

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Den småskaliga vattenkraftens betydelse för det framtida svenska elsystemet	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska The importance of smallscale hydro power for the future Swedish power system	
Universitet/högskola/företag KTH	Avdelning/institution Avd. för elkraftteknik & avd. för resurser, energi och infrastruktur
Adress Teknikringen 33, 100 44 Stockholm	
Namn på projektledare Mikael Amelin	
Namn på ev övriga projektdeltagare Anders Wörman, Iasonas Kouveliotis-Lysikatos, Joel Axelsson, Shuang Hao	
Nyckelord: 5-7 st Småskalig vattenkraft, modellering, elproduktion, driftplanering, miljövillkor	

## Förord.

Projektet har finansierats av Energimyndigheten inom ramen för programmet Hållbar Vattenkraft – HåVa.

## Innehållsförteckning

Sammanfattning .....	1
Summary .....	2
Inledning/Bakgrund .....	2
Genomförande .....	3
Resultat .....	6
Diskussion.....	8
Publikationslista.....	9
Referenser, källor.....	10
Bilagor .....	10

## Sammanfattning

I Sverige finns ungefär 1900 vattenkraftverk med en installerad effekt som är lägre än 10 MW. Dessa kraftverk står för en relativt liten del av den svenska elproduktionen (ungefär 5 TWh/år), men skulle kunna leverera både mer energi och reglerförmåga till elsystemet genom effektivare utnyttjande. För att öka förståelsen av vilken roll småskalig vattenkraft kan spela i det svenska elsystemet har detta projekt tagit fram modeller för att statistiskt utvärdera aggregerad produktion inom den småskaliga vattenkraften. Dessa undersökningar visar att produktionen på enskilda kraftverk kan kräva upp till dubbelt så mycket energilagring jämfört med en samordnad, aggregerad produktion. Effektiviteten beror dock både på reservoarvolym och längdsskalan i planeringen. Vidare har

modeller för att utvärdera prognoskvalitetens inverkan på vattenkraftproduktionen utvecklats, samt modeller för att jämföra hur ägarskap och samverkan påverkar vattenkraftproduktionen. Dessa modeller applicerades på den svenska vattenkraftproduktionen och ett resultat är att förbättrade prognoserna över den periodiska variationen mellan torr- och våtår kan förbättra produktionseffektiviteten med c:a 2% och att koordinerad planering av vattenkraftverken kan ge runt 10% mer elproduktion. Slutligen har modeller utvecklats för att studera hur nya miljövillkor påverkar elproduktion och spill i vattenkraftverk, samt hur man kan göra ekonomisk avvägningar av nyttan från tekniska åtgärder för förbiledning av fisk jämfört med anpassade turbinflöden.

## Summary

There are approximately 1900 hydro power plants in Sweden with an installed capacity of 10 MW or less. These power plants contribute to a relatively small part of the Swedish electricity generation (around 5 TWh/year), but could deliver both more energy and more balancing capacity to the power system through more efficient utilization. To increase the understanding of which role the small-scale hydro power could have in the Swedish power system, this project has developed models to statistically evaluate aggregated generation within the small-scale hydro power. These studies show that the production at individual power plants can require up to twice as much energy storage compared to a coordinated, aggregated production. However, the efficiency depends both on the reservoir volume and the length scale in the planning. Moreover, models to evaluate the impact of forecast quality on the hydro power generation have been developed, as well as models to compare how ownership and coordination influences hydro power generation. These models were applied to the Swedish hydropower production and one result is that improved forecasts of the periodic variation between dry and wet years can improve the production efficiency by about 2% and that coordinated planning of the hydro power plants can provide around 10% more electricity generation. Finally, models have been developed to study how new environment restrictions influence electricity generation and spillage in hydro power plants, as well as how to make economic trade-offs of the benefit from technical measures for bypassing fish compared to adapted turbine flows.

## Inledning/Bakgrund

Mycket av den småskaliga vattenkraften i Sverige byggdes under helt andra förutsättningar än vad vi har idag. Anläggningarna dimensionerades för att försörja ett lokalt energibehov utan möjlighet att exportera överskott till det nationella elnätet. Detta medförde att effektkapaciteten i dessa kraftverk är låg i förhållande till vattenflödena och att stora volymer vatten spills förbi dessa kraftverk. Ett bättre utnyttjande av den småskaliga vattenkraften skulle dels medföra att det svenska elsystemet tillfördes ytterligare koldioxidfri elproduktion och dels kunna underlätta en fortsatt utbyggnad av kontinuerligt varierande elproduktion (t.ex. vindkraft eller solkraft) som ju behöver balanseras av annan elproduktion eller genom åtgärder på förbrukningssidan. Därför finns ett behov att

karaktisera den småskaliga vattenkraftens sammantagna effekt- och regleringskapacitet med hänsyn taget till olika klimatfluktuationer. Användningen av den småskaliga vattenkraften måste även ta hänsyn till hur befintlig och förändrad drift av kraftverken påverkar miljön.

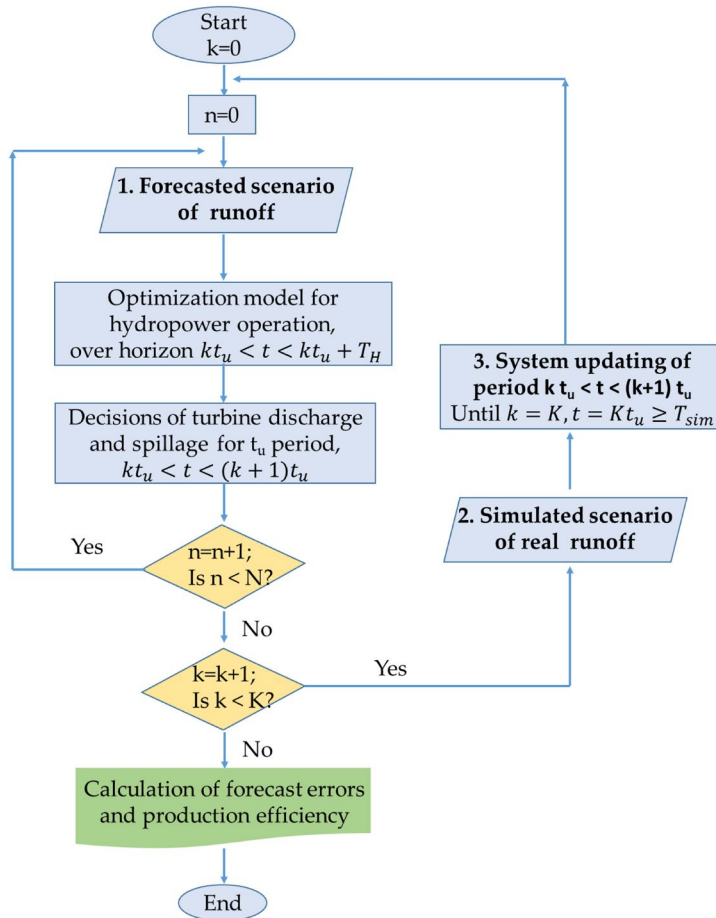
De småskaliga vattenkraftverken har ofta små magasin. För att planera driften på ett effektivt sätt behövs därför relativt exakta prognoser för tillrinningen i vattendraget; prognoser som kan ta hänsyn till ett fluktuerande klimat. Detta gäller i synnerhet om den småskaliga vattenkraften ska användas som en flexibel resurs för att balansera vindkraft och solkraft. Det behövs därför prognosverktyg som kan ta hänsyn till hur lokal tillrinning och gångtiderna mellan kraftverken påverkas av säsong, väderlek, fyllnadsgrad i magasinerna, o.s.v. En relativt enkel metod att ta hänsyn till hur vattendragens strömningsmekanik påverkar gångtiderna är att använda den kinematiska- diffusiva vågekvationen (Zmijewski et al., 2015), men detta ställer i så fall krav på att optimeringsmetoderna anpassas till den utökade problembeskrivningen. En annan möjlighet att utveckla den småskaliga vattenkraftens ekonomiska betydelse är att utgå från flera kraftstationers aggregerade produktionskapacitet som t.ex. en reducerad varians (Zmijewski och Wörman, 2016).

## Genomförande

Projektet har utförts i form av flera delprojekt vid Avd. för elkraftteknik resp. Avd. för resurser, energi och infrastruktur vid KTH. Följande delprojekt har genomförts:

- a) Betydelsen av månadslånga prognoser för produktionseffektiviteten i ett vattenkraftssystem med många kraftstationer (Hao et al, 2023).
- b) Statistisk utvärdering av aggregerad produktion inom den småskaliga vattenkraftproduktionen, samt en ekonomisk analys kring detta (Axelsson et al., 2023).
- c) Värdet av samordnad driftplanering av småskalig vattenkraft (Kouveliotis-Lysikatos et al, 2022).
- d) Inverkan av nya miljöregler på vattenkraftens reglerförmåga och energiproduktion (Sandkvist och Malaussène, 2023; Thörnqvist, 2023).

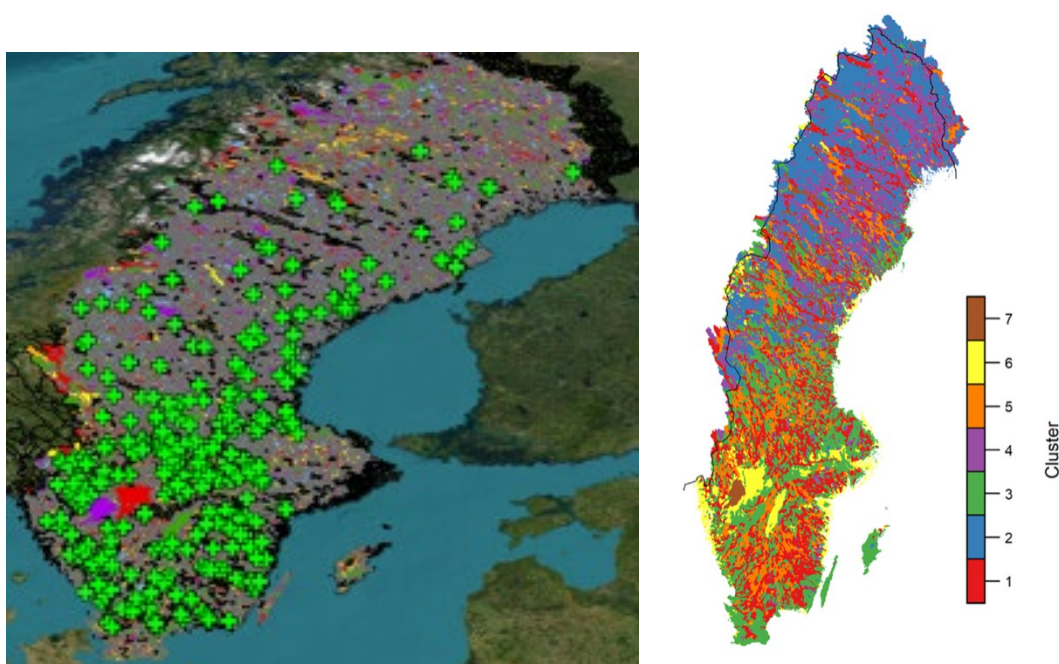
Delprojekt a) utvecklar en optimeringsmodell av den typ som används inom storskalig vattenkraftproduktion, men med det uttalade syftet att kunna värdera prognoskvalitetens inverkan på effektiviteten i vattenkraftproduktionen (Figur 1). Modellen använder ensembleprognoser från historiska data och stegvis linjär optimering i kombination med avtagande horisontkontroll för att simulera avrinning och driften av ett kaskadvattenkraftssystem. I den första ansökan tillämpas modellramverket på Dalälvens avrinningsområde i Sverige, främst på grund av den omfattande tillgången på högkvalitativa data.



Figur 1: Schematisk struktur av modellpaket som analyserar betydelsen av prognoser som tar hänsyn till klimatfluktuationer för produktionseffektiviteten för många vattenkraftstationer (Hao et al., 2023).

I delprojekt b) valdes 424 småskaliga vattenkraftstationer som har en installerad produktionskapacitet på mellan 0,5 till 10 MW (Figur 2). Den undre gränsen infördes på grund av bristen på viss data för riktigt små kraftstationer. Historiska avrinningstidsserier simulerades med S-HYPE för perioden 1981 till 2017 (Lindström et al., 2010). Vidare klustrades kraftstationerna i fem olika kombinationer av de sju klimatologiska-geografiska klusterregioner som identifierades av Lopez et al. (2021). Ett syfte var att klustervis analysera statistisk karakteristika för den aggregerade produktionen och jämföra med den icke aggregerade. Därför användes en nyutvecklade spektral metodik som uttrycker så kallad virtuell energilagring som funktion av koordineringsavstånd (Wörman et al., 2020). Virtuell energilagring uppkommer som ett resultat av en minskad (och utnyttjad) varians i den aggregerade produktionen, vilket är en produktionsvariabel som minskar kontinuerligt med ökad aggregering inom ett tänkt koordineringsavstånd.

I delprojekt c) jämfördes två modeller för driftplanering av småskaliga vattenkraftverk. I den ena modellen antas att en central aktör styr elproduktionen i samtliga kraftverk i ett älvsystem och att målsättningen är att maximera den totala intäkten från såld el (koordinerad planering). I den andra modellen antas att varje kraftverk har olika ägare, som planerar driften enbart av det egna kraftverket. Det kraftverk som ligger längst uppströms i älvsystemet kan planera utan att ta hänsyn till de övriga kraftverken, medan nedströms liggande kraftverk måste anpassa planerna efter tappning och spill från det närmaste uppströms liggande kraftverket (successiv planering). I bägge modellerna antas aktörerna ha tillgång till perfekt information om elpriser, tillrinning o.s.v. Modellerna testades på samma data som i delprojekt b).

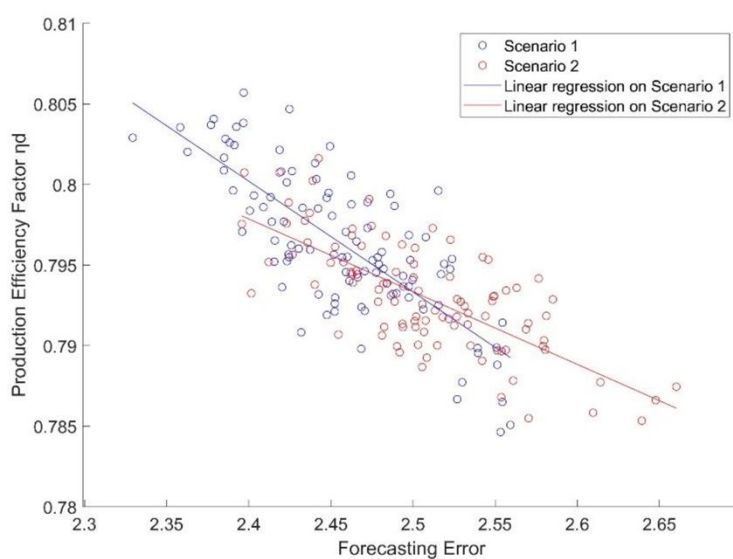


Figur 2 Till vänster: Karta över 424 utvalda småskaliga kraftstationer (gröna kors). Till höger: De sju clusterregioner som identifierades av Lopez et al (2021).

Delprojekt d) omfattar ett par fallstudier som har initierats av andra uppdragsgivare, men som har handletts av forskare inom detta projekt. Dessa fallstudier behandlar både småskalig vattenkraft samt större älvar i Sverige. I en studie jämförs kostnaderna för att installera låglutande intagsgaller vid småskaliga vattenkraftverk med det alternativa kostnadsbortfallet som uppkommer genom att begränsa de maximala frisströmshastigheterna i intaget under högflöden och begränsa elproduktionen. Två andra fallstudier har testat metoder för att skatta hur nya miljövillkor påverkar den sammantagna reglerförmågan och elproduktionen för vattenkraftverken i ett älvsystem.

## Resultat

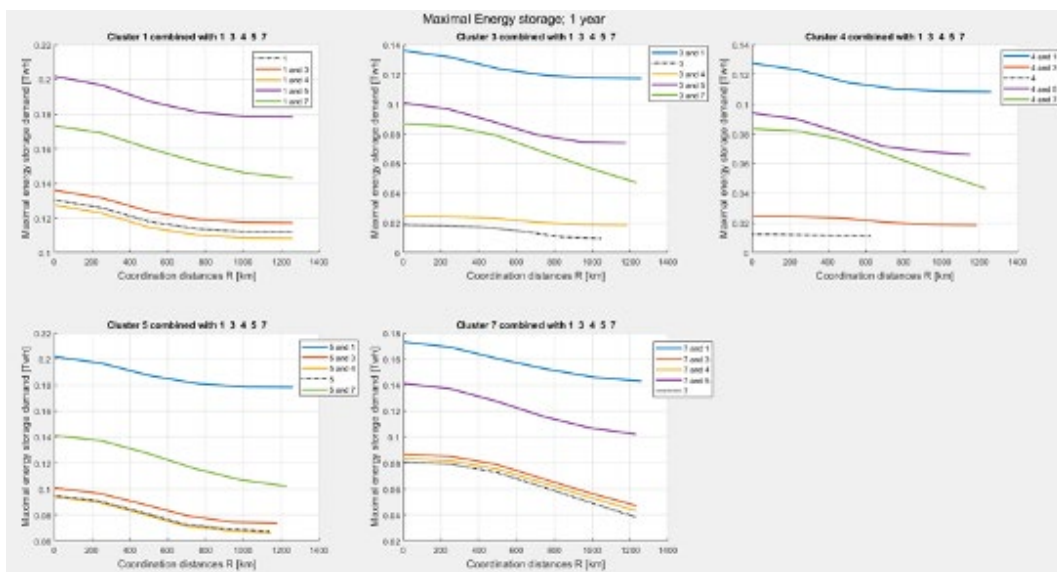
Inom delprojekt a) användes mer än 50 års historiska data på daglig avrinning och den visade på en tydlig två-årig periodisk variation i vattentillgången som kan tolkas som omväxlande torra och våta perioder. Den två-åriga variationen representerades genom en bimodal klassificering av historiska tidsserier, d.v.s. i relativt torra och våta år, och användes för analys av hur fördelningarna kan användas generalisering av årstidsvariationerna i vattentillgång. Effektiviteten av vattenkraftproduktionen visar sig i hög grad bero på kopplingen mellan den representativa tvååriga hydrologiska regimen och den regim som faktiskt realiseras i ett framtidsscenario (Figur 3). Det är alltså viktigt för en effektiv planering att kunna prognostisera om det kommande året blir torrt eller vått, helt oavsett att produktionen generellt är relativt högre under våta år. Prognosfelet kan dock minskas när man tar hänsyn till periodiska hydroklimatfluktuationer, såsom torra och våta perioder, vilket kan öka produktionseffektiviteten med upp till cirka 2 % (Figur 3). Den motsvarande potentiella vattenkraftproduktion i Dalälven visar sig kunna ökas med 13 GWh/år när prognoserna beaktar tvåårig periodicitet i vattenavrinning.



Figur 3 Samband mellan prognosfel och produktionseffektivitet för två olika scenarier som kombinerar historiska prognoser från våta år med produktion under faktiskt våta år (Scenario 1) och prognoser från torra år med faktiskt våta år (Scenario 2).

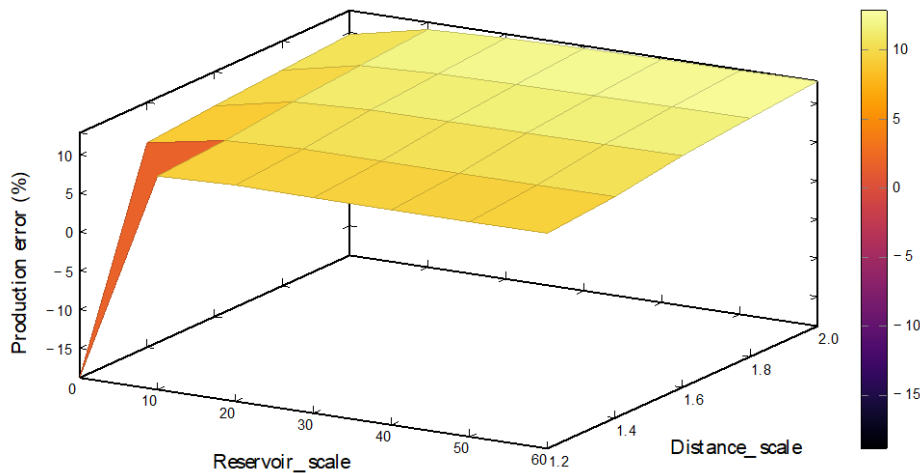
I delprojekt b) analyserades den virtuella energilagringsskapaciteten i fem olika kluster av Sveriges småskaliga vattenkraft, vilket baserades på sju olika klusterregioner med olika klimatologisk karakterisering enligt Lopez et al. (2021)) (Figur 4). Exempelvis kunde klimatvariationerna i olika regioner förklaras med olika klimatindex som inbördes har olika periodicitet. Analysen visade att en

aggregerad produktionsplanering av klusterregionerna 1 och 7 ger den högsta reduktionen av energilagringsbehovet, vilket medför en hög grad av så kallad virtuell energilagring (Axelsson et al., 2023). Summan av energilagringsbehovet vid enskilda kraftverk kan vara upp till dubbelt så stort jämfört med energilagringsbehovet då produktionen samordnas mellan de aggregerade kraftverken. Reduktionen i energilagring kan kallas för virtuell energilagring. Effektiviteten i den virtuella energilagringen ökar med koordineringsavståndet (Figur 4), vilket även stöds av resultaten i avsnitt c) nedan.



Figur 4 Maximalt energilagringsbehov för att helt jämna ut kraftproduktionen som funktion av koordineringsavstånd (aggregeringsavstånd).

I delprojekt c) analyserades skillnaden mellan koordinerad och successiv planering i ett älvsystem. En del av de data som används i de två planeringsmodellerna är dessvärre inte tillgängliga och därför behövde studien baseras på ett antal antaganden om rinntider, magasinstorlek, lokal tillrinning, och verkningsgradskurvor. Modellerna har testats på ett stort antal tester, där vattenkraftverken fördelats i älvsystem med olika antal kraftverk i varje älv och där de antagna parametrarna har varierats för att uppskatta vilken betydelse de kan ha på slutresultatet. Figur 5 visar skillnaden i elproduktion mellan koordinerad och successiv planering för olika magasinstorlkar (*Reservoir\_scale*) respektive rinntider (*Distance\_scale*).



Figur 5 Skillnad mellan elproduktion för koordinerad planering respektive successiv planering. (Positiva värden betyder att koordinerad planering är mer effektiv.)

Som väntat får man både högre elproduktion och högre värde av elproduktionen vid koordinerad planering jämfört med successiv planering (utom i det extrema fallet då bägge parametrarna har sina lägsta värden), vilket visar att kraftverken kan utnyttjas på ett effektivare sätt då man beaktar hela älvsystemet (t.ex. genom att hålla igen på elproduktionen i ett uppströms liggande kraftverk för att undvika att nedströms liggande kraftverk måste köras på låg verkningsgrad eller i värsta fall spilla vatten). Skillnaden ligger i allmänhet runt 10%.

Fallstudierna i delprojekt d) visar att det i många fall kan löna sig för kraftproducenter att acceptera produktionsbortfall som följer av en miljöanpassad förbiledning av fisk istället för att bekosta ombyggnationer med låglutande galler för att underlätta fiskpassagen. Studierna av hur nya miljövillkor påverkar vattenkraftens reglerförmåga och elproduktionen är ännu inte avslutade, men de första resultaten från en studie av Skellefteälven tyder på att miljövillkor i form av undre gränser för spill (t.ex. genom krav på att hålla ett flöde genom torrflåror) inte har någon stor inverkan på vattenkraftens reglerförmåga – vilken i det här sammanhanget har uppskattats som kraftverkens förmåga att styra elproduktionen till de timmar då elpriset är som högst – men att det studerade kraven på spill leder till betydande produktionsförluster.

## Diskussion

Många småskaliga vattenkraft har små vattenmagasin, vilket innebär att de endast kan reglera elproduktionen i ett kortare tidsperspektiv, t.ex. att styra elproduktionen inom ett dygn till de timmar då behovet är som störst. I ett längre tidsperspektiv kommer elproduktionen att i stor utsträckning följa årstidsvariationerna. Det är därför viktigt att ta fram modeller för att studera samvariationerna mellan småskalig vattenkraft i olika regioner, samt samspelet mellan småskalig vattenkraft och väderberoende elproduktion som vindkraft och solenergi.



I ett vattendrag med flera vattenkraftverk kommer driften i uppströms liggande kraftverk att påverka förutsättningarna för nedströms liggande kraftverk. Då ett kraftverk producerar kommer det vatten som passerar genom turbinerna att efter en viss tid nå nästa kraftverk i vattendraget. Om detta kraftverk inte har möjlighet att ta tillvara det inkommande vattnet (t.ex. för att magasinet är fullt och den maximala tappningen är lägre än tillflödet) tvingas det nedströms liggande kraftverket att tvingas spilla vatten, vilket självfallet innebär att en viss möjlig elproduktion går förlorad. Därför är det uppenbart optimalt att koordinera planeringen av all vattenkraftproduktion i ett och samma vattendrag, så att hela vattenkraftssystemet utnyttjas så effektivt som möjligt. Om vattenkraftverken i ett vattendrag har olika ägare är det dock komplicerat att koordinera driften av kraftverken. Resultaten från detta projekt visar på en potentiell skillnad i elproduktion och vinst då man jämför koordinerad drift av småskaliga kraftverk i ett vattendrag med en driftsituation där varje enskilt kraftverk planerar för att maximera den egna vinsten och där nedströms liggande kraftverk får anpassa sig efter de beslut som fattats för kraftverken uppströms. I de större svenska älvarna har man löst detta genom att bilda vattenregleringsföretag, som ägs av de olika aktörerna i en älv och som reglerar hur vattnet används för elproduktion. En slutsats från detta projekt är att en liknande lösning även för mindre vattendrag skulle kunna öka värdet av den småskaliga vattenkraftens bidrag till det svenska elsystemet.

Den svenska regeringen har beslutat om en nationell plan för moderna miljövillkor för vattenkraften. En viktig del i denna process kommer att vara att göra avvägningar mellan miljöåtgärder och konsekvenser för elsystemet. Miljöåtgärder för vattenkraften kan dels resultera i förlorad elproduktion (t.ex. då man kräver att en ökad andel av vattnet ska spillas vid sidan av kraftverket) och dels i minskad reglerförmåga (d.v.s. att man inte längre kan styra vattenkraftsproduktionen till de tidpunkter då vattenkraften är som mest efterfrågad).

De fallstudier som har genomförts för att undersöka hur vattenkraftens reglerförmåga påverkas av nya miljökrav har testat olika mått på vattenkraftens reglerförmåga (dels värdefaktorer, d.v.s. ett mått på vattenkraftens förmåga att producera el då elpriserna är som högst, och dels mått baserade på vattenkraftens förmåga att följa extrema lastvariationer). Hittills har dessa mått endast testats på större älvar (Skellefteälven resp. Ljungan) och det behövs fortsatt arbete med att vidareutveckla analysmetoderna samt att studera fler älvar, framtida förhållanden, o.s.v. De preliminära resultaten visar emellertid att miljöåtgärder som t.ex. krav spill inte har någon större påverkan på vattenkraftens reglerförmåga utan att sådana miljökrav framför allt leder till lägre elproduktion i vattenkraften. Den här frågan kommer att följas upp i flera kommande projekt på KTH.

## Publikationslista

Axelsson, J., Wörman, A., Amelin, M., Riml, J., Pechlivanidis, I., 2023. Statistical assessment of the production behavior of a system of small-scale hydropower plants subjected to historical climate fluctuations, In preparation.

Hao, S., Wörman, A., Brandimarte, L., Riml, J., Bottacin-Busolin, A., 2023. A Model for Assessing the Importance of Runoff Forecasts in Periodic Climate on Hydropower Production, 2023, *Water* **2023**, 15(8), 1559;

<https://doi.org/10.3390/w15081559>

Jing Hu, Yu Li, Anders Wörman, Bingyao Zhang, Wei Ding, Huicheng Zhou, 2023. Reducing energy storage demand by spatial-temporal coordination of multienergy systems, *Applied Energy*. *Applied Energy*, 329:120277,

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120277>

Kouveliotis-Lysikatos, I., Amelin, M., 2022. The value of coordinating the operation of small-scale hydro, Hydropower scheduling conference 2022, Oslo, Norway.

Thörnqvist, D., 2023. Åtgärder för fiskanpassade avledare vid småskalig vattenkraft. Masterexamensarbete, KTH.

Sandkvist, S., Malaussène, E., 2023. Miljöåtgärders påverkan på vattenkraftens elproduktion och reglerförmåga. Kandidatexamensarbete, KTH.

## Referenser, källor

Lindström, G., Pers, C., Rosberg, J., Strömqvist, J., Arheimer, B., 2010. "Development and testing of the HYPE (Hydrological Predictions for the Environment) water quality model for different spatial scales," *Hydrology*

Lopez, M.G., Crochemore, L., Pechlivanidis, I., 2021. "Benchmarking an operational hydrological model for providing, *HESS* 25(3): 1189-1209.

<https://doi.org/10.5194/hess-25-1189-2021>.

Wörman, A., Bertacchi Uvo, C., Brandimarte, L., Busse, S., Crochemore, L., Girons Lopez, M., Hao, S., Pechlivanidis, I., Riml, J., 2020. Virtual energy storage-gain resulting from the spatiotemporal coordination of hydropower over Europe. *Applied Energy*, Vol. 272, Article number 115249,

[doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115249](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115249)

Zmijewski, N., Bottacin-Busolin, A., Wörman, A., 2015. "Incorporating hydrologic routing into reservoir operation models: Implications for hydropower production planning". *Water Resources Management*, December 2016, 30(2):623–640, DOI: 10.1007/s11269-015-1181-x

Zmijewski, N., Wörman, A., 2016. "Hydrograph variances over different time-scales in hydropower production networks", *Water Resources Research*, 52(8):5829-5846, 10.1002/2015WR017775