.3) een handvat gegeven voor drempelwaardes bij het ontwerpen van vispassages met hevels in Nederland. Hierin is voor vrijwillige vismigratie van alle soorten en stadia, waarbij boven een RPC van 1,3 voor enkele in de literatuur beschreven soorten de eerste schade ontstaat, een maximale RPC ingeschat van 1,25 voor vrijwillige migratie voor alle soorten en stadia.

Tabel 3.3: Overzicht inschatting van veilige drempelwaarden voor drukverlagingen voor verschillende typen vismigratie en doelsoorten. Voor verschillende specifieke soorten en stadia kunnen deze waarden hoger liggen dan hier weergegeven.

Type vismigratie:	**Vrijwillig**	**Onvrijwillig**
Doelsoorten	*RPC*	*RPC*
Alle soorten en stadia	1,25	1,3
Aal (alle stadia)	?	8,0
Driedoornige stekelbaars (adult)	?	8,0

Voor kwetsbare soorten (karperachtigen en baarsachtigen) is het raadzaam binnen deze waarden te blijven of aanvullend onderzoek te plegen naar een meer accurate drempelwaarde. Die drempelwaarde kan mogelijk voor verschillende (doel)soorten ook een stuk hoger liggen. Bijvoorbeeld bij de vispassage van Gemaal Oudenhoorn zijn aanwijzingen dat verschillende vissoorten hier onder een hogere RPC-waarde van 1,88 vrijwillig passeren (zie kader 3.1). Als de onderdruk in toepassingen voor vrijwillige migratie te groot is, dan veroorzaakt dit geen schade maar levert het een verminderde efficiëntie op van de voorziening.

Voor aal en driedoornige stekelbaars geldt een veel hogere tolerantie, verwacht wordt (zie tabel 3.2) dat een RPC tot ongeveer 10,0 geen noemenswaardige schade oplevert. Veiligheidshalve is een drempelwaarde van 8,0 weergegeven. Dit betekent dat er op zout-zoet overgangen, met doelsoorten driedoornige stekelbaars en glasaal en mogelijke meeliftende soorten als brakwatergronden en bot, mogelijkheden zijn voor toepassing van voorzieningen die gebruik maken van onvrijwillige migratie met een sterke drukverlaging. Voor de Hollandse Delta valt daarbij te denken aan locaties langs het Grevelingenmeer.

Voor vrijwillige migratie is voor aal en driedoornige stekelbaars vermoedelijk een lagere RPC dan 8.0 van toepassing, echter is niet bekend tot waar de FVR reikt en bij welke onderdruk deze soorten gaan drijven of ander ongemak ondervinden en daardoor gehinderd worden in het verder zwemmen. Dit zou in de praktijk of met een onderzoeksopstelling in meer detail vastgesteld kunnen worden.

Kader 3.1: Casus drukverloop en vismigratie cyclische hevelvispassage Oudenhoorn
De vispassage van gemaal Oudenhoorn kan worden gekenschetst als een vissluis met hevel waarbij aan de polderzijde de opvangbak is gepositioneerd. De vis zwemt vrijwillig naar de vissluis via de hevel als doorzwemleiding tegen de lokstroom in, die door een lokstroompomp wordt opgewekt. De hevelleiding ligt tussen het buitenpeil (0 m NAP) en de opvangbak met visveilige lokstroompomp aan de polderzijde (-1,20 m NAP). Vis wordt periodiek vanuit de opvangbak uitgespoeld naar het vaste polderpeil van -2,25 m NAP. De inzwemopening aan de buitenzijde ligt op -0,85 m NAP en de maximale hoogte van de hevel is +4,4 m NAP.

Tijdens het hevelproces is de opvangbak aan de polderzijde niet direct in contact met het polderpeil, maar via een lokstroompomp die water vanuit de maaltocht verpompt door de opvangbak richting de visleiding. Onder statische druk (referentievlak buitenpeil) is er een drukverschil van 110 kPa bij de inzwemopening en 58 kPa op de top van de hevel, ofwel een RPC van 1,88. Tijdens het vismigratieproces draait de lokstroompomp die afhankelijk van het toerental volgens opgave een bereik qua opvoerhoogte heeft van 2,15-4,87m ofwel in de ordegrootte van ~3 m en ~30 kPa. Het is noodzakelijk de pomp te draaien voor het verkrijgen van een continue lokstroom rekening houdend met getijfluctuatie aan de zijde van het Haringvliet, aangezien de hevel geen effectief verval heeft. In een gesloten leiding of een leiding met veel weerstand zou druk van de lokstroompomp een grote invloed hebben op het drukverloop. Gezien de open leiding met een ruime binnendiameter van 400mm en een lage stroomsnelheid van 0,3m/s, zal de toegevoegde druk echter beperkt zijn. De dynamische druk zal in de praktijk dicht bij het verloop liggen dat optreedt onder statische druk.

In de passagemonitoring zijn in 2025 verschillende vissoorten aangetroffen in de passagefuik (Kroon & Van Wijk, 2025). Deze vissoorten kunnen echter binnenkomen via de lokstroompomp (opgezogen door de pomp), of vanuit het Haringvliet door vrijwillig tegen de lokstroom in door de leiding naar de opvangbak te zwemmen. De soorten waarvan wordt verwacht dat ze vrijwillig zijn gemigreerd zijn jonge stadia van aal, adulte driedoornige stekelbaars, juveniele snoekbaars, winde en roofblei. Hoewel het niet 100% sluitend is, is het aannemelijk dat deze vissen de RPC van 1,88 zelfstandig overbrugd hebben en dat dit voor deze individuen zowel binnen het tolerantiebereik als de free vertical range (FVR) vallen. Nader onderzoek met een aangepaste opzet gericht op met zekerheid passerende vissen en druksensoren, kan betrouwbaarder inzicht bieden voor deze soorten.

4 Beschouwing toepassing van hevels in vismigratievoorzieningen

Hevels en andere type leidingen waar onderdruk heerst, bieden toepassingen in vismigratievoorzieningen om vissen vrijwillig of onvrijwillig een hoogte te laten overbruggen. Op basis van het hier gegeven overzicht blijkt dat er grote verschillen zijn tussen individuen, vissoorten en stadia in de mate waarin negatief effect ondervonden wordt van de heersende onderdruk. Voor waterbeheerders en ontwerpers van vismigratievoorzieningen betekent dit dat bij gebruik van hevels in vismigratievoorzieningen rekening gehouden moet worden met de soorten en stadia die potentieel gebruik maken van de voorziening.

Op kleinere zout-zoet overgangen waar uitsluitend jonge aal, driedoornige stekelbaars en soorten als brakwatergrondel en bot migreren, kunnen hoge hevels (>8m) nog geschikt zijn om vis via onvrijwillige migratie effectief en vitaal over te zetten. Dit zou in de Hollandse Delta voor locaties langs het Grevelingenmeer van toepassing kunnen zijn. Andersom zou schieraal ook (op onvrijwillige basis) met een dergelijke hevel kunnen migreren. Dergelijke oplossingen kunnen daarom op bepaalde locaties en migratiemomenten bij aanbod van robuuste doelsoorten worden ingezet. Op plaatsen waar andere soorten migreren (zoals karperachtigen, zalmachtigen en baarsachtigen), zijn zulke hoge hevels onwenselijk, aangezien er dan vrijwel zeker visschade optreedt aan deze soorten.

Hevels voor een groter soortenspectrum en met inbegrip van kwetsbare stadia mogen minder drukverlaging hebben, omdat er snel schade ontstaat aan o.a. karperachtigen en baarsachtigen in verschillende levensstadia. Leidinghoogten ten opzichte van het laagste peil moeten voor hevels onder de 2 meter (RPC < 1,3) blijven voor onvrijwillige migratie en tot rond de 1 meter (RPC < 1,25) voor vrijwillige migratie. Deze getallen betreft een best beschikbare schatting, die voor de Nederlandse doelsoorten verder kan worden onderbouwd. Dit houdt ook in dat bij primaire waterkeringen bij vismigratie voor een breed soortenspectrum semi-horizontale leidingen, zonder te grote hoogte met 'hangend' water, door de kering een voorwaarde zijn voor het onbeschadigd en vitaal overzetten van vis binnen een vismigratievoorziening.

Het uiteindelijke ontwerp bepaalt of de vismigratie voor verschillende doelsoorten effectief verloopt en of de vismigratievoorziening duurzaam blijft functioneren (Kooiman et al., 2026; Schiphouwer et al., 2023). Dit is sterk locatie en doelsoort specifiek, waarbij rekening gehouden moet worden met het gedrag van de doelsoort op verschillende momenten. De uiteengezette kennis uit dit rapport kan bij het ontwerpen van nieuwe vispassages worden meegenomen in de ontwerpeisen. Hierbij is het belangrijk om drukveranderingen vooraf goed door te rekenen. Ook verdient het aanbeveling de kennisbasis voor optredende schade en de mogelijkheid tot vrijwillige migratie van vissoorten bij drukverlaging te vergroten.

Literatuur

Brown, R. S., Carlson, T. J., Gingerich, A. J., Stephenson, J. R., Pflugrath, B. D., Welch, A. E. & Townsend, R. L., 2012. Quantifying mortal injury of juvenile Chinook salmon exposed to simulated hydro-turbine passage. *Transactions of the American Fisheries Society*, *141*(1), 147-157.

Brown, R.S., Colotelo, A.H., Pflugrath, B.D., Boys, C.A., Baumgartner, L.J., Deng, Z.D. & Singhanouvong, D., 2014. Understanding barotrauma in fish passing hydro structures: a global strategy for sustainable development of water resources. Fisheries, 39(3), 108-122.

Brown, R.S., Walker, R.W., & Stephenson, J.R., 2016. A preliminary assessment of barotrauma injuries and acclimation studies for three fish species (No. PNNL--24720). Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States).

Boys, C., Navarro, A., Robinson, W., Fowler, A., Chilcott, S., Miller, B., ... & Deng, Z., 2014. Downstream fish passage criteria for hydropower and irrigation infrastructure in the Murray–Darling Basin. Fisheries Final Report Series No. 141. NSW Department of Primary Industries, Port Stephens Fisheries Institute, Australia.

Cox, R. X., Kingsford, R. T., Suthers, I., & Felder, S., 2023. Fish injury from movements across hydraulic structures: a review. Water, 15(10), 1888.

Deitelzweig Senior, P.D., M. Kooiman & S. Ploegaert, 2026. Effecten van een onderdruk-vispassage op de overleving en gezondheid van glasaal en driedoornige stekelbaars. Onderzoek naar schade en (uitgestelde) sterfte bij de continue retourstroom passage met kattenrug bij De Noord en de cyclische vrij-verval passage bij Prommelsluis. Stichting RAVON, Nijmegen. Rapportnummer 2025.163.

Esselink, P., C. de Leeuw, J. Graveland, G. Berg, 2003, Ecologische herstelmaatregelen in zoute wateren; Een ecologische evaluatie over de periode 1990-2000. Rapportnummer: RIKZ/2003.028. Rijksinstituut voor Kust en Zee, Middelburg.

Esch, B. P. M. van, 2012. Fish Injury and Mortality During Passage Through Pumping Stations. ASME. J. Fluids Eng. July 2012; 134(7): 071302.

Evans, O., Don, A., Tuhtan, J. A., Toming, G., Williams, C. F., Price, J. C.& Bolland, J. D., 2025. The effectiveness of a fish-friendly pumping station for critically endangered European eel; An assessment using live eels, fish-mounted sensors and passive sensors. Ecological Engineering, 213, 107526.

Jeremy, Y., Martino, J., Felder, S., Kingsford, R. T., & Suthers, I. M., 2025. Tackling fish passage problems: conservation implications of fish ascending hypobaric pressure gradients in a pipe. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 35(1), e70050.

Kooiman, M. & S.M.A. Ploegaert, 2022. Passagecheck Zeeland – 2021. Efficiëntie van zout-zoet vismigratievoorzieningen bij gemalen Loohoek en De Noord voor glasaal en driedoornige stekelbaars. Stichting RAVON, Nijmegen. Rapportnummer 2021.044-PC21.

Kooiman, M., I. Spruijt, S. Ploegaert, P.D. Deitelzweig Senior, A. Kool & M. Schiphouwer, 2026. Passagecheck synthese. Onderzoeksresultaten testen vismigratievoorzieningen op zout-zoet overgangen en prioritering van maatregelen in Zeeland. Stichting RAVON, Nijmegen. Rapportnummer 2025.164.

Kroes, M.J., & Monden, S.A., 2005. Vismigratie, een handboek voor herstel in Vlaanderen en Nederland. Uitgegeven door Organisatie ter Verbetering van de Binnenvisserij en Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Nieuwegein/Brussel.

Kroon, J.W. & A.N. van Wijk, 2018. Gemalenonderzoek Hollandse Delta; Monitoring visaanbod en –passage bij 12 gemalen, VSN2017.08. Visserij Service Nederland in opdracht van Waterschap Hollandse Delta.

Kroon, J.W. & A.N. van Wijk, 2025. Monitoring vismigratie gemaal Oudenhoorn; Onderzoek visaanbod en -passage. VSN2025.15. Visserij Service Nederland in opdracht van Waterschap Hollandse Delta.

Pavlov, D. S., Lupandin, A. I., Kostin, V. V., Kirillov, P. I., & Sadkovskii, R. V., 2002. Adaptation Potential of Perches, Cyprinids, and Salmonid Fishes to Changes of Hydrostatic Pressure. Journal of Ichthyology, 42(2), S255.

Pelster, B., 2023. Swimbladder function in the European eel Anguilla anguilla. Fishes, 8(3), 125.

Pflugrath, B. D., Boys, C. A., & Cathers, B. (2018). Predicting hydraulic structure-induced barotrauma in Australian fish species. *Marine and Freshwater Research*, *69*(12), 1954-1961.

Pflugrath, B. D., Harnish, R., Rhode, B., Beirao, B., Engbrecht, K., Stephenson, J. R., & Colotelo, A. H., 2019. American eel state of buoyancy and barotrauma susceptibility associated with hydroturbine passage. Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems, (420), 20.

Pflugrath, B. D., Saylor, R., Engbrecht, K. M., Mueller, R. P., Stephenson, J. R., Bevelhimer, M., & Colotelo, A. H., 2020. BIOLOGICAL RESPONSE MODELS: Predicting injury and mortality of fish during downstream passage through hydropower facilities. No. PNNL-30893. Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), Richland, WA (United States).

Schiphouwer, M.E. & M. Kooiman, 2021. Landinwaartse migratie van aal via de Noord-Hollandse IJsselmeerkust. Onderzoek naar intrek, aanbod en knelpunten. Rapportnummer 2019.053. RAVON, Nijmegen.

Schiphouwer, M., S. Ploegaert & B. Peters, 2023. Vispassage Hoofdgemaal Vier Noorderkoggen; Programma van eisen, variantenstudie en uitwerking voorkeursvariant. Projectnummer 2022.100. Stichting RAVON, Nijmegen.

Schreer, J. F., Gokey, J., & DeGhett, V. J. 2009. The incidence and consequences of barotrauma in fish in the St. Lawrence River. *North American Journal of Fisheries Management*, *29*(6), 1707-1713.

Silva, L., Rosa, R. G., Campino, N., Martins, I., Pinho, M. R., Correia, J., & Morato, T., 2019. The effect of rapid decompression on barotrauma and survival rate in swallowtail seaperch (Anthias anthias): Defining protocols for mitigating surfacing mortality. Aquaculture, 498, 405-412.

Stensholt, B. K., Aglen, A., Mehl, S., & Stensholt, E. 2002. Vertical density distributions of fish: a balance between environmental and physiological limitation. ICES Journal of Marine Science, 59(4), 679-710.

Vriese, F. T. & J. Hop, 2015. Door getijdenturbines toelaatbare vissterfte in het Grevelingenmeer; Fase 1a–effect van de Flakkeese spuisluis. Rapportnummer: 20141067/rap02. ATKB, Geldermalsen.

Wintermans, G.J.M., 1999. Een hevel-vispassage op Texel. De Levende Natuur, 100(1), 14-18.

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.

Bijlage 1: Hydraulische berekening hevel

Hydraulische voorbeeldberekening (met behulp van Gemini AI) voor een stromende hevel van **100 meter lang** ($\varnothing 12{,}5$ cm) bij een hoogteverschil van **1 meter** (aanzuiging 0 m, uitstroom -1 m, top $+6$ m).

1. Uitgangspunten en Parameters

- **Buisdiameter (D):** $0{,}125$ m
- **Buisoppervlakte (A):** $\frac{\pi}{4} \cdot (0{,}125)^2 \approx 0{,}01227$ m^2
- **Totale leidinglengte (L):** 100 m
- **Totaal verval (Δh):** $1{,}0$ m
- **Wandruwheid (ϵ):** $0{,}05$ mm $= 0{,}00005$ m (standaard gladde kunststof/stalen leiding)
- **Kinematische viscositeit water (ν):** $1{,}0 \cdot 10^{-6}$ m^2/s (bij ≈ 20°C)
- **Valversnelling (g):** $9{,}81$ m/s^2
- **Dichtheid water (ρ):** 1000 kg/m^3

2. Energiebalans & Stroomsnelheid (Darcy-Weisbach)

Het beschikbare hoogteverschil (Δh) levert de energie die wordt omgezet in stroomsnelheid (v) en opgesnoept door leidingwrijving (h_w):

$$\Delta h = \frac{v^2}{2g} + h_w = \frac{v^2}{2g} + f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} = \frac{v^2}{2g}\left(1 + f \cdot \frac{L}{D}\right)$$

Waarbij f de wrijvingsfactor van Darcy is.

A. Wrijvingsfactor (f) en Reynoldsgetal (Re)

We berekenen dit iteratief:

1. **Relatieve ruwheid:** $\frac{\epsilon}{D} = \frac{0{,}00005}{0{,}125} = 0{,}0004$
2. Bij een geschatte turbulentie geldt met de **Colebrook-White** formule dat $f \approx 0{,}020$.

B. Berekening van de stroomsnelheid (v)

Vul de bekende waarden in:

$$1{,}0 = \frac{v^2}{2 \cdot 9{,}81}\left(1 + 0{,}020 \cdot \frac{100}{0{,}125}\right)$$

$$1{,}0 = \frac{v^2}{19{,}62}(1 + 16)$$

$$1{,}0 = \frac{v^2}{19{,}62} \cdot 17$$

$$v^2 = \frac{19{,}62}{17} \approx 1{,}154 \Rightarrow v = \sqrt{1{,}154} \approx \mathbf{1{,}07}\ \text{m/s}$$

(Controle Re*:* $Re = \frac{v \cdot D}{\nu} = \frac{1{,}07 \cdot 0{,}125}{10^{-6}} \approx 133.750$*. Met Re en* $\frac{\epsilon}{D}$ *blijkt* $f \approx 0{,}020$ *exact te kloppen).*

3. Dynamische Druk op het Hoogste Punt ($+6$ m)

Stel dat het hoogste punt exact halverwege de leiding ligt op $L_1 = 50$ meter vanaf de inlaat.

We passen de uitgebreide **wet van Bernoulli** toe tussen de waterinlaat (punt 0) en de top (punt 1):

$$p_0 + \rho g h_0 + \frac{1}{2}\rho v_0^2 = p_1 + \rho g h_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \Delta p_{\text{wrijving}}$$

Gegevens voor deze balans:

- **Inlaat (0):** $p_0 = 101{,}3$ kPa (atmosfeer), $h_0 = 0$ m, $v_0 \approx 0$ m/s
- **Top (1):** $h_1 = +6$ m, $v_1 = 1{,}07$ m/s
- **Wrijvingsverlies over** 50 m **($h_{w,1}$):**

$$h_{w,1} = f \cdot \frac{L_1}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0{,}020 \cdot \frac{50}{0{,}125} \cdot \frac{1{,}07^2}{19{,}62} = 8 \cdot 0{,}0584 = \mathbf{0{,}467}\ \text{m waterkolom}$$

Uitgewerkte Drukberekening (p_1):

$$p_1 = p_0 - \rho \cdot g \cdot (h_1 + h_{w,1}) - \frac{1}{2}\rho v_1^2$$

$$\rho \cdot g \cdot h_1 = 1000 \cdot 9{,}81 \cdot 6 = 58.860\ \text{Pa} \quad (58{,}86\ \text{kPa})$$

$$\rho \cdot g \cdot h_{w,1} = 1000 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}467 = 4.581\ \text{Pa} \quad (4{,}58\ \text{kPa})$$

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 = 0{,}5 \cdot 1000 \cdot 1{,}07^2 = 572\ \text{Pa} \quad (0{,}57\ \text{kPa})$$

Samenvoegen:

$$p_1 = 101{,}3\ \text{kPa} - 58{,}86\ \text{kPa} - 4{,}58\ \text{kPa} - 0{,}57\ \text{kPa} = \mathbf{37{,}29}\ \text{kPa}$$

Samenvatting Uitkomsten

- **Stroomsnelheid (v):** $1{,}07$ m/s
- **Debiet (Q):** $0{,}01227\ \text{m}^2 \cdot 1{,}07\ \text{m/s} = 0{,}0131\ \text{m}^3/\text{s} = \mathbf{13{,}1}$ liter/seconde
- **Statische druk op top (stilstaand):** $101{,}3 - 58{,}9 = \mathbf{42{,}4}$ kPa
- **Dynamische druk op top (stromend):** $42{,}4 - 4{,}58 - 0{,}57 = \mathbf{37{,}3}$ kPa

(N.B. Als er extra weerstanden en bochten op het eerste traject zitten, zal het drukverlies over de eerste 50m nog iets groter worden, waardoor de druk op de top richting de $30 - 35$ kPa *kan zakken).*

Bijlage 2: Hydraulische berekening hevel met opvoerpomp

Hydraulische voorbeeldberekening (met behulp van Gemini AI) voor een stromende hevel van **100 meter lang** (Ø12,5 cm) bij een hoogteverschil van **1 meter** (aanzuiging 0 m, uitstroom −1 m, top +6 m). Als er een opvoerpomp aan het begin van de leiding wordt geplaatst die een extra druk van 30 kPa levert, verandert dit de dynamiek van het systeem aanzienlijk.

De pomp injecteert extra energie, wat leidt tot een hogere stroomsnelheid, een groter debiet én een gunstigere (hogere) druk op de top van de hevel.

1. Nieuwe Stroomsnelheid en Debiet

De toegevoegde pompdruk ($\Delta p_{\text{pomp}} = 30.000$ Pa) telt op bij het natuurlijke hoogteverschil ($\Delta h = 1$ m).

De totale beschikbare energiehoogte wordt:

$$H_{\text{totaal}} = \Delta h + \frac{\Delta p_{\text{pomp}}}{\rho \cdot g} = 1{,}0 + \frac{30.000}{1000 \cdot 9{,}81} = 1{,}0 + 3{,}06 = \mathbf{4{,}06} \text{ meter}$$

A. Berekening van de nieuwe snelheid (v)

Via de uitbreiding van de Darcy-Weisbach balans:

$$H_{\text{totaal}} = \frac{v^2}{2g}\left(1 + f \cdot \frac{L}{D}\right)$$

$$4{,}06 = \frac{v^2}{19{,}62}\left(1 + 0{,}020 \cdot \frac{100}{0{,}125}\right)$$

$$4{,}06 = \frac{v^2}{19{,}62} \cdot 17 \Longrightarrow v^2 = \frac{4{,}06 \cdot 19{,}62}{17} \approx 4{,}686$$

$$v = \sqrt{4{,}686} \approx \mathbf{2{,}16} \text{ m/s}$$

B. Nieuwe debiet (Q)

$$Q = A \cdot v = 0{,}01227 \text{ m}^2 \cdot 2{,}16 \text{ m/s} = 0{,}0265 \text{ m}^3/\text{s} = \mathbf{26{,}5} \text{ liter/seconde}$$

*Het debiet verdubbelt ruimschoots t.o.v. de situatie zonder pomp (*13,1 l/s → 26,5 l/s*).*

2. Nieuwe Druk op het Hoogste Punt (+6 m)

Omdat de stroomsnelheid hoger is, neemt de leidingwrijving over de eerste 50 meter ook toe. We berekenen het nieuwe drukverlies over de stijgleiding ($h_{w,1}$):

$$h_{w,1} = 0{,}020 \cdot \frac{50}{0{,}125} \cdot \frac{2{,}16^2}{19{,}62} = 8 \cdot 0{,}238 = \mathbf{1{,}90} \text{ m waterkolom} \quad (\approx 18{,}6 \text{ kPa})$$

Drukbalans tot aan de top:

$$p_{\text{top}} = p_{\text{atmosfeer}} + \Delta p_{\text{pomp}} - \text{Hoogteverlies} - \text{Wrijvingsverlies} - \text{Snelheidsdruk}$$

- **Atmosfeerdruk (p_0):** $101{,}3$ kPa
- **Pompdruk:** $+30{,}0$ kPa
- **Hoogte ($+6$ m):** $-58{,}9$ kPa
- **Wrijving (50 m):** $-18{,}6$ kPa
- **Snelheidsdruk ($\frac{1}{2}\rho v^2$):** $-2{,}3$ kPa

$$p_{\text{top}} = 101{,}3 + 30{,}0 - 58{,}9 - 18{,}6 - 2{,}3 = \mathbf{51{,}5}\ \text{kPa}$$

Vergelijkingsoverzicht

Parameter	**Zonder pomp**	**Met pomp (30 kPa)**
Stroomsnelheid (v)	$1{,}07$ m/s	$2{,}16$ m/s
Debiet (Q)	$13{,}1$ l/s	$26{,}5$ l/s
Druk op de top ($+6$ m)	$37{,}3$ kPa	$51{,}5$ kPa

Belangrijkste conclusie

Hoewel de hogere stroomsnelheid voor meer leidingwrijving zorgt, levert de pomp ruim voldoende druk om dit op te vangen. De absolute druk op de top **stijgt van** $37{,}3$ kPa **naar** $51{,}5$ kPa. Dit verkleint het risico op cavitatie en ontgassing op het hoogste punt aanzienlijk en helpt de hevel veel stabieler en sneller te laten draaien.

Bijlage 3: Overzicht berekeningen verschillende hevelsituaties

Hydraulische voorbeeldberekening (met behulp van Gemini AI) met hieronder een vergelijkingsoverzicht van alle drie de bedrijfssituaties voor en nauwe leiding van **100 meter** (Ø12,5 cm) bij 1 meter verval (eerste tabel) en vervolgens voor een ruime leiding (Ø50cm) (tweede tabel).

Tabel B3.1: Totaaloverzicht: Druk, Snelheid en Debiet

Parameter	**1. Afsluiter DICHT(Statisch / Stilstaand)**	**2. Afsluiter OPEN(Puur op hevelwerking)**	**3. Met Pomp AAN(Opvoerpomp 30 kPa)**
Stroomsnelheid (v)	0 m/s	1,07 m/s	2,16 m/s
Debiet (Q) in l/s	0 l/s	13,1 l/s	26,5 l/s
Debiet (Q) in m³/h	0 m^3/h	47 m^3/h	95 m^3/h
Druk op Inlaat (0 m)	101,3 kPa	101,3 kPa	131,3 kPa
Druk op Top (+6 m)	42,4 kPa	37,2 kPa	51,5 kPa
Druk op Uitlaat (−1 m)	111,1 kPa *(op klep)*	101,3 kPa	101,3 kPa *(vrije uitstroom)*

Tabel B3.2: Totaaloverzicht: Buis Ø 50 cm (100 meter lang)

Parameter	1. Afsluiter DICHT(Statisch / Stilstaand)	2. Afsluiter OPEN(Puur op hevelwerking)	3. Met Pomp AAN(Opvoerpomp 30 kPa)
Stroomsnelheid (v)	0 m/s	2,50 m/s	5,03 m/s
Debiet (Q) in l/s	0 l/s	490 l/s	987 l/s
Debiet (Q) in m³/h	0 m^3/h	1.765 m^3/h	3.553 m^3/h
Druk op Inlaat (0 m)	101,3 kPa	101,3 kPa	131,3 kPa
Druk op Top (+6 m)	42,4 kPa	38,8 kPa	39,5 kPa
Druk op Uitlaat (−1 m)	111,1 kPa *(op klep)*	101,3 kPa	101,3 kPa *(vrije uitstroom)*