



Low Head Hydropower for Local Energy Solutions

A.G. Pradeep Narrain



UNESCO-IHE
Institute for Water Education



TU Delft Delft
University of
Technology

The role of small hydropower is becoming increasingly important on a global level. Increasing energy demand and environmental awareness has further triggered research and development into sustainable low-cost technologies. In developing countries, particularly in rural areas, local power generation could considerably improve living conditions. With this in mind, the development of a next generation low-head hydropower machines was subject of investigation in the EU-project HYLOW. Being part of the research lines of that project, this thesis presents a numerical modelling approach to improve the design of machines like water wheels for increased hydraulic efficiency. Nowadays, Computational Fluid Dynamics (CFD) enables numerical models to be quite

accurate and incorporate physical complexities like free surfaces and rotating machines. The results of the CFD simulations carried out in this research show that a change in blade geometry can result in higher torque levels, thereby increasing performance. Numerical simulations also enabled to determine the optimal wheel-width to channel-width ratio and further improve performance by modifying the channel bed conditions upstream and downstream of the water wheel. With a power rating in the low kilowatt range, low-head hydropower machines like optimised water wheels seem to have a clear potential for small-scale energy generation, thereby contributing to achieving the Sustainable Development Goals by providing local energy solutions.

ISBN 978-0-8153-9612-3



9 780815 396123

an informa business



CRC Press
Taylor & Francis Group

A BALKEMA BOOK

This book is printed on paper
from sustainably managed
forests and controlled sources

Low Head Hydropower for Local Energy Solutions | A.G. Pradeep Narraim



LOW HEAD HYDROPOWER FOR LOCAL ENERGY SOLUTIONS

DISSERTATION

Submitted in fulfillment of the requirements of
the Board for Doctorates of Delft University of Technology
and
of the Academic Board of the UNESCO-IHE
Institute for Water Education
for
the Degree of DOCTOR
to be defended in public on
Monday, 9 October 2017, at 10:00 hours
in Delft, the Netherlands

by

Arcot Ganesh Pradeep NARRAIN

Master of Science in Water Resources Engineering and Management
University of Stuttgart, Germany

born in Bangalore, India

This dissertation has been approved by the promoters:
Prof.dr.ir. A.E. Mynett
Prof.dr. N.G. Wright

Composition of the doctoral committee:

Chairman	Rector Magnificus Delft University of Technology
Vice-Chairman	Rector UNESCO-IHE
Prof.dr.ir. A.E. Mynett	UNESCO-IHE / Delft University of Technology, promotor
Prof.dr. N.G. Wright	De Montfort University, UK / UNESCO-IHE, promotor

Independent members:	
Prof.dr.ir. W.S.J. Uijtewaal	Delft University of Technology
Prof.dr.ir. C. Zevenbergen	UNESCO-IHE / Delft University of Technology
Prof. dr. G. Pender	Heriot-Watt University, UK
Prof.dr.-ing. U. Gärtner	Esslingen University of Applied Sciences, Germany
Prof.dr.ir. H.H.G. Savenije	Delft University of Technology, reserve member

CRC Press/Balkema is an imprint of the Taylor & Francis Group, an informa business

© 2017, A.G. Pradeep Narrain

Although all care is taken to ensure integrity and the quality of this publication and the information herein, no responsibility is assumed by the publishers, the author nor UNESCO-IHE for any damage to the property or persons as a result of operation or use of this publication and/or the information contained herein.

A pdf version of this work will be made available as Open Access via <http://repository.tudelft.nl/ihe>. This version is licensed under the Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



Published by:
CRC Press/Balkema
Schipolweg 107C, 2316 XC, Leiden, The Netherlands
Pub.NL@taylorandfrancis.com
www.crcpress.com – www.taylorandfrancis.com
ISBN 978-0-8153-9612-3

LOW HEAD HYDROPOWER FOR LOCAL ENERGY SOLUTIONS

“The power of water has changed more in this world than emperors or kings.”

Leonardo da Vinci, (1452 – 1519)

Summary

Growing energy demand together with increasing environmental concerns has widened the interest in hydropower generation. In addition to conventional large-scale dam-operated hydropower technologies, several smaller scale hydropower machines are being explored for providing local energy solutions. Advantages of such machines are that they are cheaper to produce and are likely to have less environmental impact. Such technologies seem of particular interest for developing countries where technical solutions rely on the schooling of communities to operate machines with a new technology. The implementation of such technologies requires trained staff that is to be employed on site.

The role of small hydropower is becoming increasingly important on a global level. The potential in terms of sustainability is rapidly expanding as fossil resources and nuclear fuels are being depleted. Rapid industrial and economic growth in developing countries is leading to shortages of electricity, in particular peak demand. Economic growth is often given priority over environmental issues. In developing countries, particularly in rural areas, energy availability is not receiving the priority it deserves. Hence the possibility of creating power generation for local consumption based on sustainable technologies can improve living conditions as well as bring employment benefits to local communities.

Off-grid generation brings along many advantages and offers more flexibility for power generation. Changing legislation facilitates small hydropower generation by individuals and communities. The cost factor plays an important role in the construction of electro-mechanical equipment. Local availability of construction materials is of considerable importance, as machines require maintenance and timely repair in case of failure. For that purpose, many remote areas will require training of local individuals. The United Nations program "Sustainable Development Goals" (Goal #6: Water for all) and (Goal #7: Energy for Development) are of particular interest for the development of small-scale hydropower, as the effects of energy production in remote areas are of considerable importance for the local populace. The SDG's aim at alleviating poverty by providing basic amenities for all in the fields of health, education, clean water and sanitation, employment, affordable clean energy, etc.

In this research, the application of new hydropower technologies, in particular the local potential of water wheels in developing countries was studied. Increased interest in small hydropower as a renewable source of energy especially in regions of Asia and Africa, where the infrastructure is weak, have a potential for local power generation. The development of hydropower machines for very low heads was investigated in the EU-project HYLOW, "Hydropower converters for very low head differences" (HYLOW, 2012). The scope of the project was to develop two novel hydropower converters with free water surfaces and one in a closed system. These machines were to offer alternatives to conventional turbine technology in terms of environmental sustainability for very low head differences.

This thesis presents the approach of using numerical modelling of a small-scale hydropower machine. Such machines, like water wheels, have the advantage that the infrastructure around the deployment site does not require far-reaching incursions in the surroundings at the watercourse. The focus in this study is on improving the hydraulic efficiency. The torque thus generated can be converted into electrical or mechanical energy. The use of numerical models to assess and predict performance is a method used in many fields today. The increase in computational hardware and Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation software nowadays enables numerical models to be more accurate and incorporate more physical complexities like free surfaces in rotating machines.

Various parameters such as choice of mesh elements, mesh consistency, choice of boundary conditions and turbulence model are studied in this thesis. To ensure that the boundary conditions were realistic, experimental results performed on a test rig within the HYLOW project were used to verify the numerical models. Flow measurements from the test rig were taken as real boundary conditions for the numerical simulations. The simulation results were checked and used for further developing the design of the hydropower machines. This approach enables obtaining a better understanding of flow conditions during operation by visualising flow patterns. The basic model supplied results that were plausible and matched those of the experiments, enabling modifications of the machine geometry e.g. blade angles to be made in the simulation models. These models could then be modified to further explore improving efficiency.

The numerical models were developed using the commercial CFD-code ANSYS Fluent®. The results of the simulations show that a change in blade geometry results in higher values for torque in the selected cases, thereby increasing the performance of the machine. The analysis of the flow situation shows that losses due to turbulence occur within the channel before and after the wheel, reducing the overall performance of the machine. To investigate the effect of channel-width, the model was modified by reducing the wheel-width within the given channel-width of 1 metre. The geometry of the new model called for a different meshing strategy consisting of tetrahedral cells with regions of local refinement. A complete re-meshing of the models with varying wheel-width was performed. The simulations show an increase in efficiency of the machine. Based on these simulations the optimal ratio of wheel-width to channel-width could be determined.

Modifications of the channel bed upstream and downstream of the machine show that the channel bed has an influence on the performance. Here too performance was improved. The influence of wall gaps at the wheel sides show that performance could be improved by modifying the gaps. Simulations show that variations in the downstream channel walls lead to changes in efficiency.

The results of the numerical simulations describe the flow conditions within the channel for different modifications in the channel and at the wheel. Power generation with these machines for low discharges is in the low kilowatt range, enabling the implementation of water wheels in areas with limited infrastructure. Hydropower machines like improved water wheels are seen to have potential for small-scale hydropower and seem to have value for local energy generation, in accordance with the Sustainable Development Goals (SDGs) of the United Nations.

Samenvatting

De steeds toenemende vraag naar energie en de groeiende aandacht voor het milieu hebben de belangstelling voor waterkrachtcentrales doen toenemen. Naast de ontwikkeling van grootschalige waterkrachtcentrales in bergachtige gebieden wordt er ook weer opnieuw gedacht over kleinschalige mogelijkheden op lokale schaal, waaronder de watermolen of het waterrad. De voordelen van dergelijke eenvoudige machines zijn dat ze goedkoper zijn te produceren en onderhouden, en minder effecten op het milieu hebben. Dit lijkt met name van belang voor ontwikkelingslanden waar technische oplossingen kritisch afhankelijk zijn van de aanwezigheid van geschoolde arbeidskrachten die de nieuwe technologieën moeten toepassen.

Ook op wereldniveau neemt de belangstelling naar kleinschalige energiewinning uit waterkracht toe. Met de afname van fossiele en nucleaire brandstof neemt de belangstelling voor duurzame energiebronnen toe. De snelle toename van vraag naar energie in ontwikkelingslanden leidt tot een tekort aan beschikbare elektriciteit, met name tijdens piekuren. Economische groei krijgt veelal prioriteit boven milieuaspecten, met alle gevolgen van dien. In ontwikkelingslanden, met name in landelijke gebieden, krijgt energievoorziening niet de aandacht die het verdient. Juist daar kan de beschikbaarheid van duurzame energie het verschil maken tussen overleven of het opbouwen van een bestaan voor lokale gemeenschappen.

Het plaatselijk opwekken van energie biedt veel voordelen en flexibiliteit. Aanpassingen in wetgeving maken het mogelijk om kleinschalige waterkracht verder te ontwikkelen en testen. Uiteraard spelen kosten een belangrijke rol bij het ontwikkelen en bouwen van elektromechanische apparatuur. Plaatselijke beschikbaarheid van constructiematerialen is van groot belang voor het onderhouden en repareren van onderdelen. Daarbij is opleiding en training van de plaatselijke bevolking noodzakelijk. Het Verenigde Naties programma "Duurzame Ontwikkelingsdoelstellingen" (nr 6: Water voor iedereen" en nr 7: "Energie voor Ontwikkeling" zijn van groot belang voor de ontwikkeling van kleinschalige waterkrachtcentrales, gelet op het belang voor lokale economische ontwikkeling en het opheffen van armoede van de lokale bevolking.

In dit onderzoek werd nagegaan of nieuwe versies van eenvoudige waterkrachtcentrales zoals watermolens een rol zouden kunnen spelen in met name ontwikkelingslanden. Er bestaat namelijk een toegenomen belangstelling voor kleinschalige waterkracht als duurzame energiebron in gebieden in Azië en Afrika waar nog beperkte energievoorzieningen aanwezig zijn.

Het EU-project HYLOW (2012) richtte zich op het ontwikkelen van waterkracht machines die kunnen werken met een klein verschil in waterspiegel. Het doel van het project was om twee types watermolens met een vrij oppervlak te onderzoeken, en een type in een gesloten leidingsysteem. Deze machines zouden een alternatief moeten bieden voor conventionele turbines in geval van een klein lokaal verval, en gebaseerd moeten zijn op milieuvriendelijke duurzame technieken. In dit proefschrift wordt een numeriek model ontwikkeld waarmee de vormgeving en eigenschappen van kleinschalige watermolens kunnen worden onderzocht. De aandacht ging met name uit naar het vinden van manieren om de efficiency van dergelijke apparaten te verbeteren.

Het gebruik van numerieke modellen om de prestaties van apparaten te beoordelen en voorspellen wordt in vele toepassingsgebieden gebruikt: in de luchtvaart, auto-industrie, en ook in de waterbouwkunde. Door steeds krachtiger computer hardware en software en is met name het gebruik van Computational Fluid Dynamics (CFD) sterk toegenomen voor het onderzoeken van complexe stromingssituaties inclusief het omgaan met vrij oppervlak en draaiende watermolens. Verschillende parameters zoals de keuze van het rekenrooster, randvoorwaarden, beginvoorwaarden, turbulentiemodellen etc. zijn in het kader van dit proefschrift onderzocht.

Om er zeker van te zijn dat de gekozen randvoorwaarden correct waren zijn de experimentele resultaten van een proefopstelling die in het HYLOW project zijn uitgevoerd gebruikt om het numerieke model te valideren. Gemeten stroomsnelheden en waterdiepten werden gebruikt als invoer voor het numerieke model. De berekende uitkomsten werden eerst geverifieerd en vervolgens gebruikt om de vormgeving en eigenschappen van het ontwerp verder te verbeteren. Door gebruik te maken van computervisualisatie kon het gedrag van de machine beter worden begrepen. Het basismodel bleek afdoende realistische uitkomsten te bieden die overeen kwamen met de metingen, waarna

modificaties konden worden doorgerekend zoals veranderingen in invalshoek van de schoepen om het rendement verder te kunnen verbeteren.

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van de commerciële CFD-code ANSYS-Fluent®. De resultaten gaven aan dat een verandering in invalshoek tot een hoger rendement kan leiden, althans voor de hier onderzochte gevallen. Op basis van visualisaties kon worden vastgesteld dat energieverliezen door turbulentie met name plaatsvinden rond de schoepen, waardoor het rendement afneemt. Om het effect van de breedte van het toegangskanaal te onderzoeken zijn simulaties uitgevoerd met verschillende verhoudingen in breedte van het waterrad ten opzichte van het toegangskanaal. Dit impliceerde dat nieuwe modellen moesten worden ontwikkeld op basis van vierhoekige elementen met plaatselijke verfijning ter plaatse van het schoepenrad. De resultaten lieten zien dat het rendement van de machine hiermee verder kan worden verbeterd. Op basis van deze berekeningen kon de optimale breedte-verhouding worden bepaald .

Aanpassingen aan de bodemeigenschappen bovenstrooms en benedenstrooms lieten zien dat ook deze invloed hebben en het rendement kunnen verbeteren. Experimenten met verbeterde vormgeving bij de aansluiting op de wanden gaven aan dat lekkage kon worden verminderd waardoor het rendement eveneens toenam, met name door aanpassingen aan de wanden benedenstrooms.

Het vermogen dat met deze kleinschalige waterkracht kan worden verkregen ligt in de orde van enige kilowatt, hetgeen het mogelijk maakt om deze te plaatsen in gebieden met slechts een beperkte infrastructuur. Met behulp van kleinschalige waterkrachtcentrales kan op die manier toch energie worden gewonnen die van groot belang kan zijn voor lokale economische ontwikkeling en het opheffen van armoede, overeenkomstig de doelstellingen van duurzame ontwikkeling zoals beoogd door de Verenigde Naties.

