



Bart van Esch, Technische Universiteit Eindhoven
Kees Rommens, Tauw

Visvriendelijke pompen

In toenemende mate worden in Nederland maatregelen getroffen om de mogelijkheden van veilige vismigratie te verbeteren. Gemalen vormen daarbij een barrière voor vissen. Ontwerpers en opdrachtgevers streven er daarom naar gemalen zodanig in te richten dat vis in beide richtingen ongeschonden het gemaal kan passeren. Voor vispassage van een hoog naar een laag waterniveau zijn inmiddels voldoende mogelijkheden voorhanden waarbij vissterfte en -schade niet optreden. Passage van een laag naar een hoog niveau betekent echter in de meeste gevallen dat vis door de pompen heengaat. Talrijke onderzoeken in Europa en de Verenigde Staten hebben uitgewezen dat vissterfte en -schade op een ingewikkelde manier afhangen van eigenschappen van de pomp, maar tevens van eigenschappen van de vis en de wijze waarop de vis de pomp binnenkomt. Metingen die tot nu toe zijn gedaan aan vissterfte en -schade in Nederlandse gemalen geven nog onvoldoende inzicht in dit verband.

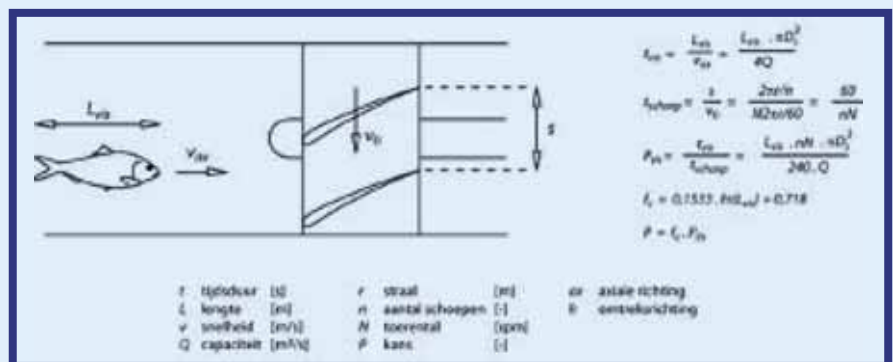
Bij de opdrachtverstrekking voor het ontwerp van een nieuw gemaal of de levering van nieuwe pompen treft men tot op heden vaak algemeen gestelde eisen en formu-

leringen aan. Met aanduidingen in een bestek dat het gemaal of de aan te bieden pompen 'visvriendelijk' moeten zijn, kan de aanbieder niet zoveel. Pompleveranciers worden soms benaderd met de

vraag of zij bepaalde pompen kunnen voorzien van een visvriendelijke waaier. Daarnaast treft men advertenties aan van pompleveranciers die claimen een visvriendelijke pomp op de markt te hebben gezet

Een belangrijk mechanisme voor vis schade is botsing tussen de vis en de voorrand van bewegende (of stilstaande) schoepen. De kans dat een vis wordt geraakt wordt groter naarmate de vis langer is en trager de pomp binnenkomt, en deze kans wordt eveneens groter naarmate de pomp meer schoepen heeft en sneller roteert. Als wordt aangenomen dat de vissen bij binnenkomst in de pomp passief en parallel aan de stroming meebewegen, dan kan de theoretische kans P_{th} op een botsing met een schoep eenvoudig met een botsingsmodel berekend worden als de verhouding van de tijd die nodig is voor de vis om de pomp binnen te komen (t_{vis}) en de tijd waarin een schoep beweegt (t_{schoep}) over één kanaalbreedte (s^0). Deze kans blijkt dan alleen nog afhankelijk van de lengte van de vis (L_{vis}), het aantal schoepen (n), de inlaatdiameter van de pomp (D_s), het toerental (N) en de capaciteit (Q) door de pomp, en onafhankelijk van de afstand (r) van de vis tot het centrum van de inlaat.

De praktijk is dat vissen niet altijd parallel aan de stroming binnenkomen en dat een botsing niet altijd leidt tot schade. Daarom wordt dit eenvoudige botsingsmodel gecorrigeerd met een empirische correctiefactor (f_c) die afhankelijk is van de lengte van de vissen.



Afb. 1: Kans op een botsing tussen een vis en de voorrand van een schoep.

Onderzoek heeft aangetoond dat een botsing niet altijd leidt tot schade aan de vis. Een snelheidsverschil tussen de vis en de schoep van minder dan twaalf meter per seconde lijkt weinig schade tot gevolg te hebben¹¹. Uitzonderingen op deze regel vormen vissen lichter dan 20 gram, die een verwaarloosbare kans op een botsing hebben, ongeacht de snelheid, en botsingen met dunne, scherpe schoepen, die vrijwel zeker leiden tot ernstig letsel bij een snelheid groter dan zeven meter per seconde, ongeacht de lengte van de vis⁶.

De resultaten van het botsingsmodel moeten dus met de nodige voorzichtigheid worden

bekeken. Het houdt bovendien geen rekening met een zekere voorkeur van vissen om de pomp op een bepaalde plaats binnen te komen, bijvoorbeeld langs de wanden waardoor een botsing met een hogere snelheid plaatsvindt dan nabij de naaf van de pomp. Ook wordt geen rekening gehouden met de eigen beweging van vissen, zowel in de richting van de stroming (voor vis A die wil migreren) of juist tegengesteld (voor vis B die zich tegen het pompen verzet).

Deze eigen beweging kan het verschil maken tussen de kans op een botsing die nihil is (vis A) of nagenoeg 100 procent (vis B).

zonder dat de prestaties dienaangaande worden gekwantificeerd. In dit artikel wordt getracht het begrip 'visvriendelijke pomp' te onderwerpen aan een nadere, objectieve beschouwing.

Amerikaans onderzoek naar visschade

Visschade en -sterfte bij passage van pompen en turbines was onderwerp van talrijke studies in binnen- en buitenland. Vooral in de Verenigde Staten is de laatste 15 jaar veel laboratoriumonderzoek gedaan door het Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) naar de algemene biologische criteria voor het ontstaan van schade aan vissen^{1),2),3),4),5),6),7)}. Dit gebeurde in het kader van het Advanced Hydropower Turbine Systems programma⁸⁾ dat het U.S. Department of Energy in 1994 begon samen met de industrie. En hoewel dit programma zich richtte op de ontwikkeling van visvriendelijke waterturbines, zijn de meeste van deze onderzoeken algemeen van opzet en daarom eveneens te gebruiken voor de analyse van pompen.

Tot de belangrijkste mechanismen voor het ontstaan van visschade behoren de mechanische effecten, bijvoorbeeld veroorzaakt door een botsing van de vis met de voorrand van de schoepen^{2),6)} (zie kader). Ook schuren van de vis langs een ruw oppervlak of bekneld raken in smalle spleten behoort tot deze categorie. Een tweede mechanisme voor schade betreft een te hoge afschuifsnijheid waardoor grote lokale verschillen kunnen ontstaan in de krachten die op een vis werken^{2),7)}. Ook grote of snelle drukfluctuaties kunnen de oorzaak zijn van schade^{2),3),4),5),9),10)}. Met name een snelle verlaging van de druk kan leiden tot inwendige bloedingen en scheuren van de zwemblaas of het ontstaan van luchtbelletjes in ogen en bloedbaan. Een instantane drukverhoging tot 20 bar leidde niet tot permanente schade in een test met verschillende soorten vis, zowel physostomen (met open zwemblaas) als physoclisten (met gesloten zwemblaas)¹⁰⁾. Wel wordt melding gemaakt van tijdelijke verdoving van vissen

na een sterke drukverhoging. Ook als deze oorzaken op zich niet tot permanente schade zouden leiden, kunnen vissen tijdelijk versuft of gedesoriënteerd raken waardoor ze een makkelijker prooi zijn voor roofdieren.

De vertaling van deze inzichten in criteria voor pomp- of turbineontwerp blijkt evenwel lastig, temeer omdat de visschade die ontstaat bij passage sterk afhankelijk is van de vissoort en de lengte van de vis. Zelfs de leeftijd en de conditie van de vis hebben een invloed. Voor mechanische schade is ook de manier waarop de vis de pomp binnenkomt van invloed op de schade die kan ontstaan. In het bijzonder van belang zijn de positie van de vis bij binnenkomst, de oriëntatie van de vis ten opzichte van de rotor en het snelheidsverschil tussen de schoepen en de vis. De belangrijkste eigenschappen van de pomp of turbine, die van invloed zijn op visschade, zijn het aantal rotor- en statorbladen, het toerental, de inlaatdiameter en de capaciteit. Maar ook de dikte van de bladen, de ruwheid van de inwendige oppervlakken en de spleetbreedtes tussen de schoepen en het huis en tussen de rotor- en statorschoepen spelen een belangrijke rol.

Nederlands onderzoek naar gemalen

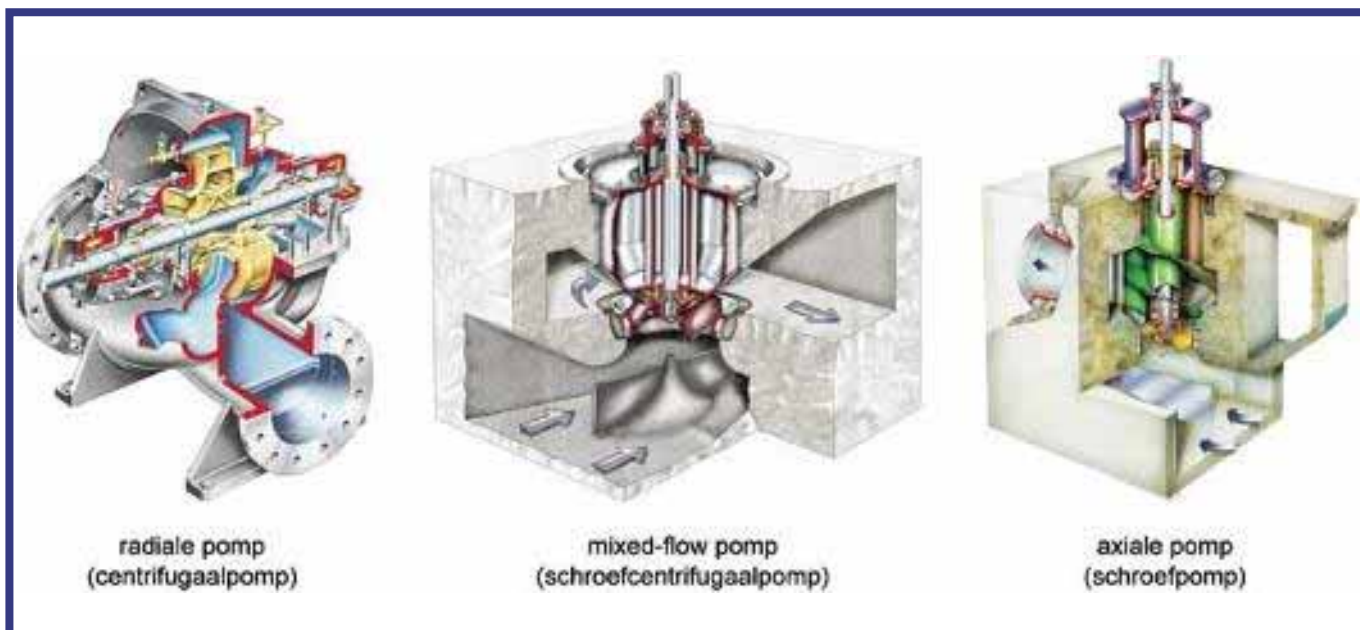
Ook in Nederland is veel onderzoek verricht naar vissterfte en -beschadiging bij passage door pompgemalen. En hoewel de meeste meetrapporten een goed beeld geven van de sterftecijfers en de mate van beschadiging, vertonen deze studies vaak tekortkomingen als het gaat om een wetenschappelijke benadering. De populatie van vissen is in veel gevallen te klein, waardoor een statistische analyse van resultaten een groot onbetrouwbaarheidsinterval laat zien. Bij gedwongen blootstelling van vissen ontbreekt in deze studies een controlegroep van vissen die wél wordt ingebracht (zij het aan de perszijde van de pomp) en wordt opgevangen, maar niet de pomp passeert. Hierdoor worden de negatieve effecten van vervoer, opslag, het inbrengen in het systeem en het opvangen van de vissen

meegeteld bij het effect van pomppassage. Een volledig onderzoek richt zich bovendien niet alleen op schade direct na de pomppassage, maar ook op zogenaamde uitgestelde schade (na 96 uur), bijvoorbeeld door niet waarneembare inwendige bloedingen of kneuzingen. Niet in alle onderzoeken wordt hiermee rekening gehouden.

Afgezien van bovengenoemde aspecten die karakteristiek zijn voor een gedegen onderzoek, ontbreekt in de onderzoeksrapporten vaak informatie over pompspecifieke omstandigheden zoals toerental van de pomp, opvoerhoogte en capaciteit. Als deze informatie al wordt gegeven, dan betreft het vaak de ontwerpgrootheden van het gemaal in plaats van de werkelijke condities tijdens de metingen. Veel gemalen beschikken over pompen met toerenregeling door frequentieomvormers. De capaciteit door de pomp is dan afhankelijk van het toerental en de actuele waterstanden aan de zuig- en perszijde van het gemaal. Als informatie over toerental en capaciteit door de pomp ontbreekt, kan geen goede wetenschappelijke conclusie worden getrokken over de visvriendelijkheid van het gemaal.

De algemene indruk die bekijft na lezing van deze rapporten, is dat pompen van het axiale type 'visvriendelijk' zijn, en dat mixed-flow en radiale pompen dat eveneens zijn tenzij deze pompen grote afmetingen hebben. In een recent onderzoek door STOWA, waarvan de resultaten worden besproken in een voorpublicatie¹²⁾, wordt dit genuanceerd. Een belangrijke conclusie is dat geen eenduidige relatie is waargenomen tussen het type pomp en de omvang van de visschade. Verder blijkt een significante relatie te bestaan tussen het toerental van de pomp en de waargenomen schade.

Dit beeld heeft enige aanvulling: de vraag of een pomp visvriendelijk is, hangt niet alleen af van het pomptype en het toerental, maar evenzeer van de afmeting van de pomp en de bedrijfsomstandigheden. In het vervolg wordt hierop nader ingegaan.



Visvriendelijkheid van pompen

In pompen wordt visschade veelal veroorzaakt door botsing van de vis met de voorrand van de schoepen, door schuren van de vis langs een ruw oppervlak of door bekneling in spleten. Dit laatste effect speelt in pompen met half-open waaiers zelfs sterker dan in waterturbines, omdat de lekstroming door de spleten tegengesteld is gericht aan de rotatierichting van de schoepen, waardoor een vis gemakkelijker beknelde raakt. Een sterke drukverlaging - zoals die optreedt in turbines - vindt men evenwel niet in pompen. Uit onderzoek blijkt dat physostome vissen bestand zijn tegen een snelle drukverlaging van 70 procent van de initiële waarde en dat voor physocliste vissen de grens op ongeveer 40 procent ligt¹⁾. In pompen wordt de druk wel snel verhoogd, maar dit leidt volgens Foye en Scott¹⁰⁾ niet tot schade aan vissen. Cavitatie is wel een potentiële bron van schade. Omdat dit nabij de voorrand van schoepen optreedt, kan de

kans op schade door een botsingsmodel worden beschreven. De kans op bekneling in spleten kan worden verkleind door de spleten tussen de tip van de schoepen en het pomphuis zo klein mogelijk te maken of door toepassing van een gesloten waaier. De afstand tussen rotor- en statorschoepen (of tong van de slak) mag niet te klein worden gekozen. Vergroten van deze afstand zal echter ten koste gaan van het rendement van de pomp. Schuren van vissen langs de wanden, wat kan leiden tot ontschubben, wordt verminderd door de toepassing van gladde oppervlakken aan de binnenzijde van de pomp.

De kans op een botsing van de vis en de schoepen van de pomp kan worden berekend met een botsingsmodel. In de tabel is een vergelijking gemaakt tussen modelberekeningen en metingen aan diverse gemalen met verschillende typen pompen. Gegeven de onzekerheden van

het botsingsmodel komen de resultaten verrassend goed overeen met de metingen. Alleen gemalen Katwijk en Gouda laten een groot verschil zien tussen modelberekeningen en metingen. Een verklaring is dat het snelheidsverschil laag is, waardoor botsingen met de schoepen niet leiden tot schade.

In de tabel zijn ook onderzoeken opgenomen naar de visvriendelijkheid van twee Hidrostral pompen. Deze mixed-flow pompen hebben één schoep met een speciale kurkettekkervorm aan de inlaat. Ook voor deze machines blijkt de visvriendelijkheid goed beschreven te worden door het botsingsmodel. De speciale schoepvorm is mogelijk de reden dat tot relatief hoge snelheden van zo'n 13 meter per seconde weliswaar schade aan vissen ontstaat, maar geen sterfte. Bij hogere snelheden wordt de sterfte wederom voorspeld door het botsingsmodel, waaruit blijkt dat Hidrostral pompen hun visvriendelijke eigenschap te

De tipsnelheid $v_{tip,1}$ van de schoep aan de inlaat van de pomp hangt af van het pomptype en de opvoerhoogte H van de pomp. Het pomptype wordt gekarakteriseerd door de waarde van het specifieke toerental, waarbij de waarden voor toerental, volumestroom en opvoerhoogte worden genomen bij maximaal rendement (*BEP*). Radiale pompen hebben een specifiek toerental kleiner dan 1, mixed-flow pompen hebben waarden tussen 1 en 3, en axiale pompen hebben een waarde groter dan 3.

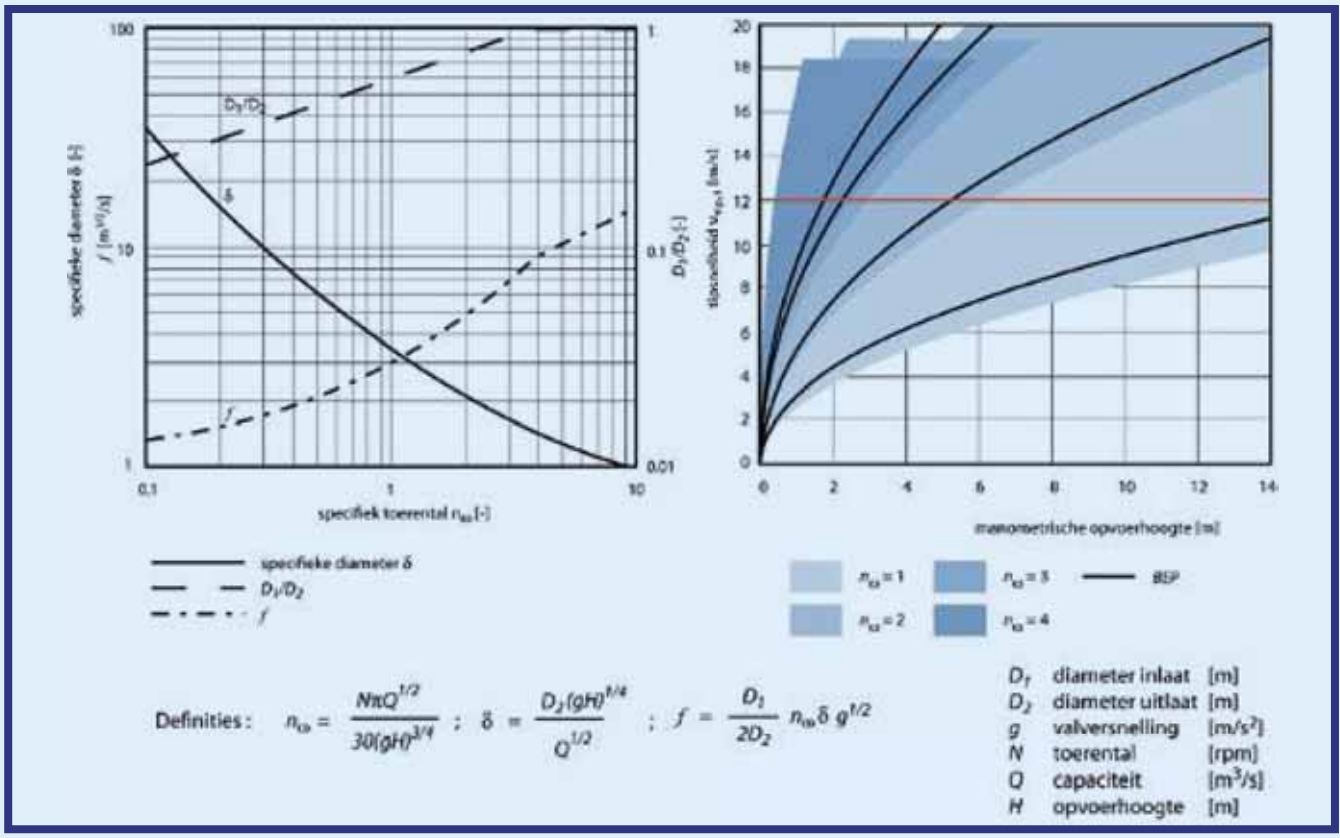
De waarde voor de tipsnelheid kan bepaald worden uit

$$v_{tip,1} = f \sqrt{H}$$

Bij de selectie van pompen voor een gemaal spelen een aantal zaken een rol. In principe is elk pomptype geschikt als gemalenpomp. Door een juiste keuze voor de diameter en het toerental te maken, is elk pomptype in staat een bepaalde combinatie van capaciteit en opvoerhoogte te leveren. Het blijkt dat een keuze voor een radiale pomp leidt tot een pomp met een grote afmeting en een laag toerental, terwijl de keuze voor een axiaal type een pomp levert met een kleine afmeting en een hoog toerental. Mixed-flow pompen zitten hier tussenin. Uit oogpunt van kosten van de pomp (en het gemaal als geheel) heeft een axiale pomp in veel gevallen de voorkeur, omdat de kosten in

grote mate worden bepaald door de afmeting van de pomp. Er is echter een praktische beperking: cavitatie. Om cavitatie te voorkomen wordt de keuzevrijheid in pomptype beperkt. Waar de grens ligt wordt bepaald door de opvoerhoogte van het gemaal. Voor opvoerhoogten tot ongeveer drie meter zijn alle pomptypen toe te passen, tot tien meter opvoerhoogte zijn radiale en mixed-flow pompen te gebruiken, en bij nóg hogere opvoerhoogten kunnen alleen radiale pomptypen worden toegepast.

Afb. 2: Het verband tussen opvoerhoogte en tipsnelheid aan de inlaat van de pomp voor verschillende pomptypen en een breed werkgebied.



	naam	pomptype	inlaatsnelheid (m/s)	aantal schoepen	toerental (rpm)	capaciteit (m ³ /min)	opvoerhoogte (m)	botsingsnelheid (m/s)	vislengte (m)	aantal vissen	metingen: % schade	metingen: % sterfte	model: % geraakt
gemaal	Umuiden	axiaal	3,94	5	64*	3000*	0,7*	14,0	0,69* 0,15*	35 63	66 0	66 0	52 7
	Lijnden	axiaal	1,04	4	360*	225*	5,4*	20,4	0,6** 0,2**	2 32	- -	100 88	65 41
	Haarwijk	axiaal	0,36	4	837*	20*	2,4*	16,2	0,095*	430	13	10	35
	Lijnden	mixed-flow	1,45	3	200*	525*	5,4*	16,0	0,6** 0,2**	4 163	- -	50 29	65 19
	Schoute	mixed-flow	1,55	3	143*	505*	2,4*	12,3	0,2**	-	-	14	16
	Gouda	radiaal	2,16	5	51*	684*	1,25*	6,1	0,28	137	0	0	29
	Katwijk	radiaal	2,66	8	59*	1080*	1,36*	8,9	0,61* 0,14*	56 577	0 1	0 1	65 14
speciaal	Helfrich	Hidrostaal	0,41	1	400-600	10-24	6*	8,7-13,2	0,18*	2235	25	3	27-43
	McNabb	Hidrostaal	0,91	1	375	168	-	18,4	0,065*	434	4	3	3

* : schatting

* : aal
• : schubvis

danken hebben aan de combinatie van hoge inlaatsnelheid, laag toerental en het feit dat de pompen een gesloten waaier bezitten met slechts één waaierschoep.

De selectie van pomptypen in een gemaal is tot op heden meestal gebaseerd op een kostenanalyse (zie kader). Minimalisatie van kosten zal leiden tot de keuze voor een pomp met minimale diameter en maximaal toerental. Met een botsingsmodel kan vervolgens worden geschat hoe groot de kans is op schade aan vissen. De kans op botsingen tussen vis en schoepen is hoger naarmate de opvoerhoogte van een gemaal groter is, omdat dit gepaard gaat met een hoger toerental. Daarnaast is de kans ook groter in axiale pompen dan in radiale pompen. De reden is dat het toerental van axiale pompen veel hoger is dan van radiale pompen. En hoewel de diameter voor axiale pompen kleiner is, is de tipsnelheid aan de inlaat van axiale pompen toch aanzienlijk hoger dan van vergelijkbare radiale pompen voor dezelfde capaciteit en opvoerhoogte. De visvriendelijkheid van een gemaal zou als gevolg van deze conclusie verbeterd kunnen worden door over te stappen op een pomp van een meer mixed-flow of radiaal type. Deze pompen zijn echter groter en daarom duurder.

De toepassing van Hidrostaal pompen voor gemalen valt onder een dergelijke verbetering. De pompen zijn van het mixed-flow type, al hebben ze in vergelijking hiermee een nóg grotere buitendiameter, omdat de waaier slechts één schoep bevat. Een axiale waaier voorzien van een Hidrostaal-achtige inlaat is minder zinvol, omdat het toerental ongewijzigd hoog zal zijn, en zelfs

verhoogd moet worden indien het aantal schoepen wordt gereduceerd.

Conclusie

Gemalen die beschikken over snellopende, compacte pompen zijn in het algemeen weinig visvriendelijk. Dit geldt des te sterker naarmate de opvoerhoogte van het gemaal hoger is. De wens om de visvriendelijkheid van snellopende pompen te verbeteren kan in zijn algemeenheid alleen worden gerealiseerd door vervanging van de pompen door grotere, en dus duurdere, varianten.

Het verdient uit oogpunt van kostenbeheersing daarom aanbeveling om daar waar aanpassing noodzakelijk is, zo weinig mogelijk concessie te doen aan de pompselectie, maar in plaats daarvan over te gaan op een by-pass voor de vissen. Het maakt het mogelijk dat voor het pompedeelte van het gemaal gekozen wordt voor de meest compacte, goedkope en energiezuinige pompen.

LITERATUUR

- 1) Cada G., C. Coutant en R. Whitney (1997). Development of biological criteria for the design of advanced hydropower turbines. DOE/ID-10578, U.S. Department of Energy, Idaho, VS.
- 2) Coutant C. en R. Whitney (2000). Fish behavior in relation to passage through hydropower turbines: a review. Transactions of the American Fisheries Society jaargang 129, pag. 351-380.
- 3) Abernethy C., B. Amidan en G. Cada (2001). Laboratory studies of the effects of pressure and dissolved gas supersaturation on turbine-passed fish. Pacific Northwest National Laboratory 13470.
- 4) Abernethy C., B. Amidan en G. Cada (2002). Simulated passage through a modified Kaplan turbine pressure regime. A supplement to laboratory studies of the effects of pressure and dissolved gas supersaturation on turbine-passed fish. Pacific Northwest National Laboratory 13470-A.
- 5) Abernethy C., B. Amidan en G. Cada (2003). Fish passage through a simulated horizontal bulb turbine pressure regime: a supplement to 'Laboratory studies of the effects of pressure and dissolved gas supersaturation on turbine-passed fish'. Pacific Northwest National Laboratory 13470-B.
- 6) Turnpenny A., D. Davis, J. Fleming en J. Davies (1992). Experimental studies relating to the passage of fish and shrimps through tidal power turbines. National Power PLC, Hampshire, Engeland.
- 7) Nietzel D., M. Richmond, D. Dauble, R. Mueller, R. Moursund, C. Abernethy, G. Guensch en G. Cada (2000). Laboratory studies on the effects on shear on fish: final report. DOE/ID-10822, U.S. Department of Energy, Idaho, VS.
- 8) Sale M., G. Cada, B. Rinehart, G. Sommers, P. Brookshier en J. Flynn (2000). Status of the US Department of Energy's Advanced Hydropower Turbine Systems Program. DOE/ID-108013.
- 9) Harvey H. (1963). Pressure in the early life history of sockeye salmon. Proefschrift University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- 10) Foye R. en M. Scott (1965). Effects of pressure on survival of six species of fish. Transactions of the American Fisheries Society jaargang 94, pag. 88-91.
- 11) Electric Power Research Institute (1987). Turbine-related fish mortality: review and evaluation of studies. EPRI AP-5480. Project 2694-4.
- 12) STOWA (2010). Worden vissen in de maling genomen? Brochure. Rapport 2010-21.