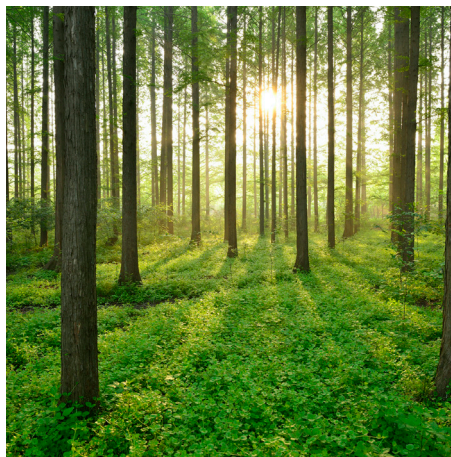


HÅLLBAR VATTENKRAFT I FRAMTIDENS ENERGISYSTEM

SLUTRAPPORT FRÅN HÅVEN-PROJEKTET

RAPPORT 2025:1082



HÅLLBAR VATTENKRAFT
I FRAMTIDEN ENERGISYSTEM



Hållbar vattenkraft i framtidens energisystem

Slutrapport från HÅVEN-projektet

EBBA LÖFBLAD, PROFU

MIKAEL ODENBERGER, PROFU

LISA GÖRANSSON, CTH

SIMON ÖBERG, CTH

MIKAEL AMELIN, KTH

ULI MAX RAHMLow, KTH

ERIK LINDBLom, IVL SVENSKA MILJÖINSTITUTET

MIKAEL MALMAEUS, IVL SVENSKA MILJÖINSTITUTET

ARVID RENSFELDT, PROFU

JENNY WESTERBERG, PROFU

Förord

Vattenkraftens roll att möta en varierande efterfrågan på el i det svenska energisystemet har under lång tid varit relativt oförändrad. Men det är på väg att förändras. Samtidigt som andelen variabel kraft i form av vindkraft och solex växer förväntas samhällets behov av el under de kommande decennierna att öka kraftigt. Detta, i kombination med förändrade tillrinningsmönster på grund av ett förändrat klimat och omprövningen av vattenkraften, kommer att ha en stor påverkan på vattenkraftens förutsättningar och funktion i det framtida energisystemet.

Denna rapport sammanfattar resultaten från forskningsprojektet "Hållbar vattenkraft i framtidens energisystem" som genomfördes under åren 2022 - 2024. Projektet har haft som övergripande mål att fördjupa kunskapen om vattenkraftens roll i det framtida energisystemet och de elsystemmässiga och hållbarhetsmässiga systemkonsekvenserna av miljöanpassningsåtgärder i vattenkraften i perspektivet av ett energisystem i förändring.

Bakgrunden till projektet utgörs av en förstudie (Systemkonsekvenser av miljöåtgärder i vattenkraften, Energiforsks rapport nr 2022:862) som genomfördes under hösten 2021. Förstudien syftade till att utveckla en metodik och att analysera systemkonsekvenserna av miljöanpassningsåtgärder för vattenkraften i ett framtida elsystem. Utkomsten av förstudien har legat till grund för arbetet i detta projekt och utgjort en grund för en vidare metodikutveckling och fortsatta analyser av olika konsekvenser för vattenkraften och elsystemet som följd av att förse vattenkraften med moderna miljövillkor.

Projektet har initierats av Energiforsk och genomförts av forskare från KTH, Chalmers, Profu och IVL Svenska Miljöinstitutet. Energiforsk vill rikta ett stort tack dels till medverkande forskare, dels till projektets referensgrupp bestående av representanter från Energiföretagen Sverige, Fortum, Havs- och Vattenmyndigheten, IVL Svenska Miljöinstitutet, Sintef, Statkraft, Svenska kraftnät, Uniper, Vattenfall, Vattenkraftens Miljöfond och Vattenregleringsföretagen samt Energimyndigheten som varit adjungerad till referensgruppen att följa verksamheten. Energiforsk vill också rikta ett särskilt tack till projektets finansiärer som varit vattenkraftsbranschen, Svenska kraftnät och Energimyndigheten.

Författarna ansvarar för rapportens innehåll.

Energiforsk

Sammanfattning

Vattenkraften har en stor och viktig roll i det svenska el- och energisystemet, både vad gäller dess bidrag till elproduktionen men framförallt som reglerkraft, där vattenkraften historiskt bidragit med den absoluta merparten av regleringen och balanseringen av dagens svenska kraftsystem. Under lång tid har vattenkraftens roll att balansera en varierande efterfrågan på el i det svenska energisystemet varit relativt oförändrad. Detta är nu på väg att förändras.

En kombination av flera omvärldsfaktorer kommer successivt att få en allt större påverkan på vattenkraftens förutsättningar och dess roll i det framtida energisystemet. Det handlar om den pågående omställningen av energisystemet med en allt större andel variabel kraft som vindkraft och sol, samtidigt som behovet av el under de kommande decennierna förväntas öka kraftigt. Samtidigt befinner sig vattenkraften miljömässigt i en ny tid med tydliga målkonflikter, där krav på att miljöanpassa vattenkraften måste avvägas mot behovet av en ökad efterfrågan på vattenkraftens produktions- och reglerbidrag. Den pågående klimatförändringen innebär på samma gång nya hydrologiska säsongsmönster som vattenkraften måste hantera och som påverkar vattenkraftens produktionsförutsättningar.

Denna rapport sammanfattar den forskning som har bedrivits inom projektet *Hållbar vattenkraft i framtidens energisystem*. Projektet har haft som övergripande syfte att fördjupa kunskapen om vattenkraftens roll i det framtida energisystemet och analysera elsystemmässiga och hållbarhetsmässiga systemkonsekvenser av att man inför ett antal miljöanpassningsåtgärder i delar av det svenska vattenkraftssystemet i fyra olika energiframtider.

En viktig del av arbetet i projektet har utgjorts av metodutveckling. Dels vad gäller att bättre kunna beskriva och representera vattenkraften i energisystemmodeller genom förbättrade vattenkraftsekvivalenter, dels vad gäller metodiken för att analysera och utvärdera hållbarhetskonsekvenserna av förlust av elproduktion och reglerförmåga på grund av att man inför miljöanpassningsåtgärder i vattenkraften.

Projektets viktigaste slutsatser kan översiktligt sammanfattas i följande punkter.

Vattenkraftens förändrade roll

Vattenkraften förväntas att gå från att hantera lastvariationer inom dygnet till att hantera vindkraftens variationer över flera dygn och veckor. Den kommer i allt större utsträckning komplettera vindkraften snarare än att enbart balansera efterfrågan, vilket historiskt har varit dess främsta roll. Vattenkraftens fulla produktionspotential används därför främst för att hantera variationer på dagen före- och intradagmarknaden, medan andra tekniker som t.ex. värmepumpar, elbilar och stationära batterier kan bidra med systemtjänster till låg kostnad och därmed kan komma att ta över en del av vattenkraftens bidrag av systemtjänster.

Vattenkraften förväntas också oftare producera på maxlast eller minimilast i framtiden, eftersom den väntas utgöra en mindre del av elsystemet på samma

gång som elprisvariationerna förväntas vara större än idag. Det finns därmed ett stort värde av att kunna nyttja vattenkraftens drift under fler timmar på ytterlighetspositionerna.

Vattenkraftens variationshantering på tidsskalan flera dygn, mellan säsonger och mellan år är en mycket värdefull förmåga med få andra alternativ. Att ersätta denna förmåga är mycket svårare och dyrare än att ersätta vattenkraftens variationshantering på korta tidsskalor eller en produktionsförlust på enstaka TWh.

Miljöanpassningens effekter

Det analyserade miljöåtgärdsscenarioet bedöms leda till en produktionsförlust på cirka 1 TWh vattenkraft per år. Scenarioet, som baseras på ett underlag från Svenska kraftnäts regeringsuppdrag hösten 2023¹, omfattar genomförandet av miljöanpassningsåtgärder i form av minimitappning och i totalt 44 av de storskaliga vattenkraftverken, med en sammanlagd installerad effekt på ungefär 3,3 GW. Det analyserade scenarioet, som i rapporten benämns som Vattenförvaltningscykel 2.5 (VFC 2.5), bedöms påverka vattenkraftens reglerförmåga endast marginellt.

Ersättning av flexibel elproduktion

Förlusten i vattenkraftsproduktion på grund av genomförda miljöanpassningsåtgärder enligt det analyserade miljöåtgärdsscenarioet kan komma att ersättas med landbaserad vindkraft och andra flexibilitetsåtgärder som batterier och elektrolysörer för vätgasproduktion. Dessa investeringar bedöms ha en relativt liten klimatpåverkan.

Hållbarhetskonsekvenser

De föreslagna miljöåtgärderna kan förväntas innebära positiva effekter på de akvatiska ekosystemen, vilket bidrar till ökad biologisk mångfald och förbättrad vattenkvalitet. Hur stora dessa positiva effekter blir är dock starkt beroende av lokala förutsättningar och måste analyseras närmare från fall till fall. Samtidigt indikerar hållbarhetsanalysen av de systemmässiga konsekvenserna av en förlust av elproduktion och reglerförmåga på grund av genomförandet av miljöanpassningsåtgärder enligt det analyserade miljöåtgärdsscenarioet blandade effekter på andra hållbarhetsmål, särskilt de som är kopplade till markanvändning och kritiska mineraler.

Framtida utmaningar och behov

Den pågående omställningen av energisystemet innebär att värdet av de roller som vattenkraften har haft historiskt och fram till idag successivt håller på att förändras. Det finns därför ett stort behov av fortsatt forskning och vidare analyser av vattenkraftens roll i olika typer av framtida energisystem. Den metodik som har utvecklats inom projektet utgör en värdefull grund för fortsatt metodutveckling och fortsatta systemanalyser inom området.

¹ Svenska kraftnät (2023a). Att kartlägga de konsekvenser för elsystemet och omprövning av vattenkraften medför m.m. Redovisning av regeringsuppdrag. Ärendenr Svk 2023/510. 2023-09-26. Samt Svenska kraftnät (2023b). PM: Uppdateringar och rättelser avseende återrapportering av regeringsuppdrag. Ärendenr Svk 2023/610. 2024-10-18.

Nyckelord

Vattenkraft, miljöanpassning, hållbarhet, elsystem

Summary

Hydropower plays a significant and important role in the Swedish electricity and energy system, both in terms of its contribution to electricity production but above all as regulating power, where hydropower historically has contributed to the vast majority of the regulation and balancing of today's Swedish power system. For a long time, hydropower's role in balancing a varying demand for electricity in the Swedish energy system has been relatively unchanged. This is now about to change.

A combination of several external factors, such as the ongoing transformation of the energy system with an increasing share of variable power such as wind power and solar power together with an increasing demand for electricity in the coming decades, will gradually impact the conditions for hydropower and its role in the future energy system. At the same time, hydropower is in a new era of significant conflicts of interest, in which requirements to adapt hydropower to the environment must be weighed against the need for an increased demand for hydropower's production and regulation contribution. The ongoing climate change also means new hydrological seasonal patterns that affect hydropower's production conditions.

This report summarizes the research conducted within the project Sustainable Hydropower in Future Energy Systems. The project's overall aim has been to deepen the understanding of hydropower's role in the future energy system and to analyze the consequences on electricity systems and sustainability in a systems perspective when implementing different environmental adaptation measures in parts of the Swedish hydropower system. The analyses include four different future energy systems.

An important part of the project has involved method development. This includes methods to better describe and represent hydropower in energy system models through improved hydropower equivalents, as well as a methodology for analyzing and evaluating the sustainability consequences of the loss of electricity production and regulation capacity due to the implementation of environmental adaptation measures in hydropower.

The project's key conclusions can be summarized as follows.

Hydropower's Changing Role

Hydropower's role is expected to change from managing daily load variations to handling wind power variations over multiple days and weeks. It will increasingly complement wind power rather than merely balancing demand, which has historically been its primary role. Therefore, hydropower's full production potential is mainly used for managing variations in the day-ahead and intraday markets, while other technologies like heat pumps, electric vehicles, and stationary batteries can provide system services at a low cost and may take over some of the system services traditionally provided by hydropower.

Hydropower is also expected to more frequently operate at maximum or minimum load in the future, as it is anticipated to constitute a smaller portion of the power system while electricity price variations are expected to be larger than today. Thus, there is great value in utilizing hydropower's operation during more hours at extreme positions.

Hydropower's ability to manage variations over time scales of several days, seasons, and years is a highly valuable capability with few other alternatives. Replacing this capability is much more difficult and expensive than replacing short-term variation management or a production loss of a few TWh.

Environmental Adaptation Effects

The analyzed environmental adaptation scenario is estimated to lead to a production loss of approximately 1 TWh of hydropower per year. The scenario, based on data from Svenska kraftnät, includes the implementation of environmental adaptation measures in the form of minimum flow releases at a total of 44 large-scale hydropower plants, with a combined installed capacity of approximately 3.3 GW. The analyzed scenario is estimated to marginally affect hydropower's regulation capacity.

Replacement of Flexible Electricity Production

The loss of hydropower production due to the implementation of environmental adaptation measures may be replaced with onshore wind power and other flexibility measures such as batteries and electrolyzers for hydrogen production. These investments are expected to have a relatively small climate impact.

Sustainability Consequences

The proposed environmental measures can be expected to have positive effects on aquatic ecosystems, contributing to increased biodiversity and improved water quality. However, the magnitude of these positive effects is strongly dependent on local conditions and must be analyzed further on a case-by-case basis. Meanwhile, the sustainability analysis of the system consequences of a loss of electricity production and regulation capacity due to the implementation of environmental adaptation measures in the analyzed scenario indicates mixed effects on other sustainability goals, particularly those related to land use and critical minerals.

Future Challenges and Needs

The ongoing transformation of the energy system implicates that the value of the roles that hydropower has had historically and up until today is gradually changing. There is therefore a great need for continued research and further analyses of hydropower's role in various types of future energy systems. The methodology developed within the project provides a valuable foundation for continued method development and further system analyses in the field.

Innehåll

1	Inledning	13
1.1	Bakgrund	13
1.2	Syfte och mål med projektet	14
1.3	Förutsättningar Och Avgränsningar	15
1.4	Projektets upplägg	16
1.5	Rapportens upplägg	18
2	Vattenkraftens anpassning till modern miljölagstiftning	19
2.1	Vattenkraften i en ny tid	19
2.2	En nationell plan för omprövning av vattenkraften	20
3	Vattenkraften och vattenmiljön	23
3.1	Vattenkraften som kraftkälla	23
3.2	Vattenhushållning	25
3.3	Vattenkraftens reglerförmåga	28
3.4	En god vattenmiljö – Betydelsen av levande vattendrag	30
3.5	Betydelsen av åtgärder för bättre ekologisk status	32
4	Analyserna inom Håven: en övergripande sammanfattning av vad som har analyserats	35
4.1	Vattenförvaltningscykel 2.5 – projektets analyserade miljöåtgärdsscenario	35
4.2	Analyserade energisystemscenarier	38
4.3	Översiktligt om metodiken som har använts	39
5	Analyserna inom Håven: en övergripande sammanfattning av resultat och slutsatser	40
5.1	Konsekvenserna för vattenmiljön av olika miljöanpassningsåtgärder enligt VFC 2.5	40
5.1.1	Faunapassage	41
5.1.2	Minimitappning	42
5.2	Konsekvenser för vattenkraften av miljöanpassningsåtgärder enligt VFC 2.5	44
5.3	Konsekvenser för elsystemet av miljöanpassningsåtgärder enligt VFC 2.5	46
5.4	Hållbarhetskonsekvenser av miljöanpassningsåtgärder enligt VFC 2.5	49
6	Vattenkraftens roll i det framtida elsystemet	52
7	Avslutande ord	54
8	Referenslista	56

BILAGA 1 Vattenkraftens roll i energisystemet

BILAGA 2 Hållbarhetsanalys av miljöåtgärder i vattenkraften i ett elsystemperspektiv

BILAGA 3 Vattenmiljömässiga konsekvenser av miljöanpassningsåtgärder i vattenkraften

1 Inledning

Denna rapport sammanfattar den forskning som har bedrivits inom projektet *Hållbar vattenkraft i framtidens energisystem* som har genomförts under 2022–2024. Det övergripande syftet med projektet har varit att fördjupa kunskapen om vattenkraftens roll i det framtida energisystemet och möjliga systemkonsekvenser av miljöanpassningsåtgärder i vattenkraften i perspektivet av ett energisystem i förändring.

I detta inledande kapitel ges en övergripande beskrivning av bakgrund, syfte och mål med projektet. Dessutom redogörs för projektets förutsättningar, avgränsningar och upplägg. Avslutningsvis beskrivs hur rapporten är disponerad.

1.1 BAKGRUND

Vattenkraftens roll att möta en varierande efterfrågan på el i det svenska energisystemet har under lång tid varit relativt oförändrad. Detta är på väg att förändras. En kombination av flera omvärldsfaktorer kommer att få stor påverkan på vattenkraftens förutsättningar och funktion i det framtida energisystemet. Det handlar om den pågående omställningen av energisystemet med en allt större andel variabel kraft (vindkraft och solel), samtidigt som behovet av el förväntas öka kraftigt, särskilt inom transport- och industrisektorerna, drivet av de svenska klimatmålen.

Samtidigt befinner sig vattenkraften miljömässigt i en ny tid med tydliga målkonflikter, där krav på att miljöanpassa vattenkraften måste avvägas mot behovet av en ökad efterfrågan på vattenkraftens produktions- och reglerbidrag. Klimatförändringen förväntas på samma gång innebära nya hydrologiska säsongsmönster som vattenkraften måste hantera och som påverkar vattenkraftens produktionsförutsättningar. Vattenkraften bidrar också med andra viktiga förmågor som ett drift- och leveranssäkert elsystem behöver, t.ex. frekvens- och spänningsstabilitet och elberedskapsförmågor. Även dessa förmågor kommer att påverkas. Sammantaget innebär dessa faktorer att förutsättningarna för den svenska vattenkraften och vattenkraftens framtida roll kommer att förändras väsentligt under de närmaste årtiondena.

Både arbetet med att förse vattenkraften med moderna miljövillkor och omställningen av energisystemet drivs direkt och uttalat av hållbarhetsmål. Av det skälet är det viktigt att också öka kunskapen om vilka indirekta miljö- och hållbarhetskonsekvenser förändringarna i vattenkraftens förutsättningar medför.

Bakgrunden till detta projekt utgörs av en förstudie (*Systemkonsekvenser av miljöåtgärder i vattenkraften*) som genomfördes under hösten 2021 på uppdrag av ett antal företag inom vattenkraftsbranschen tillsammans med Svenska kraftnät. Förstudien hade som övergripande syfte att utveckla metodik och analysera systemkonsekvenser av miljöanpassningsåtgärder för vattenkraften i ett framtida elsystem (år 2035). Förstudien analyserade ett urval av ekonomiska och miljömässiga systemkonsekvenser av att ersätta vattenkraften med andra tillgängliga produktions- och variationshanteringsalternativ. Resultaten av analyserna finns publicerade inom ramen för Energiforsks rapportserie². Utkomsten av förstudien har utgjort en grund för vidare metodikutveckling och fortsatta analyser av olika konsekvenser för vattenkraften och elsystemet som följd av att förse vattenkraften med moderna miljövillkor.

1.2 SYFTE OCH MÅL MED PROJEKTET

Det övergripande syftet med projektet har varit att fördjupa kunskapen om hur och i vilken utsträckning vattenkraften kan användas som en effektiv och reglerande resurs i ett framtida elsystem med en stor andel variabel elproduktion och en hög efterfrågan på el, ett förändrat klimat³ samt ökade krav på miljöanpassningsåtgärder. Projektet har därigenom avsett att öka kunskapen om vattenkraftens framtida roll och särskilt hur kraftbalansen i ett framtida elsystem kan säkerställas på ett hållbart sätt.

Projektets mål har varit att besvara följande tre övergripande frågeställningar:

- Hur påverkas vattenkraftens möjligheter att tillgodose behovet av energi, effekt, variationshantering samt systemtjänster⁴, givet kraven på miljöanpassningsåtgärder i kombination med klimatförändringens påverkan på vattenkraften samtidigt som efterfrågan på el och effekt ökar i takt med omställningen av energisystemet?
- Vilka andra åtgärder finns tillgängliga för att tillsammans med vattenkraften tillgodose behovet av effekt, variationshantering och systemtjänster i det framtida elsystemet?

² Gode m.fl. (2022).

³ Här har projektet nyttjat den kunskap som har tagits fram inom ramen för Energiforsksprojektet *Klimatförändringarnas inverkan på vattenkraftens produktions- och reglerförmåga (KLIVA)*, se Scharff m.fl., 2022.

⁴ Systemtjänster är ett samlingsnamn på funktioner som är av fundamental betydelse för att upprätthålla ett stabilt kraftsystem (och därmed leveranssäkerheten). Det handlar t.ex. om frekvens- och spänningsstabilitet, balanseringsenergi och svängmassa och omfattar t.ex. olika typer av stödtjänster och reserver.

- Vad blir de sammantagna hållbarhetskONSEKVENSERNA, inklusive de vattenmiljömässiga konsekvenserna, av olika utfallsrum för vattenkraftens framtida roll i kombination med andra åtgärder för att tillgodose behovet av effekt, variationshantering och systemtjänster i det framtida elsystemet?

Viktigt att påpeka är att projektet inte har nått så långt som att kunna studera systemtjänster, se vidare avsnitt 5.3 samt bilaga 1.

1.3 FÖRUTSÄTTNINGAR OCH AVGRÄNSNINGAR

Strax efter att projektet startade hösten 2022 annonserade Tidöpartierna genom Tidö-avtalet⁵ att omprövningen av vattenkraften skulle "pausas tills det är kartlagt vilka konsekvenser omprövningen får för elproduktionen". Vidare skulle "ett nytt regelverk för omprövning tas fram som säkerställer att intresset av elförsörjning väger mycket tungt"⁶. Projektet fick därigenom frågå den ursprungliga planen att inom arbetspaket 2 (se nedan under avsnitt 1.4) genomföra en fallstudiebaserad prognos för det faktiska utfallet av NAP utifrån de faktiska tillståndsansökningar och domar som projektet hade räknat med skulle komma in under projektperioden. Som beskrivs i bilaga 3 har projektet istället genomfört en rad intervjuer med sakkunniga för att få fram kunskap om vilken typ av miljöanpassningsåtgärder som kan bedömas som mer eller mindre troliga i de kommande prövningarna av vattenkraften.

Ursprungligen var det tänkt att ha en post doc-tjänst på KTH knuten till projektet, varför en rekryteringsprocess inleddes så snart projektet hade startat. Då rekryteringsprocessen drog ut på tiden på grund av avsaknad av lämpliga kandidater försenades arbetet i projektet något. I mitten på 2023 knöts istället en doktorand till projektet. Modellerings- och simuleringsarbetet i projektet genomfördes under 2023 och början på 2024. Antaganden om miljövillkor/miljöåtgärdsscenario och scenerier för framtidens energisystem fastställdes i slutet av 2023.

I projektet har vi valt att inte göra något försök att sätta ett värde på vattenkraftens reglerförmåga, utan i stället studerar vi hur hela systemet påverkas av miljöåtgärder, d.v.s. vilka extra investeringar i annan reglerförmåga och förändrade körmönster man får till följd av olika åtgärder och omvärldsscenerier.

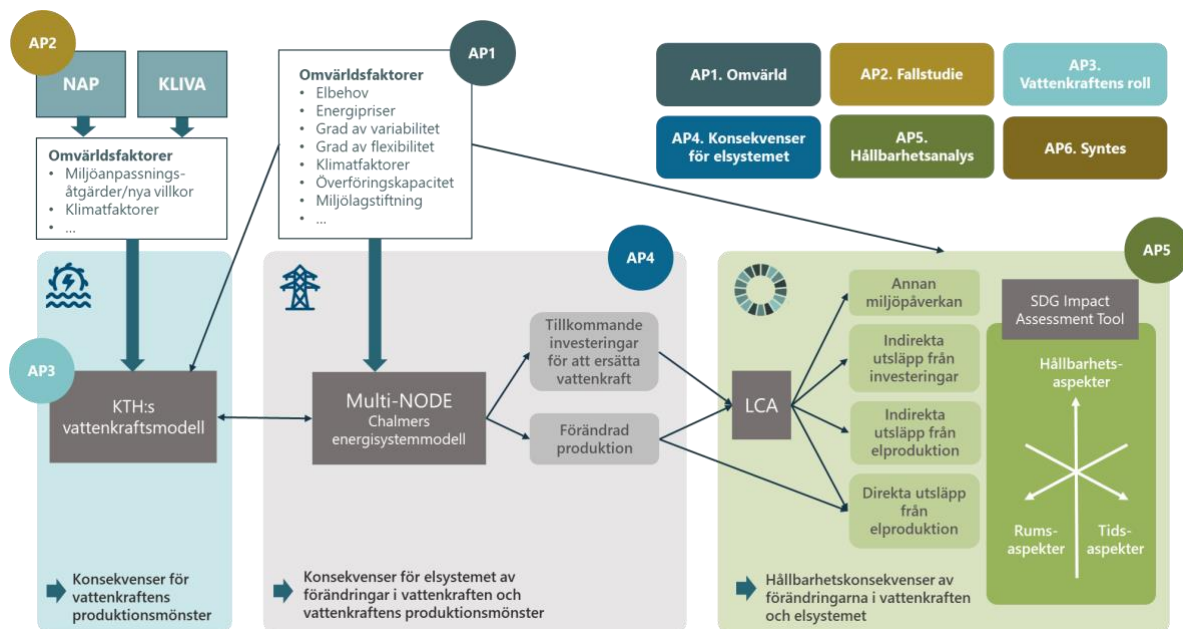
⁵ <https://www.liberalerna.se/wp-content/uploads/tidoavtalet-overenskommelse-for-sverige-slutlig.pdf>

⁶ Prövningarna har varit pausade sedan dess. I augusti 2024 kom regeringens promemoria med föreslagna förändringar i lagstiftningen. Promemorian har varit på remiss under hösten, remisstiden gick ut 22 november. Enligt promemorian föreslås huvuddelen av författningsändringarna träda i kraft den 1 januari 2025. De föreslagna lagändringarna och de förordningsändringar som följer av dessa, föreslås träda i kraft den 1 juli 2025.

Vattenkraften kan även bidra med vissa förmågor som behövs för både leverans- och driftsäkerhet inom kraftsystemet men detta ingår inte i rapporten.

1.4 PROJEKTETS UPPLÄGG

Arbetet har genomförts i sex olika arbetspaket (AP) och projektgruppen har bestått av forskare och analytiker från KTH, Chalmers, IVL Svenska Miljöinstitutet samt Profu. Figur 1 nedan är en schematisk bild över hur de olika arbetspaketen och analysverktygen som har använts inom projektet hänger ihop. För mer information om de modellverktyg som har använts hänvisas till bilaga 1 och bilaga 2.



Figur 1 En övergripande processbild över hur projektets arbetspaket (AP), analysdelar och analysverktyg hänger samman. NAP avser Nationella planen för omprövningen och KLIVA står för Energiforskningsprojektet KLIVA (Klimatförändringarnas inverkan på vattenkraftens produktions- och reglerförmåga), se Scharff m.fl., 2022, som vi har hämtat underlag från i form av klimatfaktorer. LCA avser livscykelanalys och SDG står för Sustainable Development Goals.

Översiktligt har arbetspaketen omfattat:

AP1. Omvärldsanalys av vattenkraftens roll och förutsättningar i det framtida energisystemet. Detta arbetspaket har omfattat framtagande av utvecklingsscenarioer för energisystemet med avseende på grad av elektrifiering, produktionskällor, nivåer av överföringskapacitet, data om kostnader för olika produktionstekniker och energislag m.m. Utgör utgångspunkt för AP3, AP4 och AP5. (Profu och Chalmers)

AP2. Fallstudiebaserad prognos för faktiskt utfall av den nationella planen för omprövning (NAP). Detta AP har på grund av omständigheter som projektet ej haft rådighet över fått utföras på ett annat sätt än vad som ursprungligen var tänkt (se avsnitt 1.3). Istället för data från faktiska ansökningar har intervjuer utförts med sakkunniga och olika företrädare som berörs av prövningarna. Syftet har varit att på detta sätt få mer kunskap om vilken typ av miljöanpassningsåtgärder som, av olika parter, bedöms som mer eller mindre troliga i omprövningarna. Utkomsten av dessa intervjuer framgår av bilaga 3. Detta AP har också genomfört en analys av de möjliga ekologiska konsekvenserna av föreslagna miljöanpassningsåtgärderna baserat på en litteraturstudie av forskningen inom området (se dels avsnitt 5.1, dels bilaga 3). (IVL Svenska Miljöinstitutet)

AP3. Vattenkraftens roll i en förändrad omvärld. I detta AP har en detaljerad analys av vattenkraftens produktionsmönster genomförts med hjälp av KTH:s detaljerade vattenkraftsmodell. Modellarbetet har kompletterats med den data som togs fram inom ramen för KLIVA-projektet⁷ vad gäller konsekvenser av ett förändrat klimat och förändrade tillrinningsmönster. Med utgångspunkt i ett scenario med miljöanpassningsåtgärder som bestämdes i samråd med referensgruppen har KTH:s modell analyserat förändringarna som uppstår i vattenkraftens förmågor på grund av miljöanpassningarna (se vidare nedan under kapitel 4 och kapitel 5). Resultatet från ett fall med och ett fall utan miljöanpassningsåtgärder har sedan tagits vidare för analys inom AP4. En viktig del av detta AP har varit metodutveckling för framtagandet och implementering av matematiskt definierade ekvivalenter⁸ (se vidare i bilaga 1), som möjliggör en matematisk koppling mellan KTH:s detaljerade vattenkraftsmodell och Chalmers mer övergripande elsystemmodell, vilket ger en ökad möjlighet att kunna analysera konsekvenser för elsystemet av förändringar i vattenkraften. (KTH)

AP4. Konsekvenser för elsystemet av förändringar i vattenkraften. Detta AP har analyserat vattenkraftens roll i olika framtida energisystemscenarier med och utan ett fall av miljöanpassningsåtgärder (från AP3). (Chalmers)

AP5. Hållbarhetsanalys. I detta AP har resultaten från AP4 analyserats med avseende på de hållbarhetsmässiga konsekvenserna på FN:s 17 hållbarhetsmål och delmål av ett förändrat energisystem och förlust av vattenkraftproduktion på grund av det analyserade miljöåtgärdsscenarioet. Även detta AP har omfattat metodutveckling. (IVL Svenska Miljöinstitutet och Profu)

⁷ Se slutrapport från Energiforskningsprojektet KLIVA: Scharff m.fl. (2023). *Klimatförändringarnas inverkan på vattenkraftens produktions- och reglerförmåga*. ER 2023:924.

⁸ För att inte göra en elsystem/energisystemmodell alltför beräkningstung brukar man använda s.k. ekvivalenter för att beskriva vattenkraften, vilket innebär att man aggregerar all vattenkraft inom ett område (t.ex. elområden). Dvs. en förenklad representation av vattenkraften.

AP6. Syntes. Detta arbetspaket har haft som syfte att sammanställa resultaten från övriga AP genom föreliggande rapport. (*Profu*)

Arbetsmässigt har en inte obetydlig, och viktig, del av projektet utgjorts av metodutveckling, dels vad gäller kopplingen mellan vattenkraftsmodellen och energisystemmodellen i form av utvecklade ekvivalenter för att bättre beskriva och representera vattenkraften i energisystemmodellerna (AP3 och AP4), dels vad gäller metodik för att analysera och utvärdera hållbarhetskonsekvenserna av förlust av elproduktion och reglerförmåga (AP5).

1.5 RAPPORTENS UPPLÄGG

Utöver denna syntesrapport har två delrapporter tagits fram som, mer i detalj, beskriver analysarbetets metodik och analysverktyg liksom analysresultat och slutsatser från dels AP3 och AP4 (konsekvenserna för vattenkraftens produktion och förmågor i ett framtida energisystem), dels AP5 (hållbarhetskonsekvenserna av ett förändrat energisystem). För att ändå hålla ihop projektets slutsatser har delrapporterna, istället för att publiceras separat, lagts som bilagor till denna rapport (bilaga 1 och bilaga 2). Bilaga 3 utgör en sammanfattning av arbetet inom AP2, som har genomförts som en litteratur- och intervjustudie om de vattenmiljömässiga konsekvenserna av olika miljöanpassningsåtgärder.

De två följande kapitlen (2 och 3) utgör en fond till projektets analyser i form av en beskrivning av skälen till att vattenkraften nu ska anpassas till modern miljölagstiftning och en beskrivning av vattenkraftens roll och förmågor i dagens elsystem. Kapitel 4 ger en översiktlig beskrivning av det valda miljöåtgärdsscenarioet liksom de analyserade energisystemscenarierna. I kapitel 5 ges sedan en sammanfattning av projektets analysresultat och slutsatser. Kapitel 6 är en översiktlig sammanfattning av vad som går att dra för slutsatser om vattenkraftens framtida roll utifrån de analyserna som har gjorts inom projektet. Sist, i kapitel 7, ges några avslutande ord. Kapitel 8 redogör för de referenser som nämns i syntesrapporten. Därefter följer bilagorna med tillhörande referenslistor.

2 Vattenkraftens anpassning till modern miljölagstiftning

Sveriges och Nordeuropas energisystem genomgår just nu en genomgripande förändring med en allt större andel variabel elproduktion, i form av vind- och solkraft, som förväntas behöva tillgodose ett snabbt växande elbehov när samhällets olika sektorer ska ställas om för att nå uppsatta klimatmål. Samtidigt ska en stor del av Sveriges vattenkraftverk, under de kommande decennierna, förses med moderna miljövillkor. Som en följd av detta är vattenkraftens roll och förutsättningar i elsystemet på väg att förändras.

2.1 VATTENKRAFTEN I EN NY TID

Vattenkraften har haft en avgörande betydelse för elektrifieringen av Sverige. I takt med att samhällets behov av elektricitet ökade kraftigt under och efter andra världskriget byggdes de svenska älvarna ut i snabb takt. Utbyggnaden avstannade i början på 1970-talet när striden om "de sista oreglerade älvarna" i norr i stort sett innebar ett stopp för vattenkraftens möjligheter till expansion, trots ett fortsatt ökande behov av el i skuggan av oljekrisen⁹. Obeaktat en avstannad expansion har vattenkraften sedan dess haft och har alltjämt en stor och viktig roll i det svenska elsystemet, både vad gäller dess bidrag till elproduktionen men framförallt som reglerkraft, där vattenkraften bidrar med den absoluta merparten av regleringen och balanseringen av dagens svenska kraftsystem¹⁰. Vattenkraften bidrar också med andra för elsystemet viktiga förmågor som frekvens- och spänningsstabilitet och elberedskapsförmågor.

Eftersom vattenkraftens utbyggnad till stor del skedde under 1900-talets första decennier fram till 1970-talet har majoriteten av den svenska vattenkraften tillstånd som är äldre än den svenska miljöbalken, vilken trädde i kraft först 1999. Under åren runt millennieskiftet infördes även ett flertal EU-direktiv i svensk lagstiftning

⁹ <https://historia.vattenfall.se/stories/fran-vattenkraft-till-solceller/valdiga-investeringar-i-vattenkraft>

¹⁰ *Reglering* avser balansering inom timmen, d.v.s. de kortaste tidsskalorna, medan *balansering* avser strategisk förläggning av produktion, d.v.s. produktionsplanering och/eller flytt av produktion mellan timmar, dagar, veckor, säsong och år.

som vattenkraften idag har att förhålla sig till, bland annat EU:s ramdirektiv för vatten¹¹ och Art- och habitatdirektivet¹².

Som en del av den energipolitiska överenskommelsen från 2016 underströks vattenkraftens centrala roll för ett robust och leveranssäkert elsystem, samtidigt som det slogs fast att vattenkraftens påverkan på vattenmiljön ska hanteras genom en anpassning till modern miljölagstiftning. Det nya regelverket som trädde i kraft 2019 i enlighet med energiöverenskommelsen innebär bland annat att alla tillståndspliktiga vattenverksamheter för produktion av vattenkraftsel ska förses med moderna miljövillkor. Ett vidare syfte med lagändringarna har varit att tydligare harmonisera den svenska vattenmiljölagstiftningen med EU-rätten. Med moderna miljövillkor avses att en vattenverksamhets tillstånd inte är äldre än 40 år.

2.2 EN NATIONELL PLAN FÖR OMRÖVNING AV VATTENKRAFTEN

Omrövningen av vattenkraften ska ske enligt en nationell plan med syfte att nå största möjliga vattenmiljönytta och en nationell effektiv tillgång till vattenkraftsel.

Ansökningarna inför omrövningen ska lämnas in mellan 2022 och 2038, där samtliga vattenkraftverk ska få sina tillstånd prövade. Myndigheter som länsstyrelser och Havs- och vattenmyndigheten samordnar processen. Idag har 1 590 av Sveriges runt 2 000 vattenkraftverk anmält sig till den nationella planen för omrövning (Svenska kraftnät, 2023a). *I efterföljande kapitel 3 ges en närmare beskrivning av den svenska vattenkraften.*

Planen har ett nationellt helhetsperspektiv och ska vara vägledande för miljöprövningarna och vattenförvaltningen. Utgångspunkten är att vattenkraftverken ska omprövas i ett sammanhang, utifrån vattendrag och huvudavrinningsområden. Planen bekräftar det s.k. planeringsmålet från den nationella strategin om en maximal produktionsförlust på 1,5 TWh¹³ och beaktar också vikten av vattenkraftens reglerförmåga i elsystemet, framförallt i de 255 mest betydelsefulla kraftverken för reglerkraft¹⁴.

¹¹ Europaparlamentets och rådets direktiv 2000/60/EG av den 23 oktober 2000 om upprättade ram för gemenskapens åtgärder på vattenpolitikens område.

¹² Rådets direktiv 92/43/EEG av den 21 maj 1992 om bevarande av livsmiljöer samt vilda djur och växter.

¹³ Planeringsmålet på 1,5 TWh föreslogs av Havs- och vattenmyndigheten och Energimyndigheten (2014) i rapporten "Strategi för åtgärder inom vattenkraften". Planeringsmålet innebär att högst 2,3 % av vattenkraftens årsproduktion får tas i anspråk under ett normalår (motsvarande 1,5 TWh).

¹⁴ Det nationella riktvärdet på 1,5 TWh finns fördelat på 22 huvudavrinningsområden som är viktigast för reglerkraften. Dessa kallas HARO-värden. Se vidare i Energimyndigheten, Svenska kraftnät och Havs- och vattenmyndigheten (2016). Se även vidare i kapitel 3.3.

En viktig fråga i miljöprovningarna är vilka miljö kvalitetsnormer som har satts för de olika vattenförekomsterna. Det finns olika uppfattningar om hur detaljerad denna normsättningsprocess ska vara, och vilka underlag som ska finnas framme. Såväl forskare som vattenkraftsbranschen efterfrågar platsspecifika bedömningar i normsättningen medan vattenmyndigheterna inte anser att de har möjlighet att göra detta utan snarare har valt att arbeta med schabloner. Miljödombstolarna kan inte ändra miljö kvalitetsnormer, men kan begära ett remissyttrande från Vattenmyndigheten om de har anledning att tro att normen är felaktigt satt.

Viktiga aspekter i samband med att förse vattenkraften med moderna miljö villkor är möjligheten att förklara vattenförekomster¹⁵ som *kraftigt modifierade vatten* (KMV) samt möjligheten att besluta om undantag i form av *mindre stränga krav* (MSK), vilket kan ske både i s.k. *naturliga vatten* och i KMV. För att förklara en vattenförekomst som KMV krävs att det handlar om samhällsnyttiga verksamheter – exempelvis vattenkraft – som resulterat i väsentligt ändrad fysisk karaktär¹⁶. I KMV ställs lägre krav för vissa kvalitetsfaktorer¹⁷ (*god ekologisk potential*, GEP) jämfört med vad som krävs för *naturliga vatten* (*god ekologisk status*, GES), men innebär inte en generell befrielse från att vidta åtgärder för att uppnå ekologiska mål. För att besluta om MSK krävs bland annat att det är omöjligt, eller skulle medföra orimliga kostnader, att uppnå god ekologisk status eller potential (Havs- och vattenmyndigheten, 2023). För närvarande pågår arbete med att förklara KMV och besluta om undantag i högre utsträckning, särskilt avseende vattenförekomster med påverkan från vattenkraft. (Havs- och vattenmyndigheten, 2023).

I vattendirektivets tredje förvaltningscykel (2016-2021) förklarade vattenmyndigheterna 658 ytvattenförekomster som KMV på grund av betydande negativ påverkan från vattenkraft, och av dessa hade 477 vattenförekomster mindre stränga krav. I *naturliga vatten* beslutades om ytterligare 104 vattenförekomster med mindre stränga krav (Havs- och vattenmyndigheten, 2023a).

¹⁵ I syfte att kunna beskriva status på och bedöma vilka mål (miljö kvalitetsnormer) som ska gälla är stort sett allt vatten i Sverige (exklusive havet) indelat i mindre enheter, s.k. vattenförekomster. <https://www.vattenmyndigheterna.se/vattenforvaltning/tillstandet-i-vattnet/vattenforekomstindelning.html>

¹⁶ Det kan också handla om att de åtgärder som krävs för att nå *god ekologisk status* skulle ge en betydande negativ inverkan på verksamheten.

¹⁷ En kvalitetsfaktor (*biologisk, fysikalisk/kemisk eller hydromorfologisk*) kan bestå av en eller flera parametrar som vägs samman till ekologisk status och ekologisk potential. <https://www.vattenmyndigheterna.se/om-vattenmyndigheterna/ordlista/k.html#h-Kvalitetsfaktor>

En ytterligare faktor att beakta vid normsättning är påverkan på Natura 2000-områden¹⁸. Bedömningar om vilka vattenkraftverk som kan behöva göra särskilda miljöanpassningar för att beakta Natura 2000-lagstiftningen har gjorts i ett 20-tal avrinningsområden, där mer än 90 vattenkraftverk angetts som troliga att påverka Natura 2000-områden negativt (Svenska kraftnät, 2023a). Det finns fortfarande många frågetecken kring hur prövningarna för kraftverk som berörs av Natura 2000-relaterad miljölagstiftning kommer att hanteras¹⁹.

¹⁸ Natura 2000-områden är ett nätverk av utpekade skyddsvärda områden i hela EU som kopplar till EU:s art- och habitatdirektiv och/eller fågeldirektivet med syfte att värna vissa naturtyper eller växt- och djurarter. Direktiven har implementerats i svensk lagstiftning i bl.a. miljöbalken och tillhörande förordningar. Enligt lagstiftningen är det i Natura 2000-områden förbjudet att utan tillstånd "*bedriva verksamheter eller vidta åtgärder som på ett betydande sätt kan påverka miljön*".

¹⁹ Här är det viktigt att lyfta det faktum att flera områden har pekats ut/utsetts till Natura 2000-områden i och runt vattendrag där vattenkraft redan varit utbyggd under lång tid (före tiden då den Natura 2000-relaterade lagstiftningen implementerades i svensk lagstiftning).

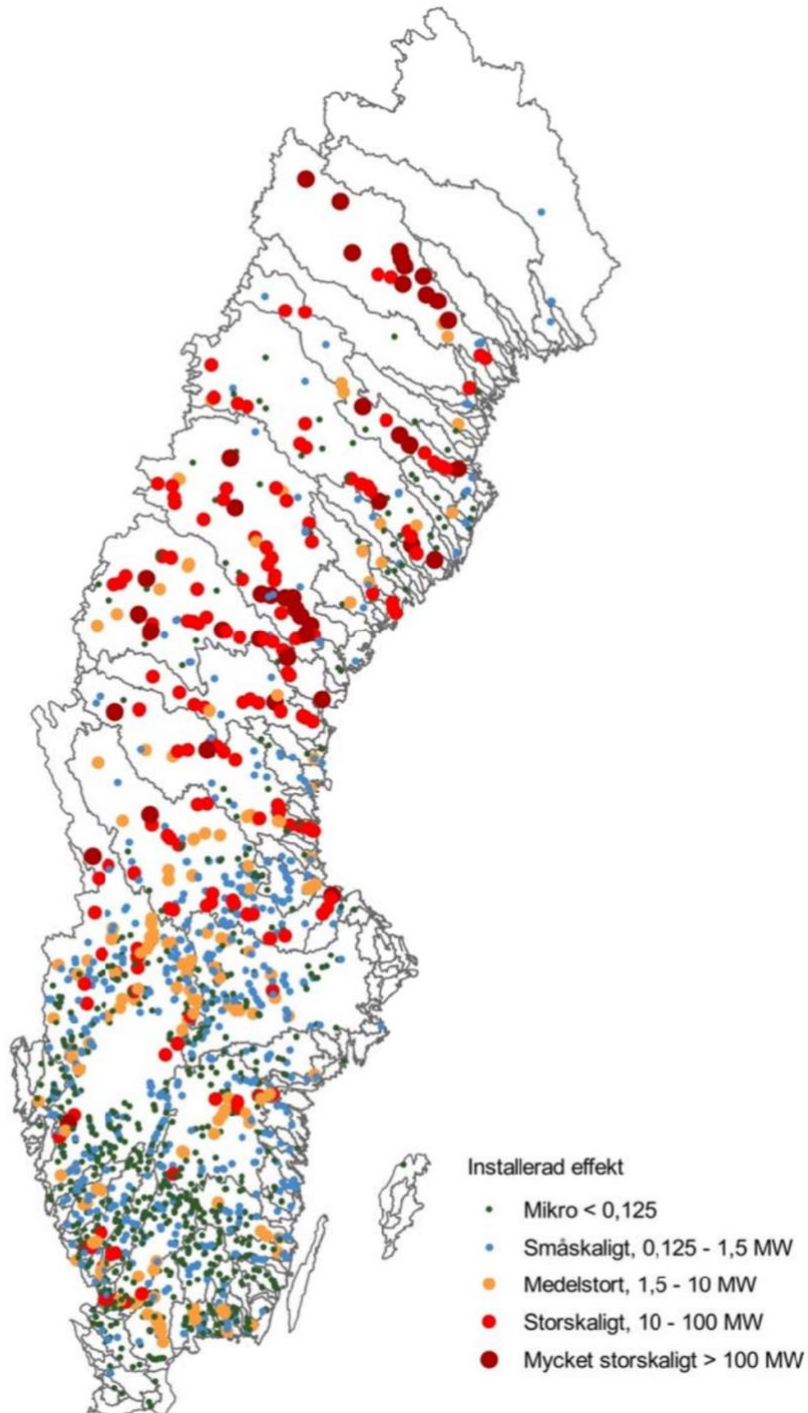
3 Vattenkraften och vattenmiljön

I detta avsnitt ges en beskrivning av den svenska vattenkraften samt dess inverkan på vattenmiljön.

3.1 VATTENKRAFTEN SOM KRAFTKÄLLA

Det finns betydande skillnader mellan olika typer av vattenkraftverk vad gäller utformning. Reglerkraftverk kallas de vattenkraftverk som har tillgång till magasin, antingen i direkt anslutning till kraftverket eller längre uppströms, och som därmed kan anpassa produktionen av el efter behov. De kraftverk som saknar magasin och istället nyttjar uppströms inkommande tillrinning kallas strömkraftverk. Om ingen uppströms magasinering finns, styrs produktionen av det naturligt varierande flödet i vattendraget.

Totalt finns det omkring 2 100 vattenkraftverk i Sverige varav den största andelen utgörs av små verk i de södra delarna av landet. Vattenkraftens totala installerade effekt uppgår till ca 16,4 GW varav knappt ca 13,7 GW brukar ses som en övre gräns för vad som kan betraktas som samtidigt tillgänglig effekt och som beror av, bland annat, momentan vattentillgång vid samtliga anläggningar. De stora vattenkraftverken ligger huvudsakligen i norra Sverige och utgör ca 98 % av den installerade kapaciteten och står för ca 80–90 % av den totala elproduktionen från vattenkraft och vilka även utgör merparten av de s.k. reglerkraftverken. Figur 2 visar en karta över Sveriges vattenkraftverk utifrån storlek och placering. Som framgår ligger de största kraftverken i den norra delen av landet, medan merparten av de små och medelstora kraftverken ligger i södra Sverige.

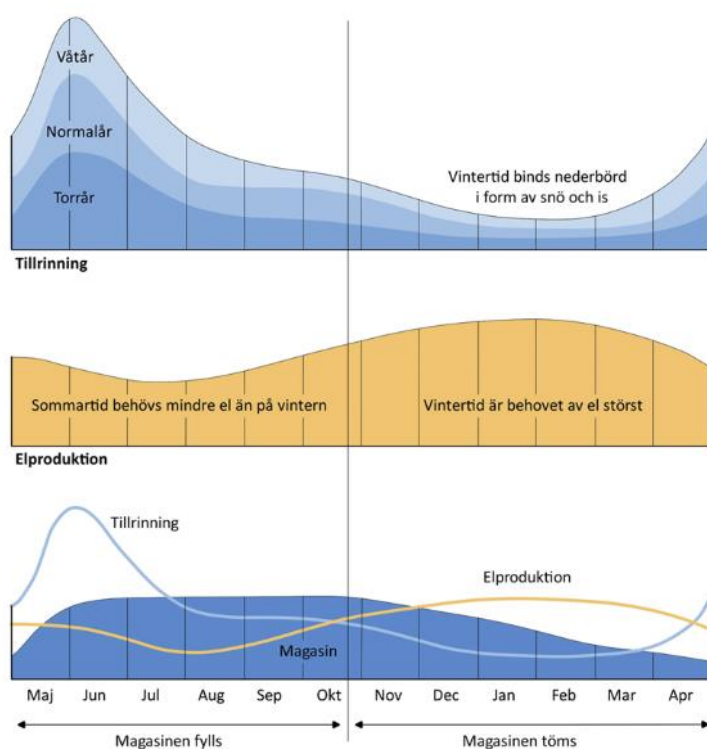


Figur 2 Vattenkraftverken i Sverige. Källa: Energimyndigheten (2014).

3.2 VATTENHUSHÅLLNING

Årsenergin från vattenkraften kommer från tillrinningen. Hur stor del av denna tillrinning som kan nyttjas beror i huvudsak på storleken på vårfloden (i volym och/eller tidsmässig topp) i förhållande till volymen på tillgängliga magasin, fördelningen av nederbörd över året samt förmågan hos enskilda vattendrags naturliga eller förändrade förmåga att hantera flöden. Genom att lagra vatten i stora vattenmagasin kan vattnets lägesenergi sparas över tid, upp till säsongsskala (i vissa fall flerårsskala). Totalt uppgår lagringskapaciteten i de nordiska vattenmagasinen till en vattenmängd som motsvarar drygt 120 TWh potentiell elproduktion, varav ca 33 TWh lagringskapacitet finns i Sverige.

Figur 3 visar en översiktlig bild av de grundläggande principerna för vattenhushållningen av tillrinningen och hur vattnet används för vattenkraftsproduktion av el.



Figur 3 Översiktlig bild över de grundläggande principerna för vattenhushållningen av tillrinningen och hur vattnet används för produktion av vattenkraftsel. Bild från Vattenregleringsföretagens hemsida²⁰.

²⁰ <https://www.vattenreglering.se/>

Beroende på skillnader i mängden nederbörd mellan år kan elproduktionen från den svenska vattenkraften variera mellan ca 50–80 TWh per år²¹. Under 2023 låg den totala elproduktionen från vattenkraft i Sverige på ca 66 TWh, motsvarande siffra under 2022 var ca 70 TWh²². Vattenkraften står därmed för ca 40–50 % av Sveriges totala elproduktion, som för år 2023 låg på ca 163 TWh²³.

Som nämnts kan magasinerna lagra vatten för senare elproduktion, vilket i elsystemet nyttjas för alltifrån reglering inom dygnet upp till säsongreglering. I stora magasin, högt upp i älvsystemet, med stor regleringsamplitud mellan gränserna för dämning och sänkning, tappas det uppdämda vattnet för att kunna användas för produktion i nedströms liggande kraftverk under vintern, då den naturliga tillrinningen är låg. På så vis töms magasinerna av för att sedan kunna magasinera den stora tillrinning som sker under vårfloden, för att säkerställa tillgången till vatten under nästa vintersäsong. Mindre magasin, som därmed har en liten volym för reglering, finns i allmänhet i nära anslutning till de flesta (men långt ifrån alla) vattenkraftstationer. Dessa mindre magasin kan då användas för reglering på dygns- och veckobasis.

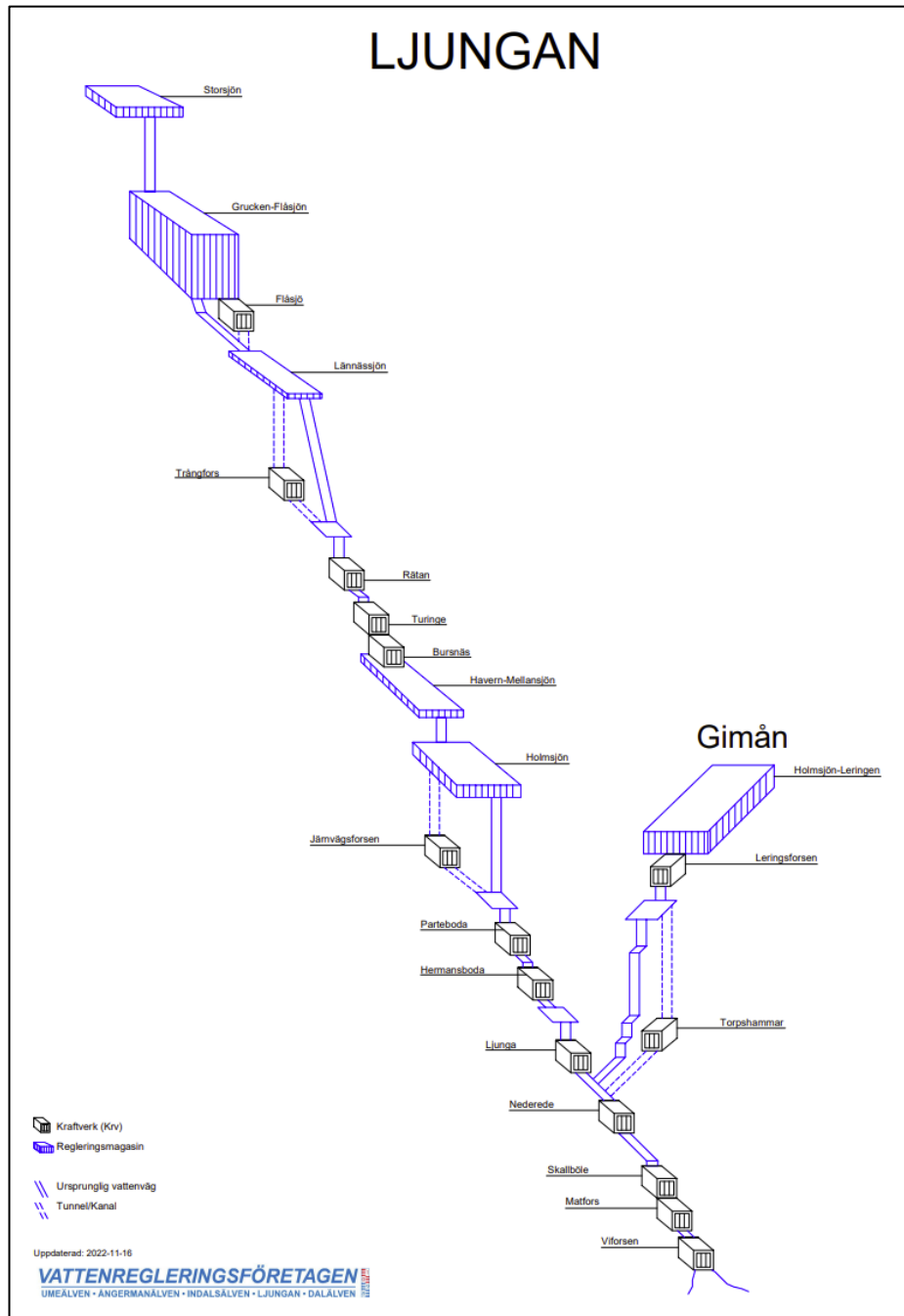
I takt med att elsystemet får en allt högre andel icke-planerbar elproduktion förändras förutsättningarna för och förväntningarna på vattenkraftens förmåga och betydelse för att kunna reglera och balansera systemet. Till följd av vindkraftens ökade andel i systemet ökar vattenkraftens betydelse framförallt på flerdygns-skalan. Som lyfts i bl.a. Nepp (2016 samt 2020) är dock den nordiska vattenkraften i grunden väl lämpad för att balansera ett elsystem med en stor andel vindkraft. Detta beror främst på de stora magasinerna högt upp i kraftverksälvarna, en viss överkapacitet i en del kraftverk samt vattenkraftens naturligt goda egenskaper att snabbt kunna ändra produktionen. Översiktligt kan en kraftverksälv beskrivas som ett system där aktörerna har för avsikt att optimera vattenanvändningen med hänsyn tagen till att tillrinningen till en anläggning påverkas av magasinering och flödesreglering i anläggningar belägna uppströms. Figur 4 visar en schematisk karta av Ljungans älvsystem med regleringsmagasin och kraftstationer. Figuren visar tydligt det fysiska systemberoendet mellan kraftverken och magasinerna i ett och samma vattendrag.

²¹ <https://www.energiforetagen.se/energifakta/elsystemet/produktion/vattenkraft/vatar-och-torror/>

²² Se SCB "Bruttoproduktion, GWh efter elområde, kraftslag och år"

https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START__EN__EN0105__EN0105A/AnlInstEffBrPr od/table/tableViewLayout1/

²³ Minskad elanvändning och elproduktion under 2023



Figur 4 En schematisk karta över Ljungan med dess kraftverk och regleringsmagasin. Karta hämta från Vattenregleringsföretagens hemsida²⁴.

²⁴ https://www.vattenreglering.se/wp-content/uploads/2024/10/LVF_schematisk_bild.pdf

Eftersom de svenska vattenkraftverken ingår i samreglerade system, med starka hydrologiska kopplingar mellan vattenkraftstationerna beror möjligheterna till reglering dels på den tekniska utformningen på vattenkraftverken, dels vilka tillstånd som finns för att höja och sänka vattenytorna i magasinerna och flödena i en älv. För att kunna reglera i en kraftstation behöver man, av förklarliga skäl, ta hänsyn till förhållandena i uppströms och nedströms liggande stationer, med beaktande av vattnets gångtid mellan stationerna.

Vattnet som rinner till ett magasin omfattar turbintappning och spill genom utskov från uppströms liggande kraftverk, samt den totala tillrinningen i området²⁵. Vattnet som rinner ut ur magasinet omfattar tappning och spill i det tillhörande kraftverket.

Lagringskapaciteten i stora och små regleringsmagasin spelar en viktig roll för vattenkraftens förmåga att kunna producera el när det är som mest eftertraktat i elsystemet. Det handlar alltså inte bara om att producera el (kWh) utan också om att producera el vid *rätt tillfälle*.

3.3 VATTENKRAFTENS REGLERFÖRMÅGA

Vattenkraften har genom sin möjlighet att lagra energi en särskilt god förmåga att bidra till att balansera elsystemet på olika tidskalor om resursen används klokt. Som nämns ovan är total väntad normal årlig tillrinning, och elproduktionspotential, ca 65–66 TWh per år och installerad effekt 16,4 (13,7) GW²⁶ vilket ger 4 400 fullasttimmar²⁷ per år, som är ett mått på nyttjandegraden av den installerade effekten, dvs hur många timmar på installerad effekt krävs för att producera årsproduktionen. Bidraget från vattenkraft är en betydande andel av såväl kraftsystemets totala årliga omsättning som installerade effekt. Fördelning av resursen görs enligt maximerat värde för resursägaren, vilket i sig även bör spegla maximerad nytta för systemet, d.v.s. elproduktion i vattenkraften bör i möjligaste mån förläggas till timmar då andra och dyrare resurser annars måste producera. Alltså bör en vattenkraftsägare, på grund av lagringsförmågan av vatten, beakta det alternativvärde som produktion vid ett senare tillfälle **eventuellt** kan medföra och prissätta sin resurs därefter, d.v.s. vattenkraften bör inte producera så fort elen kan säljas för mer än rörliga kostnader, såsom är fallet för annan planerbar kraftproduktion utan värderas baserat på vilken teknik som annars måste stå för

²⁵ Begreppet tappning inkluderar allt vatten som passerar anläggningen, d.v.s. både genom turbin och genom utskov. Spill syftar endast på utskovstappningen.

²⁶ Som beskrivs i avsnitt 3.2 är 16,4 GW den totala installerade kapaciteten hos den svenska vattenkraften varav ca 13,7 GW anses som en övre gräns för vad som kan betraktas som samtidigt tillgänglig effekt.

²⁷ Av totalt 8 760 timmar på ett år.

densamma, vilket i vardagligt tal brukar benämnas "vattenvärde". Vid en oklok fördelning av resursen kan alltså kraftsystemet stå inför lägen då det är låg tillgång på vattenkraft, vilket kan ge ett stort kostnadspåslag för elproduktionen eller i sämsta fall avsaknad av viktiga förmågor.

Reglerförmåga avser ett kraftverks möjligheter att producera el då den behövs som mest. Vattenkraften har en unik förmåga att bidra till att upprätthålla balansen mellan produktion och elförbrukning på alla tidsskalor från den kontinuerliga balansen (svängmassa och primärreglering) till säsons- och årsreglering samt även bidra med vissa förmågor som behövs för både leverans- och driftsäkerhet inom kraftsystemet. Detta beror på att många enskilda vattenkraftsturbiner kan regleras snabbt och att de stora vattenmagasinen kan lagra mycket stora volymer energi.²⁸ Vattenkraften har därför hittills stått för den största delen av reglerförmågan i det nordiska elsystemet.

Att förse vattenkraften med moderna miljövillkor kan komma att minska möjligheterna att styra vattenkraftsproduktionen och kommer därför att påverka vattenkraftens reglerförmåga. Den minskade reglerförmågan och dess konsekvenser för elsystemet måste förstas vägas mot miljövärdet av miljöåtgärder och därför efterfrågas ofta ett mått på reglerförmågan. Dock saknas det en vedertagen vetenskaplig definition av reglerförmåga. Eftersom vattenkraftverk ingår i ett system, där åtgärder i ett kraftverk även kan påverka övriga kraftverk i samma vattendrag är det också svårt att sätta ett mått på reglerförmågan i ett enskilt kraftverk. Ett sätt att beskriva enskilda kraftverks bidrag till att öka eller minska effektbidraget beroende på variationerna i efterfrågan på el och på variationen i elproduktion från andra delar av systemet ges genom begreppet *reglerbidrag* (reglerförmågan avser därmed det *maximala reglerbidraget*). Det *relativa reglerbidraget* är en metod för att utvärdera reglerbidraget och är ett mått som beskriver hur elproduktionen i ett eller flera kraftverk följer residuallasten, d.v.s. nettoanvändningen av el (Lönnberg & Bladh, 2016).

För att visa på olika vattenkraftverks betydelse för kraftsystemet vad gäller dess förmåga att balansera elsystemet har man delat in verken i tre olika *reglerklasser* (Energimyndigheten, Svenska kraftnät och Havs- och vattenmyndigheten, 2016). Klass 1 omfattar ca 255 kraftverk²⁹ som står för det högsta reglerbidraget sett till

²⁸ Vattenkraftens totala lagringskapacitet är omkring 81 TWh i Norge, 34 TWh i Sverige och 5 TWh i Finland, d.v.s. totalt ungefär 120 TWh. Detta kan jämföras med att elförbrukningen i Norden (exklusive Island) uppgick till 373 TWh 2023. Källa: Energy Statistics Data Browser, IEA [www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser]

²⁹ De 658 vatten som klassats som KMV på grund av vattenkraft i Sverige (se avsnitt 2.2) påverkas av sammanlagt 247 stycken vattenkraftkraftverk och dammar, varav 179 tillhör Klass 1-verk (av totalt 255 kraftverk). Således finns det 79 Klass 1-verk som klassas som s.k. naturliga vatten, där God Ekologisk Status (GES) krävs.

vattenkraftens totala reglerkraft. Klass 2 omfattar ca 78 verk, och klass 3 omfattar övriga ca 1 700 anläggningar som tillsammans står för ett väldigt litet reglerbidrag.

3.4 EN GOD VATTENMILJÖ – BETYDELSEN AV LEVANDE VATTENDRAG

Älvar och vattendrag innehåller betydande ekologiska värden och rymmer en hög artmångfald i förhållande till sin areal, och har stor betydelse för vandrande fiskarter. De flesta fiskarter vandrar i olika grad, för att föröka sig men också för att hitta mat och skydd. Vissa fiskarter, exempelvis laxfiskar, kan vandra många hundratals kilometer för att leka. Även vissa musslor, som t.ex. flodpärlmusslan, är beroende av vandrande värd fiskar för att fullfölja sin livscykel (se t.ex. Lundberg & Bergengren, 2008). Flödande vatten är vidare viktigt för materialtransport och för strömfårornas form (*hydromorfologin*) (Palmer m.fl., 2014). Biodiversiteten i vattendragen är ofta knuten till strömsträckor, vilket är en bristvara i reglerade älvar. Strömsträckor innehåller ofta en rik smådjursfauna och är därför en viktig uppväxtmiljö för många fiskarter (Liliegren m.fl., 1996). Möjligheten för olika organismer att röra sig uppströms och nedströms i vattendrag kan beskrivas med begreppet *konnektivitet* och är en helt avgörande faktor för ekologin i strömmande vatten (Jansson, 2006)³⁰.

Även om 70 % av jordens yta består av vatten så utgörs endast ca 2–3 % av sötvatten. Av all världens sötvatten finns merparten lagrat i polarområden och glaciärer och som grundvatten, resten som ytvatten. En försvinnande liten andel av ytvattnet återfinns i vattendrag (se t.ex. USGS, 1993). Samtidigt är rinnande vatten globalt hotade och den biologiska mångfalden minskar snabbare än på land och i havet (se t.ex. Tickner m.fl., 2020). Sedan 1970-talet har tre fjärdedelar av världens vandrande fiskar försvunnit och i Europa har nedgången varit ännu större (WWF, 2021). Denna nedgång beror till största delen på att konnektiviteten har försämrats och att livsmiljöer förstörts (se t.ex. Deinet m.fl., 2020). I den senaste rapporteringen till EU av bevarandestatus i Sverige (2019) bedöms 9 av 11 fiskarter som omfattas av art- och habitatdirektivet påverkas negativt eller mycket negativt av vandringshinder (Naturvårdsverket, 2020). Vidare innebär förändrade vattenflöden och materialtransport förändringar i livsmiljöer som i många fall påverkar ekosystemen negativt.

Vattenkraftverk har en negativ påverkan på vattenmiljön och djur- och växtarter (Näslund m.fl., 2013; Fjeldstad m.fl., 2018; Svenska kraftnät, 2023a). Generellt är fragmentering av vattendrag på grund av vattenreglering en av huvudorsakerna till att sötvattenfiskar har minskat i antal och spridning (se t.ex. Hart & Poff, 2002;

³⁰ Enligt Länsstyrelsernas databas VISS (*Vatteninformationssystem Sverige*) avser konnektivitet möjligheten till spridning och fria passager för djur, växter, sediment och organiskt material i uppströms och nedströms riktning.

Fahrig, 2003; Nilsson m.fl., 2005; Poulet, 2007; Fjeldstad m.fl., 2018). Hela två tredjedelar av de svenska vattendragen uppnår inte god ekologisk status, främst på grund av negativ påverkan av vattenreglering framför allt från vattenkraft (Havs- och vattenmyndigheten, 2022).

Vattenkraftverk utgör fysiska barriärer och vandringshinder i vattendragen som innebär förändrade flöden och att konnektivitet och nedströms transport av material begränsas (Näslund m.fl., 2013). I de fall där vatten leds in till vattenkraftverken via en tub, tunnel eller kanal lämnas den ursprungliga älvfåran helt eller delvis utan vatten och en torrfåra bildas. I Sverige finns närmare 1 000 mer eller mindre torrlagda älvfåror nedströms vattenkraft. Flertalet av dessa vattenkraftverk saknar vattendomar med villkor som ställer krav på någon form av minimitappning (Widén m.fl., 2022).

Antalet dammar i Sverige uppgår till omkring 15 000, varav omkring 2 100 är kopplade till vattenkraftverk. Flera tusen av dessa dammar saknar tillstånd enligt miljöbalken, och en stor andel av dessa utgör vandringshinder som begränsar vattendragens konnektivitet (Havs- och vattenmyndigheten, 2021). Många av vattenkraftsdammarna är samtidigt värdefulla kulturmiljöer som behöver bevaras och värnas.

Behovet av åtgärder för att förbättra konnektiviteten är alltså stort generellt, och i ännu högre grad i vattendrag som påverkas av vattenkraft.

Vattenkraften innebär vidare ofta en omfördelning av vattenflödet mellan årstider, särskilt i norra Sverige. Eftersom elbehovet tenderar att vara större under vintern lagras vatten i magasin under sommarhalvåret för att sedan utnyttjas vintertid och för korttidsreglering. Detta innebär att vattenföringen blir onaturligt hög under vinterhalvåret och lägre än vad som är naturligt under vårfloden. Därmed missgynnas strandvegetation och bottenstrukturer som är anpassade till de naturliga cyklerna, exempelvis svämskogar och strandängar (se t.ex. Malm Renöfält m.fl., 2010; Malm Renöfält & Ahonen, 2013). Sötvattenstränder hyser betydande artrikedomar (se t.ex. Bjelke & Sundberg, 2014), till stor del på grund av de naturliga variationerna i vattenflöden under året. Korttidsreglering av vattenflöden sker också för att utjämna variationer i elproduktion, och detta har ökat under senare år i takt med en större andel vindkraft i elsystemet och förväntas öka ännu mer i framtiden. Korttidsreglering har negativa effekter på ekosystemen i rinnande vatten eftersom snabba och kraftiga vattenståndsvariationer är svåra att hantera för många organismer (se t.ex. Bakken m.fl., 2012; Kling, 2015; Widén m.fl., 2023). Korttidsreglering bidrar även till ökad erosion (se t.ex. Kling, 2015).

Vattenkraftens miljöpåverkan sker dessutom i ett sammanhang där ekosystemen samtidigt utsätts för kumulativ påverkan av flera andra miljöhot. Tidigare fysisk

påverkan från rätningar³¹, sjösänkningar, fördämningar och flottledsrensningar har storskaligt förändrat landskapet och därmed den fysiska miljön i sjöar och vattendrag. Vidare finns påverkan från övergödning, försurning och miljögifter i olika grad i de flesta svenska vattendrag. Klimatförändringar innebär en direkt påverkan på hydrologin men bidrar även till förändrad vattenkvalitet, inte minst förhöjda vattentemperaturer, och till att förstärka problem med invasiva främmande arter (Jansson m.fl., 2015; Havs- och vattenmyndigheten, 2022)³².

Regleringens påverkan på vattendragets hydrologi är generellt lägre för den småskaliga vattenkraften på grund av den stora andelen strömkraftverk, även om korttidsreglering förekommer. I kvalitetsfaktorn ekologisk status bedöms förutom konnektivitet även ett antal andra kvalitetsfaktorer såsom avvikelser i volym/vattenstånd, hydrologisk regim och fisk. Som helhet uppnår omkring 20 % av vattenförekomster där det förekommer strömkraftverk god ekologisk status, medan mindre än 10 % av vattenförekomster där det förekommer reglerkraftverk uppnår god status (Lindblom & Holmgren, 2016). Fiskpassager saknas i stort sett helt vid de ca 400 största vattenkraftverken i Sverige.

3.5 BETYDELSEN AV ÅTGÄRDER FÖR BÄTTRE EKOLOGISK STATUS

Miljömålet *Levande sjöar och vattendrag* gäller sedan 1999 som ett av Sveriges miljökvalitetsmål, och innebär bland annat att sjöar och vattendrag ska vara ekologiskt hållbara och att deras variationsrika livsmiljöer ska bevaras. Målet anger vidare att vattendrag bör ha naturliga vattenflöden och strukturer som ger möjlighet till livsmiljöer och spridningsvägar för vilda växt- och djurarter som en del i en grön infrastruktur. Naturlig produktionsförmåga, biologisk mångfald, kulturmiljövärden samt landskapets ekologiska och vattenhushållande funktion ska bevaras, samtidigt som förutsättningar för friluftsliv värnas.

Miljökvalitetsmålen är inte juridiskt bindande men som tidigare nämnts finns det ett flertal EU-direktiv som berör miljön i rinnande vatten, bland annat Art- och habitatdirektivet och Ramdirektivet för vatten ("vattendirektivet") – i svensk lagstiftning infört genom Artskyddsförordningen (1999) och Vattenförvaltningsförordningen (2004). Artskyddsförordningen innebär bland annat att viktiga arter knutna till strömmande vatten som flodpärlmussla, lax och havsnejonöga ska skyddas liksom deras livsmiljöer. Sverige har även ställt sig bakom EU:s biodiversitetsstrategi, och år 2024 antog EU en ny lag om

³¹ Rätningar av vattendrag har historiskt främst gjorts för att underlätta flottning av timmer.

³² Risken för spridning av invasiva arter i älvsystem och vattendrag är samtidigt viktig att ha i åtanke när man överväger miljöanpassningskrav i syfte att öka konnektiviteten (Lindblom & Holmgren, 2016), eftersom det innebär en risk för att en förmodad miljöförbättringsåtgärd kan leda till icke-önskvärda konsekvenser för vattenmiljön.

naturrestaurering som bland annat innebär att medlemsländerna måste återställa minst 25 000 km vattendrag till fritt flödande vattendrag senast 2030.

Den viktigaste drivkraften för åtgärder i vattendragen är emellertid för närvarande omprövningarna för moderna miljövillkor. Implementeringen av miljöanpassningsåtgärder förväntas leda till viktiga förbättringar i vattenmiljön och ha positiva effekter på den biologiska mångfalden. Den nationella omprövningen för att förse vattenkraften med moderna miljövillkor förväntas också bidra till att nå miljö kvalitetsmålet *Levande sjöar och vattendrag* (Havs- och vattenmyndigheten, 2023b). Även om inte alla vattenförekomster kan förbättras, kan strategiska åtgärder bidra med positiva effekter för vattenmiljön. Enligt Widén m.fl. (2017) skulle åtgärder för ekologisk reglering kunna genomföras med liten produktionsförlust om de beaktas på avrinningsområdesnivå. Ett kontinuerligt flöde är utmärkande för naturliga akvatiska ekosystem och landekosystem i anslutning till vattendrag. Viktigt bedöms därför också vara att så långt möjligt bevara ett kontinuerligt flöde nedströms anläggningarna (d.v.s. genom minimitappning)³³.

Olika typer av vattenkraftverk har olika påverkan på miljön. Små strömkraftverk har ofta liten reglering och kan återfå konnektiviteten med effektiva faunapassager (Lindblom & Holmgren, 2016). I de fall där utrivning av dammar genomförs kan detta återskapa strömsträckor och minska vandringshinder, vilket kan ha en betydande positiv påverkan på den biologiska mångfalden i vattenmiljön och omkringliggande ekosystem (se t.ex. Bilton m.fl., 2001; Näslund m.fl., 2013; Malm Renöfält & Ahonen, 2013; McKie m.fl., 2018; Turgeon m.fl., 2019; Sandin m.fl., 2020).

För att fatta beslut om nödvändiga åtgärder behövs vägledning kring minimitappning och referensförhållanden³⁴, samt hur biologiska och hydromorfologiska kvalitetsfaktorer ska sammanvägas vid normsättningen. Ett

³³ Men som framgår i bl.a. Malm Renöfält m.fl. (2015) så finns det dock en del osäkerheter i forskningslitteraturen vad gäller reella effekter av flödesreduktioner (och därmed effekterna av minimitappning).

³⁴ När det gäller bedömningar av en vattenförekomsts ekologiska status så görs dessa genom att jämföra dagens tillstånd med ett *teoretiskt* referenstillstånd. Enligt Ramdirektivet för vatten ska referensförhållandet motsvara ett *"(nearly) undisturbed state"*, ett stabilt/statiskt tillstånd där mänsklig aktivitet har haft obefintlig eller mycket liten påverkan på ekosystemet. Direktivet anger således att medlemsländerna ska identifiera vad som utmärker en vattenförekomst med ingen eller endast mindre påverkan från mänskliga aktiviteter (*"no or only minor alterations"*). Sverige har gjort sin tolkning av hur begreppet referenstillstånd ska tolkas. Här kan det vara värt att lyfta det faktum att ekosystem till sin natur inte är statiska utan fluktuerar över tid, och det går inte heller att säga vilket ekosystem som är *"mest optimalt"*, eftersom det beror på vilket perspektiv man utgår ifrån. Att avgöra vilket tillstånd av ett ekosystem som ska anges som referenstillstånd är därför en bedömningsfråga och en mycket komplex sådan.

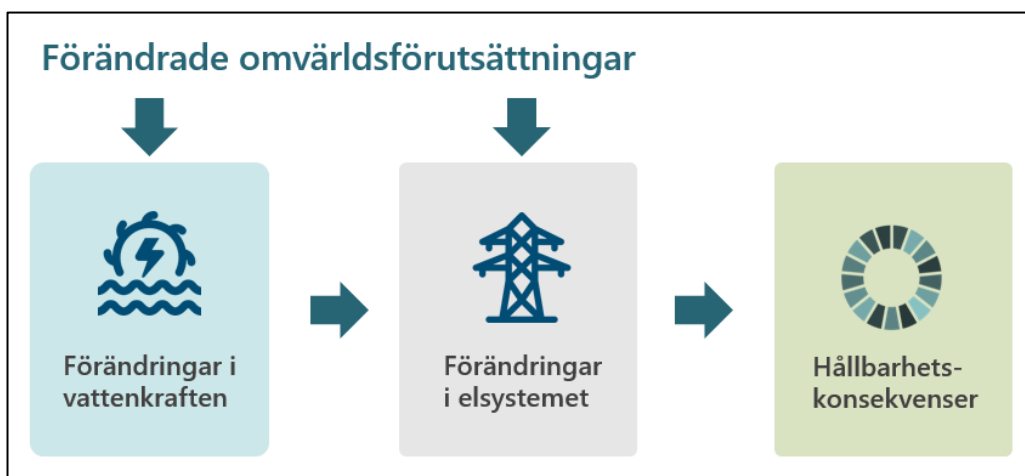
vanligt schablonvärde för minimitappning är 5 % av medelvattenföringen, men detta har av vissa bedömare ifrågasatts gällande dess biologiska förankring (Degerman & Näslund, 2021). Vidare behövs klarhet om vilka åtgärder som krävs för att uppnå god ekologisk status eller potential, samt för att tillgodose särskilda mål inom Natura 2000-områden. Det efterfrågas också vägledning för att bedöma om dessa åtgärder innebär orimliga kostnader och om det finns skäl för undantag (Havs- och vattenmyndigheten, 2023a; Svenska kraftnät, 2023a).

4 Analyserna inom Håven: en övergripande sammanfattning av vad som har analyserats

I detta kapitel ges en översiktlig beskrivning av vad som har analyserats inom projektet. I bilaga 1 och 2 finns en mer detaljerad beskrivning av den metodik och de modellverktyg som har använts inom projektet.

Som nämns inledningsvis har projektets övergripande frågeställningar handlat om att analysera hur förändrade omvärldsförutsättningar, dels i form av bland annat ett ökat elbehov, en mer variabel elproduktion och klimatförändringen, dels i form av krav på miljöanpassningsåtgärder i vattenkraften som leder till förändringar för vattenkraftens förmågor och roll i elsystemet. Analyserna har vidare haft som mål att visa på de alternativa tekniker som kan ersätta eventuella förluster av vattenkraftens förmågor och vilka hållbarhetskONSEKVENSER detta i förlängningen leder till.

Förenklat kan man därför beskriva projektet i tre delar, se Figur 5.



Figur 5 Projektets tre övergripande analysdelar.

4.1 VATTENFÖRVALTNINGSCYKEL 2.5 – PROJEKTETS ANALYSERADE MILJÖÅTGÄRDSSCENARIO

Det saknas en nationell sammanställning över vilka miljöanpassningsåtgärder som bedöms bli aktuella vid enskilda kraftverk. Vilka åtgärder som i slutänden kommer att genomföras i de enskilda fallen beror på specifika faktorer som t.ex.

gällande miljö kvalitetsnorm, eventuella bevarandemål och på vad domstolarna beslutar i de enskilda prövningarna.

Då projektet inleddes var tanken och förhoppningen att kunna studera det faktiska utfallet av miljövillkor och miljöanpassningsåtgärder i de första omprövningarna. På grund av att NAP-processen pausades strax efter det att projektet startade under hösten 2022 har forskargruppen istället fått nöja sig med att analysera ett (fiktivt) scenario med miljöanpassningsåtgärder som valdes ut i samråd med referensgruppen. Det scenario som valdes benämns Vattenförvaltningscykel 2.5 (VFC 2.5). Scenariot har analyserats av Svenska kraftnät i en rapport till regeringen under 2023 (Svenska kraftnät, 2023a)³⁵ och åtgärderna som ingår i detta scenario finns beskrivna i förslaget från 2018 till nya miljö kvalitetsnormer för vattenförekomster som är förklarade som *kraftigt modifierade vatten* (KMV) på grund av vattenkraft³⁶. Vattenförvaltningen bedrivs i ett cykliskt arbete, med en ny cykel vart sjätte år. Enligt uppgift kommer (det inofficiella) namnet VFC 2.5 sig av att förslagen till miljö kvalitetsnormerna togs fram i ett regeringsuppdrag mellan två ordinarie vattenförvaltningscykler.

Översiktligt omfattar det analyserade miljöåtgärdsscenarioet åtgärder som berör kvalitetsfaktorerna *hydrologisk regim* (vattenflöde och förändringar i vattenstånd) respektive *konnektivitet* (möjlighet till fri passage för fauna och flora uppströms/nedströms i ett vattendrag).

Mycket viktigt för förståelsen av de resultat som redogörs för i denna rapport är det faktum att det analyserade miljöåtgärdsscenarioet endast ska ses som ett *scenario* och *ingen prognos*. Det analyserade miljöåtgärdsscenarioet ska därför inte tolkas som ett scenario med åtgärder som förväntas bli utfallet av omprövningarna.

I scenariot berörs endast 44 av de 333 storskaliga³⁷ kraftverken av dessa miljöåtgärder (se bilaga 1 för en lista över de kraftverk som omfattas). Totalt står dessa 44 kraftverk för en sammanlagd installerad effekt på ungefär 3,3 GW av totalt 16,4 GW installerad effekt nationellt³⁸. Miljöanpassningsscenarioet saknar

³⁵ Motsvarar alternativ D "Uppskattat miljöanpassningsbehov enligt vattenförvaltningscykel 2.5" i Svenska kraftnät (2023a), se sidan 86 i <https://www.svk.se/siteassets/om-oss/rapporter/2023/slutrapport-20230926-nap-vattenkraft.pdf>

³⁶ <https://www.vattenmyndigheterna.se/tjanster/publikationer/2018/samrad-om-miljokvalitetsnormer-for-kraftigt-modifierade-vattenforekomster---vattenkraft.html>, bilaga 1
<https://www.vattenmyndigheterna.se/download/18.6ce5045216a58f96d2f83b8/1557146244713/Bilaga%201%20Metoder.pdf>

³⁷ Kraftverk i reglerbidragsklass 1 och 2.

³⁸ Varav knappt ca 13,7 GW brukar ses som en övre gräns för vad som kan betraktas som samtidigt tillgänglig effekt,

därmed produktions- och reglerpåverkande miljöåtgärder i övriga 289 storskaliga vattenkraftverk.

Forskargruppen har fått dataunderlaget för scenariot från Svenska kraftnät som i sin tur har fått underlaget från de länsstyrelser som utgör vattenmyndigheterna.

Miljöåtgärdsscenarioet *Vattenförvaltningscykel 2.5* inkluderar:

- **Minimitappning³⁹ under hela året**
 - Innebär i stor utsträckning minimitappning genom turbin på 5 % av medelvattenföring. Flera kraftverk är dock undantagna.
 - Åtgärden kan leda till att man tvingar fram elproduktion även under perioder då elen inte efterfrågas. Om denna åtgärd införs på kraftverk som idag inte har denna typ av vattendom kan det också innebära konsekvenser i form av minskad reglerförmåga.
- **Minimispill under hela året**
 - Omfattar generell minimitappning genom naturfåra (5 % av medelvattenföring). Flera kraftverk är dock undantagna.
 - Åtgärden leder till en produktionsförlust och, i de fall det finns uppströmsliggande magasinskapacitet, minskad reglerförmåga.
- **Minimispill endast april–oktober**
 - Omfattar fiskväg inklusive locktappning (5 % av medelvattenföring samt 5 m³/s om 5 % av medelvattenföring > 5 m³/s). Flera kraftverk är dock undantagna.
 - Åtgärden innebär en produktionsförlust och minskad reglerförmåga för det fall det finns uppströmsliggande magasinskapacitet.

Det är alltså viktigt för förståelsen av resultatet att det valda miljöåtgärdsscenarioet endast omfattar åtgärder i 44 av de stora kraftverken. Det omfattar inga småskaliga vattenkraftverk och inte heller områden med särskilda krav p.g.a. Natura 2000-lagstiftning. Vidare saknas åtgärder av typen miljöanpassad reglering (förutom inom ramen för minimitappningen i de 44 kraftverken), eller åtgärder som innebär begränsningar i korttidsreglering eller flödesparametrar som vattenstånd, begränsad förändringshastighet eller specifik flödesenergi. Scenariot omfattar inte

³⁹ Minimitappning avser den minsta mängd vatten som måste tappas vid ett vattenkraftverk. Vatten kan släppas antingen genom (tappas) eller förbi en turbin (spills).

heller utrivning av magasin, något som skulle kunna innebära stor påverkan på produktions- och reglerförmåga.

För mer om de detaljerade data som har använts för analyserna, se bilaga 1 till denna rapport.

I Svenska kraftnäts rapport (Svenska kraftnät, 2023a) analyseras även hur vattenkraften påverkas av alternativa miljöåtgärdsscenarioer (alternativ A–C), där vattenkraften i praktiken styrs efter ett "naturligt flöde". Detta alternativ har inte modellerats explicit i den detaljerade vattenkraftsmodellen, men i bilaga 1 görs en känslighetsanalys av hur energisystemet påverkas om förmågan att lagra vatten begränsas.

Observera att vi har valt att inte göra något försök att sätta ett värde på vattenkraftens reglerförmåga, utan i stället studerar vi hur hela systemet påverkas av miljöåtgärder, d.v.s. vilka extra investeringar i annan reglerförmåga och förändrade körmönster man får till följd av olika åtgärder och omvärldsscenarioer.

4.2 ANALYSERADE ENERGISYSTEMSCENARIER

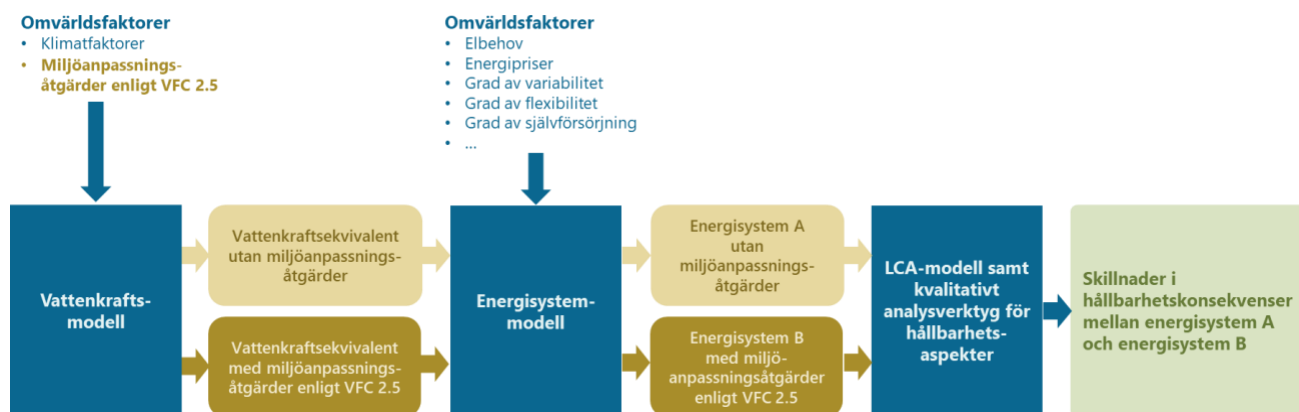
För utvärderingen av vattenkraftens roll, vad gäller elproduktion och reglerförmåga, samt hur denna påverkas av det valda miljöåtgärdsscenariot har fyra olika framtida energisystemscenariier modellerats inom projektet som samtliga innebär en kraftig elektrifiering av samhället men med mer eller mindre av olika produktionstekniker. Scenarierna är därmed valda för att spegla ett utfallsrum som kan skapa olika förutsättningar för vattenkraften och/eller alternativ reglerbar kraftteknik. De fyra energisystemscenarierna är:

- **Scenario "Kostnadsoptimalt"**: Energisystemmodellens resultat visar på det system som, utifrån antagande om kostnader för kraftteknik och väderförutsättningar, möter väntad efterfrågan på el till lägsta total systemkostnaden. Således är fördelning av kraftproduktionsteknik och dess roller i systemet ett direkt modellresultat med mål om så låg kostnad som möjligt. Vissa restriktioner finns exempelvis för vindkraft för att spegla svårigheter kring acceptans för landbaserad vindkraft (se bilaga x för mer detaljer).
- **Scenario "Vind"**: I detta scenario antas befintlig kärnkraft ha passerat åldersstrecket. Istället antas (tvingas in i modellen) en utbyggnad om 22 GW havsvind motsvarande det tidigare planeringsmålet om 120 TWh per år.

- **Scenario "Kärnkraft"**: I detta scenario sker livstidsförlängning av befintlig kärnkraft samt nybyggnad av 9 GW kärnkraft (tvingas in i modellen) för att illustrera nuvarande regerings planer på kärnkraftsutbyggnad.
- **Scenario "Vind utan flex"**: I detta scenario saknas möjlighet till investeringar i vätgas- och värmelager (utelämnas som investeringsalternativ i modellen).

4.3 ÖVERSIKTLIGT OM METODIKEN SOM HAR ANVÄNTS

I Figur 6 beskrivs arbetsgången i analyserna. Miljöanpassningsåtgärderna som föreslås i VFC 2.5 implementerades i forskargruppens vattenkraftsmodell och två olika vattenkraftsekvivalenter – en referensekvivalent (utan miljöanpassningsåtgärder implementerade) och en ekvivalent med miljöanpassningsåtgärder enligt VFC 2.5 (se ovan vad som ingår) togs fram och skickades vidare till forskargruppens energisystemmodell.



Figur 6 En schematisk översikt av projektets analyser.

Resultaten från de olika energisystemscenarierna med och utan miljöanpassningsåtgärder enligt VFC 2.5 har sedan analyserats med hjälp av dels LCA-verktyg, dels ett kvalitativt hållbarhetsverktyg (som beskrivs vidare i bilaga 2). Målet har varit att på så sätt kunna bedöma hållbarhetskonsekvenserna av en förlust av vattenkraftsproduktion på grund av implementering av miljöanpassningsåtgärder enligt VFC 2.5 och vad det innebär i form av t.ex. utsläpp av koldioxid, markanvändning och användning av metaller när vattenkraftens roll tas över av alternativa tekniker (som ges av modelleringarna av de olika framtidssystemen i energisystemmodellen).

5 Analyserna inom Håven: en övergripande sammanfattning av resultat och slutsatser

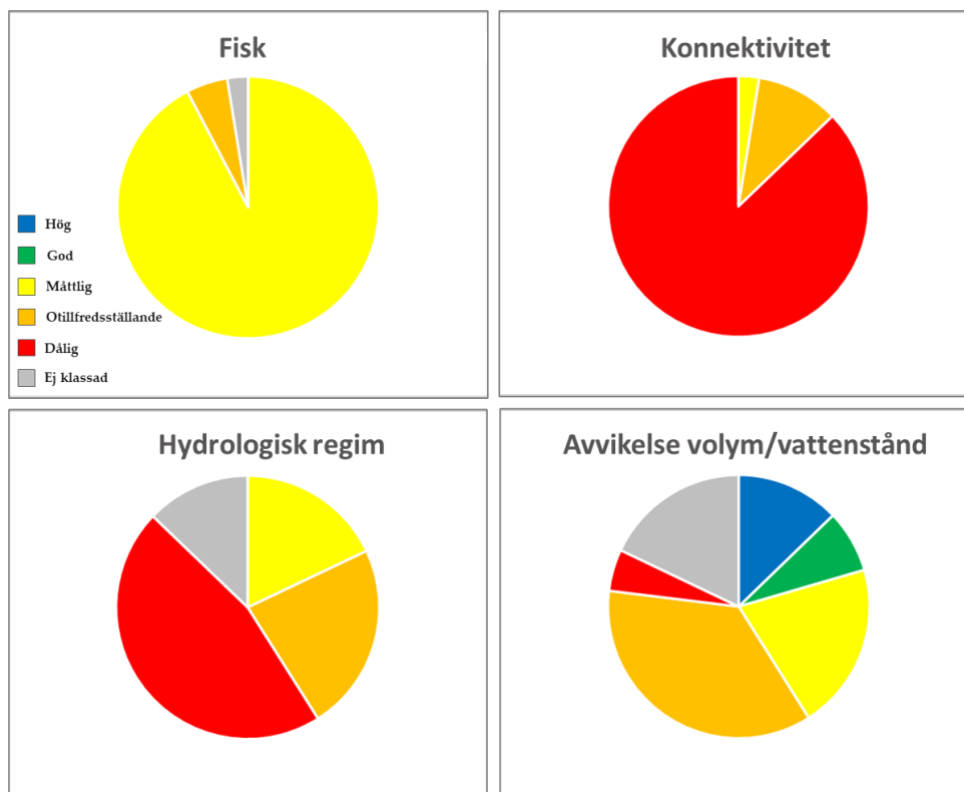
I detta kapitel sammanfattas projektets övergripande resultat och slutsatser. I bilaga 1 och 2 finns en mer detaljerad beskrivning av resultaten och slutsatserna i sin helhet samt metodik och modellverktyg som använts inom projektet.

5.1 KONSEKVENSERNA FÖR VATTENMILJÖN AV OLIKA MILJÖANPASSNINGSÅTGÄRDER ENLIGT VFC 2.5

Här beskrivs de möjliga konsekvenserna för vattenmiljön av de miljöanpassningsåtgärder som föreslås enligt VFC 2.5. Att göra en bedömning av utfallet av VFC 2.5 på vattenmiljön i de älvar som ingår i miljöåtgärdsscenarioet är dock inte möjlig utan en ingående platsanalys av vattenmiljöstatusen i de enskilda vattenförekomsterna. Detta har inte varit möjligt inom ramen för föreliggande projekt.

Som konstateras av Svenska kraftnät (2023a) saknas det en sammanställning på nationell nivå över vilka miljöanpassningar som myndigheterna bedömer behöver genomföras vid enskilda anläggningar med avseende på att uppfylla miljö kvalitetsnormer. Därtill ska också alla undantag som är möjliga att använda för att beakta vattenkraftens förmågor tillämpas vilket innebär att de fördjupade normöversynerna framöver bättre behöver beakta påverkan på vattenkraftens förmågor. Som nämns ovan har projektet analyserat ett scenario med föreslagna miljöanpassningsåtgärder i enlighet med *Vattenförvaltningscykel 2.5* (se vidare under kapitel 4.1). I detta kapitel ger vi en översiktlig beskrivning av de analyserade miljöanpassningsåtgärderna som ingår i VFC 2.5-scenarioet. Vilka åtgärder som genomförs kan i slutänden skilja sig mycket eller lite ifrån detta scenario.

I figur 7 visas en genomgång av 39 utvalda vattenförekomster uppströms och nedströms kraftverk i Luleälven, Skellefteälven, Ljungan samt Åtran där åtgärder föreslås enligt scenarioet VFC 2.5. Flertalet av dessa vattenförekomster definieras som kraftigt modifierade vatten, men även i den minoritet (7 st) som klassas som naturliga, gäller att en mycket liten del av vattenförekomsterna uppnår högre än måttlig status. Genom att implementera föreslagna åtgärder skulle förbättringar i ekologisk status respektive ekologisk potential kunna uppnås, i synnerhet beträffande konnektivitet.



Figur 7 Stickprov för status på olika kvalitetsfaktorer i 39 utvalda vattenförekomster uppströms och nedströms kraftverk i Luleälven, Skellefteälven, Ljungan samt Ätran där åtgärder föreslås enligt scenariot Vattenförvaltningscykel 2.5, d.v.s. det miljöåtgärdsscenario som har studerats i detta projekt.

5.1.1 Faunapassage

Konnektivitet är en hydromorfologisk kvalitetsfaktor som ska beaktas vid uppfyllande av MKN⁴⁰. Begreppet konnektivitet avser möjligheten till spridning och fria passager för djur, växter, sediment, organiskt material och näringsämnen i ett ekosystem. Faunapassage används här som ett samlingsnamn för åtgärder som syftar till att möjliggöra upp- och nedströmspassage av vattenlevande organismer förbi ett hinder utan att riva ut dammen. Åtgärdstypen inkluderar bland annat naturliknande fiskvägar och tekniska fiskvägar.^{41, 42} Faunapassager framhålls

⁴⁰ De intervjuer som har gjorts inom AP2 i projektet indikerar att det finns motstridiga uppfattningar huruvida vattendirektivet ställer ett generellt krav på någon form av ekologiskt kontinuum eller inte.

⁴¹ Vattenmyndigheterna (2020). *Vattenmyndigheternas riktlinjer för vattenkraft. Åtgärder och undantag*.

⁴² Degerman & Näslund (2021).

allmänt som den vanligaste miljöförbättrande åtgärden (Havs- och vattenmyndigheten, 2021).

Ur ett ekologiskt perspektiv är det rimligt att undantag bör göras för de fall där dammarna har anlagts över naturliga vandringshinder, eftersom det då aldrig skett någon uppströmspassage. Även då anläggandet av en faunapassage blir orimligt kostsam eller tekniskt komplicerad bör rimlighetsavvägningen enligt 2 kap. 7 § miljöbalken innebära att undantag kan vara aktuella. Det gäller främst stora och därmed nyare kraftverk.

Ur ett miljöperspektiv innebär en ändamålsenligt utformad faunapassage att vattenlevande organismer, material och rörelseenergi kan passera mer eller mindre obehindrat förbi vattenkraftverket. Faunapassager minskar därmed habitatfragmentering och ökar tillgången till livsmiljöer uppströms och nedströms (Fjeldstad m.fl., 2018; Havs- och vattenmyndigheten, 2022; Hedelin m.fl., 2023). Åtgärden bedöms därför leda till en ökad överlevnad och reproduktion (Widén m.fl., 2017) vilket i sin tur bidrar till ökad genetisk diversitet inom och mellan populationer (Strömberg m.fl., 2015)⁴³. Konnektivitet är särskilt viktigt för arter som lax och öring som behöver vandra för att reproducera sig (Havs- och vattenmyndigheten, 2021). Det bedöms vara *tekniskt* möjligt att bygga väl fungerande fiskvägar för samtliga förekommande fiskarter i alla svenska vattensystem (Calles m.fl., 2013).

För att faunapassagen ska vara funktionell krävs att ett tillräckligt stort vattenflöde leds genom den. En faunapassage måste med andra ord alltid kombineras med krav på minimitappning (spill) bredvid turbinen. Detta flöde går därmed förlorat för elproduktion. Hur stort flödet behöver vara beror på flera olika faktorer, bland annat fallhöjd, basflöde i nedströms vattendrag och vilka ekologiska effekter som ska uppnås. En sammanställning av internationella rekommendationer visar att 2–10 % av det totala flödet bör användas för att säkerställa nedströmspassage, med 5 % av medelvattenföringen som ett grovt riktmärke (Calles m.fl., 2013). Mindre vattendrag verkar kräva en högre andel av flödet än större vattendrag.

5.1.2 Minimitappning

Med minimitappning avses den minsta mängd vatten som måste tappas vid ett vattenkraftverk. Vattnet kan antingen släppas genom turbin eller direkt till en naturfåra. I vissa sammanhang syftar tappning enbart på vatten genom turbin.

⁴³ I Havs- och vattenmyndighetens "Vägledning för fisk- och faunapassager" framgår svårigheterna att följa upp effekterna av fisk- och faunapassager. Det är därför viktigt att kunskapsläget ökar. <https://www.havochvatten.se/arbete-i-vatten-och-energiproduktion/vattenkraftverk-och-dammar/miljo-och-skyddsatgarder/vagledning-for-fisk-och-faunapassager.html>. Se även Silva m.fl., (2018).

Vatten förbi turbin kallas då för spill. I det här avsnittet använder vi emellertid tappning för båda typerna.

Ett vattendrags hydrologiska regim, det vill säga vattenflöden, vattenstånd och variationer inom och mellan år, är en viktig förutsättning för att skapa lämpliga miljöer för olika arter och har avgörande betydelse för ett vattendrags ekologiska status (Poff m.fl., 1997; Puckridge m.fl., 1998; Degerman & Näslund, 2021; Widén m.fl., 2021a; Widén m.fl., 2021b). Traditionellt har reglerkraftverk haft en mycket stor påverkan på den hydrologiska regimen. Ur ett elsystemperspektiv är en av vattenkraftens stora fördelar att det är möjligt att lagra vatten från perioder med låg efterfrågan på el till perioder med stor efterfrågan på el, vilket inte alls behöver överensstämma med när det naturligt flödar lite eller mycket vatten. Snabba och kraftiga förändringar av vattenstånd i vattenmagasinet, så kallad korttidsreglering, kan öka erosion och i extrema fall leda till att fiskar strandar och dör (se t.ex. Bakken m.fl., 2012; Malm Renöfält & Ahonen, 2013; Kling, 2015; Widén m.fl., 2023).

Genom en ökad minimitappning kan livsmiljöer nedströms dammen stärkas och reducera påverkan uppströms. Åtgärden kan bidra till mer naturtrogna habitat som kan minska störningsstress för akvatiska organismer och i förlängningen en förväntad förbättrad tillväxt och reproduktion i sötvatten. Alla dessa effekter bidrar i sin tur direkt eller indirekt positivt till den biologiska mångfalden.

För att vinna fallhöjd och därmed öka produktionen leds vattnet i många fall betydande sträckor genom tunnlar eller tuber från vattenmagasinet till turbinen. Därmed återförs det inte till vattendraget direkt nedanför dammen, utan ibland flera kilometer längre ned. För att undvika att fåran mellan damm och turbinmynningen torrläggs krävs ett minimiflöde direkt till naturfåran. Ytterligare en aspekt att beakta är torrfårans längd. Återigen beror valet av åtgärd på de platsspecifika förutsättningarna och vilka värden som är mest angelägna att stärka eller återskapa. Som lyfts av Widén m.fl. (2022) behövs mer kunskap om sambanden mellan vattenflöde och naturvärden⁴⁴. Det finns observationer av att det kan räcka med ganska lite vatten för att få en fiskfauna som är knuten till strömmande vatten snarare än ett stillastående vatten. Vill man däremot uppnå till exempel svämplan nedströms krävs större flöden.

Hur stor minimitappning som krävs kan skilja från fall till fall. Enligt 31 kap. 22 § miljöbalken ska en tillståndshavare tåla en förlust av *”högst en femtedel och lägst en tjugondel av produktionsvärdet av den vattenkraft som enligt meddelat tillstånd kan tas ut vid kraftverket”*. Produktionsvärdet tolkas ofta som vattenföring. Det framstår som att det är den lägre delen av intervallet, 5 % av totalflödet, som hittills har använts i

⁴⁴ Malm Renöfält & Ahonen (2013) konstaterar t.ex. att *”olika flöden utför olika tjänster för ekosystemen, vilket i sin tur påverkar de ekosystemtjänster som vattendraget bidrar med till människan”*.

de fall det alls finns villkor på minimitappning (Widén m.fl., 2022). I samtal med vattenkraftsintressenter har det också framförts att det generellt spills minst 5 % av flödet även vid de kraftverk som idag saknar krav på minimitappning⁴⁵. Nivån 5 % har däremot ingen biologisk förankring (Degerman & Näslund, 2021), och som nämnts ovan lyfter Widén m.fl. (2022) att mer kunskap behövs om vilka flöden som har störst effekter för olika arter och den totala biologiska mångfalden.

Krav på minimitappning leder till stabilare vattennivåer och förbättrar vattenkvaliteten genom att säkerställa kontinuerligt flöde och förhindra stagnation. Detta gynnar särskilt fisk (Havs- och vattenmyndigheten, 2021). Ett kontinuerligt flöde hjälper också till att minska ackumuleringen av näringsämnen och föroreningar (Degerman & Näslund, 2021; Hedelin m.fl., 2023).

Faunapassager (se avsnitt 5.1.1) behandlas som en separat åtgärd ovan. I praktiken bidrar de ändå till en minimitappning där vatten leds bredvid turbin och damm. Beroende på fallhöjd och faunapassagens utformning kan den mynna direkt nedanför dammen och därmed addera till en minimitappning till naturfåran. I sådana fall kan vattnet bidra både till ekologisk konnektivitet och motverka torrfåror. Ofta anläggs faunapassagen emellertid parallellt med den naturliga fåran, antingen på grund av topografin eller av andra skäl. Då krävs det att vatten leds både till faunapassagen och direkt till naturfåran för att uppnå samma miljönytta. Den samlade produktionsförlusten blir då större. Om den förlusten skulle anses vara för stor kommer i stället de båda åtgärderna att behöva ställas mot varandra för att avgöra på vilket sätt det begränsade vattenflödet kan göra störst miljönytta. Men, återigen beror valet av åtgärd på de platsspecifika förutsättningarna och vilka värden som är mest angelägna att stärka eller återskapa.

5.2 KONSEKVENSER FÖR VATTENKRAFTEN AV MILJÖANPASSNINGSÅTGÄRDER ENLIGT VFC 2.5

Syftet med denna del av projektet har varit att analysera inverkan på vattenkraften av de miljöanpassningsåtgärder som föreslagits av Vattenmyndigheterna i VFC 2.5, d.v.s. hur vattenkraftens reglerförmåga och elproduktion förändras. För en detaljerad beskrivning av modellverktyg och analysresultat om elsystemet, se bilaga 1.

I det här projektet har vi som nämnts ovan endast simulerat miljöåtgärder i form av minimitappning och minimispill i enlighet med VFC 2.5. Det bör dock

⁴⁵ I de fall det påståendet stämmer skulle ett villkor om minimitappning inte behöva medföra motsvarande förlust av elproduktion. Dock är det osäkert om detta avser 5 % av medelvattenföring (MQ) på årsbasis eller om det handlar om kontinuerligt spill.

framhållas att vilka åtgärder som kommer genomföras beror av vilka miljövillkor som i slutändan fastställs av miljödomstolarna. Det är också viktigt att beakta att VFC 2.5 endast omfattar åtgärder för en mindre andel av alla de storskaliga vattenkraftverken och utan några särskilda miljöanpassningar för Natura 2000-områden. VFC 2.5 bör med andra ord beaktas som ett scenario med relativt måttliga krav på miljöanpassningar av vattenkraften. Det är troligt att det i domstolsprövningarna kommer att framföras krav på mer ingripande miljöanpassningar, t.ex. i form av begränsningar av magasin snivåändringar och flödesändringar. Det finns ett stort behov av att fortsätta det arbete som genomförts inom detta projekt och även simulera mer "utmanande" scenarier för vattenkraften.

Enligt analyserna leder införda åtgärder enligt VFC 2.5 (krav på minimitappning, och minimispill inkl. faunapassage) till en förlust i vattenkraftens elproduktion på ungefär 1 TWh. Resultaten från modellprocessen, som inkluderar såväl en detaljerad vattenkraftsmodell (KTH) som en övergripande elsystemmodell (Chalmers), visar inte på någon större förändring av de resulterande ekvivalenterna som erhålls från den detaljerade vattenkraftsmodellen när hänsyn tas till miljöanpassningsåtgärder enligt VFC 2.5, vilket är en indikation på att modellresultaten av dessa miljöåtgärder inte påvisar någon större inverkan på vattenkraftens reglerförmåga. Resultaten ligger i linje med slutsatserna från tidigare studier (t.ex. Bladh & Funkquist, 2021; Bladh m.fl., 2023; Sandkvist & Malaussène, 2023; Jaldegren, 2023; Ali & Alvarado, 2024). Det är dock viktigt att notera att konsekvenserna av krav på minimitappning och minimispill varierar för olika kraftverk, för olika tillrinningsscenarier och för olika tidshorisonter. Den generella bilden som framträder i dessa studier är emellertid att vattenkraftssystemen i de studerade älvarna har en god förmåga att styra elproduktionen till de timmar då vattenkraften behövs som mest, även med antagande om miljöanpassad vattenkraft enligt VFC 2.5. Detta innebär att de produktionsminskningar som blir resultatet av krav på minimispill framför allt styrs till perioder med lägre elpriser. De vattenflöden som uppstår i älvarna till följd av (relativt) måttliga nivåer på minimispill och minimitappning förefaller inte utgöra någon större inskränkning i vattenkraftens reglerförmåga⁴⁶; antingen kan vattnet tas emot och lagras i magasin nedströms eller så har nedströms liggande kraftverk egna krav på minimispill eller minimitappning av samma storleksordning, vilket innebär att vattnet strömmar vidare.

Det är viktigt att notera att krav på minimispill oundvikligen resulterar i minskad elproduktion i de berörda kraftverken. Ju mer omfattande krav på minimispill som

⁴⁶ Dock är det viktigt att påpeka att nivån 5 % av medelvattenföring (MQ) eller medellågwaterföring (MLQ) kan addera upp till relativt höga spillvolymer. 5 % av MQ i Ljungan motsvarar exempelvis ca 300 GWh.

införs, desto större blir naturligtvis den förlorade vattenkraftsproduktionen. Moderna miljövillkor kan också komma att innefatta begränsningar av vilka vattennivåer man får ha i magasinen under olika tider på året samt begränsningar av hur snabbt vattennivån får ändras. Sådana begränsningar kommer förmodligen ha en betydligt större inverkan på vattenkraftens reglerförmåga. I t.ex. ett fall då det införs krav på ett mer eller mindre konstant flöde på en älvsträcka mellan två kraftverk så måste kraftverket uppströms antingen spilla eller hålla en konstant elproduktion under motsvarande tidsperiod. Beroende på magasinstorleken i det nedströms liggande magasinet kan då även detta kraftverk tvingas producera på en mer eller mindre konstant nivå. Under dessa omständigheter har kraftverken i praktiken mycket lite reglerförmåga kvar. I ett sådant fall skulle vattenkraften förlora en del av sin centrala roll som reglerkraft.

5.3 KONSEKVENSER FÖR ELSYSTEMET AV MILJÖANPASSNINGÅTGÄRDER ENLIGT VFC 2.5

Syftet med denna del av projektet har varit att analysera förändringarna som uppstår i det nordeuropeiska elsystemet till följd av förlust av vattenkraftsproduktion på grund av att man inför miljöanpassningsåtgärder enligt VFC 2.5 i olika energisystemscenarier, samt hur detta påverkar vattenkraftens roll. För en detaljerad beskrivning av modellverktyg och analysresultat om elsystemet, se bilaga 1.

Som nämnts ovan leder miljöåtgärder enligt VFC 2.5 i de 44 kraftverken som omfattas till en minskad vattenkraftproduktion om ca 1 TWh/år, som i de studerade energisystemscenarierna energimässigt ersätts med landbaserad vindkraft i Sverige eller omgivande länder. Dock kompenseras den förlorade flexibiliteten från vattenkraften dels av ytterligare investeringar i teknik som kan bidra med flexibilitet, exempelvis batterier, dels ökat nyttjande av användarflexibilitet. Båda dessa typer av åtgärder beaktas i miljöbedömningen (se vidare kapitel 5.4 samt bilaga 2).

Vattenkraftsproduktionsmönstret är genomgående ganska likt för alla de undersökta scenarierna, även om det finns en tendens till mer frekvent drift under perioder på 12–15 timmar för kärnkraftsscenarioet och mindre frekventa 1-timmeselement för scenarioet med vind utan flex. Anledningen till att det är liten skillnad för vattenkraftsdriften mellan de undersökta scenarierna är att den totala elproduktionsmixen för norra Europa är ganska likartad för alla scenarier.

Projektets analyser visar att trenden med en svagare korrelation mellan vattenkraftproduktion och variationer i intradagsbelastningen fortsätter och förstärks i de framtida energisystem som modelleras, vilket tyder på att

vattenkraften i större utsträckning kompletterar vindkraften snarare än att balansera efterfrågan.

Känslighetsanalyserna visar att om vattenkraftens lagringskapacitet begränsas så skulle det i första hand minska vattenkraftens förmåga att hantera variationer med riktigt lång uthållighet, så som mellan sommar och vinter och mellan år. Variationerna mellan sommar och vinter förväntas minska i takt med en fortsatt klimatförändring, vilket skulle innebära ett lägre elbehov vintertid för uppvärmning samtidigt som mer nederbörd faller som regn under höst och tidig vinter och därmed kan nyttjas för vattenkraftproduktion samma vinter. En ökad andel vindkraft i elsystemet innebär också en ökad tillgång på elproduktion vintertid eftersom vindkraften producerar mer el på vintern i norra Europa. Tillgången på vindkraft varierar dock, precis som vattenkraften, mellan år, och även om det inte finns någon tydlig korrelation mellan år med låg vindkraftsproduktion och tillrinning i norra Europa så finns ett fortsatt behov av hantering av mellanårsvariabilitet där vattenkraften är svår att ersätta. Det finns därför ett behov av att studera vattenkraftens roll över ett stort antal väderår för att bättre ansätta vattenkraftens värde när det gäller hantering av mellanårsvariabilitet samt vilka alternativ som finns för att hantera detta i elsystemet. Modellen som används för beräkningarna i detta projekt har perfekt information om tillrinning för de två studerade väderåren (*“perfect foresight”*), vilket innebär en överskattning av vattenkraftens förmåga att hantera variationer mellan år. En konsekvens av mindre lagervolymer bör därför också studeras med en beräkningsmodell där tillgången på information om framtida tillrinning begränsas.

Vid mycket omfattande begränsningar av vattenkraftens lagringskapacitet ökar också mängden vatten som måste spillas och årsproduktionen från vattenkraften minskar. För att bättre kunna ansätta vid vilken nivå på lagringsbegränsning det inträffar behövs fortsatta studier där lagernivåerna begränsas i detaljerade vattenkraftsmodeller för att generera nya ekvivalenter som kan användas för analys på energisystemnivå.

Avseende systemtjänster, vilket är ett vitt begrepp som inbegriper ett flertal vitala förmågor för ett fungerande kraftsystem (ex. stödtjänster och olika typer av reserver), så modelleras och analyseras detta ej explicit i de utförda analyserna⁴⁷ och det bör noteras att vattenkraften historiskt har haft en mycket framträdande och viktig roll i att bidra till dessa förmågor det svenska kraftsystemet. Dock pekar resultaten på en tydligt förändrad roll för vattenkraften i de analyserade

⁴⁷ Bilaga 1 inkluderar dock en känslighetsanalys av konsekvenser av att ta hänsyn till uppreglning för balansering av vindkraft. Uppreglering syftar till att tillgängliggöra effekt som kan täcka upp för oförutsedda produktions- eller transmissionsbortfall (N-1) och variationer från efterfrågan på el, vind- och solkraft inom timmen.

scenarierna, där framförallt andra tekniker, som t.ex. värmepumpar, elbilar och batterier finns på plats och kan bidra med systemtjänster i framtiden, medan vattenkraftens fulla produktionspotential används för att hantera variationer på dagen före-marknaden och intradagmarknaden. Vattenkraften, vars andel i framtidens elsystem förväntas minska, uppvisar i modellanalyserna ett förändrat produktionsmönster där produktionen förskjuts mer mot max- och minimigränserna.

Vattenkraft bidrar med alla förmågor som ett drift- och leveranssäkert elsystem behöver. För att bedöma vad som behöver ersätta minskad produktion från vattenkraft behövs en analys av påverkan på alla vattenkraftens bidrag till elsystemet. Frekvens- och spänningsstabilitet samt elberedskapsförmågor omfattas inte av det här projektet, dock behövs en analys av påverkan även på dessa förmågor till följd av behovet av miljöåtgärder för att göra det möjligt till att göra korrekta avvägningar för att nå största möjliga vattenmiljönytta och en nationell effektiv tillgång till vattenkraftsel.

5.4 HÅLLBARHETSKONSEKVENSER AV MILJÖANPASSNINGSGÅRDER ENLIGT VFC 2.5

Denna del av projektet har haft som mål att bedöma hållbarhetskonsekvenser av förändringar i det nordeuropeiska elsystemet orsakad av begränsad vattenkraftsproduktion och andra framtida förändringar i elsystemet, såsom ökat elbehov. I detta syfte har ett screeningverktyg i kombination med fördjupade analyser inklusive livscykelanalys för ett antal alternativ använts. För en detaljerad beskrivning av metodiken och analysresultaten, se bilaga 2.

För att få en helhetssyn på de möjliga hållbarhetskonsekvenserna av miljöanpassningsåtgärder i vattenkraften har FN:s 17 hållbarhetsmål (och i viss mån miljö kvalitetsmålen) valts som ramverk för analyserna⁴⁸.

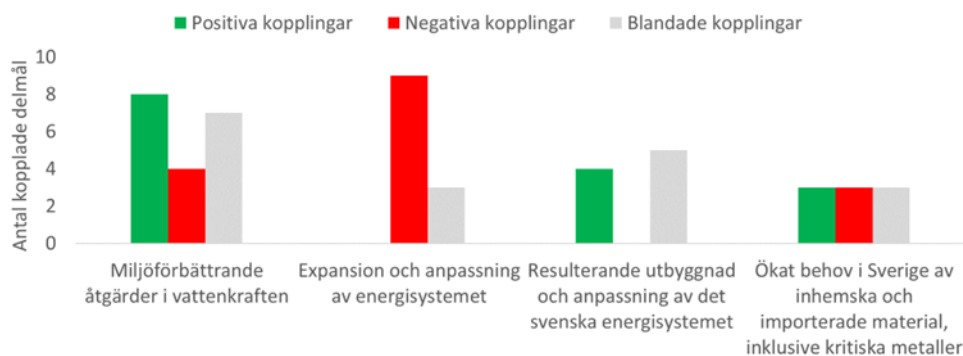
En inledande screening indikerade att ett antal globala hållbarhetsmål kan komma att påverkas av miljöanpassningsåtgärder enligt VFC 2.5 i svensk vattenkraft⁴⁹. En sammanfattning av i vilken utsträckning de bedöms orsaka positiv, negativ eller blandad (både positiv och negativ) påverkan på de olika delmålen inom FN:s hållbarhetsramverk presenteras i Figur 8.

En stor del av påverkan kan förväntas gälla mål 6 *Rent vatten och sanitet*⁵⁰ samt mål 15 *Ekosystem och biologisk mångfald*. Bedömningen är att de föreslagna åtgärderna kan få en huvudsakligen direkt positiv påverkan på de akvatiska ekosystemen men blandade effekter på övriga hållbarhetsmål. Den förstnämnda effekten är naturligtvis väntad och helt i linje med syftet med miljöåtgärderna. Utmaningen är i stället att på något sätt värdera de övriga effekterna och väga de positiva mot de negativa.

⁴⁸ Fördelarna med dessa mål är bland annat att de har hög policyrelevans och täcker en bredd av sociala, ekonomiska och miljömässiga hållbarhetsaspekter. Det finns dock även nackdelar med detta ramverk. Exempelvis är klimatmålet mycket begränsat och omfattar främst anpassning till klimatförändringar och i mindre utsträckning behovet av minskade utsläpp. I projektet fångar vi upp klimatpåverkan på annat sätt, dels genom de kvantitativa beräkningarna, dels genom ett kvalitativt resonemang.

⁴⁹ Beskrivet i form av ett antal kategorier av kopplingar mellan dessa miljöåtgärder och deras konsekvenser, se bilaga 2.

⁵⁰ Den starkaste positiva kopplingen bedöms finnas till delmålet 6.3 *Förbättra vattenkvaliteten och avloppsrening samt öka återanvändning*, för vilken andelen vattenförekomster med god yt- och grundvattenstatus utgör en indikator, och delmål 6.6 *Skydda och återställ vattenrelaterade ekosystem*, som bland annat har antalet åtgärdade vandringshinder som en indikator.



Figur 8 Sammanfattning av de identifierade kopplingarna mellan miljöanpassningsåtgärderna enligt VFC 2.5 och FN:s globala hållbarhetsmål. Staplarnas höjd anger hur många delmål som bedöms påverkas direkt eller indirekt av åtgärderna och färgen anger om påverkan underlättar (positiv koppling) eller försvårar (negativ koppling) uppfyllandet av delmålet.

Miljöåtgärderna leder förvisso till följdinvesteringar i ny elproduktion och flexibilitetsåtgärder som innebär en belastning på mark- och resursanvändning, som i sin tur kan ge utsläpp av växthusgaser och kemikalier. En viktig del i hållbarhetsanalysen har varit att undersöka betydelsen av dessa földeffekter, särskilt aspekter som kopplar till den gröna omställningen – klimatpåverkan, behovet av kritiska metaller för energi och elektrifiering, ökad markanvändning och markomvandling. De senare aspekterna tenderar att försvåra klimatomställningen genom målkonflikter om vilken mark och vilka resurser som tas i anspråk och det är därför angeläget att beakta sådana effekter i olika energiscenarier. Genom hållbarhetsanalysen har vi också detekterat möjlig påverkan på exempelvis arbetsvillkor i andra länder (vilket vi bedömt som små och osäkra effekter), samt på det svenska elsystemet (vilket har hanterats i andra analyser i projektet och som beskrivs i andra delar av denna rapport).

Bland de viktigaste slutsatserna är att konsekvenserna på klimatpåverkan från elsystemet till följd av de antagna begränsningarna i svensk vattenkraft (VFC 2.5-åtgärderna) är relativt små. Energisystemmodellerna visar även att investeringarna i annan elproduktion fram till 2045 endast påverkas marginellt av en förlust i svensk vattenkraftproduktion på grund av åtgärder enligt VFC 2.5.

Effekterna på markomvandling eller förändrad markanvändning påverkas mest av tillkommande investeringar i storskalig solkraft och av användningen av olika biobaserade bränslen i kraftproduktionen. För det senare gäller att ursprunget för bioråvaran kommer ha stor betydelse för den faktiska miljöpåverkan som förbrukningen ger upphov till, vilket är viktigt att beakta. Även för markomvandling/förändrad markanvändning gäller dock att påverkan från miljöåtgärder enligt VFC 2.5 i svensk vattenkraft bedöms bli liten i förhållande till

annan markanvändning, inte minst den som omställningen av energisystemet kommer kräva i stort.

När det kommer till effekterna på behovet av olika kritiska mineral så är det den enda påverkanskategori där vi ser en tydlig, och som vi anser signifikant, skillnad mellan de olika energisystemscenarierna som projektet har analyserat. För nästan alla kritiska mineral som har ingått i analyserna så ökar efterfrågan mer i scenariot där det sker en kraftig utbyggnad av havsbaserad vindkraft i Sverige. I det scenariot ökar investeringarna mer i olika flexibilitetslösningar som exempelvis elektrolysörer för vätgasproduktion, batterier med flera, vilket medför ett större behov av olika kritiska råmaterial. Här kan det dock återigen vara värt att poängtera att teknikutveckling har skett och sannolikt kommer att fortsätta att ske som innebär ett minskat, eller åtminstone förändrat, behov av kritiska material för olika tekniklösningar. Exempelvis har det på senare år utvecklats litium-jon-batterier som innehåller betydligt mindre mängder kobolt, vilket tidigare identifierades som ett problematiskt råmaterial av flera anledningar. När vi jämförde effekterna på behovet av kritiska mineral till följd av miljöåtgärderna i VFC 2.5 i svenska vattenkraft med effekterna från hela den väntade utbyggnaden i det nordeuropeiska kraftsystemet så såg vi att ökad efterfrågan till följd av miljöåtgärder enligt VFC 2.5 i svensk vattenkraft motsvarar i storleksordningen 0,01–0,1 % av den totala ökade efterfrågan.

Det finns en mängd såväl uppenbara som långsökta konsekvenser av olika typer av investeringar i energisystemet och att försöka kartlägga alla i en kvalitativ hållbarhetsanalys är en svår uppgift. Att göra en helhetsbedömning kommer i slutändan innebära subjektiva bedömningar då det är mycket svårt att objektivt väga hållbarhetsaspekter mot varandra. Oavsett detta är det angeläget att genomföra hållbarhetsanalyser för olika typer av investeringar i energisystemet och beakta dessa så tidigt som möjligt i beslutsprocesser. En kvalitativ hållbarhetsanalys kan till exempel lyfta potentiella hållbarhetsrisker som behöver utredas i mer detalj. Att holistiskt integrera hållbarhetskonsekvenser och omvärldstrender i utformningen av energiscenarier förblir en viktig och utmanande uppgift.

6 Vattenkraftens roll i det framtida elsystemet

Analyserna i HÅVEN indikerar att vattenkraften i allt större utsträckning kompletterar vindkraften snarare än att balansera efterfrågan, vilket historiskt har varit dess främsta roll. Vattenkraften kommer därför gå från att hantera lastvariationer inom dygnet till att hantera vindvariationer på tidsskalan flera dygn till vecka. Analyser av historiska data visar att den här förändringen i vattenkraftens roll redan har påbörjats i och med en ökad vindkraftsproduktion i de nordligaste svenska elområdena (SE1 och SE2), där vattenkraft nu samsas med vindkraften om överföringskapacitet till södra Sverige.

Fram till år 2019 var produktionsmönstret för vattenkraft och de sydgående transmissionsflödena starkt kopplade till intradagsvariationer i södra Sverige. Som analyserna inom projektet visar minskar dock detta mönster från och med år 2020. Den svagare kopplingen till intradagsvariationer för vattenkraft kan bland annat förklaras med utbyggnaden av vindkraft och en lägre driftsäker södergående överföringskapacitet mellan elområde SE2 och SE3.

En vattenkraftproduktion anpassad efter vindkraftens produktionsmönster kan förväntas vara det nya normala, för även om överföringskapaciteten från norra Sverige planeras att utökas så byggs samtidigt mer vindkraft i norra Europa. Analyserna visar att vindkraftens produktionsmönster därför kan förväntas ha stor påverkan på värdet av el i Sverige, oavsett elproduktionsmix inom Sverige.

På längre tidsskala minskar behovet av att hantera säsongsvariationer medan behovet att hantera mellanårsvariationer ökar. Variationerna mellan sommar och vinter förväntas minska i och med klimatförändringarna som innebär ett lägre elbehov vintertid för uppvärmning samtidigt som mer nederbörd faller som regn under höst och tidig vinter och därmed kan nyttjas för vattenkraftproduktion samma vinter. En ökad andel vindkraft i elsystemet innebär också en ökad tillgång på elproduktion vintertid eftersom vindkraften producerar mer på vintern i norra Europa. Tillgången på vindkraft varierar dock, precis som vattenkraften, mellan år, så det finns ett fortsatt behov av hantering av mellanårsvariabilitet där vattenkraften är svår att ersätta.

Det finns flera alternativ på efterfrågesidan (värmepumpar, elbilar) och i form av stationära batterier som kan bidra med systemtjänster till låg kostnad. Samtidigt förväntas vattenkraften oftare producera på maxlast eller minimilast (dellast) i framtiden, eftersom den väntas utgöra en mindre del av elsystemet samtidigt som

variationer av värdet på el förväntas vara större än idag. Det finns därmed ett stort värde att kunna nyttja vattenkraftens drift fler timmar på ytterlighetspositionerna.

Vattenkraftens variationshantering på flera dygn, mellan säsonger och mellan år är svårare och dyrare att ersätta i elsystemet än vattenkraftens variationshantering på korta tidsskalor eller produktionsförlust för enstaka TWh. Miljövillkor som tar detta i beaktan har möjlighet att förbättra den lokala miljön runt svensk vattenkraft utan att försämra elsystemets förmåga till klimatomställning.

7 Avslutande ord

Den pågående omställningen av energisystemet innebär att värdet av de roller som vattenkraften har haft historiskt och fram till idag successivt håller på att förändras. Det finns därför ett behov av att bättre förstå vattenkraftens roll i det framtida energilandskapet. När nu vattenkraften samtidigt ska förses med moderna miljövillkor innebär det att dess förmåga att bidra till dessa olika roller också kommer förändras. Det här projektet har syftat till att bidra till ökad förståelse runt båda dessa frågor.

Komplexiteten i den utmaning vi står inför vad gäller att försöka hantera och komma tillrätta med klimatförändringen och förlusten av biologisk mångfald ökar risken för att samhället allt oftare kommer tvingas att hantera ett ökande antal svårlosliga, eller i vissa fall även olösliga problem och målkonflikter. Inom forskningen brukar man tala om denna typ av problem som *"omedgängliga problem"* (från engelskans *"wicked problems"*⁵¹). Problemen kännetecknas av en hög grad av komplexitet och osäkerhet. De saknar entydiga definitioner och det finns inte heller något tydligt "rätt" eller "fel" vad gäller lösningar på problemen och inte heller några entydiga kriterier för att utvärdera hur bra de eventuella lösningarna är.

Det *"omedgängliga problem"* som detta projekt har kretsat kring handlar om hur man ska värna vattenkraftens klimatnytta som förnybar energikälla och bärare av viktiga förmågor i dagens och morgondagens elsystem samtidigt som vattenverksamheter ska hantera dagens ekosystempåverkan men också den historiska negativa påverkan som vattenkraften har haft på vattenmiljön i form av förlust av biodiversitet och akvatiska och vattennära habitat. Som konstateras i en rapport av Odell m.fl. (2022), som behandlar målkonflikten vindkraft-försvarsintressen, vilken delar många likheter med målkonflikten kring vattenkraft-vattenmiljö: *I grunden ligger en målkonflikt och att göra avvägningar i den konflikten handlar om värderingar. Frågan är därför i grunden politisk.*

Oavsett hos vem som frågan om beslut och avgörande till slut landar i denna eller andra liknande målkonflikter som uppstår när vi tvingas hantera vår tids två stora utmaningar på miljöområdet – klimatförändringen och förlusten av biologisk mångfald – så kan man konstatera att behovet av fortsatt forskning och fördjupad kunskap är av fundamental betydelse. I detta fall handlar det om vikten av att fördjupa kunskapen om vattenkraftens roll i framtiden och dess påverkan på vattenmiljön.

⁵¹ Begreppet kommer från Rittel & Webbers artikel från 1973 *"Dilemmas in a General Theory of Planning"*.

Och, det är en komplex uppgift för dem som tvingas hantera målkonflikten när den ställs på sin spets vid beslut om miljö kvalitetsnormer och domstolsbeslut i de kommande miljöprövningarna – d.v.s. när man ska försöka att väga vattenkraftens samhällsnyttor mot miljönyttan av åtgärder i vattenmiljön. Kanske kan man då ödmjukt ställa sig frågan: *Vad är det som ska bevaras, varför och för vem/vad?*

8 Referenslista

Ali, S. & Alvarado, A. (2024). Inverkan av miljövillkor på vattenkraftverkens elproduktion och reglerförmåga i Klarälven, kandidatexamensarbete, KTH Skolan för elektroteknik och datavetenskap, Stockholm 2024.

Bakken, T., Zinke, P., Melcher, A., Sundt, H., Vehanen, T. & Acreman, M. (2012). Setting environmental flows in regulated rivers. Implementing the EU Water Framework Directive (EU WFD) in Norway. Sintef, TR A7246.
<https://www.cedren.no/Portals/Cedren/TR%20A7246.pdf>

Bilton, D. T., Freeland, J. R., & Okamura, B. (2001). Dispersal in freshwater invertebrates. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 32(1), 159-181.

Bjelke, U., & Sundberg, S. (2014). Sötvattenstränder som livsmiljö - rödlistade arter, biologisk mångfald och naturvård. (Artdatabanken rapporter 15). Artdatabanken SLU.

Bladh, J. & Funkquist, J. (2021). Miljöåtgärders påverkan på vattenkraftsproduktionen i Ljungan, Vattenkraftens miljöfond, 2021.

Bladh, J., Funkquist, J. & Näsström, J. (2023). Miljöåtgärders påverkan på vattenkraftsproduktionen i Dalälven, Vattenfall Vattenkraft AB & Fortum Sverige AB, 2023.

Calles, O., Degerman, E., Wickström, H., Christiansson, J., Gustafsson, S. & Näslund, I. (2013). Anordningar för upp- och nedströmspassage av fisk vid vattenanläggningar. Underlag till vägledning om lämpliga försiktighetsmått och bästa möjliga teknik för vattenkraft. Havs- och vattenmyndighetens rapport 2013:14. ISBN 978-91-87025-39-6.

Degerman, E. & Näslund, I. (2021) Fysisk restaurering av akvatiska miljöer. Vattendrag och sjöar med kantzoner och våtmarker. GRIP on LIFE:s rapportserie 2021.03. ISBN 978-91-986871-6-3.

Deinet, S., Scott-Gatty, K., Rotton, H., et al. 2020. The Living Planet Index (LPI) for migratory freshwater fish - Technical Report. World Fish Migration Foundation, The Netherlands.

Energimyndigheten (2014). Vad avgör ett vattenkraftverks betydelse för elsystemet. Underlag till nationell strategi för åtgärder inom vattenkraften. ER 2014:12.

- Energimyndigheten, Svenska kraftnät & Havs- och vattenmyndigheten (2016). Vattenkraftens reglerbidrag och värde för elsystemet. ER 2016:11.
- Fahrig, L. (2003). Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology and Systematics* 34, 487–515. doi:10.1146/ANNUREV.ECOLSYS.34.011802.132419
- Fjeldstad, H.-P., Pulg, U., & Forseth, T. (2018). Safe two-way migration for salmonids and eel past hydropower structures in Europe: a review and recommendations for best-practice solutions. *Marine and Freshwater Research* 69(12): 1834-1847.
- Gode, J., Holm, J., Löfblad, E., Rensfeldt, A., Unger, T., Lindblom, E., Malmaeus, M. & Walter, V. (2022). Systemkonsekvenser av miljöåtgärder i vattenkraften. Lill-Håven: en förstudie om vattenkraftens framtida roll. Energiforsk rapport 2022:862.
- Hart, D. D. & Poff, N. L. (2002). A Special Section on Dam Removal and River Restoration. *Bioscience* 52(8), 653–655. doi:10.1641/0006-3568(2002)052[0653:ASSODR]2.0. CO;2
- Havs- och vattenmyndigheten (2021). Redovisning av regeringsuppdrag om kunskapsammansättning om dammar. Dnr 1-2021. 2021-09-29. <https://www.havochvatten.se/download/18.9d6062e17c13f61b9e73898/1633076455989/RU%20Kunskapsammansättning%20dammar%20slut.pdf>. Besökt 2024-07-11.
- Havs- och vattenmyndigheten (2022). Levande sjöar och vattendrag. Fördjupad utvärdering av miljö kvalitetsmålen 2023. 2022-09-30. ISBN 978-91-89329-46-1.
- Havs- och vattenmyndigheten (2023a). Regeringsuppdrag om översyn av förutsättningar för normsättning av ytvatten. Bilaga 1. Tillämpning av KVM och undantag. Dnr 2825-2022.
- Havs- och vattenmyndigheten (2023b). Uppdrag om att följa upp och analysera arbetet med att förse vattenkraften med moderna miljövillkor. Redovisning av regeringsuppdrag Dnr 2135-22. 2023-12-01. <https://www.havochvatten.se/download/18.6f2a86e218bd90826b0d7497/1701344886665/2135-22%20Slutredovisning-RU-uppfoljning-nap.pdf> Besökt 2024-07-12.
- Havs- och Vattenmyndigheten & Energimyndigheten (2014). Strategi för åtgärder i vattenkraften. Avvägning mellan energimål och miljö kvalitetsmålet Levande sjöar och vattendrag. Havs- och vattenmyndighetens rapport 2014:14.
- Hedelin, B., Alkan-Olsson, J. & Greenberg, L. (2023) Collaboration Adrift: Factors for Anchoring into Governance Systems, Distilled from a Study of Three Regulated Rivers. *Sustainability* 2023, 15, 4980. <https://doi.org/10.3390/su15064980>.

- Jaldegren, P. (2023). Inverkan av moderna miljövillkor på vattenkraftens reglerförmåga: En fallstudie av Ljungan, masterexamensarbete, KTH Skolan för elektroteknik och datavetenskap, Stockholm 2024.
- Jansson, R. (2006). The effect of dams on biodiversity. I B. Johansson, & B. Sellberg (Red.), Dams under debate Forskningsrådet Formas.
- Jansson, R., C. Nilsson, E. C. H. Keskitalo, T. Vlasova, M.-L. Sutinen, J. Moen, F. Chapin III, K. Bråthen, M. Cabeza, T. V. Callaghan, B. Van Oort, H. Dannevig, I. A. Bay-larsen, R. A. Ims, & Aspholm, P. (2015). Future changes in the supply of goods and services from natural ecosystems: prospects for the European north. *Ecology and Society* 20(3): 32.
- Klimat- och näringslivsdepartementet 2024. Bättre förutsättningar för vattenkraftens omprövning. Pro memoria KN 2024/01642. Augusti 2024. <https://www.regeringen.se/contentassets/4edca016c2d64f22bedbe07c16ba9922/pro-memoria-vattenkraft.pdf>. Besökt 2024-12-03.
- Kling, J. (2015). Miljöåtgärder i vattenkraftverk. Sammanställning av åtgärder för att nå god ekologisk status och god ekologisk potential. Havs- och Vattenmyndigheten, rapport 2015:26.
- Liliegren, Y., Lagerkvist, G., Halldén, A. & Broberg, O. (1996). Nyckelbiotoper i rinnande vatten. Ett system för identifiering av särskilt värdefulla biotoper i och i anslutning till rinnande vatten. Länsstyrelsen i Jönköpings län 1996-12-31.
- Lindblom E. & Holmgren K., 2016. Den småskaliga vattenkraftens miljöpåverkan och samhällsnytta – En syntesstudie. IVL Rapport B2258.
- Lundberg, S. & Bergengren, J. (2008). Miljöövervakningsstrategi för stormusslor. Utveckling av nationell miljöövervakning för sötvattenslevande stormusslor 2008. PM från Naturhistoriska riksmuseet, 2008:1.
- Lönnberg, J. & Bladh, J. (2016). Relative Balancing Contribution of Hydropower Plants and Rivers , revision 2. Report Number VRD-R19:2016-Rev2. Vattenfall R&D, Power Technology. 2016-01-20.
- Malm Renöfält, B., Jansson, R. & Ahonen, J. (2015). Ekologisk återställning i helt eller delvis torrlagda fåror i anslutning till vattenkraftverk. Havs- och vattenmyndigheten, 2015:22.
- Malm Renöfält, B. & Ahonen, J. (2013). Ekologiska flöden och ekologiskt anpassad vattenreglering. Underlag till vägledning om lämpliga försiktighetsmått och bästa möjliga teknik för vattenkraft. Havs- och Vattenmyndigheten rapport 2013:12.

- Malm Renöfält, B., Jansson R. & Nilsson, C. (2010). Effects of hydropower generation and opportunities for environmental flow management in Swedish riverine ecosystems. *Freshwater Biology*, 55: 49–67
- McKie, B. G., Sandin, L., Carlson, P. E., & Johnson, R. K. (2018). Species traits reveal effects of land use, season and habitat on the potential subsidy of stream invertebrates to terrestrial food webs. *Aquatic Sciences*, 80(2), 1-12.
- Naturvårdsverket (2020). Sveriges arter och naturtyper i EU:s art- och habitatdirektiv. Resultat från rapportering 2019 till EU av bevarandestatus 2013–2018.
- Nepp (2016). Fortsättning - Reglering av ett framtida svenskt kraftsystem. Bruce, J., Söder, L., Bladh, J., Unger, T., Holmer, S., Badano, A., Lönnberg, J., Göransson, L., Rydén, B., Sköldberg, H., Larsson, S. & Montin, S.
https://nepp.se/etapp1/pdf/Forts_reglering_av_ett_framtida.pdf
- Nepp (2020). Insikter och vägval i energiomställningen. Slutrapport från Nepp:s andra etapp. December 2020. https://nepp.se/pdf/Insikter_och_vagval.pdf
- Nilsson, C., Reidy, C. A., Dynesius, M., & Revenga, C. (2005). Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science* 308, 405–408. doi:10.1126/SCIENCE.1107887
- Näslund, I., Kling, J., & Bergengren, J. (2013). Vattenkraftens påverkan på akvatiska ekosystem – en litteratursammanställning. Havs- och vattenmyndighetens rapport 2013:10.
- Odell, A., Bernland, A., Eriksson, G., Grahn, P., Mårtensson, T., Norin, L., Olsén, M. & Reichel, B. (2022). Möjligheter till samexistens mellan Försvarsmaktens verksamhet och utbyggd vindkraft. FOI-R—5293—SE. ISSN 1650-1942, April 2022.
- Palmer, M.A., Hondula, K.L. & Koch, B.J. 2014. Ecological Restoration of Streams and Rivers: Shifting Strategies and Shifting Goals. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 2014. 45:247–69
- Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E., & Stromberg, J. C. (1997). The Natural Flow Regime: A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*, 47: 769–784.
- Poulet, N. (2007). Impact of weirs on fish communities in a Piedmont stream. *River Research and Applications* 23, 1038–1047. doi:10.1002/RRA.1040
- Puckridge J. T., Sheldon F, Walker K. F. & Boulton A. J. (1998). Flow variability and the ecology of large rivers. *Marine and Freshwater Research* 49: 5572

- Sandin, L., Donadi, S., Holmgren, K., von Wachenfeldt, E., & Jones, D. (2020). Sötvatten – förvaltning och restaurering med förändrat klimat. Slutrapport från projektet FRESHREST (Sötvattenslandskapet – förvaltning och restaurering i förändrat klimat). (Rapport 6942). Naturvårdsverket.
- Sandkvist, S. & Malaussène, E. (2023). Miljöåtgärders påverkan på vattenkraftens elproduktion och reglerförmåga, kandidatexamensarbete, KTH Skolan för elektroteknik och datavetenskap, Stockholm 2023.
- Scharff, R., Göransson, L., Walter, V., Berg, P., Hundecha, Y., Löfblad, E., Holm, J., Unger, T., Blom, E., Söder, L. & Amelin, M. (2023). Klimatförändringarnas inverkan på vattenkraftens produktions- och reglerförmåga. Slutrapport från KLIVA-projektet. Energiforsk rapport 2023:924.
- Silva, A.T., Lucas, M.C., Castro-Santos, T., Katopodis, C., Baumgartner, L.J., Thiem, J.D., Aarestrup, K., Pompeu, P.S., O'Brien, G.C., Braun, D.C., Burnett, N.J., Zhu, D.Z., Fjeldstad, H.P., Forseth, T., Rajaratnam, N., Williams, J.G., and Cooke, S.J. (2018). The future of fish passage science, engineering, and practice. *Fish and Fisheries* 19(2): 340-362.
- Strömberg, M., Borg, C., Degerman, E., Friberg, S., Jonzon, G., Jougda, L., Norström, L., Sers, B., Sjölander, E. och Spjut, D. (2015). Ångermanälvsprojektet – förslag till miljöförbättrande åtgärder i mellersta Ångermanälven och nedre Fjällsjöälven. WWF, Telge Energi, Länsstyrelsen Västernorrland, Länsstyrelsen Västerbotten, Älvräddarna, Coompanion, SLU, Vilhelmina Model Forest, ÅFF, Skogsstyrelsen. 2015.
https://media.wwf.se/uploads/2019/01/angermanalvsprojektet_sept2015_.pdf.
 Besökt 2024-07-12.
- Svenska kraftnät (2023a). Att kartlägga de konsekvenser för elsystemet som omprövning av vattenkraften medför m.m. Redovisning av regeringsuppdrag. Svk 2023/610. 2024-09-26.
- Svenska kraftnät (2023b). PM: Uppdatering och rättelser avseende åiterrapportering av regeringsuppdrag. Ärenden: Svk 2023/610. 2024-10-18.
- Tickner, D., Opperman, J.J., Abell, R., Acreman, M., Arthington, A., Bunn, S.E., Steven, J.C., Dalton, J., Darwall, W., Edwards, G., Harrisson, I., Hughes, K., Jones, T., Leclère, D., Lurch, A.J., Leonard, P., McClain, M.E., Muruven, D., Olden, J.D., Ormerod, S.J., Robinson, J., Tharme, R.E., Thieme, M., Tockner, K., Wright, M. & Young, L. (2020). Bending the Curve of Global Freshwater Biodiversity Loss: An Emergency Recovery Plan. *BioScience*, Volume 70, Issue 4, April 2020, Pages 330–342, <https://doi.org/10.1093/biosci/biaa002>

Turgeon, K., Turpin, C., & Gregory-Eaves, I. (2019). Boreal river impoundments caused nearshore fish community assemblage shifts but little change in diversity: a multiscale analysis. *76(5)*, 740-752.

USGS (1993). <https://www.usgs.gov/media/images/distribution-water-and-above-earth>.

Widén, Å., Jansson, R., Malm Renöfält, B., Degerman, E. & Wisaeus, D. (2017). Ekologisk reglering. Metod för att beräkna produktionsförluster och miljönytta i reglerade vattendrag. Energiforsk rapport 2017:449. ISBN 978-91-7673-449-0.

Widén, Å., Malm Renöfält, B., Degerman, E., Wisaeus, D. & Jansson, R. (2021a). Let it flow: Modeling ecological benefits and hydropower production impacts of banning zero-flow events in a large regulated river system. *Science of the Total Environment*, volume 783 (2021) 147010. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147010>

Widén, Å., Malm Renöfält, B., Degerman, E., Wisaeus, D. & Jansson, R. (2021b) Environmental Flow Scenarios for a Regulated River System: Projecting Catchment-Wide Ecosystem Benefits and Consequences for Hydroelectric Production. *Water Resources Research*, 58, 2021WR030297. <https://doi.org/10.1029/2021WR030297>

Widén Å., Segersten, J., Donadi, J., Degerman, E., Malm Renöfält, B., Karlsson Tiselius, A., Lundbäck, S. & Jansson, R. (2022) Sveriges torrfårar: geografi, naturvärden och metoder för miljöförbättringar. <https://umu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1733276/FULLTEXT03.pdf>

Widén, Å. Malm Renöfält, B., Ahonen, J. & Jansson, R. 2023. Ecopeaking – pilotstudie om korttidsreglering. Energiforsk RAPPORT 2023:935.

WWF (2021). The World's Forgotten Fishes. https://wwfint.awsassets.panda.org/downloads/world_s_forgotten_fishes__final_april9_.pdf

BILAGA 1: VATTENKRAFTENS ROLL I ENERGISYSTEMET

ULI MAX RAHMLow, KTH

SIMON ÖBERG, CTH

LISA GÖRANSSON, CTH

MIKAEL AMELIN, KTH

LENNART SÖDER, KTH

Innehåll

1	Inledning	4
2	Metodik	6
2.1	Vattenkraftsmodeller	6
2.2	Energisystemmodell	14
2.3	Undersökta fall	20
3	Resultat	23
3.1	Vattenkraftekvivalenter	23
3.2	Vattenkraftens roll i ett framtida energisystem jfr historiskt	24
3.3	Vattenförvaltningscykel 2.5	31
3.4	Känslighetsanalys: Konsekvenser av mindre vattenkraftlager	33
3.5	Känslighetsanalyser: Konsekvenser av att ta hänsyn till behovet av uppreglering	37
4	Slutsatser	40
4.1	påverkan på vattenkraften av miljöanpassningar	40
4.2	Vattenkraftsmodeller	41
4.3	Resultat från energisystemsimuleringarna	43
5	Referenslista	45

1 Inledning

Vattenkraften är en nyckelspelare i det svenska elsystemet. Vattenkraftens produktion motsvarar knappt hälften av den svenska efterfrågan och det är vattenkraften som till största delen hanterar variationer i efterfrågan på el både över dygnet, mellan säsonger och inom timmen.

Inom de närmsta årtiondena förväntas förutsättningarna för vattenkraften att förändras drastiskt. Efterfrågan på el förväntas dubblas medan vattenkraften har i stort sett samma vattenresurs i de utbyggda älvarna att förhålla sig till vilket innebär att vattenkraften kommer att försörja i storleksordningen en fjärdedel av efterfrågan på el snarare än hälften, såsom idag. Det innebär att vattenkraftens utjämnande effekt på elpriset kommer reduceras.

En stor del av den ökade efterfrågan på el i Sverige och i norra Europa förväntas mötas med vindkraft. Det innebär att variabiliteten i nettolast kommer att präglas av vindkraftens variationer snarare än av de variationer i efterfrågan som vattenkraften är byggd för att möta.

I och med omställningen av elsystemet får vi också in nya tekniker i elsystemet som kan bidra med flexibilitet på olika tidsskalor, så som elbilar och stationära batterier. Dessa komponenter kan i viss mån ta över roller som traditionellt varit vattenkraftens.

Även om energisystemet ställer om för att begränsa klimatförändringarna så har vi nått så högt i utsläpp av växthusgaser att ett varmare klimat är ett faktum. I Sverige innebär ett varmare klimat att nederbörd i större omfattning faller som regn än som snö, vilket innebär större tillrinningsnivåer till vattenmagasin under höst och tidig vinter och en tidigare, och mindre, vårflod (Scharff m.fl., 2023). Ett varmare klimat innebär också en något ökad tillrinning¹ i Sverige.

Sammantaget innebär omställningen av energisystemet att värdet av vattenkraftens olika tänkbara roller förändras och det finns därför ett behov av att bättre förstå vattenkraftens roll i det framtida energilandskapet. Samtidigt ska vattenkraften förses med moderna

¹ I storleksordningen ett par procent. Se Scharff m.fl. (2023) för detaljer.

miljövillkor vilket innebär att vattenkraftens förmåga att bidra till olika roller kan komma att förändras. Den här rapporten syftar till att bidra till ökad förståelse runt dessa frågor. Vattenkraften kan även bidra med vissa förmågor som behövs för både leverans- och driftsäkerhet inom kraftsystemet men detta ingår inte i rapporten.

Den här bilagan beskriver det arbete som har gjorts med att modellera vattenkraften och att simulera olika scenerier för energisystemet. Modellerings- och simuleringsarbetet genomfördes under 2023 och början på 2024. Antaganden om miljövillkor och scenerier för framtidens energisystem fastställdes i slutet av 2023.

2 Metodik

För att kunna studera vattenkraftens roll i ett framtida elsystem behövs verktyg som kan beskriva energisystemet såväl som vattenkraftssystemet. I det här arbetet har en detaljerad modell över Sveriges tio största älvar använts för att generera en så kallad *vattenkraftekvivalent*, som övergripande beskriver älvarnas aggregerade egenskaper, per elområde. Vattenkraftekvivalenterna har därefter implementerats i en energisystemmodell.

2.1 VATTENKRAFTSMODELLER

Vattenkraften kännetecknas av att man har tillgång till en viss mängd vatten, som det gäller att utnyttja så effektivt som möjligt.

Elproduktionen i ett vattenkraftverk är en icke-linjär funktion av tappning och fallhöjd. Det ideala vore förstås om man alltid kunde köra varje kraftverk på dess bästa verkningsgrad, men i praktiken behöver man ta hänsyn till vad som händer i det övriga elsystemet. Om efterfrågan t.ex. är hög, vilket resulterar i höga elpriser, kan det vara befogat att köra kraftverk på en något lägre verkningsgrad, eftersom den förlorade effekten kompenseras av ett högre elpris. Man måste också ta hänsyn till att kraftverken i samma älvsystem påverkar varandra.

I det här avsnittet beskrivs de vattenkraftsmodeller som har använts inom projektet och hur dessa kopplas samman med energisystemmodellen. Här ingår också en sammanställning av de miljövillkor som har modellerats.

Detaljerade vattenkraftsmodeller

En detaljerad modell av ett vattenkraftssystem formuleras i regel som ett optimeringsproblem motsvarande det planeringsproblem som kraftverksägarna skulle ställas inför i ett visst scenario. I verkligheten är ett vattenkraftverk ett icke-linjärt system, där elproduktionen beror på framför allt tappning och fallhöjd (som i sin tur beror på magasinsinnehållet). Eftersom vatten från ett kraftverk rinner vidare till nästa kraftverk i älven så behöver man koordinera driften av kraftverken i samma älvsystem. Dessutom är flera av faktorerna som påverkar driften av vattenkraften osäkra och man måste planera

utifrån prognoser. Om man skulle vilja ta hänsyn till alla dessa faktorer så skulle resultatet bli ett mycket omfattande icke-linjärt, stokastiskt optimeringsproblem. Sådana problem är i praktiken ohanterliga och det är därför brukligt att förenkla modellen så att man i stället får ett linjärt, deterministiskt problem.

Även en så kallad detaljerad modell är alltså en förenkling av verkligheten. Som med alla förenklingar har man ett val när det gäller vilka faktorer som ska inkluderas i modellen. En grundmodell för en detaljerad representation av vattenkraften är att man beaktar magasininnehållet, elproduktionen som funktion av tappningen, spill och tillrinning från kraftverk uppströms samt lokal tillrinning. Det är även önskvärt att ta hänsyn till rinntiden mellan olika kraftverk, eftersom rinntiderna t.ex. påverkar hur snabbt ett vattenkraftssystem kan gå från hög till låg elproduktion utan att man blir tvungen att spilla vatten. Alla dessa faktorer kan beaktas i en linjär optimeringsmodell. Vill man ta hänsyn till att de flesta vattenkraftverk inte kan köras på alltför låg tappning (p.g.a. dålig verkningsgrad och kraftigt ökat slitage på utrustningen) behöver man införa heltalsvariabler. Optimeringsproblemet är då fortfarande linjärt, men heltalsvariablerna gör att lösningstiden kan öka markant, vilket kan vara problematiskt då man modellerar ett stort system.² Vill man även ta hänsyn till fallhöjdsförluster (d.v.s. att elproduktionen per enhet vatten blir lägre då magasinerna inte är fulla) får man antingen ett icke-linjärt problem eller linjär approximation som kräver heltalsvariabler. I bägge fallen kan lösningstiden öka och med icke-linjära modeller finns det även en risk att man inte hittar den globala optimala lösningen. Det är därför att föredra om man kan använda en linjär modell utan heltalsvariabler, vilket är vad vi har gjort i det här projektet. Modellen omfattar 196 kraftverk i de tio största vattenkraftsälvarna³. Den totala installerade effekten i de modellerade kraftverken är 14 700 MW, vilket kan jämföras med att den totala installerade effekten i svensk vattenkraft är ungefär 16 400

² Resultaten från Stock Söderlund & Yesil Aydin (2024) tyder emellertid på att skillnaden är liten mellan modeller som beaktar respektive inte beaktar förbjudna intervall för tappningen.

³ Luleälven, Skellefteälven, Umeälven, Ångermanälven, Indalsälven, Ljungan, Ljusnan, Dalälven, Göta älv och Lagan.

MW.⁴ Modellen är baserad på öppna data (rapporter, vattendomar, webbsidor m.m.) som samlats in på KTH under en lång tid.⁵

Miljövillkor som påverkar driften av vattenkraften

Processen att förse vattenkraften med moderna miljövillkor för svensk vattenkraft förväntas leda till skärpta miljövillkor i flera kraftverk. Det är än så länge svårt att säga vilka typer och i vilken omfattning nya miljökrav kommer att införas. Det är dock troligt att ett av de viktigaste kraven kommer att bli att återställa konnektiviteten i många vattendrag, vilket betyder att det måste vara möjligt för flora och fauna att passera vattenkraftverken. I vattenkraftverk där turbinerna ligger i nära anslutning till dammen kan konnektivitet erhållas genom att ha ett mindre vattenflöde som går förbi dammen i en fisktrappa eller annan teknisk lösning. Detta flöde leds ej genom turbinen och räknas därmed som spill. För kraftverk med långa torrfåror behövs både en väg från dammen till torrfåran och att man upprätthåller ett tillräckligt stort flöde genom torrfåran. Även detta vatten räknas som spill. För att återställa konnektiviteten kommer det därför vara nödvändigt att lägga på ett krav på minimispill i de berörda kraftverken. Det är även nödvändigt att man har ett tillräckligt flöde i älvsträckorna mellan kraftverken. Flödet mellan kraftverken är summan av spill och tappning från kraftverket uppströms och det kan därför utöver krav på minimispill även tillkomma krav på minimitappning. Både minimispill och minimitappning är enkla att beakta i en detaljerad vattenkraftmodell; de inkluderas i de undre gränserna för motsvarande optimeringsvariabler.

Andra typer av miljövillkor som kan komma i fråga är nivåbegränsningar i vattenmagasinen (d.v.s. att vattennivån i ett magasin ska hållas inom snävare gränser under vissa tider på året eller att vattennivån inte får ändras för mycket under en viss tidsperiod) samt flödesbegränsningar (t.ex. att flödet i vissa älvsträckor ska hållas inom snävare gränser under vissa tider på året eller att flödet inte får ändras för mycket under en viss tidsperiod). Även dessa typer av villkor kan hanteras i en linjär detaljerad modell i form av extra bivillkor. Det bör dock noteras att sambandet mellan magasininnehåll och vattennivå beror på magasinets form och därför

⁴ Se Energiåret 2023 från Energiföretagen (<https://www.energiforetagen.se/statistik/elstatistik/energiaret/>).

⁵ Se t.ex. F. Obel, "Balansering av en storskalig vindkraftsutbyggnad i Sverige med hjälp av den svenska vattenkraften", masterexamensarbete, KTH, Stockholm 2012.

vanligen är icke linjärt. I en linjär modell behöver man därför anta ett linjärt samband mellan magasinens innehåll och vattennivå.

Då projektet inleddes var tanken att studera de miljövillkor som faktiskt beslutats i de första omprövningarna. Detta har inte varit möjligt eftersom processen skjutits upp i regeringsbeslut. I stället har vi valt att studera inverkan av det miljöåtgärdsscenario som även beaktats av Svenska kraftnät i deras rapport till regeringen [2]⁶. Dessa miljövillkor benämns ofta Vattenförvaltningscykel 2.5 (VFC 2.5)⁷ och inkluderar:

- minimispill under hela året,
- minimispill endast april–oktober,
- minimitappning under hela året.

Totalt berörs 44 kraftverk av miljöåtgärder (Tabell 1). Det bör påpekas att det i tabellen förekommer ett felaktigt värde, nämligen minimispillet i Krångfors, som i Svenska kraftnät (2023) angavs till 172 m³/s, men som egentligen ska vara 39,6 m³/s. En ny ekvivalent vattenkraftsmodell för SE1 togs fram när detta fel uppdagades, men det visade sig att skillnaden mellan de två ekvivalenterna var så liten att det inte bedömdes ha någon nämnvärd påverkan på resultaten från energisystemmodellen som används i avsnitt 2.2. Vi har därför valt att i energisystemmodellen fortsätta använda ekvivalenten som är baserad på minimispill 172 m³/s i Krångfors.

I Svenska kraftnäts rapport (Svenska kraftnät, 2023) studeras också hur vattenkraften påverkas av alternativa miljöåtgärdsscenarioer (alternativ A-C), där vattenkraften i praktiken styrs efter ett "naturligt flöde". Detta alternativ har inte modellerats explicit i den detaljerade vattenkraftsmodellen, men i avsnitt 3.4 görs en känslighetsanalys av hur energisystemet påverkas om förmågan att lagra vatten begränsas.

⁶ Se Bilaga Uppskattat miljöanpassningsbehov enligt vattenförvaltningscykel 2.5 i Svenska kraftnät (2023).

⁷ Miljöåtgärderna som ingår i det miljöåtgärdsscenario som (inofficiellt) kallas *Vattenförvaltningscykel 2.5* (VFC 2.5) finns beskrivna i vattenmyndigheternas förslag från 2018 till nya miljö kvalitetsnormer för vattenförekomster som är förklarade som kraftigt modifierade vatten (KMV) på grund av vattenkraft (Vattenmyndigheterna, 2018). Forskargruppen har fått datan från Svenska kraftnät som i sin tur har fått underlaget från vattenmyndigheterna. Namnet VFC 2.5 är vattenmyndigheternas egna benämning och namnet kommer sig av att förslagen till miljö kvalitetsnormerna togs fram i ett regeringsuppdrag mellan två ordinarie vattenförvaltningscykler.

Tabell 1 Lista över de kraftverk som berörs av miljötåtgärder i scenariot VFC 2.5.

Kraftverk/ regleringsdamm	Huvud- avrinningsområde	Minimispill april- oktober (m3/s)	Minimispill hela året (m3/s)	Minimitappning hela året (m3/s)
Lilla Edet	Göta älv	5	0	0
Trollhättan	Göta älv	5	0	0
Vargön	Göta älv	5	0	0
Boden	Luleälven	5	0	0
Vittjärv	Luleälven	5	0	0
Laxede	Luleälven	5	0	0
Randidammen	Luleälven	0	6,5	6,5
Kvistforsen	Skellefteälven	0	40,3	0
Selsfors	Skellefteälven	0	39,8	0
Krångfors	Skellefteälven	0	39,6 (172)*	0
Granfors	Skellefteälven	5	0	0
Slagnäs	Skellefteälven	0	13,1	0
Bergnäs	Skellefteälven	0	12,8	0
Stornorrfor	Umeälven	0	35	0
Tuggen	Umeälven	4	0	0
Hällfors	Umeälven	0	11,9	0
Betsele	Umeälven	0	11,55	0
Bålforsen	Umeälven	0	11,5	0
Grundfors	Umeälven	5	0	0
Juktan (Storjuktans reglerdamm)	Umeälven	0	2,44	0
Klippen	Umeälven	0	3,03	0
Volgsjöfors	Ångermanälven	0	0	7,55
Hjälta	Ångermanälven	0	6,9	0
Forsse	Ångermanälven	0	6,85	0
Bågedede	Ångermanälven	0	4,97	0
Blåsjödammen	Ångermanälven	0	1,405	0
Ormsjön	Ångermanälven	0	1,9	0
Bergeforsen	Indalsälven	5	0	0
Stadsforsen	Indalsälven	5	0	0
Granboforsen	Indalsälven	5	0	0
Nederede	Ljungan	5	0	0

Ljunga	Ljungan	4	0	0
Hermansboda	Ljungan	4	0	0
Parteboda	Ljungan	0	3,705	0
Leringsforsen	Ljungan	0	1,985	0
Ljusnefors	Ljusnan	5	0	0
Ljusne strömmar	Ljusnan	5	0	11,8
Bergvik	Ljusnan	5	0	0
Landafors	Ljusnan	5	0	11,4
Dönje	Ljusnan	0	9,05	0
Halvfari	Ljusnan	2	0	0
Alfta	Ljusnan	0	1,775	0
Spjutmo	Dalälven	5	0	0
Blyberg	Dalälven	4	0	0
Väsa	Dalälven	3	0	0
* Felaktigt värde i Svenska kraftnät (2023)				

Vattenkraftens reglerförmåga

Med reglerförmåga avses ett kraftverks möjligheter att producera el då den behövs som mest. Vattenkraften har en unik förmåga att bidra till att upprätthålla balansen mellan produktion och elförbrukning på alla tidsskalor från den kontinuerliga balansen (svängmassa och primärreglering) till säsons- och årsreglering. Detta beror på att enskilda vattenkraftsturbiner kan regleras snabbt och att de stora vattenmagasinen kan lagra mycket stora volymer energi.⁸ Vattenkraften har därför hittills stått för den största delen av reglerförmågan i det nordiska elsystemet.

Att förse vattenkraften med moderna miljövillkor kan komma att minska möjligheterna att styra vattenkraftsproduktionen och kommer därför att påverka vattenkraftens reglerförmåga. Den minskade reglerförmågan och dess konsekvenser för elsystemet måste förstås vägas mot miljövärdet av miljöåtgärder och därför efterfrågas ofta ett mått på reglerförmågan, men det finns ingen vedertagen vetenskaplig

⁸ Vattenkraftens totala lagringskapacitet är omkring 81 TWh i Norge, 34 TWh i Sverige och 5 TWh i Finland, d.v.s. totalt ungefär 120 TWh. Detta kan jämföras med att elförbrukningen i Norden (exklusive Island) uppgick till 373 TWh 2023 (Energy Statistics Data Browser, IEA, www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser).

definition av reglerförmåga. I tidigare studier har ett flertal olika mått föreslagits och testats, t.ex. värdefaktor, modifierad värdefaktor, relativt reglerbidrag, ekvivalent energilager och stresstest.⁹ Dessa mått kan alla ge intressanta insikter i hur miljökrav påverkar vattenkraftens reglerförmåga, men de måste alltid tolkas med försiktighet. Ett mått som bygger på historiska data mäter bara den del av vattenkraftens reglerförmåga som hittills har utnyttjats, vilket inte behöver vara samma sak som vattenkraftens tekniska potential att balansera variationer. Det är också viktigt att notera att varje enskilt vattenkraftverk ingår i ett system, där åtgärder i ett kraftverk även kan påverka övriga kraftverk i samma vattendrag. Det är därför svårt att sätta ett mått på reglerförmågan i ett enskilt kraftverk. I detta projekt har vi valt att inte göra något försök att sätta ett värde på vattenkraftens reglerförmåga, utan i stället studerar vi hur hela systemet påverkas av miljöåtgärder, d.v.s. vilka extra investeringar i annan reglerförmåga och förändrade körmönster man får till följd av olika åtgärder och omvärldsscenarioer.

Ekvivalenta modeller

En detaljerad vattenkraftsmodell blir snabbt mycket omfattande om den inkluderar ett stort antal vattenkraftverk under en längre tidsperiod med hög tidsupplösning. Det är ur beräkningsteknisk synvinkel svårt att hantera så stora modeller som en del av en energisystemmodell. Det kan dessutom vara svårt att sammanställa alla data som behövs till den detaljerade modellen. Det är därför brukligt att man aggregerar all vattenkraft i ett område till en s.k. ekvivalent modell. Målsättningen för den ekvivalenta modellen är att den ska ge ungefär samma resultat som en detaljerad modell, samtidigt som beräkningstiden förkortas och det blir möjligt att använda aggregerade indata.

Det finns flera olika sätt att strukturera en ekvivalent modell. En typisk ekvivalent modell, som har använts i många simuleringsverktyg, är att låta vattenkraften i ett visst område representeras av ett magasin med en viss högsta och lägsta produktionskapacitet. Det är också vanligt att använda olika verkningsgrad för olika produktionsnivåer, vilket representerar att man får ut mindre elektrisk energi per volymenhet vatten vid hög elproduktion jämfört med då kraftverken körs på bästa

⁹ Se t.ex. Planting-Bergloo & Svensson (2024), Bladh & Funkquist (2021) och Jaldegren (2024).

verkningsgrad. Det är också vanligt att lägga till rampvillkor, som begränsar hur snabbt elproduktionen kan öka eller minska, vilket representerar den "tröghet" som man får i ett vattenkraftssystem, t.ex. då vatten p.g.a. rinntiden når fram till ett nästan fullt vattenmagasin och man ändå tvingas producera trots att elpriserna har gått ned, eftersom alternativet är att spilla vattnet. Det är denna typ av vattenkraftsekvivalent som har använts i energisystemmodellen i detta projekt (se avsnitt 2.2).

Även om ekvivalenter används i så gott som alla större elsystems-/energisystemmodeller så är det ofta oklart hur parametervärdena för de ekvivalenta modellerna har beräknats. I Blom (2023) studerades systematiska metoder för att beräkna dessa parametervärden. Principen är att lösa ett optimeringsproblem där man vill minimera skillnaden mellan resultaten för den ekvivalenta och den detaljerade modellen för ett givet scenario. Utmaningen med denna princip är att den resulterar i ett optimeringsproblem i två nivåer¹⁰ där målfunktionen i den övre nivån är att välja parametervärden så att man minimerar ett mått på skillnaden mellan de två modellerna. Bivillkoren till den övre nivån inkluderar ytterligare ett optimeringsproblem, där man givet parametervärdena på den ekvivalenta modellen optimerar vilken vattenkraftsproduktion man får från den ekvivalenta modellen.

För att lösa ett sådant optimeringsproblem i två nivåer behöver man antingen formulera om problemet till en nivå (vilket görs genom att inkludera optimalitetsvillkoren för det undre problemet som bivillkor till det övre problemet) eller genom att använda någon form av sökalgoritm. I Blom (2023) användes framför allt s.k. *Particle Swarm Optimisation* (PSO), och det är även den metod som använts för att ta fram ekvivalenter i detta projekt.

För att identifiera parametrarna i en ekvivalent modell behöver man alltså jämföra den ekvivalenta modellens resultat med resultaten för en detaljerad modell för en given testperiod. Målsättningen är att en väl konstruerad ekvivalent även ska ge rimliga resultat då den tillämpas på ett annat scenario än det som ekvivalenten är "tränad" på, men det beror förstas på hur likartade förutsättningarna är i träningsscenariot och det scenario som studeras.

¹⁰ Eng. "bilevel optimisation problem".

Den energisystemmodell som använts i projektet har möjlighet att använda olika parametervärden för vattenkraftsekvivalenterna under olika delar på året. En fördel med detta är att det ger oss en möjlighet att representera begränsningar i vattenkraftens reglerförmåga i ett längre tidsperspektiv. Ett exempel på detta är vårfloden, då vattenkraften har begränsade möjlighet att dra ner på elproduktionen under lågprisperioder, eftersom detta skulle leda till att mer vatten behöver spillas. Detta påverkar parametern för den lägsta tillåtna elproduktionen i den ekvivalenta modellen. I Lilja (2023) presenterades en metod för att med hjälp av en klusteralgoritm dela upp historiska data för inflödet i olika perioder (t.ex. hög-, medel- och lågflödesperioder). Därefter beräknas en ekvivalent för varje inflödesperiod.

Miljöåtgärdsscenarioet får också konsekvenser för de ekvivalenta modellerna. Principen är att beräkna en ekvivalent modell för systemet för ett referensscenario och sedan göra en ny ekvivalent för systemet med ett miljöåtgärdsscenario. Minimitappning återspeglas i ekvivalenten i form av lägsta tillåtna produktionsnivå. De ekvivalenta modellerna saknar dock en parameter för spill, men eftersom ekvivalenten endast beaktar det totala inflödet omräknat till energi, så kan spill modelleras som förlust av inflöde. Man kan alltså utifrån den detaljerade modellen beräkna hur mycket vattenkraftsproduktion som förloras p.g.a. krav på minimispill och sedan dra av motsvarande energi från inflödet i den ekvivalenta modellen. Med denna metod är det inga problem att beakta krav på minimispill som bara gäller under en viss del av året.

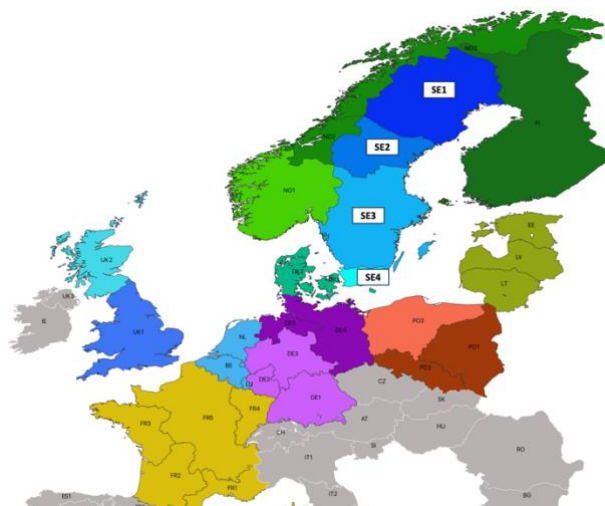
2.2 ENERGISYSTEMMODELL

Sammanställning av de framtida elsystem där vattenkraftens roll undersöks har tagits fram med hjälp av en kostnadsminimerande investeringsmodell av det nordeuropeiska elsystemet. Med modellen som verktyg beräknas hur efterfrågan på el, värme och vätgas kan mötas till lägsta kostnad. Tack vare en hög tidsupplösning och ett stort antal teknikalternativ, både när det gäller produktion och lagring, ger beräkningarna ett elsystem sammansatt av tekniker som kompletterar varandra - det vi till vardags kallar "ett balanserat elsystem". Modellen utvecklades först av Göransson m.fl. (2018) för att senare uppdateras i ett flertal studier, varav senast i en studie av Toktarova m.fl. (2021).

Beräkningarna med modellen avser ett framtida system som uppfyller nollutsläppsmål på så sätt att modellen endast kan investera i utsläppsfria tekniker. Investeringarna i modellen görs för att möta efterfrågan på el, värme och vätgas till lägsta kostnad. Utöver dagens efterfrågan på el och fjärrvärme ingår ny efterfrågan på el och vätgas från elektrifiering av industri och el till, till exempel, planerade batterifabriker liksom el till transportsektorn. I modellen finns möjlighet att genomföra investeringar i lagring av el, värme och vätgas.

Geografiskt område. Området som modelleras omfattar norra Europa så som visas i Figur 1. Detta då det är viktigt att få med påverkan på elsystemet genom utbytet med omgivande länder. Tretton länder, uppdelat i 16 regioner, ingår därför i modellen.

Överföringskapacitet. De 16 regionerna i Figur 1 är valda för att representera viktiga begränsningar för en driftsäker överföringskapacitet (även i de fall de endast har ett elområde). Sverige är i modellen uppdelat i sina fyra elområden. Överföringskapaciteten mellan två regioner har begränsats till vad som förväntas vara på plats av ENTSO-E till 2040 (ENTSO-E, 2022).



Figur 1 Geografiskt område som omfattas av beräkningarna

Tidsupplösning och tidsperiod. Beräkningarna tar sin utgångspunkt i dagens elsystem med möjlighet till investeringar i elproduktion, överföringskapacitet och lagring för att möta efterfrågan på el år 2050. Data från två historiska år, i form av torrår och våtår (1991 och 1992) har använts för att representera variationerna i vindhastighet, solinstrålning, temperatur och tillrinning som i sin tur påverkar möjligheterna till vindkraftsproduktion, solexproduktion, efterfrågan på el för uppvärmning och möjligheten till vattenkraftproduktion. Beräkningarna är gjorda med en tidsupplösning på 3 timmar för att fånga variabiliteten i vindkraft och solex samt värdet av flexibilitetsåtgärder.

Klimatförändringar. De valda väderåren (1991 och 1992) inträffade före nämnvärda klimatförändringar. För det beräknade året (2050) antas den globala medeltemperaturen ha ökat med 2 grader jämfört med förindustriell tid. I en studie som genomförts av Energiforsk, SMHI, Chalmers, KTH och Profu (Scharff m.fl., 2023) studeras hur elsystemet påverkas av en 2 graders ökning av global medeltemperatur. Det varmare klimatet innebär en ökad tillrinning till vattenmagasinen i Norge (+ 14 TWh/år i beräkningarna i denna rapport) och Sverige (+ 2 TWh/år i beräkningarna i denna rapport) och en omfördelning av tillrinningen över tid med en mindre och tidigare vårflod samt mer höstregn. En ökad tillrinning och förändrad fördelning av norsk vattenkraft rapporteras av NVE (2019). Beräkningarna för Sverige finns presenterade i en rapport från det ovannämnda projektet (Scharff m.fl., 2023). En högre temperatur ger också en lägre efterfrågan på energi för uppvärmning (12 % minskning enligt beräkningarna). Förändringen i efterfrågan på energi för uppvärmning är beräknad enligt Abrahamsson (2020), där förändringen i Finland antas motsvara förändringen i elområde SE3 och förändringen i övriga regioner antas motsvara förändringen i elområde SE4.

Elproduktionstekniker. Endast investeringar i tekniker utan koldioxidutsläpp är möjligt (vindkraft, solex, kärnkraft, biogaseldade gasturbiner, biomassaeldade kraftvärmeverk, fossil kondenskraft med koldioxidinfångning och lagring). Antaganden för dessa ges i appendix men för de för Sverige mest centrala gäller:

Vattenkraft. Dagens vattenkraft antas finnas kvar, men modellen möjliggör inte nya investeringar i vattenkraft. Vattenkraftens möjlighet att hantera variationer i elsystemet begränsas av den installerade effekten,

årstillrinningen och vattendomar. För att representera variationer i tillrinning till vattenkraftmagasinen används tillrinning från SMHI:s modell för hydrologiska system (HBV-modellen, Bergström 1995) för år 1991 och 1992. År 1991 var ett torrår i Sverige med en total tillrinning på 62,3 TWh medan 1992 var ett våtår med en total tillrinning på 73,3 TWh. Älvsystemets struktur och vattendomar begränsar vattenkraftens möjliga produktionsnivå. Hur dessa begränsningar påverkar vattenkraften på elområdesnivå beskrivs av vattenkraftekvivalenter (Tabell 4) som tas fram baserat på detaljerad modellering av älvsystemen enligt avsnitt 2.1.

Vind- och solet. För vindkrafts- och soletproduktion används historiska och modellerade väderdata från åren 1991 och 1992. Väderdata för vind- och soletproduktion varierar alltså både geografiskt och över tid. Vindhastighet och solinstrålning är tagna från Europeiska centret för medellånga väderprognoser (C3S 2017) med hjälp av verktyget utvecklat av Mattsson m.fl. (2021). En begränsad acceptans för landbaserad vindkraft är antagen för Sverige. Endast 4 % av den landyta som är möjlig för vindkraftsproduktion (vägar, sjöar, naturreservat och tätbefolkade områden borträknade) får användas. Havsbaserad vindkraft kan byggas på max 40 m djup och minst 5 km från land. När naturreservat och skyddade områden är borträknade får 33 % av ytan (minst 5 km från land och där djupet är max 40m) användas. I skyddade områden ingår dock inte de områden som pekats ut som försvarsintresse av regeringen under november 2024. Områden med potential för vindkraft är för både land- och havsbaserad vindkraft indelad i fem klasser per region för att representera skillnader i vindresurs. Teknikbeskrivningen är anpassad för vindresursen vilket innebär att landbaserad vindkraft i områden med låg medelvind (klass 1-3) motsvarar 100 SP (specifik effekt, dvs generatorkapacitet över svept rotorarea i W/m²) och 150 m tornhöjd medan landbaserad vindkraft i områden med hög medelvind (klass 4-5)

motsvarar 300 SP och 100 m tornhöjd och havsbaserad vindkraft motsvarar 200 SP och 150 m tornhöjd.

Teknikvalet påverkar elproduktionsprofil såväl som kostnader och ytanvändning där vindkraft med större rotor i förhållande till generator är dyrare och kräver mer yta per installerad effekt.

Kärnkraft. Dagens kärnkraft antas livstidsförlängas och finnas kvar i elsystemet i två av de tre undersökta fallen. Den nybyggda finska kärnkraften samt kärnkraften i Storbritannien som är under byggnation antas finnas kvar. Modellen kan investera i kärnkraft utan begränsningar i kapacitet i samtliga länder utom Tyskland där ingen ny kärnkraft tillåts i enlighet med politiska beslut. Kostnaderna för nyinvesteringar motsvarar den typ av storskalig kärnkraft som vi har i Sverige idag vid en större utbyggnad av ny kärnkraft och är baserad på samtal med experter på området. Kostnaderna för kärnkraft som används här är alltså lägre än de som anges av IEA World Energy Outlook. Den första enheten i en region förväntas vara dyrare, vilket inte har tagits med i modelleringen. Kärnkraften antas kunna variera sin produktionsnivå fritt mellan 70-100 % av installerad kapacitet. Modellen inkluderar alltså inte små och modulära reaktorer som en separat kostnadsklass. Detta då kostnaderna för denna teknik är okänd i dagsläget (men det är samtidigt inte troligt att dessa inom överskådlig tid kommer uppvisa lägre kostnader än de redan låga kostnader vi antagit för kärnkraft).

Efterfrågan på el, vätgas och värme. Mängden el till fjärrvärmesystemet är ett resultat av beräkningen. I övrigt är efterfrågan på el baserat på antaganden enligt nedan. För att ersätta fossila bränslen i transport, industri och värmesektorn ökar efterfrågan på el i norra Europa med knappt 65 % och i Sverige med knappt 70 % i de beräknade fallen. I Sverige står el för vätgasproduktion till industrin för en stor del av ökningen.

- **Fix elefterfrågan.** I tillägg till befintlig elanvändning antas el användas till högtemperaturuppvärmning inom cementproduktion. Cementindustrins produktionsnivå antas förbli oförändrad (på den nivå

den hade innan elektrifieringen). El till cementproduktion och batterifabriker antas vara konstant över tid och uppgå till 3 TWh/år respektive 5 TWh/år (2 TWh/år i södra Sverige och 3 TWh/år i norra Sverige). Cementindustrin och batterifabrikerna tillsammans med befintlig elanvändning utgör alltså en förutbestämd efterfrågan på el varje timme i beräkningarna.

- El till vätgasproduktion. Utöver den direkta konsumtionen av el inom industrin antas el även användas för att producera vätgas till reduktion av järnmalm (som planeras av bland annat LKAB, vilket studerats av Toktarova m.fl., 2022a) och för termokemisk plaståtervinning (som studeras av exempelvis Borealis som belysts av Toktarova m.fl., 2022b). Vätgasanvändningen inom stålindustrin (50 TWh/år el under antagande att LKAB:s järnmalmsuttag är oförändrat och att järnmalmen reduceras i norra Sverige där SSAB och Stegra, tidigare H2 Green Steel, antas använda LKAB:s järn som råvara) och för termokemisk plaståtervinning (20 TWh/år el) antas vara konstant över tid. Det är dock möjligt att förskjuta elkonsumtion för vätgasproduktion från perioder med höga elpriser till perioder med lägre elpriser under förutsättning att investeringar tas i vätgaslagring och extra elektrolysörkapacitet så att industrins behov av vätgas fortfarande tillgodoses varje timme. Kostnaderna för vätgaslagring motsvarar kostnader för storskaliga berggrumslager av den typ som nu testas inom HYBRIT. Kostnaderna för elektrolysörkapacitet motsvarar elektrolysörer av typen alkali. Samtliga kostnader för energilagring är hämtade från danska Energimyndigheten, se appendix för detaljer.

-El för transporter. Samtliga personbilar antas vara elektrifierade vilket innebär en efterfrågan på el på 12 TWh/år i Sverige. Det antas att 30 % av bilarna kan ladda flexibelt medan 70 % laddar så fort de står parkerade. I båda fallen måste elen till bilarna kunna möta bilarnas transportbehov (enligt körmönster framtaget med GPS mätningar av 426 bilar i sydvästra

Sverige, se Kullingsjö & Karlsson, 2012). Bilarna antas vara utrustade med 30kWh batterier i genomsnitt och laddeffekten är begränsad till 3,7 kWh/h. Metoden som används för att representera elbilarna på aggregerad form i beräkningarna har utvärderats av Taljegård m.fl. (2021). Även lastbilar och bussar antas vara elektrifierade, vilket innebär ytterligare 13 TWh/år elbehov i Sverige. Bussarna och lastbilarna antas inte kunna laddas flexibelt. Valet av 30 kWh batterier och att endast 30% av bilarna kan ladda flexibelt med låg laddeffekt är medvetet för att inte överskatta möjligheten i denna flexibilitet (i verkligheten är det troligt att batterierna kommer ha betydligt större kapacitet och det finns inget som talar för varför inte smart laddning skulle kunna bli mer eller mindre standard på samtliga bilar).

-El till fjärrvärmesystemet. Dagens efterfrågan på fjärrvärme, justerat med hänsyn till varmare klimat, är inkluderat i modellen och kan mötas av rena värmeproduktionstekniker, biomassabaserad kraftvärme samt värmepumpar och elpannor. Det är möjligt att investera i värmelager vilket innebär att värmepumpar och elpannor kan producera värme under perioder med god tillgång på el till låg kostnad för att sedan spara värmen i värmelager och använda för att möta efterfrågan på värme vid ett annat tillfälle.

I samtliga länder i norra Europa antas en elektrifiering av stålindustrin samt transportsektorn. En elektrifiering av industrin i norra Europa motsvarande den i Sverige är förväntad. Behovet av el för vätgasproduktion i norra Europa som helhet är därmed sannolikt högre än vad som antagits i beräkningarna i denna rapport. Utöver en efterfrågan på el från stålindustrin samt transportsektorn antas el efterfrågas för att ersätta naturgas för uppvärmning i individuella hushåll i Tyskland, Polen, Nederländerna och Storbritannien.

2.3 UNDERSÖKTA FALL

För utvärdering av vattenkraftens roll samt hur denna roll påverkas av miljöåtgärdsscenario Vattenförvaltningscykel 2.5 har fyra olika

framtidssystem modellerats. I dessa framtidssystem görs olika antagande för utveckling av havsbaserad vindkraft och kärnkraft, vilket är sammanställt i Tabell 2. I det kostnadsoptimala fallet antas dagens vattenkraftkapacitet finnas kvar och befintlig kärnkraft livstidsförlängas. Till detta läggs produktions- och lagringskapacitet så att efterfrågan på el, värme och vätgas möts till lägsta kostnad. I kärnkraftsfallet tillförs 9 GW ny kärnkraft till Sverige för att illustrera nuvarande regerings planer på kärnkraftsutbyggnad. I vindfallet antas existerande kärnkraft ha passerat åldersstrecket. Istället antas en utbyggnad om 22 GW havsvind motsvarande det tidigare planeringsmålet om 120 TWh havsvind per år. I samtliga fall är flexibilitetsåtgärder, så som vätgas- och värmelager, möjliga teknikalternativ i den kostnadsoptimala elmixen. Som variant på Vind-fallet studeras ett fall utan möjlighet till investeringar i vätgas- och värmelager för att förstärka värdet av flexibilitet från andra källor.

Tabell 2 Undersökta energisystemfall.

	Vind	Kostnadsoptimal	Kärnkraft	Vind utan Flex
Havsbaserad vindkraft	22 GW	-	-	22 GW
Kärnkraft				
Livstidsförlängning	-	5 GW	5 GW	
Ny kapacitet	-	-	9 GW	
Vätgas- och värmelager	-	-	-	Nej

För respektive scenario i Tabell 2 har två vattenkraftsekvivalenter använts, en referensekvivalent och en ekvivalent framtagen för att motsvara det miljöåtgärdsscenario som definierats för Vattenförvaltningscykel 2.5. Den huvudsakliga skillnaden är att ett minimispill har implementerats, vilket i energisystemmodellen beskrivs som ett kontinuerligt spill av vatten.

I dagens elsystem bidrar vattenkraften inte bara med elproduktion på day-a-head- och intradagmarknaderna utan även med systemtjänster. För att begränsa beräkningstiden ställs i grundfallen inga krav på leverans av systemtjänster i energisystemmodellen. Som känslighetsanalys finns därför ett fall där vi undersöker påverkan av ett krav på att det finns tillgänglig kapacitet, från vattenkraften eller andra tekniker, som kan leverera systemtjänster varje timme. Det ska i detta fall alltid finnas tillgänglig effekt för att kunna hantera bortfall

av den största enheten (N-1) samt hantera de variationerna från efterfrågan på el, vind- och solkraft som kan uppstå inom timmen. Kapacitetskraven beror av vind- och solelens produktionsnivå och definieras i olika tidsintervall med varierande krav på snabbhet och uthållighet.

Utöver vattenförvaltningscykel 2.5 diskuteras även mer omfattande miljötåtgärder för vattenkraften. Däribland miljötåtgärder som begränsar vattenkraftens lagerkapacitet, vilket i Svenska kraftnäts rapport (2023) beskrivs i miljöalternativ A och B. I en känslighetsanalys undersöks därför hur elsystemet påverkas av att reducera den ekvivalenta lagerkapaciteten.

3 Resultat

I detta kapitel redovisas resultaten från de beräkningar och simuleringar som har genomförts inom projektet.

3.1 VATTENKRAFTEKVIVALENTER

En viktig fråga i projektet har varit att undersöka inverkan av VFC 2.5 på den svenska vattenkraften och vilka konsekvenser det får för energisystemet. Tabell 3 visar det extra spill som man får till följd av miljöåtgärdsscenario VFC 2.5. Totalt förloras ungefär 1 TWh.

Tabell 3 Ökning av spill med miljöanpassningar enligt VFC 2.5

Prisområde	Extra spill VFC 2.5 [TWh]
SE1	0,646
SE2	0,408
SE3	0,012
SE4	0,002
Total	1,068

Miljöåtgärdsscenario VFC 2.5 omfattar inte förändringar över en dag eller en vecka och därför påverkas inte rampningsparametern i ekvivalenterna av VFC 2.5. Däremot får miljöåtgärderna konsekvenser för parametrarna för maximal respektive minimal elproduktion samt maximalt magasinsinnehåll. Tabell 4 visar värdet på dessa parametrar för referensfallet (d.v.s. utan VFC 2.5) samt ändringen då man inkluderar miljöåtgärderna i VFC 2.5 i respektive elområde.

Tabell 4 Ekvivalenta modeller av vattenkraften för referensfallet och miljöåtgärdsscenario VFC 2.5.

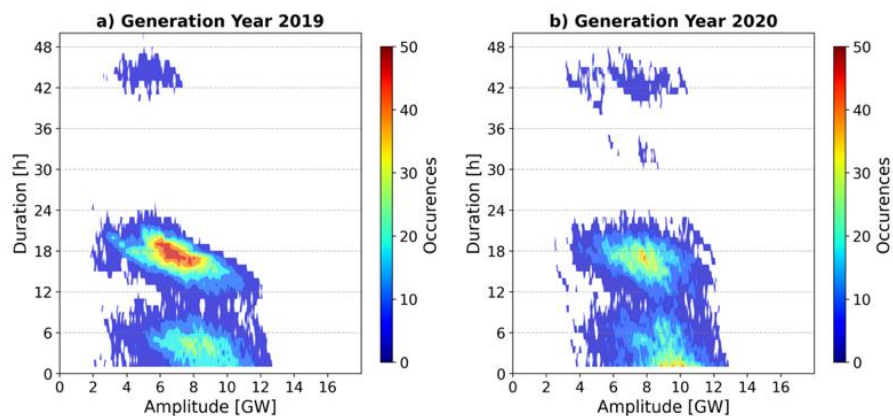
Area	Inflödesperiod	Maximal produktion [GW]		Minimal produktion [GW]		Maximalt magasininnehåll [GWh]		Rampningsbegränsning [GWh/h]	
		Ref	VFC 2.5	Ref	VFC 2.5	Ref	VFC 2.5	Ref	VFC 2.5
SE1	Låg	4,91	-0,25	0,59	0,15	15374	-1760,6	0,92	-0,02
	Medel	4,99	-0,22	0,41	0,08	14520	-309,8	0,77	-0,07
	Hög	4,61	-0,18	0,28	0,31	15382	551,7	0,35	-0,43
SE2	Låg	6,47	-0,03	0,38	-0,07	12127	-2,1	0,85	-0,13
	Medel	6,72	-0,05	1,07	-0,02	9748	66,9	0,86	0,04
	Hög	6,75	0,04	1,22	0,01	12127	1	1,27	0,00
SE3	Låg	1,2	0,01	0,16	-0,01	1850	5,4	0,16	0,00
	Medel	1,25	0,01	0,19	0,02	1965	6,8	0,24	0,00
	Hög	1,25	0,02	0,38	-0,01	2686	78,4	0,15	-0,03
SE4	Låg	0,11	0	0,01	0	112	0	0,02	0,00
	Medel	-	-	-	-	-	-	-	-
	Hög	0,12	0	0,02	0	125	2	0,01	0,00

Den största påverkan av VFC 2.5 syns i SE1. Möjligheten att lagra vatten har minskat till följd av kraven på minimitappning och minimispill, vilket avspeglas i parametrarna för minimal elproduktion och maximalt magasininnehåll. Vidare har även parametern för maximal effekt minskat. Anledningen till detta är att man i den detaljerade modellen får färre tillfällen med mycket hög elproduktion och den traditionella enstationsekvivalenten bortser då från dessa toppar. Detta indikerar att en enkel ekvivalent inte är tillräcklig för att representera hur vattenkraften körs i extrema situationer.

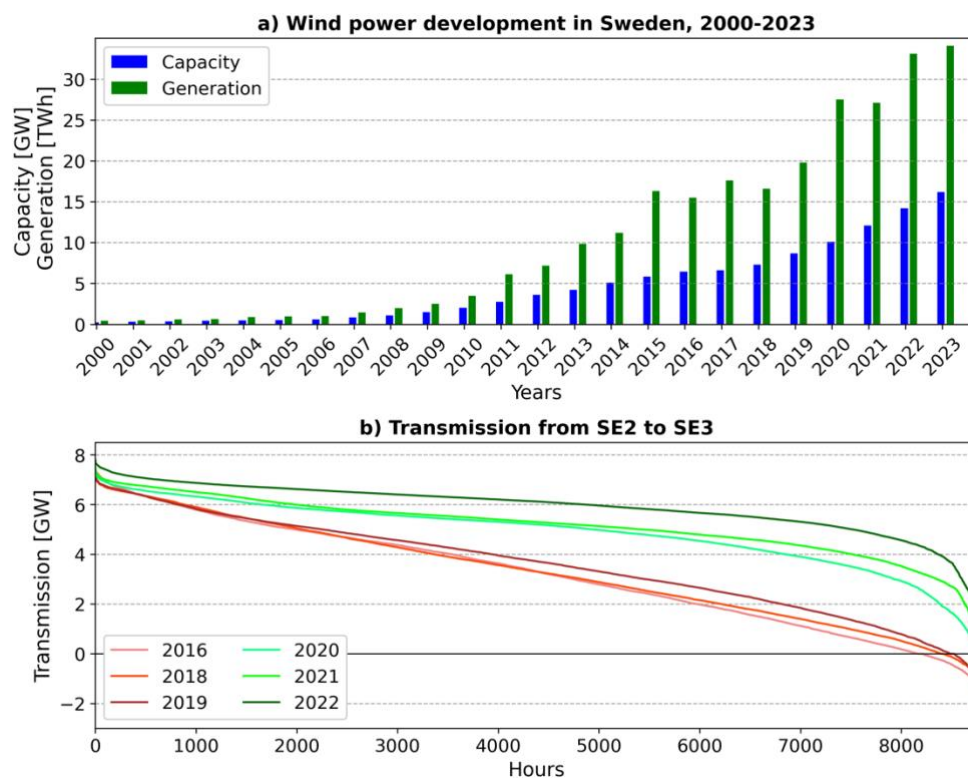
3.2 VATTENKRAFTENS ROLL I ETT FRAMTIDA ENERGISYSTEM JFR HISTORISKT

Figur 2 illustrerar den uppmätta driften av vattenkraft för åren 2019 och 2020 med avseende på amplitud, varaktighet och antal förekomster. Fram till år 2019 var produktionsmönstret för vattenkraft och de sydgående transmissionsflödena starkt kopplade till intradagsvariationer i södra Sverige. Detta visas i Figur 2a där det röda området visar ofta återkommande händelser vid

vattenkraftsdrift vid 6–8 GW under på varandra följande perioder om 15–20 timmar. Som framgår av Figur 2b minskar dock detta mönster från och med år 2020. Den svagare kopplingen till intradagsvariationer för vattenkraft förklaras med utbyggnaden av vindkraft och en lägre driftsäker södergående överföringskapacitet mellan elområdena SE2 och SE3. Fram till år 2019 utgjorde vindkraften en mindre andel av elproduktionen och var relativt jämnt fördelad mellan norra och södra Sverige (Energimyndigheten, 2023). Det skedde dock en stor ökning av vindkraftsproduktionen under år 2020, delvis på grund av en ökad installerad effekt, men till stor del på grund av ett år med bättre vindförhållanden. Sedan år 2020 har vindkraften fortsatt att växa, och det nästan uteslutande i de nordliga regionerna (Energimyndigheten, 2023). På grund av den ökade vindkraftsproduktionen främst i norra Sverige har således det sydgående transmissionsflödet ökat och vattenkraftens driftmönster förändrats (se Figur 3 för vindkraftsutbyggnad och förändringar i de sydgående transmissionsflödena).



Figur 2 Vattenkraftproduktion för år 2019 (a) och 2020 (b) från statistik från Sveriges Stamnätsoperatörer, Svenska kraftnät (2023)

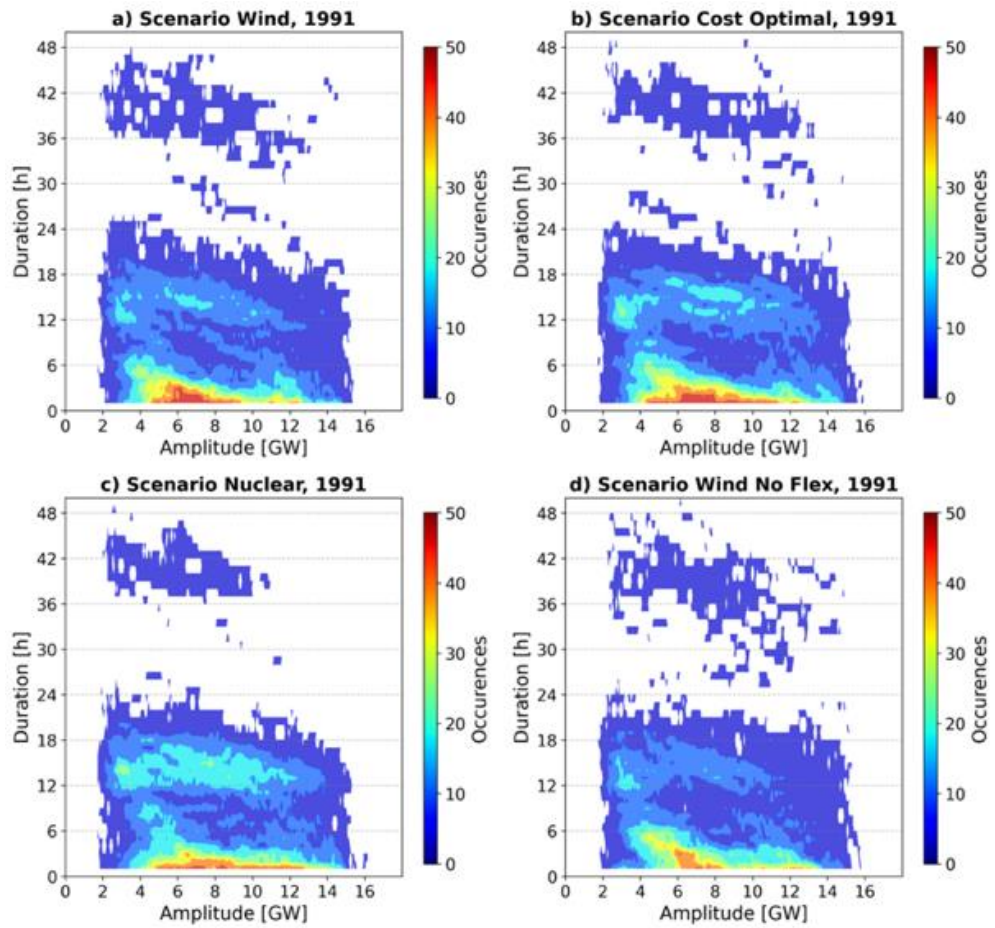


Figur 3 Utbyggnaden av svensk landbaserad vindkraft sedan år 2000 (a) samt hur elöverföringen förändrats mellan prisområde SE2 och SE3 under några av de senaste åren (b). Noterbart är att när produktionen från vindkraft ökar år 2020 ändras både överföringen mellan prisområde SE2 och SE3, samt vattenkraftens driftmönster (Figur 4).

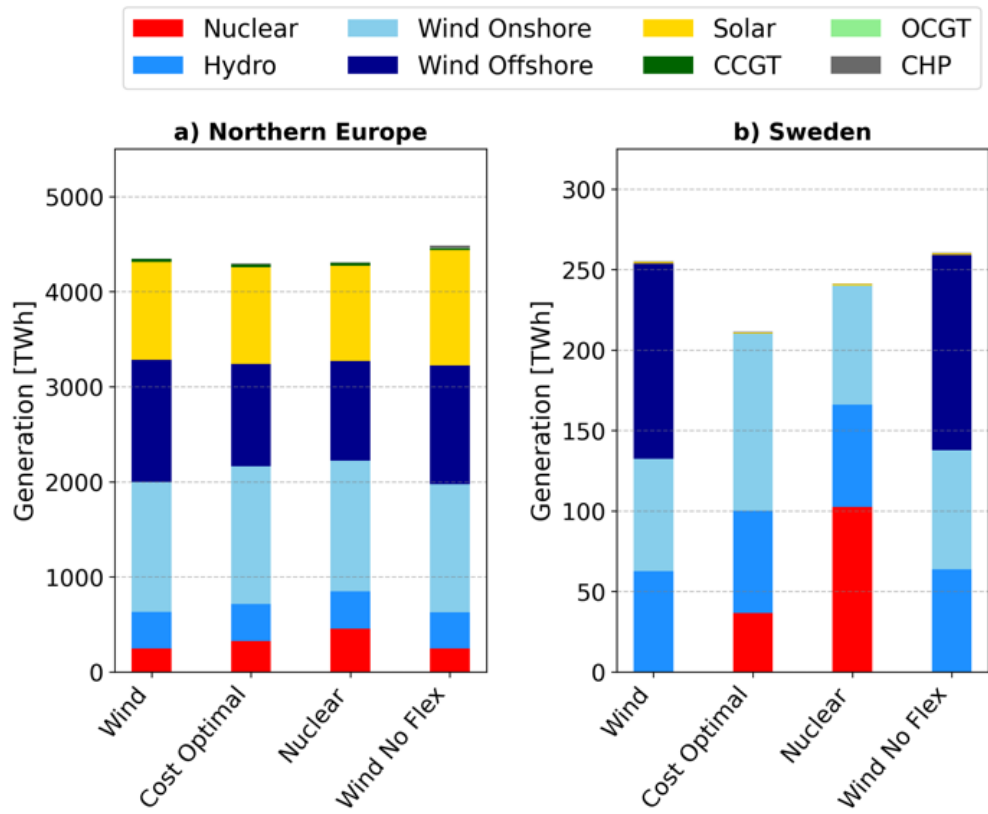
Figur 5 visar driftmönstret för svensk vattenkraft för de fyra modellerade framtidsscenerierna. De resulterande vattenkraftsproduktionsmönstren är i allmänhet ganska lika för alla de undersökta scenarierna, även om det finns en tendens till mer frekvent drift under perioder på 12–15 timmar för kärnkraftssceneriet (Figur 5c) och mindre frekventa 1-timmeselement för scenariot med vind utan flex (Figur 5d). En jämförelse mellan resultaten i Figur 5 och den historiska utvecklingen i Figur 2 visar att trenden med en svagare korrelation mellan vattenkraftproduktion och variationer i intradagsbelastningen fortsätter och förstärks i de framtida energisystem som modelleras, vilket tyder på att vattenkraften i större utsträckning kompletterar vindkraften snarare än att balansera efterfrågan. I och med att vattenkraften är byggd för att hantera

säsongsvariationer så väl som dygnsvariationer så har vattenkraften god förmåga att hantera vindkraftens variationer på flera dygn till upp till ca 10 dagar.

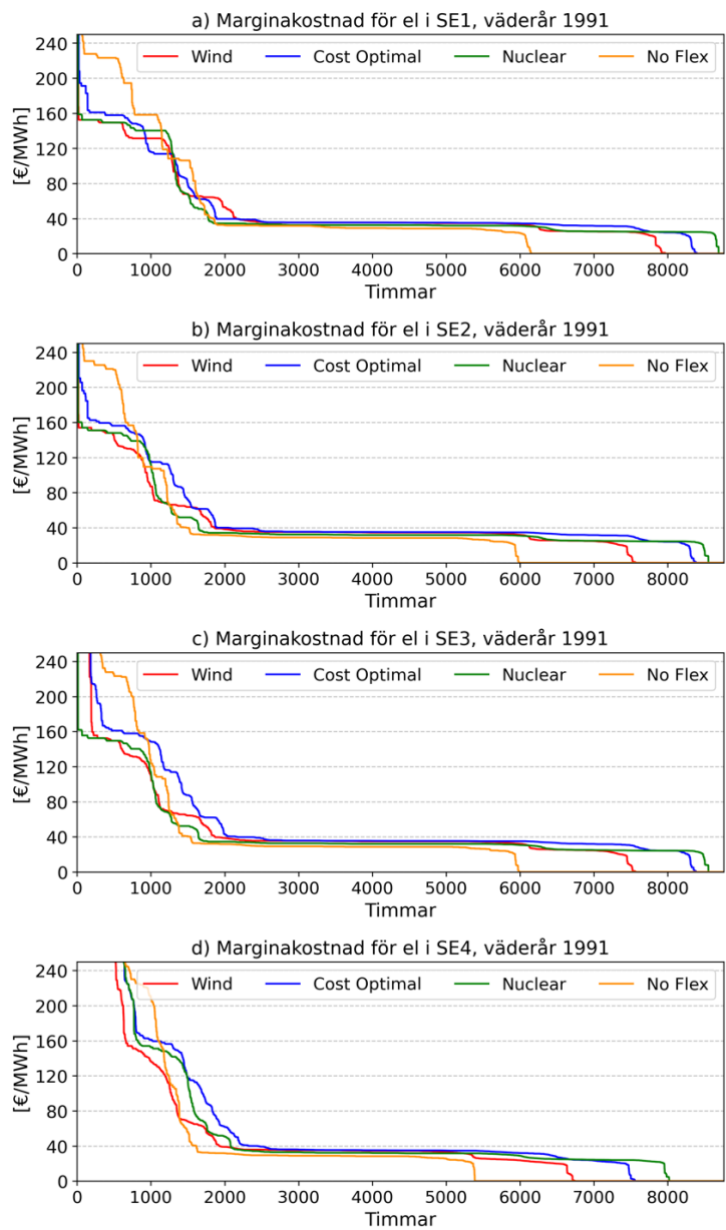
Anledningen till att det är liten skillnad för vattenkraftsdriften mellan de undersökta scenarierna är att den totala elproduktionsmixen för norra Europa är ganska likartad för alla scenarier, vilket visas i Figur 6a, trots väsentlig skillnad i elproduktionsmix i Sverige (Figur 6b). Vattenkraftsproduktionen allokeras i första hand till perioder med högt värde på el. Eftersom Sverige är en del av ett sammansatt europeiskt elsystem påverkas värdet av el i Sverige väsentligt av omgivningen. Detta stöds ytterligare av de resulterande marginalkostnaderna för el för de fyra scenarier som visas i Figur 7. Som synes är marginalkostnaden likartad för scenarierna Vind, Kostnadsoptimal och Kärnkraft.



Figur 5 Vattenkraftproduktion under det meteorologiska året 1991 för fyra framtidsscenarier med hänsyn till elsystemets utveckling.



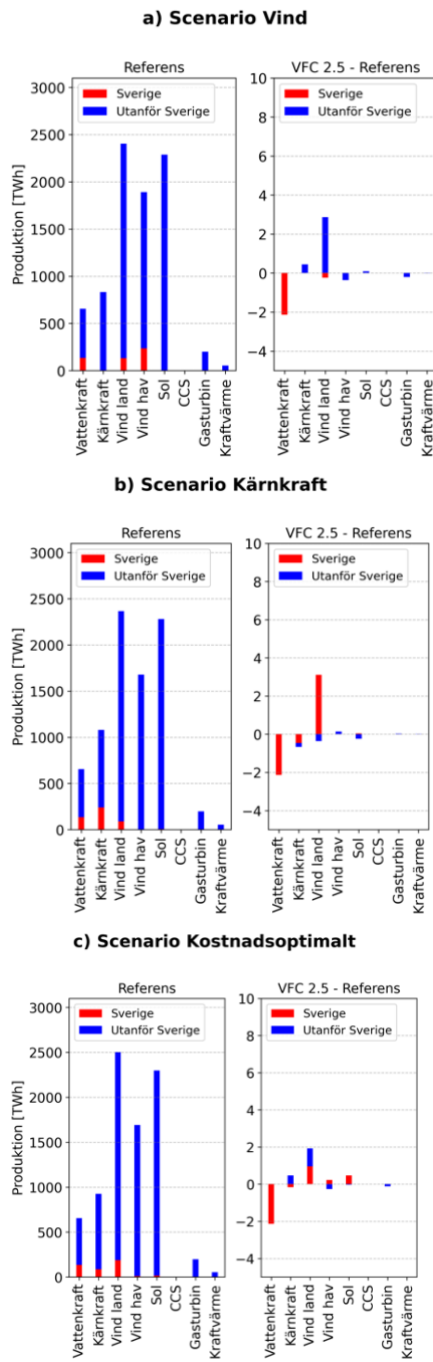
Figur 6 Elproduktionsmixar igenomsnitt för de två väderåren i a) norra Europa och b) Sverige för de olika framtidsscenarioer som modellerats.



Figur 7 Sorterad marginalkostnad för el för de fyra scenarierna med hänsyn till elsystemets utveckling.

3.3 VATTENFÖRVALTNINGSCYKEL 2.5

Figur 8 nedan visar hur VFC 2.5 påverkar elproduktionens sammansättning för de tre framtidsscenarioer som definierats ovan. Påverkan från VFC 2.5 är att den svenska vattenkraften minskar sin produktion med drygt 1 TWh per år (Figur 8 visar påverkan över den modellerade tvåårsperioden), och som framgår av Figur 8a-c blir effekterna av VFC 2.5 olika beroende på vilket framtidsscenario som antas. För scenariot Vind kompenseras bortfallet från svensk vattenkraft huvudsakligen med landbaserad vindkraft utanför Sverige då Sverige redan har en stor mängd elproduktion från havsbaserad vindkraft, och således finns det ett större ekonomiskt värde att placera den kompletterande vindkraften utanför Sverige. I scenariot Kärnkraft kompenseras istället vattenkraftens bortfall huvudsakligen med landbaserad vindkraft i Sverige, detta då andelen elektricitet från vindkraft är låg i Sverige på grund av den intvingade mängden kärnkraft. I det kostnadsoptimala scenariot, vilket inkluderar 5 GW livstidsförlängd kärnkraft i Sverige, kompenserar lika delar landbaserad vindkraft i Sverige och utanför Sverige bortfallet från vattenkraften. Gällande tekniker som möjliggör variationshantering, t.ex. elektrolysörkapacitet, vätgaslager, värmelager, batterier och värmepumpar, påverkas investeringarna endast marginellt för VFC 2.5.



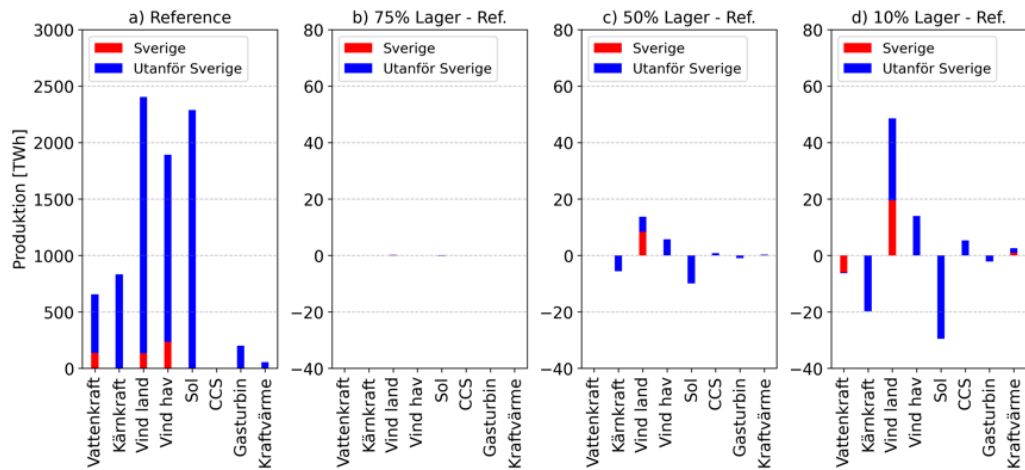
Figur 8 Förändring i produktion till följd av VFC 2.5 för tre möjliga framtida norra Europa och den modellerade tvåårsperioden.

3.4 KÄNSLIGHETSANALYS: KONSEKVENSER AV MINDRE VATTENKRAFTLAGER

Miljöalternativen som avser att begränsa avvikelserna från naturlig vattenföring (miljöalternativ A och B i Svenska kraftnät, 2023) undersöks i energisystemmodellen genom att reducera den ekvivalenta lagerkapacitet som erhållits från den detaljerade vattenkraftmodellen. Vi gör detta för Vind-fallet som antas vara i störst behov av flexibilitet och därmed mest känsligt för förändringar i vattenkraftens lagerförmåga. Det är viktigt att notera att det är just den ekvivalenta lagerkapaciteten som reducerats, och att detta gjorts helt utan koppling till den detaljerade vattenkraftsmodellen. Det kan antas sannolikt att det inte är ett linjärt förhållande mellan en minskning av lagarekapaciteterna i den detaljerade vattenkraftmodellen och den resulterande minskningen av den ekvivalenta lagerkapaciteten. Det är också viktigt att poängtera att elsystemmodellen bara kan ge indikationer om övergripande påverkan på prisområdesnivå och ger ingen information om konsekvenser för enskilda kraftverk.

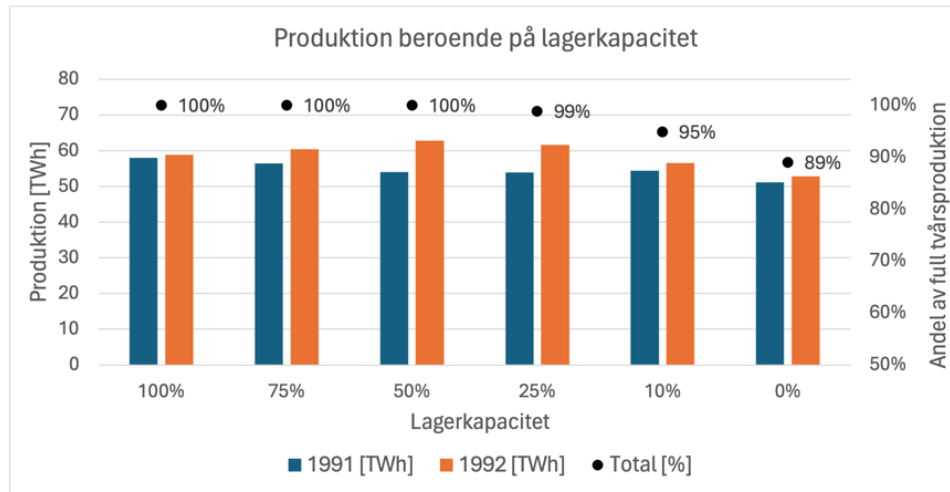
Som visas i Figur 9 förändras den kostnadsoptimala elproduktionsmixen inte alls om den modellerade lagerkapaciteten minskar med 25%, men vid en minskning med 50% förändras produktionsmixen. Mindre vattenkraftslager innebär att de kostnadsoptimala investeringarna i vindkraft på land ökar medan solelinvesteringar och kärnkraftinvesteringar minskar. Anledningen till denna omfördelning är att vattenkraften tydligt minskar sin förmåga att hantera mellanårsvariationer genom att flytta vatten från ett våtår (1992) till ett torrår (1991). Effekterna av en minskad förmåga att hantera mellanårsvariationer beskrivs i mer detalj nedan. En minskning av den aggregerade lagerkapaciteten med 90% (Figur 9d) medför en minskning av vattenkraftens produktion motsvarande 5% under den modellerade tvåårsperioden. Dessutom expanderar vindkraften kraftigt både i Sverige och i omkringliggande länder.

Elproduktion (och diff) över två år



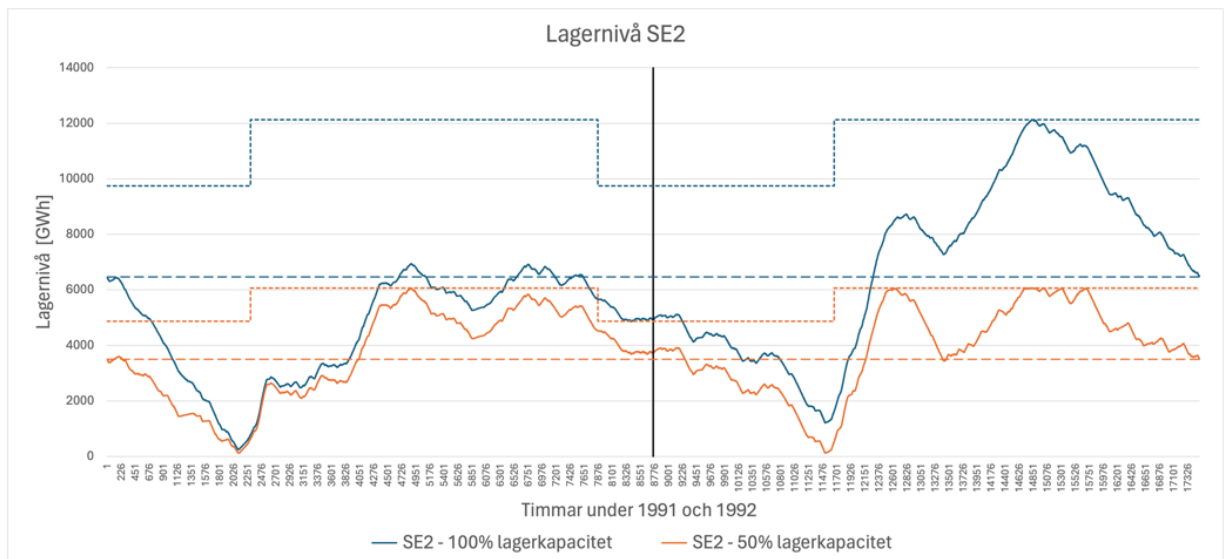
Figur 9 Elproduktionen i norra Europa för den analyserade tvåårsperioden samt förändringar av denna till följd av minskad aggregerad lagernivå.

Förmågan att hantera mellanårsvariationer visualiseras i Figur 10. Tillrinningen som använts är ca 10 TWh större för väderåret 1992 jämfört med 1991, men som visas i Figur 10 är produktionen från svensk vattenkraft i princip lika för de båda åren när modellen har 100% lagerkapacitet (endast vattenkraft kopplad till storskalig lagring är inkluderad i Figur 10, den totala produktionen är i snitt 65 TWh), vilket betyder att en ansevärd mängd vatten flyttats från 1992 till 1991. Dock, redan vid en minskning av lagerkapaciteten med 25% ökar skillnaden i produktion mellan åren, och vid en minskad lagerkapacitet med 50% är skillnaden i produktion mellan åren nästan 10TWh, d.v.s. att möjligheten att flytta vatten mellan åren har i stort sett gått förlorad. Vid en minskad lagerkapacitet med 75% förändras inte bara fördelningen av vatten mellan åren utan en del produktion går också förlorad, och utan lagerkapacitet alls, alltså en förenklad representation av naturlig vattenföring, minskar vattenkraftproduktionen med 11%.



Figur 10 Beräknad årsproduktion från vattenkraften i Sverige i förhållande till aggregerad lagerkapacitet. Notera att beräkningarna genomförts endast med en förenklad vattenkraftbeskrivning och endast kan ge grova trender.

Figur 11 visar vattennivån i det ekvivalenta lagret i SE2 för två fall, 100% och 50% lagerkapacitet, under hela den modellerade tvåårsperioden (årsskifte markerat med en vertikal svart linje). Den heldragna linjen visar vattennivån per timme, den streckade markerar att start- och slutnivån har samma värde, och den punktade linjen visar den maximala nivån som tillåts (som är säsongsb beroende). Genom att jämföra lagernivån vid starten 1991 och vid årsskiftet framgår det att lagernivån minskat med 1,5 TWh för fallet med 100% lagerkapacitet, dvs att vatten "flyttats" från 1992 till 1991 (i beräkningarna antas att 1991 och 1992 cyklas i oändlighet). Motsvarande jämförelse för fallet med 50% lagerkapacitet visar att ca 0,2 TWh flyttats i motsatt riktning, från 1991 till 1992. Vidare visar Figur 11 att den maximala lagernivån endast är begränsande en gång för fallet med 100% lagerkapacitet, medan den övre gränsen blir en begränsning flertalet gånger för fallet med 50% lagerkapacitet, i synnerhet under vädåret 1992 med ett högre vatteninflöde.



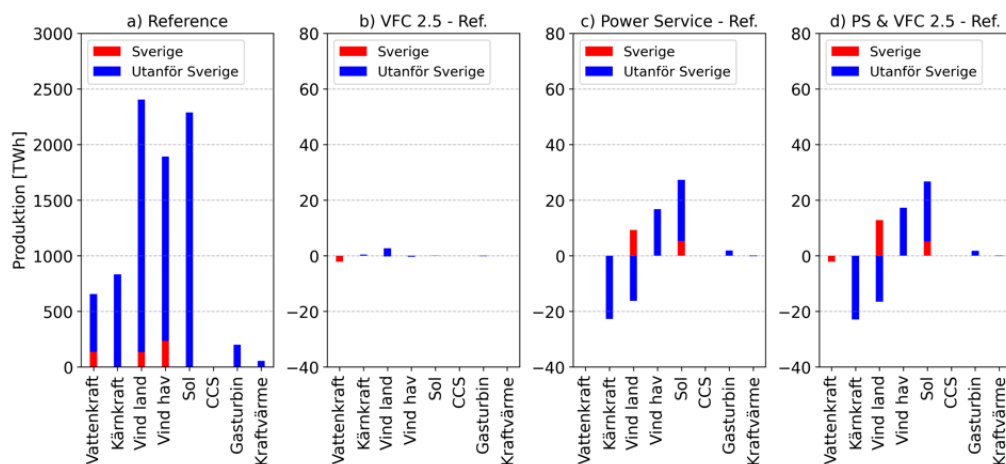
Figur 11 Aggregerad nivå i vattenmagasin i SE2 över den undersökta tvåårsperioden.

Som framgår från Figur 11 kompenseras den minskade produktionen under vädåret 1991 när lagerkapaciteten är reducerad med 50% med en ökad produktion av vindkraft. Dock producerar vindkraften såklart under båda åren, och således har en ny jämvikt uppnåtts som påverkar alla tekniker i systemet. Vindkraft har fördelen att den, i de nordiska länderna, producerar mer vintertid än sommartid, vilket minskar behovet av säsongslagring av vattenkraft. Något som dock bör belysas är det faktum att den mest kostnadseffektiva lösningen (enligt modellen) för att kompensera en minskad förmåga att hantera mellanårsvariationer är att investera i mer vindkraft som också har stora variationer i årsproduktion mellan år. Det är också ett faktum att vindkraft generellt är den dominerande tekniken i det modellerade geografiska området, vilket kan leda till stora skillnader i elproduktion från vindkraft mellan år. Låg vindkraftsproduktion korrelerar inte med torrår i det nordiska systemet, men torra vindfattiga år riskerar trots allt inträffa och ställer krav på åtgärder med låga investeringskostnader som kan användas för dessa enstaka tillfällen.

3.5 KÄNSLIGHETSANALYSER: KONSEKVENSER AV ATT TA HÄNSYN TILL BEHOVET AV UPPREGLERING

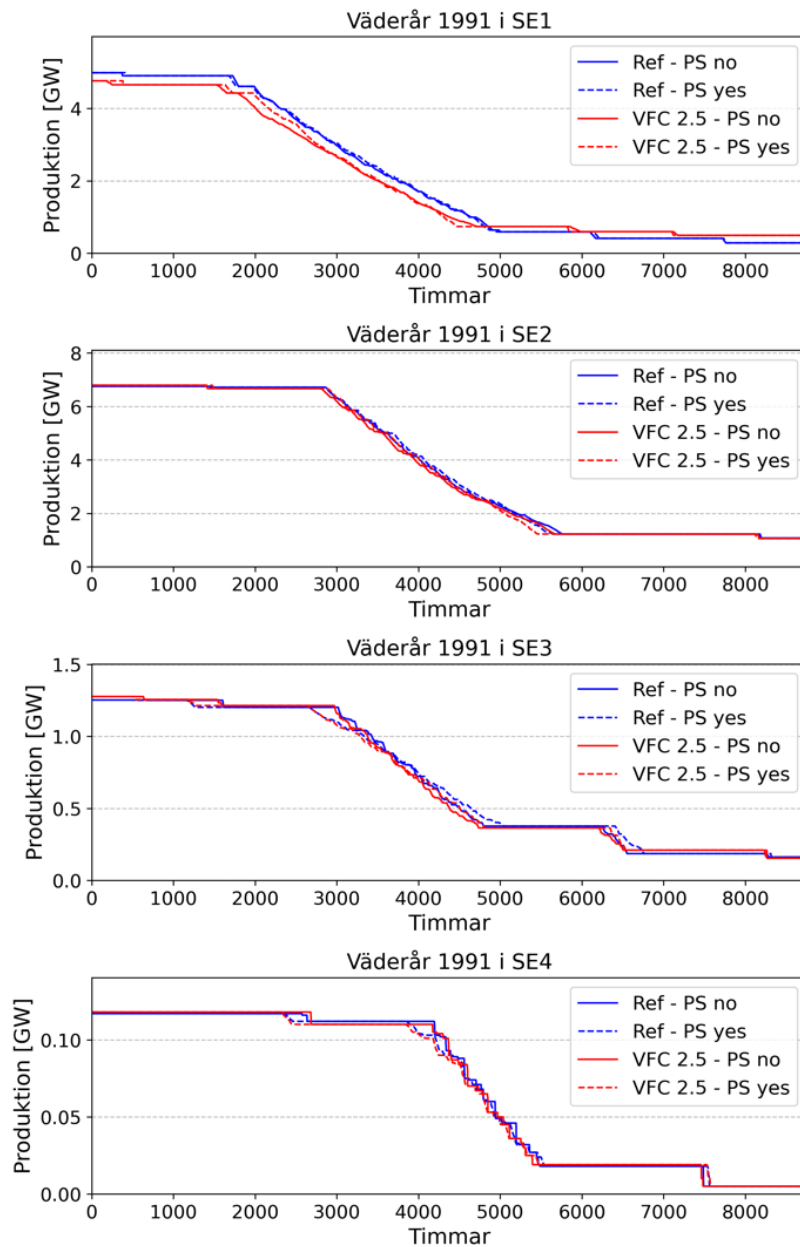
Konsekvenser av att ta hänsyn till uppreglering är endast utvärderat i framtidsscenarioet Vind då behovet av uppreglering för balansering av vindkraft är som störst i detta fallet. Uppreglering syftar till att tillgängliggöra effekt som kan täcka upp för oförutsedda produktions- eller transmissionsbortfall (N-1) och variationer från efterfrågan på el, vind- och solkraft inom timmen och stimulerar därmed investeringar i tekniker som bidrar med effekt till låg kostnad. I beräkningarna representeras detta förenklat av att det ska finnas tillräckligt med tillgänglig effekt till uppreglering på olika tidsskalor inom timmen. I det undersökta fallet möts behovet av uppreglering framförallt med flexibilitet på användarsidan. Investeringar i värmepumpskapacitet med tillhörande värmelager ökar till följd av villkoren på kapacitet för uppreglering då värmepumpar har en relativt låg investeringskostnad och möjlighet att agera på korta tidsskalor. En ökad värmepumpskapacitet med värmelager reducerar investeringar i elektrolysoverkapacitet och vätgaslager som bidrar med flexibilitet på samma tidsskalor samtidigt som det stimulerar en total ökning av elproduktion från vindkraft. Investeringar i batterier ökar också till följd av krav på tillgänglig kapacitet för uppreglering, vilket stimulerar investeringar i mer solkraft. Den sammantagna ökningen av solkraft och vindkraft i Sverige resulterar i en något reducerad elproduktion från kärnkraft och landbaserad vindkraft utanför Sverige.

Elproduktion (och diff) över två år



Figur 12 Produktion för den tvåårsperiod som undersöks samt förändringen av denna med hänsyn till a) VFC 2.5, b) behov av uppreglering, c) VFC 2.5 samt behov av uppreglering.

Som visas i Figur 13 har inkluderingen av uppreglering ytterst liten påverkan på hur den svenska vattenkraften drifas. I modellen kan vattenkraften bidra med systemtjänster när den producerar på minimilast eller dellast (reserver för nedreglering inkluderas inte i modellen), och som framgår av Figur 13 väljer modellen inte att generellt reservera effekt för systemtjänster då det finns ett stort värde för systemet att nyttja den maximala produktionen från vattenkraften under vissa timmar. Det finns korta perioder när systemtjänsterna ändrar vattenkraftens körprofil på höga nivåer, framförallt i SE3 och SE4, men det är svårt att säga om skillnaderna beror på att en del av vattenkraftens effekt reserveras för systemtjänster eller om det är en effekt av att systemet fått en ny optimal driftpunkt på grund av den justerade kapacitetsmixen.



Figur 13 Storleksorterad vattenkraftproduktion för de fyra elområdena utan hänsyn till behov av uppreglering eller VFC 2.5 (blå heldragen linje, med hänsyn till behov av uppreglering (blå streckad linje), med hänsyn till VFC 2.5 (röd heldragen linje) med hänsyn till VFC 2.5 samt behov av uppreglering (röd streckad linje).

4 Slutsatser

4.1 PÅVERKAN PÅ VATTENKRAFTEN AV MILJÖANPASSNINGAR

Resultaten i avsnitt 3 visar att miljöåtgärdsscenario VFC 2.5 inte har någon större inverkan på ekvivalenterna, vilket kan tolkas som att just dessa miljöåtgärder (d.v.s. krav på minimitappning och minimispill i endast 44 större vattenkraftverk) inte heller har någon större inverkan på vattenkraftens reglerförmåga. Dessa resultat ligger i linje med slutsatserna från tidigare studier (t.ex. Bladh & Funkquist, 2021; Bladh m.fl., 2023; Sandkvist & Malaussène, 2023; Jaldegren, 2023; Ali & Alvarado, 2024).

Det är dock viktigt att notera att konsekvenserna av krav på minimitappning och minimispill varierar för olika kraftverk, för olika tillrinningsscenarier och för olika tidshorisonter. Den generella bilden som framträder i dessa studier är emellertid att vattenkraftssystemen i de studerade älvarna har en god förmåga att styra elproduktionen till de timmar då vattenkraften behövs som mest även med antagande om miljöanpassad vattenkraft enligt VFC 2.5. Detta innebär att de produktionsminskningar som blir resultatet av krav på minimispill framför allt styrs till perioder med lägre elpriser. De vattenflöden som uppstår i älvarna till följd av minimispill och minimitappning förefaller inte utgöra någon större inskränkning i vattenkraftens reglerförmåga; antingen kan vattnet tas emot och lagras i magasin nedströms eller så har nedströms liggande kraftverk egna krav på minimispill eller minimitappning av samma storleksordning, vilket innebär att vattnet strömmar vidare.

Det är också viktigt att notera att krav på minimispill oundvikligen resulterar i minskad elproduktion i de berörda kraftverken. Ju mer omfattande krav på minimispill som införs, desto större blir naturligtvis den förlorade vattenkraftsproduktionen. Det kommer att bli en viktig uppgift att väga miljönytta på lokal nivå (förbättrad konnektivitet i vattendrag) mot miljökonsekvenserna på global nivå, där de sistnämnda kan hänföras både till att vattenkraften i sig är en förnybar energikälla och att vattenkraftens reglerförmåga underlättar integrationen av variabel, förnybar elproduktion, som t.ex. vindkraft och solkraft.

I det här projektet har vi endast simulerat miljöåtgärder i form av minimitappning och minimispill i enlighet med VFC 2.5. Det bör dock framhållas att det är osäkert vilka miljövillkor som i slutändan fastställs av miljödomstolarna. Moderna miljövillkor kan också komma att innefatta begränsningar av vilka vattennivåer man får ha i magasinen under olika tider på året samt begränsningar av hur snabbt vattennivån får ändras. Sådana begränsningar kommer förmodligen ha en betydligt större inverkan på vattenkraftens reglerförmåga. I t.ex. extremfallet då man kräver ett mer eller mindre konstant flöde på en älvsträcka mellan två kraftverk så måste kraftverket uppströms hålla en konstant elproduktion under motsvarande tidsperiod. Beroende på magasinets storleken i det nedströms liggande magasinet kan även detta kraftverk tvingas producera på en mer eller mindre konstant nivå. Under dessa omständigheter har kraftverken i praktiken mycket lite reglerförmåga kvar. Det finns därför ett stort behov av att fortsätta arbetet med att simulera vattenkraftens reglerförmåga ifall hårdare krav på miljöanpassningar ställs samt att analysera vilken inverkan detta skulle få på vattenkraftens roll i energisystemet.

4.2 VATTENKRAFTSMODELLER

Vattenkraften har stor betydelse för det nordiska elsystemet både som leverantör av förnybar elproduktion och för dess reglerförmåga. Reduceras elproduktionen i vattenkraften måste detta kompenseras med andra investeringar för att uppnå ett koldioxidneutralt energisystem. Underskattas reglerförmågan så innebär det att kostnaderna för att balansera variabel elproduktion överskattas och vice versa. Det är därför utomordentligt viktigt att i systemstudier simulera vattenkraften med modeller som på ett så korrekt sätt som möjligt speglar vattenkraftens bidrag till elsystemet.

Som diskuterats i avsnitt 2.1 är man av tvungen att förenkla representationen av vattenkraften i energisystemmodeller både av beräkningstekniska skäl och p.g.a. den omfattande datainsamling som annars skulle krävas. Erfarenheterna både från detta projekt och närliggande forskning visar dock att den typ av ekvivalenter som traditionellt har använts i energisystemmodeller behöver förfinas för att t.ex. kunna fånga upp hur vattenkraften kan användas under extrema situationer (såsom långa perioder med väldigt hög eller låg vindkraftsproduktion) och för att representera andra typer av miljövillkor än minimitappning och minimispill.

Det finns flera möjliga vägar för hur vattenkraftsekvivalenter kan förbättras. Ett sätt är att lägga på ytterligare bivillkor i den ekvivalenta modellen för att t.ex. representera maximal eller minimal elproduktion under en längre tidsperiod. En annan variant är att aggregera vattenkraftverk i mindre enheter, så att man t.ex. har en ekvivalent för ett antal kraftverk inom en viss älv. Detta ger en bättre representation av de fysiska begränsningarna i vattenkraften. Vilken detaljnivå som är möjlig beror på hur många sådana ekvivalenter per elområde som energisystemmodellerna kan hantera.

Det finns också anledning att närmare studera vilka egenskaper som en god ekvivalent ska ha. De metoder som utvecklats i Blom (2023) och efterföljande arbeten bygger på att minimera den absoluta eller kvadratiska avvikelsen mellan elproduktionen från den detaljerade resp. ekvivalenta modellen. Erfarenheten från detta projekt är emellertid att en mänsklig expert fokuserar på andra aspekter som t.ex. hur väl ekvivalenten representerar vattenkraftens förmåga att leverera el då behovet är som störst eller att hålla tillbaka elproduktionen (d.v.s. lagra vatten utan att det medför ökat spill) då behovet är lågt.

Syftet med vattenkraftsekvivalenter är att representera hur vattenkraften kommer att användas i energisystemet. Oftast används energisystemsimuleringar för att studera konsekvenserna av olika framtidsscenarioer, där elsystemet kan skilja sig på väsentliga punkter från dagens system. Därför ska en bra vattenkraftsmodell representera vattenkraftens förmåga att reglera elproduktionen, vilket inte nödvändigtvis är detsamma som att modellen representerar hur vattenkraften har använts historiskt — i ett framtida system kan vattenkraften användas på ett sätt som skiljer sig väsentligt från idag. Ekvivalenter bör därför ha möjlighet att anpassas till framtida data (t.ex. om tillrinning, nya miljövillkor, o.s.v.) och i så stor utsträckning som möjligt bygga på förenklade modeller av de fysiska och tekniska begränsningar i systemet medan bivillkor som lagts till för att imitera observerade produktionsmönster bör användas med försiktighet.

De traditionella ekvivalenterna ger en grov uppskattning om vattenkraftens reglerförmåga. Tack vare den ökade beräkningskapaciteten i moderna datorer är det idag rimligt att öka detaljnivån i de modeller som används. För studier av framtidens energisystem finns det därmed ett behov att vidareutveckla och förfina metoderna för att identifiera ekvivalenta modeller. Detta

arbete behöver göras i samspel med vidareutvecklingen av energisystemmodeller för att säkerställa modellernas kvalitet.

4.3 RESULTAT FRÅN ENERGISYSTEMSIMULERINGARNA

Resultat från arbetet visar att vattenkraften går från att hantera lastvariationer inom dygnet till att hantera vindvariationer på tidsskalan flera dygn till vecka. Analyser av historiska data visar att den här förändringen i vattenkraftens roll redan har börjat i och med ökad vindkraftsproduktion i de nordligaste svenska elområdena där vattenkraft nu samsas med vindkraften om överföringskapacitet till södra Sverige. En vattenkraftproduktion anpassad efter vindkraftens produktionsmönster kan förväntas vara det nya normala, för även om överföringskapaciteten från norra Sverige planeras att utökas så byggs samtidigt mer vindkraft i norra Europa och analyserna visar att vindkraftens produktionsmönster kan förväntas ha stor påverkan på värdet av el i Sverige oavsett elproduktionsmix inom Sverige.

Vattenförvaltningscykeln 2.5 innebär en reduktion i vattenkraftproduktion om ca 1 TWh/år som i de studerade scenarierna ersätts med landbaserad vindkraft i Sverige eller omgivande länder.

Om vattenkraftens lagringskapacitet begränsas så reducerar det i första hand vattenkraftens förmåga att hantera variationer med riktigt lång uthållighet så som mellan sommar och vinter och mellan år. Variationerna mellan sommar och vinter förväntas minska i och med klimatförändringarna som innebär ett lägre elbehov vintertid för uppvärmning samtidigt som mer nederbörd faller som regn under höst och tidig vinter och därmed kan nyttjas för vattenkraftproduktion samma vinter. En ökad andel vindkraft i elsystemet innebär också en ökad tillgång på elproduktion vintertid eftersom vindkraften producerar mer på vintern i norra Europa. Tillgången på vindkraft varierar dock, precis som vattenkraften, mellan år, och även om det inte finns någon tydlig korrelation mellan år med låg vindkraftsproduktion och tillrinning i norra Europa så finns ett fortsatt behov av hantering av mellanårsvariabilitet där vattenkraften är svår att ersätta. Det finns därför ett behov av att studera vattenkraftens roll över ett stort antal väderår för att bättre ansätta vattenkraftens värde när det gäller hantering av mellanårsvariabilitet samt vilka alternativ som finns att hantera detta i elsystemet. Modellen som används för beräkningarna i rapporten har

perfekt information om tillrinning för de två studerade väderåren (*"perfect foresight"*), vilket innebär en överskattning av vattenkraftens förmåga att hantera variationer mellan år. En konsekvens av mindre lagervolymer bör också studeras med en beräkningsmodell där tillgången på information om framtida tillrinning begränsas.

Vid mycket omfattande begränsningar av vattenkraftens lagringskapacitet ökar också mängden vatten som måste spillas och årsproduktionen från vattenkraften minskar. För att bättre kunna ansätta vid vilken nivå på lagringsbegränsning det inträffar behövs fortsatta studier där lagernivåerna begränsas i detaljerade vattenkraftmodeller för att generera nya ekvivalenter som kan användas för analys på energisystemnivå.

Andra tekniker bidrar framförallt med systemtjänster i framtiden medan vattenkraftens fulla produktionspotential används för att hantera variationer på dagen före- och intradagmarknaden. Det finns flera alternativ på efterfrågesidan (värmepumpar, elbilar) och i form av stationära batterier som kan bidra med systemtjänster till låg kostnad. Samtidigt förväntas vattenkraften oftare producera på maxlast eller minimilast (dellast) i framtiden, eftersom den väntas utgöra en mindre del av elsystemet samtidigt som variationer av värdet på el förväntas vara större än idag.

5 Referenslista

Abrahamsson (2020) The impact of climate change on future Swedish heating and cooling demand, Master thesis, Chalmers University of Technology (2020) <https://hdl.handle.net/20.500.12380/302050>.

Ali, S. & Alvarado, A. (2024). Inverkan av miljövillkor på vattenkraftverkens elproduktion och reglerförmåga i Klarälven, kandidatexamensarbete, KTH Skolan för elektroteknik och datavetenskap, Stockholm 2024.

Bergström, S. (1995). The HBV model. In: Singh VP (ed) Computer Models of Watershed Hydrology., *Water Resources Publications*, pp. 443–476, 1995.

Bladh, J. & Funkquist, J. (2021). Miljöåtgärders påverkan på vattenkraftsproduktionen i Ljungan, Vattenkraftens miljöfond, 2021.

Bladh, J., Funkquist, J. & Näsström, J. (2023). Miljöåtgärders påverkan på vattenkraftsproduktionen i Dalälven, Vattenfall Vattenkraft AB & Fortum Sverige AB, 2023.

Blom, E. (2023). Hydropower Area Equivalents: Reduced Models for Efficient Simulation of Large-Scale Hydropower Systems, doktorsavhandling, TRITA-EECAS-AVL 2023:25, KTH Skolan för elektroteknik och datavetenskap, Stockholm 2023.

Energimyndigheten, 2023. Antal verk, installerad effekt och elproduktion.

ENTSO-E, 2022. System Needs Study - Opportunities for a more efficient European power system in 2030 and 2040, Brussels, Belgium, 2022.

Göransson, L. m.fl. (2018). Impact of thermal plant cycling on the cost-optimal composition of a regional electricity generation system, *Appl Energy*, vol. 197, pp. 230–240, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.04.018.

Jaldegren, P. (2024). Inverkan av moderna miljövillkor på vattenkraftens reglerförmåga: En fallstudie av Ljungan, masterexamensarbete, KTH Skolan för elektroteknik och datavetenskap, Stockholm 2024.

Kullingsjö och Karlsson, 2012, The Swedish Car Movement Data Project; EEVC: Brussels, Belgium

Lilja, D. (2023). Computing Equivalent hydropower models in Sweden using inflow clustering, masterexamensarbete, TRITA-EECS-EX 2023:79, KTH Skolan för elektroteknik och datavetenskap, Stockholm 2023.

Mattsson, N. m.fl. (2021). An autopilot for energy models – Automatic generation of renewable supply curves, hourly capacity factors and hourly synthetic electricity demand for arbitrary world regions, *Energy Strategy Reviews*, vol. 33, p. 100606, 2021, doi: 10.1016/j.esr.2020.100606.

Nordel (1999). Nordel Annual Report 1999.

Planting-Bergloo, T. & Svensson, K. (2024). Jämförelse av värdefaktor och stresstest för att mäta vattenkraftens reglerförmåga vid olika miljövillkor, kandidatexamensarbete, KTH Skolan för elektroteknik och datavetenskap, Stockholm 2024.

Sandkvist, S. & Malaussène, E. (2023). Miljöåtgärders påverkan på vattenkraftens elproduktion och reglerförmåga, kandidatexamensarbete, KTH Skolan för elektroteknik och datavetenskap, Stockholm 2023.

Scharff, R., Göransson, L., Walter, V., Berg, P., Hundecha, Y., Löfblad, E., Holm, J., Unger, T., Blom, E., Söder, L. & Amelin, M. (2023). Klimatförändringarnas inverkan på vattenkraftens produktions- och reglerförmåga. Slutrapport från KLIVA-projektet. Energiforsk rapport 2023:924.

Stock Söderlund, A. & Yesil Aydin, B. (2024). Optimizing Hydroelectric Power Production along the Skellefte River: A comparative study of linear programming and mixed-integer linear programming models, kandidatexamensarbete, KTH Skolan för teknikvetenskap, Stockholm 2024.

Svenska kraftnät (2023). Att kartlägga de konsekvenser för elsystemet som omprövning av vattenkraften medför m.m., redovisning av regeringsuppdrag, ärende nr SvK 2023/610, Svenska kraftnät, Sundbyberg 2023.

Toktarova, A. m.fl. (2021). Design of Clean Steel Production with Hydrogen : Impact of Electricity System Composition, 2021.

Toktarova, A. m.fl., (2022a). Interaction between electrified steel production and the north European electricity system, *Appl Energy*, vol. 310, p. 118584, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118584>.

Toktarova, A. m.fl., (2022b). Thermochemical recycling of plastics – Modeling the implications for the electricity system, *J Clean Prod*, vol. 374, p. 133891, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133891>.

Vattenmyndigheterna (2018). Miljö kvalitetsnormer för kraftigt modifierade vattenförekomster – vattenkraft. <https://www.vattenmyndigheterna.se/tjanster/publikationer/2018/samrad-om-miljokvalitetsnormer-for-kraftigt-modifierade-vattenforekomster---vattenkraft.html>

BILAGA 2: HÅLLBARHETSANALYS AV MILJÖÅTGÄRDER I VATTENKRAFTEN I ETT ELSYSTEMPERSPEKTIV

ERIK LINDBLOM, IVL SVENSKA MILJÖINSTITUTET AB

MIKAEL MALMAEUS, IVL SVENSKA MILJÖINSTITUTET AB

ARVID RENSFELDT, PROFU

JENNY WESTERBERG, PROFU

Sammanfattning

Denna bilaga presenterar en hållbarhetsanalys av ett miljöåtgärdsscenario inom svensk vattenkraft och påverkan olika hållbarhetsmål. Miljöåtgärdsscenarioet bygger på Vattenförvaltningscykel 2.5 (VFC 2.5) och beskrivs närmare i huvudrapporten "Hållbar vattenkraft i framtidens energisystem".

Hållbarhetsanalysen täcker bland annat klimatpåverkan, markanvändning, biologisk mångfald, ekosystemtjänster och behovet av kritiska material. FN:s globala hållbarhetsmål (SDG) används som ramverk för analysen.

Miljöåtgärderna som ingår i VFC2.5 påverkar elsystemet, vilket i sin tur skapar både positiva och negativa hållbarhetskonsekvenser. Analysen bedömer att vattenkraftens miljöåtgärder som ingår i VFC 2.5 främst ger positiva effekter på vattenkvalitet och akvatiska ekosystem, men även kan leda till negativa konsekvenser för markanvändning och klimatpåverkan genom behov av investeringar i ny elproduktion. För att förstå effekterna av miljöåtgärderna, har tre olika scenarier för elsystemets utveckling använts. Resultaten visar att effekterna på klimatpåverkan är små i samtliga scenarier, medan behovet av kritiska mineraler ökar i vissa scenarier, särskilt i ett scenario med kraftig utbyggnad av havsbaserad vindkraft.

De kvantitativa analyserna visade att konsekvenserna för växthusgasutsläpp och behov av kritiska mineraler från de föreslagna miljöåtgärderna är marginella. Effekterna på markomvandling och markanvändning bedöms vara små i jämförelse med omställningen av elsystemet i stort, där storskalig solkraft och biobränslen påverkar mest.

Sammanfattningsvis bedöms att miljöåtgärder i vattenkraften enligt VFC 2.5 medför både positiva och negativa hållbarhetskonsekvenser, där positiva effekter främst syns i form av förbättrad biologisk mångfald i vattenmiljön, medan markanvändning och behovet av kritiska mineraler medför vissa negativa konsekvenser. Därutöver sker också en påverkan på elsystemets olika förmågor vilket behandlas i bilaga 1. Analysen betonar vikten av att beakta dessa åtgärder i ett större systemperspektiv för att säkerställa att både de positiva och negativa effekterna hanteras effektivt.

Summary

This appendix presents a sustainability analysis of environmental measures within Swedish hydropower and their impact on different sustainability goals. The measures are based on the VFC 2.5 scenario, see further description in the main report "Hållbar vattenkraft i framtidens energisystem". The sustainability analysis covers, e.g., climate impact, land use, biodiversity, ecosystem services, and the need for critical materials. The UN's global sustainability goals (SDGs) are used as a framework for the analysis.

The environmental measures in the VFC 2.5 scenario affect the electricity system, which in turn creates both positive and negative sustainability consequences. The analysis assesses that hydropower's environmental measures mainly have positive effects on water quality and aquatic ecosystems but can also lead to negative consequences for land use and climate impact due to investments in new electricity production. To understand the effects of the environmental measures, three different scenarios for the development of the electricity system have been used. The results show that the effects on climate impact are small in all scenarios, while the need for critical minerals increases in certain scenarios, particularly in the scenario with significant expansion of offshore wind power.

The quantitative analyses showed that the consequences for greenhouse gas emissions and the need for critical minerals from the proposed environmental measures are marginal. The effects on land conversion and land use are considered to be small compared to the overall transformation of the electricity system, where large-scale solar power and biofuels have the greatest impact.

In summary, the assessment is that environmental measures in hydropower lead to both positive and negative sustainability consequences, with positive effects primarily seen in the form of improved biodiversity in the aquatic environment, while land use and the need for critical minerals lead to some negative consequences. Additionally, there is also an impact on the various capabilities of the electricity system, which are addressed in the main report and other supplementary reports. The analysis emphasizes the importance of considering these measures from a broader system perspective to ensure that both the positive and negative effects are managed effectively.

Innehåll

1	Inledning	6
1.1	Bakgrund	6
1.2	Projektet "Hållbar vattenkraft i framtidens energisystem"	6
1.3	Hållbarhetsanalys baserat på Vattenförvaltningscykel 2.5 (VFC 2.5)	7
1.4	Fokus på hållbarhetsaspekter	7
2	Frågeställning och metod	9
2.1	Studerat system	9
2.2	Metod och metodutveckling	11
2.2.1	Kvalitativ hållbarhetsanalys	11
2.2.2	Kvantitativ hållbarhetsanalys	15
2.3	Kopplingen mellan de globala hållbarhetsmålen och de svenska miljökvalitetsmålen	17
3	Resultat	20
3.1	Kvalitativ hållbarhetsanalys	20
3.2	Kvantitativ analys	25
3.2.1	Klimatpåverkan	25
3.2.2	Markanvändning	29
3.2.3	Markomvandling	33
3.2.4	Kritiska råmaterial	37
3.3	Fördjupad kvalitativ analys kring vissa hållbarhetsaspekter	40
3.3.1	Klimatpåverkan	40
3.3.2	Markomvandling och vattenmiljö	41
3.3.3	Biologisk mångfald	51
3.3.4	Övriga ekosystemtjänster	60
3.3.5	Kritiska material	65
4	Diskussion	68
5	Slutsatser	72
6	Referenslista	75
Bilaga A:	Globala hållbarhetsmålen delmål	83

Förkortningar och begrepp

GEP	God ekologisk potential
GES	God ekologisk status
LCA	Livscykelanalys
LCI	Livscykelinventering
Miljöåtgärd i vattenkraften	Åtgärder enligt miljöåtgärdsscenario VFC 2.5
MKN	Miljö kvalitetsnorm
NAP	Nationella planen för omprövning av vattenkraften
SDG	FN:s globala hållbarhetsmål (Sustainable Development Goals)
VFC2.5	Vattenförvaltningscykel 2.5 = projektets analyserade miljöåtgärdsscenario, vilket endast omfattar åtgärder i 44 av de 333 storskaliga vattenkraftverken.

1 Inledning

1.1 BAKGRUND

I energiöverenskommelsen om långsiktig inriktning för svensk energipolitik från 2016 slog fem av riksdagens åtta partier fast att Sveriges vattenkraft ska anpassas till modern miljölagstiftning med moderna miljövillkor. Det är en del av Sveriges genomförande av EU:s ramdirektiv för vatten. Energiöverenskommelsen tydliggjorde samtidigt vattenkraftens centrala roll för Sveriges förnybara elförsörjning. Omprövningen av vattenkraften ska därför ske enligt en nationell plan (NAP) som väger behovet av åtgärder som förbättrar vattenmiljön mot behovet av nationell tillgång till elproduktion, reglerförmåga och andra systemtjänster. Tidplanen för omprövningen sträcker sig fram till 2039. Under samma period förväntas elsystemet byggas ut och förändras mycket kraftigt för att nå Sveriges mål om ett helt fossilfritt elsystem 2040. Effekterna av klimatiförändringarna kommer också att bli allt påtagligare. De här processerna kommer att samverka på olika vis med betydande effekter på både elsystem och miljö.

1.2 PROJEKTET "HÅLLBAR VATTENKRAFT I FRAMTIDENS ENERGISYSTEM"

Projektet "Hållbar vattenkraft i framtidens energisystem" (HÅVEN) har haft som målsättning att öka kunskapen om effekterna på elsystem och miljö. Projektet har analyserat hur och i vilken utsträckning vattenkraften kan tillgodose det framtida behov av energi, effekt, variationshantering och systemtjänster under nya produktionsförutsättningar. En viktig fråga har varit vilka miljöåtgärder för vattenkraften som omprövningen kommer att resultera i och vilka effekter de har på både elproduktion och miljö. Projektet har också analyserat hur det bortfall av elproduktion och andra elsystemnyttor som miljöåtgärderna förväntas orsaka kan kompenseras genom bland annat investeringar i andra tekniker. Baserat på detta har projektet gjort en samlad hållbarhetsanalys.

1.3 HÅLLBARHETSANALYS BASERAT PÅ VATTENFÖRVALTNINGSCYKEL 2.5 (VFC 2.5)

Hållbarhetsanalysen tillämpar ett helhetsperspektiv som omfattar både miljöåtgärder i vattenkraften och resulterande förändringar av elsystemet i övrigt. Projektet fokuserar särskilt på hållbarhetsaspekterna klimatpåverkan, markanvändning och vattenmiljö, biologisk mångfald och övriga ekosystemtjänster samt behov av kritiska material.

Hållbarhetsanalysen är baserad på miljöåtgärdsscenario Vattenförvaltningscykel 2.5 (VFC 2.5). Detta scenario omfattar åtgärder som berör hydrologisk regim och konnektivitet. Totalt ingår endast 44 av de 333 storskaliga vattenkraftverken i Sverige i scenariot. Det är således viktigt att förstå att åtgärderna i vattenkraften som ingår i den kvantitativa hållbarhetsanalysen baseras på ett scenario med relativt små förändringar i vattenkraften som helhet och därmed även elsystemet. Detta gäller särskilt den kvantitativa hållbarhetsanalysen som utgår från kvantitativa elsystemscenarier där åtgärderna enligt VFC 2.5 är införda (se huvudrapporten och bilaga 1). För ytterligare detaljer om VFC 2.5 hänvisas till huvudrapporten. Den kvalitativa hållbarhetsanalysen påbörjades innan de kvantitativa elsystemscenarierna var klara och baseras delvis på miljöåtgärder i bredare bemärkelse än de som ingår i VFC 2.5 och på resultat från förstudien "Systemkonsekvenser av miljöåtgärder i vattenkraften" som genomfördes under hösten 2021 (Energiforsk, 2022). Förstudien drog bland annat slutsatsen att miljöåtgärderna i vattenkraften kommer att leda till ett minskat påverkanstryck på vattenmiljön och ett ökat påverkanstryck på landmiljön, i första hand på grund av investeringar i ny landbaserad vindkraft. I det här projektet har förstudiens metodik breddats från att analysera miljökonsekvenser till att omfatta hållbarhetskonsekvenser. FN:s globala utvecklingsmål används som ramverk för analysen. De svenska miljö kvalitetsmålen utgör en precisering av utvecklingsmålens hållbarhetsdimension. Metodiken har också fördjupats till att inkludera vilken typ av mark som skulle beröras samt vad effekterna skulle bli på biologisk mångfald och övriga ekosystemtjänster.

1.4 FOKUS PÅ HÅLLBARHETSASPEKTER

Den här bilagan redovisar metod, metodutveckling och resultat av hållbarhetsanalysen och utgör ett kunskapsunderlag för HÅVEN.

Projektresultaten ska kunna läggas till grund för politiska och företagsmässiga beslut som på olika sätt formar morgondagens elsystem.

2 Frågeställning och metod

Arbetet har syftat till att bedöma hållbarhetskONSEKVENSER av förändringar i det nordeuropeiska elsystemet orsakad av begränsad vattenkraftsproduktion och andra framtida förändringar i elsystemet, såsom ökat elbehov. Den begränsade vattenkraftsproduktionen orsakas av miljöåtgärder i vattenkraften.

Såväl kvalitativa som kvantitativa hållbarhetsanalyser har genomförts. Metodik för dessa beskrivs i detta avsnitt. Resultat från scenarioarbete och energisystemmodellering i andra arbetspaket har utgjort underlag för hållbarhetsbedömningen. För mer information om scenarioarbetet hänvisas till syntesrapporten. Tidsperspektiven i projektet som helhet är år 2030 samt 2045, medan analyserna som presenteras i denna bilaga har fokuserat på 2045. När det gäller åtgärder inom vattenkraften så avser vi i allmänhet och om inte annat anges de åtgärder som föreslås enligt scenariot "Vattenförvaltningscykel 2.5/Miljöalternativ D" i Svenska Kraftnäts redovisning av regeringsuppdrag att kartlägga vilka konsekvenser prövningen för moderna miljövillkor för vattenkraften kan få för elsystemet och för en trygg elförsörjning.

2.1 STUDERAT SYSTEM

Det system som studerats i detta projekt sträcker sig från det lokala, där ekologi och biologi i enskilda älvsträckor påverkas av miljöåtgärderna, till det globala där förändrade investeringar i energiinfrastruktur påverkar värdekedjor som kan bestå av en mängd aktörer i olika världsdelar. Olika systemgränser används i olika delar av projektet där så är nödvändigt eller fördelaktigt.

När vi studerat konsekvenserna av miljöåtgärder i vattenkraften på elsystemet så har vi använt oss av avancerade energisystemmodeller som beskriver elsystemet och annan tillförsel, omvandling och användning av energi inom industrier, transportsektorn och hushåll i Nordeuropa. Detta inkluderar 13 länder uppdelat på 16 områden och tar hänsyn till betydande överföringsbegränsningar mellan olika områden/länder. Mer om energisystemmodellerna och resultaten från dessa går att läsa i bilaga 1.

I detta projekt studerar vi ett tänkbart framtida system, därav har det varit nödvändigt att göra vissa antaganden om den framtida

utvecklingen, både i Sverige och i omvärlden. För omvärldens utveckling har främst ett scenario använts medan vi för elsystemets utveckling i Sverige har försökt visa på ett större utfallsrum genom att använda oss av tre olika scenarier. Dessa scenarier är relativt "extrema" och ska inte ses som prognoser eller målbilder, utan ett verktyg för att visa på hur konsekvenserna av miljöåtgärder i vattenkraften varierar givet olika omgivande elsystem. Det är också viktigt att understryka att vi i scenarierna gör vissa antaganden/bestämmer vissa parametrar men därefter får fortfarande modellen besluta om hur andra delar av systemet utvecklas kostnadseffektivt givet dessa villkor. Följande tre scenarier används av projektet:

- **Nuclear_N: Ny kärnkraft**

I detta scenario antar vi att det görs omfattande satsningar på, och investeringar i, ny kärnkraft i Sverige. Detta representeras i modellen genom att nya kärnkraftverk motsvarande en sammanlagd kapacitet på 9 GW byggs i Sverige fram till 2045, dvs. den totala kapaciteten uppgår då till 14 GW. Detta motsvarar mer än en fördubbling av nuvarande kapacitet som uppgår till knappt 7 GW.

- **Nuclear_LE: Livstidsförlängningar i befintlig kärnkraft**

I detta scenario antar vi att majoriteten av befintliga kärnkraftsreaktorer livstidsförlängs och är i drift bortom 2045. Av nuvarande knappt 7 GW elproduktionskapacitet så kvarstår minst 5 GW under den studerade perioden.

- **Wind: Ny havsbaserad vindkraft**

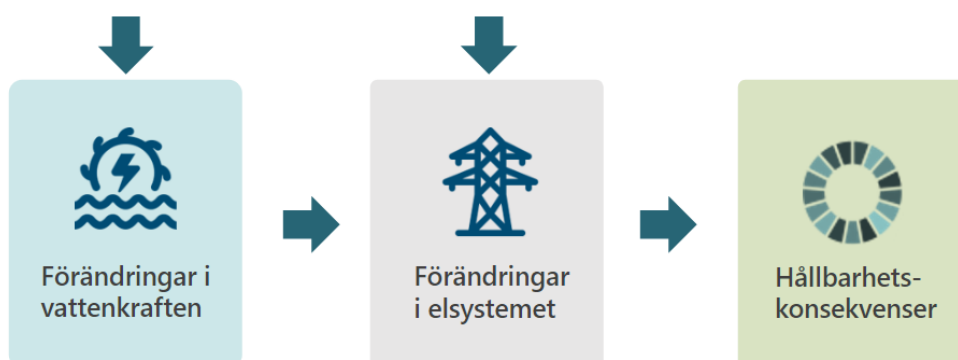
I detta scenario antar vi att en stor utbyggnad av havsbaserad vindkraft sker i Sverige fram till 2045. Detta representeras i modellen genom att ny havsbaserad vindkraft motsvarande en sammanlagd kapacitet på 22 GW byggs ut i Sverige fram till 2045. Idag finns väldigt lite havsbaserad vindkraft i Sverige men totalt finns det kapacitet på ca 16 GW varav den stora merparten är landbaserad.

2.2 METOD OCH METODUTVECKLING

2.2.1 Kvalitativ hållbarhetsanalys

Den kvalitativa hållbarhetsanalysen utgick från frågeställningen hur olika hållbarhetsmål kan påverkas av miljöåtgärder i vattenkraften och de resulterande förändringar som sker i det nordeuropeiska elsystemet. Frågeställningen för hållbarhetsanalysen illustreras i Figur 1.

Förändrade omvärldsförutsättningar



Figur 1. Illustration av projektets frågeställning. Det arbete som beskrivs i denna bilaga fokuserar på hållbarhetskonsekvenserna, medan förändringar i vattenkraften och elsystemet har hanterats i andra arbetspaket och utgjort underlag för hållbarhetsanalyserna.

Som utgångspunkt för den kvalitativa hållbarhetsanalysen användes FN:s 17 globala hållbarhetsmål (SDG¹, se Tabell 1 och Figur 2) och tillhörande delmål (se Bilaga A till denna bilaga). Arbetet inleddes med en övergripande screening av relevanta hållbarhetsaspekter med hjälp av verktyget SDG Impact Assessment Tool². Det framkom då tydligt att en mer detaljerad metodik behövs för att fånga bredden av hållbarhetskonsekvenser kopplad till frågeställningen för projektet. Därmed utvecklade vi en metodik för kvalitativ hållbarhetsanalys, även den med utgångspunkt i FN:s 17 globala hållbarhetsmål men även de tillhörande delmålen. Den utvecklade metodiken beskrivs nedan och sammanfattas i Figur 3.

¹ SDG = Sustainable Development Goals

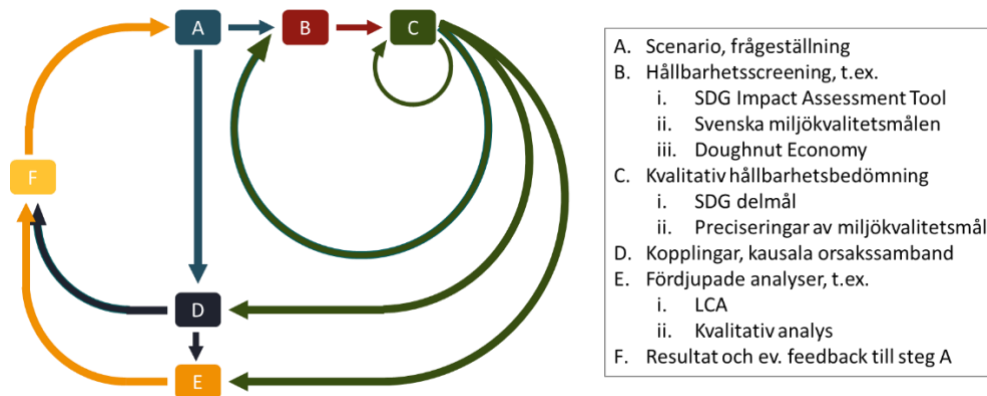
² Wexus, 2024

Tabell 1. FN:s 17 hållbarhetsmål (SDG). De tillhörande delmålen presenteras i Bilaga A.

1. Ingen fattigdom	10. Minskad ojämlikhet
2. Ingen hunger	11. Hållbara städer och samhällen
3. God hälsa och välbefinnande	12. Hållbar konsumtion och produktion
4. God utbildning	13. Bekämpa klimatförändringarna
5. Jämställdhet	14. Hav och marina resurser
6. Rent vatten och sanitet för alla	15. Ekosystem och biologisk mångfald
7. Hållbar energi för alla	16. Fredliga och inkluderande samhällen
8. Anständiga arbetsvillkor och ekonomisk tillväxt	17. Genomförande och globalt partnerskap
9. Hållbar industri, innovationer och infrastruktur	



Figur 2. FN:s sjutton globala utvecklingsmål (SDG).



Figur 3. Övergripande beskrivning av metodik för hållbarhetsbedömning.

Beskrivning av de olika stegen i metodiken:

A. Scenario, frågeställning, aktivitet att analysera

Det första steget omfattar att definiera frågeställningen och beskriva den aktivitet som ska studeras/bedömas. Aktiviteten kan till exempel vara en systemförändring i det energisystem som man önskar bedöma ur ett hållbarhetsperspektiv. Det underlättar i efterföljande steg om aktiviteten och frågeställningen är tydligt definierade och beskrivna. En kvalitativ beskrivning kan även kompletteras med kvantitativa underlag som resultat från t.ex. ett energisystemscenario eller modellberäkningar. Omfattningen och detaljnivån kommer att påverka hur senare steg i processen kan utföras. Till exempel, för att möjliggöra kvantitativ hållbarhetsbedömning måste steg A ge kvantitativa resultat. Annars kommer de följande stegen att begränsas till kvalitativa analyser.

I detta projekt har frågeställningen varit kopplade till miljöåtgärder i vattenkraften i Sverige och vilka förändringar sådana åtgärder innebär för det nordeuropeiska elsystemet, se vidare i avsnitt 2.1. Andra arbetspaket har bidragit med kvantitativa resultat från energisystemmodellering (se Bilaga 1).

B. Hållbarhetscreening

Målet med screeningen är att välja ut de viktigaste hållbarhetsaspekterna för mer djupgående analyser. Screeningen kan baseras på olika hållbarhetsramverk och göras utifrån olika

metoder. I projektet har vi utgått från FN:s 17 globala hållbarhetsmål och använt verktyget SDG Impact Assessment Tool. Det är en screeningmetod som utvecklats av Chalmers och Göteborgs universitet (Wexus, 2024). Den går ut på att bedöma vilka hållbarhetsmål som är av relevans för den aktuella frågeställningen och hur. För varje mål bedöms om målet är relevant eller ej, eller om det är oklart och mer kunskap behövs. För relevanta mål görs en bedömning om konsekvenserna är direkta eller indirekta respektive positiva eller negativa. Resultatet blir en prioritering av hållbarhetsfrågor för vidare analys.

C. **Kvalitativ hållbarhetsbedömning**

Nästa steg är att utifrån resultat från screeningen göra en mer detaljerad kvalitativ hållbarhetsbedömning. I vårt fall har vi analyserat påverkan på de olika delmål som finns kopplade till FN:s 17 hållbarhetsmål. Totalt finns 169 delmål, men eftersom en prioritering gjorts i steg B så omfattar detta steg vanligtvis färre delmål än så. På liknande sätt som i steg B analyseras för varje delmål om konsekvenserna är direkta eller indirekta respektive positiva eller negativa alternativt om inga konsekvenser bedöms finnas eller om mer information behövs. En bedömning görs även hur omfattande konsekvenserna bedöms vara på en skala 1-5. Det kan mycket väl finnas flera olika typer av påverkan på samma mål (t.ex. både positiva och negativa konsekvenser).

D. **Kopplingar, kausala samband**

Detta steg innebär definition av kopplingarna mellan aktiviteten som definierats i steg A och motivet för bedömningen i steg C. Kopplingarna kan också kallas kausala samband, drivkrafter etc. Syftet är att identifiera gemensamma mekanismer/orsaker/drivkrafter som gör att den studerade aktiviteten orsakar viss påverkan på SDG-målen och delmålen. Ofta går det att sammanfatta dessa i några få gemensamma kopplingar (betydligt färre än konsekvenserna). Som ett exempel, i detta projekt där vi studerat hållbarhetseffekter av begränsad vattenkraftsproduktion (orsakad av miljöåtgärder) har vi valt följande fyra huvudsakliga kopplingar: 1) Miljöförbättrande åtgärder i vattenkraften, 2) Förlust av fossilfri elproduktion och

systemtjänster, 3) Expansion och anpassning av elsystemet samt
4) Ökat behov i Sverige av inhemska och importerade material,
inklusive kritiska metaller.

E. **Fördjupade analyser**

Baserat på ett kvantitativt scenario i steg A (om sådant finns) samt behov som identifierats i steg A-D kan fördjupade analyser genomföras. Detta kan till exempel vara kvantitativa analyser av påverkan på olika miljöpåverkanskategorier. De kvantitativa beräkningar som genomförts i projektet, samt metodik för dessa, beskrivs närmare nedan i avsnitt 3.2.

F. **Resultat och feedback till steg A**

Det sista steget är att sammanställa resultat och presentera hållbarhetsbedömning inklusive kvalitativa och eventuellt kvantitativa resultat. Återkoppling är också möjlig till andra tidigare steg baserat på resultaten. Om exempelvis ett scenario visar stor påverkan på ett eller flera hållbarhetsmål kan det vara önskvärt att justera det och sedan göra om övriga steg ovan.

2.2.2 **Kvantitativ hållbarhetsanalys**

Den kvantitativa hållbarhetsanalysen bygger på metoder som livscykelanalys (LCA) och konsekvensanalys. Resultaten från energisystemanalyserna som utförts i andra arbetspaket av HÅVEN-projektet utgör det huvudsakliga projektspecifika underlaget för den kvantitativa hållbarhetsanalysen. Metoden bygger vidare på det arbete som gjordes i förstudien Lill-HÅVEN.³

Underlaget från energisystemanalyserna består av tillkommande investeringar i nya anläggningar i termer av eleffekt [GW] (produktionsanläggningar/användare) eller lagringskapacitet [GWh] (energilagring) samt förändrad produktion i elsystemet [GWh] med respektive utan miljöåtgärder i svensk vattenkraft. Det är miljöpåverkan från dessa förändringar som har analyserats i denna hållbarhetsanalys.

³ Systemkonsekvenser av miljöåtgärder i vattenkraften – Energiforskrapport 2022:862

Fyra miljöpåverkanskategorier har inkluderats i denna kvantitativa analys:

- **Klimatpåverkan** – bidrag till global klimatpåverkan (GWP, global warming potential), [kg CO₂e]
- **Markanvändning** – markresurser tagna i anspråk, inkluderar både spatial och temporal parameter (hur stor yta tas i anspråk och hur länge), omfattar både direkta och indirekta effekter, [m²a]
- **Markomvandling** – förändrad markanvändning/omvandling från en marktyp till en annan, omfattar både direkta och indirekta effekter, [m²]
- **Användning av kritiska mineraler** – hur påverkar förändringen den globala efterfrågan av kritiska mineraler, [kg]

Urvalet av ovan miljöpåverkanskategorier gjordes i samråd med projektets referensgrupp och mot bakgrund av resultaten och lärdomar från förstudien till projektet. Förstudien (Lill-HÅVEN) inkluderade fler och delvis andra miljöpåverkanskategorier. Miljöpåverkanskategorin *markomvandling* har tillkommit och kompletterar kategorin *markanvändning*. Miljöpåverkanskategorin *användning av kritiska mineral* ersätter "*utarmning av minerala resurser*" som fanns med i förstudien. Här fokuserar vi alltså mer på just olika mineral som anses kritiska för den hållbara omställningen i Europa.^{4,5}

Beräkningar av specifik miljöpåverkan i respektive miljöpåverkanskategori för olika tekniker/aktiviteter har huvudsakligen gjorts med hjälp av LCA-verktyget SimaPro. Merparten av LCI-data⁶ som har använts för beräkningarna har hämtats ifrån databasen Ecoinvent i form av befintliga dataset.⁷ I vissa fall har dessa dataset anpassats något för att bättre svara upp mot frågeställningen och systemgränsen i detta projekt. Det huvudsakliga exemplet på detta är att miljöpåverkan från det

⁴ Europeiska kommissionen (2020a). *Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU. A Foresight Study*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020. DOI: 10.2873/58081

⁵ Europeiska kommissionen (2020b). *Meddelande från kommissionen till Europaparlamentet, rådet, europeiska ekonomiska och sociala kommittén samt regionkommittén. Resiliens för råvaror av avgörande betydelse: Att staka ut vägen mot ökad trygghet och hållbarhet*. Bryssel: Europeiska kommissionen 2020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SV/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474> (besökt 2024-07-10).

⁶ Life Cycle Inventory, dvs. datainsamling om resurser och utsläpp i livscykeln.

⁷ The Ecoinvent database version 3.9

historiska arvet från investeringar i elsystemet har exkluderats från miljöpåverkan från förändrad elproduktion. För vissa tekniker/aktiviteter som studerats i detta projekt har det inte funnits färdiga dataset att tillgå i Ecoinvent-databasen, i dessa fall har egna dataset byggts upp i SimaPro baserat på andra källor och mer disaggregerade data från Ecoinvent-databasen.

Något som är viktigt att notera är att vi i energisystemanalyserna som avser förändrad produktion modellerar ett framtida år omkring 2045. Trots detta baseras beräkningarna i den kvantitativa hållbarhetsanalysen på LCI-data som avser dagens system och tekniker. Den huvudsakliga anledningen till detta är att vi helt enkelt inte har underlag som beskriver möjliga framtida tekniker, värdekedjor m.m. Att ta fram detaljerade beskrivningar och LCI-data om möjliga framtida system är ett omfattande arbete som dessutom är förknippat med betydande osäkerheter, vilka bör hanteras genom exempelvis scenarioanalys, något som komplicerar arbetet ytterligare. Detta ryms inte inom det aktuella projektet. Att vi utgår från data som beskriver dagens system och tekniker är självklart en förenkling som i någon utsträckning minskar precisionen för resultaten men givet förutsättningarna ser vi det ändå som det bästa alternativet.

2.3 KOPPLINGEN MELLAN DE GLOBALA HÅLLBARHETSMÅLEN OCH DE SVENSKA MILJÖKVALITETSMÅLEN

Agenda 2030 och FN:s globala hållbarhetsmål är det mest omfattande internationella systemet för att ta ett helhetsgrepp om hållbarhetsfrågor. De sjutton målen spänner över alla tre hållbarhetsdimensionerna; den ekonomiska, den sociala och den miljömässiga.

Sveriges miljömål beskriver vilka utmaningar som finns på den nationella nivån när det gäller just miljömässig hållbarhet. De svenska miljökvalitetsmålen är betydligt mer preciserade när det gäller vilken miljökvalitet som krävs för en god miljö i jämförelse med målen i Agenda 2030. Detaljrikiedom gör det lättare att följa utvecklingen i miljön och på så sätt förstå var utvecklingen går åt rätt eller fel håll och vilka åtgärder som är viktigast. Att uppnå miljömålen innebär att vi uppnår den miljömässiga dimensionen av Agenda 2030 i Sverige.⁸

⁸ "Sveriges miljömål och de globala hållbarhetsmålen." *Sveriges miljömål*. 2020. <https://sverigemiljomal.se/sa-fungerar-arbetet-med-sveriges-miljomal/sveriges-miljomal-och-de-globala-hallbarhetsmalen/> (Besökt 2024-05-16)

De olika miljömålsmyndigheterna har kartlagt hur de globala hållbarhetsmålen med tillhörande delmål förhåller sig till de svenska miljö kvalitetsmålen.⁹ Regeringens dåvarande nationella miljömålssamordnare Annika Helker Lundström använde dessa kartläggningar för att ta fram en instruktion för hur företag årligen kan redovisa sitt arbete för miljömålen i miljömålsstrukturen.¹⁰ Instruktionen redogör bland annat för kopplingarna mellan de svenska miljö kvalitetsmålen och de globala hållbarhetsmålen delmål.

HÅVEN har valt att använda de här kopplingarna mellan miljö kvalitetsmål och globala hållbarhetsmål eftersom de

1. bygger på miljömålsmyndigheternas egna kartläggningar,
2. redovisar sambanden på delmålsnivå, det vill säga samma nivå som HÅVEN:s fördjupade konsekvensbedömning har gjorts på, och
3. riktar sig mot näringslivet som är de primära aktörerna i förändringen av det svenska energisystemet.

Enligt Helker Lundström kopplar varje svenskt miljö kvalitetsmål till minst två olika delmål, i de flesta fall betydligt fler.¹¹ Dessa delmål hör till elva av de sju globala hållbarhetsmålen. Den miljömässiga dimensionen är med andra ord närvarande i två tredjedelar av de globala hållbarhetsmålen. De som saknar koppling är *Ingen fattigdom, God utbildning för alla, Jämställdhet, Minskad ojämlikhet, Fredliga och inkluderande samhällen* samt *Genomförande och globalt partnerskap*.

Genom den fördjupade konsekvensbedömningen har HÅVEN identifierat att delmål för elva globala hållbarhetsmål påverkas av miljöåtgärder i vattenkraften och förändringarna i det svenska energisystemet i de studerade scenarierna. I flera fall är det samma delmål som Helker Lundström har bedömt utgöra kopplingar till de

⁹ Finansdepartementet (2016). *Uppdrag till statliga myndigheter att bidra med underlag för Sveriges genomförande av Agenda 2030*. Regeringsbeslut 2016-04-07 Fi2016/01355/SFÖ (delvis).

<https://www.regeringen.se/contentassets/af12d612e6e94b2698057db968d30b80/uppdrag-till-statliga-myndigheter-att-bidra-med-underlag-for-sveriges-genomforande-av-agenda-2030/> (Besökt 2024-07-10)

¹⁰ Annika Helker Lundström (2017). *Positionering av Sveriges miljömål. Kartläggning av sambandet mellan Sveriges miljömål och GRI G4 och Standards, Globala målen, FN Global Compact, Planetära gränser*. Nationella miljömålssamordnaren för näringslivet, 2017. <https://sverigemiljomal.se/contentassets/8be3b8c158904b37ad27f133b3d5e7cd/positionering-av-sveriges-miljomal-slutlig-juni-2017.pdf> (Besökt 2024-07-10)

¹¹ Helker Lundström (2017), *Positionering av Sveriges miljömål*

svenska miljö kvalitetsmål.¹² Dessa kan därmed sägas beskriva den miljömässiga hållbarhetsdimensionen och övriga den ekonomiska och den sociala. Som en del av HÅVEN:s förstudie identifierades vilka miljö kvalitetsmål som påverkas av förändringarna i det svenska elsystemet.¹³ Genom att kombinera dessa komponenter – relevanta globala hållbarhetsmål, relevanta svenska miljö kvalitetsmål och kopplingar mellan delmål och miljö kvalitetsmål – kan HÅVEN integrera miljö målssystemet i det analytiska ramverket. Figur 4 illustrerar vilka miljö kvalitetsmål som påverkas i HÅVEN:s scenarier, vilka globala hållbarhetsmål de kopplar till samt hur frekventa dessa kopplingar är. Som framgår av figuren utgörs den miljömässiga hållbarhetsdimensionen inom de globala målen i första hand av *Rent vatten och sanitet* samt *Ekosystem och biologisk mångfald*. Antalet kopplingar är jämnare fördelade mellan de svenska miljö kvalitetsmålen, med *Ett rikt växt- och djurliv* i topp, följt av *Giffri miljö*, *Grundvatten av god kvalitet* samt *Myllrande våtmarker*. (Denna kartläggning är enbart giltig för åtgärder i den svenska vattenkraften och är inte en generell beskrivning av den miljömässiga hållbarhetsdimensionen inom de globala utvecklingsmålen.)



Figur 4. Kopplingar mellan de globala hållbarhetsmål och de svenska miljö kvalitetsmål som påverkas av förändringar i det svenska energisystemet. Större ikon indikerar fler kopplingar mellan delmål för globala hållbarhetsmål respektive preciseringar för svenska miljö kvalitetsmål.

¹² Helker Lundström (2017), *Positionering av Sveriges miljö mål*.

¹³ Energiforsk (2022). *Systemkonsekvenser av miljö åtgärder i vattenkraften. Bilaga A: Metodik, verktyg och modeller*, sid 14. Rapport 2022:862. ISBN 978-91-7673-862-7.

3 Resultat

3.1 KVALITATIV HÅLLBARHETSANALYS

Analysen gjordes med den metod för hållbarhetsbedömning som utvecklats inom projektet och som beskrivs i avsnitt 2.2.1. Den kvalitativa hållbarhetsanalysen utgick från frågeställningen hur olika hållbarhetsmål påverkas av miljöåtgärder i vattenkraften¹⁴ och de följd effekter som sker i det nordeuropeiska elsystemet samt längre upp i kopplade värdekedjor (steg A i metodiken).

Resultat av den inledande hållbarhetsscreeningen (steg B i metodiken), som gjordes med verktyget SDG Impact Assessment Tool (Wexus, 2024), visas i Figur 5. Screeningen omfattar en övergripande analys av påverkan på FN:s 17 hållbarhetsmål. Genom efterföljande steg i metodiken inhämtades mer kunskap om hållbarhetskonsekvenser och SDG-screeningen uppdaterades baserat på dessa, se Figur 6.



Figur 5. Resultat av inledande screening med hjälp av SDG Impact Assessment Tool

¹⁴ Som nämnts i avsnitt 1.3 i denna bilaga har den kvalitativa analysen utgått från miljöåtgärder i vattenkraften i bredare bemärkelse än de som ingår i den kvantitativa beräkningarna (vilka begränsas av åtgärder enligt VFC 2.5).

- 1) Miljöförbättrande åtgärder i vattenkraften
Miljöförbättrande åtgärder i vattenkraften utgör kärnan i hållbarhetsanalysen och är en naturlig koppling mellan det studerade scenariot och identifierade hållbarhetskonsekvenser. Detta orsakssamband förklarar också en stor del av kopplingarna. Resultaten var till övervägande del positiva konsekvenser på hållbarhetsmålen och relaterade delmål (se även Figur 7).
- 2) Förlust av fossilfri elproduktion och systemtjänster
Många åtgärder i vattenkraften kommer att leda till minskad elproduktion från vattenkraften och sannolikt begränsningar av vattenkraftens förmåga att tillhandahålla andra systemtjänster. Det här utgör det primära och uttalade motstående intresset mot miljöanpassningen. Detta orsakssamband förklarar näst flest kopplingar och uppvisade nästan uteslutande negativ påverkan (se även Figur 7).
- 3) Expansion och anpassning av elsystemet
Om vattenkraftens elproduktion och bidrag till systemtjänster begränsas behöver detta kompenseras genom andra investeringar i elsystemet. Det här orsakssambandet beskriver därmed närliggande indirekta effekter av miljöåtgärder i vattenkraften. Det här sambandet förklarar knappt 20 % av kopplingarna, varav drygt hälften bedöms vara blandade (positiva/negativa) och knappt hälften positiva (se även Figur 7).
- 4) Ökat behov i Sverige av inhemska och importerade material, inklusive kritiska metaller
Vissa miljöåtgärder i vattenkraften och investeringar i ny elproduktion kräver råmaterial. Dessa utvinns runt om i världen och genererar ekonomisk aktivitet och ekologiska fotavtryck där. Detta orsakssamband förklarar lika många kopplingar som samband 3, knappt 20 %. Kopplingarna är jämnt fördelade mellan positiva, negativa och blandade.

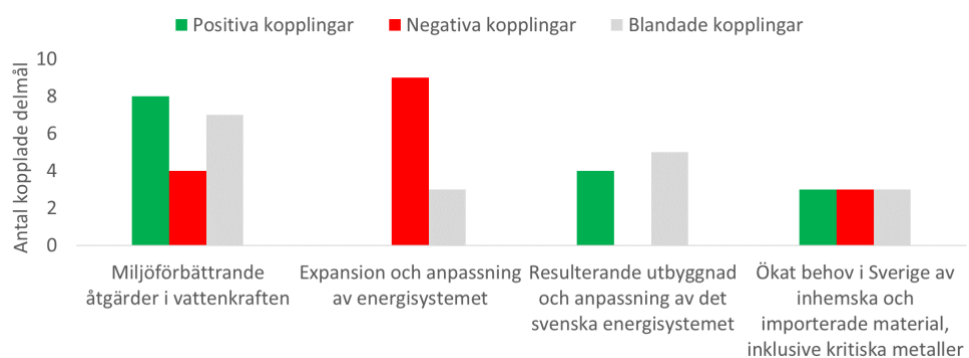
En sammanfattning av i vilken utsträckning de ovan nämnda kopplingarna orsakar bedömd positiv, negativ eller blandad (positiv och negativ) påverkan på de olika delmålen presenteras i Figur 7. Av figuren framgår att det finns både positiva, negativa och blandade

kopplingar mellan miljöförbättrande åtgärder i vattenkraften och ökat behov av material och påverkan på delmålen. Förlust av fossilfri elproduktion och systemtjänster (såsom exempelvis energilagring) innebär istället enbart negativa eller blandade kopplingar. Expansion och anpassning av elsystemet har främst blandade eller positiva kopplingar till påverkan på delmålen. Efterföljande steg i metodiken (steg E) omfattar fördjupade analyser, vilka presenteras separat i avsnitt 3.2 (kvantitativ analys) samt 3.3 (fördjupad kvalitativ analys).

Tabell 2. Bedömd påverkan på delmål för relevanta SDG:er. Mörkgrönt avser större positiv påverkan än ljusgrönt och rött avser större bedömd negativ påverkan än rosa. Se Bilaga A för en lista med hållbarhetsmål och delmål. Kolumnen längst till höger anger identifierade kopplingar för respektive delmål (1. Miljöförbättrande åtgärder i vattenkraften, 2. Förlust av fossilfri elproduktion och systemtjänster, 3. Expansion och anpassning av elsystemet, 4. Ökat behov i Sverige av material, inkl. kritiska metaller).

SDG	Delmål	Direkt positiv	Indirekt positiv	Indirekt negativ	Direkt negativ	Koppling nr
1. Ingen fattigdom						
1	1.4					4
1	1.5					1
6. Rent vatten och sanitet för alla						
6	6.3					1
6	6.5					1
6	6.6					1, 3
7. Hållbar energi för alla						
7	7.1					2
7	7.2					2
7	7.3					2
7	7.b					4
8. Anständiga arbetsvillkor och ekonomisk tillväxt						
8	8.1					2
8	8.2					3, 1
8	8.4					3, 1
8	8.7					4
8	8.8					4
8	8.9					1
8	8.a					4
9. Hållbar industri, innovationer och infrastruktur						
9	9.1					3
9	9.2					3, 1
9	9.4					2
9	9.5					3, 1
9	9.a					4
9	9.b					4
11. Hållbara städer och samhällen						
11	11.4					1
11	11.5					1, 2
11	11.6					2
12. Hållbar konsumtion och produktion						
12	12.2					1, 2
12	12.a					4
13. Bekämpa klimatförändringarna						
13	13.1					1, 2
13	13.2					2
14. Hav och marina resurser						
14	14.2					1, 3
14	14.4					3
14	14.5					3
15. Ekosystem och biologisk mångfald						

15	15.1				1, 3
15	15.2				3
15	15.4				3
15	15.5				1, 3
17. Genomförande och globalt partnerskap					
17	17.7				4
17	17.11				4



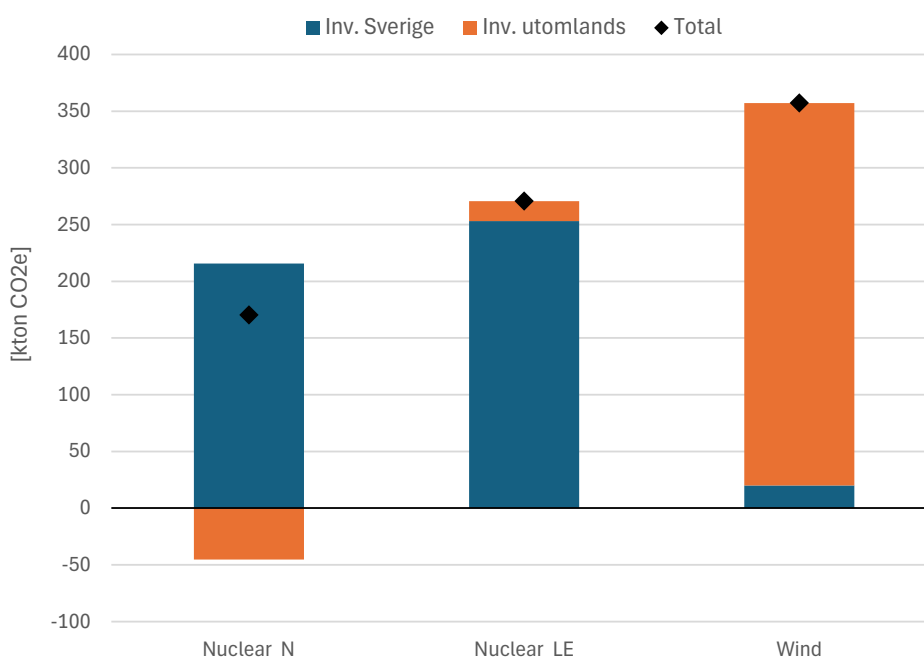
Figur 7. Sammanfattning av de identifierade kopplingarna och bedömd påverkan på delmålen.

3.2 KVANTITATIV ANALYS

3.2.1 Klimatpåverkan

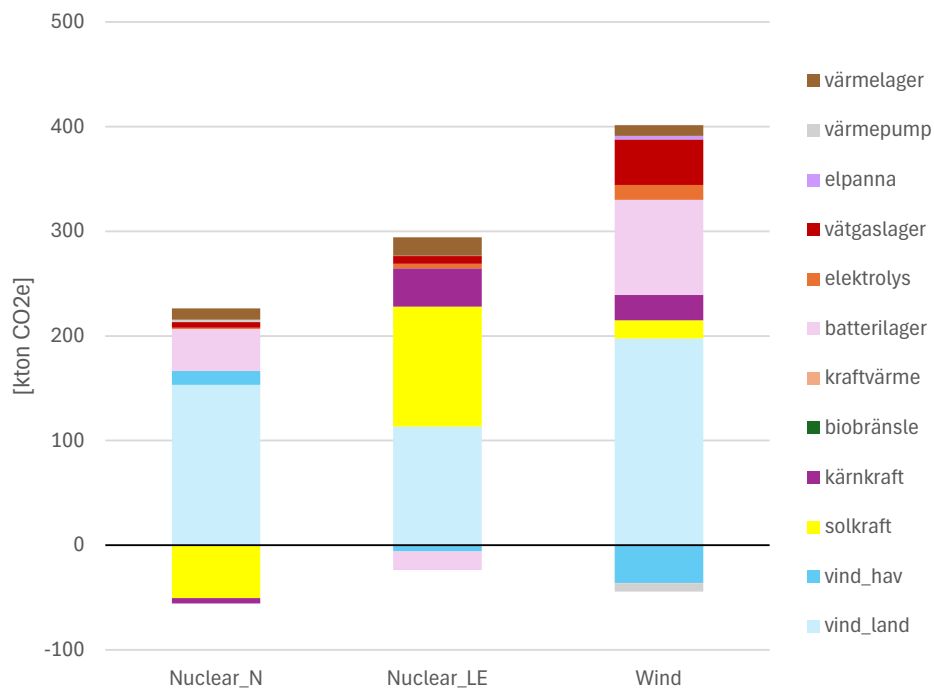
Figur 8 nedan visar hur klimatpåverkande utsläpp påverkas av förändrade investeringar i elsystemet som konsekvens av miljöåtgärder i svensk vattenkraft. Figuren visar detta uppdelat på effekter av förändrade investeringar inom Sverige och förändrade investeringar utomlands. Vi kan se att i samtliga fall så ökar de klimatpåverkande utsläppen från förändrade investeringar. Vi ser också en tydlig skillnad mellan dessa fall med avseende på var investeringarna ökar eller minskar. I fallen med ny kärnkraft och livstidsförlängning av befintlig kärnkraft ökar investeringarna i Sverige till följd av miljöåtgärder i svensk vattenkraft. I fallet med fokus på vindkraft i Sverige så ökar investeringarna som leder till ökad klimatpåverkan främst utomlands. Klimatpåverkan ökar mest i fallet med stora tillkommande investeringar i vindkraft i Sverige, ca 350 kton CO_{2e}. I fallet med nyinvesteringar i svensk kärnkraft minskar klimatpåverkan något från investeringar utomlands, detta innebär att investeringarna utomlands förändras på ett sätt som leder till minskad klimatpåverkan med miljöåtgärder i svensk vattenkraft

jämfört med utan. Konkret innebär det här att modellanalyserna visar att i detta fall byggs det mindre solkraft med miljöåtgärder i svensk vattenkraft än utan och detta leder till minskade utsläpp jämfört med fallet utan miljöåtgärder.



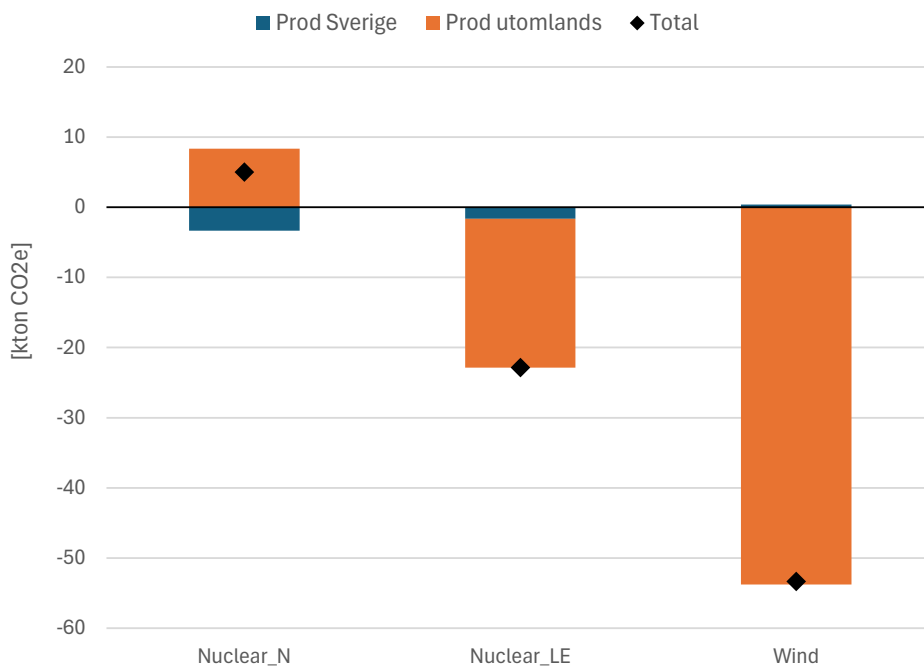
Figur 8. Klimatpåverkan från förändrade investeringar uppdelat på om investeringarna ökar eller minskar inom Sverige eller utomlands.

Figur 9 nedan visar hur klimatpåverkande utsläpp påverkas av förändrade investeringar i elsystemet som en konsekvens av miljöåtgärder i svensk vattenkraft. Figuren visar detta uppdelat på olika tekniker/kraftslag som påverkas. Som framgår påverkas ett stort antal olika tekniker. Störst effekt på klimatpåverkan ger förändrade investeringar i landbaserad vindkraft som ökar i samtliga scenarier. Även investeringar i solkraft ger en betydande påverkan i fallen med ny kärnkraft och livstidsförlängd kärnkraft. I fallet med ny kärnkraft ser vi dock att utbyggnaden av solkraft snarare minskar med miljöåtgärderna i svensk vattenkraft. Energilager som vätgaslager och batterier är andra tekniker som ger relativt stora bidrag till klimatpåverkan, särskilt i fallet med ökad vindkraftsutbyggnad i Sverige. Figur 8 och Figur 9 redovisar alltså samma resultat men nedbrutet på olika sätt.



Figur 9. Klimatpåverkan från förändrade investeringar uppdelat på vilka tekniker/kraftslag som påverkas.

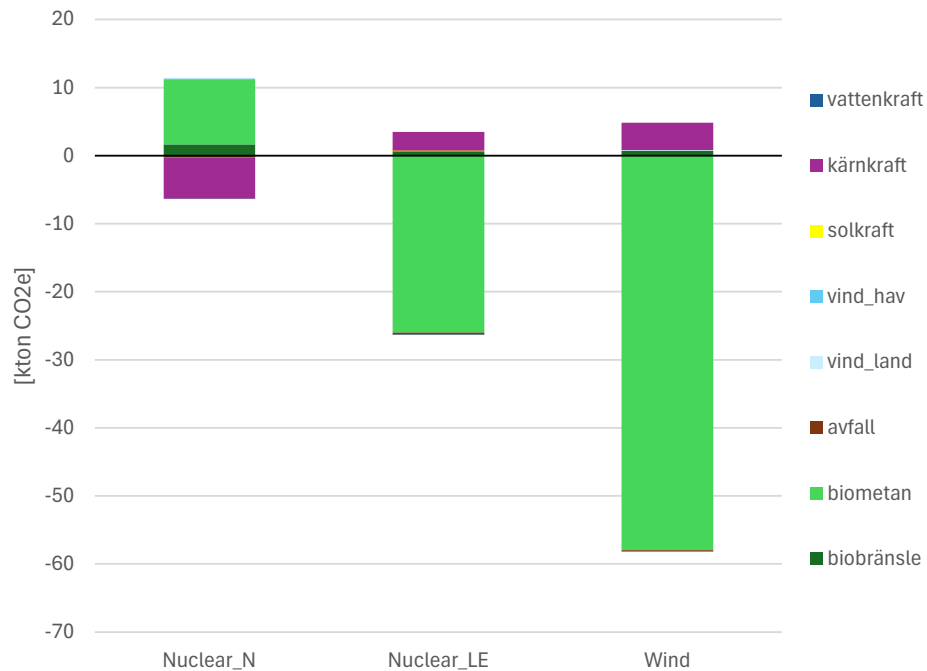
Figur 10 nedan visar hur klimatpåverkande utsläpp påverkas av förändrad elproduktion under ett år som konsekvens av miljöåtgärder i svensk vattenkraft. Detta avser alltså direkta och indirekta klimatpåverkande utsläpp från själva driften av elproduktionsanläggningar. Figuren visar detta uppdelat på effekter av förändrad produktion inom Sverige och förändrad produktion utomlands. I fallet med ny kärnkraft så ökar klimatpåverkan något från ökad elproduktion i andra delar av kraftsystemet till följd av miljöåtgärder i svensk vattenkraft och den här effekten beror på förändrad produktion utomlands. I fallet med livstidsförlängning av befintlig kärnkraft och ökad investering i vindkraft i Sverige så bidrar den förändrade elproduktionen till minskad klimatpåverkan, även här är det främst en effekt av förändrad produktion utomlands. Klimatpåverkan minskar mest i fallet med ökad investering i vindkraft och effekten uppgår till ca -50 kton CO₂e/år.



Figur 10. Klimatpåverkan från förändrad elproduktion under ett år uppdelat på om produktionen ökar eller minskar inom Sverige eller utomlands.

Figur 11 nedan visar hur klimatpåverkande utsläpp påverkas av förändrad elproduktion under ett år som konsekvens av miljöåtgärder i svensk vattenkraft. Figuren visar detta uppdelat på olika tekniker/kraftslag som påverkas. Vi kan se att det är ett färre antal tekniker som ger något betydande bidrag till förändrad klimatpåverkan. Detta beror på att merparten av teknikerna som påverkas inte ger upphov till några klimatpåverkande utsläpp i driftfasen, som exempelvis sol- och vindkraft. De tekniker som här ger ett tydligt bidrag är elproduktion med biometan och kärnkraft. Elproduktion med gasturbin eller gasmotorer som drivs med biometan är en teknik som kan bidra med flexibel och planerbar kapacitet som också är fossilfri. Bidraget till ökad eller minskad klimatpåverkan (om produktionen minskar) kommer dels från ofullständig förbränning av metangasen så att en liten andel släpps ut i atmosfären, dels från produktionen och transporten av gasen där läckage också kan ske. För kärnkraften är det huvudsakligen utvinning och produktion av uranbränsle som ger upphov till klimatpåverkande utsläpp. I fallet med ny kärnkraft i Sverige så ökar produktionen av el med biometan med miljöåtgärder i svensk

vattenkraft, vilket bidrar till den något ökade klimatpåverkan från förändrad elproduktion. I fallen med livstidsförlängning av befintlig svensk kärnkraft och investering i havsbaserad vindkraft i Sverige minskar elproduktionen från biometan med miljöåtgärder i svensk vattenkraft. Det är detta som bidrar till att klimatpåverkan minskar i dessa två fall. Figur 10 och Figur 11 redovisar alltså samma resultat men nedbrutet på olika sätt.

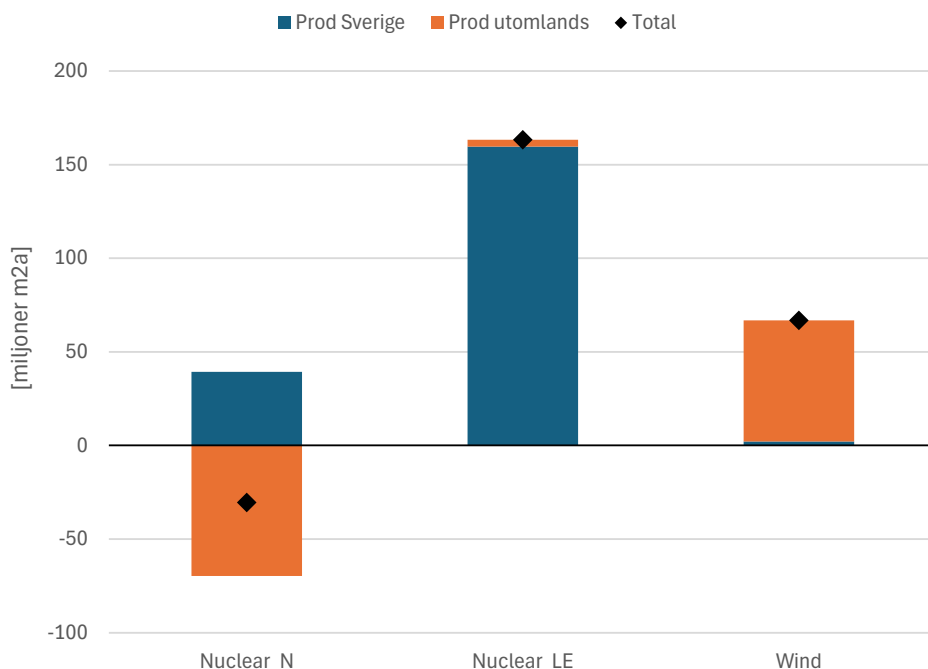


Figur 11. Klimatpåverkan från förändrad elproduktion under ett år uppdelat på vilka tekniker/kraftslag som påverkas.

3.2.2 Markanvändning

Figur 12 nedan visar hur markanvändning påverkas av förändrade investeringar i elsystemet till följd av miljöåtgärder i svensk vattenkraft. Figuren visar detta uppdelat på effekter av förändrade investeringar inom Sverige och förändrade investeringar utomlands. Markanvändning mäts här i kvadratmeterår [m²a] vilket innefattar både hur stor area som tas i anspråk och hur länge. Vi kan se relativt olika resultat i de olika fallen. I fallet med ny kärnkraft i Sverige ökar markanvändningen i Sverige men minskar utomlands. Totalt sett

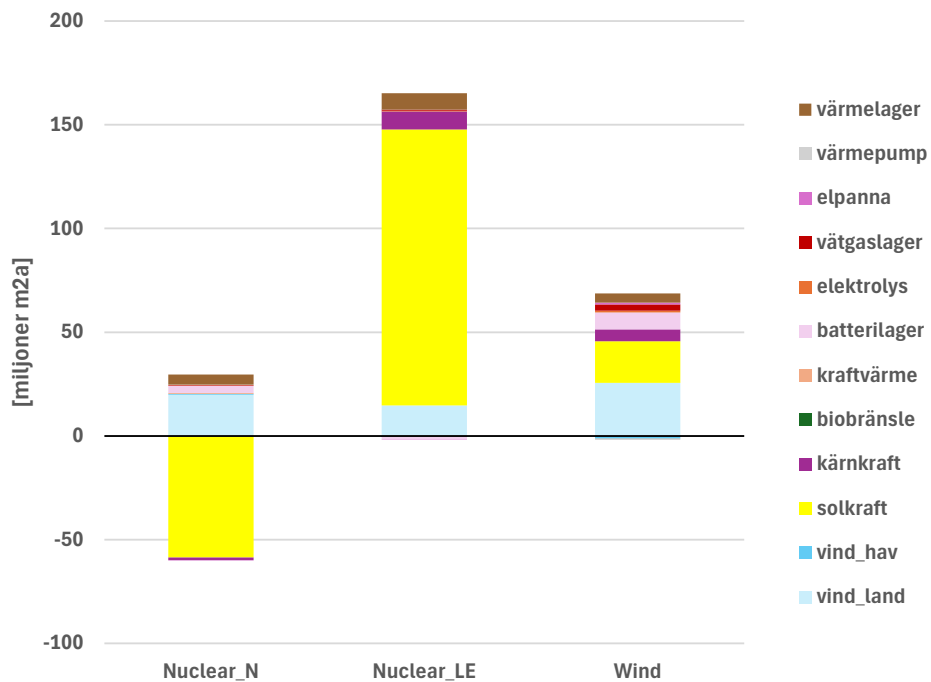
minskar dock markanvändningen i detta fall. I fallet med livstidsför längning i befintlig svensk kärnkraft så ökar markanvändningen och nästan uteslutande inom Sverige. I fallet med ökad investering i havsbaserad vind i Sverige så ökar markanvändningen men främst utomlands. Markanvändningen ökar klart mest i fallet med livstidsför längning i befintlig svensk kärnkraft, då det scenariot/systemet – vilket framgår nedan i Figur 13– innebär att det byggs en betydande andel solkraft.



Figur 12. Förändrad markanvändning från förändrade investeringar uppdelat på om investeringarna ökar eller minskar inom Sverige eller utomlands.

Figur 13 nedan visar hur markanvändning påverkas av förändrade investeringar i elsystemet till följd av miljöåtgärder i svensk vattenkraft. Figuren visar detta uppdelat på olika tekniker/kraftslag som påverkas. Figuren visar att utbyggnaden av solkraft har stor påverkan på resultaten för förändrad markanvändning. Detta är intuitivt då storskalig markbaserad solkraft är en ytintensiv teknik för elproduktion. Något mindre intuitivt så ser vi något minskade investeringar i solkraft till följd av miljöåtgärder i svensk vattenkraft i fallet med ny kärnkraft i Sverige medan vi ser något ökade investeringar i fallet med livstidsför längning i befintlig svensk

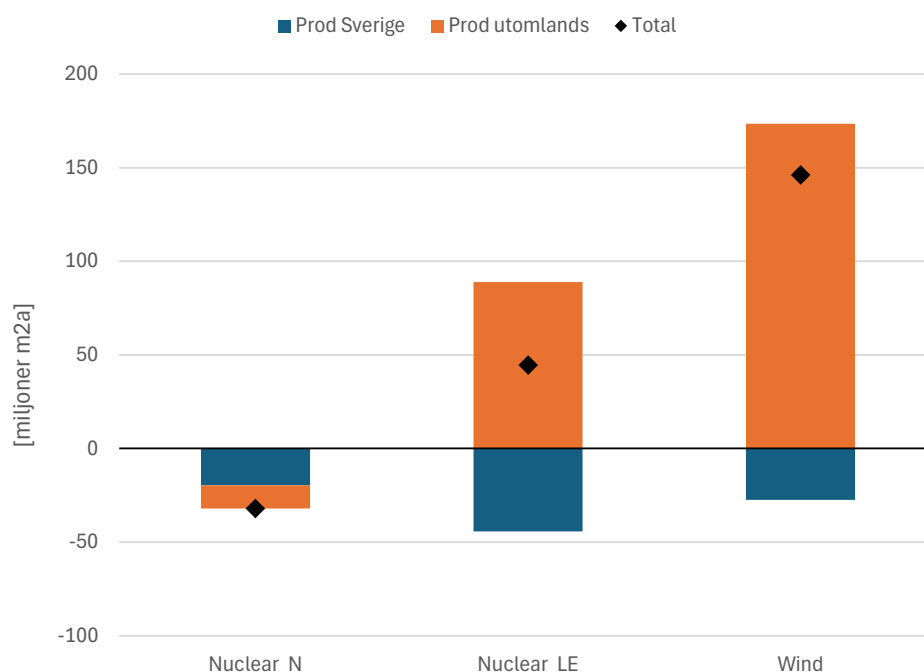
kärnkraft. Även något ökade investeringar i landbaserad vindkraft i samtliga fall ger ett tydligt bidrag till ökad markanvändning. Figur 12 och Figur 13 redovisar alltså samma resultat men nedbrutet på olika sätt.



Figur 13. Förändrad markanvändning från förändrade investeringar uppdelat på vilka tekniker/kraftslag som påverkas.

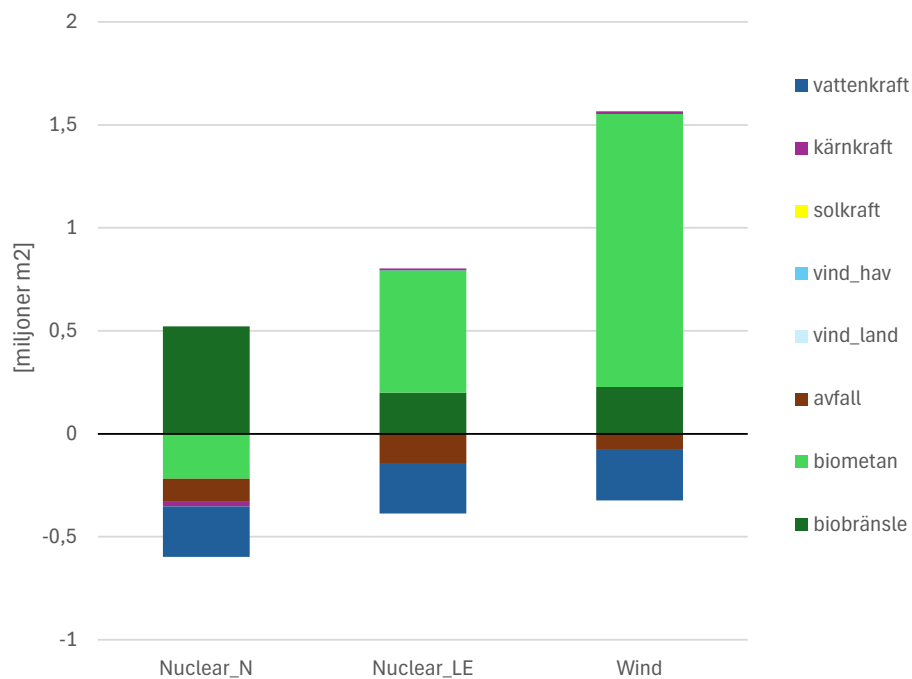
Figur 14 visar hur markanvändning påverkas av förändrad elproduktion under ett år som konsekvens av miljöåtgärder i svensk vattenkraft. Detta avser alltså direkta och indirekta markanvändningseffekter från själva driften av elproduktionsanläggningar. Figuren visar detta uppdelat på effekter av förändrad produktion inom Sverige och förändrad produktion utomlands. Här ser vi att markanvändningen från förändrad elproduktion ökar mest i fallet med utbyggd havsbaserad vindkraft i Sverige och att detta beror på ökad elproduktion utomlands. Det är dock en relativt liten markanvändningseffekt som kan ses här. I fallet med ny kärnkraft i Sverige så minskar markanvändningen marginellt på grund av

förändrad elproduktion till följd av miljöåtgärder i svensk vattenkraft. Effekten är en konsekvens av både förändrad elproduktion inom Sverige och utomlands.



Figur 14. Konsekvenser på markanvändning från förändrad elproduktion under ett år uppdelat på om produktionen ökar eller minskar inom Sverige eller utomlands.

Figur 15 visar hur markanvändning påverkas av förändrad elproduktion under ett år som konsekvens av miljöåtgärder i svensk vattenkraft. Figuren visar detta uppdelat på olika tekniker/kraftslag som påverkas. Vi kan se att förändrad elproduktion från biometan ger störst bidrag till denna miljökonsekvens, fasta biobränslen och vattenkraft påverkar också tydligt. För biometan är det främst produktionen av bioråvara som ger upphov till ökad markanvändning. Biometanen antas produceras på flera olika sätt, bland annat genom förgasning av biomassa från skog och jordbruk. Figur 14 och Figur 15 redovisar alltså samma resultat men nedbrutet på olika sätt.

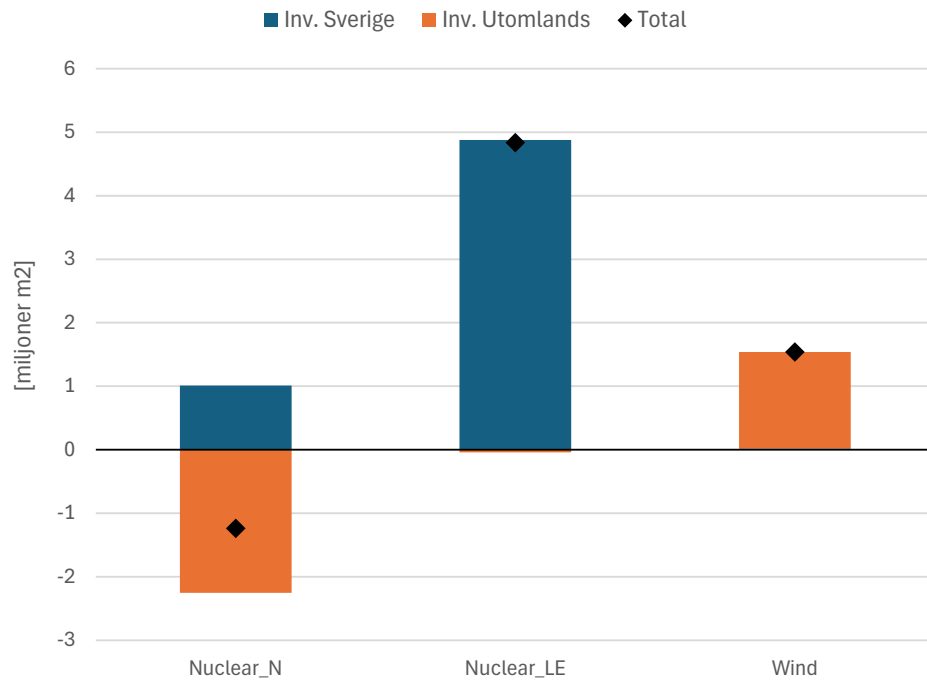


Figur 15. Konsekvenser på markanvändning från förändrad elproduktion under ett år uppdelat på vilka tekniker/kraftslag som påverkas.

3.2.3 Markomvandling

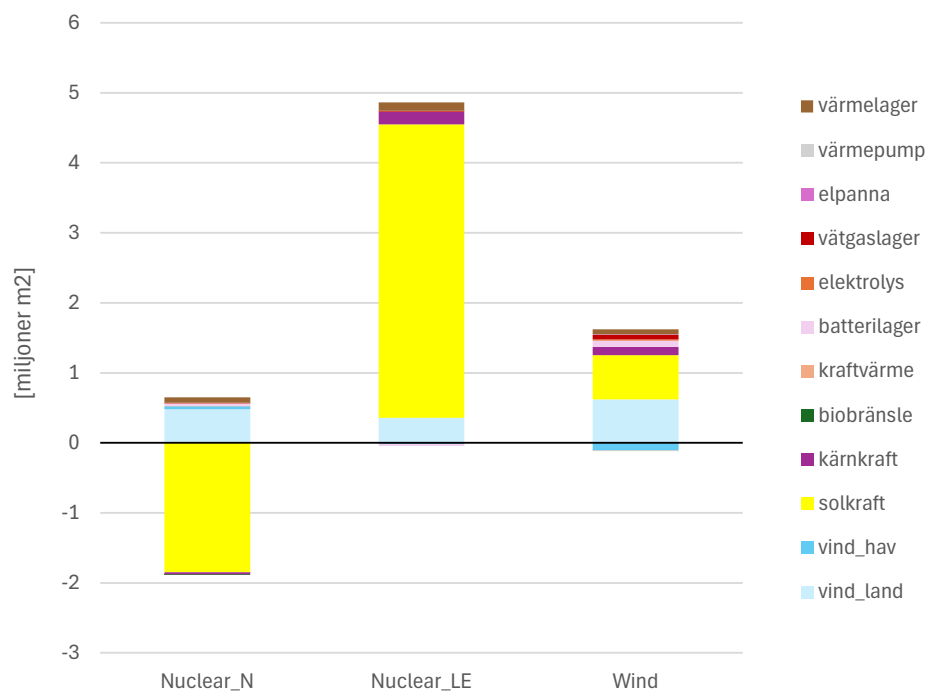
Figur 16 nedan visar markomvandling till följd av förändrade investeringar i elsystemet till följd av miljöåtgärder i svensk vattenkraft. Figuren visar detta uppdelat på effekter av förändrade investeringar inom Sverige och förändrade investeringar utomlands. Markomvandling innebär här att en markyta tas i anspråk, och vid behov förändras, för att nyttjas/brukas på ett nytt sätt. Markomvandling mäts i kvadratmeter [m²]. I denna beräkning har vi inte skiljt ut från eller till vilken "marktyp" som omvandlingen görs, exempelvis om det är skogsmark som omvandlas till industrimark eller jordbruksmark som omvandlas till mark för bostäder. Figuren visar att markomvandling minskar i fallet med ny kärnkraft i Sverige och att detta beror på förändrade investeringar i elsystemet utomlands. I fallet med livstidsförslängning i svensk kärnkraft ökar istället markomvandlingen tydligt och här beror detta uteslutande på förändrade investeringar i elsystemet i Sverige. I fallet med ökade investeringar i havsbaserad vindkraft i Sverige ökad

markomvandlingen något och det beror på förändrade investeringar i elsystemet utomlands.



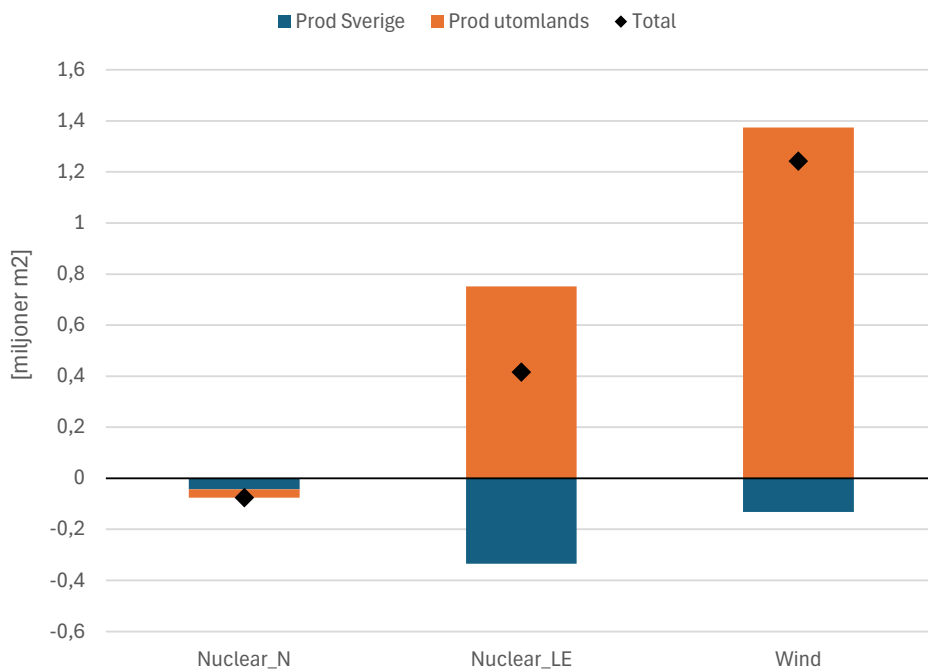
Figur 16. Markomvandling från förändrade investeringar uppdelat på om investeringarna ökar eller minskar inom Sverige eller utomlands.

Figur 17 nedan visar markomvandling till följd av förändrade investeringar i elsystemet till följd av miljöåtgärder i svensk vattenkraft. Figuren visar detta uppdelat på olika tekniker/kraftslag som påverkas. Vi kan se att det till största del är förändrade investeringar i solkraft följt av landbaserad vindkraft som bidrar till denna påverkan. I fallet med nyinvestering i kärnkraft i Sverige så sker mindre investeringar i solkraft utomlands till följd av miljöåtgärder i svensk vattenkraft. Detta är huvudorsaken till att markomvandlingen minskar i detta fall. Man kan notera att resultaten för förändrad markanvändning och markomvandling till följd av förändrade investeringar i elsystemet är relativt lika. Figur 16 och Figur 17 redovisar alltså samma resultat men nedbrutet på olika sätt.



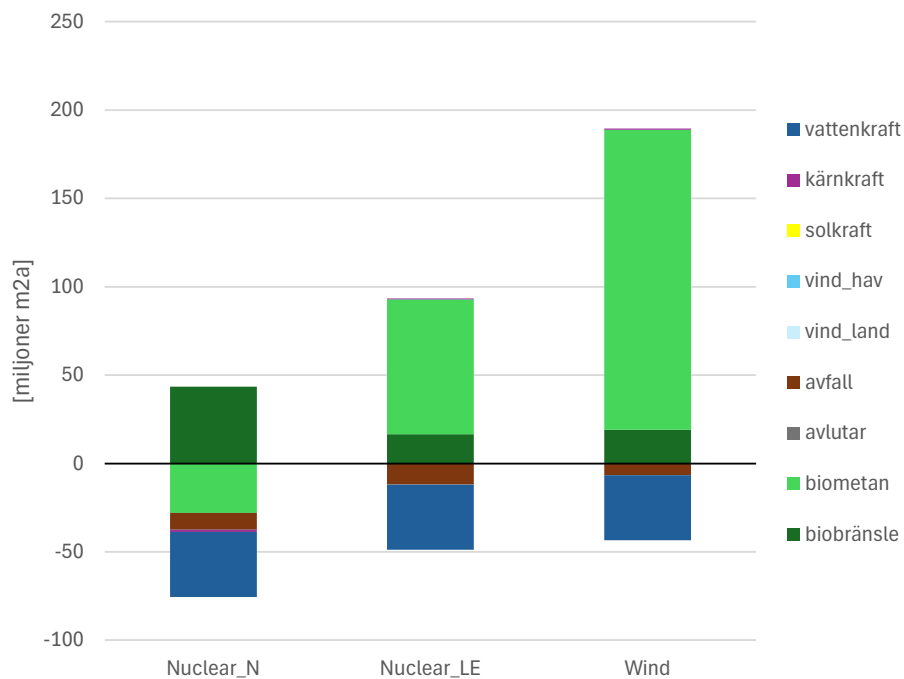
Figur 17. Markomvandling från förändrade investeringar uppdelat på vilka tekniker/kraftslag som påverkas.

Figur 18 nedan visar markomvandling till följd av förändrad elproduktion under ett år som konsekvens av miljöåtgärder i svensk vattenkraft. Detta avser alltså direkta och indirekta markomvandlingseffekter från själva driften av elproduktionsanläggningar. Figuren visar detta uppdelat på effekter av förändrad produktion inom Sverige och förändrad produktion utomlands. Som vi kan se påverkas markomvandling mycket olika i de olika fallen. I fallet med ny kärnkraft i Sverige minskar markomvandlingen marginellt. I fallet med livstidsförlängning av svensk kärnkraft ökar markomvandlingen tydlig. Mest ökar dock markomvandlingen i fallet med nyinvestering i havsbaserad vindkraft i Sverige. I båda de två senare fallen ser vi också att markomvandlingen ökar utomlands medan den minskar i Sverige till följd av förändrad elproduktion.



Figur 18. Markomvandling från förändrad elproduktion under ett år uppdelat på om produktionen ökar eller minskar inom Sverige eller utomlands.

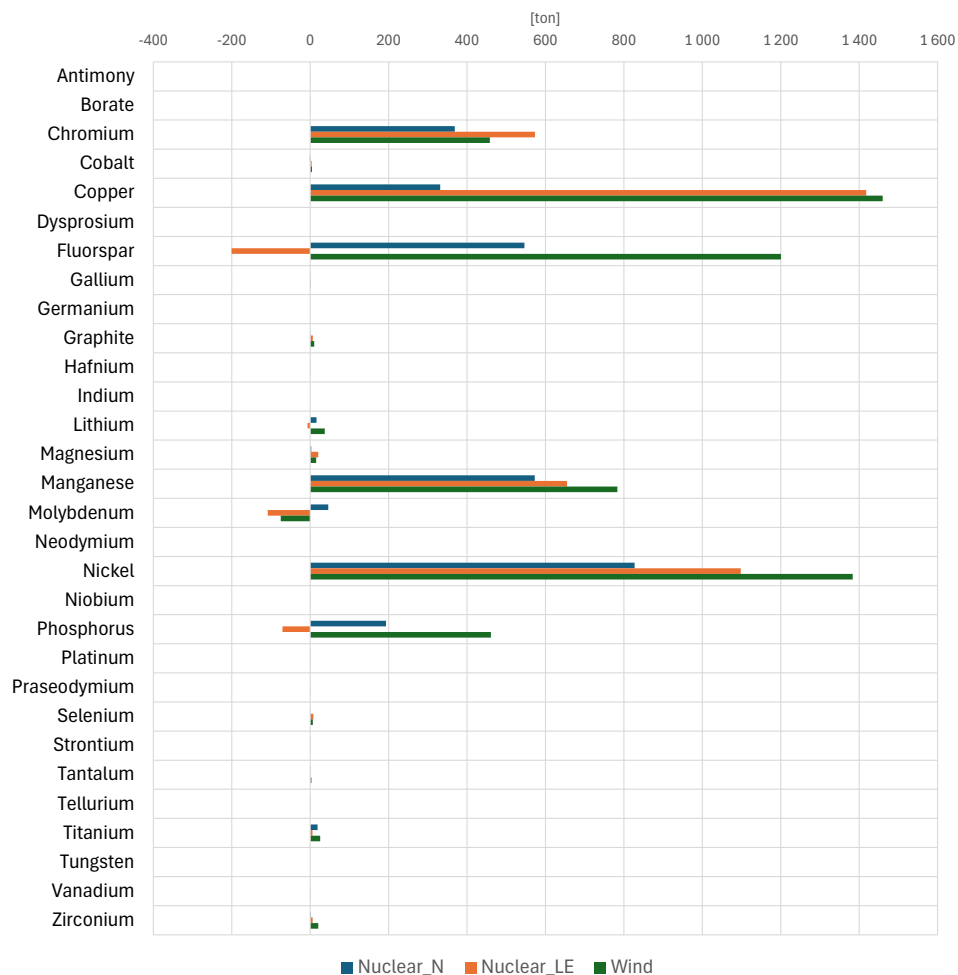
Figur 19 nedan visar markomvandling till följd av förändrad elproduktion under ett år som konsekvens av miljöåtgärder i svensk vattenkraft. Figuren visar detta uppdelat på olika tekniker/kraftslag som påverkas. Som framgår ger förändrad elproduktion från biometan och fasta biobränslen störst påverkan på markomvandlingen enligt våra beräkningar. Figur 18 och Figur 19 redovisar alltså samma resultat men nedbrutet på olika sätt.



Figur 19. Markomvandling från förändrad elproduktion under ett år uppdelat på vilka tekniker/kraftslag som påverkas.

3.2.4 Kritiska råmaterial

Figur 20 nedan visar hur behovet/efterfrågan av material som anses vara kritiska för EUs och Sveriges gröna omställning påverkas av förändrade investeringar i elsystemet som konsekvens av miljöåtgärder i svensk vattenkraft. Figuren visar förändringen i absoluta tal i ton av respektive material. Vi kan se att den absoluta förändringen är relativt stor för vissa material som exempelvis koppar, mangan och nickel. Det är dock viktigt att poängtera att det totala behovet och förekomsten av dessa olika material också varierar stort. Material som hafnium, neodym och vanadin är till exempel mycket mer ovanliga och används i mindre omfattning, därmed kan en jämförelsevis liten absolut förändring av behovet få en relativt stor påverkan på den totala förbrukningen och marknaden för sådana mer sällsynta material.



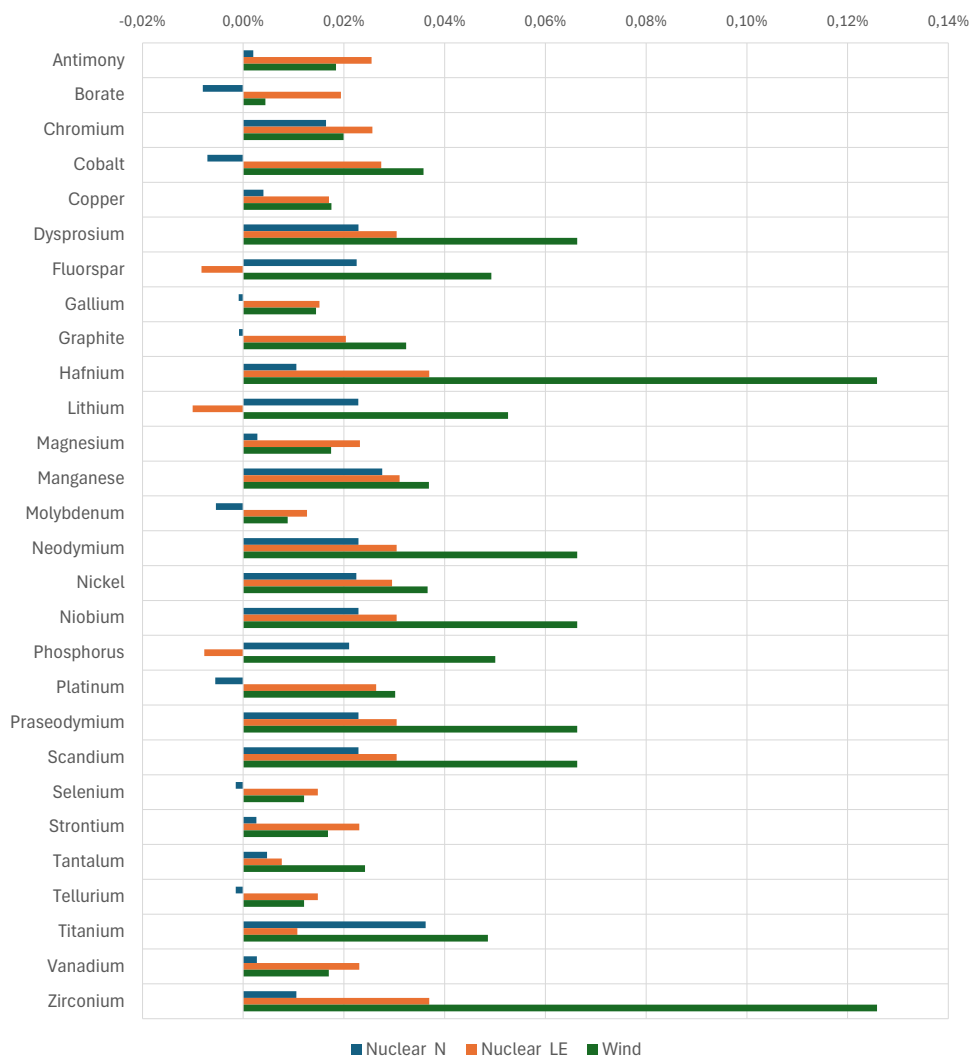
Figur 20. Förändrat behov av kritiska råmaterial till följd av förändrade investeringar i elsystemet uppdelat på individuella råmaterial.

Av Figur 20 kan vi som sagt se att den absoluta förändringen är störst för ämnen som koppar, krom, fluorspar och nickel. Hur effekterna skiljer sig mellan de olika energisystemscenarierna varierar för olika material men generellt är ändå effekten störst i scenariot med fokus på havsbaserad vindkraft i Sverige.

Figur 21 nedan visar istället den relativa förändringen i behovet av dessa kritiska material. Här har vi tagit förändringen till följd av miljöåtgärder i svensk vattenkraft och satt i relation till det uppskattade totala behovet för de beräknade investeringarna i det nordeuropeiska elsystemet utan miljöåtgärder i svensk vattenkraft.

Exempelvis visar våra beräkningar att behovet av antimon skulle öka med 1,6 ton i scenarion med utbyggd havsbaserad vindkraft i Sverige till följd av miljöåtgärder i svensk vattenkraft. Samtliga tillkommande investeringar beräknas innebära ett ökat behov med ca 8,7 kton antimon, detta innebär att förändringen till följd av miljöåtgärder i vattenkraften utgör ca 0,02% av den totala förändringen.

Detta sett att redovisa effekten tar alltså hänsyn till hur sällsynt eller hur stor användningen av respektive material är. Här får vi också en helt annan bild där flera av de material som påverkas mest är bland de mer sällsynta, så som exempelvis Hafnium, Dysprosium och Zirkonium. Effekterna av införandet av miljöåtgärder i svensk vattenkraft är dock inte helt oväntat små i förhållande till det totala behovet för investeringar i det nordeuropeiska elsystemet, det rör sig om mellan nära 0 och ca 0,12%. En slutsats som även framträder med denna jämförelse är att effekten för en majoritet av materialen är störst i scenariot med en kraftig utbyggnad av havsbaserad vindkraft i Sverige.



Figur 21 Förändrat behov av kritiska råmaterial till följd av förändrade investeringar i elsystemet som andel av totalt behov för investeringar i det nordeuropeiska elsystemet, uppdelat på individuella råmaterial.

3.3 FÖRDJUPAD KVALITATIV ANALYS KRING VISSA HÅLLBARHETSASPEKTER

3.3.1 Klimatpåverkan

I samtliga scenarier med miljöåtgärder i vattenkraften ökar utsläppen av växthusgaser med i storleksordningen 200 000 till 400 000 ton koldioxidekvivalenter till följd av tillkommande investeringar i vindkraft

och andra kraftslag/tekniker. Utsläppen från förändrad produktion minskar samtidigt med 20 000 till 55 000 ton per år i två av scenarierna, vilket alltså på något decennium kompenserar för utsläppen kopplade till investeringar. I scenariot med ny kärnkraft ökar även utsläppen marginellt till följd av förändrad produktion (se avsnitt 4.2.1).

Sverige släpper årligen ut i storleksordningen 50 miljoner ton växthusgaser¹⁵, vilket innebär att de förändrade utsläppen till följd av miljöåtgärder i vattenkraften utgör mindre än en procent av Sveriges årliga utsläpp. Utsläppen till följd av investeringar bör i detta fall fördelas över hela livscykelns som är ett par decennier.

För att klara diverse klimatmål spelar inte bara de årliga utsläppen roll utan också de samlade utsläppen över tid. Det utsläppsutrymme som återstår för att klara exempelvis 1,5-gradersmålet brukar uttryckas i termer av en global koldioxidbudget (IPCC, 2021). De globala koldioxidbudgeten kan delas upp mellan olika länder på olika sätt (Morfeldt et al., 2022), och Alfredson m fl (2024) föreslår att det svenska utsläppsutrymme efter 2022 bör ligga mellan 227 och 464 miljoner ton. De förändrade utsläppen till följd av miljöåtgärder i vattenkraften skulle kunna relateras även till dessa siffror och blir då bråkdelar av en promille. Å andra sidan är det kvarvarande utsläppsutrymme en mycket knapp resurs – endast 5–10 år av nuvarande utsläpp – vilket gör att även små ”uttag” från denna budget skulle kunna ses som problematiska.

3.3.2 Markomvandling och vattenmiljö

Miljöåtgärder i vattenkraften syftar till att förbättra vattenmiljön. Effekterna på biologisk mångfald och övriga ekosystemtjänster beskrivs i avsnitt 3.3.3. Samtidigt bedöms åtgärderna medföra investeringar och förändringar i produktionen i andra delar av elsystemet. Det påverkar markanvändningen på land och till havs och leder till viss markomvandling. Förenklat kan effekten av NAP-åtgärderna beskrivas som att en del av elsystemets påverkanstryck flyttas från vattenmiljön till landmiljön. Därigenom återställs en del av den historiska markomvandlingen och fragmenteringen av vattenmiljön samtidigt som mer mark tas i anspråk för elproduktion på land. Markomvandling och fragmentering till följd av mänsklig

¹⁵ Sveriges territoriella utsläpp av växthusgaser uppskattas preliminärt till 44,2 miljoner ton koldioxidekvivalenter (exklusive LULUCF). <https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/klimat/sveriges-utslapp-och-upptag-av-vaxthusgaser/>

aktivitet, är den huvudsakliga drivkraften för förlust av ekosystem både på land och i sötvatten.^{16, 17}

NAP-åtgärders påverkan på akvatisk markanvändning

Drivkraften för genomförande av NAP-åtgärder är att uppfylla miljö kvalitetsnormerna (MKN) för Sveriges vattenförekomster. För vattenförekomster som förklarats som kraftigt modifierade eller konstgjorda ska god ekologisk potential (GEP) uppnås, i övriga fall är god ekologisk status (GES). Vid genomförande av NAP-åtgärder ska dock en avvägning göras mellan deras potential att bidra till GEP och samtidigt deras negativa påverkan på vattenkraftens samhällsnytta. Även GES innebär krav på fungerande akvatiska ekosystem och motsvarar ofta tillstånd nära det naturliga, opåverkade. GEP och GES är begrepp inom vattenförvaltningen som vilar på olika så kallade kvalitetsfaktorer. Havs- och vattenmyndigheten har utförliga vägledningar i hur statusklassningen ska genomföras¹⁸. Styrande för bedömningen av GEP och GES är biologiska kvalitetsfaktorer. De beskriver växt- och djurlivet i vattenförekomsten. Dessutom används stödjande kvalitetsfaktorer som beskriver fysikaliska-kemiska egenskaper i vattnet, särskilda förorenande ämnen samt hydromorfologi. God ekologisk och kemisk status är dessutom en precisering av miljö kvalitetsmålet *Levande sjöar och vattendrag*.

Vattenkraftens produktionsförmåga är direkt beroende av hydromorfologin i form av bland annat vattenföring, vattenföringsvariationer, magasinskapacitet och fallhöjd. För att uppnå GEP/GES är det inte ovillkorligen nödvändigt att återställa hydromorfologin till naturliga förhållanden, utan i första hand till den grad att det möjliggör fungerande akvatiska ekosystem. Med andra ord är det ett rimligt antagande att man bör sträva efter att välja NAP-åtgärder som gör största möjliga biologiska nytta med minsta möjliga hydromorfologiska påverkan. Vilka åtgärder det är beror delvis på

¹⁶ IPBES (2019). *Global Assessment on Biodiversity and Ecosystem Services. Chapter 2.2 Status and Trends –Nature*. The Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services 2019. [https://www.ipbes.net/system/files/2021-06/2020%20IPBES%20GLOBAL%20REPORT%20\(CHAPTER%202.2\)_V3_SINGLE_0.pdf](https://www.ipbes.net/system/files/2021-06/2020%20IPBES%20GLOBAL%20REPORT%20(CHAPTER%202.2)_V3_SINGLE_0.pdf) (Besökt 2024-07-10)

¹⁷ "Living planet report 2022. Vägen ut ur naturkrisen." WWF. <https://www.wwf.se/rapport/living-planet-report/#de-storsta-hoten> (besökt 2024-07-10)

¹⁸ <https://www.havochvatten.se/data-kartor-och-rapporter/rapporter-och-andra-publikationer/utgivningsserier-och-andra-publikationer/vagledningar-for-statusklassificering.html>

förutsättningarna i det enskilda fallet. Vår bedömning är att NAP-åtgärderna generellt kommer att få en liten effekt på den akvatiska markanvändningen. Den totala arealen av sjöar och vattendrag bedöms bli i stort sett oförändrad. Även om en del små vattenkraftverk rivs och deras reservoarer töms så kommer det sannolikt att röra sig om små arealer i ett nationellt perspektiv. De kan dessutom delvis kompenseras för av ökade arealer av svämplan, det vill säga säsongsvist översvämmade områden. Lämpligt lokaliserade och utformade NAP-åtgärder kommer dock att väsentligt kunna öka mängden värdefulla habitat i vattenmiljön, främst fler och längre strömsträckor och större strandzoner. Betydelsen av detta utvecklas i avsnitt 3.3.3. Tabell 3 ger en översiktlig bedömning av hur olika typer av NAP-åtgärder påverkar den akvatiska markanvändningen.

Tabell 3. Översikt av olika NAP-åtgärders bedömda påverkan på den akvatiska markanvändningen

Typ av åtgärd	Påverkan på akvatisk markanvändning
Utrivning	Endast aktuellt för mindre kraftverk, reglerdammar mm. Stor påverkan: <ul style="list-style-type: none"> • Reservoar uppströms försvinner. • Återgång till naturliga flödesvariationer nedströms, vilket bland annat kan innebära både ökade strömsträckor och svämplan.
Faunapassage	Obefintlig påverkan, men stor potentiell effekt på den biologiska mångfalden.
Ökad minimitappning	Liten till betydande påverkan. Naturligare flödesvariation nedströms, vilket bland annat kan innebära ökade strömsträckor.
Begränsning av korttidsreglering	Liten påverkan: <ul style="list-style-type: none"> • Erosion av strandzoner kan minska både uppströms och nedströms. • Minskning av torrfåror nedströms (åtminstone mer sällan eller under kortare perioder).
Miljöanpassade flöden	Obefintlig till liten påverkan. Naturligare flödesvariation nedströms, vilket bland annat kan innebära ökade strömsträckor. Ofta en del av ökad minimitappning eller begränsning av korttidsreglering, men kan också tillämpas enskilt.
Biotopvårdande åtgärder	Liten påverkan. Inkluderar många olika åtgärder. Vissa påverkar inte markanvändningen utan enbart vattenmiljöns kvalitet. Andra kan innebära att flödes hastigheten eller längd på strömsträckor nedströms ökar genom förändringar av vattendragets morfologi. Kan förstärka effekter av övriga typer av åtgärder.

Markanvändning och arealbehov för solkraft och vindkraft

Omställningen av energisystemet kommer att innebära omfattande markomvandling. Enligt flera studier är fossilfri elproduktion som

sol-, vind- och biokraft mer utrymmeskrävande än fossilbaserade alternativ.^{19,20} Då avses ofta hela sol- eller vindkraftsparken. Om bara infrastrukturen inkluderas, till exempel solpanelerna eller vindkraftverkens "fotavtryck" med tillhörande vägar och ledningsdragningar, blir markanvändningen mindre. Ur ett planeringsperspektiv är ofta det första relevant, eftersom en produktionsanläggning sällan kan samlokaliseras med andra verksamheter. Till exempel är solparker ofta inhägnade och vindkraftverk har en påtaglig omgivningspåverkan genom buller och skuggor. Samtidigt finns det utrymme för natur inne i parkerna. Det pågår till exempel en utveckling av solparker som utformats för att möjliggöra både bete och odling inne i parken, så kallade agrivoltaiska system.²¹ Likaså kan skogsbruk fortsätta att bedrivas i vindkraftsparken. Det är också stora variationer inom de olika energislagens markanspråk beroende på teknikval och geografiska förutsättningar.²² I och med utbyggnaden av sol- och vindkraftsparken blir elproduktionen alltmer en areell näring och därmed ett allt vanligare och tydligare inslag i landskapsbilden. På många platser är det lokala motståndet mot ny vindkraft starkt. Hur solkraft kommer att uppfattas när parkerna blir fler och större återstår att se. Med tiden har många vattenkraftverk fått höga kultur- och teknikhistoriska värden, trots att de en gång också orsakade betydande förändringar i landskapsbilden.

Den markomvandlingen som drivs av att NAP-åtgärderna ska kompenseras av investeringar i annan elproduktion är däremot liten, maximalt 0,02 % jämfört med markomvandlingen som hela omställningen sannolikt kommer att kräva. Störst blir markomvandlingen i scenariot Nuclear LE, där ca 4,5 km² solkraft och 0,22 km² landbaserad vindkraft tillkommer för att kompensera NAP-

¹⁹ John van Zalk, Paul Behrens (2018). The spatial extent of renewable and non-renewable power generation: A review and meta-analysis of power densities and their application in the U.S. *Energy Policy*. Vol. 123, 2018:83–91. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.023>.

²⁰ Jonas Kristiansen Nøland, Juliette Auxepaules, Antoine Rousset, Benjamin Perney, Guillaume Falletti (2022). Spatial energy density of large-scale electricity generation from power sources worldwide. *Sci Rep* 12, 21280, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25341-9>.

²¹ "Utvärdering av det första agrivoltaiska systemet i Sverige." *Mälardalens universitet*. <https://www.mdu.se/forskning/forskningsprojekt/framtidens-energi/utvardering-av-det-forsta-agrivoltaiska-systemet-i-sverige> (Besökt 2024-07-10)

²² Hannah Ritchie (2022). How does the land use of different electricity sources compare? *Our World in Data*. 2022. <https://ourworldindata.org/land-use-per-energy-source> (Besökt 2024-07-09)

åtgärderna. I scenariot Nuclear_N byggs 0,36 km² landbaserad och 0,61 km² havsbaserad vindkraft ut. I scenariot Wind byggs i stort sett ingen extra elproduktion till följd av begränsningarna i svensk vattenkraft, men däremot mer vätgaslager än i övriga scenarier. En fullständig redovisning av förändrad markanvändning och markomvandling ges i avsnitt 3.2.2 och 3.2.3.

Hittills har utbyggnaden av solkraft i Sverige dominerats av små eller mycket små anläggningar som företrädesvis varit byggnadsmonterade. År 2023 stod anläggningar mindre än 20 kW tillsammans för ca 60 % av den totala installerade effekten i Sverige, medan anläggningar större än 1 000 kW stod för knappt 7 %.²³ De stora solparkernas andel antas dock öka framöver. Det är inte omöjligt att utvecklingen kommer att påminna om den för vattenkraften, på så vis att den inledande utbyggnaden består av små anläggningar för lokalt bruk för att sedan övergå i stora anläggningar av regional eller rentav nationell betydelse. Solkraft behöver lokaliseras i goda sollägen, vilket styrs av topografi, väderstreck och vegetation. Hittills har de absolut flesta anläggningarna installerats av privatpersoner. Det har medfört att flest installationer har skett i södra Sverige, som är mer tätbefolkat än norra. De flesta anläggningarna har monterats på tak. De tar då inte någon ny mark i anspråk. Större anläggningar byggs på marken. I flera fall har ansökningar om att uppföra solparker på jordbruksmark fått avslag med motiveringen att livsmedelsproduktion har högre prioritet. En omsvängning kan vara på gång, men fram tills idag har livsmedelsproduktion prioriterats i de flesta fall.²⁴ Även våtmarker kan erbjuda goda sollägen, men har ofta höga naturvärden. Utbrutna torvtäckter har i en del fall använts. Vår bedömning är att majoriteten av större solparker kommer att anläggas i avverkad produktionsskog framöver, eftersom det är den dominerande markanvändningen i Sverige och generellt uppvisar låga övriga värden. Trots potentiella intressekonflikter mellan solkraft och annan markanvändning bör det finnas relativt gott om lämpliga lokaliseringar nationellt eftersom utbyggnaden är i en tidig fas jämfört

²³ "Över 250 000 installerade solcellsanläggningar i Sverige." *Energimyndigheten*. 2024. <https://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2024/over-250-000-installerade-solcellsanlaggningar-i-sverige/> (Besökt 2024-07-10)

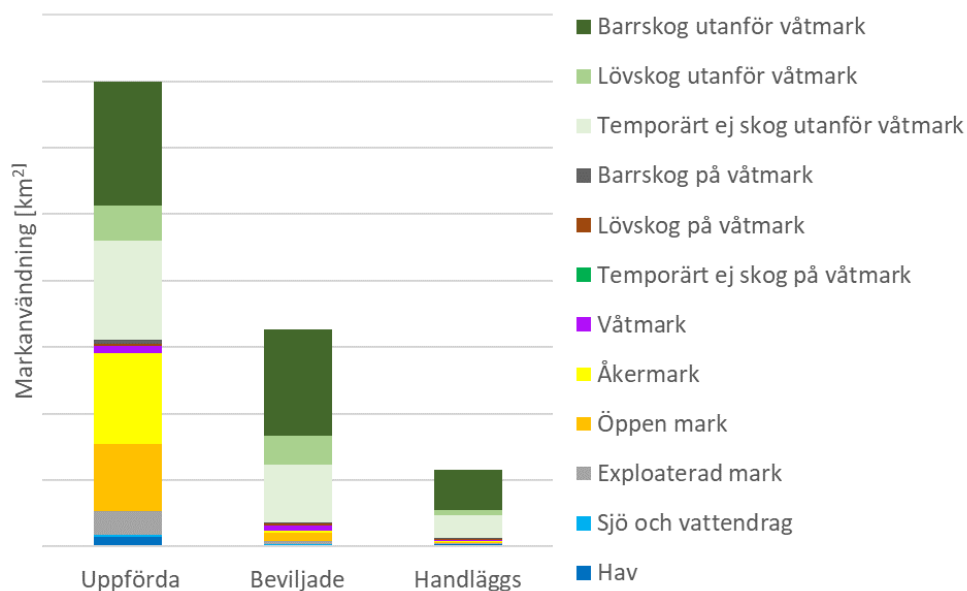
²⁴ Dimitri Lennartsson. "Länsstyrelsen: Solceller behöver ta plats på skånsk jordbruksmark." *Sveriges Radio*. 2024. <https://sverigesradio.se/artikel/lansstyrelsen-solceller-behover-ta-plats-pa-skansk-jordbruksmark> (Besökt 2024-07-10)

med landbaserad vindkraft. En typisk markanvändning för solet ligger i intervallet 8–15 km²/TWh•år.²⁵

Vindkraft har expanderat kraftigt i Sverige under de senaste decennierna och är nu det tredje största energislaget sett till årlig produktion efter vattenkraft och kärnkraft. Över tid har det skett ett skifte i var vindkraftverken har lokaliserats. Redan uppförda verk står till stor del på åkermark och annan öppen mark. Nya verk (beviljade och under handläggning) kommer nästan uteslutande att lokaliseras på skogsmark. Detta illustreras i Figur 22. Under den här perioden har vindkraften påverkats av flera faktorer som sannolikt har betydelse för lokaliseringarna. Den tekniska utvecklingen innebär att kraftverken blir allt större. Det innebär både att verken blir material- och utrymmeseffektiva, men också att de syns och hörs på längre avstånd. Nya vindkraftsprojekt möts ofta av lokalt motstånd. Åren 2014–2021 beviljades 45 % av de landbaserade vindkraftverken miljötillstånd. Mellan 2020–2022 var det endast 36 % som fick tillstånd.²⁶

²⁵ UNEP (2016). *Green Energy Choices: the benefits, risks and trade-offs of low-carbon technologies for electricity production*. United Nations Environmental Programme. 2016. Report of the International Resource Panel. ISBN 978-92-807-3490-4.

²⁶ Svensk Vindenergi (2023). *Statistik och prognos – Q1 2023*. 2023-05-17. https://svenskvindenergi.org/wp-content/uploads/2023/05/Statistik-och-prognos-vindkraft-Sverige-Q1-2023_FINAL.pdf (Besökt 2024-07-08).



Figur 22. Markanvändning för vindkraftparker som var uppförda, beviljade men ännu inte uppförda, samt under handläggning 2021. Data från Vindbrukskollen 2021.

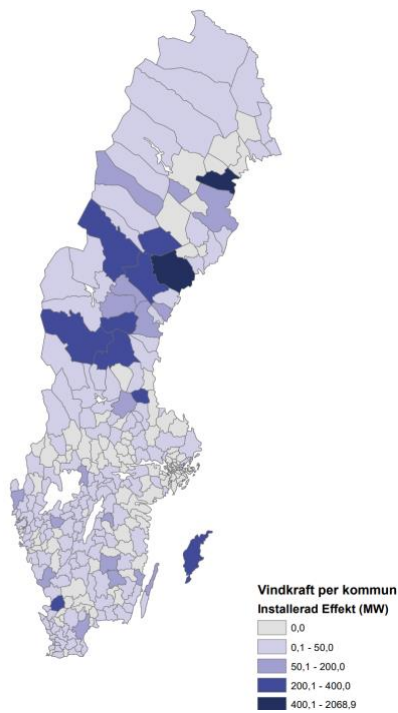
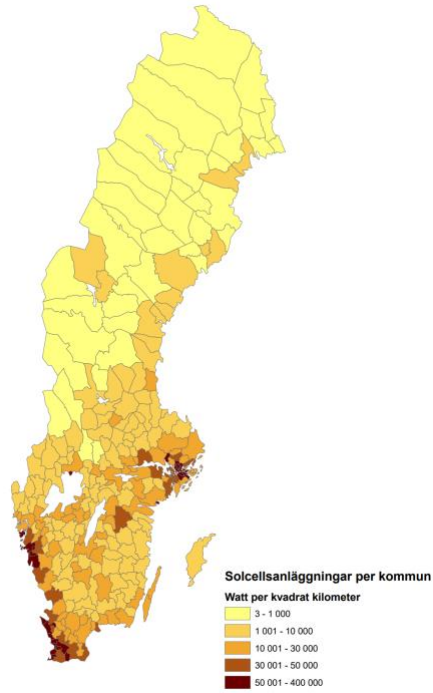
En stor del av det ökade elbehovet kommer att finnas i norra Sverige, där flera elintensiva industriprojekt inom bland annat fossilfritt stål och batterivärdekedjan pågår eller planeras. Energimyndigheten och Naturvårdsverket har gemensamt tagit fram en nationell strategi för en hållbar vindkraftsutbyggnad. Utgångspunkten i strategin är en nationell utbyggnad fram till 2040-talet motsvarande minst 100 TWh, varav 20 TWh till havs.²⁷ Strategin anger det regionala utbyggnadsbehovet för de fem Norrlandslänen (Västerbotten, Norrbotten, Västernorrland, Jämtland och Gävleborg) till 35 TWh i årsproduktion, mot ca 45 TWh för resten av landet. Styrande för lokalisering av vindkraft är goda vindlägen, lokal social acceptans i form av kommunal tillstyrkan av projekten och tillstyrkan från Forsvarsmakten. Till stor del på grund av att allt fler projekt inte får tillstånd så har utbyggnaden av vindkraft bromsat in i Sverige.²⁸ Det framstår som att de "enkla" vindkraftslokaliseringarna är tagna och att det därför blir allt svårare att få tillstånd för nya projekt. Under senare år har intresset ökat kraftigt för havsbaserad vindkraft, med

²⁷ Energimyndigheten (2021). *Nationell strategi för en hållbar vindkraftsutbyggnad*. Statens energimyndighet, januari 2021. ISBN 978-91-89184-88-6.

²⁸ Svensk Vindenergi (2023). *Statistik och prognos – Q1 2023*.

över 100 GW under utveckling.²⁹ Även till havs finns det starka motstående intressen mellan vindkraft på ena sidan och Försvarmakten, yrkesfisket och naturvården på den andra. En typisk markanvändning för vindkraft på land ligger på 50–100 km²/TWh (Nilsmo och Abrahamsson, 2018; Energimyndigheten, 2020). För vindkraft till havs ligger markanvändningen i den nedre delen av detta intervall. Den arealen avser dock hela parken, det vill säga även markområden mellan vindkraftverk. Enligt UNEP (2016) blir markanvändningen omkring två storleksordningar (en faktor hundra) mindre om enbart vindkraftverken räknas in.

²⁹ Svensk Vindenergi (2024). *Statistik och prognos Q1 2024*. 2024-04-19. <https://svenskvindenergi.org/wp-content/uploads/2024/04/Statistik-och-prognos-Q1-2024.pdf> (Besökt 2024-07-15).



Figur 23. Spridning av installerade solceller³⁰ och vindkraftverk³¹ i Sverige. Något förenklat är fördelningen mellan de två kraftslagen motsatta. Högst koncentration av solceller finns i södra Sverige medan högst koncentrationen av vindkraft finns i norra Sverige. Observera att enheterna skiljer sig något åt. Kartan över solceller använder W/km² och kartan över vindkraft använder MW/kommun.

Potentiellt stor nytta för vattenmiljön med försumbar effekt på nationell markanvändning

NAP-åtgärderna kommer att utgöra en försumbar drivkraft för markomvandling. De tillkommande investeringarna i elproduktion beräknas kräva som mest 5 km². Den förändrade produktionen orsakar i praktiken ingen markomvandling. Även om vi inte vet när investeringarna kommer att ske så är det rimligt att anta att det blir i omgångar under den tjugoförårsperiod som omprövningarna förväntas ta. Som jämförelse slutavverkas drygt 2 000 km² skog om året i Sverige.³² Mellan 2010 och 2020 minskade åkerarealen med ca 8 km² årligen medan betesmarken ökade med 1 km² årligen.³³ Markanvändningen förändras ständigt och i betydligt större omfattning än vad NAP-åtgärderna förväntas orsaka.

Mycket talar för att lämpligt lokaliserade och utformade NAP-åtgärder har stor potential att öka mängden värdefulla habitat i vattenmiljön, främst fler och längre strömsträckor och större strandzoner.³⁴ För att kompensera effekterna på vattenkraften kan det leda till att ytterligare några solcellsparkar. De kommer sannolikt att

³⁰ Energimyndigheten (2024a). *Nätanslutna solcellsanläggningar. Installerad effekt per kvadratkilometer*. Karta. 2024-04-03.

https://www.energimyndigheten.se/496789/globalassets/statistik/official-statistik/statistikprodukter/biogas/solel_kilometer.pdf (Besökt 2024-07-10)

³¹ Energimyndigheten (2024b). *Vindkraftsstatistik. Installerad effekt per kommun*. Karta. 2024-04-19. https://www.energimyndigheten.se/497f54/globalassets/statistik/official-statistik/statistikprodukter/vindkraftsstatistik/vindkraft_2023_effekt.pdf (Besökt 2024-07-10)

³² Skogsstyrelsen (2022). *Bruttoavverkning 2020 med preliminär statistik för 2021 och prognos för 2022*. Statistik från Skogsstyrelsen. Produktnummer: JO0312. Serie: JO – Jordbruk, skogsbruk och fiske. 2022-09-27.

<https://www.skogsstyrelsen.se/globalassets/statistik/statistikfaktablad/jo0312-statistikfaktablad.pdf> (Besökt 2024-07-10)

³³ Jordbruksverket (2021). *Jordbruksmarkens användning 2020. Slutlig statistik*. Produktkod: JO0104. *Jordbruksverket*. 2021. <https://jordbruksverket.se/om-jordbruksverket/jordbruksverkets-officiella-statistik/jordbruksverkets-statistikrapporter/statistik/2021-02-03-jordbruksmarkens-anvandning-2020.-slutlig-statistik> (Besökt 2024-07-10)

³⁴ Se till exempel Calles m.fl., 2013; Malm Renöfält & Ahonen, 2013; Kling, 2015; Fjeldstad m.fl., 2018; Degerman Näslund, 2021; Widén m.fl., 2021a och 2021b.

uppföras i produktionsskog i södra Sverige, men även jordbruksmark kan komma att tas i anspråk. Byggs i stället vindkraft bedöms det främst ske på land i norra Sverige. Vår bedömning är att det under ganska lång tid kommer att vara enklare att hitta acceptabla lokaliseringar för solkraft än för vindkraft eftersom en mycket mindre andel av lokalerna med goda sollägen har tagits i anspråk än lokaler med goda vindlägen och på grund av att solkraft generellt har färre och mildare intressekonflikter med närboende, Försvarsmakten och rennäring än vindkraften. Sammantaget bedöms den totala markanvändningen förbli oförändrad till följd av NAP-åtgärderna.

3.3.3 Biologisk mångfald

Läget är allvarligt för den biologiska mångfalden, både globalt och i Sverige. Fler arter än någonsin i mänsklighetens historia är på väg att utrotas och ekosystem förändras i snabb takt, som en följd av vårt sätt att leva.³⁵ Havs- och vattenmyndigheten beskriver tillståndet för hotade limniska arter och livsmiljöer på följande vis:³⁶

För många av arterna är den största utmaningen vandringshinder och förstörda lekhabitat på grund av vattenkraftutbyggnad och annan fysisk påverkan i vattenmiljön. Arter som vandrar långt mellan söt- och saltvatten som till exempel ål, lax, havsnejonöga och vimma, är särskilt utsatta för denna typ av påverkan.

Vart sjätte år ska alla medlemsländer följa upp bevarandestatusen för samtliga arter och naturtyper inom landets gränser som är upptagna i EU:s art- och habitatdirektiv. Sveriges senaste rapportering skedde 2019 och avser perioden 2013–2018.³⁷ Figur 24 visar status och trender för de olika grupperna av naturtyper. I avsnitt 3.3.2 konstateras att NAP-åtgärderna främst kommer att få en direkt påverkan på sjöar och vattendrag och en indirekt påverkan på skogsmark på grund av ytterligare utbyggnad av sol- och/eller vindkraft. Även andra naturtyper kan påverkas av sol- eller vindkraftsparker, men det

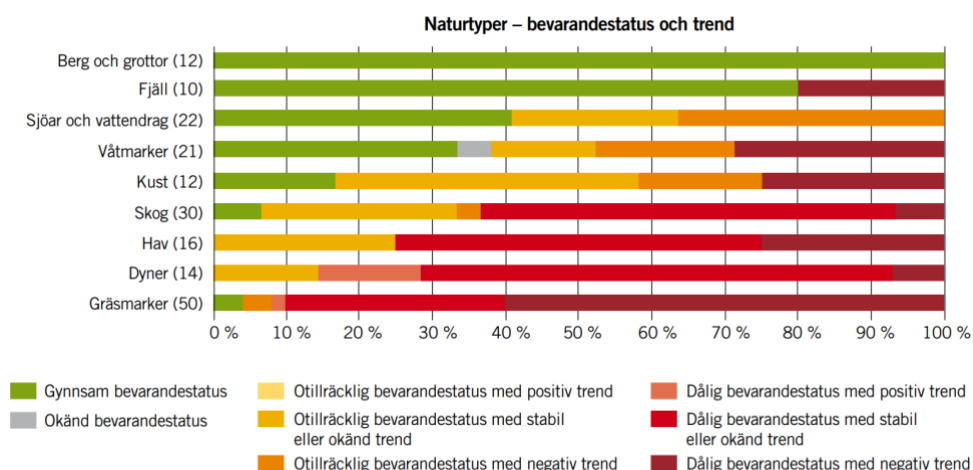
³⁵ "Ämnesområde Biologisk mångfald". Naturvårdsverket.

<https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/biologisk-mangfald/> (Besökt 2024-07-10)

³⁶ Havs- och vattenmyndigheten (2022). *Levande sjöar och vattendrag. Fördjupad utvärdering av miljö kvalitetsmålen 2023*. 2022-09-30. ISBN: 978-91-89329-46-1

³⁷ Naturvårdsverket (2019). *Sveriges arter och naturtyper i EU:s art- och habitatdirektiv. Resultat från rapporteringen 2019 till EU av bevarandestatus 2013–2018*. Naturvårdsverket 2019. ISBN 978-91-620-6914-8

bedöms vara mindre sannolikt. Idag finns det tillräckligt många och stora sjöar och vattendrag, men deras bristande kvalitet gör att många av dem inte uppnår gynnsam bevarandestatus.³⁸ Nedanför fjällkedjan uppnår nästan inga sötvattensnaturtyper gynnsam bevarandestatus.³⁹ Anledningen till att tillståndet för skogen bedöms vara ännu värre än för sjöar och vattendrag är att bara en dryg femtedel av Sveriges skogsareal håller naturtypsklass, det vill säga kan klassas som en i art- och habitatdirektivet definierad naturtyp. Nedanför fjällkedjan är andelen naturtypsklass i den vanliga skogsmarken där skogsbruk bedrivs under 10 %, vilket är långt under de 20 % som anses nödvändig för att långsiktigt nå gynnsam bevarandestatus.⁴⁰



Figur 24. Bevarandestatus och trender för Sveriges naturtyper i EU:s art och habitatdirektiv 2013–2018.⁴¹

Vår bedömning är att utbyggnaden av elsystemet i första hand kommer att ske i den skogsmark som inte är naturtypsklassad. Dels beroende på att konflikten med naturvärden då blir lägre, dels för att skogsmark är den i särklass mest utbredda markanvändningen som upptar ca 57 % av Sveriges yta.⁴² Denna bedömning gäller för de tillkommande investeringar i ny elproduktion som NAP-åtgärderna beräknas ge upphov till enligt de studerade scenarierna. Den

³⁸ Naturvårdsverket (2019). *Sveriges arter och naturtyper i EU:s art- och habitatdirektiv*.

³⁹ Naturvårdsverket (2019). *Sveriges arter och naturtyper i EU:s art- och habitatdirektiv*.

⁴⁰ Naturvårdsverket (2019). *Sveriges arter och naturtyper i EU:s art- och habitatdirektiv*.

⁴¹ Naturvårdsverket (2019). *Sveriges arter och naturtyper i EU:s art- och habitatdirektiv*.

⁴² "Markanvändningen i Sverige 2020." SCB. 2022-09-20. <https://www.scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/miljo/markanvandning/markanvandningen-i-sverige/pong/tabell-och-diagram/markanvandningen-i-sverige/> (Besökt 2024-07-01)

storskaliga utbyggnaden av elproduktionen förväntas kräva en stor utbyggnad av vindkraft i norra Sverige. Där är sannolikheten betydligt större att vindkraften kan komma att göra intrång både i naturtypsklassad skog, som är frekventare i norra Sverige, och i fjällmiljön. Det finns även stora förväntningar på en snabb och storskalig utbyggnad av havsbaserad vindkraft. Bevarandestatusen bedöms som otillfredsställande eller dålig för samtliga marina naturtyper, främst på grund av dålig kvalitet och dåliga framtidsutsikter.⁴³ Kunskapsläget är fortfarande begränsat om miljökonsekvenserna av havsbaserad vindkraft. Vindkraft till havs lokaliseras av tekniska skäl i relativt grunda områden. Dessa utgör ofta ekologiskt värdefulla miljöer. Bland negativa konsekvenser märks bland annat skador på känsliga grundområden vid anläggning, fåglar och fladdermöss som kolliderar med vindkraftverken samt undervattensbuller som kan störa fiskar och tumlare. Samtidigt kan de också ge positiva konsekvenser i form av skydd mot trålning och artificiella rev.⁴⁴ Det finns också modelleringsresultat som visar på regionala effekter på hydrografi, biogeokemi och pelagiska ekosystem.⁴⁵ NAP-åtgärderna beräknas leda till mycket små investeringar i havsbaserad vindkraft i alla betraktade scenarier. Därför åtgärderna diskuterar vi inte dess påverkan på biologisk mångfald ytterligare.

Vid en jämförelse av ett framtida miljötillstånd med eller utan NAP-åtgärder är vår bedömning att vattenmiljön kommer att gynnas påtagligt av lämpligt lokaliserade och utformade åtgärder samt att de negativa effekterna på landmiljön till följd av tillkommande investeringar i elproduktion blir helt försumbara jämfört med effekterna av den generella omställningen av energisystemet.

Det finns ett mycket omfattande stöd i litteraturen för att vattenkraften har genomgripande och övervägande negativa effekter på den biologiska mångfalden och vattenmiljön i sötvatten.⁴⁶ År 2021

⁴³ Naturvårdsverket (2019). *Sveriges arter och naturtyper i EU:s art- och habitatdirektiv*.

⁴⁴ Marcus C. Öhman (2023). *Effekter av havsbaserad vindkraft på fisk*. Naturvårdsverket 2023. Vindval rapport 7115. ISBN 978-91-620-7115-8.

⁴⁵ Lars Arneborg, Jörgen Öberg, Per Pemberton, Maria Karlberg, Sam Fredriksson (2023). *Regionala effekter av havsbaserad vindkraft*. SMHI 2023-08-21, reviderad 2023-09-05. https://www.smhi.se/polopoly_fs/1.202760!/Input_till_samradsunderlaget_SMHI_230821_RevHaV_RevSMHI%20%281%29.pdf (Besökt 2024-07-12)

⁴⁶ För en kunskapssammanställning om vattenkraftens påverkan på akvatiska ekosystem se till exempel Näslund m.fl. (2013). För fler exempel på studier, se Hart & Poff, 2002; Fahrig, 2003; Nilsson m.fl., 2005; Poulet, 2007 och Deinet m.fl., 2020.

presenterade Havs- och vattenmyndigheten en kunskapssammanställning om vattenkraftsdammars och andra dammars för- och nackdelar för bland annat biologisk mångfald jämfört med om dammarna inte skulle finnas.⁴⁷ Där drogs bland annat följande slutsatser:

- Artmångfalden i sötvatten är generellt mycket hög i proportion till habitatets areal. Rinnande vatten hyser en hög variation i habitat, morfologi och artrikedom i förhållande till sjöar och dammar.
- Det stora antalet anlagda dammar i svenska vattendrag har på många ställen gjort strömsträckor av hög kvalitet till en bristvara, vilket utgör ett hot för strömlevande organismer specifikt och biologisk mångfald generellt. I skapade lugnvattnet ersätts de strömlevande arterna med sjölevande arter.
- I Sverige finns det ca 220 rödlistade arter knutna till sötvattensmiljöer. Största andelen av de rödlistade arter som lever i sötvatten är kopplade till eller lever i vattendrag där vandringshinder och vattenreglering är de påverkansfaktorer som hotar dessa arter. Färre än 10 rödlistade arter är kopplade till vattenmagasin och reglerade vatten.
- Fragmentering till följd av dammar gör att strömlevande populationer även påverkas mer av andra stressfaktorer såsom torka, ökade vattentemperaturer, översvämningar och sjukdomar.
- Det saknas forskningsstudier som har visat på positiva effekter av dammar för strömvattenlevande arter eller landlevande arter som lever intill vattendraget.
- Vandringshinder kan dock minska risken för spridning av sjukdomar och kan begränsa oönskade arter att vandra obehindrat i vattendraget.

Nedan ges en översikt av förväntade effekter på biologisk mångfald av de fem typerna av NAP-åtgärder. Beskrivningarna är generella och

⁴⁷ Havs- och vattenmyndigheten (2021). *Redovisning av regeringsuppdrag om kunskapssammanställning om dammar*. Dnr 1-2021. 2021-09-29. <https://www.havochvatten.se/download/18.9d6062e17c13f61b9e73898/1633076455989/RU%20Kunskapssammanställning%20dammar%20slut.pdf> (Besökt 2024-07-11)

bedömningen av vilken eller vilka åtgärder som är lämpliga och hur de ska utformas och dimensioneras behöver göras utifrån de plats- och anläggnings-specifika förutsättningarna i varje enskilt fall.

Faunapassage

Faunapassager framhålls allmänt som en av de viktigaste miljöförbättrande åtgärderna.⁴⁸ Det finns ett större antal olika utformningar av både naturlika och tekniska lösningar.⁴⁹ Gemensamt är att de syftar till helt eller delvis återställa den naturliga konnektiviteten i vattendraget som har gått förlorad till följd av uppdamningen. Det möjliggör migration för fisk och andra akvatiska arter. Detta är särskilt viktigt för arter som lax och öring som behöver vandra för att reproducera sig.⁵⁰ Faunapassager minskar därmed habitatfragmentering och ökar tillgången till livsmiljöer uppströms och nedströms.⁵¹ Detta leder till en ökad överlevnad och reproduktion⁵² vilket i sin tur bidrar till ökad genetisk diversitet inom och mellan populationer⁵³. Sammantaget kan lämpligt lokaliserade

⁴⁸ Havs- och vattenmyndigheten (2021). *Redovisning av regeringsuppdrag om kunskapssammanställning om dammar*. Se även Erik Lindblom, Kristina Holmgren (2016). *Den småskaliga vattenkraftens miljöpåverkan och samhällsnytta*; Erik Degerman, Ingemar Näslund (2021). *Fysisk restaurering av akvatiska miljöer. Vattendrag och sjöar med kantzoner och våtmarker*. GRIP on LIFE:s rapportserie 2021.03. ISBN 978-91-986871-6-3.

⁴⁹ Degerman, Näslund (2021). *Fysisk restaurering av akvatiska miljöer*.

⁵⁰ Havs- och vattenmyndigheten (2021). *Redovisning av regeringsuppdrag om kunskapssammanställning om dammar*.

⁵¹ Havs- och vattenmyndigheten (2022). *Levande sjöar och vattendrag*; Beatrice Hedelin, Johanna Alkan-Olsson, Larry Greenberg (2023). *Collaboration Adrift: Factors for Anchoring into Governance Systems, Distilled from a Study of Three Regulated Rivers. Sustainability* 2023, 15, 4980. <https://doi.org/10.3390/su15064980>

⁵² Åsa Widén, Roland Jansson, Birgitta Renöfält, Erik Degerman, Dag Wisaeus (2017). *Ekologisk reglering. Metod för att beräkna produktionsförluster och miljönytta i reglerade vattendrag*. Energiforsk rapport 2017:449. ISBN 978-91-7673-449-0. Se även Lindblom, Holmgren (2016). *Den småskaliga vattenkraftens miljöpåverkan och samhällsnytta*; Mia Svedäng, Cecilia Lindblad, Henrik Nordzell, Klas Sandell (2023). *Porlande bäckar och brusande älvar – värden och nyttor i fritt strömmande vatten*. Naturskyddsföreningen och WWF, 2023. ISBN: 978-91-558-0263-9.

⁵³ Mikael Strömberg, Christer Borg, Erik Degerman, Sara Friberg, Göran Jonzon, Leif Jougda, Lennart Norström, Berit Sers, Erik Sjölander, David Spjut (2015). *Ångermanälvsprojektet – förslag till miljöförbättrande åtgärder i mellersta Ångermanälven och nedre Fjällsjöälven*. WWF, Telge Energi, Länsstyrelsen Västernorrland, Länsstyrelsen Västerbotten, Älvräddarna, Coompanion, SLU, Vilhelmina Model Forest, ÄFF, Skogsstyrelsen. 2015.

https://media.wwf.se/uploads/2019/01/angermanalvsprojektet_sept2015_.pdf (Besökt 2024-07-12); Åsa Widén, Roland Jansson, Jani Ahonen, Birgitta Malm-Renöfält (2022a).

och utformade faunapassager med andra ord minska vattenkraftens negativa miljöeffekter och bidra till ett hälsosammare och mer robust ekosystem genom mer naturliga processer och flöden.⁵⁴ Värdet av faunapassager kan också utläsas av det faktum att 60 av 73 ansökningar där verksamhetsutövarna i första hand ansökt om moderna miljövillkor föreslår fiskpassager för uppströms vandring som villkor, där 39 avser tekniska lösningar och 21 naturliga passager i form av inlöp och omlöp.⁵⁵

Vår bedömning är att någon form av faunapassage kommer att krävas för en stor majoritet av de vattenkraftverk som inte redan har det. Undantag bör i första hand göras för de verk som sammanfaller med naturliga vandringshinder och för de kraftigt modifierade vatten där anläggandet av en faunapassage blir orimligt kostsam eller tekniskt komplicerad.

Återskapa eller förbättra hydrologisk regim

Ett vattendrags naturliga flödesregim, mönstret med höga och låga flöden över året och mellan år, och specifika vattenflöden och vattenstånd som är nödvändiga för att skapa lämpliga miljöer för olika arter har avgörande betydelse för ett vattendrags ekologiska status.⁵⁶ Vi använder här begränsningar i vattenreglering som ett samlingsbegrepp för åtgärdstyperna ökad minimitappning, begränsning av korttidsreglering och miljöanpassade flöden. Även om

Lagan inför miljöprövning av vattenkraften. 2022. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1725269/FULLTEXT01.pdf>. (Besökt 2024-07-12)

⁵⁴ Åsa Widén, Jani Ahonen, Birgitta Malm Renöfält, Erik Degerman, Roland Jansson (2022b). *Ljungan inför miljöprövning av vattenkraften: naturvärden, flöden och strömhabitat samt möjliga miljönyttor*. 2022. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1633540/FULLTEXT02.pdf> (Besökt 2024-07-12); Åsa Widén, Birgitta Malm Renöfält, Erik Degerman, Dag Wisaeus, Roland Jansson (2021a). Let it flow: Modeling ecological benefits and hydropower production impacts of banning zero-flow events in a large regulated river system. *Science of the Total Environment* 783 (2021) 147010. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147010>

⁵⁵ Havs- och vattenmyndigheten (2023). *Uppdrag om att följa upp och analysera arbetet med att förse vattenkraften med moderna miljövillkor*. Redovisning av regeringsuppdrag Dnr 2135-22. 2023-12-01.

<https://www.havochvatten.se/download/18.6f2a86e218bd90826b0d7497/1701344886665/2135-22%20Slutredovisning-RU-uppfoljning-nap.pdf> (Besökt 2024-07-12)

⁵⁶ Degerman, Näslund (2021). *Fysisk restaurering av akvatiska miljöer*; Widen m.fl. (2021a) Let it flow; Åsa Widén, Birgitta Malm Renöfält, Erik Degerman, Dag Wisaeus, Roland Jansson (2021b). Environmental Flow Scenarios for a Regulated River System: Projecting Catchment-Wide Ecosystem Benefits and Consequences for Hydroelectric Production. *Water Resources Research*, 58, 2021WR030297. <https://doi.org/10.1029/2021WR030297>.

de skiljer sig åt syftar alla tre i första hand till att stärka livsmiljöerna nedströms dammen. (Begränsningar av korttidsreglering kan även minska erosionen av vattenmagasinets strandzon.) Åtgärderna kan dessutom kombineras.

- **Minflöde** anger ett lägsta tillåtet flöde förbi eller genom kraftverket. Kravet kan skilja sig åt mellan olika delar av året, särskilt i kombination med miljöanpassade flöden. Beroende på de platsspecifika förutsättningarna kan minflödet antingen släppas direkt i fåran nedströms dammen eller genom en faunapassage. I vissa fall kan faunapassagen anläggas så att den mynnar direkt nedanför dammen, men ofta löper den parallellt med den naturliga fåran. Leds minflödet via faunapassagen kan det finnas en torråra mellan dammen och faunapassagens mynning under perioder när inget vatten släpps genom turbinerna. Krav på minflöde är ett vanligt villkor och vår bedömning är att den kommer att bli än vanligare genom NAP-processen. Majoriteten av de ansökningar som hittills har lämnats in innehåller yrkanden om någon form av minimitappning, främst genom tänkt fiskväg.⁵⁷
- **Korttidsreglering** kan förekomma både vid små- och storskalig vattenkraft och påverkar nedströms vattendrag genom snabba och återkommande onaturliga variationer i vattenflödet.⁵⁸ Det saknas en entydig och generell definition av korttidsreglering. Ett förslag vi har stött på är mer än 1 meter regleramplitud inom ett dygn.⁵⁹ Även om denna åtgärd har viktiga positiva effekter, är det färre rapporter som specifikt beskriver dess nytta lika detaljerat som för de andra åtgärderna. Denna åtgärd bidrar dock till minskad erosion och förbättrad biologisk mångfald.⁶⁰ Åtgärden begränsar inte hur mycket eller lite vatten som får eller måste släppas ur reservoaren. Därmed påverkas inte den totala elproduktionen direkt. Däremot begränsas körmönstret, vilket kan vara negativt för andra elsystemtjänster. Åtgärden är ovanlig i

⁵⁷ Havs- och vattenmyndigheten (2023). *Uppdrag om att följa upp och analysera arbetet med att förse vattenkraften med moderna miljövillkor.*

⁵⁸ Degerman, Näslund (2021). *Fysisk restaurering av akvatiska miljöer*

⁵⁹ Det här förslaget gavs som ett exempel på en definition av korttidsreglering i en intervju med en handläggare på Havs- och vattenmyndigheten våren 2024.

⁶⁰ Degerman, Näslund (2021). *Fysisk restaurering av akvatiska miljöer*; Havs- och vattenmyndigheten (2022). *Levande sjöar och vattendrag.*

dagsläget, bland annat för att den kan vara svår både att definiera och följa upp, men vår bedömning att den kommer att tillämpas oftare framöver, och det har förekommit både ansökta och utdömda villkor med någon form av begränsad korttidsreglering i de ansökningar som hittills hanterats. Åtgärden ingår inte i scenariot "Vattenförvaltningscykel 2.5/Miljöalternativ D" i Svenska Kraftnäts redovisning av regeringsuppdrag att kartlägga vilka konsekvenser prövningen för moderna miljövillkor för vattenkraften kan få för elsystemet och för en trygg elförsörjning.

- **Ekologiska flöden** innebär villkor för verksamheten som delvis styr flödesmängder under vissa tider på året. De kan också kallas bland annat ekoflöden eller miljöanpassade flöden. Åtgärden kan därmed påminna om både ökat minflöde och begränsningar av korttidsreglering. Ekologiska flöden syftar på ett flödesmönster som återskapar eller åtminstone efterliknar naturliga flödesregimer, vilket gynnar både biologisk mångfald och minskar erosion, vilket är viktigt för att upprätthålla stabila och hälsosamma ekosystem.⁶¹

Några gemensamma eller likartade effekter av de tre åtgärderna är att de kan bidra till förbättrade/mer naturtrogna habitat, minskad stress för akvatiska organismer och en förbättrad tillväxt och reproduktion i sötvatten. Alla dessa effekter bidrar i sin tur direkt eller indirekt positivt till den biologiska mångfalden. Krav på minflöden och miljöanpassade flöden leder till stabilare vattennivåer och förbättrar vattenkvaliteten genom att säkerställa kontinuerligt flöde och förhindra stagnation. Detta gynnar särskilt fisk.⁶² Ett kontinuerligt flöde hjälper också till att minska ackumuleringen av näringsämnen och föroreningar.⁶³ Stabiliseringen av habitat kan bli särskilt påtaglig för vattenmiljöer som har utsatts för korttidsreglering. Om det begränsas minskar erosion och sedimenttransport, vilket förbättrar

⁶¹ Degerman, Näslund (2021). *Fysisk restaurering av akvatiska miljöer*; Hedelin, Alkan-Olsson, Greenberg (2023). *Collaboration Adrift*.

⁶² Havs- och vattenmyndigheten (2021). *Redovisning av regeringsuppdrag om kunskapssammanställning om dammar*; Mats Jonsson (2015). *Rikedomar runt rinnande vatten. De ekonomiska värdena av en miljöanpassad vattenkraft*. Sportfiskarna, WWF, Älvräddarna, Naturskyddsföreningen. 2015.
<https://media.wwf.se/uploads/2019/01/rikedomar-vatten-2.pdf> (Besökt 2024-07-12).

⁶³ Degerman, Näslund (2021). *Fysisk restaurering av akvatiska miljöer*; Hedelin, Alkan-Olsson, Greenberg (2023). *Collaboration Adrift*.

bottnar och strandzoner.⁶⁴ Det gynnar en lång rad arter som nyttjar de habitaterna, allt från bottenlevande smådjur och laxfiskar som gräver ner rom i grusbottnar till strandvegetation och akvatiska makrofyter.⁶⁵ Förbättrade habitat och minskad stress leder till ökad biomassa och densitet hos fiskpopulationer, vilket stärker deras överlevnad och reproduktionsframgång.⁶⁶

Biotopvårdande åtgärder

Biotopvårdande åtgärder omfattar många olika slags åtgärder som kan utföras i eller längs vattendrag och sjöar. Till skillnad från åtgärdstyperna ovan så påverkar de normalt sett inte de direkta förutsättningarna för vattenkraftproduktionen. I stället kan åtgärderna bestå av att lägga ut död ved, stora stenar eller grusbankar i vattendrag för att återställa bottenstrukturer, flodbankar och naturliga habitat.⁶⁷ Genom att göra delar av nedströmsfåran smalare kan man öka vattnets flödes hastighet utan att behöva öka flödesvolymen. Det finns fler exempel på hur det går att skapa en mängd olika mikrohabitat som stödjer olika arter.⁶⁸ Sammantaget kan biotopvårdande åtgärder – ensamma eller i kombination med faunapassager eller begränsningar i vattenregleringen – bidra till att förbättra ekosystemets övergripande funktion och motståndskraft mot störningar.⁶⁹

⁶⁴ Jonsson (2015). *Rikedomar runt rinnande vatten*; Widén m.fl. (2017) *Ekologisk reglering*; Havs- och vattenmyndigheten (2021). *Redovisning av regeringsuppdrag om kunskapssammanställning om dammar*; Widen m.fl. (2021a) *Let it flow*.

⁶⁵ Havs- och vattenmyndigheten (2022). *Levande sjöar och vattendrag*; Widén m.fl. (2021b) *Environmental Flow Scenarios for a Regulated River System*.

⁶⁶ Widén m.fl. (2017) *Ekologisk reglering*; Svedäng (2023). *Porlande bäckar och brusande älvar*; Widén m.fl. (2022b) *Ljungan inför miljöprövning av vattenkraften*.

⁶⁷ Jonsson (2015). *Rikedomar runt rinnande vatten*; Degerman, Näslund (2021). *Fysisk restaurering av akvatiska miljöer*; Hedelin, Alkan-Olsson, Greenberg. (2023) *Collaboration Adrift*.

⁶⁸ Åsa Widén, Birgitta Malm Renöfält, Jani Ahonen, Roland Jansson (2023). *Ecopeaking – Pilotstudie om korttidsreglering*. Energiforsk rapport 2023:935. ISBN 978-91-7673-935-8.

⁶⁹ Roland Jansson, Erik Degerman, Åsa Widén, Birgitta Malm Renöfält (2017). *Evidensbaserade åtgärder för att restaurera ekologiska funktioner i reglerade vattendrag. Vad finns i verktygslådan?* Energiforsk rapport 2017:430. ISBN 978-91-7673-430-8; Birgitta Malm Renöfält, Åsa Widén, Roland Jansson, Erik Degerman (2017). *Identifiering av påverkan, åtgärdsbehov och åtgärds potential i vattendrag påverkade av vattenkraft*. Energiforsk rapport 2017:429. ISBN 978-91-7673-429-2.

3.3.4 Övriga ekosystemtjänster

Vattenkraften har inte bara en stor påverkan på den biologiska mångfalden, utan påverkar också en majoritet av de ekosystemtjänster som Havs- och vattenmyndigheten har föreslagit för sötvatten.⁷⁰ Ekosystemtjänster är de nyttor, direkta eller indirekta, som naturens ekosystem och dess organismer tillhandahåller människan. Både NAP-åtgärderna och de resulterande investeringarna i nya produktionsanläggningar kan därför påverka även övriga ekosystemtjänster. Eftersom markomvandlingen av landmiljön blir så liten i de studerade scenarierna gör vi antagandet att effekterna på ekosystemtjänsterna från skog och jordbruksmark blir försumbar. Antagandet förutsätter att man tar hänsyn till ekosystemtjänster under planering och prövning av nya sol- och vindkraftsparker.

Vattenkraften är en av de viktigaste påverkansfaktorerna, efter skogsbruk och jordbruk, med kopplingar till 19 av 23 ekosystemtjänster. I flera fall är vattenkraftens påverkan negativ. Det gäller särskilt för de stödjande tjänsterna som bland annat bidrar till att upprätthålla den biologiska mångfalden. I andra fall är påverkan neutral. Ofta är påverkan situationsberoende. Om och hur mycket en vattenkraftdamm kan bidra till den reglerande tjänsten *Skydd mot översvämningar* beror bland annat på dess regleringsvolym och vattendragets högvattenföring. Vattenkraftens dammar har inte utformats för att aktivt minska översvänningsrisker och de flesta mindre vattenkraftverk drivs som strömkraftverk och har inte någon större betydelse för att dämpa flödena vid en höglödessituation.⁷¹ Dammar fungerar som en sedimentfälla som förändrar den naturliga erosionen och kan minska näringstillförsel nedströms, vilket påverkar *Biogeokemiska cykler*, *Sedimentkvarhållning*, *Reglering övergödning* och i vissa fall *Reglering av giftiga ämnen*.⁷² Vattenkraften både underlättar och försvårar exempelvis strandnära promenader, som är ett exempel på den kulturella tjänsten *Rekreation*, genom att skapa i vissa fall vattenspeglar och i andra fall torrlägga strömfåror eller erodera strandzoner. Om vattenkraften bidrar positivt eller negativt till *Eстетiska värden* beror både på den specifika anläggningens utformning

⁷⁰ Havs- och vattenmyndigheten (2017). *Ekosystemtjänster från svenska sjöar och vattendrag. Identifiering och bedömning av tillstånd*. 2017. Havs- och vattenmyndighetens rapport 2017:7. ISBN 978-91-87967-55-9.

⁷¹ Havs- och vattenmyndigheten (2021). *Redovisning av regeringsuppdrag om kunskapssammanställning om dammar*.

⁷² Havs- och vattenmyndigheten (2021). *Redovisning av regeringsuppdrag om kunskapssammanställning om dammar*.

och betraktarens preferenser.⁷³ Tabell 4 redovisar Havs- och vattenmyndighetens lista över ekosystemtjänster i sötvatten tillsammans med deras bedömning av hur vattenkraften påverkar dessa.

Tabell 4. Lista över ekosystemtjänster i Sveriges sötvatten.⁷⁴ Kryssen indikerar vilka ekosystemtjänster som påverkas av vattenkraften genom fysisk exploatering (X1), vattenståndsreglering (X2) och vandringshinder (X3).⁷⁵

Kategori	Ekosystemtjänst	Beskrivning	Vattenkraft
Stödjande (S)	Biogeokemiska cykler	Kolets, kvävet, syrets och fosfors cykler.	X1 X2
	Primärproduktion	Fotosyntesens omvandling av koldioxid (CO ₂) och energi (solljus) till kolhydrater (biomassa) och syre.	X1 X2
	Näringsväv	Ett fungerande flöde av energi från lägre till högre trofiska nivåer i ekosystemet.	X1 X2 X3
	Biologisk mångfald	Artrikedom och artsammansättning som ger en förutsättning för upprätthållandet av ekologiska system.	X1 X2 X3
	Livsmiljö	Livsmiljö (habitat) som ger en förutsättning för att arter ska kunna utvecklas och fortleva.	X1 X2 X3
	Vattnets kretslopp	Vattnets cirkulation i form av ånga som kondenserar och faller ned till marken som nederbörd.	X1 X2
Reglerande (R)	Luft- och klimatreglering	Reglering via upptag av växthusgaserna koldioxid (CO ₂), metan (CH ₄) och lustgas (N ₂ O).	X1 X2
	Sedimentkvarhållning	Reglering av erosion via olika jordarter.	X1 X2 X3
	Reglering övergödning	Reglering av övergödning genom omvandling av oorganiskt kväve till kvävgas, sedimentation och upptag i levande organismer.	X2
	Biologisk reglering	Reglering av patogena organismer genom inlandsvattnens olika förmågor att begränsa effekterna.	X3
	Reglering av giftiga ämnen	Reglering av giftiga ämnen genom nedbrytning, lagring i biomassa eller sedimentation.	X1 X2
	Vattenrening	Rening och syresättning av vatten genom fotosyntesen.	X1 X2

⁷³ Havs- och vattenmyndigheten (2017). *Ekosystemtjänster från svenska sjöar och vattendrag*.

⁷⁴ Havs- och vattenmyndigheten (2017). *Ekosystemtjänster från svenska sjöar och vattendrag*. Tabell 5.

⁷⁵ Havs- och vattenmyndigheten (2017). *Ekosystemtjänster från svenska sjöar och vattendrag*. Tabell 5.

Kategori	Ekosystemtjänst	Beskrivning	Vattenkraft
	Skydd mot översvämningar	Reglering av översvämning genom ekosystemets förmåga att motstå översvämning, via till exempel svämplan och plana ytor längs vattendrag.	X1 X2
Producerande (P)	Livsmedel	Tillhandahållande av olika livsmedel som fisk och kräftor.	X1 X2 X3
	Dricksvatten	Tillhandahållande av dricksvatten som i sötvatten är världens viktigaste livsmedel.	X2
	Genetiska resurser	Tillhandahållande av genetiskt material i sjöar och vattendrag vid tillverkning av läkemedel och kosmetika.	X1 X2 X3
	Vatten till bevattning och industri	Tillhandahållande av vatten till industriprocesser och till bevattning inom jordbruket.	X2
Kulturella (C)	Rekreation	Rekreation och avkoppling som t.ex. fritidsfiske, bada, åka båt, åka skridskor, dyka och fågelskådning.	X1 X2 X3
	Estetiska värden	Sjöar, vattendrag och vattnets utseende, exempelvis både ovanför och under ytan, om den är grumlig eller inte är något som påverkar hur estetiskt vi upplever vattnet.	X1 X2 X3
	Vetenskap och utbildning	Genom forskning och utbildning får vi kunskap om naturens nyttor.	
	Kulturarv	Kulturarv i anslutning till svenska sjöar och vattendrag består bland annat av gamla kvarnar, luckdammar och byggnader såsom tvättstugor och badhus.	X1 X2 X3
	Inspiration	Sötvattensekosystemens funktion som inspirationskälla till exempelvis kultur, utbildning och vetenskap.	
	Naturarv	Naturliga funktioner (habitat), formationer och platser av estetiskt och vetenskapligt värde.	X1 X2 X3

De tre typerna av påverkan ger en grov uppfattning om vilka ekosystemtjänster som kan komma att påverkas av olika NAP-åtgärder:

- Den **fysiska exploateringen** kan i första hand reduceras genom utrivning av dammen, men ett vattenkraftverk består också av maskinhus, tilloppstub med mera. Reservoaren innebär i de flesta fall också en fysisk exploatering, när landmiljöer ställts under vatten. I vissa fall kan

biotopvårdande åtgärder reducera effekterna av den fysiska exploateringen, åtminstone för vissa ekosystemtjänster.

- **Vattenståndsregleringens** effekter kan helt elimineras genom utrivning av dammen. De kan också reduceras genom en ökad minimitappning, begränsningar av korttidsreglering och miljöanpassade flöden, antingen för att bättre efterlikna naturliga flödesvariationer eller för att dämpa regleringsamplituden eller både och.
- Även de artificiella **vandringshinder** som ett vattenkraftverk innebär kan helt elimineras genom utrivning. Det är värt att påminna om att flera vattenkraftverk har uppförts vid platser med naturliga vandringshinder. Det gäller särskilt äldre och därmed mindre kraftverk. Effekterna av vandringshinder kan i de flesta fall effektivt reduceras med lämpligt utformade faunapassager förbi turbiner och kraftverksdamm. Ökad minimitappning, miljöanpassade flöden och olika typer av biotopvårdande åtgärder kan förbättra vandringsvägarna nedströms kraftverk.

Man måste komma ihåg att vattenkraftens påverkan inte är negativ för alla ekosystemtjänster, att inte alla ekosystemtjänster i Tabell 4 påverkas lika mycket eller av varje vattenkraftverk samt att NAP-åtgärdernas effekter varierar mellan olika utformningar. Det är därför nödvändigt med plats- och anläggnings specifika bedömningar för att uppnå önskat resultat.

Lindblom och Holmgren resonerade 2016 om vilka effekter en omfattande utrivning av små vattenkraftverk skulle kunna få på kultur och rekreation, miljö och elförsörjningen.⁷⁶ Följande slutsatser från den studien kan sägas ha kopplingar till flera av de ekosystemtjänster i sötvatten som beskrivs ovan:

Vattenmiljön och den biologiska mångfalden gynnas av att återskapa strömsträckor och minska antalet vandringshinder. (...) Studien drar också slutsatsen att det kan uppstå andra, kumulativa, effekter om många vattenkraftverk längs samma vattendrag eller i samma avrinningsområde skulle rivas ut. Till exempel kan det lokala mikroklimatet påverkas av att sjöarealen minskar med färre dammar. Risken för skred och sättningar kan öka till följd av förändrade grundvattennivåer.

⁷⁶ Lindblom, Holmgren. *Den småskaliga vattenkraftens miljöpåverkan och samhällsnytta.*

Markfuktförhållanden kan också påverka produktivitet i angränsande jordbruks- och skogsmark.

Många småskaliga vattenkraftanläggningar har höga kulturhistoriska värden. De är de äldsta tekniska installationerna som fortfarande är i drift och de påminner tydligt om hur Sveriges industrialisering och elektrifiering gick till. Värdena hänger starkt samman med en bibehållen verksamhet. (...) Enligt studien kan det finnas fler frågor som bör påverka beslut om utrivning eller andra miljöförbättrande åtgärder. Ett exempel är att det är svårt att jämföra sportfiskets ökade värde efter återställning av strömsträckor med minskade värden från andra rekreativitet eller boendemiljö. (...) Andra exempel på frågeställningar som knappast har någon större betydelse i det enskilda fallet men där de kumulativa effekterna kanske kan få betydelse är hur vattenmiljöns motståndskraft mot invasiva arter förändras med ökad konnektivitet och vilken betydelse den småskaliga vattenkraftens fördämningar har vid översvämningar i ett förändrat klimat.

Även om NAP-åtgärder generellt syftar till att främja den biologiska mångfalden, uttryckt som biologiska kvalitetsfaktorer, så kan de samtidigt påverka fler ekosystemtjänster. De tydligaste kopplingarna finns till de kulturella tjänsterna *Rekreation*, *Estetiska värden*, *Kulturarv*, *Inspiration* och *Naturarv* genom att påverka både vattenkraftverkens och den omedelbara omgivningens fysiska utformning, men även genom att gynna förutsättningar för sportfiske.⁷⁷ Naturturism, särskilt i form av sportfiske, gynnas av ökad konnektivitet och naturliga flöden eftersom det gynnar fiskpopulationerna. Upp emot en tredjedel av vattenkraftverken har höga kultur- och teknikhistoriska värden som sannolikt skulle gå förlorade vid en utrivning.⁷⁸ Andra typer av NAP-åtgärder, till exempel krav på minimitappning, faunapassager och restriktioner vattenregleringen, kan ofta utformas så att påverkan blir mindre. Det är därför angeläget att konsekvensbedömningar görs i varje enskilt fall även avseende kulturmiljön. Andra ekosystemtjänster som kan påverkas är de reglerande tjänsterna *Sedimentkvarhållning* genom att till exempel minska erosion genom

⁷⁷ Lindblom, Holmgren (2016). *Den småskaliga vattenkraftens miljöpåverkan och samhällsnytta*.

⁷⁸ Lindblom, Holmgren (2016). *Den småskaliga vattenkraftens miljöpåverkan och samhällsnytta*.

begränsningar av korttidsreglering, *Reglering övergödning* och *Reglering av giftiga ämnen* genom ökad minimitappning som tillåter större transport av partikulärt material, de producerande tjänsterna *Livsmedel* genom att påverka fisk- och kräftpopulationer och *Vatten till bevattning och industri* genom att begränsa vattenkraftens körmönster samt i olika hög grad. Eftersom NAP-åtgärderna kommer att beslutas och genomföras under de kommande två decennierna går det inte idag att förutsäga vad det samlade utfallet blir.

Sammantaget gör vi bedömningen att effekterna på reglerande och producerande ekosystemtjänster kommer att bli helt underordnade effekterna på de stödande ekosystemtjänsterna och biologisk mångfald. Det gäller dock inte för utrivningar. I de fallen kan effekterna bli stora på flera ekosystemtjänster. Generellt – men inte nödvändigtvis i varje enskilt fall – bedömer vi att NAP-åtgärdernas effekter även på reglerande och producerande tjänster blir positiva, med undantag för *Vatten till bevattning och industri*. Situationen är mer svårbedömd för de kulturella tjänsterna eftersom flera av dem är knutna till de befintliga kraftverkens utformningar och det faktum att de fortfarande är i drift. Beslut om miljöförbättrande åtgärder bör därför baseras på plats- och anläggningsspecifika bedömningar för att balansera effekterna på både biologisk mångfald och andra ekosystemtjänster.

3.3.5 Kritiska material

Den pågående gröna omställningen förväntas öka behovet av en rad kritiska material. Till exempel innehåller vindkraftverk ofta neodym, nickel och zink. Solenergi använder gallium, indium och tellur, och batterier och elbilar använder kobolt, litium och nickel. Vissa mineraler används endast för specifika ändamål, som kobolt och litium, medan andra som koppar och nickel används i stor utsträckning inom solenergi, vindkraft, elnät och energilagring (Hund et al., 2022; KU Leuven, 2022). Olika studier har visat olika resultat vad gäller möjligheten att hantera materialförsörjning i hållbara framtidsscenarioer (Watari et al., 2017; Månberger & Stenqvist, 2018).

I detta avsnitt väljer vi att fokusera på kritiska metaller, men slutsatserna är sannolikt desamma även för många andra kritiska material. Som redovisat i avsnitt 4.2.4 så förväntas en ökad användning av kritiska metaller till följd av investeringar i elsystemet. Det beräknade behovet av vanliga metaller som koppar och nickel är

större än för mer ovanliga metaller som kobolt och neodym. För att avgöra i vilken utsträckning det beräknade tillkommande behovet av kritiska metaller är stort i förhållande till övrig användning kan vi jämföra mot den förväntade användningen av dessa metaller i den pågående gröna omställningen i Sverige.

EU-kommissionen (2020) presenterar en prognos för användningen av kritiska råvaror utifrån scenarier framtagna av EU. Scenariot med medelstor efterfrågan antar att det inom EU finns 200–250 miljoner elbilar i bilparken år 2050 (EU:s personbilsflotta 2020 var nästan 250 miljoner bilar), 300 GWh batterilagringkapacitet, 800 GW kapacitet för landbaserad vindkraft, 450 GW kapacitet för havsbaserad vindkraft och 1 000 GW solcellskapacitet. För detta scenario anges förväntad användning av kritiska metaller inom EU vilket vi grovt skalar ner till svenska förhållanden genom att anta att Sverige står för 2 % av antalet bilar i EU, 3,6 % av vindkraften och 1 % av solenergin inom EU. Prognostiserad vindkraft och solkraft i Sverige kommer från Brännlund et al. (2022). I **Tabell 3** nedan visas hur stor andel av den prognosticerade användningen av olika kritiska material i Sverige som de tillkommande investeringarna i elsystemet i de olika scenarierna skulle utgöra.

Tabell 3. Tillkommande behov av kritiska material uttryckt som andel (%) av förväntad användning i den gröna omställningen i Sverige.

	Nuclear_N	Nuclear_LE	Wind
Chromium	2	3	2
Cobalt	0	0	0.007
Copper	0	1	0.7
Dysprosium	0	0	2.3E-07
Gallium	-7*	122	116
Graphite	0	0	0.002
Lithium	0	0	0.07
Manganese	1	1	0.9
Molybdenum	1	-3*	-2*
Neodymium	0	0	6.5E-05
Nickel	0	0	0.4
Platinum	0	0	0.05
Praseodymium	0	0	9.4E-05
Selenium	-13*	131	107
Tellurium	-1*	9	7

* Negativa tal anger minskad användning till följd av NAP-åtgärder

Notera att investeringarna i elsystemet i scenarierna inte begränsas till det svenska elsystemet och att jämförelsen med behoven för svensk omställning endast tjänar syftet att belysa storleksordningen av tillkommande investeringar med avseende på behovet av kritiska material.

För ett fåtal fall innebär NAP-åtgärderna, enligt dessa beräkningar, att efterfrågan kopplad till dessa investeringar är större än efterfrågan i den gröna omställningen, vilket främst indikerar en mycket liten efterfrågan i den gröna omställningen. Det gäller ämnen som gallium och selen vilket också är starkt beroende av vilka antaganden kring teknikval som görs (de kan användas i solceller, men behöver inte göra det), vilket tenderar att skilja sig mellan olika studier.

I de flesta fall är andelen i stället mycket liten, fraktioner av en procent, vilket indikerar att NAP-åtgärdernas påverkan på efterfrågan på kritiska material är marginell i ett större perspektiv. Slutsatsen blir å ena sidan att denna efterfrågan rimligen knappast är en betydande konsekvens av NAP-åtgärderna. Å andra sidan efterfrågas kvantiteter av metaller som kobolt, koppar, litium och nickel som det riskerar att bli brist på globalt till följd av den gröna omställningen (referens), vilket kan försvåra de investeringar som NAP-åtgärderna förutsätter. Detta skulle kunna leda till negativa följd effekter som vi inte har fångat upp i modellanalyserna där vi inte tar hänsyn till begränsningar i tillgången på råmaterial för att bygga energiinfrastrukturen.

4 Diskussion

I denna bilaga har vi gjort en ansats för att bedöma hållbarhetskonskvenser av förändringar i det nordeuropeiska elsystemet orsakad av begränsad vattenkraftsproduktion och andra framtida förändringar i elsystemet, såsom ökat elbehov. Ambitionen har varit att utforska frågeställningen ur ett brett perspektiv, med utgångspunkt i samtliga av FN:s globala hållbarhetsmål.

Vår inledande analys visar att ett antal globala hållbarhetsmål kan komma att påverkas av miljöåtgärder i svensk vattenkraft, och att en stor del av påverkan kan förväntas gälla målen Ekosystem och biologisk mångfald och i viss mån Rent vatten och sanitet⁷⁹. Närmare bestämt kan vi konstatera en huvudsakligen direkt positiv påverkan på de akvatiska ekosystemen till följd av miljöåtgärder, och blandade effekter på övriga hållbarhetsmål. Den förstnämnda effekten är väntad och helt i linje med syftet med miljöåtgärderna. Utmaningen är i stället att på något sätt värdera de övriga effekterna.

Miljöåtgärderna leder förvisso till följdinvesteringar i ny elproduktion och flexibilitetsåtgärder som innebär en belastning på mark- och resursanvändning, som i sin tur kan ge utsläpp av växthusgaser och kemikalier. Ett viktigt uppdrag i detta delprojekt har varit att undersöka betydelsen av dessa följd effekter. Vi bedömer att det finns ett särskilt behov av att undersöka aspekter som berör kritiska frågor kopplade till den gröna omställningen. Med tanke på klimatfrågans betydelse har därför klimatpåverkan varit en viktig aspekt, liksom frågor kopplade till målkonflikter inom den gröna omställningen, såsom behovet av kritiska metaller för energi och elektrifiering, ökad markanvändning och markomvandling. De senare aspekterna tenderar att försvåra klimatomställningen genom att skapa konflikter kring vilken mark och vilka resurser som tas i anspråk och det är därför angeläget att beakta sådana effekter i olika energiscenarier. Genom vår hållbarhetsanalys har vi också detekterat möjlig påverkan på exempelvis arbetsvillkor i andra länder (vilket vi bedömt som små och osäkra effekter), samt på det svenska elsystemet (vilket hanteras i andra delar av projektet).

⁷⁹ Detta hållbarhetsmål berör främst hållbar vatten- och avloppshantering m.m., men inkluderar även delmål som kopplar till förvaltning av vattenresurser och skydd och återställning av vattenrelaterade ekosystem. Därav är det relevant för detta projekt.

Den kvantitativa hållbarhetsanalysen i detta projekt gav upphov till ett antal insikter som informerade våra kvalitativa resonemang och bidrog till den övergripande analysen. Samtidigt finns tydliga begränsningar i denna metod givet studiens omfattning. Den viktigaste av dessa är sannolikt att vi använder underlagsdata som beskriver dagens teknik för att analysera miljöpåverkan av aktiviteter som kan komma att ske ett par årtionden fram i tiden. Denna och övriga begränsningar beskriver vi i avsnitt 2.2.1. Med detta i åtanke bör man därför vara försiktig med att dra allt för långtgående slutsatser baserat på endast resultaten från den kvantitativa hållbarhetsanalysen.

Bland de viktigaste slutsatserna är att konsekvenserna på klimatpåverkan från elsystemet till följd av de antagna begränsningarna i svensk vattenkraft är relativt små. Detta gäller över alla våra studerade scenarier. Det är dock viktigt att komma ihåg att detta är givet ett villkor i energisystemmodellerna att alla fossila bränslen är urfasade från kraftproduktionen i Nordeuropa till 2045. Energisystem-modellerna visar även att investeringarna i annan elproduktion fram till 2045 påverkas endast marginellt av begränsningarna i svensk vattenkraft. I våra olika energisystemscenarier så påverkas det omgivande elsystemet något olika av miljöåtgärderna i svensk vattenkraft vilket ger på marginalen olika konsekvenser men den övergripande slutsatsen om hur utsläppen av klimatpåverkande gaser påverkas är ändå densamma.

Effekterna på markomvandling eller förändrad markanvändning påverkas mest av tillkommande investeringar i storskalig solkraft och på användningen av olika biobaserade bränslen i kraftproduktionen. För det senare gäller att ursprunget för bioråvaran kommer ha stor betydelse för den faktiska miljöpåverkan som förbrukningen ger upphov till, vilket är viktigt att beakta. Även för markomvandling/förändrad markanvändning gäller dock att påverkan från miljöåtgärder i svensk vattenkraft bedöms bli liten i förhållande till annan markanvändning, exempelvis den som omställningen av energisystemet kommer kräva i stort.

När det kommer till effekterna på behovet av olika kritiska mineral så är det den enda påverkanskategori där vi ser en tydlig, och som vi anser signifikant, skillnad mellan de olika energisystemscenarierna. För nästan alla kritiska mineral som vi tittat på här så ökar efterfrågan mer i scenariot där det sker en kraftig utbyggnad av havsbaserad vindkraft i Sverige. I detta scenario ökar investeringarna mer i olika

flexibilitetslösningar som exempelvis elektrolysörer för vätgasproduktion, batterier med flera. Dessa medför ett större behov av olika kritiska mineral. Här kan det dock återigen vara värt att poängtera att teknikutveckling har skett och sannolikt kommer att fortsätta att ske som innebär ett minskat, eller åtminstone förändrat, behov av kritiska material för olika tekniklösningar. Exempelvis har det på senare år utvecklats litium-jon-batterier som innehåller betydligt mindre mängder kobolt, vilket tidigare identifierades som ett problematiskt råmaterial av flera anledningar. När vi jämförde effekterna på behovet av kritiska mineral till följd av miljöåtgärderna i svensk vattenkraft med effekterna från hela den väntade utbyggnaden i det nordeuropeiska kraftsystemet så såg vi att ökad efterfrågan till följd av miljöåtgärder i svensk vattenkraft kunde motsvara i storleksordningen 0,01-0,1% av den totala ökade efterfrågan.

För att få en helhetssyn på hållbarhetskONSEKVENSERNA av miljöåtgärder i vattenkraften har vi valt FN:s hållbarhetsmål (och i viss mån miljö kvalitetsmålen) som ramverk. Fördelarna med dessa är bland annat att de har hög policyrelevans och täcker en bredd av sociala, ekonomiska och miljömässiga hållbarhetsaspekter. Det finns även nackdelar med detta ramverk. Exempelvis är klimatmålet mycket begränsat och omfattar främst anpassning till klimatförändringar och i mindre utsträckning behovet av minskade utsläpp. I projektet fångar vi upp klimatpåverkan på annat sätt, dels genom de kvantitativa beräkningarna, dels genom ett kvalitativt resonemang.

Det finns en mängd såväl uppenbara som långsökta konsekvenser av olika typer av investeringar i energisystemet och att försöka kartlägga alla i en kvalitativ hållbarhetsanalys är en svår uppgift. Att göra en helhetsbedömning kommer i slutändan innebära subjektiva bedömningar då det är mycket svårt att objektivt väga hållbarhetsaspekter mot varandra. Uppgiften kompliceras ytterligare då antalet konsekvenser inte bara är många och ibland okända, utan även för att konsekvenserna kan påverka varandra positivt eller negativt och även vara kumulativa så att effekten av två konsekvenser tillsammans är större än de två konsekvenserna är var för sig.

Metoden som utvecklas inom ramen för detta projekt utnyttjar hållbarhetsmålen delmål vilket underlättar bedömningen av projektets konsekvenser som helhet. En nackdel med att hålla sig till delmålen är samtidigt att konsekvenser som inte berör delmålen inte bedöms i hållbarhetsanalysen. Metoden undviker emellertid inte

subjektiviteten som kommer med att bedöma en konsekvens storlek eller om konsekvenserna påverkar varandra. Vidare finns risken att bristande kunskaper hos användaren gör att vissa icke-uppenbara konsekvenser missas. Även om detta inte är unikt för denna metod så medför den förenklade bedömningen av konsekvenser på en femgradig skala att olika typer av positiva och negativa konsekvenser synbarligen kan jämföras mot varandra, vilket öppnar upp en ytterligare dimension för subjektivitet.

Oavsett dessa reservationer är det angeläget att genomföra hållbarhetsanalyser för olika typer av investeringar i energisystemet och beakta dessa så tidigt som möjligt i beslutsprocesser. En kvalitativ hållbarhetsanalys kan till exempel lyfta potentiella hållbarhetsrisker som behöver utredas i mer detalj. Att holistiskt integrera hållbarhetskonsekvenser och omvärldstrender i utformningen av energiscenarier förblir en viktig och utmanande uppgift.

5 Slutsatser

- Miljöåtgärder i vattenkraften syftar till att åstadkomma förbättringar i den lokala vattenmiljön. Dessa åtgärder kommer även att innebära konsekvenser för elsystemet, vilket i sin tur leder till andra hållbarhetskonsekvenser vilka kan vara både positiva och negativa. Det är därför viktigt att beakta miljöåtgärderna i ett större systemperspektiv för att maximera nyttan och minimera negativa konsekvenser för elsystemet och andra hållbarhetsmål. Regeringens paus av vattenkraftens omprövning motiveras just med att man ser en risk för oacceptabla konsekvenser för elsystemet.
- I detta projekt har vi valt att utgå från FN:s globala hållbarhetsmål (SDG) för den kvalitativa hållbarhetsanalysen. De är politiskt överenskomna, välkända och täcker in alla tre hållbarhetsdimensioner. Den politiska aspekten är även en nackdel då vissa mål inte är så skarpt formulerade, exempelvis målet om begränsad klimatpåverkan som fokuserar mer på att hantera/mildra effekter än att åtgärda orsaker. SDG-ramverket omfattar sjutton hållbarhetsmål. Denna övergripande målnivå lämpar sig för att sälla och prioritera, men är alltför grov för djupare analys av hållbarhetskonsekvenser. I projektet har en mer detaljerad metodik utvecklats som bland annat beaktar de olika delmål som hör till hållbarhetsmålen (totalt 169 stycken). På den nivån framkommer tydligt att det ofta finns både positiva och negativa, samt både direkta och indirekta, konsekvenser för ett och samma mål.
- Åtgärderna i vattenkraften och de följd effekter de ger upphov till bedöms påverka elva av sjutton SDG. Eftersom påverkan är av olika slag och olika stark på olika delmål är det svårt att summera den totala påverkan på varje SDG. Vid en samlad bedömning framstår det som att det blir starkast positiv påverkan på *Rent vatten och sanitet för alla*

och *Ekosystem och biologisk mångfald*, och starkast negativ påverkan på *Hållbar energi för alla*, *Hållbar industri, innovationer och infrastruktur* samt *Hållbara städer och samhällen*. Detta avspeglar också den centrala målkonflikten mellan vattenmiljö och elproduktion. För övriga SDG bedöms den samlade positiva och negativa påverkan väga ganska jämnt.

- Motsvarande bedömning för de nationella miljökvalitetsmålen ger att det blir tydligast positiv påverkan på *Levande sjöar och vattendrag* och *Ett rikt växt- och djurliv*. Påverkan bedöms bli mindre tydlig men övervägande positiv även på *Hav i balans samt levande kust och skärgård* och *Myllrande våtmarker*. En viss negativ indirekt påverkan bedöms uppkomma på *Begränsad klimatpåverkan* och *Frisk luft*.
- De kvantitativa beräkningarna av påverkan på växthusgasutsläpp och behov av kritiska mineraler visar att miljöåtgärder i vattenkraften, med efterföljande konsekvenser för elsystemet, står för en obetydlig andel av elsystemets totala resursförbrukning och klimatpåverkande utsläpp från utbyggnad, underhåll och omställning. Det finns dock osäkerheter i scenarierna, bland annat kring genomförbarheten av följdinvesteringar och om klimatbudget eller resursbrist innebär omvärderade strategier.
- Miljöåtgärdernas direkta påverkan blir främst lokal i den vattenförekomst de utförs, medan de indirekta effekterna på grund av följd effekter på elsystemet i hög grad uppstår på en mycket större geografisk skala, till exempel längs värdekedjorna för nyinvesteringar i elproduktion och en något minskad andel vattenkraftsel i den svenska elmixen. Generellt innebär miljöanpassningsåtgärderna större potentiell nytta för vattenmiljö än de resulterande

förlusterna för landmiljön till följd av ökade investeringar i elinfrastruktur på annat håll.

- Miljöanpassning av svensk vattenkraft kommer ge betydande positiva konsekvenser på vattenmiljö, biologisk mångfald och ekosystemtjänster lokalt och nationellt. Hur stor nytta av miljöåtgärderna kommer att bli kommer att variera från fall till fall. Bedömningar måste göras ur ett avrinningsområdesperspektiv som beaktar platsspecifika förutsättningar. Till exempel kan olämpligt valda åtgärder medföra oproportionerligt stora negativa konsekvenser på lokal kulturmiljö eller elproduktion i förhållande till nytta för vattenmiljön. Det går därför inte prognosticera den totala nationella miljönyttan till exempel i termer av den framtida bevarandestatusen för Sveriges sötvattensnaturtyper.
- I ett globalt perspektiv blir systemeffekterna av miljöanpassningarna i vattenkraften helt obetydliga. Ökad efterfrågan på begränsade resurser kan trots det vara problematisk och orsaka ej försumbara negativa marginaleffekter.
- Osäkerheter i omställningstakt för elsystemet kan innebära risk för att miljöanpassningsåtgärderna får oproportionerliga (om än små) effekter på elsystemet till följd av att kompensatoriska investeringar försenas. Å andra sidan bör det motsatta scenariot inte heller vara uteslutet – att utbyggnadsbehovet visar sig bli mindre än prognosticerat vilket frigör resurser/miljökapacitetsmässigt utrymme för miljöanpassningsåtgärder.

6 Referenslista

- Alfredsson E.C., Lindvall D., Karlsson M. & Malmaeus M., 2024. Industrial climate mitigation strategies and the remaining fair carbon budget – The case of Sweden. *Next Sustainability* 3, 100031. <https://doi.org/10.1016/j.nxsust.2024.100031>
- Arneborg, L., Öberg, J., Pemberton, P., Karlberg, M., Fredriksson, S. (2023) *Regionala effekter av havsbaserad vindkraft*. SMHI 2023-08-21, reviderad 2023-09-05. https://www.smhi.se/polopoly_fs/1.202760!/Input_till_samradsunderlaget_SMHI_230821_RevHaV_RevSMHI%20%281%29.pdf (Besökt 2024-07-12)
- Calles, O., Degerman, E., Wickström, H., Christiansson, J., Gustafsson S. & Näslund, I. (2013). *Anordningar för upp- och nedströmspassage av fisk vid vattenanläggningar. Underlag till vägledning om lämpliga försiktighetsmått och bästa möjliga teknik för vattenkraft*. Havs- och vattenmyndighetens rapport 2013:14. ISBN 978-91-87025-39-6.
- Degerman, E., Näslund, I. (2021) *Fysisk restaurering av akvatiska miljöer. Vattendrag och sjöar med kantzon och våtmarker*. GRIP on LIFE:s rapportserie 2021.03. ISBN 978-91-986871-6-3.
- Deinet, S., Scott-Gatty, K., Rotton, H., et al. 2020. *The Living Planet Index (LPI) for migratory freshwater fish - Technical Report*. World Fish Migration Foundation, The Netherlands.
- Energiforsk (2022). *Systemkonsekvenser av miljöåtgärder i vattenkraften. Bilaga A: Metodik, verktyg och modeller, sid 14*. Rapport 2022:862. ISBN 978-91-7673-862-7.
- Energimyndigheten (2021). *Nationell strategi för en hållbar vindkraftsutbyggnad*. Statens energimyndighet, januari 2021. ISBN 978-91-89184-88-6.
- Energimyndigheten (2024a). *Nätanslutna solcellsanläggningar. Installerad effekt per kvadratkilometer*. Karta. 2024-04-03. https://www.energimyndigheten.se/496789/globalassets/statistik/officiell-statistik/statistikprodukter/biogas/solel_kilometer.pdf (Besökt 2024-07-10)
- Energimyndigheten (2024b). *Vindkraftsstatistik. Installerad effekt per kommun*. Karta. 2024-04-19.

https://www.energimyndigheten.se/497f54/globalassets/statistik/official-statistik/statistikprodukter/vindkraftsstatistik/vindkraft_2023_effekt.pdf (Besökt 2024-07-10)

- Energimyndigheten (2024c). "Över 250 000 installerade solcellsanläggningar i Sverige." *Energimyndigheten*. 2024. <https://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2024/over-250-000-installerade-solcellsanlaggningar-i-sverige/> (Besökt 2024-07-10)
- Europeiska kommissionen (2020a). *Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU. A Foresight Study*. Luxembourg: Publications Office of the European Union 2020. DOI: 10.2873/58081
- Europeiska kommissionen (2020b). *Meddelande från kommissionen till Europaparlamentet, rådet, europeiska ekonomiska och sociala kommittén samt regionkommittén. Resiliens för råvaror av avgörande betydelse: Att staka ut vägen mot ökad trygghet och hållbarhet*. Bryssel: Europeiska kommissionen 2020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SV/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474> (besökt 2024-07-10).
- Fahrig, L. (2003). *Effects of habitat fragmentation on biodiversity*. *Annual Review of Ecology and Systematics* 34, 487–515. doi:10.1146/ANNUREV.ECOLSYS.34.011802.132419
- Finansdepartementet (2016). *Uppdrag till statliga myndigheter att bidra med underlag för Sveriges genomförande av Agenda 2030*. 2016-04-07 Fi2016/01355/SFÖ (delvis). <https://www.regeringen.se/contentassets/af12d612e6e94b2698057db968d30b80/uppdrag-till-statliga-myndigheter-att-bidra-med-underlag-for-sveriges-genomforande-av-agenda-2030/> (Besökt 2024-07-10)
- Fjeldstad, H.-P., Pulg, U., & Forseth, T. (2018). *Safe two-way migration for salmonids and eel past hydropower structures in Europe: a review and recommendations for best-practice solutions*. *Marine and Freshwater Research* 69(12): 1834-1847.
- Hart, D. D. & Poff, N. L. (2002). *A Special Section on Dam Removal and River Restoration*. *Bioscience* 52(8), 653–655. doi:10.1641/0006-3568(2002)052[0653:ASSODR]2.0. CO;2

- Havs- och vattenmyndigheten (2017). *Ekosystemtjänster från svenska sjöar och vattendrag. Identifiering och bedömning av tillstånd*. 2017. Havs- och vattenmyndighetens rapport 2017:7. ISBN 978-91-87967-55-9.
- Havs- och vattenmyndigheten (2021). *Redovisning av regeringsuppdrag om kunskapssammanställning om dammar*. Dnr 1-2021. 2021-09-29. <https://www.havochvatten.se/download/18.9d6062e17c13f61b9e73898/1633076455989/RU%20Kunskapssammanställning%20dammar%20slut.pdf> (Besökt 2024-07-11)
- Havs- och vattenmyndigheten (2022). *Levande sjöar och vattendrag. Fördjupad utvärdering av miljökvalitetsmålen 2023*. 2022-09-30. ISBN 978-91-89329-46-1.
- Havs- och vattenmyndigheten (2023). *Uppdrag om att följa upp och analysera arbetet med att förse vattenkraften med moderna miljövillkor. Redovisning av regeringsuppdrag*. Dnr 2135-22. 2023-12-01. <https://www.havochvatten.se/download/18.6f2a86e218bd90826b0d7497/1701344886665/2135-22%20Slutredovisning-RU-uppfoljning-nap.pdf> (Besökt 2024-07-12)
- Hedelin, B., Alkan-Olsson, J., Greenberg, L. (2023) Collaboration Adrift: Factors for Anchoring into Governance Systems, Distilled from a Study of Three Regulated Rivers. *Sustainability* 2023, 15, 4980. <https://doi.org/10.3390/su15064980>
- Helker Lundström, A. (2017). *Positionering av Sveriges miljömål. Kartläggning av sambandet mellan Sveriges miljömål och GRI G4 och Standards, Globala målen, FN Global Compact, Planetära gränser. Nationella miljömålssamordnaren för näringslivet*, 2017. <https://sverigemiljomal.se/contentassets/8be3b8c158904b37ad27f133b3d5e7cd/positionering-av-sveriges-miljomal-slutlig-juni-2017.pdf> (Besökt 2024-07-10)
- IPBES (2019). *Global Assessment on Biodiversity and Ecosystem Services. Chapter 2.2 Status and Trends –Nature*. The Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services 2019. DOI: 10.5281/zenodo.5517457 (Besökt 2024-07-10)
- IPCC. 2021. *Climate Change 2021: Physical Science Basis*. AR6.
- Jansson, R., Degerman, E., Widén, Å., Malm Renöfält, B. (2017) *Evidensbaserade åtgärder för att restaurera ekologiska funktioner i*

reglerade vattendrag. Vad finns i verktygslådan? Energiforsk rapport 2017:430. ISBN 978-91-7673-430-8;

Jonsson, M. (2015) *Rikedomar runt rinnande vatten. De ekonomiska värdena av en miljöanpassad vattenkraft*. Sportfiskarna, WWF, Älvräddarna, Naturskyddsföreningen. 2015.
<https://media.wwf.se/uploads/2019/01/rikedomar-vatten-2.pdf>
(Besökt 2024-07-12)

Jordbruksverket (2021). *Jordbruksmarkens användning 2020. Slutlig statistik*. Produktkod: JO0104. *Jordbruksverket*. 2021.
<https://jordbruksverket.se/om-jordbruksverket/jordbruksverkets-officiella-statistik/jordbruksverkets-statistikrapporter/statistik/2021-02-03-jordbruksmarkens-anvandning-2020.-slutlig-statistik> (Besökt 2024-07-10)

Kling, J. (2015). *Miljöåtgärder i vattenkraftverk. Sammanställning av åtgärder för att nå god ekologisk status och god ekologisk potential*. Havs- och Vattenmyndigheten, rapport 2015:26.

Lennartsson, D. "Länsstyrelsen: Solceller behöver ta plats på skånsk jordbruksmark." *Sveriges Radio*. 2024.
<https://sverigesradio.se/artikel/lansstyrelsen-solceller-behover-ta-plats-pa-skansk-jordbruksmark> (Besökt 2024-07-10)

Lindblom, E., Holmgren, K. (2016) *Den småskaliga vattenkraftens miljöpåverkan och samhällsnytta*. IVL Svenska Miljöinstitutet, 2016. urn:nbn:se:ivl:diva-2928

Lindblom, E. & Malmaeus, M. 2020. Kartläggning av koppling mellan miljökvalitetsmål och tillståndspliktiga verksamheter. MERIT bakgrundsrapport. IVL-rapport B 2397.

Malm Renöfält, B. & Ahonen, J. (2013). *Ekologiska flöden och ekologiskt anpassad vattenreglering. Underlag till vägledning om lämpliga försiktighetsmått och bästa möjliga teknik för vattenkraft*. Havs- och Vattenmyndigheten rapport 2013:12.

Malm Renöfält, B., Widén, Å., Jansson, R., Degerman, E. (2017) *Identifiering av påverkan, åtgärdsbehov och åtgärdspotential i vattendrag påverkade av vattenkraft*. Energiforsk rapport 2017:429. ISBN 978-91-7673-429-2.

Morfeltdt, J., Azar, C., Johansson, D. J. A. (2022). Nationella utsläppsmål utifrån Parisavtalet och internationella

rättvisprinciper – analys av Sveriges territoriella klimatmål.
Göteborg: Chalmers tekniska högskola.

Mälardalens universitet. "Utvärdering av det första agrivoltaiska systemet i Sverige." *Mälardalens universitet*.
<https://www.mdu.se/forskning/forskningsprojekt/framtidens-energi/utvardering-av-det-forsta-agrivoltaiska-systemet-i-sverige>
(Besökt 2024-07-10)

Naturvårdsverket. Ämnesområde Biologisk mångfald.
Naturvårdsverket.
<https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/biologisk-mangfald/> (Besökt 2024-07-10)

Naturvårdsverket (2019). *Sveriges arter och naturtyper i EU:s art- och habitatdirektiv. Resultat från rapporteringen 2019 till EU av bevarandestatus 2013–2018*. Naturvårdsverket 2019. ISBN 978-91-620-6914-8

Nilsson, C., Reidy, C. A., Dynesius, M., & Revenga, C. (2005). *Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems*. *Science* 308, 405–408. doi:10.1126/SCIENCE.1107887

Näslund, I., Kling, J., & Bergengren, J. (2013). *Vattenkraftens påverkan på akvatiska ekosystem – en litteratursammanställning*. Havs- och vattenmyndighetens rapport 2013:10.

Nøland, J.K., Auxepaules, J., Rousset, Perney, B., Faletti, G. (2022). *Spatial energy density of large-scale electricity generation from power sources worldwide*. *Sci Rep* 12, 21280, 2022.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-25341-9>.

Poulet, N. (2007). *Impact of weirs on fish communities in a Piedmont stream*. *River Research and Applications* 23, 1038–1047.
doi:10.1002/RRA.1040

Ritchie, H. (2022). *How does the land use of different electricity sources compare?* *Our World in Data*. 2022.
<https://ourworldindata.org/land-use-per-energy-source> (Besökt 2024-07-09)

SCB (2022). *Markanvändningen i Sverige 2020*. SCB. 2022-09-20.
<https://www.scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/miljo/markanvandning/markanvandningen-i->

sverige/pong/tabell-och-diagram/markanvandningen-i-sverige/
(Besökt 2024-07-01)

- Skogsstyrelsen (2022). *Bruttoavverkning 2020 med preliminär statistik för 2021 och prognos för 2022*. Statistik från Skogsstyrelsen. Produktnummer: JO0312. Serie: JO – Jordbruk, skogsbruk och fiske. 2022-09-27.
<https://www.skogsstyrelsen.se/globalassets/statistik/statistikfakta/blad/jo0312-statistikfaktablad.pdf> (Besökt 2024-07-10)
- Strömberg, M., Borg, C., Degerman, E., Friberg, S., Jonzon, G., Jougda, L., Norström, L., Sers, B., Sjölander, E., Spjut, D. (2015) *Ångermanälvsprojektet – förslag till miljöförbättrande åtgärder i mellersta Ångermanälven och nedre Fjällsjöälven*. WWF, Telge Energi, Länsstyrelsen Västernorrland, Länsstyrelsen Västerbotten, Älvräddarna, Coompanion, SLU, Vilhelmina Model Forest, ÅFF, Skogsstyrelsen. 2015.
https://media.wwf.se/uploads/2019/01/angermanalvsprojektet_sept2015_.pdf (Besökt 2024-07-12);
- Svedäng, M. Lindblad, C., Nordzell, H, Sandell., Klas. (2023). *Porlande bäckar och brusande älvar – värden och nyttor i fritt strömmande vatten*. Naturskyddsföreningen och WWF, 2023. ISBN: 978-91-558-0263-9.
- Svensk Vindenergi (2023). *Statistik och prognos – Q1 2023*. 2023-05-17.
https://svenskvindenergi.org/wp-content/uploads/2023/05/Statistik-och-prognos-vindkraft-Sverige-Q1-2023_FINAL.pdf (Besökt 2024-07-08)
- Svensk Vindenergi (2024). *Statistik och prognos Q1 2024*. 2024-04-19.
<https://svenskvindenergi.org/wp-content/uploads/2024/04/Statistik-och-prognos-Q1-2024.pdf> (Besökt 2024-07-15).
- Sveriges miljömål (2020). "Sveriges miljömål och de globala hållbarhetsmålen." *Sveriges miljömål*. 2020.
<https://sverigemiljomal.se/sa-fungerar-arbetet-med-sveriges-miljomal/sveriges-miljomal-och-de-globala-hallbarhetsmalen/> (Besökt 2024-05-16)
- UNEP (2016). *Green Energy Choices: the benefits, risks and trade-offs of low-carbon technologies for electricity production*. United Nations

Environmental Programme 2016. Report of the International Resource Panel. ISBN 978-92-807-3490-4.

Wexus (2024). SDG Impact Assessment Tool, webbaserat verktyg utvecklat av Wexus - West Sweden Nexus for Sustainable Development, Göteborgs Universitet i samarbete med SDSN Northern Europe och Mistra Carbon Exit. Tillgängligt via <https://sdgimpactassessmenttool.org>.

Widén, Å., Jansson, R., Renöfält, B., Degerman, E., Wisaeus, D. (2017) *Ekologisk reglering. Metod för att beräkna produktionsförluster och miljönytta i reglerade vattendrag*. Energiforsk rapport 2017:449. ISBN 978-91-7673-449-0;

Widén, Å., Malm Renöfält, B., Degerman, E., Wisaeus, D., Jansson, R. (2021a). Let it flow: Modeling ecological benefits and hydropower production impacts of banning zero-flow events in a large regulated river system. *Science of the Total Environment* 783 (2021) 147010. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147010>

Widén, Å., Malm Renöfält, B., Degerman, E., Wisaeus, D., Jansson, R. (2021b) Environmental Flow Scenarios for a Regulated River System: Projecting Catchment-Wide Ecosystem Benefits and Consequences for Hydroelectric Production. *Water Resources Research*, 58, 2021WR030297. <https://doi.org/10.1029/2021WR030297>

Widén, Å., Jansson, R., Ahonen, J., Malm-Renöfält, B. (2022a) *Lagan inför miljöprövning av vattenkraften*. 2022. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1725269/FULLTEXT01.pdf>. (Besökt 2024-07-12)

Widén, Å., Ahonen, J., Malm Renöfält, B., Degerman, E., Jansson, R. (2022b) *Ljungan inför miljöprövning av vattenkraften: naturvärden, flöden och strömhabitat samt möjliga miljönyttor*. 2022. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1633540/FULLTEXT02.pdf> (Besökt 2024-07-12);

Widén, Å., Malm Renöfält, B., Ahonen, J., Jansson, R. (2023) *Ecopeaking – Pilotstudie om korttidsreglering*. Energiforsk rapport 2023:935. ISBN 978-91-7673-935-8; Widén mf.fl. Ekologisk reglering;

- WWF. "Living planet report 2022. Vägen ut ur naturkrisen." WWF.
<https://www.wwf.se/rapport/living-planet-report/#de-storsta-hoten> (besökt 2024-07-10)
- van Zalk, J., Behrens, P. (2018). The spatial extent of renewable and non-renewable power generation: A review and meta-analysis of power densities and their application in the U.S. *Energy Policy*. Vol. 123, 2018: 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.023>.
- Öhman, M. C. (2023). *Effekter av havsbaserad vindkraft på fisk*. Naturvårdsverket 2023. Vindval rapport 7115. ISBN 978-91-620-7115-8.

Bilaga A: Globala hållbarhetsmålen delmål

Delmål nr	Delmål namn
1.1	Utrota den extrema fattigdomen
1.2	Minska fattigdomen med minst 50 %
1.3	Inför sociala trygghetssystem
1.4	Lika rätt till egendom, grundläggande tjänster, teknologi och ekonomiska resurser
1.5	Bygg motståndskraft mot ekonomiska, sociala och miljökatastrofer
1.a	Mobilisera resurser till implementering av politik för fattigdomsbekämpning
1.b	Skapa policyramverk med fattigdoms- och jämställdhetsperspektiv
2.1	Tillgång till säker och näringsriktig mat för alla
2.2	Utrota alla former av felnäring
2.3	Fördubbla småskaliga livsmedelsproducenters produktivitet och intäkter
2.4	Hållbar livsmedelsproduktion och motståndskraftiga jordbruksmetoder
2.5	Bevara den genetiska mångfalden i livsmedelsproduktionen
2.a	Investera i infrastruktur på landsbygden, jordbruksforskning, teknikutveckling och genbanker
2.b	Förhindra handelsbegränsningar och marknadsstörningar, inklusive genom ett avskaffande av exportsubventioner, för jordbruksprodukter
2.c	Skapa stabila marknader för jordbruksråvaror och snabb tillgång till marknadsinformation
3.1	Minska mödradödligheten
3.2	Förhindra alla dödsfall som hade kunnat förebyggas bland barn under fem år
3.3	Bekämpa smittsamma sjukdomar
3.4	Minska antalet dödsfall till följd av icke smittsamma sjukdomar och främja mental hälsa
3.5	Förebygg och behandla drogmissbruk
3.6	Minska antalet dödsfall och skador i vägtrafiken
3.7	Tillgängliggör reproduktiv hälsovård, familjeplanering och utbildning för alla
3.8	Tillgängliggör sjukvård för alla
3.9	Minska antalet sjukdoms- och dödsfall till följd av skadliga kemikalier och föroreningar
3.a	Genomför världshälsoorganisationens ramkonvention om tobakskontroll
3.b	Stöd forskning, utveckling och tillgängliggör vaccin och läkemedel för alla

- Delmål nr Delmål namn
- 3.c Öka finansiering och personal till utvecklingsländers hälso- och sjukvård
 - 3.d Förbättra tidiga varningssystem för globala hälsorisker
 - 4.1 Avgiftsfri och likvärdig grundskole- och gymnasieutbildning av god kvalitet
 - 4.2 Lika tillgång till förskola av god kvalitet
 - 4.3 Lika tillgång till yrkesutbildning och högre utbildning av god kvalitet
 - 4.4 Öka antalet personer med färdigheter för ekonomisk trygghet
 - 4.5 Utrota diskriminering i utbildning
 - 4.6 Alla människor ska kunna läsa, skriva och räkna
 - 4.7 Utbildning för hållbar utveckling och globalt medborgarskap
 - 4.a Skapa inkluderande och trygga utbildningsmiljöer
 - 4.b Öka antalet stipendier för högre utbildning för utvecklingsländer
 - 4.c Öka antalet utbildade lärare i utvecklingsländer
 - 5.1 Utrota diskriminering av kvinnor och flickor
 - 5.2 Utrota våld mot och utnyttjande av kvinnor och flickor
 - 5.3 Avskaffa tvångsäktenskap och könsstympning
 - 5.4 Värdesätt obetalt omsorgsarbete och främja delat ansvar i hushållet
 - 5.5 Säkerställ fullt deltagande för kvinnor i ledarskap och beslutsfattande
 - 5.6 Allmän tillgång till sexuell och reproduktiv hälsa och rättigheter
 - 5.a Lika rätt till ekonomiska resurser och ägande samt tillgång till finansiella tjänster
 - 5.b Stärk kvinnors roll med hjälp av teknik
 - 5.c Skapa lagar och handlingsplaner för jämställdhet
 - 6.1 Säkert dricksvatten för alla
 - 6.2 Säkra tillgången till sanitet, hygien och toaletter för alla
 - 6.3 Förbättra vattenkvaliteten och avloppsrening samt öka återanvändning
 - 6.4 Effektivisera vattenanvändning och säker vattenförsörjning
 - 6.5 Integrerad förvaltning av vattenresurser
 - 6.6 Skydda och återställ vattenrelaterade ekosystem
 - 6.a Utöka det vatten- och sanitetsrelaterade stödet till utvecklingsländer
 - 6.b Stöd lokalt engagemang i vatten- och sanitetshantering
 - 7.1 Tillgång till modern energi för alla
 - 7.2 Öka andelen förnybar energi i världen
 - 7.3 Fördubbla ökningen av energieffektivitet
 - 7.a Tillgängliggör forskning och teknik samt investera i ren energi
 - 7.b Bygga ut och förbättra infrastrukturen för energi i utvecklingsländerna
 - 8.1 Hållbar ekonomisk tillväxt
 - 8.2 Främja ekonomisk produktivitet genom diversifiering, teknisk innovation och uppgradering
 - 8.3 Främja politik för nya arbetstillfällen och ökad företagsamhet
 - 8.4 Förbättra resurseffektiviteten i konsumtion och produktion
 - 8.5 Full sysselsättning och anständiga arbetsvillkor med lika lön för alla

- | Delmål nr | Delmål namn |
|-----------|---|
| 8.6 | Främja ungas anställning, utbildning och praktik |
| 8.7 | Utrota tvångsarbete, människohandel och barnarbete |
| 8.8 | Skydda arbetstagares rättigheter och främja trygg och säker arbetsmiljö för alla |
| 8.9 | Främja gynnsam och hållbar turism |
| 8.10 | Tillgång till bank- och försäkringstjänster samt finansiella tjänster för alla |
| 8.a | Öka handelsstödet aid for trade för utvecklingsländer |
| 8.b | Utarbeta en global strategi för ungdomssysselsättning |
| 9.1 | Skapa hållbara, motståndskraftiga och inkluderande infrastrukturer |
| 9.2 | Främja inkluderande och hållbar industrialisering |
| 9.3 | Underlätta tillgången till finansiella tjänster och marknader |
| 9.4 | Uppgradera all industri och infrastruktur för ökad hållbarhet |
| 9.5 | Öka forskningsinsatser och teknisk kapacitet inom industrisektorn |
| 9.a | Främja utveckling av hållbar infrastruktur i utvecklingsländer |
| 9.b | Stöd diversifiering och teknikutveckling i inhemsk industri |
| 9.c | Tillgång till informations- och kommunikationsteknik för alla |
| 10.1 | Minska inkomstklyftorna |
| 10.2 | Främja social, ekonomisk och politisk inkludering |
| 10.3 | Säkerställ lika rättigheter för alla och utrota diskriminering |
| 10.4 | Anta skatte- och socialskyddspolitik som främjar jämlikhet |
| 10.5 | Förbättra regleringen av globala finansmarknader och institut |
| 10.6 | Stärk utvecklingsländers representation i finansiella institutioner |
| 10.7 | Främja ansvarsfull och säker migration |
| 10.a | Särskild och differentierad behandling av utvecklingsländer |
| 10.b | Uppmuntra utvecklingsbistånd och investeringar i de minst utvecklade länderna |
| 10.c | Minska kostnaderna för migranternas internationella transaktioner |
| 11.1 | Säkra bostäder till överkomlig kostnad |
| 11.2 | Tillgängliggöra hållbara transportsystem för alla |
| 11.3 | Inkluderande och hållbar urbanisering |
| 11.4 | Skydda världens kultur- och naturarv |
| 11.5 | Mildra de negativa effekterna av naturkatastrofer |
| 11.6 | Minska städernas miljöpåverkan |
| 11.7 | Skapa säkra och inkluderande grönområden för alla |
| 11.a | Främja nationell och regional utvecklingsplanering |
| 11.b | Implementera strategier för inkludering, resurseffektivitet och katastrofriskreducering |
| 11.c | Bistå de minst utvecklade länderna med hållbar och motståndskraftig byggnation |
| 12.1 | Implementera det tioåriga ramverket för hållbara konsumtions- och produktionsmönster |
| 12.2 | Hållbar förvaltning och användning av naturresurser |

- | Delmål nr | Delmål namn |
|-----------|---|
| 12.3 | Halvera matsvinnet i världen |
| 12.4 | Ansvarsfull hantering av kemikalier och avfall |
| 12.5 | Minska mängden avfall markant |
| 12.6 | Uppmuntra företag att tillämpa hållbara metoder och hållbarhetsredovisning |
| 12.7 | Främja hållbara metoder för offentlig upphandling |
| 12.8 | Öka allmänhetens kunskap om hållbara livsstilar |
| 12.a | Stärk utvecklingsländerens vetenskapliga och tekniska kapacitet för hållbar konsumtion och produktion |
| 12.b | Utveckla och implementera verktyg för övervakning av hållbar turism |
| 12.c | Eliminera marknadsstörningar som uppmuntrar till slösaktiga konsumtionsmönster |
| 13.1 | Stärk motståndskraften mot och anpassningsförmågan till klimatrelaterade katastrofer |
| 13.2 | Integrera åtgärder mot klimatförändringar i politik och planering |
| 13.3 | Öka kunskap och kapacitet för att hantera klimatförändringar |
| 13.a | Implementera FN:s ramkonvention om klimatförändringar |
| 13.b | Främja mekanismer för att höja förmågan till klimatrelaterad planering och förvaltning |
| 14.1 | Minska föroreningarna i haven |
| 14.2 | Skydda och återställ ekosystemen |
| 14.3 | Minska havsförurningen |
| 14.4 | Främja hållbart fiske |
| 14.5 | Bevara kust- och havsområden |
| 14.6 | Avskaffa subventioner som bidrar till överfiske |
| 14.7 | Öka den ekonomiska nyttan av hållbar hantering av marina resurser |
| 14.a | Utöka vetenskaplig kunskap, forskning och teknik som bidrar till friskare hav |
| 14.b | Stöd småskalig fiskerier |
| 14.c | Implementera och verkställ den internationella havsrättskonventionen |
| 15.1 | Bevara, restaurera och säkerställ hållbart nyttjande av ekosystem på land och i sötvatten |
| 15.2 | Främja hållbart skogsbruk, stoppa avskogningen och återställ utarmade skogar |
| 15.3 | Stoppa ökenspridning och återställ förstörd mark |
| 15.4 | Bevara bergsekosystem |
| 15.5 | Skydda den biologiska mångfalden och naturliga livsmiljöer |
| 15.6 | Främja tillträde till och rättvis vinstdelning av genetiska resurser |
| 15.7 | Stoppa tjuvjakt och illegal handel med skyddade arter |
| 15.8 | Förhindra invasiva främmande arter i land- och vattensystem |
| 15.9 | Integrera ekosystem och biologisk mångfald i nationell och lokal förvaltning |

- | Delmål nr | Delmål namn |
|-----------|---|
| 15.a | Öka de finansiella resurserna för att bevara och hållbart nyttja ekosystem och biologisk mångfald |
| 15.b | Finansiera och skapa incitament för hållbart brukande av skog |
| 15.c | Bekämpa tjuvjakt och illegal handel |
| 16.1 | Minska våldet i världen |
| 16.2 | Skydda barn mot övergrepp, utnyttjande, människohandel och våld |
| 16.3 | Främja rättssäkerhet och säkerställ tillgång till rättvisa |
| 16.4 | Bekämpa organiserad brottslighet och olagliga finans- och vapenflöden |
| 16.5 | Bekämpa korruption och mutor |
| 16.6 | Bygg effektiva, tillförlitliga och transparenta institutioner |
| 16.7 | Säkerställ ett lyhört, inkluderande och representativt beslutsfattande |
| 16.8 | Stärk utvecklingsländers roll i den globala styrningen |
| 16.9 | Säkerställ juridisk identitet för alla |
| 16.10 | Säkerställa allmän tillgång till information och skydda de grundläggande friheterna |
| 16.a | Stärk de nationella institutioner som förebygger våld, terrorism och brottslighet |
| 16.b | Främja och verkställ icke-diskriminerande politik och lagstiftning |
| 17.1 | Öka inhemsk kapacitet för skatte- och andra intäkter |
| 17.2 | Implementera alla åtaganden för utvecklingsbistånd |
| 17.3 | Mobilisera finansiella resurser till utvecklingsländerna |
| 17.4 | Bistå utvecklingsländer med att uppnå hållbar skuldsättning |
| 17.5 | Investerar i de minst utvecklade länderna |
| 17.6 | Samarbeta och dela kunskap kring vetenskap, teknik och innovation |
| 17.7 | Främja hållbar teknologi i utvecklingsländer |
| 17.8 | Stärka den vetenskapliga, tekniska och innovativa kapaciteten för de minst utvecklade länderna |
| 17.9 | Öka kapaciteten för implementering av globala målen i utvecklingsländer |
| 17.10 | Främja ett multilateralt handelssystem inom ramen för Världshandelsorganisationen |
| 17.11 | Öka utvecklingsländers export |
| 17.12 | Avveckla handelshinder för de minst utvecklade länderna |
| 17.13 | Öka den makroekonomiska stabiliteten i världen |
| 17.14 | Stärk politisk samstämmighet för hållbar utveckling |
| 17.15 | Respektera nationellt ledarskap för genomförande av politik för att uppnå globala målen |
| 17.16 | Stärk det globala partnerskapet för hållbar utveckling |
| 17.17 | Uppmuntra effektiva partnerskap |
| 17.18 | Stöd insamling och spridning av tillförlitliga data |
| 17.19 | Utveckla nya sätt att mäta framsteg |

BILAGA 3: VATTENMILJÖMÄSSIGA KONSEKVENSER AV MILJÖANPASSNINGÅTGÄRDER I VATTENKRAFTEN

ERIK LINDBLOM, IVL SVENSKA MILJÖINSTITUTET AB
MIKAEL MALMAEUS, IVL SVENSKA MILJÖINSTITUTET AB

Innehåll

1	Faunapassage	6
2	Utrivning av damm	8
3	Återskapa eller förbättra hydrologisk regim	9
	3.1 Minimitappning	9
	3.2 Miljöanpassade flöden inklusive begränsning av korttidsreglering	11
4	Moderna miljövillkor – vad kan tänkas bli aktuellt?	13
	4.1 Gällande miljövillkor	13
	4.2 Yrkanden av första prövningsgruppen	14
	4.3 Möjlig utveckling av framtida miljövillkor	14
5	Referenslista	17

En vidare beskrivning av de vattenmiljömässiga konsekvenserna av olika miljöanpassningsåtgärder i vattenkraften

Projektet analyserat ett scenario med föreslagna miljöanpassningsåtgärder i enlighet med *Vattenförvaltningscykel 2.5* (se vidare i syntesrapporten). Bedömningen är att beskrivna åtgärder enligt VFC 2.5 kan förväntas motsvara behovet av miljöanpassning, dock kommer flera vattenkraftverk än de som omfattas av VFC 2.5 att behöva miljöanpassas. I denna bilaga ger vi en översiktlig beskrivning av de typer av miljöanpassningsåtgärder som kan bli aktuella. Vilka åtgärder som genomförs kan i slutändan skilja sig mycket eller lite ifrån detta scenario.

Som konstateras av Svenska kraftnät saknas det en sammanställning på nationell nivå över vilka miljöanpassningar som myndigheterna bedömer behöver genomföras vid enskilda anläggningar med avseende på att uppfylla miljö kvalitetsnormer.¹ Därtill ska också alla undantag som är möjliga att använda för att beakta vattenkraftens förmågor tillämpas vilket innebär att de fördjupade normöversynerna framöver bättre behöver beakta påverkan på vattenkraftens förmågor. För att underlätta den avvägningen har regeringen föreslagit så kallade HARO-värden, det vill säga huvudavrinningsområdesvisa riktvärden för produktionsförlust av vattenkraftsel.² Dessa begränsar hur omfattningen av produktions- och reglerpåverkande åtgärder i de större älvarna. Se även kapitel 4.

Trots att vattenkraften har en mycket lång historia i Sverige är erfarenheterna av miljöanpassningsåtgärder relativt begränsad. Det är en naturlig följd av att det stora flertalet av vattenkraftverken saknar moderna miljövillkor. Traditionellt har det funnits en tydlig målkonflikt mellan vattenkraftens elproduktion och miljöanpassning, när vattnet antingen däms in för att släppas genom turbin eller leds till vattendraget. En central och återkommande fråga blir därför hur stor del av årsflödet som verksamhetsutövarna ska få utnyttja för elproduktion och hur stor del de kan komma att behöva avstå för miljöanpassningar. Bland olika vattenkraftsintressenter finns det en förväntning på att omprövningen ska leda till att nya innovativa åtgärder tas fram under de kommande åren med större miljönytta och mindre produktionsbortfall. Befintliga exempel är fingaller och andra anordningar för att förhindra att fisk passerar genom turbiner och i stället leds till säkra nedströmspassager, liksom olika typer av biotopvårdande åtgärder i och längs vattendragen.

Vår bedömning är att de vanligaste miljöanpassningsåtgärderna kommer att bli faunapassage, minimitappning, begränsningar av korttidsreglering,

¹ Svenska kraftnät (2023). *Att kartlägga de konsekvenser för elsystemet som omprövning av vattenkraften medför m.m. Redovisning av regeringsuppdrag*. SvK 2023/610.

² Klimat- och näringslivsdepartementet 2024. *Bättre förutsättningar för vattenkraftens omprövning*. Pro memoria KN 2024/01642. Augusti 2024.

miljöanpassade flöden och utrivning. Dessa åtgärder redan förekommit i de omprövningar som har hunnit genomföras. Samtliga åtgärder har också lyfts i de intervjuer som har genomförts med olika vattenkraftsintressenter inom ramen för detta projekt.

Vilken eller vilka åtgärder som kan bli aktuella i det enskilda fallet beror bland annat på vilken typ av påverkan som ska motverkas och hur stort åtgärdsutrymmet i förhållande till vattenkraften är enligt normsättningen. Vattenmyndigheterna beskriver sex olika åtgärds-kategorier med sammanlagt omkring trettio olika åtgärds-typer i riktlinjerna för vattenkraftens påverkan på MKN för yt-vatten.³ Till exempel inkluderar kategorin *Möjliggöra upp- och nedströmspassage* tre olika typer av naturliknande fiskvägar och fyra olika typer av tekniska fiskvägar. Vattenmyndigheterna beskriver även fyra olika typer av påverkan som kopplar till olika kvalitetsfaktorer, nämligen förändring av konnektivitet, hydrologisk regim respektive annat morfologiskt tillstånd samt vattenuttag eller vattenavledning.⁴ Havs- och vattenmyndigheten delar i sin tur in vattenkraftens påverkan på ekosystemtjänster i fysisk exploatering, vattenståndsreglering och vandringshinder, se Tabell 1.⁵

Tabell 1. Vår bedömning av kopplingar mellan påverkansfaktorer och de miljöanpassningsåtgärder som ingår i studien. Påverkansfaktorerna kommer från Vattenmyndigheternas respektive Havs- och vattenmyndighetens beskrivning av vattenkraftens påverkan på hydromorfologiska kvalitetsfaktorer respektive ekosystemtjänster.

Påverkansfaktor	Faunapassage	Minimitappning	Begränsningar av korttidsreglering	Miljöanpassade flöden	Utrivning
Förändring av konnektivitet / vandringshinder	Ja	(Ja)	(Ja)	(Ja)	Ja
Förändring av hydrologisk regim / vattenståndsreglering	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Förändring av annat morfologiskt tillstånd / fysisk exploatering					Ja
Vattenuttag eller vattenavledning		Ja	(Ja)	(Ja)	Ja

Olika typer av åtgärder kan väljas för att uppnå ett och samma syfte. Till exempel kan konnektiviteten öka/vandringshinder undanröjas både genom faunapassage och utrivning. Valet styrs med andra ord inte enbart av vilken typ av påverkan som ska åtgärdas utan också av hur åtgärden påverkar verksamheten. Bland de inlämnade tillståndsansökningarna finns det också flera exempel på att

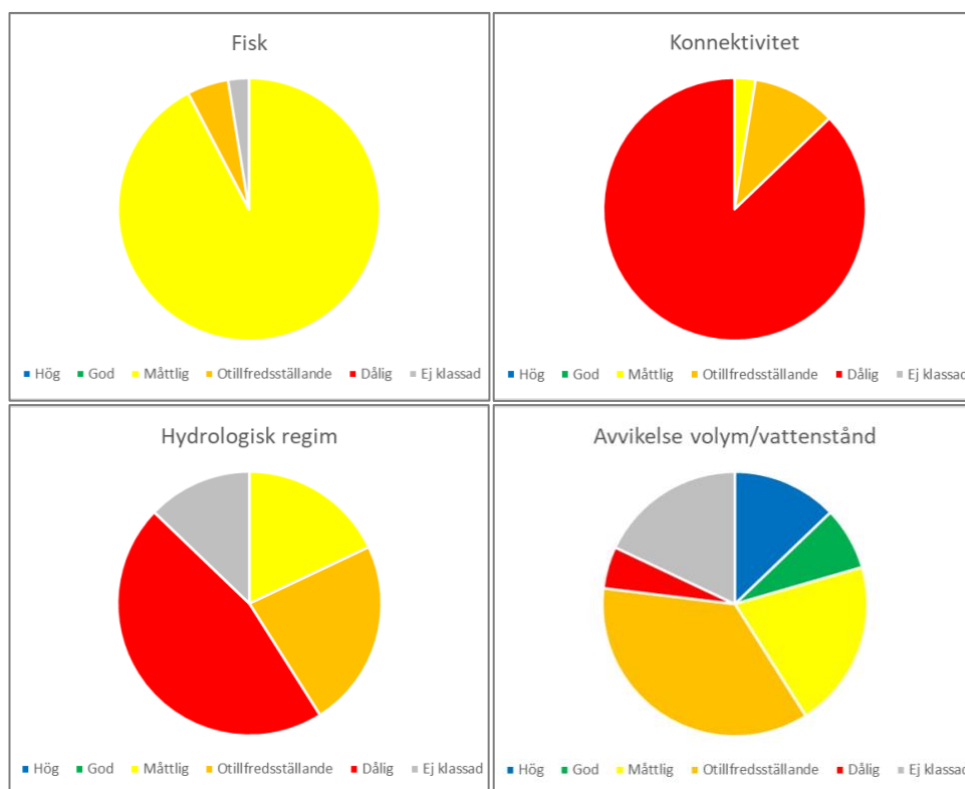
³ Vattenmyndigheterna (2020). *Vattenmyndigheternas riktlinjer för vattenkraft. Åtgärder och undantag*. https://viss.lansstyrelsen.se/ReferenceLibrary/55113/Riktlinjer_Vattenkraft_Atgärder_MKN.pdf Besökt 2024-09-09.

⁴ Vattenmyndigheterna (2020). *Vattenmyndigheternas riktlinjer för vattenkraft. Åtgärder och undantag*.

⁵ Havs- och vattenmyndigheten (2017). *Ekosystemtjänster från svenska sjöar och vattendrag. Identifiering och bedömning av tillstånd*. 2017. Havs- och vattenmyndighetens rapport 2017:7. ISBN 978-91-87967-55-9.

verksamhetsutövare vill kombinera olika åtgärder för att åstadkomma en bra avvägning mellan miljönytta och kostnad. En vanlig kombination är en säsongsstyrd (miljöanpassad) minimitappning, fingaller som ska förhindra att fisk passerar genom turbiner och biotopvårdande åtgärder i och längs vattendrag.

I Figur 1 visas en genomgång av 39 utvalda vattenförekomster uppströms och nedströms kraftverk i Luleälven, Skellefteälven, Ljungan samt Ätran där åtgärder föreslås enligt scenariot "Vattenförvaltningscykel 2.5/Miljöalternativ D" i Svenska kraftnäts redovisning av regeringsuppdraget att kartlägga vilka konsekvenser prövningen för moderna miljövillkor för vattenkraften kan få för elsystemet och för en trygg elförsörjning.⁶ Flertalet av dessa vattenförekomster definieras som kraftigt modifierade vatten, men även i den minoritet (7) som klassas som naturliga, gäller att en mycket liten del av vattenförekomsterna uppnår högre än måttlig status. Genom att implementera föreslagna åtgärder skulle tydliga förbättringar i ekologisk status respektive ekologisk potential kunna uppnås, i synnerhet beträffande konnektivitet.



Figur 1. Stickprov för status på olika kvalitetsfaktorer i 39 utvalda vattenförekomster uppströms och nedströms kraftverk i Luleälven, Skellefteälven, Ljungan samt Ätran där åtgärder föreslås enligt scenariot Vattenförvaltningscykel 2.5, dvs. det åtgärdsscenario som har studerats i detta projekt.

⁶ Svenska kraftnät (2023). Att kartlägga de konsekvenser för elsystemet som omprövning av vattenkraften medför m.m. Redovisning av regeringsuppdrag.

1 Faunapassage

Faunapassage används här som ett samlingsnamn för åtgärder som syftar till att möjliggöra upp- och nedströmspassage av vattenlevande organismer förbi ett hinder utan att riva ut dammen. Åtgärdstypen inkluderar bland annat naturliknande fiskvägar och tekniska fiskvägar.⁷

Faunapassager framhålls allmänt som den viktigaste miljöförbättrande åtgärden.⁸ Konnektivitet är en hydromorfologisk kvalitetsfaktor som ska beaktas vid uppfyllande av MKN. De intervjuer som har gjorts inom AP2 i projektet indikerar att det finns motstridiga uppfattningar, åtminstone på handläggarnivå, mellan berörda myndigheter och branschföreträdare huruvida vattendirektivet ställer ett generellt krav på någon form av ekologiskt kontinuum eller inte. Ur ett ekologiskt perspektiv är det rimligt att undantag bör göras för de fall där dammarna har anlagts över naturliga vandringshinder eftersom det då aldrig skett någon uppströmspassage. Det gäller främst för vissa äldre och mindre kraftverk. Även då anläggandet av en faunapassage blir orimligt kostsam eller tekniskt komplicerad bör rimlighetsavvägningen enligt 2 kap. 7 § miljöbalken innebära att undantag kan vara aktuella. Det gäller främst stora och därmed nyare kraftverk.

Ur ett miljöperspektiv innebär en ändamålsenligt utformad faunapassage att vattenlevande organismer, material och rörelseenergi kan passera mer eller mindre obehindrat förbi vattenkraftverket. Faunapassager minskar habitatfragmentering och ökar tillgången till livsmiljöer uppströms och nedströms.⁹ Åtgärden bedöms därför leda till en ökad överlevnad och reproduktion¹⁰ vilket i sin tur bidrar till ökad genetisk diversitet inom och mellan populationer^{11,12}. Detta är särskilt viktigt

⁷ Vattenmyndigheterna (2020). *Vattenmyndigheternas riktlinjer för vattenkraft. Åtgärder och undantag*; Erik Degerman, Ingemar Näslund (2021). *Fysisk restaurering av akvatiska miljöer. Vattendrag och sjöar med kantzon och våtmarker*. GRIP on LIFE:s rapportserie 2021.03. ISBN 978-91-986871-6-3.

⁸ Havs- och vattenmyndigheten (2021). *Redovisning av regeringsuppdrag om kunskapsutvärdering om dammar*. Dnr 1-2021. 2021-09-29.

⁹ Fjeldstad, H.-P., Pulg, U., & Forseth, T. (2018). *Safe two-way migration for salmonids and eel past hydropower structures in Europe: a review and recommendations for best-practice solutions*. *Marine and Freshwater Research* 69(12): 1834-1847; Havs- och vattenmyndigheten (2022). *Levande sjöar och vattendrag. Fördjupad utvärdering av miljö kvalitetsmålen 2023*. 2022-09-30. ISBN 978-91-89329-46-1; Hedelin, B., Alkan-Olsson, J. & Greenberg, L. (2023) *Collaboration Adrift: Factors for Anchoring into Governance Systems, Distilled from a Study of Three Regulated Rivers*. *Sustainability* 2023, 15, 4980. <https://doi.org/10.3390/su15064980>.

¹⁰ Widén, Å., Jansson, R., Malm Renöfält, B., Degerman, E. & Wisaeus, D. (2017). *Ekologisk reglering. Metod för att beräkna produktionsförluster och miljönytta i reglerade vattendrag*. Energiforsk rapport 2017:449. ISBN 978-91-7673-449-0.

¹¹ Strömberg, M., Borg, C., Degerman, E., Friberg, S., Jonzon, G., Jougda, L., Norström, L., Sers, B., Sjölander, E. och Spjut, D. (2015). *Ångermanälvsprojektet – förslag till miljöförbättrande åtgärder i mellersta Ångermanälven och nedre Fjällsjöälven*. WWF, Telge Energi, Länsstyrelsen Västernorrland, Länsstyrelsen Västerbotten, Älvräddarna, Coompanion, SLU, Vilhelmina Model Forest, ÅFF, Skogsstyrelsen. 2015. https://media.wwf.se/uploads/2019/01/angermanalvsprojektet_sept2015_.pdf. Besökt 2024-07-12.

¹² I Havs- och vattenmyndighetens (2020) "Vägledning för fisk- och faunapassager" framgår svårigheterna att följa upp effekterna av fisk- och faunapassager. Det är därför viktigt att kunskapsläget ökar. Se även Silva m.fl., (2018).

för arter som lax och öring som behöver vandra för att reproducera sig.¹³ Det bedöms vara tekniskt fullt möjligt att bygga väl fungerande fiskvägar för samtliga förekommande fiskarter i alla svenska vattensystem.¹⁴

För att faunapassagen ska vara funktionell krävs att ett tillräckligt stort vattenflöde leds genom det. En faunapassage måste med andra ord alltid kombineras med krav på minimitappning. Detta flöde går därmed förlorat för elproduktion. Hur stort flödet behöver vara beror på flera olika faktorer, bland annat fallhöjd, basflöde i nedströms vattendrag och vilka ekologiska effekter som ska uppnås. En sammanställning av internationella rekommendationer visar att 2–10 % av det totala flödet bör användas för att säkerställa nedströmspassage, med 5 % av medelvattenföringen som ett grovt riktmärke.¹⁵ Mindre vattendrag verkar kräva en högre andel av flödet än större vattendrag.

¹³ Havs- och vattenmyndigheten (2021). *Redovisning av regeringsuppdrag om kunskapssammanställning om dammar*

¹⁴ Calles, O., Degerman, E., Wickström, H., Christiansson, J., Gustafsson S. & Näslund, I. (2013). *Anordningar för upp- och nedströmspassage av fisk vid vattenanläggningar. Underlag till vägledning om lämpliga försiktighetsmått och bästa möjliga teknik för vattenkraft*. Havs- och vattenmyndighetens rapport 2013:14. ISBN 978-91-87025-39-6.

¹⁵ Calles m.fl. (2013). *Anordningar för upp- och nedströmspassage av fisk vid vattenanläggningar*.

2 Utrivning av damm

Dammutrivningar kan beskrivas som en miljöanpassning om man betraktar vattenkraften i sin helhet eller som ett sammanhängande system. För det enskilda vattenkraftverket innebär en utrivning däremot att elproduktionen helt upphör. Det är därmed den åtgärd som har i särklass mest långtgående påverkan på ett enskilt vattenkraftverk, men beroende på storlek och placering av magasin i älvsträckan kan utrivning även ha en tydlig påverkan elsystemmässigt. Alternativa åtgärder till utrivning är anläggande av faunapassage för att minska effekter av vandringshinder och minimitappning, begränsningar av korttidsreglering och miljöanpassade flöden för att minska effekterna av vattenståndsregleringen.

Utrivning av dammar kan ske helt eller delvis. Det behöver inte omfatta vattenkraftverkets övriga delar, som maskinhus, tilloppstub med mera. Resultatet av en utrivning blir ett fritt flödande vatten. Det kan återställa den ekologiska kontinuiteten i vattendraget för vattenlevande organismer, material och rörelseenergi i form av en naturlig hydrologisk regim. Det kan i sin tur leda till att habitat i form av strömsträckor, svämplan och strandzoner stärks eller återskapas. Samtidigt innebär en utrivning att vattenmagasinet uppströms dammen töms. Det leder till en snabb och, för både närboende och etablerade arter, genomgripande förändring, när sjömiljön, som kan ha utvecklats under ett eller flera sekler, ersätts av ett vattendrag. Det går att tänka sig situationer med högre miljövärden knutna till det etablerade vattenmagasinet än det fritt flödande vattendraget, men generellt bedöms utrivning vara en åtgärd med stor potential för positiva miljöeffekter.¹⁶ Samtidigt går som sagt möjligheten till elproduktion förlorad. En utrivning kan också medföra både positiv och negativ påverkan på olika kulturella ekosystemtjänster¹⁷.

¹⁶ Bilton, D. T., Freeland, J. R., & Okamura, B. (2001). *Dispersal in freshwater invertebrates*. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 32(1), 159-181; Näslund, I., Kling, J., & Bergengren, J. (2013). *Vattenkraftens påverkan på akvatiska ekosystem – en litteratursammanställning*. Havs- och vattenmyndighetens rapport 2013:10; Malm Renöfält, B. & Ahonen, J. (2013). *Ekologiska flöden och ekologiskt anpassad vattenreglering. Underlag till vägledning om lämpliga försiktighetsmått och bästa möjliga teknik för vattenkraft*. Havs- och Vattenmyndigheten rapport 2013:12; McKie, B. G., Sandin, L., Carlson, P. E., & Johnson, R. K. (2018). *Species traits reveal effects of land use, season and habitat on the potential subsidy of stream invertebrates to terrestrial food webs*. *Aquatic Sciences*, 80(2), 1-12; Turgeon, K., Turpin, C., & Gregory-Eaves, I. (2019). *Boreal river impoundments caused nearshore fish community assemblage shifts but little change in diversity: a multiscale analysis*. 76(5), 740-752; Sandin, L., Donadi, S., Holmgren, K., von Wachenfeldt, E., & Jones, D. (2020). *Sötvatten – förvaltning och restaurering med förändrat klimat*. Slutrapport från projektet FRESHREST (Sötvattenslandskapet – förvaltning och restaurering i förändrat klimat). (Rapport 6942). Naturvårdsverket.

¹⁷ *Kulturella ekosystemtjänster avser "upplevelserikedom och livskvalitet i form av friluftsliv, rekreation och upplevelser av natur- och kulturarv"*.

3 Återskapa eller förbättra hydrologisk regim

Ett vattendrags hydrologiska regim, det vill säga vattenflöden, vattenstånd och variationer inom och mellan år, är en viktig förutsättning för att skapa lämpliga miljöer för olika arter och har avgörande betydelse för ett vattendrags ekologiska status.¹⁸ Traditionellt har reglerkraftverk haft en mycket stor påverkan på den hydrologiska regimen. Ur ett elsystemperspektiv är en av vattenkraftens stora fördelar att det är möjligt att lagra vatten från perioder med låg efterfrågan på el till perioder med stor efterfrågan på el, vilket inte alls behöver överensstämja med när det naturligt flödar lite eller mycket vatten. Snabba och kraftiga förändringar av vattenstånd i vattenmagasinet, så kallad korttidsreglering, kan öka erosion och i extrema fall leda till att fiskar strandar och dör.¹⁹

Genom en ökad minimitappning, miljöanpassade flöden, det vill säga att släppa vatten till nedströmsfåror när det gör störst ekologisk nytta, och i förekommande fall begränsningar av korttidsreglering kan livsmiljöer nedströms dammen stärkas och reducera påverkan uppströms. Några gemensamma eller likartade effekter av åtgärderna är att de kan bidra till mer naturtrogna habitat som kan minska störningsstress för akvatiska organismer och i förlängningen en förväntad förbättrad tillväxt och reproduktion i sötvatten. Alla dessa effekter bidrar i sin tur direkt eller indirekt positivt till den biologiska mångfalden.

3.1 MINIMITAPPNING

Med minimitappning avses den minsta mängd vatten som måste tappas vid ett vattenkraftverk. Vattnet kan antingen släppas genom turbin eller direkt till en naturfåra. I vissa sammanhang syftar tappning enbart på vatten genom turbin. Vatten förbi turbin kallas då för spill. I det här avsnittet använder vi emellertid tappning för båda typerna. För att vinna fallhöjd och därmed öka produktionen leds vattnet i många fall betydande sträckor genom tunnlår eller tuber från vattenmagasinet till turbinen. Därmed återförs det inte till vattendraget direkt nedanför dammen, utan ibland flera kilometer längre ned. För att undvika att fåran

¹⁸ Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E., & Stromberg, J. C. (1997). *The Natural Flow Regime: A paradigm for river conservation and restoration*. *N. BioScience*, 47: 769–784; Puckridge J. T., Sheldon F, Walker K. F. & Boulton A. J. (1998). *Flow variability and the ecology of large rivers*. *Marine and Freshwater Research* 49: 5572; Degerman & Näslund (2021). *Fysisk restaurering av akvatiska miljöer*; Widén, Å., Malm Renöfält, B., Degerman, E., Wisaeus, D. & Jansson, R. (2021a). *Let it flow: Modeling ecological benefits and hydropower production impacts of banning zero-flow events in a large regulated river system*. *Science of the Total Environment*, volume 783 (2021) 147010. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147010>; Widén, Å., Malm Renöfält, B., Degerman, E., Wisaeus, D. & Jansson, R. (2021b). *Environmental Flow Scenarios for a Regulated River System: Projecting Catchment-Wide Ecosystem Benefits and Consequences for Hydroelectric Production*. *Water Resources Research*, 58, 2021WR030297. <https://doi.org/10.1029/2021WR030297>.

¹⁹ Bakken, T., Zinke, P., Melcher, A., Sundt, H., Vehanen, T. & Acreman, M. (2012). *Setting environmental flows in regulated rivers. Implementing the EU Water Framework Directive (EU WFD) in Norway*. Sintef, TR A7246. <https://www.cedren.no/Portals/Cedren/TR%20A7246.pdf>; Malm Renöfält, B. & Ahonen, J. (2013). *Ekologiska flöden och ekologiskt anpassad vattenreglering*; Kling, J. (2015). *Miljöåtgärder i vattenkraftverk. Sammanställning av åtgärder för att nå god ekologisk status och god ekologisk potential*. Havs- och Vattenmyndigheten, rapport 2015:26; Widén, Å., Malm Renöfält, B., Ahonen, J. & Jansson, R. (2023). *Ecopeaking – pilotstudie om korttidsreglering*. Energiforsk RAPPORT 2023:935.

mellan damm och turbinmynningen torrläggs krävs ett minimiflöde direkt till naturfåran. Ytterligare en aspekt att beakta är torrfarens längd. För de mycket långa torrfareorna, längre än en mil, är minimitappning sannolikt inte en ekologiskt funktionell åtgärd. Återigen beror valet av åtgärd på de platspecifika förutsättningarna och vilka värden som är mest angelägna att stärka eller återskapa. Renöfält Malm & Ahonen konstaterar t.ex. att "*olika flöden utför olika tjänster för ekosystemen, vilket i sin tur påverkar de ekosystemtjänster som vattendraget bidrar med till människan*".²⁰ Som lyfts i Widén m.fl. behövs mer kunskap om sambanden mellan vattenflöde och naturvärden²¹. Det finns observationer av att det kan räcka med ganska lite vatten för att få en fiskfauna som är knuten till strömmande vatten snarare än ett stillastående vatten. Vill man däremot uppnå till exempel svämplan nedströms krävs större flöden.

Hur stor minimitappning som krävs kan skilja från fall till fall. Enligt 31 kap. 22 § miljöbalken ska en tillståndshavare tåla en förlust av "*högst en femtedel och lägst en tjugondel av produktionsvärdet av den vattenkraft som enligt meddelat tillstånd kan tas ut vid kraftverket*". Produktionsvärdet tolkas ofta som vattenföring. Det framstår som att det är den lägre delen av intervallet, 5 % av totalflödet, som hittills har använts i de fall det alls finns villkor på minimitappning.²² I samtal med vattenkraftsintressenter har det också framförts att det generellt spills minst 5 % av flödet även vid de kraftverk som idag saknar krav på minimitappning²³. Nivån 5 % har däremot ingen biologisk förankring²⁴, och som nämnts ovan lyfter Widén m.fl. att mer kunskap behövs om vilka flöden som har störst effekter för olika arter och den totala biologiska mångfalden.²⁵

Krav på minimitappning leder till stabilare vattennivåer och förbättrar vattenkvaliteten genom att säkerställa kontinuerligt flöde och förhindra stagnation. Detta gynnar särskilt fisk.²⁶ Ett kontinuerligt flöde hjälper också till att minska ackumuleringen av näringsämnen och föroreningar.²⁷

Faunapassager (se avsnitt 1) behandlas som en separat åtgärd. I praktiken bidrar de ändå till en minimitappning där vatten leds bredvid turbin och damm. Beroende på fallhöjd och faunapassagens utformning kan den mynna direkt nedanför dammen och därmed dubblera som en minimitappning till naturfåran. Då kan vattnet göra dubbel miljönytta genom att både bidra till ekologisk kontinuitet och motverka torrfare. Ofta anläggs faunapassagen emellertid parallellt med den naturliga fåran, antingen på grund av topografin eller av andra

²⁰ Malm Renöfält, B. & Ahonen, J. (2013). *Ekologiska flöden och ekologiskt anpassad vattenreglering*.

²¹ Widén Å., Segersten, J., Donadi, J., Degerman, E., Malm Renöfält, B., Karlsson Tiselius, A., Lundback, S. & Jansson, R. (2022) *Sveriges torrfareor: geografi, naturvärden och metoder för miljöförbättringar*. <https://umu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1733276/FULLTEXT03.pdf>

²² Widén m.fl. (2022). *Sveriges torrfareor: geografi, naturvärden och metoder för miljöförbättringar*.

²³ I de fall det påståendet stämmer skulle ett villkor om minimitappning inte behöva medföra motsvarande förlust av elproduktion.

²⁴ Degerman, E. & Näslund, I. (2021). *Fysisk restaurering av akvatiska miljöer*.

²⁵ Widén m.fl. (2022). *Sveriges torrfareor: geografi, naturvärden och metoder för miljöförbättringar*.

²⁶ Havs- och vattenmyndigheten (2021). *Redovisning av regeringsuppdrag om kunskapsammansättning om dammar*.

²⁷ Degerman, E. & Näslund, I. (2021). *Fysisk restaurering av akvatiska miljöer*; Hedelin m.fl. (2023).

Collaboration Adrift: Factors for Anchoring into Governance Systems, Distilled from a Study of Three Regulated Rivers.

skäl. Då krävs det att vatten leds både till faunapassagen och direkt till naturfåran för att uppnå samma miljönytta. Den samlade produktionsförlusten blir då större. Om den förlusten skulle anses vara för stor kommer i stället de båda åtgärderna att behöva ställas mot varandra för att avgöra på vilket sätt det begränsade vattenflödet kan göra störst miljönytta.

3.2 MILJÖANPASSADE FLÖDEN INKLUSIVE BEGRÄNSNING AV KORTTIDSREGLERING

Miljöanpassade flöden innebär att vattnet tappas i mängder och vid tidpunkter som är ekologiskt motiverade. Det är därmed ett sätt att maximera miljönyttan av en given årsvolym av vatten eller, annorlunda uttryckt, en avvägning där varken vattenkraftproduktion eller vattenmiljön får allt, men båda intressena tillräckligt mycket för att klara sig långsiktigt. Widén m.fl. har föreslagit ett antal olika så kallade basfunktioner som kan kombineras vid miljöanpassade flöden.²⁸ De listar sex olika basfunktioner:

- Nolltappningsrestriktion
- Tappning i torrfåra eller omlöp
- Tappning i fiskväg
- Säsongsanpassade flöden
- Vattenstånds Anpassning
- Naturlig flödesregim

Korttidsreglering innebär att vattenkraften balanserar snabba variationer i elproduktionen och stabilitet i elnätet. En vanlig definition är förändringar i flöden och vattenstånd på tidsskalor kortare än ett dygn. Några vattenkraftsintressenter har gjort tillägget att regleringsamplituden ska överstiga en meter för att det ska anses vara korttidsreglering. Behovet av regleringar inom ett dygn förväntas bli allt större i takt med att både andelen intermitterent elproduktion och effekterna av klimatförändringarna ökar²⁹ Korttidsreglering kan förekomma både vid små- och storskalig vattenkraft och påverkar nedströms vattendrag genom snabba och återkommande onaturliga variationer i vattenflödet.³⁰

Miljöeffekterna av korttidsreglering och därmed nyttan av att begränsa det är inte lika väl beskrivna som till exempel effekterna av vandringshinder och torrfåror.³¹ Snabba flödesförändringar ökar risken för erosion och sedimenttransport, vilket är negativt för botten och strandzoner.³² Snabba flödesförändringar kan påverka

²⁸ Widén m.fl. (2017). *Ekologisk reglering*.

²⁹ *Ekologisk status hos stränder och akvatiska miljöer i respons på korttidsreglering under vintern*. Projektledare: Roland Jansson. Projektbeskrivning: <https://www.umu.se/forskning/projekt/ekologisk-status-hos-strander-och-akvatiska-miljoer-i-respons-pa-korttidsreglering-under-vintern/>. Besökt 2024-09-12. Se även Scharff m.fl. (2023). *Klimatförändringarnas inverkan på vattenkraftens produktions- och reglerförmåga*. ER 2023:924.

³⁰ Degerman, E. & Näslund, I. (2021). *Fysisk restaurering av akvatiska miljöer*.

³¹ Degerman, E. & Näslund, I. (2021). *Fysisk restaurering av akvatiska miljöer*.

³² Näslund m.fl. (2013). *Vattenkraftens påverkan på akvatiska ekosystem – en litteratursammanställning*; Kling (2015). *Miljöätgärder i vattenkraftverk. Sammanställning av åtgärder för att nå god ekologisk status och god ekologisk potential*; Widén m.fl., (2017). *Ekologisk reglering*; Havs- och vattenmyndigheten (2021). *Redovisning av regeringsuppdrag om kunskapsammanställning om dammar*; Widén m.fl. (2021a). *Let it flow: Modeling ecological benefits and hydropower production impacts of banning zero-flow events in a large regulated river system*.

födovävarna i ekosystemet.³³ Det missgynnar i sin tur en lång rad arter som nyttjar habitaterna, allt från bottenlevande smådjur och laxfiskar som gräver ner rom i grusbotten till strandvegetation och akvatiska makrofyter.³⁴

I vattendrag med många kraftverk efter varandra, vilket är vanligt i Sverige, kan snabba tappningar vid olika tillfällen skapa mycket komplexa och onaturliga flödesregimer, där de negativa miljöeffekterna förstärks nedströms.³⁵ Förändrade frekvenser, magnituder och förutsägbarhet i flödesförändringar inom dygnet har visat sig kunna leda till minskad täthet, mångfald, reproduktionsframgång och överlevnad hos vatten- och strandorganismer.³⁶

Med den definition av minimitappning och miljöanpassade flöden som används här så begränsar miljöanpassade flöden – till skillnad från minimitappning – inte hur mycket eller lite vatten som får eller måste släppas ur vattenmagasinet. Därmed påverkas inte den totala elproduktionen direkt. Däremot begränsas körmönstret, vilket kan vara negativt för andra elsystemtjänster (se vidare bilaga 1). Det är fullt möjligt att framtida miljövillkor kommer att kräva kombinationer av flera miljöanpassningsåtgärder.

³³ Renöfält Malm & Ahonen (2013). *Ekologiska flöden och ekologiskt anpassad vattenreglering*.

³⁴ Widén m.fl. (2021b). *Environmental Flow Scenarios for a Regulated River System: Projecting Catchment-Wide Ecosystem Benefits and Consequences for Hydroelectric Production*; Havs- och vattenmyndigheten (2022). *Levande sjöar och vattendrag*; Xylia, M., Bin Asraf, F., Rudberg, P. M., Barquet, K., & Han, G. (2024). *Keeping the flow: hydropower, river ecosystems and governance in northern Sweden*. SEI Report. Stockholm Environment Institute. <https://doi.org/10.51414/sei2024sei2024.014>.

³⁵ Degerman, E. & Näslund, I. (2021). *Fysisk restaurering av akvatiska miljöer*; Xylia m.fl. (2024). *Keeping the flow: hydropower, river ecosystems and governance in northern Sweden*.

³⁶ Malm Renöfält, B. & Ahonen, J. (2013). *Ekologiska flöden och ekologiskt anpassad vattenreglering*; Bejarano, M.D., SordoWard, A., GabrielMartin, I. & Garrote, L. (2019). *Tradeoff between economic and environmental costs and benefits of hydropower production at run-of-river-diversion schemes under different environmental flows scenarios*. *Journal of Hydrology*, 572, 790–804.

4 Moderna miljövillkor – vad kan tänkas bli aktuellt?

Den uttalade målsättningen med den pågående omprövningen är att alla svenska vattenkraftverk ska få moderna miljövillkor. Vilka miljöanpassningsåtgärder som kommer att krävas, hur de kommer att fördela sig mellan olika typer av kraftverk och hur de ska utformas för att uppfylla dessa villkor är för tidigt att avgöra. Under hösten 2024 har regeringens promemoria *Bättre förutsättningar för vattenkraftens omprövning* varit ute på remiss. Syftet är bland annat att samverkansprocessen ska stärkas och avvägningen mellan elsystemet och vattenmiljön ska förtydligas.³⁷ Huvuddelen av författningsändringarna föreslås träda i kraft den 1 januari 2025. De föreslagna lagändringarna och de förordningsändringar som följer av dessa, föreslås träda i kraft den 1 juli 2025. Då ska även vattenkraftens omprövning återupptas. Efterhand kan man förvänta sig att de olika aktörernas kunskap och erfarenhet kommer att öka och alla delar av omprövningen att utvecklas, från ansvarsfördelning i samverkansprocessen till erkända åtgärdstyper och utformning av villkoren som sådana.

Hur vanliga tror vi då att de åtgärder som vi har inkluderat i den här studien kommer att bli framöver? För att försöka besvara den frågan har vi tittat på hur dagens villkor ser ut, vad verksamhetsutövarna i de första prövningsgrupperna har yrkat på hittills och frågat ett antal vattenkraftsintressenter om deras förväntningar.

4.1 GÄLLANDE MILJÖVILLKOR

Det saknas heltäckande sammanställningar av vattenkraftens miljövillkor. Samtidigt är anledningen till omprövningen att de flesta vattenkraftverk helt saknar moderna miljövillkor. Av det följer att de miljöanpassningsåtgärder som beskrivs i den här studien saknas vid de flesta vattenkraftverken. 2014 gjordes en sammanställning av naturliknande fiskvägar i Blekinge, Halland, Jönköping, Kalmar, Kronoberg, Skåne, Västra Götaland och Östergötlands län.³⁸ Den visade på 90 omlöp, 5 inlöp, 15 överlöp, 7 kombinationer samt 45 utrivningar av vandringshinder.³⁹ Det är viktigt att understryka att studien omfattade alla artificiella vandringshinder i länen, inte bara vattenkraftverk. Samma studie anger att det finns ca 6 000 kända vandringshinder i länen, medan en kunskapssammanställning av Riksantikvarieämbetet kommer fram till att antalet små kraftverk i samma län är drygt 600.⁴⁰ Enligt Calles m.fl. finns det idag

³⁷ Klimat- och näringslivsdepartementet 2024. *Bättre förutsättningar för vattenkraftens omprövning*.

³⁸ Havs- och vattenmyndigheten & Energimyndigheten (2014). *Strategi för åtgärder i vattenkraften. Avvägning mellan energimål och miljökvalitetsmålet Levande sjöar och vattendrag*. Havs- och vattenmyndighetens rapport 2014:14.

³⁹ Omlöp, inlöp och överlöp är olika typer av naturliknande fiskvägar. Omlöp är längre slingor förbi dammen, inlöp leds ofta genom dammen och överlöp över dammen. De beskrivs närmare av Vattenmyndigheterna (2020).

⁴⁰ Widmark D. (2002). *Småskalig vattenkraft och kulturmiljövård*. Riksantikvarieämbetet, Kunskapsavdelningens PM 2002:6

fiskpassager vid ca 10 % av de svenska vattenkraftverken.⁴¹ Av de fyrahundra största kraftverken är det endast ett fåtal som har faunapassager.

En aktuell kartläggning av torrfårar i Sverige identifierade totalt 972, varav 23 % hade något villkor om minimitappning.⁴² Villkoret var i genomsnitt 3,6 % av den naturliga årsmedelvattenföringen på årsbasis. Det är vanskligt att extrapolera de uppgifterna, men de indikerar att det är en minoritet av vattenkraftverken som har villkor om minimitappning. Villkor om miljöanpassade flöden, inklusive begränsningar av korttidsreglering, kan visserligen utformas på många olika vis men verkar också vara ovanliga.⁴³

Dammutrivningar har historiskt skett i en del fall. Eftersom det är en åtgärd som innebär att elproduktionen upphör förekommer åtgärden inte vid något av de befintliga kraftverken.

4.2 YRKANDEN AV FÖRSTA PRÖVNINGSGRUPPEN

Havs- och vattenmyndigheten har gjort en sammanställning av 102 ansökningar som remitterats till myndigheten från domstolarna inom ramen för omprövningen fram till den 31 oktober 2023.⁴⁴ De rör huvudsakligen mindre kraftverk med begränsad eller ingen reglerförmåga. De är med andra ord inte är representativa för samtliga kraftverk som ska omprövas.

Enligt sammanställningen ansöker verksamhetsutövarna i 73 fall i första hand om moderna miljövillkor. Av dessa innehåller 60 förslag på fiskpassager för uppströms vandring som villkor, där 39 avser tekniska lösningar och 21 naturliknande passager. Majoriteten av ansökningarna innehåller även yrkanden om någon form av minimitappning, främst genom tänkt fiskväg. De återstående 29 ansökningarna yrkar i första hand på avveckling av verksamheten och hel eller delvis utrivning. Enligt Havs- och vattenmyndighetens sammanställning är den installerade effekten mindre än 1 500 kW i samtliga fall och elproduktionen har redan upphört i 14 av dessa anläggningar. Hittills är det med andra ord verksamhetsutövaren som har tagit initiativ till utrivning.

4.3 MÖJLIG UTVECKLING AV FRAMTIDA MILJÖVILLKOR

Regeringens avsikt är att omprövningen ska återupptas 1 juli 2025. Innan dess ska bland annat avvägningen mellan behovet av åtgärder som förbättrar vattenmiljön och behovet av en nationell effektiv tillgång till vattenkraftsel förtydligas. Bland annat framgår att *"det utrymme EU-rätten ger att vid miljöanpassning av verksamheterna säkra en fortsatt nationell effektiv tillgång till vattenkraftsel [ska] utnyttjas fullt ut"* samt att *"mark- och miljödomstolen får rätt att vid en omprövning för moderna miljövillkor av verksamheter som har ett väsentligt allmänintresse besluta om mindre*

⁴¹ Calles m.fl. (2013). *Anordningar för upp- och nedströmspassage av fisk vid vattenanläggningar*.

⁴² Widén m.fl. (2022). *Sveriges torrfårar: geografi, naturvärden och metoder för miljöförbättringar*.

⁴³ Degerman, E. & Näslund, I. (2021). *Fysisk restaurering av akvatiska miljöer*.

⁴⁴ Havs- och vattenmyndigheten (2023). *Uppdrag om att följa upp och analysera arbetet med att förse vattenkraften med moderna miljövillkor. Redovisning av regeringsuppdrag Dnr 2135–22. 2023-12-01. <https://www.havochvatten.se/download/18.6f2a86e218bd90826b0d7497/1701344886665/2135-22%20Slutredovisning-RU-uppfoljning-nap.pdf> Besökt 2024-07-12.*

stränga villkor och bestämmelser än vad som skulle krävas för att uppnå den kvalitet som vattnet ska ha enligt en miljökvalitetsnorm, i de fall de krav som följer av art- och habitatdirektivet ger utrymme för detta”⁴⁵.

Bestämmelserna har varit ute på remiss och ca sextio remissvar har inkommit, majoriteten från olika myndigheter. Det gör det svårt att bedöma hur långtgående krav på miljöanpassningar som kommer att krävas, liksom att bedöma hur representativa de domar som hittills har meddelats kommer att vara. Med detta i åtanke har vi här vägt samman de synpunkter och åsikter vi tagit del av i de intervjuer (som genomfördes innan promemorian skickades på remiss) i ett försök att teckna en möjlig utveckling av framtida miljövillkor för vattenkraften:

- **Faunapassager:** Konnektivitet i vattendrag är centralt för att uppnå god ekologisk status. Som framgår i avsnitt 4.2 har 60 av 73 ansökningar i prövningsgrupp 1 innehållit förslag på olika typer av faunapassager. Vi bedömer att det även i den fortsatta omprövningen i de flesta fall kommer att ställas krav på installation av faunapassage om det saknas. Eftersom faunapassagen i sig har mindre påverkan på kraftverkets produktionsförmåga och elberedskap än storleken på minimitappningen som ska släppas genom faunapassagen går det inte att säga något generellt om i vilka fall undantag från faunapassage kommer att ges. Det är eftersträvansvärt att alla bedömningar av miljöåtgärder görs utifrån de platsspecifika förutsättningarna. Där dammar har anlagts vid naturliga vandringshinder saknas miljöhistoriska skäl att anlägga faunapassager.
- **Utrivning:** Vi har inte kunnat göra någon egen bedömning över hur vanligt utrivning av fungerande kraftverk kan komma att bli. Förväntningarna verkar skilja sig åt mellan olika intressenter, där det finns röster både för att bevara alla driftdugliga vattenkraftverk likväl som att miljönyttan av utrivning överskuggar värdet av elproduktionen för små kraftverk. Helt klart är emellertid att det enbart är aktuellt för små vattenkraftverk. Hav- och vattenmyndigheten, Svenska kraftnät och Energimyndigheten har i sin uppföljning av omprövningen gjort bedömningen att *”det inte är förvånande att en del verksamhetsutövare med småskalig vattenkraft nu väljer att avveckla sin verksamhet i samband med omprövningarna enligt den nationella planen. Att verksamheter avvecklas får ses som en naturlig konsekvens av planen och branschens finansiering via Vattenkraftens miljöfond.”*⁴⁶ Svensk Vattenkraftförening, en organisation för den småskaliga vattenkraften under 10 MW, skriver i sitt remissvar att *”regeringens förslag missgynnar tydligt den småskaliga vattenkraften och medför i praktiken ett regelverk som med all säkerhet kommer att leda till att antalet utrivningar ökar.”*⁴⁷ Här verkar det alltså finnas en principiell samsyn om utfallet, men inte om allvaret för vattenkraftsägarna. Förutom utrivning av kraftverk i drift, som främst avses här, så kommer omprövningen med stor

⁴⁵ Klimat- och näringslivsdepartementet 2024. *Bättre förutsättningar för vattenkraftens omprövning.*

⁴⁶ Havs- och vattenmyndigheten (2023). *Uppdrag om att följa upp och analysera arbetet med att förse vattenkraften med moderna miljövillkor.* Dnr 2135-22. 2023-01-30.

⁴⁷ Svensk Vattenkraftförening (2024). *Yttrande över promemorian ”Bättre förutsättningar för vattenkraftens omprövning”.* Diarienummer KN 2024/01642. 2024-11-21.

<https://www.regeringen.se/contentassets/b84a5033bf8443e3b3bf62d0380ff200/svensk-vattenkraftforening.pdf>

sannolikhet att leda till utrivning av mer eller mindre obsoleta dammar och kraftverk. Detta påverkar inte nödvändigtvis effektiv tillgång på vattenkraftsel, men väl miljönytta.

- **Minimitappning:** Sannolikt kommer krav på viss minimitappning att ställas i många fall. Det finns, som redovisas i avsnitt 4.3.3 ekologiska argument för att det rådande riktmärket 5 % kan vara för lågt. Samtidigt visar analysen VFC2.5 (se syntesrapport och bilaga 1) att redan de måttliga kraven på minimitappning genom naturfåra summerar till ungefär 1 TWh förlorad elproduktion årligen. Om man skulle ställa högre krav på flöden genom naturfåror och fiskvägar så kommer man snabbt upp betydligt större produktionsförluster. En del av regeringens förslag är att det ska införas "huvudavrinningsområdesvisa riktvärden för produktionsförlust av vattenkraftsel".⁴⁸ Dessa summerar till det nationella riktmärket ca 1,5 TWh år, eller 2,3 %.
- **Miljöanpassade flöden:** I takt med att "konkurrensen om vattnet" mellan elproduktion och miljönytta hårdnar så kommer det bli allt viktigare att optimera tillgängliga flöden, dvs. att få mesta möjliga miljönytta med minsta möjliga produktionsförlust. Vår bedömning är därför att kraven på miljöanpassade flöden kommer att öka och att det kommer att ske en betydande utveckling och innovation inom den här åtgärdstypen. För att optimera flödesregimen krävs bland annat stor ekohydrologisk kunskap om de arter eller artgrupper man önskar gynna och hur effekterna av miljöanpassade flöden kan stärkas av till exempel utformningen av faunapassager eller biotopvårdande åtgärder. Under nästa år kommer Formas att genomföra en systematisk översikt av vetenskapligt dokumenterade effekter av miljöanpassade flöden.⁴⁹ Det kan ses som en sådan kunskapshöjande insats som sannolikt kommer att underlätta tillämpningen av miljöanpassade flöden.

⁴⁸ Klimat- och näringslivsdepartementet 2024. *Bättre förutsättningar för vattenkraftens omprövning*.

⁴⁹ FORMAS 2024. Hur påverkas biologisk mångfald av mer naturligt reglerade flöden från dammar? Uppdaterad 2024-04-11. <https://formas.se/kunskap-och-fordjupning/formas-rapporter/rapporter/2022-12-09-hur-paverkas-biologisk-mangfald-av-mer-naturligt-reglerade-floden-fran-dammar.html?query=systematisk+%C3%B6versikt>. Besökt 2024-12-03.

5 Referenslista

- Bakken, T., Zinke, P., Melcher, A., Sundt, H., Vehanen, T. & Acreman, M. (2012). Setting environmental flows in regulated rivers. Implementing the EU Water Framework Directive (EU WFD) in Norway. Sintef, TR A7246.
<https://www.cedren.no/Portals/Cedren/TR%20A7246.pdf>
- Bilton, D. T., Freeland, J. R., & Okamura, B. (2001). Dispersal in freshwater invertebrates. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 32(1), 159-181.
- Calles, O., Degerman, E., Wickström, H., Christiansson, J., Gustafsson S. & Näslund, I. (2013). Anordningar för upp- och nedströmspassage av fisk vid vattenanläggningar. Underlag till vägledning om lämpliga försiktighetsmått och bästa möjliga teknik för vattenkraft. Havs- och vattenmyndighetens rapport 2013:14. ISBN 978-91-87025-39-6.
- Degerman, E. & Näslund, I. (2021) Fysisk restaurering av akvatiska miljöer. Vattendrag och sjöar med kantzon och våtmarker. GRIP on LIFE:s rapportserie 2021.03. ISBN 978-91-986871-6-3.
- Fjeldstad, H.-P., Pulg, U., & Forseth, T. (2018). Safe two-way migration for salmonids and eel past hydropower structures in Europe: a review and recommendations for best-practice solutions. *Marine and Freshwater Research* 69(12): 1834-1847.
- Havs- och vattenmyndigheten (2017). Ekosystemtjänster från svenska sjöar och vattendrag. Identifiering och bedömning av tillstånd. 2017. Havs- och vattenmyndighetens rapport 2017:7. ISBN 978-91-87967-55-9.
- Havs- och vattenmyndigheten (2020). Vägledning för fisk- och faunapassager. <https://www.havochvatten.se/arbete-i-vatten-och-energiproduktion/vattenkraftverk-och-dammar/miljo--och-skyddsatgarder/vagledning-for-fisk--och-faunapassager.html>. Besökt 2025-01-14.
- Havs- och vattenmyndigheten (2021). Redovisning av regeringsuppdrag om kunskapsammansättning om dammar. Dnr 1-2021. 2021-09-29.
<https://www.havochvatten.se/download/18.9d6062e17c13f61b9e73898/1633076455989/RU%20Kunskapsammansattning%20dammar%20slut.pdf>. Besökt 2024-07-11.
- Havs- och vattenmyndigheten (2022). Levande sjöar och vattendrag. Fördjupad utvärdering av miljö kvalitetsmålen 2023. 2022-09-30. ISBN 978-91-89329-46-1.
- Havs- och vattenmyndigheten (2023a). Regeringsuppdrag om översyn av förutsättningar för normsättning av ytvatten. Bilaga 1. Tillämpning av KMV och undantag. Dnr 2825-2022.
- Havs- och vattenmyndigheten (2023). Uppdrag om att följa upp och analysera arbetet med att förse vattenkraften med moderna miljövillkor. Redovisning av regeringsuppdrag Dnr 2135-22. 2023-12-01.
<https://www.havochvatten.se/download/18.6f2a86e218bd90826b0d7497/1701344886665/2135-22%20Slutredovisning-RU-uppfoljning-nap.pdf>. Besökt 2024-07-12.

Havs- och Vattenmyndigheten & Energimyndigheten (2014). Strategi för åtgärder i vattenkraften. Avvägning mellan energimål och miljö kvalitetsmålet Levande sjöar och vattendrag. Havs- och vattenmyndighetens rapport 2014:14.

Hedelin, B., Alkan-Olsson, J. & Greenberg, L. (2023) Collaboration Adrift: Factors for Anchoring into Governance Systems, Distilled from a Study of Three Regulated Rivers. *Sustainability* 2023, 15, 4980. <https://doi.org/10.3390/su15064980>.

Klimat- och näringslivsdepartementet 2024. Bättre förutsättningar för vattenkraftens omprövning. Pro memoria KN 2024/01642. Augusti 2024. <https://www.regeringen.se/contentassets/4edca016c2d64f22bedbe07c16ba9922/pro-memoria-vattenkraft.pdf>. Besökt 2024-12-03.

Kling, J. (2015). Miljöåtgärder i vattenkraftverk. Sammanställning av åtgärder för att nå god ekologisk status och god ekologisk potential. Havs- och Vattenmyndigheten, rapport 2015:26.

Malm Renöfält, B. & Ahonen, J. (2013). Ekologiska flöden och ekologiskt anpassad vattenreglering. Underlag till vägledning om lämpliga försiktighetsmått och bästa möjliga teknik för vattenkraft. Havs- och Vattenmyndigheten rapport 2013:12.

McKie, B. G., Sandin, L., Carlson, P. E., & Johnson, R. K. (2018). Species traits reveal effects of land use, season and habitat on the potential subsidy of stream invertebrates to terrestrial food webs. *Aquatic Sciences*, 80(2), 1-12.

Näslund, I., Kling, J., & Bergengren, J. (2013). Vattenkraftens påverkan på akvatiska ekosystem – en litteratursammanställning. Havs- och vattenmyndighetens rapport 2013:10.

Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E., & Stromberg, J. C. (1997). The Natural Flow Regime: A paradigm for river conservation and restoration. *N. BioScience*, 47: 769–784.

Puckridge J. T., Sheldon F, Walker K. F. & Boulton A. J. (1998). Flow variability and the ecology of large rivers. *Marine and Freshwater Research* 49: 5572

Sandin, L., Donadi, S., Holmgren, K., von Wachenfeldt, E., & Jones, D. (2020). Sötvatten – förvaltning och restaurering med förändrat klimat. Slutrapport från projektet FRESHREST (Sötvattenslandskapet – förvaltning och restaurering i förändrat klimat). (Rapport 6942). Naturvårdsverket.

Silva, A.T., Lucas, M.C., Castro-Santos, T., Katopodis, C., Baumgartner, L.J., Thiem, J.D., Aarestrup, K., Pompeu, P.S., O'Brien, G.C., Braun, D.C., Burnett, N.J., Zhu, D.Z., Fjeldstad, H.P., Forseth, T., Rajaratnam, N., Williams, J.G., and Cooke, S.J. (2018). The future of fish passage science, engineering, and practice. *Fish and Fisheries* 19(2): 340-362.

Strömberg, M., Borg, C., Degerman, E., Friberg, S., Jonzon, G., Jougda, L., Norström, L., Sers, B., Sjölander, E. och Spjut, D. (2015). Ångermanälvsprojektet – förslag till miljöförbättrande åtgärder i mellersta Ångermanälven och nedre Fjällsjöälven. WWF, Telge Energi, Länsstyrelsen Västernorrland, Länsstyrelsen Västerbotten, Älvrådarna, Coompanion, SLU, Vilhelmina Model Forest, ÅFF, Skogsstyrelsen. 2015.

https://media.wwf.se/uploads/2019/01/angermanalvsprojektet_sept2015_.pdf.
Besökt 2024-07-12.

Svenska kraftnät (2023). Att kartlägga de konsekvenser för elsystemet som omprövning av vattenkraften medför m.m. Redovisning av regeringsuppdrag. Svk 2023/610.

Turgeon, K., Turpin, C., & Gregory-Eaves, I. (2019). Boreal river impoundments caused nearshore fish community assemblage shifts but little change in diversity: a multiscale analysis. *76*(5), 740-752.

Vattenmyndigheterna (2020). *Vattenmyndigheternas riktlinjer för vattenkraft. Åtgärder och undantag*.

Widén, Å., Jansson, R., Malm Renöfält, B., Degerman, E. & Wisaeus, D. (2017). Ekologisk reglering. Metod för att beräkna produktionsförluster och miljönytta i reglerade vattendrag. Energiforsk rapport 2017:449. ISBN 978-91-7673-449-0.

Widén, Å., Malm Renöfält, B., Degerman, E., Wisaeus, D. & Jansson, R. (2021a). Let it flow: Modeling ecological benefits and hydropower production impacts of banning zero-flow events in a large regulated river system. *Science of the Total Environment*, volume 783 (2021) 147010.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147010>

Widén, Å., Malm Renöfält, B., Degerman, E., Wisaeus, D. & Jansson, R. (2021b) Environmental Flow Scenarios for a Regulated River System: Projecting Catchment-Wide Ecosystem Benefits and Consequences for Hydroelectric Production. *Water Resources Research*, 58, 2021WR030297. <https://doi.org/10.1029/2021WR030297>

Widén Å., Segersten, J., Donadi, J., Degerman, E., Malm Renöfält, B., Karlsson Tiselius, A., Lundbäck, S. & Jansson, R. (2022) Sveriges torrfårar: geografi, naturvärden och metoder för miljöförbättringar. <https://umu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1733276/FULLTEXT03.pdf>

Widén, Å. Malm Renöfält, B., Ahonen, J. & Jansson, R. (2023). Ecopeaking – pilotstudie om korttidsreglering. Energiforsk RAPPORT 2023:935.

Widmark D., 2002. Småskalig vattenkraft och kulturmiljövård. Riksantikvarieämbetet, Kunskapsavdelningens PM 2002:6

Xylia, M., Bin Asraf, F., Rudberg, P. M., Barquet, K., & Han, G. (2024). Keeping the flow: hydropower, river ecosystems and governance in northern Sweden. SEI Report. Stockholm Environment Institute. <https://doi.org/10.51414/sei2024sei2024.014>

HÅLLBAR VATTENKRAFT I FRAMTIDENS ENERGISYSTEM

SLUTRAPPORT FRÅN HÅVEN-PROJEKTET

Vattenkraftens roll att möta en varierande efterfrågan på el i det svenska energisystemet har under lång tid varit relativt oförändrad. Men det är på väg att förändras. Samtidigt som andelen variabel kraft i form av vindkraft och solceller växer förväntas samhällets behov av el under de kommande decennierna att öka kraftigt. Detta, i kombination med förändrade tillrinningsmönster på grund av ett förändrat klimat och omprövningen av vattenkraften, kommer att ha en stor påverkan på vattenkraftens förutsättningar och funktion i det framtida energisystemet.

Denna rapport sammanfattar resultaten från forskningsprojektet "Hållbar vattenkraft i framtidens energisystem" som genomfördes under åren 2022 - 2024. Projektet har haft som övergripande mål att fördjupa kunskapen om vattenkraftens roll i det framtida energisystemet och de möjliga elsystemmässiga och hållbarhetsmässiga systemkonsekvenserna av miljöanpassningsåtgärder i vattenkraften i perspektivet av ett energisystem i förändring.

Bakgrunden till projektet utgörs av en förstudie (*Systemkonsekvenser av miljöåtgärder i vattenkraften, Energiforsks rapport nr 2022:862*) som genomfördes under hösten 2021. Förstudien hade som övergripande syfte att utveckla en metodik och att analysera systemkonsekvenserna av miljöanpassningsåtgärder för vattenkraften i ett framtida elsystem. Utkomsten av förstudien har utgjort en grund i detta projekt för vidare metodikutveckling och fortsatta analyser av olika konsekvenser för vattenkraften och elsystemet som följd av att förse vattenkraften med moderna miljövillkor. En viktig del av projektet har varit att vidareutveckla metodiken dels vad gäller en bättre beskrivning och representation av vattenkraften i energisystemmodellerna genom utvecklade vattenkraftsekvivalenter, dels vad gäller metodiken för att analysera och utvärdera hållbarhetskonsekvenserna av förlust av elproduktion och reglerförmåga i vattenkraften.

Ett nytt steg i energiforskningen

Forskningsföretaget Energiforsk initierar, samordnar och bedriver forskning och analys inom energiområdet samt sprider kunskap för att bidra till ett robust och hållbart energisystem. Energiforsk är ett politiskt neutralt och icke vinstutdelande aktiebolag som ägs av branschorganisationerna Energiföretagen Sverige och Energigas Sverige, det statliga affärsverket Svenska kraftnät, samt gas- och energiföretaget Nordion Energi. Läs mer på energiforsk.se.