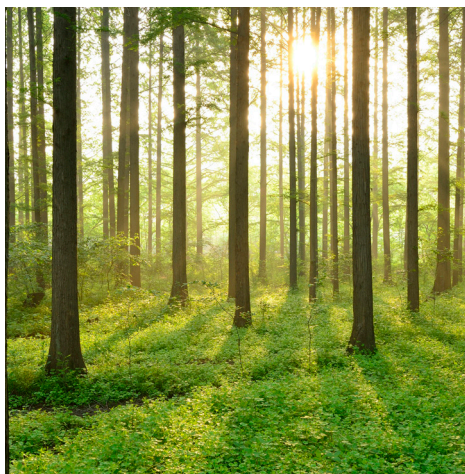


# KLIMATFÖRÄNDRINGARNAS INVERKAN PÅ VATTENKRAFTEN

RAPPORT 2021:743



KLIMATFÖRÄNDRINGARNAS  
KONSEKVENSER





# Klimatförändringarnas inverkan på vattenkraften

EBBA LÖFBLAD  
JENNY GODE  
GUSTAV STRANDBERG  
ERIK KJELLSTRÖM  
STEFAN MONTIN

ISBN 978-91-7673-743-9 | © Energiforsk juni 2021

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se



## Förord

År 2020 var det varmaste året som uppmätts i Europa och jordens medeltemperatur låg på samma höga rekordnivå som 2016. De globala utsläppen av växthusgaser fortsätter att öka och vi rör oss mot en global temperaturhöjning på över 3 grader mot slutet av seklet. Effekterna blir oåterkalleliga om vi inte lyckas bryta utvecklingen. Även om vi klarar Parisavtalets mål – om att hålla ökningen av den globala medeltemperaturen väl under 2 grader, med sikte på att inte överstiga 1,5 grader – kommer det att få betydande konsekvenser.

I den arktiska regionen, som norra Sverige tillhör, går uppvärmningen betydligt snabbare och vi ser redan effekterna av detta. Den ökade temperaturen påverkar både naturmiljö och samhället och därigenom inte minst det svenska energisystemet med allt större inslag av förnyelsebar energi. Det leder bland annat till att produktionsförutsättningarna för olika energislag förändras och att energisystemet blir mer sårbart.

I detta projekt – Klimatförändringars inverkan på energisystemet – har Energiforsk samlat ett 15-tal forskare och analytiker från Chalmers Tekniska Högskola, Energiforsk, IVL Svenska Miljöinstitutet, Profu och SMHI för att fördjupa kunskapen om klimatförändringarnas påverkan på det svenska energisystemet och vilka åtgärder som krävs för att minska de negativa effekterna. Resultatet beskrivs i sex delrapporter som behandlar klimatpåverkan på vattenkraften, kärnkraften, vindkraften, fjärrvärmens, biobränsleförsörjningen och elnäten samt en sammanfattande slutrapport. Projektet har genomförts av Ebba Löfblad och Jenny Gode på Profu, Gustav Strandberg och Erik Kjellström på SMHI och Stefan Montin på Energiforsk i nära samverkan med representanter från berörda delar av energisektorn, forskningsorganisationer, myndigheter, försäkringsbolag, med flera.

Energiforsk vill rikta ett stort tack dels till medverkande forskare, dels till alla medverkande i projektets styrgrupp och olika arbetsgrupper. Sammantaget har över hundra personer från ett 50-tal olika organisationer bidragit till projektets genomförande. Energiforsk vill också rikta ett särskilt tack till projektets finansierare<sup>1</sup>.

Energiforsk

*Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.*

---

<sup>1</sup> C4 Energi, Energimyndigheten, E.ON Sverige, Fortum Sverige, Göteborg Energi, If, Jämtkraft, Karlstads Energi, Skellefteå Kraft, Stiftelsen IVL, Svenska kraftnät, Söderenergi, Tekniska verken i Linköping, TVO, Uniper, Vattenfall, ÅForsk

## Sammanfattning

**Denna delrapport inom projektet "Klimatförändringarnas inverkan på energisystemet" beskriver klimatförändringens konsekvenser för vattenkraften. I jämförelse med andra energislag är det för vattenkraften svårare att dra generella slutsatser om klimatförändringens konsekvenser. Detta beror dels på de enskilda kraftverkens och dammarnas mycket platsspecifika förutsättningar, dels på att vattenkraften är starkt beroende av hur el- och energisystemet i övrigt kommer att utvecklas under de kommande decennierna.**

Klimatförändringens direkta påverkan på vattenkraften handlar främst om hur förändringar i nederbörd och temperatur leder till en förändrad tillrinning och därmed förändrade förutsättningar för elproduktion och reglerförmåga på olika tidsskalor. Dessutom finns indirekt påverkan genom förändringar i konsumtionsmönster och annan produktion, eftersom vattenkraften är den främsta resursen att anpassa till nya behovssituationer i kraftsystemet både på kort och lång sikt.

Nederbörd och temperatur är alltså de två viktigaste väder- och klimatrelaterade faktorerna ur ett vattenkraftsperspektiv. Projektets analyser har omfattat de potentiella konsekvenserna av en ökad årsnederbörd, en förändrad årscykel, extrem nederbörd och skyfall, konsekvenser av torrperioder, ökade vattentemperaturer och isbildning. Mycket översiktligt har också möjliga effekter av skogsbränder, stormar och åska diskuterats.

En ökad nederbörd och en ökad tillrinning kan potentiellt innebära möjligheter till ökad elproduktion, huruvida den kan realiseras är dock avhängig en rad olika faktorer som till exempel värdet på el, hur stor avdunstningen är samt tillgång till lagringskapacitet i vattenkraftsmagasinen. Flera tidigare studier har dragit slutsatsen att klimatförändringen bör innebära ökad produktionspotential för vattenkraften i Sverige och Norden. I detta projekt har vi inte kunnat styrka att denna slutsats är robust eftersom omvärldsförutsättningarna för vattenkraften ser helt annorlunda ut idag och framöver.

Med största sannolikhet kommer utvecklingen av det framtida el- och energisystemet, tillsammans med kommande miljöanpassningskrav, att ha en större påverkan för vattenkraften än de klimatförändringar vi ser framför oss. Viktiga faktorer för utvecklingen av elsystemet är den snabba tillväxten av vindkraft med tilltagande variabilitet på elmarknaden och förväntningar på en kraftigt ökad elanvändning, som båda skapar ett tryck att använda vattenkraften med förändrat körmonster. Det betyder dock inte att klimatförändringens påverkan på vattenkraften är obetydlig, och den måste beaktas vid utformningen av morgondagens elsystem. Vattenkraftsföretagen är mycket bra på att hantera både vädermässiga och kraftsystemmässiga variationer, men klimatförändringen innebär ytterligare en komponent som måste beaktas i den långsiktiga planeringen av vattenkraften.

## Nyckelord

*klimatförändring, energisystem, vattenkraft, konsekvenser.*

## Summary

**In this report the impacts of climate change on hydropower are described and analysed. The report is a sub-report of the project “Impacts of climate change on the energy system”. We have found that it is more difficult to draw general conclusions on the impacts of climate change on hydropower than for other sources of energy. This is partly explained by the specific and local conditions valid for single hydropower plants or hydro reservoirs, but also because the future role for hydropower is very dependent on the future development of the rest of the electricity and energy systems.**

The direct impact of climate change on hydropower is essentially a question of how changes in precipitation and temperature relate to a change in conditions for electricity generation and the ability to regulate at various time scales. Since hydropower is the primary resource to adapt to new short-term and long-term demands of the electricity system, there also exists an indirect impact through changes in electricity consumption patterns and changes in other electricity generation.

Precipitation and temperature are, thus, the two most important weather and climate related factors, as seen from a hydropower perspective. The analyses carried out in this study include the potential impacts of increased annual precipitation, changes in the annual dynamics of precipitation and river flow, extreme precipitation and downpour, consequences of dry periods, increased water temperatures and ice formation. Potential impacts of forest fires, storms and thunderstorms have also been included in the project, although at a more general level.

Increased precipitation and inflow may potentially lead to increased electricity generation. To what extent this can be realised is dependent on a number of factors such as the value of electricity (both economically and systemically), the size of evaporation and availability of storage capacity in the hydro reservoirs. Several previous studies have reached the conclusion that climate change could imply an increased generation potential for hydropower in Sweden and the Nordic countries. In our study, we have not been able to confirm the robustness of that conclusion since the external conditions for hydropower are significantly different today and will be in coming years.

It is highly likely that the development of the future electricity and energy systems, along with forthcoming changes in environmental regulation as regards hydropower, will have a greater impact on hydropower than the change in climate that we currently foresee. Key factors for the development of the electricity system are the swift growth in wind power, implying increased variability in the electricity market, and expectations on a significant increase in electricity demand. Both these factors entail an increased pressure on hydropower to change production patterns. However, this does *not* mean that climate change is of no significance to hydropower. Climate change needs to be taken into consideration when the electricity system of tomorrow is designed and developed. The hydropower operators are highly experienced in handling variations in both weather and conditions of the electricity market but, nevertheless, climate change will present an additional component that needs to be taken into consideration in the long-term planning of hydropower.



# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>9</b>
1.1	Bakgrund	9
1.2	Några inledande ord om förutsättningarna för projektets analyser kopplat till vattenkraften	9
1.3	Metodik som har använts inom projektet	10
1.3.1	Metod som har använts inom arbetsgruppen för vattenkraft	12
1.4	Systemgräns för analyserna av vattenkraften	13
1.4.1	Energikälla	15
1.4.2	Anläggningar och distribution	16
1.5	Vattenkraftens roll och förutsättningar i dagens och framtidens elsystem och ett förändrat klimat	21
1.5.1	Förändrade förutsättningar för vattenkraften	22
<b>2</b>	<b>Klimatförändringen</b>	<b>25</b>
2.1	Om klimatscenerierna	25
2.2	Klimatscenerier för vattenkraften	28
2.2.1	Kort om tillrinning och kopplingen till nederbörd	28
2.2.2	De viktigaste väder- och klimatrelaterade faktorerna ur ett vattenkraftsperspektiv: nederbörd och temperatur	29
<b>3</b>	<b>Konsekvenser och risker för vattenkraften utifrån ett klimatförändringsperspektiv</b>	<b>33</b>
3.1	Konsekvenser av ökad årsnederbörd	37
3.1.1	SMHI:s bedömning av framtida klimat	37
3.1.2	Beskrivning av möjliga konsekvenser	37
3.1.3	Konsekvensbedömning	39
3.2	Konsekvenser av förändrad årscykel (säsongsmönster)	40
3.2.1	SMHI:s bedömning av framtida klimat	40
3.2.2	Beskrivning av möjliga konsekvenser	40
3.2.3	Konsekvensbedömning	44
3.3	Konsekvenser av extrema nederbördsmängder på olika tidsskalor	45
3.3.1	SMHI:s bedömning av framtida klimat	45
3.3.2	Beskrivning av möjliga konsekvenser	45
3.3.3	Konsekvensbedömning	46
3.4	Konsekvenser av torrperioder	47
3.4.1	SMHI:s bedömning av framtida klimat	47
3.4.2	Beskrivning av möjliga konsekvenser	48
3.4.3	Konsekvensbedömning	50
3.5	Konsekvenser av isbildning	52
3.5.1	SMHI:s bedömning av framtida klimat	52
3.5.2	Beskrivning av möjliga konsekvenser	53
3.5.3	Konsekvensbedömning	54

3.6	Konsekvenser av ökad vattentemperatur	55
3.6.1	SMHI:s bedömning av framtida klimat	55
3.6.2	Beskrivning av möjliga konsekvenser	55
3.6.3	Konsekvensbedömning	59
3.7	Konsekvenser av skogsbränder	59
3.7.1	SMHI:s bedömning av framtida klimat	59
3.7.2	Beskrivning av möjliga konsekvenser	60
3.7.3	Konsekvensbedömning	61
3.8	Konsekvenser av stormar och Åska	61
3.8.1	Stormar	62
3.8.2	Åska och blixtnedslag	62
<b>4</b>	<b>Exempel på möjliga klimatanpassningsåtgärder för vattenkraften</b>	<b>64</b>
4.1	Ökad nederbörd – Exempel på möjliga åtgärder	64
4.2	Förändrad årscykel (säsongsmönster) – Exempel på möjliga åtgärder	65
4.3	Extrema nederbördsmängder på olika tidsskalor – Exempel på möjliga åtgärder	66
4.4	Torrperioder – Exempel på möjliga åtgärder	67
4.5	Isbildning – Exempel på möjliga åtgärder	67
4.6	Ökad vattentemperatur – Exempel på möjliga åtgärder	68
4.7	Skogsbränder – Exempel på möjliga åtgärder	68
<b>5</b>	<b>Fallstudie av förändrad tillrinning i Ljungan</b>	<b>69</b>
5.1	Ljungans älvsystem	69
5.2	Metodik för att beräkna tillrinning till magasinerna längs Ljungan idag och i ett framtida klimat	70
5.3	Översiktlig beskrivning av Vattenfalls produktionsoptimeringsmodell för Ljungan	71
5.4	resultat	71
5.5	Diskussion	71
<b>6</b>	<b>Diskussion och slutsatser</b>	<b>73</b>
6.1	Projektets huvudsakliga slutsatser om vattenkraften	73
6.2	Diskussion	75
6.2.1	Förändringar i nederbörd och temperatur har en tydlig påverkan på vattenkraften i framtidens klimat	75
6.2.2	Ytterligare väder- och klimatrelaterade faktorer som kommer att påverka vattenkraften i ett förändrat klimat	76
6.3	konsekvenserna för Vattenkraften av klimatförändringen beror i hög grad på vattenkraftens roll och värde i det framtida elsystemet	77
6.4	Fortsatt forskning och utveckling inom området	78
<b>7</b>	<b>Referenser</b>	<b>79</b>
<b>Bilaga A:</b>	<b>Dammsäkerhet</b>	<b>85</b>

# 1 Inledning

**Denna rapport beskriver de viktigaste slutsatserna vad gäller klimatförändringens påverkan på vattenkraften inom ramen för det arbete som har genomförts i Energiforsks projekt *Klimatförändringarnas inverkan på energisystemet*.**

## 1.1 BAKGRUND

I Parisavtalet fastslås att den globala temperaturökningen ska begränsas till under 2°C över förindustriell nivå, med strävan efter max 1,5°C. Samtidigt har temperaturen redan stigit med över en grad. På våra nordliga breddgrader går klimatförändringarna snabbare och temperaturökningen är kraftigare. Ökad temperatur driver andra klimatförändringar såsom förändrad nederbörd, vind och molnighet.

Klimatförändringarna kommer att påverka energisektorn på olika sätt. Energisystemets sårbarhet ökar samtidigt som produktionsförutsättningarna för olika energislag förändras. Elnätet påverkas och användningen av el, värme och kyla förändras. I Energiforsksprojektet "*Klimatförändringarnas inverkan på energisystemet*" har Profu, SMHI, IVL Svenska Miljöinstitutet och Chalmers Tekniska Högskola tillsammans analyserat hur ett förändrat klimat kan påverka energisektorn. Projektet har omfattat påverkan på vattenkraft, vindkraft, kärnkraft, bioenergi, elnät samt energianvändning, fjärrvärme och fjärrkyla. Begränsade analyser har även gjorts kring påverkan på solenergi och dammsäkerhet.

Analyserna har utgått från klimatscenarier och energisystemscenarier för att beakta förväntad utveckling av såväl energisystemet som klimatet i framtiden. SMHI har tagit fram en mängd klimatindex för att beskriva hur väder- och klimatrelaterade faktorer kan ändras vid temperaturnivåer på +1,5°C, +2,0°C, +3,0°C och +4,0°C över förindustriell tid. Dessa sammanfattas i en separat Energiforskrapport (Kjellström m.fl., 2021), medan de klimatindex som är relevanta för det energislag som behandlas i denna rapport, nämligen bioenergi, beskrivs i kommande avsnitt.

Denna rapport är en delrapport från projektet och fokuserar på hur klimatförändringar kan påverka vattenkraftens förutsättningar. Övriga delrapporter för andra energislag från detta projekt finns att ladda ner från Energiforsks hemsida.

## 1.2 NÅGRA INLEDANDE ORD OM FÖRUTSÄTTNINGARNA FÖR PROJEKTETS ANALYSER KOPPLAT TILL VATTENKRAFTEN

Av budgetmässiga skäl har det inom projektet inte varit möjligt att ta fram nya hydrologiska klimatscenarier<sup>2</sup>. Projektet har förlitat sig på redan tillgängligt material om framtidens klimat, baserat på atmosfäriska klimatmodeller. Ingen

<sup>2</sup> Främst handlade det om att det inte fanns möjlighet att ta fram ytterligare och/eller uppdaterad data baserat på samma klimatscenarier som ingick i projektet i stort (data för övriga energislag).

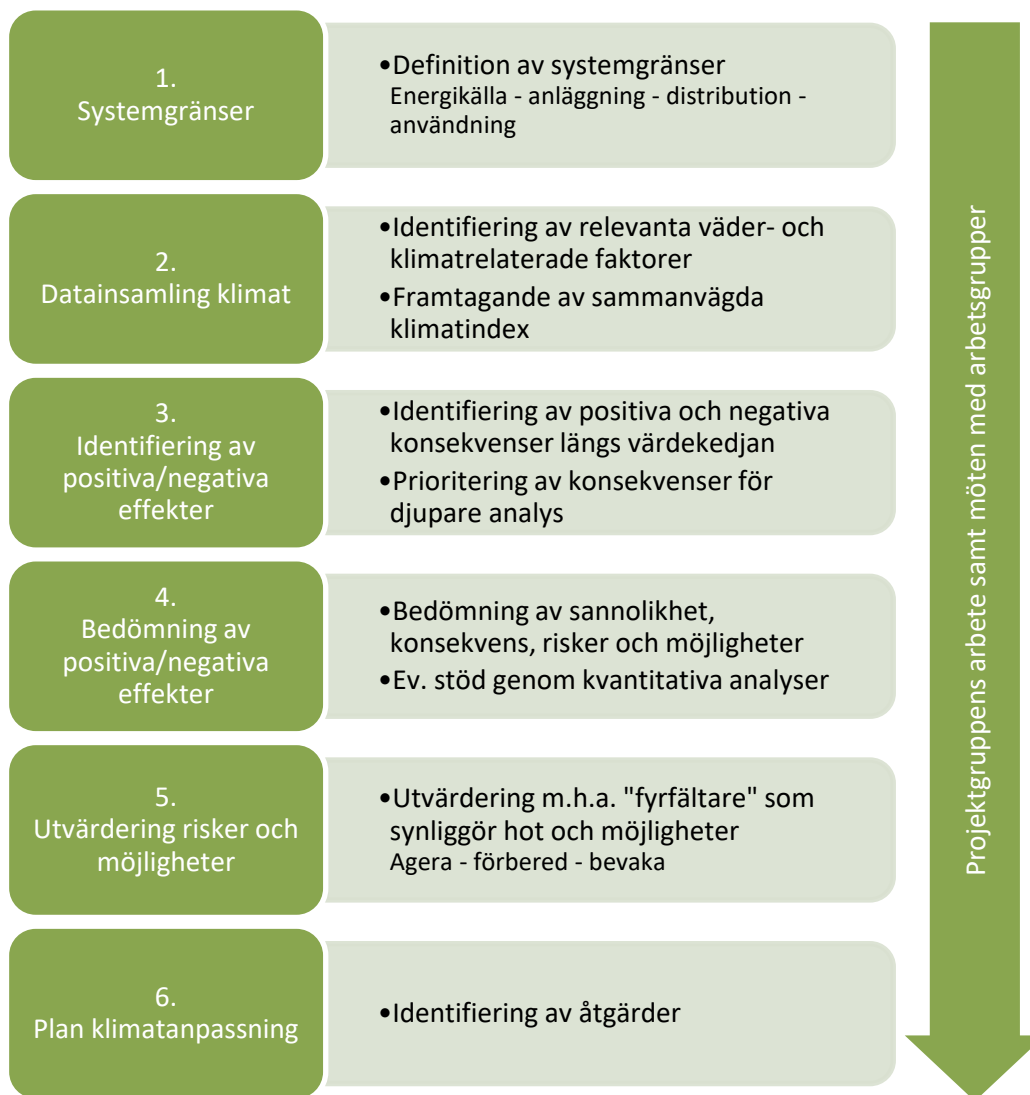
klimatmodellering har gjorts inom projektet. Kompletterande hydrologisk modellering i stor skala skulle kräva resurser som inte har funnits.

Avsaknad av hydrologisk modellering, och därmed direkta beräkningar av till exempel tillrinning och flöden till olika vattendrag och magasin, gör att projektet istället har fått förlita sig på de resultat som kommer från de atmosfäriska klimatmodellerna. Nederbörd och avdunstning är väl beskrivet i klimatmodellerna och kan användas som en indikation på hur flöden i vattendrag kan förändras, men ger ingen direkt bild av tillrinning. Nettoavrinningen i klimatmodellen är förenklad jämfört med i den hydrologiska modellen, men ger ändå en indikation på vattentillgången.

Att arbetsgruppen har utgått från nederbörd och temperatur som ett mått för att indikera förändrad tillrinning i ett framtida klimat bidrar naturligtvis till en ökad osäkerhet i projektets slutsatser om vattenkraften. Detta är viktigt att ha med sig när man läser föreliggande rapport och dess slutsatser.

### 1.3 METODIK SOM HAR ANVÄNTS INOM PROJEKTET

Figur 1 sammanfattar på övergripande nivå den metodik som använts i projektet. Metodiken har inspirerats av en risk- och sårbarhetsmetodik som VTT i Finland utvecklade 2008 inom ramen för ett nordiskt forskningsprojekt kring konsekvenser för energisystemet av klimatförändringar.



Figur 1. Övergripande metodik för projektet som använts för de flesta energislag. Viss iteration har skett mellan de olika delmomenten under projektets gång. Metodiken är en vidareutvecklad version av en risk- och sårbarhetsanalys som VTT i Finland tagit fram (Molarius m.fl., 2008).<sup>3</sup> Molarius m.fl. inkluderade även som ytterligare steg i sin metodik genomförande av anpassningsplan, vilket inte har ingått i vårt projekt.

Den beskrivna metodiken och processen i Figur 1 har vidareutvecklats under projektets gång och ett flertal verktyg och mallar har tagits fram och anpassats till projektets olika delstudier.

Analyserna av konsekvenser, risk, sårbarhet och åtgärder inom projektet har genomförts av projektgruppen i nära samarbete med sex arbetsgrupper (vattenkraft, vindkraft, kärnkraft, bioenergi, elnät samt energianvändning, fjärrvärme och fjärrkyla). Dessa grupper har träffats tre gånger. I slutet av projektet etablerades även en arbetsgrupp kring dammsäkerhet som träffades en gång. I

<sup>3</sup> Molarius R, Wessberg N, Keränen J and Schabel J. Creating a climate change risk assessment procedure – Hydropower plant case, Finland. XXV Nordic Hydrological Conference – Northern Hydrology and its Global Role (NHC-2008) Reykjavík, Iceland. 11-13 August 2008.

varje arbetsgrupp deltog ca 10-15 personer från energiföretag, myndigheter, branschorganisationer, forskare med mera.

### 1.3.1 Metod som har använts inom arbetsgruppen för vattenkraft

Arbetet inom arbetsgruppen för vattenkraften har i stora drag följt den övergripande metodiken i projektet som beskrivs i Figur 1.

Projektet inleddes med att, vid två workshops, tillsammans med arbetsgruppen och utifrån SMHI:s klimatscenarier (och data för olika väder- och klimatrelaterade faktorer och klimatindex; se kapitel 2) identifiera och diskutera de potentiella konsekvenser som klimatiförändringen kan ha på vattenkraften. Vid en avslutande workshop genomfördes sedan en utvärdering av potentiella risker och möjligheter av de identifierade konsekvenserna. Vid workshopen genomfördes omröstningar via Mentimeter om varje potentiell konsekvens där deltagarna fick rösta på i vilken grad konsekvensen anses bli betydande eller inte utifrån en sannolikhetsbedömning (*ej troligt, mindre troligt, troligt och mycket troligt*).

Fokus för projektets arbete och analyser kring klimatiförändringarnas påverkan på vattenkraften har varit konsekvenser på drift och produktion. Någon specifik analys av klimatiförändringens påverkan på dammsäkerhet ingick, av budgetmässiga skäl, inte i projektet. Under projektets gång lyftes dock önskemål om att även lyfta konsekvenserna för dammsäkerhet i projektet. För att tillmötesgå detta önskemål genomfördes därför en extra workshop i slutskedet av projektet i samverkan med Flödeskonferensens dammsäkerhetsexpertis. Någon vidare analys redovisas inte inom projektet, men dokumentation från workshopen har delgivits Flödeskonferensen. Flödeskonferensen har även bidragit till projektet genom en särskild bilaga till föreliggande rapport om dammsäkerhet i ett förändrat klimat.

Analysen i rapporten och projektet i stort bygger i stor utsträckning på kvalitativa diskussioner med arbetsgruppens experter som genomförts vid workshoparna, ett antal intervjuer med branschföreträdare samt kompletterande underlag från litteraturen. Under diskussionerna med arbetsgruppen blev det tydligt att vattenkraften, till skillnad från en del andra energislag inom projektet, över lag är svår att diskutera i mer generella termer, då förutsättningar och därmed slutsatser om klimatiförändringens konsekvenser för vattenkraften i hög grad är mycket plats- och anläggningsspecifika. Detta har begränsat analyserna och konsekvensbedömningen för vattenkraften i detta projekt, vilket identifierades tidigt i projektet och mynnade ut i ett fortsättningsprojekt som påbörjades under 2020 och avslutas årsskiftet 2022/2023 (se mer i avsnitt 6.4).

I den utsträckning arbetsgruppen har pekat på svårigheterna med att dra slutsatser för olika väder- och klimatrelaterade faktorer i mer generella termer framgår det i rapportens olika delar.

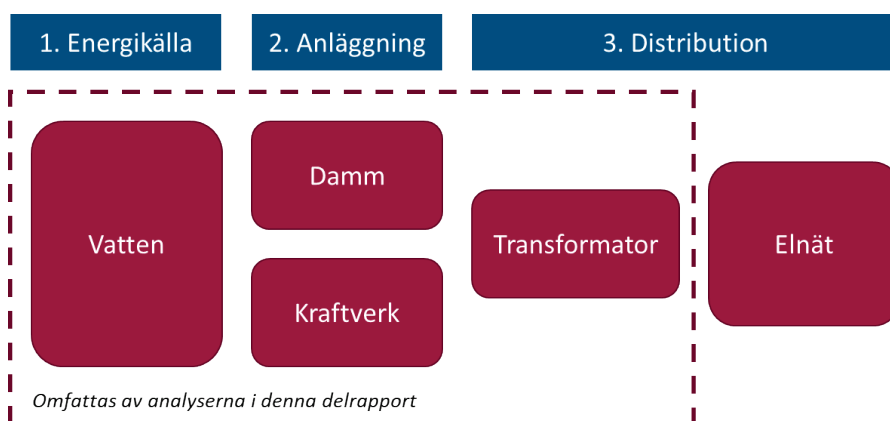
Projektets arbetsgruppsansvariga vill här passa på att rikta ett tack till deltagarna i arbetsgruppen för vattenkraft samt de medlemmar i Flödeskonferensen som deltog på workshopen om dammsäkerhet. Diskussionerna har varit mycket givande och värdefulla för projektet.

Ett särskilt tack till Maria Bartsch, Svenska Kraftnät, Kristoffer Hallberg, WSP samt Niklas Dahlbäck och Claes-Olof Brandesten, båda Vattenfall, som har läst och kommenterat rapporten.

#### 1.4 SYSTEMGRÄNS FÖR ANALYSERNA AV VATTENKRAFTEN

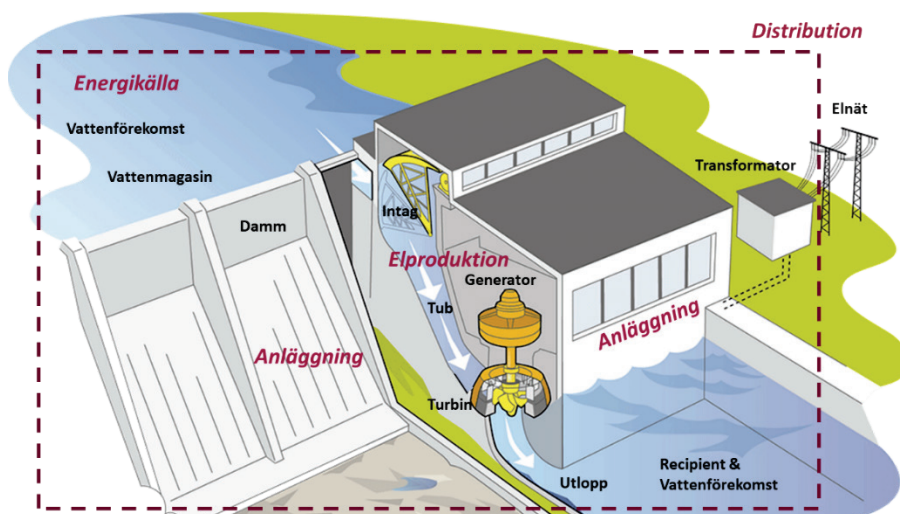
Projektets systemgräns för analyserna av vattenkraften framgår i Figur 1 nedan.

På samma sätt som för övriga analyserade energislag i projektet har vattenkraften delats in i energikälla (vatten) och anläggningar (dammar och kraftverk). Även om transformatorer generellt inom projektet har klassats som en del av distributionssystemet omfattades de i diskussionerna i arbetsgruppen för vattenkraft. En anledning till detta är den nära kopplingen mellan vattenkraftverken och transformatorerna, då de ofta sitter i anslutning till generatorerna. Som beskrivs i metodkapitlet ingår ingen vidare analys av dammsäkerhet.



**Figur 2** Aktuell systemgräns för analyserna av vattenkraften och konsekvenserna för respektive del av klimatförändringen.

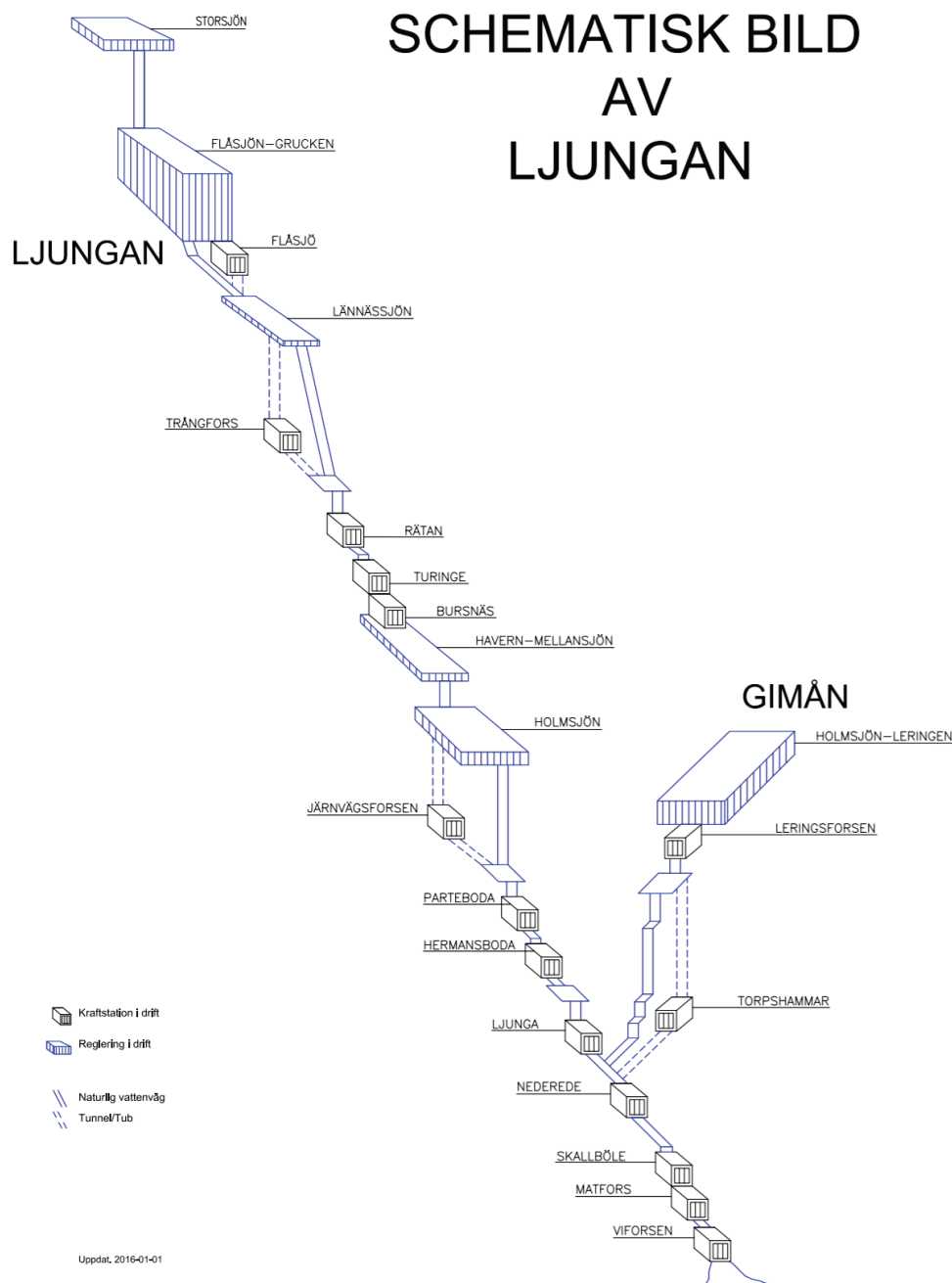
Figur 2 visar systemgränsen för analyserna och vattenkraftssystemets olika delar i ett mer anläggnings specifikt sammanhang.



Figur 3 Systemgränser i denna rapport och de delar av systemet (energikälla, anläggning och transformator) som ingår i konsekvensanalyserna. Grundfiguren är hämtad från Skellefteå Krafts hemsida, rapportens författare har modifierat den med förklarande text.

En kraftverksälv fungerar som ett system för att optimera vattenanvändningen, där tillrinningen till en anläggning påverkas av magasinering och flödesreglering i uppströms belägna anläggningar. Årsmagasinen finns högt upp i systemet. I Figur 4 visas en schematisk bild av Ljungans älvsystem med reglermagasin och kraftstationer. Av figuren blir det fysiska systemberoendet mellan olika anläggningar i samma vattendrag tydligt.





**VATTENREGLERINGSFÖRETAGEN**  
 UMEÅLVEN • ÅNGERMANLÄN • INDALSÄLVEN • LJUNGAN • LJUSTAN • DALÄLVEN

Figur 4 En schematisk bild över Ljungans älvsystem med reglermagasin och kraftstationer. Karta hämta från Vattenregleringsföretagen.

### 1.4.1 Energikälla

Den mängd vatten som rinner ut i sjöar och vattendrag från ett specifikt område, och som nyttjas som energikälla i vattenkraftverk, kallas tillrinning. Tillrinningen är den del av nederbörden som inte avdunstar eller magasineras i marken eller lagras som snö. Årsenergin från vattenkraften ges i huvudsak av tillrinningen.

Vattenkraftsproduktionen är starkt korrelerad till den hydrologiska situationen, dvs. nederbördsmängd och snösmältning. De parametrar som har störst betydelse för hur stor del av tillrinningen som kan utnyttjas är storleken på vårfloden (i volym och/eller tidsmässig topp) i förhållande till tillgänglig magasinvolym, nederbördens fördelning över året samt enskilda vattendrags naturliga eller förändrade förmåga att hantera flöden<sup>4</sup> (SOU, 2007).

Det vatten som rinner till ett magasin omfattar turbintappning och spill<sup>5</sup> genom utskov från uppströms liggande kraftverk samt den lokala tillrinningen i området, dvs. det vatten som tillkommer<sup>6</sup> mellan två kraftverk. Det vatten som rinner ut ur magasinet omfattar tappning och spill i det tillhörande kraftverket. Lika viktigt som att mäta årsproduktionen är förmågan att kunna producera när det som är mest efterfrågat i kraftsystemet. Då spelar lagringskapaciteten i stora och små magasin en roll. Det är inte alltid produktionskapaciteten i ett kraftverk är ekonomiskt optimerat för årsproduktion. En förändring i tillrinning eller tillrinningsmönster kan förändra även värdet av denna förmåga<sup>7</sup>.

Som beskrivs under avsnitt 1.2 har projektets analyser för vattenkraften, i avsaknad av klimatprojektioner för tillrinning, främst utgått från variabeln nederbörd för att indikera förändringar framtidens vattentillgång som kan omsättas till el i vattenkraftverken. Mer om detta i avsnitten nedan.

#### 1.4.2 Anläggningar och distribution

Anläggningsdelarna som har ingått i analysen omfattar dammar och kraftverk med tillhörande utrustning samt transformatorer för distribution ut på elnätet.

##### *Dammar*<sup>8</sup>

En damm är ett byggnadsverk som utgör barriär över ett vattendrag eller en terrängsänka, med syfte att lagra, kontrollera och/eller avleda vatten eller blandningar av vatten och annat material. Det är inte ovanligt att det behövs flera dammar för att dämna upp vattnet i ett och samma magasin.

Vattenkraftdammar är avsedda för att tillvarata vattens lägesenergi och/eller för att magasinera (dvs. lagra) vatten för elproduktion. De kan delas in i *kraftverksdammar* och *regleringsdammar*, där de förra syftar till att genom uppdämning koncentrera fallhöjden i ett vattendrag och de senare till att skapa ett magasin för att kunna

<sup>4</sup> Vattendragets förmåga att avbörda, det vill säga leda bort, det tillrinnande vattnet beror av dess geometri, dvs. förekomsten av bestämmande sektioner i form av t.ex. förträngningar och vattentrösklar. Även vattendragets lutning har inverkan på avbördningskapaciteten (se t.ex. Räddningsverket Karlstad, 2000). Omgivande markers egenskaper spelar också roll. Även hur stor del av ett avrinningsområdes areal som består av sjöyta påverkar denna förmåga att avbörda och utgör en naturlig flödesdämpare.

<sup>5</sup> Begreppet tappning inkluderar allt vatten som passerar anläggningen, dvs. både genom turbin och genom utskov. Spill syftar endast på utskovstappningen.

<sup>6</sup> Här ingår t.ex. lokal tillrinning plus direkt nederbörd på magasinet samt eventuella överledningar mellan delavrinningsområden.

<sup>7</sup> Det handlar alltså inte bara om produktion av el (kWh) utan också produktion av el *vid rätt tillfälle*.

<sup>8</sup> För mer information hänvisas till Svenska kraftnäts webbplats [Dammsäkerhet | Svenska kraftnät \(svk.se\)](http://www.svk.se)

reglera och styra tappning av vatten över tid. I praktiken har många dammanläggningar båda dessa egenskaper.



Figur 5 Den dämmande funktionen hos en damm utgörs av olika typer av dammkonstruktioner med syfte att koncentrera fallhöjd och/eller att magasinera vatten. Foto: SvK.

Regleringsdammar kan magasinera vatten för alltifrån dygnsreglering till säsongreglering. I så kallade årsmagasin högt upp i älvsystem, med stor regleringsamplitud mellan dämningssgräns och sänkningsgräns, tappas det uppdamnda vattnet för att kunna nyttjas för produktion i nedströms liggande kraftverk under vintern då den naturliga tillrinningen är låg. Magasinen tappas på så vis av (töms) för att magasinera den stora tillrinning som sker under våren när snön smälter och vårfloden börjar, och säkerställa vattentillgången under nästa vintersäsong. Mindre magasin, med liten reglerbar magasinvolym, finns i allmänhet i nära anslutning till flertalet vattenkraftstationer. Dessa magasin kan användas för reglering på dygns- eller veckobasis.

Dammar dimensioneras för att, med tillhörande grundläggning och anslutningar, kunna inestänga vatten och med marginal kunna motstå de belastningar de utsätts för. Utskov (avbördningsanordningar) med tillhörande styr- och övervakningssystem utformas för att tillsammans med turbintappning ge möjlighet till att kontrollera flödet förbi och genom anläggningarna samt till magasinering respektive avtappning från regleringsmagasin.

En dammanläggning inom vattenkraften har i stort tre huvudfunktioner:

- Den **dämmande** funktionen utgörs av olika typer av dammkonstruktioner och har som syfte att koncentrera fallhöjden i ett vattendrag och/eller att magasinera vatten under en tidsperiod (Figur 5).

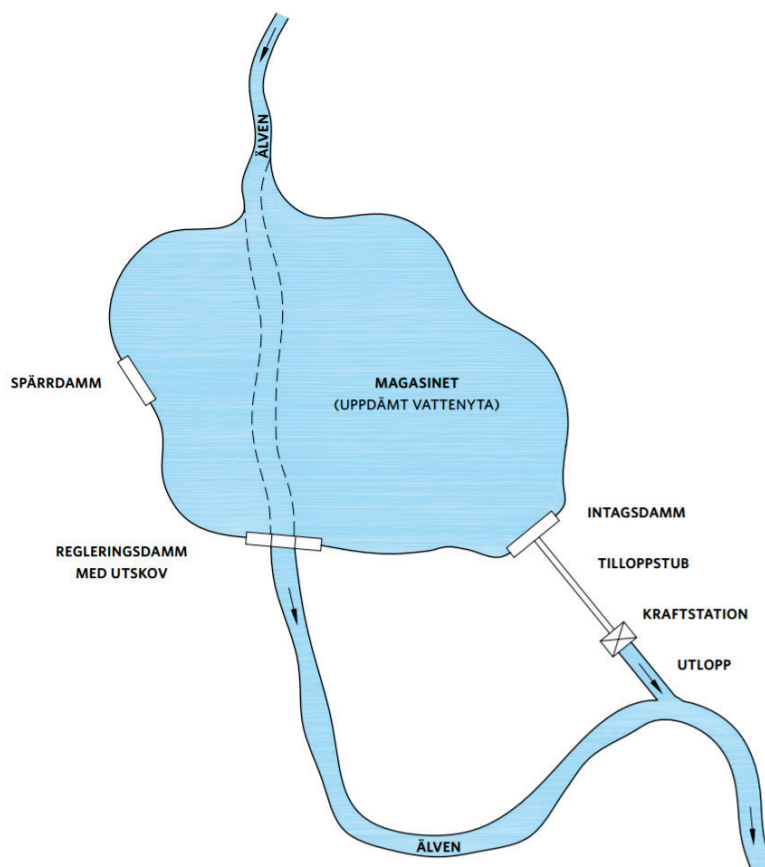
- Den *avbördande* funktionen utgörs av öppningar i dammen med tillhörande avstängningsanordningar med syfte att leda vatten från dammens uppströmssida till vattendraget nedströms dammen (Figur 4).
- Den *kontrollerande* funktionen utgörs av olika tekniska system som behövs för att styra och kontrollera vattentappningen förbi dammen liksom att övervaka de dämmande och avbördande funktionerna. Och, i förekommande fall, styra vattentappning till ett miljövillkorat mönster.



Figur 6 Den avbördande funktionen hos en damm utgörs av anläggningsdelar (utskov) för att släppa vatten genom eller förbi en anläggning. Foto: SvK.

En dammanläggning kan omfatta en eller flera dammar som tillsammans dämmer upp ett magasin och/eller skyddar lägre liggande områden från översvämning. En dammanläggning kan också innefatta dammar som reglerar vattenytor i anslutning till ett vattenmagasin. Även den tekniska utrustning som tillhör en damm ingår i en dammanläggning.

Figur 7 nedan visar översiktligt ett exempel på olika typer av dammar i ett vattenmagasin i ett älvsystem med tillhörande kraftstation.



Figur 7 En schematisk bild som visar ett älvsystem med dammanläggning med flera typer av dammar i anslutning till vattenmagasinet. Figur från Svenska Kraftnät (2019).

#### *Kraftverk, elproduktion och distribution av el*

Det är stora skillnader mellan olika kraftverk vad gäller utformning, men principen för kraftutvinning är densamma, dvs. att vattnets lägesenergi utnyttjas för elproduktion. Reglerkraftverk är vattenkraftverk som har tillgång till en lagringsfunktion av vatten, antingen direkt i anslutning till kraftverket eller längre uppströms i en annan reservoar, och som därmed kan anpassa energiproduktionen efter behov. Strömkraftverk saknar magasin och utnyttjar uppströms ifrån kommande tillrinning (som kan vara reglerad) om ingen uppströms magasinering finnes styrs produktionen av det naturligt varierande flödet i vattendragen.

Vattnet passerar genom en eller flera vattenturbiner genom vilka mekanisk energi genereras av en roterande turbinaxel. I en generator kopplad till turbinen konverteras sedan den mekaniska energin till elektrisk energi. Elen förs sedan ut på elnätet via transformatorer. Mängden el som produceras i ett vattenkraftverk beror på fallhöjd, flöde genom turbinen och turbinens verkningsgrad.

I de intag som leder till vattenkraftverkens turbiner finns ofta grindar och lodräta galler som ska skydda turbiner och andra känsliga delar i turbingången från drivgods i form av t.ex. stora stenar, träd och annat bråte som en älv kan föra med sig.

Turbinen driver en generator som alstrar el, som leds ut på nätet via kraftverkets transformatorer. I ett vattenkraftverk finns förutom turbiner, generatorer, transformatorer också kontrollrum med styrutrustning för bl.a. turbiner, generatorer, intag och utskov samt diverse hjälpsystem (lokal kraft, pumpar, batterier, ventilation etc.)

#### *Samreglerade system av kraftverk och dammar*

Sveriges vattenkraftverk ingår i samreglerade system med starka hydrologiska kopplingar mellan kraftstationerna. Möjligheterna till reglering beror dels på kraftstationernas tekniska utformning, dels vilka tillstånd som finns för att variera vattenytor i magasinen och flödena i en älv. En annan förutsättning för att kunna reglera i en kraftstation är att man tar hänsyn till förhållanden i uppströms och nedströms liggande stationer med beaktande av vattnets gångtid mellan dem.

Det är viktigt att vara medveten om vattenkraftens plats- och anläggnings-specifika förutsättningar när man diskuterar vattenkraften och dess påverkan av olika klimatfaktorer (se t.ex. Ebinger & Vergara, 2011; Majone m.fl., 2016)<sup>9</sup>. Det handlar om relativt stora skillnader i effekter och konsekvenser beroende på var i landet man befinner sig, regleringsgraden av den specifika älvsträckan, typen av vattenkraftverk (strömkraftverk eller reglerkraftverk), magasinets storlek eller regleringsgrad, den specifika konstruktionen på verken (intagsluckor, turbingångar, turbintyp <sup>10</sup>m.m.), dammarnas och avbördningsanordningarnas utformning, dammsäkerhetsklass och därmed sammanhängande säkerhetskrav samt tillrinningsområdets geologiska och fysiska förutsättningar och förhållanden (exempelvis fjällnära och höglänt terräng eller låglänt skogsmark).

Betydande platsspecifika och geografiska skillnader i mer generella termer vad gäller påverkan av klimatförändringen beskrivs i analysen, däremot ingår inga analyser av enskilda anläggningars förutsättningar (med undantag för den modellering som har gjorts av Ljungan).

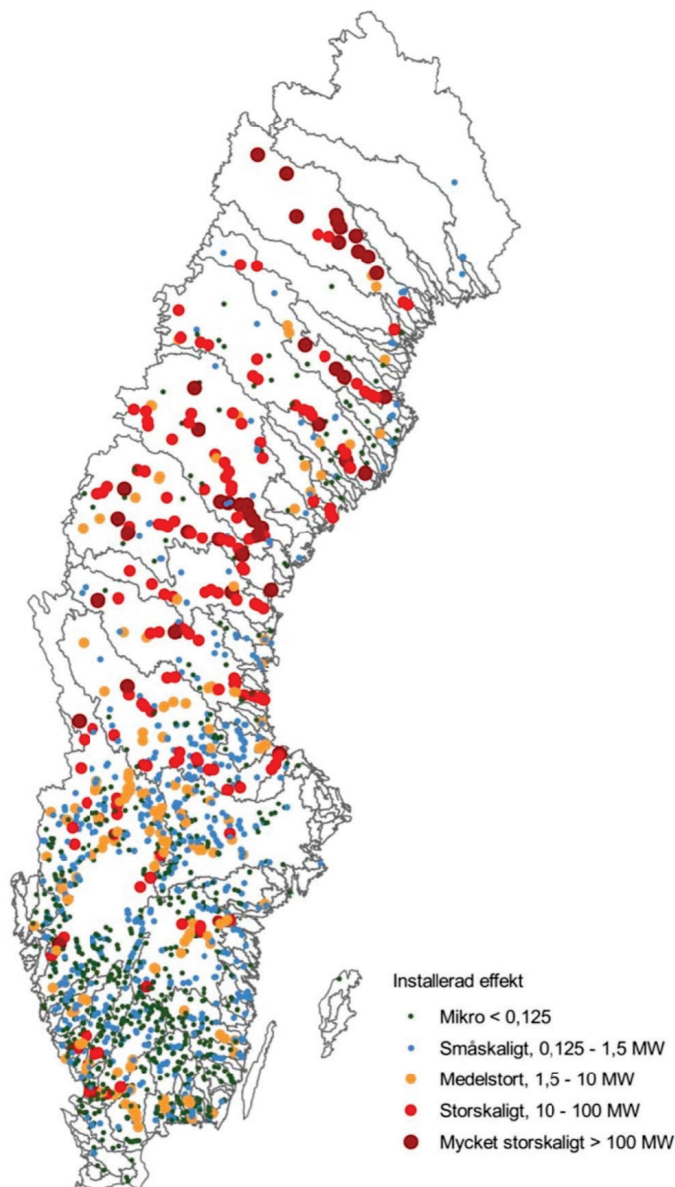
Kartan i Figur 8 visar Sveriges vattenkraftverk utifrån storlek och placering. Som framgår finns de största kraftverken i den norra delen av landet, medan södra Sverige främst hyser små och medelstora kraftverk. Små kraftverk utgörs främst av strömkraftverk med liten magasineringstillgång, medan de stora kraftverken i norr ofta utgörs av reglerkraftverk med tillhörande vattenmagasin.

Det är också viktigt att skilja på om man talar om påverkan på vattenkraftens förutsättningar för att generera el över en längre eller kortare tidsperiod eller momentan effekt. Behovet av balanserande energiproduktion styrs av beteendet i annan produktion (t.ex. vindkraft) och konsumtion. Det kan också finnas platsspecifika variationer (regionalt) av sådant behov beroende på flaskhalsar i elnätet. En klimatfaktor kan således indirekt innebära påverkan på både elproduktions- och effektperspektiv via påverkan på stamnätsfunktioner, vindvariationer eller konsumtion.

<sup>9</sup> Se även det exjobb som genomförts på uppdrag av Fortum: *Local Impacts of Climate Change on Fortum's Hydropower Production* (Thanke Wiberg, 2016).

<sup>10</sup> Det finns tre dominerande typer av turbiner som alla bygger på olika tekniker och därför gör dem lämpliga för olika förhållanden; Kaplan-, Francis- och Pelton-turbiner.

I analyserna ingår påverkan på både elproduktion och effekt.



Figur 8 Vattenkraftverken i Sverige. Källa: Energimyndigheten & Havs- och Vattenmyndigheten (2014).

### 1.5 VATTENKRAFTENS ROLL OCH FÖRUTSÄTTNINGAR I DAGENS OCH FRAMTIDENS ELSYSTEM OCH ETT FÖRÄNDRAT KLIMAT

Syftet med detta avsnitt är att ge en översiktlig beskrivning av vattenkraftens roll och förutsättningar i dagens och framtidens elsystem. I avsnittet beskrivs de främsta faktorerna utöver klimatförändringen som påverkar vattenkraften och dess roll i elsystemet, både vad gäller produktions- och balanseringsbidrag.

Vattenkraften har många uppgifter i det svenska och nordiska elsystemet (NEPP, 2020a). Förutom att den står för omkring hälften av Sveriges elproduktion så utgör

den en snabb effektreserv, används för frekvenshållning och är en planerbar och variabel resurs för att balansera ej styrbar variation i annan produktion och förbrukning av el. Vattenkraften har därmed idag en central funktion för elsystemet som reglerkraft och ger det överlägset största bidraget till kraftsystemets balansering på alla tidsskalor, från sekund till säsong (se t.ex. Kumar m.fl., 2011).

En av de viktigaste omvärldsfaktorerna, som är avhängig utvecklingen och förutsättningarna för elsystemet i stort, är kraftbolagens ekonomiska incitament för att producera el. Det handlar om förändringar i elpriser och prisvolatilitet (se t.ex. Gaudard m.fl., 2016) men också förändringar vad gäller ekonomisk kompensation för tillhandahållande av systemtjänster som styr hur kraftbolagen väljer att köra sina anläggningar.

En annan faktor som delvis sätter vissa randvillkor för vattenkraftproduktionen är begränsningar i elnätet. Det kan till exempel handla om platser med otillräcklig nätkapacitet, tillfälliga störningar vid ombyggnationer av ställverk och installationer av vindkraftsparker eller att en transformator har vissa begränsningar (se t.ex. Kumar m.fl., 2011; Holst & Thanke Wiberg, 2019).

### 1.5.1 Förändrade förutsättningar för vattenkraften

Vattenkraftens centrala roll i det svenska energisystemet vad gäller att reglera och balansera elsystemet, från säsongsskala ner till sekundnivå, gör det svårt att beakta klimatförändringens påverkan på vattenkraften frikopplat från energisystemets framtida utveckling<sup>11</sup>.

Det kan här också vara värt att nämna det faktum att många av Sveriges vattenkraftsstationer byggdes redan på tidigt 1900-tal utifrån helt andra förutsättningar än idag. Som tagits upp i Gode m.fl. (2007) kan de hydrologiska data som legat till grund för vattenkraftutbyggnaden i vissa älvar därför sträcka sig så långt tillbaka som första hälften av 1900-talet. Då dimensioneringsberäkningar för vattenkraftverk och -anläggningar bygger på klimatologisk och hydrologisk statistik kan förändringar i klimatet leda till att förutsättningarna för vattenkraftsystemet förändras. När nu svensk vattenkraft ska omprövas sker det enligt delvis förändrade förutsättningar och det är därför viktigt att utöver elsystemets troliga utveckling även ta hänsyn till förändringar av de klimatologiska förutsättningarna (se t.ex. Gaudard m.fl., 2016; IAEA, 2019).

Elsystemets utveckling med en allt högre andel icke-planerbar elproduktion kommer att innebära att kraven och förväntningarna på vattenkraftens förmåga och betydelse för att kunna balansera systemet kan komma att se radikalt annorlunda ut inom ett eller två decennier (NEPP, 2020b). Framförallt är det vindkraftens framtida utveckling men också hur stort det framtida el- och effektbehovet blir i framtiden som kommer innebära betydande konsekvenser på vattenkraften och dess förutsättningar framöver (se t.ex. Mukheibir, 2013; Gaudard

<sup>11</sup> Det kan också vara värt att påpeka att energisystemets utveckling också delvis är kopplat till klimatförändringarna, genom att nödvändiga klimatåtgärder i samhället ställer nya krav på och skyndar på omställningen av energisystemet.



m.fl., 2016). Som en följd av vindkraftens ökade andel i systemet kommer vattenkraftens betydelse öka framförallt på flerdygsskalan.

Den förväntade utvecklingen av det svenska och nordeuropeiska elsystemet (som i sin tur är påverkat av både klimatåtgärder och klimatanpassningar) innehåller därför faktorer som med stor sannolikhet kommer att ha större påverkan för vattenkraften än den pågående klimatförändringen. En relativt nyligen publicerad studie av vattenkraftens påverkan av klimatförändringen i alregionen av Anghileri m.fl. (2018) har analyserat just detta. Studiens resultat pekar på att energisystemets utveckling kan ha en betydande och i jämförelse med klimatförändringen i sig större påverkan på den framtida vattenkraftsproduktionen. Resultaten från studien visar t.ex. att elprisutvecklingen som en konsekvens av ett förändrat energisystem med en högre andel variabel produktion kan ha upp till sex gånger större påverkan på vattenkraften än klimatförändringen som sådan. Även Schaeffli (2015) och Gaudard m.fl. (2016) lyfter andra faktorer som troligen har större påverkan på vattenkraften jämfört med klimatförändringen, inte minst ur ett investeringsperspektiv.

Detta är viktigt att ha med sig när man analyserar klimatförändringen och dess potentiella konsekvenser för vattenkraften, dvs. vilka behov och krav kommer framtidens elsystem att ställa på vattenkraften? Hur kommer förutsättningarna att se ut för vattenkraften att hantera klimatförändringarnas konsekvenser givet den roll vattenkraften kan komma att fylla i framtiden?

Dessutom finns indirekt påverkan på vattenkraften av förändringar i konsumtionsmönster och annan produktion (som också delvis är en konsekvens av klimatförändringen och åtgärder för att motverka denna), eftersom vattenkraften är den främsta resursen att anpassa till nya behovssituationer i kraftsystemet både på kort och lång sikt.

Nordisk vattenkraft är dock i grunden väl lämpad för att balansera ett elsystem med en stor andel vindkraft. Främst beror detta på förekomsten av stora årsmagasin högt upp i kraftverksälvarna, en viss överkapacitet i en del kraftverk samt vattenkraftens naturligt goda egenskaper för att snabbt ändra produktionen (NEPP, 2016).

En ytterligare viktig aspekt med stor påverkan på vattenkraftens framtida förutsättningar är den förestående omprövningen av Sveriges alla vattenkraftverk i syfte att uppnå moderna miljövillkor, som i grunden handlar om Sveriges åtagande för att uppfylla EU:s Ramdirektiv för vatten<sup>12</sup> (NEPP, 2020). Inför omprövningarna har en nationell plan tagits fram i samverkan mellan Havs- och vattenmyndigheten, Energimyndigheten och Svenska Kraftnät<sup>13</sup>. Planens utgångspunkt är *"en nationell helhetssyn vad gäller att verksamheterna ska förses med moderna miljövillkor på ett samordnat sätt med största möjliga nytta för vattenmiljön och*

<sup>12</sup> Europaparlamentets och rådets direktiv 2000/60/EG av den 23 oktober 2000 om upprättade ram för gemenskapens åtgärder på vattenpolitikens område.

<sup>13</sup> Förslag till nationell plan för omprövning av vattenkraft.

<https://www.havochvatten.se/download/18.1bd43926172bdc4d64881cc1/1593175482312/bilaga-2-nationell-plan-moderna-miljovillkor.pdf>

för nationell effektiv tillgång till vattenkraftsel”<sup>14</sup>. Planen fastslogs av regeringen i juni 2020, och kommer att fungera som underlag och vägledning till verksamhetsutövare och domstolar vad gäller klassificering av vattenförekomster och normsättning. Prövningsprocessen kommer att pågå under de kommande två decennierna och kommer att innebära nya miljöanpassningsåtgärder, vilka i dagsläget är svåra att bedöma konsekvenserna av vad gäller bibehållen produktion och reglerförmåga för vattenkraften.

Som en del i den nationella helhetssynen anges ett nationellt riktvärde för vad som kan anses utgöra ”betydande negativ påverkan på vattenkraftproduktion” när det gäller energimått. Dessutom ska reglerförmågan inte påverkas. Riktvärdet för energi motsvarar det som angavs i den nationella strategin från 2014, dvs. 1,5 TWh<sup>15</sup>, som en vägledning till vattenmyndigheterna. Som en första anpassning till att hantera värdet av vattenkraftens reglerförmåga så är energiriktvärdet fördelat mellan de olika vattendragen, med lägre begränsningar i älvar med stor andel reglerkraftverk. Till exempel ligger begränsningen i Lule älv på 1 % av elproduktionen, i Emån i Småland accepteras en begränsning på 22 %.

Som lyfts i Löfblad (2020) råder det dock i dagsläget oklarheter om hur man ska kunna begränsa produktionsförlusten nationellt till 1,5 TWh givet de miljökvalitetsnormer som beslutades 2019. I det beslut som fastställde de miljökvalitetsnormer som ska gälla vid prövningarna uppskattades produktionsförlusten till mellan 0,6-1,8 TWh. Detta till följd av åtgärder för kraftverk med vattenförekomster som klassas som kraftigt modifierade vatten (KMV). Tillsammans med produktionsförlusten till följd av åtgärder vid alla övriga vattenkraftverk uppgår den totala möjliga förlusten till mellan 1,6-5,3 TWh per år (Löfblad, 2020). Ifall man dessutom genomför högflödesåtgärder för Natura 2000-områden kan produktionsförlusten öka med 1,5 TWh per år, vilket innebär en total möjlig produktionsförlust för vattenkraften på 6,8 TWh per år<sup>16</sup>. Utifrån detta kan man konstatera att konsekvenserna för elproduktion och reglerförmåga av miljökvalitetsnormerna skulle kunna bli betydande och i strid med den nationella strategin och det överenskomna riktvärdet.

Branschen har därför att, förutom energisystemets utveckling i kombination med klimatförändringen och hur denna kommer påverka förutsättningarna för vattenkraften, hantera möjliga förluster av både elproduktion och reglerförmåga (och därmed vattenkraftens flexibilitetsförmåga) genom de miljöprövningar som nu startar. Här behöver både branschen och myndigheter också beakta hur den fortsatta klimatförändringen påverkar vattenmiljön och förutsättningarna för dagens arter kopplade till dessa miljöer.

<sup>14</sup> Här kan även nämnas Vattenkraftens miljöfond som verksamhetsutövare som producerar vattenkraftsel och omfattas av den nationella planen har möjlighet att söka finansiellt stöd från för att uppnå moderna miljövillkor.

<sup>15</sup> Strategin angav ett begränsande planeringsmål för miljöförbättrande åtgärder i vattenkraftverk på nationell nivå, motsvarande att högst 2,3 % av vattenkraftens nuvarande årsproduktion under ett normalår, vilket då motsvarade 1,5 TWh, får tas i anspråk. Därefter har man utgått från 1,5 TWh som gällande (Löfblad, 2020).

<sup>16</sup> I den slutliga samrådsversionen saknas dock bedömningen för Natura-2000-områden, varför det är mycket osäkert hur dessa kommer att hanteras i prövningarna.

## 2 Klimatförändringen

**Ny kunskap om framtida klimatförändringen har tagits fram baserat på klimatscenarier. De klimatparametrar som har störst betydelse ur ett vattenkraftsperspektiv är nederbörd och temperatur. Det är mycket troligt att temperaturen ökar i hela Sverige under alla delar av året. Det är också troligt att nederbörden ökar i hela landet, med ett möjligt undantag för södra Sverige på sommaren. Dock är nederbördens naturliga årsvariabilitet större än klimatsignalen, vilket gör att det är osäkert hur stor förändringen blir.**

Här ger vi en kort generell inledning till hur klimatförändringen under det senaste seklet sett ut och vad som kan förväntas under resten av seklet. Därefter beskrivs de viktigaste väder- och klimatrelaterade faktorerna ur ett vattenkraftsperspektiv.

För mer utförliga beskrivningar och kartor, se projektets rapport om klimatförändringar (Kjellström m.fl., 2021). Resultat från det här forskningsprojektet kommer att användas i SMHIs nya webbaserade klimatscenariotjänst som lanseras 2021. Det rekommenderas att undersöka i vilken grad motsvarande index som finns i den här rapporten har uppdaterats med nyare material.

### 2.1 OM KLIMATSCENARIERNA

Den pågående globala uppvärmningen har gjort att den globala medeltemperaturen idag ökat med nästan 1,2°C jämfört med förindustriell tid (WMO, 2020). Klimatförändringarna märks redan även i Sverige och temperaturökningen här är väsentligt större än den vi ser i det globala medelvärdet. För perioden 1991–2019 jämfört med 1861–1900 har Sveriges medeltemperatur ökat med 1,7°C, motsvarande siffra för den globala medeltemperaturen är 0,8°C. Den globala uppvärmningstakten är nu 0,2°C/årtionde. Vid fortsatt uppvärmning i samma takt kommer den globala temperaturen att överskrida +1,5°C jämfört med förindustriell tid någon gång mellan 2030 och 2052 och +2°C ytterligare 20–30 år senare (IPCC, 2018).

Hur stor uppvärmningen faktiskt blir, särskilt i ett tidsperspektiv på mer än 30 år, beror på framtidens utsläpp av växthusgaser och på klimatsystemets känslighet. Större utsläpp ger större uppvärmning och betyder att en viss uppvärmningsnivå nås snabbare än med mindre utsläpp. Beroende på hur stora utsläppen blir kan den globala uppvärmningen i slutet av seklet hamna på 1,5–5°C (IPCC, 2013; IPCC, 2018).

Den här rapporten fokuserar på +1,5°C och +2°C jämfört med förindustriell tid. Vi har också analyserat ytterligare uppvärmningsnivåer: +2,5°C, +3°C, +3,5°C och +4°C. Resultaten visar att klimatförändringssignaler blir större vid högre uppvärmningsnivåer. Detta medför generellt mer omfattande konsekvenser. I vissa fall kan konsekvensernas natur ändras vid högre uppvärmningsnivåer.

Både de observerade och de simulerade temperaturförändringarna för framtiden är generellt större över kontinenterna än över haven och allra störst är den i Arktis där minskad utbredning av snö och is förstärker förändringarna och leder till ännu högre temperaturökning. Sveriges nordliga läge, med snö och is under vinterhalvåret, gör att klimatförändringen redan är högst märkbar här. Generellt väntar vi oss därför fortsatt ökad medeltemperatur främst för vinterhalvåret men även under sommaren. Särskilt väntas vintersäsongen bli kortare och sommaren längre vilket är något som redan nu har observerats.

Även nederbörds klimatet ändras när den globala medeltemperaturen ökar. Eftersom högre temperatur betyder att luften kan innehålla mer vattenånga sker större avdunstning från hav, sjöar och vattendrag men också från fuktiga markytor och vegetation. Mer vatten i kretsloppet betyder också mer nederbörd vilket för Sveriges del innebär ökad nederbörd främst under vinterhalvåret, då med ökat inslag av regn och mindre snöfall i allmänhet. Även under sommaren pekar scenarierna generellt på ökad nederbörd men eftersom sommarnederbörden väntas minska längre söderut över Europa är det mer osäkert om huruvida det kommer att bli en nederbördsökning eller inte i de södra delarna av landet. Den större avdunstningen i ett varmare klimat leder också till ökad risk för torrare markförhållanden, särskilt under nederbördsfattiga år.

Sveriges klimat är präglad av en mycket stor variabilitet mellan varma och kalla år och mellan mer eller mindre nederbördsrika år. Den typen av variabilitet som vi observerar idag har funnits även tidigare och väntas också finnas kvar i ett framtida varmare klimat med förskjutningar mot allt varmare förhållanden och med ändringar i nederbörd enligt ovan. Många av förändringarna som är att vänta påverkar inte bara medelvärden över längre perioder som år, säsong eller månad utan kan också påverka kortare förlopp som till exempel ändrad intensitet hos kortvariga skyfall. Det här gör att många väderrelaterade extremer också förväntas ändras i ett varmare klimat. Några exempel är: ökad risk för intensiva skyfall och ökad nederbörd i samband med frontsystem och lågtryck, ökad risk för värmeböljor och höga temperaturer, minskad risk för köldknäppar och låga temperaturer.

Klimatinformationen i den här rapporten baseras på resultat från simuleringar med ett stort antal regionala klimatmodeller från EURO-CORDEX (Jacob et al., 2014) där beräkningarna har gjorts på ett beräkningsgrid med 12,5x12,5 km horisontell upplösning för Europa och stora delar av Nordatlanten. De regionala modellerna har tagit drivdata från ett antal globala klimatmodeller från CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project) som ligger till grund för mycket av resultaten bakom FN:s klimatpanels femte utvärderingsrapport (IPCC, 2013). Sammanlagt har en ensemble om upp till 65 klimatsimuleringar använts för analyserna. För vissa undersökta index har materialet varit begränsat till dryga 10-talet simuleringar då data från flera modeller saknats. Syftet med att inkludera många modeller och simuleringar är att på ett systematiskt sätt kunna beskriva några av de källor till osäkerhet som finns vad gäller framtida klimatförändringar.

För att identifiera vid vilken tidpunkt olika uppvärmningsnivåer nås har vi använt den globala medeltemperaturen i de globala klimatmodellerna. Där beräknar vi först löpande 30-årsmedelvärden och identifierar sedan den första 30-årsperiod

varvid temperaturökningen når upp till de olika uppvärmningsnivåerna i förhållande till 1861–1890. På så sätt kan vi jämföra delvis olika tidsperioder från olika klimatmodeller eftersom den globala uppvärmningen är samma i båda. I projektet har vi använt 1971–2000 som referensperiod mot vilket vi jämför de olika uppvärmningsnivåerna. Eftersom vi nu omkring 2020 redan är på god väg mot +1,5°C och på sikt +2°C har en del av de klimatförändringssignaler vi presenterar redan inträffat. För +1,5°C-nivån handlar det om drygt 60% och för +2°C-nivån drygt 40%. Dessa mått skall ses som en grov uppskattning av hur stor del av den förväntade klimatförändringssignalen som vi redan har upplevt. Den globala medeltemperaturen är olika i början respektive slutet av 30-årsperioderna för respektive +1,5°C och +2°C vilket betyder att de analyserade perioderna som regel inte är beskrivningar av ett stationärt klimat.

I arbetet har vi tagit fram information för olika väder- och klimatrelaterade faktorer. Eftersom dessa är mer eller mindre komplexa har modellerna olika möjlighet att beskriva dem med olika detaljgrad. Vi har därför använt en rad olika variabler från modellerna som representerar värden för t ex temperatur, nederbörd eller luftfuktighet. Utifrån variablernas värde på dygnsbasis har vi beräknat en rad klimatindex. Dessa kan vara antingen enkla medelvärden motsvarande max- eller minvärde för variabeln i fråga. Det kan också vara frågan om mer komplicerade index som t ex hur många dagar i följd temperaturen varit över en viss nivå, eller hur många dagar på året som det finns snö på marken. Klimatindexen beskrivs i detalj i (Kjellström m.fl., 2021). För en del väder- och klimatrelaterade faktorer finns inga klimatindex som direkt kan svara på frågan om hur klimatförändringen kan påverka energisystemet. I sådana fall har vi gjort bedömningar genom att väga samman flera index. T ex kan kombinationen av klimatindex för "effektiv nederbörd" (nederbörd minus avdunstning), "längsta torrperiod" (antal dagar utan nederbörd) och "värmebölja" (antal varma dagar i följd) användas för att beskriva torka och därigenom diskutera risken för skogsbränder.

Klimatindexen presenteras i kartor och diagram. Kartor har tagits fram för hela Europa och hela Skandinavien där fördelningen visas för varje enskild 12,5x12,5 km<sup>2</sup> gridruta i modellerna och dels specifikt för Sverige i de av SMHI använda väderprognosdistrikten. Väderprognosdistrikten har valts eftersom de motsvarar regioner i Sverige med olika väder och klimat som till exempel skillnader mellan västra och östra Götaland i söder vilket till stor del påverkas av Sydsvenska höglandet och skillnader mellan fjälltrakter, inland och kusttrakter i Norrland. Utöver de 15 traditionella prognosdistrikten har vi också tagit fram data för själva kustzonen uppdelat på tre delar samt för de stora sjöarna.

Figurerna visar simulerade klimatförhållanden under en referensperiod, satt till 1971–2000, och vid olika uppvärmningsnivåer, samt skillnaden mellan framtida uppvärmningsnivåer och 1971–2000. Utöver förändring i ensemblemedelvärde visar vi också på spridningen inom ensemblen definierad som interkvartilavståndet (IQR) mellan 25- och 75-percentilerna. Spridningen i resultat mellan enskilda år för de olika simuleringarna skiljer sig mellan olika modeller. Modellerna uppvisar delvis olika klimat och klimatförändringssignal, både vad gäller absolutvärden och spridning mellan åren.

När vi sammanställer resultaten har vi använt följande terminologi:

- "mycket troligt" i vilket vi lägger att det finns en entydig signal och att bedömningen görs baserat på ett stort antal projektioner
- "troligt" där vi ser en relativt entydig signal baserat på relativt många projektioner
- "mindre troligt" där vi ser en liten signal baserat på många projektioner
- "osäkert" där vi antingen ser olika signaler eller har bara ett fåtal projektioner att tillgå.

I alla fyra fallen kan också annan information utöver de EURO-CORDEX-simuleringar som beskrivs här användas för att bedöma huruvida en viss förändring är trolig eller ej.

## 2.2 KLIMATSCENARIER FÖR VATTENKRAFTEN

Inom ramen för detta projekt har en mängd olika väder- och klimatrelaterade faktorer, vars förändringar har potential att påverka vattenkraftens förutsättningar, identifierats. I detta avsnitt beskrivs översiktligt de viktigaste klimatfaktorerna för vattenkraften. I avsnitt 3 beskrivs kortfattat även övriga väder- och klimatrelaterade faktorer som har ingått i konsekvensbedömningen av klimatförändringarnas påverkan på vattenkraften inklusive dammsäkerhet.

### 2.2.1 Kort om tillrinning och kopplingen till nederbörd

Regn och smältvatten från snö som rinner genom ett markområde kallas avrinning. Avrinningens storlek bestäms av nederbördens storlek och av hur mycket vatten som lagras i området eller avdunstar till atmosfären från våta ytor och/eller genom växtlighetens transpiration. Den specifika avrinningen, dvs. avrinning per ytenhet är ett mått på den långsiktiga vattentillgången i området. Tillrinningen är det vatten (den del av avrinningen) som rinner in till en sjö eller vattendrag.

Enligt Bergström m.fl. (2007) utgörs de mest betydelsefulla hydrologiska systemen av glaciärer, snötäckens utbredning och storlek, sjöar, vattendrag, markfuktighet och grundvatten. Tillrinningen varierar under året och mellan år beroende på samspel och variation i nederbörd, temperatur, snötäcke, markfuktighet och avdunstning. Beroende på om nederbörden faller som snö eller regn har stor påverkan på tillrinningen.

Som beskrivs inledningsvis i denna rapport har detta projekt förlitat sig på redan tillgängligt material om framtidens klimat, baserat på atmosfäriska klimatmodeller. Ingen klimatmodellering har gjorts inom projektet utan SMHI har utgått från de modellresultat som SMHI har haft tillgängliga utifrån tidigare modellberäkningar. Kompletterande hydrologisk modellering i stor skala skulle kräva resurser som inte funnits inom projektet.

Bristen på hydrologisk modellering, och därför direkta beräkningar av till exempel tillrinning och flöden, har gjort att vi istället har fått förlita oss på de resultat som kommer från de atmosfäriska modellerna. Nederbörd och avdunstning är väl beskrivet i modellerna och kan användas som en indikation på hur flöden i vattendrag kan förändras, men ger ingen direkt bild av tillrinning. Även i de

atmosfäriska modellerna finns dock data om nettoavrinningen. Nettoavrinningen i de atmosfäriska modellerna är förenklad jämfört med i de hydrologiska modellerna, men ger en indikation på vattentillgången. Överlag visar de atmosfäriska modellerna endast små förändringar i nettoavrinningen (mm/dag) vid +2 graders uppvärmning. Hur mellanårsvariationen ser ut är också osäkert. Det finns en tendens till att nettoavrinningen minskar i norr och ökar i söder, men förändringarna är små och därför relativt osäkra.

Det finns även vissa slutsatser som kan dras av fluktuationer i sjönivåer mellan vinter och sommar kopplat till nederbörd. Enligt Eklund m.fl. (2018) väntas större fluktuationer mellan årstiderna på grund av det större förväntade inslaget av regn under vinterhalvåret samtidigt som avdunstningen under sommaren ser ut att öka. En större mellanårsvariation i temperaturklimatet kan påverka avdunstningen och därmed avrinningen, vilket i sin tur kan leda till ytterligare ökade fluktuationer mellan torra och nederbördsrika år.

### 2.2.2 De viktigaste väder- och klimatrelaterade faktorerna ur ett vattenkraftsperspektiv: nederbörd och temperatur

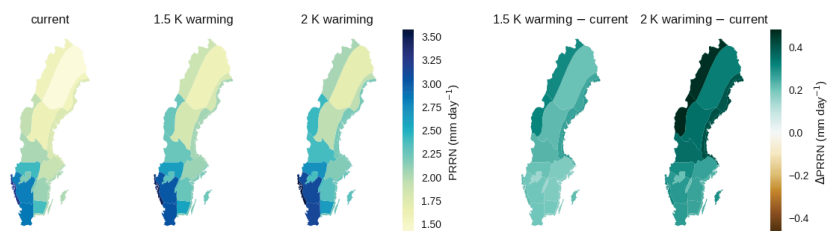
De främsta hydro-meteorologiska klimatvariablerna av vikt för vattenkraften är:

- Nederbörd (i detta projekt alltså ett indirekt mått på tillrinning)
- Temperatur

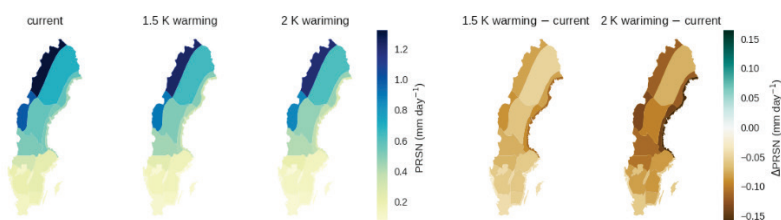
Vattenkraften är naturligtvis i hög grad beroende av nederbörd, både summerad nederbörd och hur nederbörden fördelar sig mellan årstider och mellan dagar, antal dagar med snöfall, nederbördsrika perioder, ojämn nederbörd i tid och rum samt nederbördsrika vintrar (se t.ex. Bonjean Stanton m.fl., 2016; IAEA, 2019). Nederbördssumman påverkar till exempel hur och när vattenmagasinen fylls, medan extrem nederbörd har konsekvenser för infrastruktur och drift.

Klimatparametrarna nederbörd och temperatur hänger delvis ihop vad gäller påverkan på vattenkraften eftersom temperaturen avgör om nederbörden faller som regn eller snö, men också påverkar avdunstningen och om det uppstår isbildning.

Generellt beräknas årsnederbörden öka över hela året i hela Sverige (Figur 8), med vissa regionala och geografiska skillnader, samtidigt som antalet dagar med snöfall minskar (Figur 9). I södra Sverige är sommaren blötast, i fjällen ger vintern mest nederbörd. Detta mönster beräknas bestå även i ett förändrat klimat. Störst är ökningen i nederbörd i norra Sverige på vintern, minst i sydöstra Sverige på sommaren (där förändringen är nära noll). Nederbördsförändringen är dock relativt liten (ca 5 %) jämfört med naturliga variationer, varför trenden kan övertrumfas av naturliga variationer. Det tydligaste undantaget utgörs av delar av södra Sverige där ökningen i nederbörd inte så stor, och där avdunstningen under sommaren kan bli större och därmed ge torra.

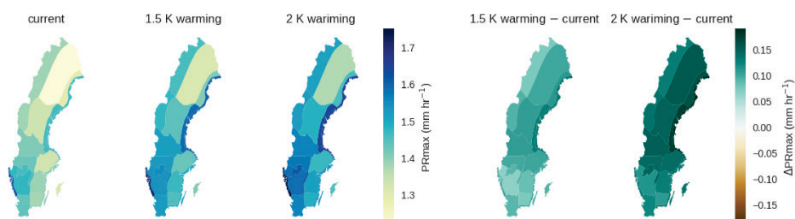


**Figur 9 Medelnederbörd som regn** (PRRN och mm/dag, helår). Kartorna till vänster visar förhållandena i referensperiodens klimat (1971-2000) samt vid tidpunkten då den globala uppvärmningen jämfört med förindustriell tid når 1,5°C resp. 2°C. Figurerna till höger visar klimatförändringssignalen mellan referensperiodens klimat respektive vid 1,5°C och 2°C uppvärmning jämfört med förindustriell tid.

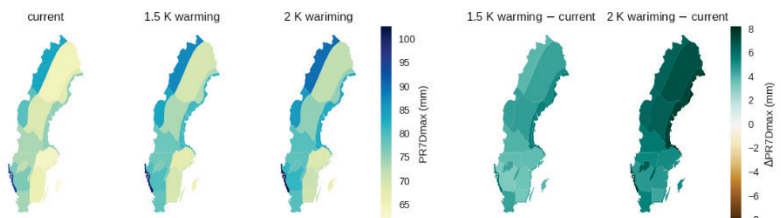


**Figur 10 Medelnederbörd som snö** (PRSN och mm/dag, helår). Kartorna till vänster visar förhållandena i referensperiodens klimat (1971-2000) samt vid tidpunkten då den globala uppvärmningen jämfört med förindustriell tid når 1,5°C resp. 2°C. Figurerna till höger visar klimatförändringssignalen mellan referensperiodens klimat respektive vid 1,5°C och 2°C uppvärmning jämfört med förindustriell tid.

Även maximal nederbörd (Figur 10 visar extrem nederbördsintensitet) och antalet dagar med kraftig nederbörd (Figur 11 visar högsta nederbörd under 7 dagar) beräknas öka i hela Sverige.



**Figur 11 Extrem nederbördsintensitet** (PRmax, mm/timme). Kartorna till vänster visar förhållandena i referensperiodens klimat (1971-2000) samt vid tidpunkten då den globala uppvärmningen jämfört med förindustriell tid når 1,5°C resp. 2°C. Figurerna till höger visar klimatförändringssignalen mellan referensperiodens klimat respektive vid 1,5°C och 2°C uppvärmning jämfört med förindustriell tid.



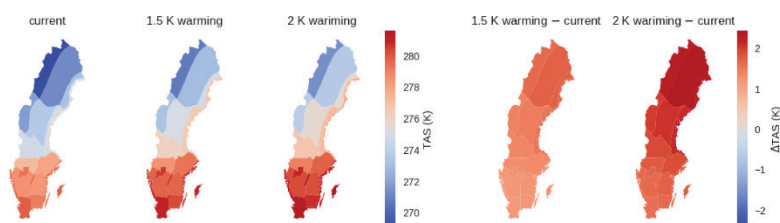
**Figur 12 Högsta nederbörd under 7 dagar** (PR7Dmax, mm). Kartorna till vänster visar förhållandena i referensperiodens klimat (1971-2000) samt vid tidpunkten då den globala uppvärmningen jämfört med förindustriell tid når 1,5°C resp. 2°C. Figurerna till höger visar klimatförändringssignalen mellan referensperiodens klimat respektive vid 1,5°C och 2°C uppvärmning jämfört med förindustriell tid.



Det kan också bli fler och längre nederbördsrika perioder, till exempel i form av blötare vintrar. Variabiliteten i nederbörd är stor, vilket gör att det finns en osäkerhet om hur stor förändringen blir. Signalen blir tydligare med en global temperaturökning på mer än +2 grader.

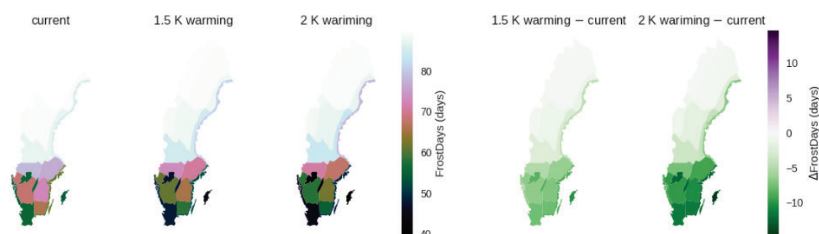
Vid högre uppvärmningsnivåer (+3°C och däröver) kan risken för torka komma att öka, särskilt under nederbördsfattiga somrar till följd av högre avdunstning vid ökade temperaturer. Vid lägre uppvärmningsnivåer (+1,5°C och +2°C uppvärmning) syns dock ingen förändring vad gäller risk för torka.

Även temperaturen beräknas öka i hela landet och det kommer att bli varmare under alla årstider (Figur 12). Den största förändringen syns i norra Sverige på vintern, där uppvärmningen blir som allra störst. Ett varmare klimat betyder allmänt att de kalla dagarna blir färre och att en större andel av nederbörden faller som regn, snösäsongen förkortas också. Antalet längre värmeböljor förväntas öka i hela landet, minimitemperaturer ökar mest i norr medan maxtemperaturer ökar mest i sydost. Uppvärmningen förstärks till följd av mindre snö och is.

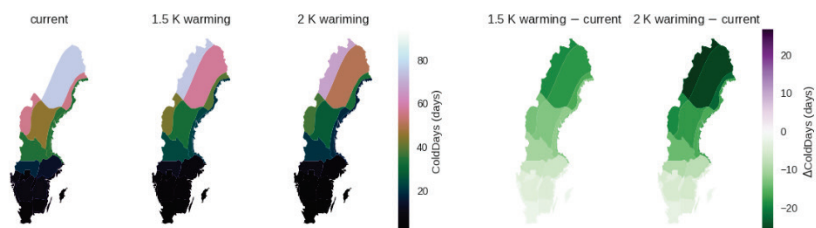


**Figur 13 Årsmedeltemperatur.** Kartorna till vänster visar förhållandena i referensperiodens klimat (1971-2000) samt vid tidpunkten då den globala uppvärmningen jämfört med förindustriell tid når 1,5°C resp. 2°C. Figurerna till höger visar klimatförändringssignalen mellan referensperiodens klimat respektive vid 1,5°C och 2°C uppvärmning jämfört med förindustriell tid.

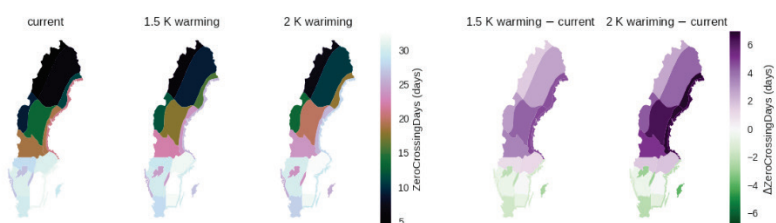
Generellt blir det mer uttalade varma extremer och mindre uttalade kalla extremer. Problem med nedisning blir generellt mindre eftersom antalet frostdagar förväntas minska, men problemet flyttas också norrut, när klimatzonerna förskjuts (Figur 12 och Figur 13). Dagar med nollgenomgångar ökar i norr under vinterhalvåret men minskar i övrigt (Figur 14).



**Figur 14 Antal frostdagar** (då minimitemperaturen < 0°C). Kartorna till vänster visar förhållandena i referensperiodens klimat (1971-2000) samt vid tidpunkten då den globala uppvärmningen jämfört med förindustriell tid når 1,5°C resp. 2°C. Figurerna till höger visar klimatförändringssignalen mellan referensperiodens klimat respektive vid 1,5°C och 2°C uppvärmning jämfört med förindustriell tid.



**Figur 15 Antal dagar då minimitemperaturen < -7°C.** Kartorna till vänster visar förhållandena i referensperiodens klimat (1971-2000) samt vid tidpunkten då den globala uppvärmningen jämfört med förindustriell tid når 1,5°C resp. 2°C. Figurerna till höger visar klimatförändringssignalen mellan referensperiodens klimat respektive vid 1,5°C och 2°C uppvärmning jämfört med förindustriell tid.



**Figur 16 Antal dagar med nollgenomgångar** under vintermånaderna (DJF). Kartorna till vänster visar förhållandena i referensperiodens klimat (1971-2000) samt vid tidpunkten då den globala uppvärmningen jämfört med förindustriell tid når 1,5°C resp. 2°C. Figurerna till höger visar klimatförändringssignalen mellan referensperiodens klimat respektive vid 1,5°C och 2°C uppvärmning jämfört med förindustriell tid.

Sammanfattningsvis, bedöms sannolikheten stor för att de klimatfaktorer som påverkar de möjliga konsekvenserna kopplat till vattenkraft kommer att förändras, dvs. det bedöms som troligt eller mycket troligt. Denna bedömning baseras på en analys av klimatmodelleringen som beskrivs i Kjellström m.fl. (2021).

### 3 Konsekvenser och risker för vattenkraften utifrån ett klimatförändringsperspektiv

**Klimatförändringen kan påverka vattenkraften på ett antal olika sätt. I detta kapitel beskrivs och diskuteras konsekvenser av klimatförändringen på vattenkraften.**

Vattenkraften är ett väderberoende kraftslag som i hög grad påverkas av dagens och framtida klimat. Förändringar i nederbörd och temperatur leder till en förändrad tillrinning och därmed förändrade förutsättningar för elproduktion och reglerförmåga på olika tidsskalor (se t.ex. Hamududu & Killingtveit, 2012; François m.fl., 2014; Gaudard m.fl.; 2016; EEA, 2019; IAEA, 2019). I jämförelse med andra energislag är det för vattenkraften dock svårare att dra generella slutsatser om klimatförändringens konsekvenser (se t.ex. Hamududu & Killingtveit, 2010; Schaepli, 2015). Detta beror dels på de enskilda kraftverkens och dammarnas mycket plats- och anläggningsspecifika förutsättningar, dels på att vattenkraften är starkt beroende av och påverkat av resten av el- och energisystemet (se t.ex. Gaudard m.fl., 2016).

Inom projektet har en rad potentiella konsekvenser på vattenkraften till följd av klimatförändringen diskuterats. I detta avsnitt beskrivs och diskuteras konsekvenserna sorterat efter de olika väder- och klimatrelaterade faktorer som påverkar vattenkraften i ett produktionsperspektiv och som har identifierats i diskussionerna i arbetsgruppen (se metodavsnitt i kapitel 1). En del konsekvenser har lagts större vikt vid under diskussionerna med arbetsgruppen, andra har endast berörts och beskrivs mer översiktligt.

Under varje avsnitt beskrivs först hur de väder- och klimatrelaterade faktorerna förändras på grund av den globala uppvärmningen utifrån vad klimatmodellerna visar. Därefter beskrivs och diskuteras de potentiella konsekvenserna.

Som beskrivs i metodavsnittet baseras bedömningen av varje potentiell konsekvens främst på de diskussioner och omröstningar som genomfördes under den sista workshopen i arbetsgruppen. Under workshopen fick deltagarna rösta på i vilken grad konsekvensen anses kunna bli betydande eller inte utifrån en sannolikhetsbedömning: *ej troligt, mindre troligt, troligt och mycket troligt*.

I Tabell 1 ges en översiktlig beskrivning av vilka konsekvenser som har diskuterats i projektet och som beskrivs i föreliggande kapitel.

Tabell 1 En översiktlig beskrivning av delstudiens omfattning med avseende på klimatförändringens konsekvenser för vattenkraften utifrån de väder- och klimatrelaterade faktorer och index som valdes ut i diskussion med arbetsgruppen.

Klimatfaktor/Index	Förändringens påverkan på eller uppkomst av	Beskrivning av potentiell konsekvens
<b>Nederbörd</b>		
Ökad nederbörd (tillrinning)	Elproduktionen	En förändrad tillrinning över året (årsnederbörd) kan påverka den totala elproduktionen (TWh)
Förändrad årsdynamik (säsongsmönster)	Elproduktionen	Förändrade säsongsmönster i nederbörden och tillrinningen i form av mindre snö och tidigare avsmältning (mindre och tidigare vårflood) kan ge en jämnare årscykel.
Förändrad årsdynamik (säsongsmönster)	Vattenkraftens flexibilitetsförmåga	Förändrade säsongsmönster i nederbörden och tillrinningen i form av mindre snö och tidigare avsmältning (dvs. vårflood) kan påverka möjligheterna till effektreglering.
Extrem nederbörd	Spill	Perioder med höga flöden på grund av kraftig nederbörd och hög avsmältning kan innebära att vatten behöver spillas i större utsträckning.
Skyfall	Anläggningar och produktionsförutsättningar	Kraftig nederbörd kan påverka risken för ras/skred längs med älvkanter som kan öka mängden drivgods med skador på anläggningar samt produktionspåverkan genom driftstopp.
<b>Torka</b>		
	Elproduktionen	Längre perioder av torka kan leda till minskad elproduktion.
	Vattenkraftens flexibilitetsförmåga	Längre perioder av torka kan minska möjligheterna till effektreglering.
	Uppfyllande av miljövillkor	Längre perioder av torka kan försvåra möjligheter att uppfylla miljövillkor i form av t.ex. min-tappning.

	Vattenbrist	Längre perioder av torka kan leda till ökad konkurrens om vatten som en resurs.
<b>Is</b>		
<b>Isdämning</b>	Vattenkraftens körsätt (effektreglering)	Ökad risk för isdämning påverkar hur vattenkraften kan köras (och därmed reglerförmågan).
<b>Isdämning</b>	Fallförluster	Isdämning i älvsträckor kan orsaka förhöjning av vattenståndet vilket kan leda till minskad fallhöjd som innebär produktionsförlust.
<b>Kravis</b>	Driftstopp	Kravis kan täppa till grindar vilket leder till att aggregaten måste stängas av (leder till spill och produktionsförlust).
<b>Isbildning</b>	Skador på anläggningar	En ökad frekvens av is ökar risk för skador på anläggningar och dammar.
<b>Isbildning</b>	Tillgänglighet till anläggningar	En ökad risk för halka kan påverka säkerheten vid anläggningarna för personalen samt tillgängligheten på tillfartsvägar.
<b>Vattentemperatur</b>		
<b>Ökad vattentemperatur</b>	Ökad frekvens av invasiva arter	Förändrade vattentemperaturer kan öka frekvensen av invasiva arter som kan påverka på anläggningar och innebära en ökad underhållsfrekvens.
<b>Ökad vattentemperatur</b>	Ökade krav på miljöanpassningsåtgärder för kallevande arter (i reglerade älvar)	Förändrade vattentemperaturer kan innebära ökade krav på miljöanpassningsåtgärder i form av vandringsvägar för kallevande arter.
<b>Skogsbrand</b>		
	Tillgänglighet till anläggningar och dammar	Skogsbränder kan försvåra tillgängligheten till anläggningar och dammar.
	Drivgods	Skogsbränder kan öka mängden drivgods i vattendragen vilket kan skada anläggningar genom att drivgods sätter igen grindar och intagsluckor.

	Behov av släckvatten	Skogsbränder kan innebära att magasin behövs för brandbekämpning vilket skulle innebära minskad elproduktion och möjlighet till effektreglering.
<b>Stormar</b>		
	Tillgänglighet och strömbortfall	Stormar kan påverka tillgängligheten till och skador på anläggningar.
<b>Åska</b>		
	Strömbortfall	Åska kan orsaka strömbortfall vilket kan innebära säkerhetsrisker.

### 3.1 KONSEKVENSER AV ÖKAD ÅRSNEDERBÖRD

#### 3.1.1 SMHI:s bedömning av framtida klimat

**Bedömning:** *Nederbörden ökar i hela landet, med regionala och geografiska skillnader. Störst är ökningen i norra Sverige på vintern, minst i sydöstra Sverige på sommaren (där förändringen är nära noll). Nederbördsförändringen är liten (ca 5%) jämfört med naturliga variationer. Trenden övertrumpas lätt av naturliga variationer.*

**Sannolikhet:** *Troligt*

Nederbörden i Sverige beräknas öka på alla skalor, från årsmedelnederbörd till extrem korttidsnederbörd, med regionala och geografiska skillnader.

Förändringssignalen är tydligast för extrem nederbörd. Den maximala nederbörden beräknas öka och likaså antalet dagar med kraftig nederbörd. Extrem korttidsnederbörd bidrar inte så mycket till flödet eftersom skyfall är både kortvariga och lokala. Även om det regnar kraftigt på en plats så blir inte nödvändigtvis summan av nederbörden över ett avrinningsområde stor. Avgörande för flödet är istället kraftig nederbörd (som regn) över längre tid och större område. Den maximala sjudygnsnederbörden är ett sådant index eftersom långvarig nederbörd oftare är förknippad med storskaliga nederbördsområden snarare än lokala skurar. Även denna beräknas öka.

Att nederbörden beräknas öka betyder att det är troligt att också flödena ökar. Att en större del av nederbörden faller som regn istället för snö gör att flödena ökar på höst och vinter, men kanske minskar på våren eftersom snösmältningen blir svagare. Den exakta fördelningen är starkt beroende på var i landet man befinner sig. Även om den extrema korttidsnederbörden inte påverkar flöden så mycket så kan problem förknippade med extrem nederbörd och höga flöden bli vanligare eftersom båda dessa beräknas öka. Bedömningen får anses som osäker eftersom ingen beräkning av kombinationen av dessa har gjorts, och eftersom detta bara baseras på atmosfäriska modeller.

#### 3.1.2 Beskrivning av möjliga konsekvenser

En ökad nederbörd sett över hela året skulle teoretiskt sett kunna innebära en ökad tillrinning och därmed en möjlighet till en ökad mängd producerad el från vattenkraften (TWh).

Det finns ett flertal studier som pekar på hur klimatförändringen kan leda till betydande förändringar i avrinningen i Europa med konsekvenser för den framtida vattenkraftspotentialen (se t.ex. Hamududu & Killingtveit, 2012; François m.fl., 2014; Gaudard m.fl., 2016). Det handlar dock främst om stora konsekvenser på regional och lokal nivå, där man ser stora skillnader mellan och inom olika regioner (se t.ex. Lehner m.fl., 2005; Kumar m.fl., 2011; Hamududu & Killingtveit, 2010; Kumar m.fl., 2011; Hamududu & Killingtveit, 2012; Berga, 2016). Den generella trenden är att de norra delarna av Europa ser en ökad potential för vattenkraftsproduktion, medan tendensen är den motsatta i de södra och östra delarna av Europa inklusive Alpregionen (se t.ex. Farinotti m.fl., 2011; Vliet m.fl., 2013; Bonjean Stanton m.fl., 2016; Anghileri m.fl., 2018; EEA, 2019; IAEA, 2019).

För svensk del mer specifikt visade analyserna i Gode m.fl. (2007) på en ökad produktionspotential på 2-10 % för vattenkraftsstationer från Dalälven och norrut. Denna ökning avsåg tidsperspektivet 2011-2040 jämfört med referensperioden 1961-1990. För de södra delarna av landet pekade analyserna på att produktionspotentialen snarare kan minska, även om det var större osäkerhet i resultaten. Analyserna baseras på hur tillrinningen kommer att förändras vid ett antal olika klimatscenarier. I studien drogs dock slutsatsen att produktionspotentialen för Sverige totalt bedöms öka, eftersom omkring 80 % av vattenkraftselen produceras i de norra delarna av landet.

Även i Klimat- och sårbarhetsutredningen från 2007 (SOU, 2007) pekade man på en ökad produktionspotential för landets stora älvar (tillrinning uttryckt i energi för tidsperioden 2071-2100 relativt 1961-1990) på ca 15-20 %. Slutsatsen som dras i utredningen är att den förväntade ökningen i tillrinning skapar mycket goda förutsättningar för en successivt ökad vattenkraftproduktion med ökade intäkter för vattenkraftsföretagen. En viktig kommentar här är dock att vindkraften då endast stod för en mycket liten andel av elsystemet. Sedan dess har det skett en kraftig utveckling av vindkraften som idag utgör en betydande andel av elsystemet. Det senare har stor betydelse för värdet för vattenkraften och att vi idag har en förskjutning mot effekthöjningar och flexibilitetsförmåga i vattenkraftssystemet snarare än investeringar i ökad elproduktion (se t.ex. Gaudard m.fl., 2016). I detta projekt har vi därför inte kunnat styrka att denna slutsats om en stor produktionspotentialökning i framtiden är robust eftersom omvärldsförutsättningarna för vattenkraften ser helt annorlunda ut idag och framöver.

Det finns en rad faktorer som avgör huruvida befintlig vattenkraft i Sverige kan tillgodogöra sig framtidens möjliga ökade nederbörds mängder och tillrinning. Eftersom kraftverk är optimerade för specifik drivvattenföring eller driftsintervall är det främst regleringsgraden<sup>17</sup> som påverkas om tillrinningen ökar eller minskar. Huruvida vattenkraften kommer producera mer el är beror också på hur elsystemets behov av flexibilitet ser ut (se t.ex. Energimyndigheten, 2014). En ökad tillrinning och ökad elproduktion kan samtidigt innebära en minskad möjlighet till reglerförmåga.

Möjligheten att lagra mer vatten i magasinen beror också under vilken säsong nederbörden kommer. Om tillrinningen ökar under säsonger med god vattentillgång och även överstiger magasineringsförmågan, resulterar ökad tillrinning typiskt i spill snarare än ökad produktion (se t.ex. Energimyndigheten, 2014; Ebinger & Vergara, 2011)<sup>18</sup>. Uppskattningsvis kan idag ungefär hälften av den producerad vattenkraftsenergin i Sverige tillgodogöras tack vare lagringsmöjligheterna i de stora årsmagasinen (Energimyndigheten, 2014).

<sup>17</sup> Regleringsgraden avser andelen av den totala årsvattenföringen som kan lagras i alla uppströms magasin/sjöar (SMHI Vattenwebb).

<sup>18</sup> Spill är det vatten som släpps från en dammanläggning. Vattnet spills antingen på grund av dammsäkerhetsmässiga skäl och att flödet i vattendraget överskrider kraftverkets slukförmåga eller för att tillgodose en fastställd minimivattenföring i naturfåran nedströms dammen. Spill uppstår då det råder brist på avsättningskapacitet vid tillfällen då elenergin inte har någonstans att ta vägen (dvs. då det finns ett överskott på el). Att spilla vatten kan likställas med att spilla pengar. Spill kan undvikas genom säsongsplanering, men likväl kommer det uppstå situationer då spill blir oundvikligt.



Eftersom vi i detta projekt har utgått från nederbörd som en indikation på en förändrad tillrinning i olika klimatscenarier är det dock viktigt att ha i åtanke att en ökad nederbörd inte alltid leder till ökad vattentillgång. Vid ett varmare klimat ökar även avdunstningen samtidigt som en förlängd växtsäsong innebär att en viss del av den ökade tillrinningen fångas upp av växtligheten istället för att rinna ut i vattendragen.

### 3.1.3 Konsekvensbedömning

Vid diskussionerna i arbetsgruppen lyftes risken för att vattenkraften i framtiden kanske inte kommer att kunna producera lika mycket el under året, eftersom den även har många andra behov att fylla. Några av deltagarna pekade på att vi i ett framtida system troligtvis kommer att ha större fokus på effekt jämfört med energi varför vattenkraftens roll som producent sett i TWh över året kan bli lägre framöver. För att kunna upprätthålla vattenkraftens flexibilitetsförmåga kan det bli nödvändigt med avkall på elproduktion.

Elpriserna spelar stor roll för hur värdefull vattenkraftselen blir. I ett framtida elsystem med mycket vindkraft kan perioder med negativa elpriser<sup>19</sup> bli vanligare. Vid dessa situationer kan det till och med vara billigare att spilla vatten än att producera el, om vattnet inte kan sparas.

Gruppen var enig om att konsekvensen beror på när och var nederbörden kommer. Vid intervjuer under projektets gång har just svårigheterna att förutse vad vattenkraften ska anpassa sig till i framtiden lyfts. Vattenkraften är i sig självt mycket anpassningsbar och van att hantera variationer. Utmaningen är förstå vattenkraftens roll i det framtida elsystemet samtidigt som klimatförändringen påverkar vattenkraftens förutsättningar. Vid diskussionerna om konsekvenser för vattenkraften av ökad nederbörd i framtiden pekade arbetsgruppen på skillnaden i konsekvenser vad gäller stora och små älvar och tillgången/avsaknaden av årsmagasin. Detta eftersom det är tillgången på årsmagasinen som blir avgörande för huruvida man kan tillgodogöra sig den ökade nederbörden till elproduktion eller inte. I exempelvis sydöstra Sverige, som saknar större magasin, bedöms det svårt att tillgodogöra sig ökad mängd vinternederbörd som produktion. Effekten förstärks av att det troligtvis blir varmare vintrar och fler perioder med låga elpriser på grund av hög andel vindkraft i systemet. Kommer nederbörden vid fel tillfällen så är möjligheten till ökad elproduktion på grund av ökade nederbördsmängder låg. Bedömningen var därför att man ser en stor sannolikhet för en negativ påverkan på elproduktion i sydöstra Sverige, om vattnet kommer vid fel tillfälle under året.

Under diskussionerna i arbetsgruppen lyftes också risken för ökad erosion, och därmed ras och skred, längs med älvkanter vid en ökad nederbörd och avrinning. Särskilt ökar denna risk om vattenkraften kommer att i än högre grad behöva användas för balansering av vindkraften. Vissa vattendrag är betydligt mer känsliga än andra för erosion, varför det krävs platsspecifika åtgärder för att hindra detta.

<sup>19</sup> Situationer med negativa elpriser kan uppstå när t.ex. vindkraften producerar mycket el samtidigt som vi har höga flöden och efterfrågan på el är liten.

## 3.2 KONSEKVENSER AV FÖRÄNDRAD ÅRSDYNAMIK (SÄSONGSMÖNSTER)

### 3.2.1 SMHI:s bedömning av framtida klimat

**Bedömning:** Det är troligt att säsongsmönstret och årsdynamiken i tillrinningen till vattendragen förändras på grund av ett varmare klimat. Snösumman (totala mängden snö) minskar i ett framtida varmare klimat. Enda undantaget är norra Norrland och norra fjällkedjan där snösumman är relativt oförändrad.  
**Sannolikhet:** Troligt

I ett varmare klimat beräknas snönederbörden minska och ersättas av regn under en större del av året. Detta gäller framförallt i början och slutet av säsongen och i områden med relativt kallt vinterklimat. I södra Sverige beräknas snön på vintern minska med 30-50 % vid en uppvärmning på 2 grader<sup>20</sup>. I norra Norrland och norra fjällkedjan är det under vintern (december-februari) även vid en viss uppvärmning tillräckligt kallt för att nederbörden ska falla som snö, varför förändringen här är mindre.

På vår och höst minskar snösumman i norra Sverige med omkring 20 % och ännu lite mer i fjällen. Snö som nederbörd beräknas minska som ett resultat av att det blir varmare, inte för att nederbörden beräknas minska. Effekten är störst på vintern i södra Sverige, där vintrarna är förhållandevis varma, och på vår och höst i norra Sverige, där vintrarna är kalla, men där det faller snö på vår och höst. Att en mindre andel av nederbörden faller som snö betyder att mer av vattnet direkt rinner till sjöar och vattendrag, istället för att lagras på marken som snö.

Att en större del av nederbörden faller som regn istället för snö gör att flödena ökar på höst och vinter, men kanske minskar på våren eftersom snösmältningen blir svagare. Den exakta fördelningen är starkt beroende på var i landet man befinner sig.

### 3.2.2 Beskrivning av möjliga konsekvenser

En förändring i tillrinning och flödesmönster över året på grund av minskat snömagasin och tidigare avsmältning samtidigt som det blir mer regn under höst och vintermånaderna kan påverka vattenkraften på olika sätt (se t.ex. Kumar m.fl.; 2011; Hamududu & Killingtveit, 2012; Gaudard m.fl., 2016). En ökad nederbörd över året generellt kan, som nämnts, innebära en potential för ökad vattenkraftsproduktion. Förändras även säsongsmönstret i tillrinningen till en jämnare årscykel, finns möjlighet till jämnare produktion över året. Det innebär dock samtidigt att möjligheterna till effektreglering minskar.

Mindre snö och tidigare avsmältning påverkar vattenkraftens förmåga till effektreglering vid olika tidpunkter. Om höst- och vinterfloden ökar, vilket det redan nu finns tecken på, kan man förutse allt fler tillfällen där hög vindkraftsproduktion och höga flöden sammanfaller. Detta eftersom vindkraften generellt sett producerar som mest under vinterhalvåret. Det ökar i sin tur risken

<sup>20</sup> Enligt scenarierna minskar det med 50 % i sydöstra Götaland, 45 % i Skåne och sedan fallande procenttal norrut.

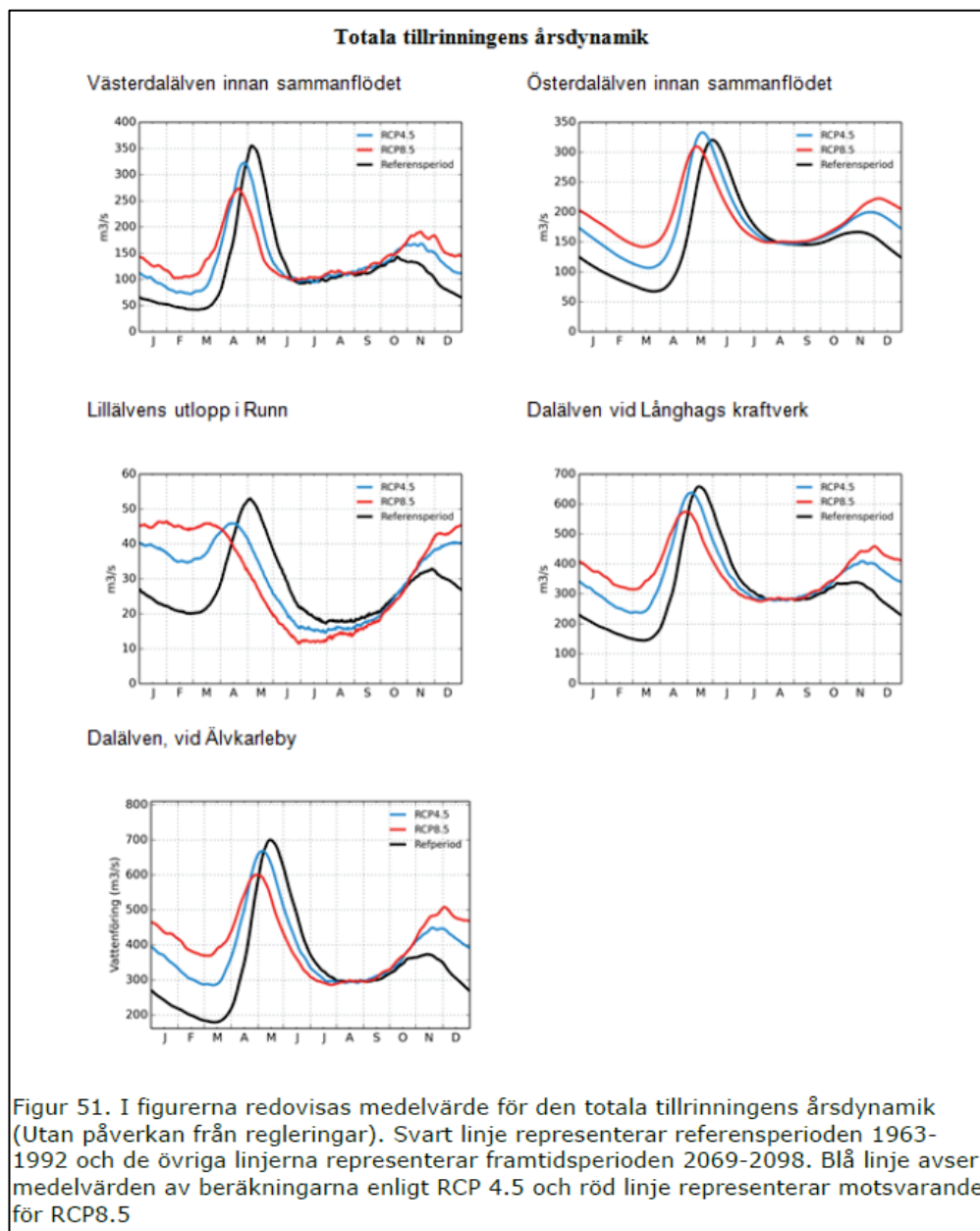
för att vatten måste spillas vilket innebär produktionsförluster (se t.ex. Ebinger & Vergara, 2011).

De förändringar i nederbörden som syns i projektets analyser stämmer överens med vad man i Gode m.fl. (2007) visade vad gäller avrinningens årsdynamik. Klimatscenerierna i Gode m.fl. visade att årsdynamiken i tillrinningen kommer att förändras, främst genom att höst- och vintertillrinningarna ökar över hela Sverige fram till slutet på seklet. Analyserna visade vidare att man i norr även fortsättningsvis kommer att ha en tydlig vårflood, även om den kommer att infalla något tidigare och att dess maximala tillrinningar minskar. I söder syns en större förändring i årsdynamiken. Analyserna visade att vårflooden där på sikt kommer att ersättas av ökade flöden vintertid, eftersom snön troligtvis kommer att smälta av vid flera tillfällen under vintern, med maximala tillrinningar som överstiger de man såg då (början av 2000-talet). Under sommarmånaderna pekade analyserna mot en påtaglig minskning av tillrinningen.

Som framgår i Figur 9 på nästa sida indikerar klimatscenerierna för Dalälven (framtagna inom ramen för projektet "Hållbar vattenkraft i Dalälven, Länsstyrelsen Dalarna, 2017) en förändrad och en något mer "utjämnad" kurva för årsdynamiken i tillrinningen jämfört med referensperioden. Diagrammen visar också en gradvis omfördelning av flödet under året. Årstidsvariationerna i klimatscenerierna visar att en tydlig vårfloodstopp kvarstår men att den förskjuts så att vårflooden tidigareläggs, sommarsäsongen med låg tillrinning startar tidigare samtidigt som tillrinningen under hösten och vintermånaderna ökar. Skillnaderna förklaras av en ökad nederbörd som i mindre grad än idag lagras som snö på grund av ökade vintertemperaturer.

Som också framgår i figuren syns för de mer sydligt belägna vattendragen (som exempelvis Lillälvens utlopp i sjön Runn) ett förändrat flödesförlopp med högre tillrinning under höst-vinter och lägre under vår-sommar. Det förklaras av förändringen i temperatur gör att mängden snö som ackumuleras under vintern kraftigt minskar.

Rapporten pekar också på att vattenkraftens årsreglering och klimatiförändringarna påverkar Dalälvens naturliga flödesdynamik i samma riktning så att vattenflödena blir högre under senhöst-vinter samtidigt som vårflooderna minskar. Årsregleringen och klimatiförändringarnas effekter på flödet i Dalälven förstärker därmed varandra.



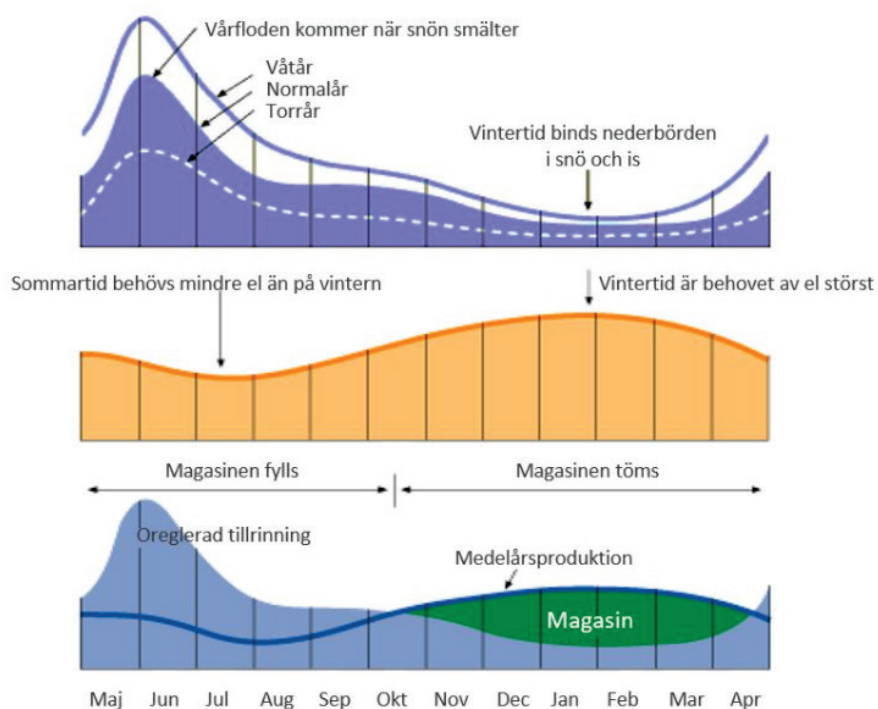
Figur 17 Figur från Länsstyrelsen Dalarna (2017) som visar en förändrad tillrinning (årsdynamik) vid två klimatscenarier (RCP 4.5 och RCP 8.5) jämfört med en referensperiod (svart linje) i Dalälvens system. RCP4.5 är ett scenario där utsläppen av växthusgaser ökar fram till omkring 2040 för att därefter minska. RCP 8.5 är ett scenario där utsläppen av växthusgaser fortsätter att öka resten av seklet.

Dagens svenska vattenkraft är till stora delar ett energidimensionerat system, vilket innebär att den är planerad för att kunna tillvarata merparten av den normala tillrinningen så att energin räcker under hela året (IVA, 2015). Vattenkraften är dock även dimensionerad för att kunna leverera viss topp effekt, vilket bygger på att vissa vattenkraftverk har byggts ut med fler eller större aggregat än vad som är motiverat för att ta hand om energin från tillflödet i syfte att kunna maximera effekt. I gengäld har dessa kraftverk en kortare driftstid. Driftstiden för kraftverken påverkas också av var i vattendraget det är lokaliserat.

Vattenkraftens möjlighet till reglering varierar över året. Vid tillfällen då det är stor tillrinning i samband med vårfloed är regleringsmöjligheterna små. Under vintern när tillrinningen är lägre är regleringsmöjligheterna oftast som störst eftersom möjligheterna att bestämma tappningsnivå då är större. I reglerade älvsträckor planeras användningen av vattnet noga. Snötäcket mäts för att ha kontroll på vilka mängder vatten som kan komma när snösmältningen startar. När efterfrågan på energi är som störst under vintern används magasinerna för att dels kunna producera den el som krävs, dels balansera elsystemets effektbehov<sup>21</sup>.

I Figur 7 ges en översiktlig beskrivning av de grundläggande principerna över årodynamiken och vattenhushållningen i vattenkraftens magasin. I norra Sverige, där våra största älvar, kraftverk och stora årsmagasin är lokaliserade, faller idag en stor del av årsnederbörden under vintern som snö samtidigt som behovet av el är stort. Årsregleringsmagasinen som har lagrat vatten under föregående säsonger används då för att möta behovet av el och i regel är magasinerna tömda strax innan vårfloden startar.

### Grundläggande principer



Figur 18 Figur över de grundläggande principerna för årodynamiken i vattenkraften och flödet i våra älvar. Figuren är hämtad från Vattenregleringsföretagen.

<sup>21</sup> Vattenkraftens totala genomsnittliga disponibla effekt varierar över året mellan omkring 4 och 8 GW, och är i genomsnitt lägre under våttår. Av Sveriges drygt 200 stora kraftverk (>10 MW) står endast 18 st för hälften av denna disponibla effekt (beräknad på årsbasis).

Redan idag ser man en förändring i säsongsmönstret i nederbörd och tillrinning, och vattenkraften kommer att behöva anpassa sig till en fortsatt förändring av årsdynamiken (se t.ex. Anghileri m.fl., 2018; IAEA, 2019). Mer nederbörd i form av regn påverkar vårflodens storlek och förutsättningarna till lagringsvolymen bundet i snö under vintern. En mer utjämnad variation under året, med ökade höst- och vinterflöden i kombination med en något mindre men utdragen vårflod skulle, precis som en ökad nederbörd totalt sett över hela året, teoretiskt kunna innebära möjligheter att tillvarata mer vatten för elproduktion.

De verkliga möjligheterna beror dock, som nämnts, både på de platsspecifika förutsättningarna samt värdet för vattenkraften i systemet vid den tidpunkt nederbörden (tillrinningen) sker. Ett större värde på effekt och ett ökat behov av flexibilitet i ett framtida elsystem kan leda till att vatten i ökad utsträckning måste spillas jämfört med idag. En större mängd vindkraft i systemet leder till att vattenkraften, för att balansera vindkraften, kommer att behöva köras mer oregelbundet och oförutsägbart än idag (Rydén et. al., 2019).

Risken för spill i systemet på grund av en förändrad årsdynamik kan också öka på grund av att den geografiska spridning vi idag har vad gäller när i tiden som vårfloden kommer ser ut att minska. Detta eftersom en ökad produktionspotential i systemet (till följd av vårfloden) oftare riskerar att inträffa samtidigt, vilket får ogynnsamma effekter för elsystemet om behovet av el samtidigt är låg.

En ökad reglering, dvs. i praktiken fler start och stopp för att kompensera för väderberoende vind- och solkraft, kan på sikt innebära mer slitage på turbinerna, vilket kan innebära ökade drift- och underhållskostnader<sup>22</sup>.

I Energiforsk-rapporten "*Dammsäkerhet i ett förändrat klimat*" (Holst & Thanke Wiberg, 2019) diskuteras just denna ökade risk för att vattenplaneringen kan komma att bli mer komplex framöver. Författarna lyfter även risken för att en större andel vatten kan bli kvar i magasinen inför vårfloden (s.k. restmagasin)<sup>23</sup> i ett förändrat klimat med högre vintertemperatur och fler smältperioder jämfört med idag. Detta skulle kunna öka sannolikheten för höga vår- och sommarflöden i älvarna. Om det under dessa perioder då är fullt i magasinen saknas buffertförmåga i systemet, vilket gör att all ytterligare tillrinning måste spillas momentant. Man pekar även på risken för ökade erosionsproblem längs älv- och strandkanter på grund av förändrade körsätt som påverkar hydromorfologin i hela älven.

### 3.2.3 Konsekvensbedömning

I diskussionerna i arbetsgruppen var man enig om att ett förändrat säsongsmönster framöver kommer att påverka både elproduktion och flexibilitetsförmåga<sup>24</sup>. Man ser också en förändring i säsongsmönstret redan idag och framhåller vikten av att ta höjd för denna förändring och planera för den.

<sup>22</sup> <https://www.chalmers.se/sv/styrkeomraden/energi/nyheter/Sidor/Vind--solenergi=ny-utmaning-f%C3%B6r-vattenkraften.aspx>

<sup>23</sup> Detta har utvärderats i bl.a. Andréasson m.fl., 2011.

<sup>24</sup> Förmågan att balansera och reglera elproduktion på olika tidsskalor.

Diskussionerna i arbetsgruppen kopplade mycket till det som diskuterades kring sannolikheten för en ökad nederbörd, dvs. de faktiska konsekvenserna beror mycket på systemfaktorer som framtida elbehov, andelen vindkraft i systemet liksom elnätets kapacitet vad gäller transmission av el från norr till söder, men också mellan Sverige och våra grannländer. Värdet på el i det framtida systemet är därför även här en nyckelfråga och systemfaktorerna kommer troligtvis överskugga storleken på effekterna av klimatförändringen (vilket, som nämnts, även beskrivs i t.ex. Anghileri m.fl, 2018; Gaudard m.fl., 2016; Schaepli, 2015). Dock innebär klimatförändringen ytterligare en komponent att ta hänsyn till (se t.ex. Schaepli, 2015).

### 3.3 KONSEKVENSER AV EXTREMA NEDERBÖRDSMÄNGDER PÅ OLIKA TIDSSKALOR

#### 3.3.1 SMHI:s bedömning av framtida klimat

**Bedömning:** Den största nederbörden under en sjudagarsperiod liksom den maximala nederbörden beräknas öka, och visar på en tydligare trend än medelnederbörden. Dock är den naturliga variabiliteten stor och kan övertrumfa förväntade förändringar även vid +2 graders uppvärmning. Det är också troligt att antal dagar med kraftig (>10 mm/dag) och extrem (>25 mm/dag) nederbörd ökar. Det är mindre troligt att mellanårsvariationen förändras.

**Sannolikhet:** Troligt med ökad extrem nederbörd.

Nederbörden i Sverige beräknas öka på alla skalor, från årsmedelnederbörd till extrem korttidsnederbörd. Förändringssignalen är tydligast för extrem nederbörd. Den maximala nederbörden beräknas öka och likaså antalet dagar med kraftig nederbörd. Extrem korttidsnederbörd bidrar inte så mycket till flödet eftersom skyfall är både kortvariga och lokala. Även om det regnar kraftigt på en plats så blir inte nödvändigtvis summan av nederbörden över ett avrinningsområde stor. Avgörande för flödet är istället kraftig nederbörd över längre tid och större område. Den maximala sjudygnsnederbörden är ett sådant index eftersom långvarig nederbörd oftare är förknippad med storskaliga nederbördsområden snarare än lokala skurar. Även denna beräknas öka.

En ökad nederbörd betyder att det också är troligt att flödena ökar. Att en större del av nederbörden faller som regn istället för snö gör att flödena ökar på höst och vinter, men kanske minskar på våren eftersom snösmältningen blir svagare. Den exakta fördelningen är starkt beroende på var i landet man befinner sig.

#### 3.3.2 Beskrivning av möjliga konsekvenser

Extrem nederbörd och skyfall är två aspekter på nederbörd som kan innebära särskilda konsekvenser. Det handlar dels om stora mängder under långa perioder (det vi här benämner extrem nederbörd), dels stora mängder på mycket kort tid (skyfall). Vi har valt att slå ihop beskrivningen av konsekvenserna för dessa väder- och klimatrelaterade faktorer eftersom konsekvenserna delvis går in i varandra och/eller är likartade.

Ökade perioder av hög nederbörd och en ökad frekvens av skyfall kan också öka risken för översvämningar och därmed få konsekvenser för tillfartsvägar och samhällen nedströms kraftverken samt en ökad risk för skred- och ras längs älvkanter (se t.ex. IAEA, 2019). Vid höga flöden och höga vattenhastigheter ökar också mängden drivgods i magasin och vattendrag (se t.ex. Mukheibir, 2013; Åstrand & Persson, 2017). Drivgodset kan bestå av alltifrån drivved, sjunktimmer och bäverdammar till båtar, bryggor andra föremål. Även stora flyttuvor av torv (uppemot en hektar i yta) kan uppkomma i samband med höga flöden och leda till problem med igensättning av grindar och galler vid intagsluckor, vilket ökar behov av underhåll på anläggningarna. Kraftiga skyfall som för med sig mer sediment och partiklar i vatten kan på sikt också orsaka skador och slitage på turbiner och kräva ökad underhållsfrekvens.

Översvämningar i samband med kraftiga skyfall kan också orsaka skador på tillfartsvägar till kraftverk och dammar vilket försvårar tillgängligheten. Om det har regnat under längre tid och marken är vattenmättad<sup>25</sup> kan kraftiga skyfall också orsaka ras och skred vilket ytterligare kan försvåra tillgängligheten till anläggningarna. År 2004 såg man till exempel stor påverkan av skyfall vad gäller åtkomst till dammanläggningar i Värmland.

I rapporten *Dammsäkerhet och klimatförändringar* (Svenska Kraftnät m.fl., 2011) påpekas att ju större regleringsgrad i anläggningarna, desto större dämpande effekt har magasinerna på flödenas storlek. Det innebär att frekvensen av översvämningar minskar. När höga tillrinningar inträffar vid tillfällena då magasinerna redan är fulla, till exempel under långvarigt blöta perioder på sensommaren eller hösten, kan regleringen tvärtom innebära högre flöden på grund av stor avbördningskapacitet. Vidare pekar man på att vattenkraften i Sverige har byggts ut i syfte att magasinera vatten för vattenkraftproduktion och inte för att skydda älvdalarna för översvämningar, och de marginaler som finns i systemet är anpassade för dammsäkerheten. I allmänhet saknas därför möjlighet att innehålla vatten i magasinerna som skydd för översvämningar.

### 3.3.3 Konsekvensbedömning

Redan idag ser man problem när många kraftiga skyfall och regnoväder följer under perioder då marken redan är mättad på vatten. Konsekvenserna är både kopplade till elproduktion och risken för skador på anläggningarna. Det handlar dels om en ökad risk för spill under perioder, dels om att mängden drivgods ökar.

Arbetsgruppen diskuterade konsekvenserna av ökat spill till följd av extrema nederbördsmängder. Några menade att om det kommer perioder när det kommer upp till 50 mm per dag ökar risken för att man behöver spilla vatten. Det kan handla om tillfällena där nederbördsområden som följer efter varandra under lång tid sammanfaller med vattenmättade marker och då vegetation inte kan ta upp mer vatten. Risken ökar då för hög vattenföring i en älv, vilket naturligtvis kan påverka nedströms liggande verk och verksamheter.

<sup>25</sup> Markfuktigheten har en avgörande betydelse för vilken effekt som stora regnmängder får på vattenflödet. <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/hydrologi/oversvamningar-1.5949>



Den ökade risken för spill i samband med stora nederbörds mängder kan också ha konsekvenser för uppfyllande av anläggningars vattendomar och villkoren för spill. En fråga som togs upp av arbetsgruppen var möjligheten till och behovet av större regleramplituder i vattendomar. Detta får särskild aktualitet i samband med att tillstånden nu står inför omprövning. Överlag ser man behov av ökade lagringsmöjligheter, inte minst under vissa tider på sommaren.

I Göta älv har man fått anpassa sig efter risken för ras- och skred som alltid har funnits där, men som i en framtid kan komma att öka (se t.ex. SGI, 2012). Kunskapen finns inom branschen, men troligtvis får man vänja sig vid att problemen kan komma att öka och hantera situationerna genom överföring av kunskap.

Konsekvensen för strömkraftverk, där tiden för att åka ut och åtgärda problem vid höga flöden generellt är mycket mer kritisk, är därför troligtvis högre än för reglerkraftverk.

Utöver skyfall och påverkan på höga flöden och tillgänglighet diskuterade arbetsgruppen även den eventuella påverkan på anläggningarna i sig. Mycket beror på dammens konstruktion, men också det geografiska avståndet för drift- och underhållspersonal som behöver ta sig till anläggningarna.

### 3.4 KONSEKVENSER AV TORRPERIODER

#### 3.4.1 SMHI:s bedömning av framtida klimat

**Bedömning:** Vid lägre uppvärmningsnivåer syns inga stora skillnader i antalet torra dagar utan nederbörd eller längsta torrperiod utan nederbörd. Vid högre uppvärmningsnivåer (+3 grader och högre) finns indikationer på längre torrperioder i främst södra Sverige.

**Sannolikhet:** Mindre troligt med ökad risk för torka vid uppvärmning under +2 grader. Troligt med ökad risk för torka i södra Sverige vid uppvärmning på över +2.

Antalet torra dagar och den längsta torrperioden beräknas inte förändras nämnvärt vid en global uppvärmning på +2 grader. Vid en högre uppvärmning blir dock klimatsignalen tydligare och torrperioderna beräknas bli längre i södra Sverige.

Det är mycket troligt att mellanårsvariationen förblir densamma för antalet torra dagar, däremot finns det indikationer på att mellanårsvariabiliteten ökar i södra delen av landet vid de högre uppvärmningsnivåerna.

I detta sammanhang kan det även vara värt att lyfta klimatindex för evapotranspiration (mm/dag), dvs. avdunstning<sup>26</sup>. Denna beräknas öka i ett varmare klimat, framförallt på sommarhalvåret. Det är mindre troligt med en förändrad mellanårsvariation.

<sup>26</sup> Begreppet evapotranspiration omfattar dels den direkta avdunstningen (evaporation) från mark, våta växtdelar, vatten, snö och is, dels av växternas transpiration.

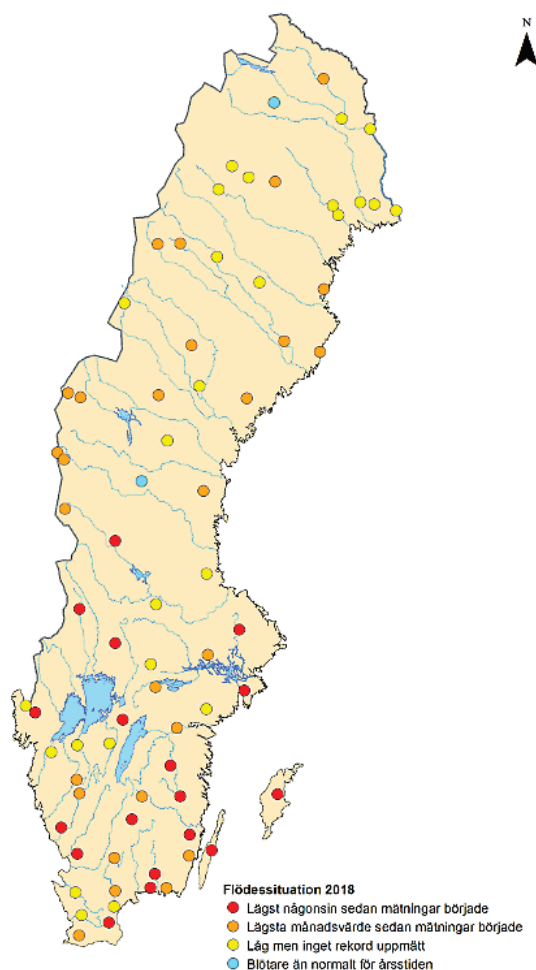
### 3.4.2 Beskrivning av möjliga konsekvenser

Om tillgången på vatten kraftigt minskar innebär det en betydande påverkan på möjligheten för kraftverk att producera el (se t.ex. EEA, 2019). Under nederbördsfattiga perioder i kombination med låga nivåer i vattenmagasinen kan det medföra att vattenkraftens andel av den totala elproduktionen samt vattenkraftens flexibilitetsförmåga minskar betydligt. Det kan också innebära ökad konkurrens om vatten som resurs, när dricksvatten behöver prioriteras före elproduktion och effektregering från vattenkraften (se t.ex. Kumar m.fl., 2011; Majone m.fl., 2016).

I Sverige kan vattenkraftens årsproduktion av el variera mellan 50-80 TWh beroende på mellanårsvariationer i tillrinningen (dvs. nederbörd och snöavsmältning). Under ett normalår producerar vattenkraften idag lite drygt 65 TWh. Möjligheten finns dock till viss utjämning i elproduktionen, mellan våtår och torrår, genom att utnyttja reglermagasinens kapacitet till reglering av flödet på säsongs- och årsskala. Säsongslagringskapaciteten i de svenska årsmagasinen uppgår till omkring ca 30 TWh (NEPP, 2014).

En minskad produktionspotential från vattenkraften kan t.ex. uppstå då det har varit en liten vårflod samtidigt som den föregående höstens nederbörd inte förmått att fylla vattenmagasinen i tillräckligt hög grad för att täcka hela vinterns behov.

Under sommaren 2018 såg man en betydande påverkan på vattenkraften från torkan i framförallt de södra och sydöstra delarna av landet. Torkan var en följd av både utebliven nederbörd och höga temperaturer som bidrog till stor avdunstning och uttorkning.



Figur 19 Kartan visar hur vattenflödet var under sommaren 2018 vid ett urval av SMHI:s mätstationer (Källa: SMHI).

Lokalt ser vattentillgång och vattenanvändande väldigt olika ut, och även om Sverige som land har god tillgång till sötvatten finns det tillfällen när och områden där vattenbrist uppstår. Enligt SMHI utfärdas risk för vattenbrist när grundvattennivåer och vattenflöden är ovanligt låga och förväntas vara fortsatt låga de närmaste veckorna<sup>27</sup>. Vid sådana tillfällen kan det bli aktuellt med prioriteringar mellan olika typer av vattenanvändning vilket kan komma att påverka vattenkraften i vissa områden. Som tagits upp i Engblom m.fl. (2020) så är vattenkraften, även om vattenuttaget för att driva turbinerna i ett kraftverk inte konsumeras utan släpps tillbaka nedströms kraftverket, fortfarande beroende av vattenuttaget. Stensen m.fl. (2019a) framhåller att det därför behövs ett gemensamt arbete över alla sektorer kring vattenresursplanering i ett avrinningsområde. Under sommaren 2018 var tillrinningen i vattenkraftens magasin, främst i södra och sydöstra Sverige (som framgår av Figur 10), låg under hela perioden från juni till september. Följden blev att elpriset låg på 50-70 % högre än normalt.

<sup>27</sup> <https://www.smhi.se/vader/varningar-och-risker/risk-for-vattenbrist>

Vattenbrist drabbade många kommuner, och i mitten av augusti hade omkring en tredjedel av Sveriges alla kommuner bevattningsförbud och/eller uppmanade till försiktigt användande av dricksvattnet (Sjökvist m.fl., 2019).

### *Konsekvenser specifikt kopplat till miljötillstånd och villkor för mintappning*

Så kallad minimitappning (mintappning) sker ofta till den del av ett vattendrag som har torrlagts efter utbyggnad av vattenkraft eller reglerdammar. Minimitappning innebär att en viss mängd vatten kontinuerligt spills för att upprätthålla ett visst flöde i vattenfåran, främst i syfte att upprätthålla de vattenekologiska förhållandena i fåran. I många tillstånd för vattenkraftverk finns det minimitappningskrav som reglerar den minsta mängd vatten som måste tappas vid ett vattenkraftverk. Ett vanligt krav i vattendomar motsvarar en minimitappning kring 5 % av medelvattenföringen eller lägre. Ett fåtal vattenkraftverk har minimitappningar upp mot 20 % av medelvattenföringen.

Det är tämligen vanligt i svenska vattenkraftverk med minimitappningar som ligger under basflödet. Basflödet är den del av flödet som kommer från grundvattenutströmning och ytvattenkällor som t.ex. sjöar och våtmarker. Situationer med enbart basflöde i ett vattendrag uppstår oftast under en längre period av torka, när det inte har fallit nederbörd i avrinningsområdet. En konsekvens vid vattenbrist och torka är därför risken för att inte kunna innehålla mintappningskraven ökar. Sommaren 2018 hade flera anläggningar problem med just detta.

Utöver konsekvenser för mintappning har torka även en påverkan på andra villkor som kopplar till låg vattentillgång, t.ex. sänkingsgränser för magasin.

### **3.4.3 Konsekvensbedömning**

Eftersom det råder ganska stor osäkerhet kring om risken för torrperioder kommer att öka i framtiden eller inte valde arbetsgruppen att diskutera konsekvenserna utifrån situationen den torra sommaren 2018. Det noterades att effekten på vattenkraften var beroende på var i landet som kraftverken låg. Vattenkraftsägare i södra och sydöstra delen av landet hade upplevt en mycket besvärlig situation med låga flöden till skillnad från vattenkraftsägare i norra Sverige.

Som framgår i Figur 10 var det exceptionellt låga flöden i södra och sydöstra delarna av landet sommaren 2018 medan det i norr var låga, men inte exceptionellt låga flöden.

I Lagan fanns det vattenkraftsägare som under nästan två månader sommaren 2018 inte kunde köra ett flertal av sina verk, vilket innebar en lokal påverkan på elsystemet. Även om vattenkraften i södra Sverige bidrar mindre till systemet i form av elproduktion och balansering jämfört med de stora kraftverken i norr så bidrar vattenkraften även i södra Sverige med systemtjänster som frekvensreglering och svängmassa. När anläggningarna stod stilla innebar det en förlust av dessa tjänster till systemet.

En upprepning av sommaren 2018 skulle därför enligt arbetsgruppen kunna innebära betydande konsekvenser för vattenkraften och elsystemet i södra och

sydöstra Sverige. Främst lyfte man problem med frekvensstabiliteten i nätet. I norr var den största konsekvensen under sommaren 2018 skogsbränderna, störningar i eldistribution genom att elledningar brann sönder liksom tillgängligheten till anläggningarna.

Här kan det också vara värt att nämna följderna av sommaren 2018 vad gäller fyllnadsgraden i de svenska vattenmagasinen under hösten 2018. Enligt Energimarknadsinspektionens veckorapporter låg fyllnadsgraden under vecka 42 fyllnadsgraden på 70 % mot normalt 85 %<sup>28</sup>.

Arbetsgruppen diskuterade även hur låga flöden i vattendrag under lång tid kan påverka vattenkraftens förmåga till flexibilitet och effekttreglering. Skulle det bli torka i norra Sverige (SE1 och SE2) försvåras möjligheten för vattenkraften att tillhandahålla olika typer av systemtjänster. Konsekvensen beror dock på vilken typ av systemtjänster som avses. I stora reglerkraftverk är det kostnaderna som styr vilka tjänster som levereras eftersom man planerar utifrån värdet på vatten. Minvattenflöde innebär generellt att frekvensreglering är lättare att upprätthålla, däremot kan det bli betydligt dyrare och svårare att tillhandahålla reglerförmåga.

I södra Sverige syntes under sommaren 2018 konkurrens mellan olika intressen om vattnet. I sjön Bolmen var ytan så låg att vattenkraftägarna inte fick släppa mer vatten till kraftproduktion. Eftersom sjön också används för dricksvattenförsörjning och till bevattning blev det extra kritiskt. Majoriteten av gruppen bedömde det som troligt att konsekvensen kan bli betydande för vattenkraften i södra Sverige om vi ser konkurrens om vatten vid liknande situationer som 2018 års sommar.

Arbetsgruppen diskuterade även risken för att fler torra och varma somrar likt den 2018 generellt kan göra det svårare att uppfylla miljövillkor för vissa anläggningar. Under sommaren 2018 hade flera anläggningar i sydöstra Sverige problem vad gäller att innehålla mintappningskraven. I älvar med många dammar i systemet kan det vara något lättare genom att man har större möjligheter att styra flöden. Men bedömningen var att fler torra och varma somrar likt den 2018 generellt kommer innebära att det blir svårare för vissa vattenkraftsägare att uppfylla dagens miljövillkor.

Vid diskussionerna i arbetsgruppen lyftes därför möjligheten att eventuellt kunna föreslå mintappningsvillkor som är konstruerade på ett mer dynamiskt och flexibelt sätt än vad som är fallet idag. Det behövs villkor som är mer anpassade för både ekosystem och verksamhetsutövare, då mintappningsvillkor ibland inte ens idag kan uppfyllas.

<sup>28</sup> <https://second-opinion.se/elproduktion-i-ett-varmare-klimat/>

## 3.5 KONSEKVENSER AV ISBILDNING

### 3.5.1 SMHI:s bedömning av framtida klimat

**Bedömning:** Ett varmare klimat med en kortare vintersäsong innebär generellt sett färre dagar med risk för isbildning över hela året, med variationer inom landet. Överlag verkar det som att området med flest antal nollgenomgångar flyttar norrut och ökar risk för isbildning till följd av ökad luftfuktighet. Isläggningen i sjöar och vattendrag bedöms infalla allt senare och islossningen börjar tidigare, dvs. antalet dagar med kontinuerligt istäcke minskar.

**Sannolikhet:** Mycket troligt med varmare klimat och kortare säsong. Risk för isbildning till följd av ökad luftfuktighet varierar inom landet.

Projektet har inte modellerat isbildning utan förlitar sig på beräkningar av temperatur. Därför bör slutsatserna om isproblem i vattenkraftverk ses som något osäkra. I allmänhet betyder dock ett varmare klimat att vintersäsongen blir kortare, vilket betyder färre dagar med risk för isbildning sett över hela året. Effekten av detta på isbildning varierar mellan olika delar av landet. Samtidigt betyder högre temperaturer att luften kan innehålla mer vattenånga och mängden vatten som vid nollgenomgångar kan frysa, vilket ökar risken för isbildning och nedisning. Det finns också ett starkt beroende av tid och plats och under vintern kan det i norra delarna av landet bli fler dagar med nollgenomgångar.

I söder betyder ett varmare klimat entydigt minskade isproblem. Bedömningen är att Götaland får varmare vintrar och därmed färre dagar med temperatur nära noll, vilket minskar risken för isbildning. Svealand ligger på gränsen mellan minskad och ökad risk. Vissa index ger ökning andra minskning. I norr kan ett varmare klimat betyda fler dagar kring noll grader vilket kan betyda ökade isproblem i norr jämfört med idag eftersom områdena med flest nollgenomgångar flyttar norrut. Norrland får fler vinterdagar med temperatur nära noll istället för klart under, vilket betyder ökad risk för isbildning till följd av ökad luftfuktighet.

I takt med högre temperaturer och en kortare vintersäsong infaller också islossningen tidigare i sjöar och vattendrag. Även isläggningen förändras och infaller allt senare. Den här typen av förändringar är redan observerade och väntas bli allt vanligare i takt med den globala temperaturökningen. Till exempel visar Sharma m.fl. (2019) att antalet sjöar som vissa år är helt isfria ökar, främst i landets sydliga delar men gradvis, i takt med ökad global uppvärmning även längre norrut i delar av Svealand. I norra Svealand och Norrland väntas klimatet vara tillräckligt kallt för att det ska finnas is på sjöarna även vid mycket kraftig global uppvärmning. I exemplet för Mälaren visar Stensen m.fl. (2017) på ca en månad kortare issäsong för tidsperioden 2032-2050.

Kortare issäsong och mildare vintrar leder även till mindre gynnsamma förhållanden för is och istillväxt vilket väntas ge mindre istjocklek i allmänhet. Isens tillväxt påverkas också av om den är snötäckt eller ej. Avsaknaden av detaljerade beräkningar för framtida istjocklek under olika klimatscenarier gör att det är osäkert kring hur istjockleken kan komma att förändras under vintrarna.

### 3.5.2 Beskrivning av möjliga konsekvenser

Det finns en rad isfenomen som idag påverkar vattenkraften. Isproblematik är ofta mycket platsspecifik och problem uppstår under särskilda förhållanden och vid enstaka tillfällen. Överlag kan isproblematik innebära relativt stora ekonomiska förluster på grund av antingen tvingande eller övervägda begränsningar i produktionen (se t.ex. Gebre m.fl., 2013; Timalisina m.fl., 2015).

Inom ramen för forskningsprogrammet NEPP (*North European Energy Perspectives Project*) analyserades orsakerna till varför inte all installerad effekt (16 GW) i Sverige utnyttjas under ansträngda tidsperioder på elmarknaden, ofta under mycket kalla vinterdagar (NEPP, 2019). En orsak som lyftes var just isproblematik. I Karlsson (2009) nämns uppskattningar som pekar på att uppemot mellan 0,5-6,5 % av uppkomna produktionsförluster vid enskilda stationer under enstaka vintrar kan kopplas till isrelaterade fenomen, främst kravis. Enligt samma studie uppkommer 70 % av de isrelaterade produktionsförlusterna i älvsträckorna, ca 25 % över intagsgrindarna och resterande 5 % som spill. Spill på grund av isproblem förekommer dock endast i mer extrema situationer, till exempel när intagsgrindarna till turbingången helt täpps igen av kravis.

I strömmande vatten bildas ingen ytis utan istället blir vattnet fullt av svävande fina iskristaller som kallas kravis eller sörpa (Fremling m.fl., 2012). Kravis är alltså ett av de största isrelaterade problemen som påverkar vattenkraften, och bildas främst i underkyllt, turbulent vatten, t.ex. vid utlopp av utskov och turbiner. Framförallt handlar konsekvenserna av kravisproblematik om igenfrusna galler vid intagen till turbinerna (Havs- och Vattenmyndigheten, 2015).

Olika isfenomen kan också uppstå som kan leda till minskad fallhöjd och därmed fallförluster och problem som påverkar vattenkraftens produktions- och reglerförmåga i olika grad. Främst handlar det om produktionsförluster pga isbildning vid intagsgrindar, förluster i älvsträckorna mellan stationer och på grund av spill. Isdämning talar man om när vattendrag däms genom kravis och/eller genom igensättning av drivis. Isdämman ger upphov till en förträngning i älven ovanför vilken vattenståndet stiger (Fremling m.fl., 2012). Bottenkrav kallas det när kravisen anhopas på botten och under särskilda betingelser växer ut över stora områden på grund, stenar och dylikt.

Under vårens islossning kan isproppar bildas som gör att områden uppströms en fördämning översvämmas. Vid dessa tillfällen kan stora isblock och ismassor tryckas upp på land och orsaka omfattande skador (se t.ex. Karlsson, 2009). Generellt styrs islossningens förlopp till stor del av hur tjock isen är och av väderutvecklingen under våren<sup>29</sup>. Framförallt kan svåra islossningar inträffa när vårfloden kommer plötsligt.

I några av Sveriges nordliga älvar anpassar man vattenplaneringen till processen för isläggning (Holst & Thanke Wiberg, 2019). Isläggning innebär att älven vid vissa stationer under en period tidigt under vintern regleras annorlunda för att skapa ett istäcke i syfte att kunna dels minska risk för isdämning, dels bibehålla möjligheterna att upprätthålla full dygnsreglering i älven under hela vintern. Får

<sup>29</sup> <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/hydrologi/is-pa-alvar-1.4190>

man inte till en bra isläggning finns risk för stora intäktsförluster eftersom man riskerar att tvingas till en begränsad vattenföring och dygnsreglering.

En konsekvens av ökad temperatur under vintertid och ökad risk för att frekvensen av nollgenomgångar flyttar norrut kan vara att man får sämre förutsättningar för att ha ett kvarvarande istäcke under hela vintern. Det innebär att driften måste anpassas till att hantera situationer med fler isläggningar under en och samma vintersäsong.

Fallförluster kan uppkomma genom att intagsgrindarna fryser fast och skapar ett ökat tryckfall och därigenom en fallförlust. I värsta fall leder det till att hela grinden täpps igen och att kraftstationen därigenom stoppas. Även i älvsträckorna mellan två kraftstationer kan fallförluster uppstå på grund av olika former av isproppar.

En ökad frekvens av perioder med betingelser som främjar isbildning ökar också risken generellt för skador på anläggningar och dammar. Det innebär även en ökad risk för halka som kan påverka säkerheten och tillgängligheten till och vid anläggningar för driftspersonal (se t.ex. Holst & Thanke Wiberg, 2019).

### 3.5.3 Konsekvensbedömning

Varmare vintrar generellt kan både underlätta och försvåra dagens utmaningar för vattenkraften vad gäller isproblematik (se t.ex. Gebre m.fl., 2013).

Klimatförändringen kan innebära både positiva och negativa konsekvenser för vattenkraftsproduktionen i kalla regioner genom förändrade isbildningsförhållanden. Timalina m.fl. (2015) pekar på att relativt få modelleringsstudier har gjorts vad gäller att undersöka klimatförändringens konsekvenser kopplat till isproblematik och vattenkraft, och att många osäkerheter finns som gör denna typ av studier komplexa. Författarna lyfter dock att de framtida isförhållandena i reglerade älvar, och konsekvenserna, inte bara beror på klimatförändringen i sig utan också på förändrade produktionsstrategier som en del av ett förändrat elsystem och det framtida behovet av el.

En positiv konsekvens kan vara en generellt kortare issäsong som minskar problematiken, medan negativa konsekvenser kan kopplas till en ökad frekvens av vintrar med fler nollgenomgångar (Gebre m.fl., 2014).

Inom föreliggande projekt har bedömningen varit att bältet för nollgenomgångar troligen kommer att förflytta sig norrut i landet, vilket innebär att andra delar av landet i framtiden kommer att behöva hantera problem kopplat till ett ökat antal nollgenomgångar jämfört med hur det ser ut idag. I ett förändrat klimat kan konsekvenserna av isbildning till viss del komma att minska i de södra delarna av landet samtidigt som de kan öka i de norra delarna. En ökad risk för perioder vintertid då det fryser på och sedan smälter skapar nya situationer för stationer där man tidigare har varit van att kunna lägga istäcken som ligger under hela säsongen. Varmare vintrar i norr, och därmed sämre förutsättningar för isläggning, kan leda till sämre möjligheter till dygnsreglering och således orsaka intäktsförluster och kanske potentiellt även ha en systempåverkan.



I arbetsgruppen noterades att man i Göta älv inte försöker lägga isen utan istället bryta upp den på grund av mindre sannolikhet för lång varaktighet i stabila isförhållanden (se även t.ex. Karlsson, 2009). Det diskuterades därför i gruppen om vikten att man överför kunskap som idag finns hos anläggningsägare i södra delen av landet till anläggningsägare längre norrut som ska lära sig hantera ett förändrat klimat utifrån isproblematik.

I arbetsgruppen diskuterades också problemet med ökade nollgenomgångar och ökad risk för perioder med halka vilket kan påverka drift och underhåll på anläggningar eftersom risk för olyckor ökar. Det kan också skapa problem med tillgängligheten till anläggningar på grund av halt väglag.

### 3.6 KONSEKVENSER AV ÖKAD VATTENTEMPERATUR

#### 3.6.1 SMHI:s bedömning av framtida klimat

**Bedömning:** Temperaturerna förväntas öka både i yt- och djupvatten. Det är troligt att maxtemperaturerna ökar mer än medeltemperaturen.

**Sannolikhet:** Mycket troligt

I takt med atmosfärens uppvärmning stiger temperaturen generellt även i sjöarna. Förändringen gäller inte bara i vattnet närmast ytan utan även längre ner mot botten. I djupare sjöar finns som regel ett s.k. språngskikt under sommarhalvåret med varmt vatten närmast ytan och kallare vatten längre ner. Beräkningar visar att språngskiktet flyttas till större djup och existerar över en längre period under året när klimatet blir varmare (Eklund m.fl., 2018). Det här betyder också att antalet dagar på vintern med kallt vatten nära ytan minskar. Påverkan på sjötemperaturerna sträcker sig också ner mot botten och även vattnet under språngskiktet värms succesivt upp. I beräkningar för Mälaren visar Stensen m.fl. (2017) t ex att antalet dagar med vattentemperaturer nära ytan över +20°C ökar från ca 40 till drygt 55 i två scenarier för tidsperioden 2032-2050 vilket ungefär motsvarar scenarierna för +1.5°C global uppvärmning. De pekar också på att maxtemperaturerna ökar mer än medeltemperaturerna både för yt- och bottenvattnet.

#### 3.6.2 Beskrivning av möjliga konsekvenser

Ökade vattentemperaturer kan orsaka olika typer av förändringar i den akvatiska miljön med konsekvenser för vattenkraften. Dels ökar risken för invasiva arter som trivs och växer till vid varmare temperaturer (se t.ex. Rahel & Olden, 2008; Benateau m.fl., 2019), dels har det en negativ påverkan på kallevande, inhemska arter som är anpassade för ett visst temperaturspann (se t.ex. Jansson m.fl., 2015). Ökade vattentemperaturer kan också leda till ökat slitage och skador på turbiner genom korrosion (se t.ex. IHA, 2019).

#### *Konsekvenser kopplat till invasiva arter*

Ökade vattentemperaturer kan orsaka ökad risk för och större problem med invasiva arter i framtiden. I framförallt sydöstra Sverige har man redan idag

problem med främst vandrarmusslan som sätter igen intagsluckor och kräver ökad underhållsfrekvens. Problem med invasiva arter behöver därför bevakas av branschen.

I detta sammanhang bör man lyfta problematiken kopplad till ökad konnektivitet<sup>30</sup> genom miljöanpassningskrav, eftersom det ökar risken för att invasiva arter kan sprida sig i älvsystem (Lindblom & Holmgren, 2016). Detta är något som måste beaktas och avvägas när man diskuterar denna typ av miljöanpassningsåtgärder.

Nedan beskrivs två arter där man redan idag ser påverkan på vattenkraften i Sverige.

**Vandrarmusslan** (*Dreissena polymorpha*, kallas även zebarmussla) kommer ursprungligen från området runt Svarta havet och Kaspiska havet. Den trivs i sötvatten som sjöar, floder och åar men klarar även bräckt vatten och kan bli upp till fyra centimeter lång (Figur 2).



Figur 20 Vandrarmusslan eller zebarmusslan (*Dreissena polymorpha*). Foto: Jakob Bergengren.

Musslan har funnits länge i svenska sjöar och vattendrag, hittills utan att orsaka större problem. Den trivs i sötvatten som sjöar, floder och åar. Musslan har förmågan att snabbt växa till och bilda täta kolonier och kan därmed fort ta över stora områden, varpå den påverkar andra arter negativt och bidra till att de slås ut. Dels på grund av att det blir ont om plats, dels på grund av ökad konkurrens om födan. Musslans förmåga att snabbt växa till när den introduceras i nya områden gör att den räknas till en av världens hundra "värsta" invasiva arter enligt *Global Invasive Species Database*.

Massförekomst av musslan i andra länder har haft stor påverkan på kraftverk, industrier, fiske och friluftsliv. Vandrarmusslan har potential att växa till så kraftigt på t.ex. intagsluckor att den orsakar driftstopp i kraftverk när vattenflödet

<sup>30</sup> 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.

stryps. När musslan får fäste och växer till stora populationer kan effekterna bli mycket ekonomiskt kännbara<sup>31</sup>. I Nordamerika orsakar musslan stora skador på kraftverk och industrier som uppskattningsvis uppgår till många miljarder dollar.

I dagsläget förekommer vandarmusslan i Mälaren och Hjälmaran liksom en del mindre insjöar i Uppland. 2012 återfanns den i de inre delarna av Bråviken och senare även i de östgötska sjöarna Glan och Roxen. Inventeringar i de sistnämnda sjösystemen har visat på tätheter på upp till 10 000 individer per m<sup>2</sup> och upp till 70 larver per liter i Göta kanal-området nedströms Norsholm<sup>32</sup>.

Det finns även ett antal andra invasiva musselarter som verkar ha etablerat sig i södra Sverige: Amerikansk trågmussla och kinesisk dammussla. Ytterligare arter som man förväntar sig kunna etablera sig i Sverige är kvaggamussla, finribbad olivmussla, grovribbad olivmussla<sup>33</sup>.

Även *vattenpesten* (*Elodea canadensis*) är en invasiv art som idag orsakar problem för vattenkraften i södra Sverige genom att den täpper igen intagsgaller i vattenkraftsstationer. Problem med vattenpesten bland annat noterats i Östergötland.

Vattenpest är en kärlväxt som kan bilda täta bestånd i sjöar, dammar och vattendrag<sup>34</sup> men klarar även brackvatten som flodmynningar och avsnörda havsvikar och tål salthalter på upp till 2,5 promille<sup>35</sup>. Växten förekommer naturligt i Nordamerika och har kommit in i landet genom handel med akvarie- och dammväxter. Den lever nedsänkt i vattnet och fäster vid botten med trådaktiga rötter. Den trivs i grunda och näringsrika vatten och finns vanligen på djup från någon decimeter ner till fyra meters djup (Figur 3). Den kan leva i kalla vatten och överleva under snötäckt is, men växer som bäst när temperaturen är mellan 10 och 25 grader.

<sup>31</sup> Informationsblad från Havs- och Vattenmyndigheten, uppdaterad 2016.

<sup>32</sup> Material från Jakob Bergengren, Tekniska Verken i Linköping (deltagare i arbetsgruppen).

<sup>33</sup> Jakob Bergengren, Tekniska verken.

<sup>34</sup> Informationsblad från Hav- och Vattenmyndigheten och Naturvårdsverket, november 2017.

<sup>35</sup> <https://www.havochvatten.se/arter-och-livsmiljoer/arter-och-naturtyper/vattenpest.html>



Figur 21 Sjuk av vattenpest (*Elodea canadensis*) i en badvik i Östergötland. Foto: Anna-Stina Påledal, Linköpings kommun.

Vattenpest är idag vanligt förekommande i sjöar och vattendrag i hela södra delen av Sverige. Under 2000-talet har den även påträffats i Sundsvallsområdet, i Sveriges nordligaste älv (Könkämä älv) samt i Bottenviken. På platser där tät bestånd har bildats påverkas möjligheten till användningen av vattendraget och/eller sjön för bl.a. fiske, rekreation och båttrafik, och den kan påverka vattenflöden i mindre vattendrag.

Vattenpesten kan lätt förväxlas med sin mindre vanligt förekommande artfrände smal vattenpest (*Elodea nuttalli*). Smal vattenpest är fortfarande betydligt mer sällsynt än vattenpest, men tycks vara på väg att få allmänt större spridning i Europa och verkar på sina håll även kunna konkurrera ut sin släkting.

### *Konsekvenser kopplat till miljöanpassningsåtgärder*

När vattentemperaturen i sjöar och vattendrag ökar till följd av ett förändrat klimat finns en risk för negativ påverkan eller utslagning av kallevande arter.

Konsekvensen kan vara att vissa habitat inte längre är lämpliga för dessa arter. I reglerade älvar med lägre konnektivitet och med instängningseffekter kan det innebära svårigheter för arter att hitta nya lämpliga habitat. En möjlig effekt av detta som framfördes i arbetsgruppen skulle kunna vara att det framöver kan behövas fler fiskvägar i vissa vattensystem. Det kan innebära att vattenkraftsägare i tillståndprocesser kan komma att åläggas att ta hänsyn till klimatförändringens negativa inverkan på arter.

Här bör man även lyfta risken för att en ökad konnektivitet genom till exempel fiskpassager<sup>36</sup> inte bara hjälper inhemska arter att förflytta sig i vattendragen. Det

<sup>36</sup> Vid anläggande och konstruktioner av fiskpassager behöver även dammsäkerhetsaspekter bedömas.

kan även underlätta för invasiva arter att sprida sig i systemet, något som måste beaktas när man diskuterar olika typer av anpassningsåtgärder.

Klimatförändringens påverkan på de akvatiska ekosystemen är komplex och beror bland annat på hur den omgivande miljön ser ut, till exempel vad gäller grundvatteninströmning. Det är också betydande skillnader mellan stora och små vattendrag vad gäller temperaturpåverkan, där små och stilla vattendrag är mer utsatta. Vilka åtgärder som passar var är av naturliga skäl därför mycket platsspecifika.

### 3.6.3 Konsekvensbedömning

Konsekvenserna av invasiva arter diskuterades i arbetsgruppen och det konstaterades att man redan idag i framförallt sydöstra Sverige har problem med främst vandrarmusslan som sätter igen intagsluckor och kräver ökad underhållsfrekvens. Det bedöms därför som att det är ett problem som kan komma att öka i dessa områden och något som man måste lära sig att hantera. Risken finns att det på sikt kan handla om relativt stora kostnader för underhåll i de områden där man redan idag har problem, framför allt när det gäller att hantera just vandrarmusslan.

Gruppen såg i dagsläget inga stora risker för att invasiva arter som vandrarmusslan kommer att påverka vattenkraften i norra Sverige i någon större grad. Däremot är det viktigt att ha kontroll på och bevaka utbredningen av de invasiva arter som potentiellt kan orsaka problem även längre norrut i takt med stigande temperaturer. Inte minst bör man beakta risken att invasiva arter har lättare att sprida sig i vattendrag om konnektiviteten ökar.

## 3.7 KONSEKVENSER AV SKOGSBRÄNDER

### 3.7.1 SMHI:s bedömning av framtida klimat

**Bedömning:** Risken för skogsbränder ökar främst till följd av varmare somrar och längre värmeböljor och torrperioder.

**Sannolikhet:** Troligt med ökad risk, särskilt i södra Sverige.

Det finns inget index som direkt beskriver brandrisk utan det är en sammanvägd bedömning av förändringar i temperatur- och nederbördsrelaterade klimatindex som kan ge en indikation på risken och sannolikheten för denna.

Förhållanden för brandrisk påverkas av ett varmare klimat. Ett tydligt resultat av en allt längre sommarsäsong är att risken ökar för att nederbördsfattiga och torra somrar kan bli ännu torrare än idag. Samtidigt väntas nederbörden generellt öka i stora delar av landet vilket motverkar detta. I medeltal och för mer nederbördsrika år väntas generellt inte någon ändring i risken för bränder. Huruvida det blir fler antal dagar med brandrisk eller om antalet dagar blir ungefär detsamma som idag men med större risk är osäkert och mer detaljerade studier behövs här. I söder, där nederbördsförändringen på sommaren beräknas vara liten, är sannolikheten för ökad brandrisk större än i norr.

På längre sikt, vid högre uppvärmningsnivåer (+3 grader och högre), blir det allt torrare i marken i Götaland och delar av Svealand. Kontrasterna mellan blöta och torra år väntas också öka på sikt.

### 3.7.2 Beskrivning av möjliga konsekvenser

Skogsbränder är framförallt en risk vad gäller tillgänglighet till anläggningar och dammar. Skogsbränder kan även öka mängden drivgods som kan skada anläggningar genom att drivgods sätter igen grindar och intagsluckor. Indirekt kan det även påverka strömförsörjning till anläggningarna.

Årligen inträffar omkring 2 500 skogsbränder i Sverige, och ungefär lika många gräsbränder. De största konsekvenserna av skogsbränder för vattenkraften handlar om skador på elnät och minskad tillgänglighet till kraftstationer och dammar.

Skogsbränder kan försvåra eller hindra drifts- och underhållspersonal att nå fram till dammar och/eller att elektroniska kommunikationer och elförsörjning till dammen bryts. Erfarenheterna från skogsbränderna under sommaren 2018, då dammägare framförallt utmed Ljusnan i Ljusdals kommun drabbades, har sammanställts i en Energiforskrapport (Jenvald & Morin, 2019).

Skogsstyrelsen uppskattade att totalt omkring 230 km<sup>2</sup> skog brann under sommaren, varav 92 km<sup>2</sup> finns i Ljusdals kommun i Gävleborgs län. Bränderna påverkade och/eller hotade vattenkraftanläggningar bland annat genom faran för brandspridning till anläggningarna, begränsningar i framkomlighet på tillfartsvägar samt nedbrända ledningsstolpar och brandskadade ledningar i elnätet.

Rapporten listar ett antal konsekvenser (Jenvald & Morin, 2019):

- När tillfartsvägar blir ofarbara eller stängs på grund av säkerhetsskäl eller på grund av brandbekämpningsinsatser vid skogsbränder försvåras tillgängligheten till anläggningarna för drifts- och underhållspersonal.
- Elförsörjningen till anläggningarna kan störas eller brytas, vilket gör att reservkraft måste finnas tillgängligt så att fortsatt drift för säkerhetsanordningar på dammen säkerställs. Vid längre strömbortfall från nätet krävs dock påfyllning av drivmedel till reservaggregaten, vilket krävs att tillfartsvägar är säkra och farbara för drivmedelstransporter in till anläggningarna.
- Risken ökar för avbrott och bortfall i elförsörjning liksom skador på elektronik för fjärravläsning av vattennivåer i magasin och dammar samt fjärrmanövrering av dammluckor, vilket utgör en säkerhetsrisk om personal inte kan tas sig till anläggningarna.
- Avbrott på talkommunikationer försvårar eller omöjliggör samordning av driftpersonalens åtgärder vid anläggningarna.

Övriga konsekvenser av skogsbrand som har diskuterats i projektet är att risken för ökade mängder drivgods i vattendragen ökar vid och efter skogsbränder,

framförallt om det kommer skyfall i dessa marker perioden efter. Skogsbränder kan också innebära att vattenmagasin behöver användas som släckvattentäcker.

### 3.7.3 Konsekvensbedömning

Arbetsgruppen noterade att den största påverkan på berörda vattenkraftanläggningar under branden i Kårböle vid Ljusnan sommaren 2018 var problem med strömförsörjning då ledningsstolpar brann ner samt att tillgängligheten till anläggningarna försvårades eller ströps.

På grund av att elnätet var otillgängligt/ur drift fick man ställa in fastspill på anläggningarna för att klara minvattenföringen i älvsträckan. Området försörjdes under en period endast av lokalnätet (40 kV). Av säkerhetsskäl släpptes dammägarens personal inte in i området omedelbart och det tog också tid att inspektera ledningsstolpar och åtgärda elnätet. Figur 13 visar hur det såg ut i området efter branden.



Figur 22 Cirka 80 av Ellevios stolpplatser skadades i branden mellan Laforsen och Kårböle. Foto: Ellevio, ur Jenvald & Morin (2019).

Vid diskussionerna i arbetsgruppen konstaterades att skogsbränder kan öka behovet att se över beredskapsplaner och ställa nya krav på personal och organisation att kunna hantera en ökad risk för skogsbränder.

## 3.8 KONSEKVENSER AV STORMAR OCH ÅSKA

Stormar och åska har diskuterats mycket översiktligt i arbetsgruppen. Generellt har dessa väder- och klimatrelaterade faktorer endast indirekta effekter på vattenkraften och ingen konsekvensbedömning har gjorts inom gruppen. Här ges endast en mycket kort övergripande beskrivning av faktorerna och av de möjliga konsekvenserna för vattenkraften.

### 3.8.1 Stormar

Stormar kan framförallt förhindra tillgänglighet till anläggningar och dammar genom nedfallna träd över tillfartsvägar. Indirekt kan det även påverka strömförsörjning till anläggningarna, genom störningar i elnätet på grund av nedblåsta träd över ledningar. En ökad mängd drivgods kan också vara en möjlig konsekvens av stormfällan (mer om risken för stormfällan, se Hansson m.fl., 2021, som behandlar konsekvenser för bioenergi inom ramen för detta projekt).

Klimatmodellerna ger inga indikationer på ändrad risk för stormar eller höga vindhastigheter. Endast små ändringar i maximal byvind och antal dagar med höga vindhastigheter förväntas. Möjligen syns en viss minskning i vindhastighet i fjällkedjan och en viss ökning längs delar av kusterna. Däremot väntas minskad förekomst av tjäle och högre markfuktighet till följd av ökad nederbörd bidra till ökad risk för stormfälld skog.

Bedömningen är sammantaget att konsekvenserna av stormar för vattenkraften är relativt liten i jämförelse med konsekvenser av andra väder- och klimatrelaterade faktorer. En relativt enkel åtgärd för att förebygga konsekvenser av stormar kan vara stormsäkring av tillfartsvägar till dammar och kraftverk.

### 3.8.2 Åska och blixtnedslag

Åska innebär främst risk för strömbortfall och skador på känslig elektronik vilket kan leda till att elproduktionen i en anläggning måste stoppas. Åska är också en orsak till att bränder uppstår.

Främst handlar det om indirekta effekter som till exempel då ett blixtnedslag kan orsaka strömbortfall i elnätet

Redan idag är åska en vanlig orsak till ett stort antal elavbrott i elnätet. Som beskrivs i Blomqvist m.fl. (2021) i delrapporten om klimatförändringarnas påverkan på elnätet inom ramen för detta projekt kan konsekvenserna av ett blixtnedslag spridas från stamnät ut till lokalnät. Även om lokalnät i stor utsträckning saknar redundans och inte är lika kraftigt dimensionerade som stamnätet, bedöms potentiella konsekvenser kopplade till stamnätet ändå som något allvarligare. Orsaken till detta är komplexiteten i elnätet där de olika spänningsnivåerna är sammankopplade med varandra. Ett åsknedslag i stamnätet kan fortplantas ned i region- och lokalnät så att ett fel slutligen kan uppstå där istället. På grund av detta kan exempelvis ett avbrott eller en brand uppstå på en annan plats relativt långt ifrån där själva åsknedslaget inträffade.

SMHI bedömer det som troligt att åksäsongen i Sverige blir längre och att antalet åskdagar ökar. Detta eftersom de storskaliga förutsättningarna för åska i Sverige ökar i ett varmare klimat med fler dagar per år med förutsättningar för s.k. djup konvektion<sup>37</sup> och därigenom mäktiga bymoln, kraftiga regnskuror och åska. Bilden kompliceras dock av att ett varmare klimat skulle kunna minska mängden iskrystaller i molnen till förmån för fler vattendroppar. I en jämförande studie som tar hänsyn både till storskaliga förändringar och förändringar i molnegenskaper

<sup>37</sup> Djup konvektion innebär molnbildning med lång vertikal utbredning som skapar moln som når högt upp i atmosfären.



visar De Ridder (2020) att frekvensen av dagar med åska kan komma att öka i Sverige i ett varmare klimat och att åksäsongen förlängs. Det saknas studier om åskintensitet och huruvida ett varmare klimat på våra breddgrader skulle intensiteten på åskovädren och urladdningar.

Överlag handlar konsekvenserna för vattenkraften av åskoväder och blixtnedslag om risker för utslagning av känslig elektronik och strömbortfall. Anläggningarna kan säkras genom reservkraft samt att man "åksäkrar" kontroll- och styrsystem.

## 4 Exempel på möjliga klimatanpassningsåtgärder för vattenkraften

Klimatanpassning handlar om att vidta åtgärder för att anpassa samhället eller sektorer till den pågående klimatförändringen. På den nationella nivån är det regeringen, riksdagen och ett stort antal myndigheter som på olika sätt ansvarar för klimatanpassningsarbetet i Sverige. Arbetet sker på olika samhällsnivåer och inom olika ansvarsområden. Klimatanpassningsportalen som drivs av Nationellt kunskapscentrum för klimatanpassning vid SMHI samlar kunskap om klimatanpassningsåtgärder<sup>38</sup>. Där kan man hitta verktyg för klimatanpassningsarbetet, dels vad gäller olika klimatrisker, dels vad gäller risker inom olika samhällssektorer.

**Klimatanpassningsåtgärder kan grupperas och diskuteras utifrån många olika parametrar och frågeställningar:**

- **För vilken del av systemet** (energikälla, produktion, distribution osv.) görs åtgärden och vilken följdverkan får den?
- **Vilken typ av åtgärd handlar det om?** Handlar det om "mjuka" eller "hårda" åtgärder, t.ex. förändrade organisationsplaner eller investeringar i ny teknik eller infrastruktur? Är det en åtgärd för daglig drift eller för plötsliga händelser?
- **Vad är det man avser skydda?** Är det verksamhetsutövaren, bredare samhällsintressen (t.ex. markägare längs en älv, stadsbebyggelse), allmänheten eller något annat?
- **Hur ser rådigheten ut?** Vems är ansvaret och finns det olika ansvarsnivåer som måste tas hänsyn till?
- **Hur ser kostnadsnivån ut?** Är det billigt/dyrt/ej genomförbart?

I detta avsnitt har vi samlat ett antal möjliga anpassningsåtgärder för vattenkraften som antingen har diskuterats inom arbetsgruppen eller som har hämtats från litteraturen. Exempelen ska ses just som exempel och ingen bedömning görs av kostnadseffektivitet eller prioritetsordning.

I bilaga A till denna rapport ges en översiktlig beskrivning av det omfattande arbete som har gjorts, görs och som planeras vad gäller dammsäkerhet i ett förändrat klimat.

### 4.1 ÖKAD NEDERBÖRD – EXEMPEL PÅ MÖJLIGA ÅTGÄRDER

Beaktat osäkerheterna av rollen för och värdet av vattenkraften i det framtida energisystemet, med ett kraftigt ökat behov av el i kombination med en alltmer variabel elproduktion på grund av att vindkraftens andel i systemet ökar är det svårt att bedöma vilka åtgärder branschen behöver fokusera på. Även om det är

<sup>38</sup> <http://www.klimatanpassning.se/>

den långsiktiga trenden man klimatanpassar kraftslaget till så bör hänsyn tas till att mellanårsvariationerna fortfarande kommer att vara stora.

Till exempel Erbingar & Vergara (2011), Kumar m.fl. (2011) samt EEA (2019) lyfter behovet av ökad magasinskapacitet för att kunna ha möjligheten att ta tillvara de potentiellt ökade tillrinningsenergierna. Denna typ av åtgärder är starkt avhängig det framtida värdet och rollen för vattenkraften i ett variabelt elsystem. Kumar m.fl. (2011) och EEA (2019) framhåller också möjligheten att särskilt analysera det potentiella behovet och möjligheten till att öka den installerade kapaciteten i enskilda kraftverk för att öka den framtida kapaciteten till effektregering.

Gaudard m.fl. (2016) lyfter vikten av att fortsatt och i än högre grad än idag bevaka marknadstrender. Inte minst bör man prioritera kunskapsuppbyggnad kring den framtida utvecklingen av värdet av producerad el i ett förändrat elsystem. Hit hör alltifrån prognoser för ökat elbehov, vindkraftens utveckling, analyser av överföringskapacitet inom landet och mellan Sverige och grannländerna liksom effekterna av nya krav på miljöanpassningsåtgärder för vattenkraften.

#### 4.2 FÖRÄNDRAD ÅRSDYNAMIK (SÄSONGSMÖNSTER) – EXEMPEL PÅ MÖJLIGA ÅTGÄRDER

Möjliga åtgärder för att hantera förändrade säsongsmönster diskuteras i bl.a. François m.fl. (2014), EEA (2019) och IAEA (2019).

Denna typ av åtgärder starkt kopplade till att lära sig mer om hur flödesmönstren ändras och anpassa sig efter nya situationer samt att hitta nya planeringsverktyg som kan ersätta den långsiktiga planeringshorisont som idag ges av mer stabila snölager. Samtidigt är det även här mycket som är avhängigt vattenkraftens värde i det framtida systemet och därmed hänger åtgärderna i hög grad samman med övriga omvärldsfaktorer som kommer att påverka vattenkraften. Konsekvenserna av ett förändrat säsongsmönster i kombination med omvärldsförändringarna styr vilka åtgärder som blir aktuella.

Exempel på åtgärder som har diskuterats i arbetsgruppen är bl.a. utveckling av förbättrade tillrinningsprognoser inklusive höst- och vårflodsprognoser liksom förbättrade elprisprognoser. Det senare framhålls även av t.ex. Gaudard m.fl. (2016). Även behovet av utvecklade produktions- och vattenplanering har diskuterats, vilket även lyfts i t.ex. EEA (2019).

Kumar m.fl. (2011) och EEA (2019) framhåller möjligheten att överväga högre effekt på turbiner vid nyinstallationer, liksom uppgradering och förstärkningar av anläggningskonstruktioner. EEA (2019) lyfter även det eventuella behovet av investeringar i ökad avbördningskapacitet i vissa anläggningar. EEA (2019) samt IAEA (2019) tar även upp möjligheten till ökade marginaler och magasinskapacitet.

För att minska slitage på turbiner av en ökad reglering på korta tidsskalor (sekunder-minuter, upp till timmar) har några energibolag börjat att testa hybridssystem där vattenkraften kombineras med stationära batterier<sup>39</sup>. Batterierna kan hjälpa till att dämpa de riktigt snabba svängningarna kopplat till vindkraftens

<sup>39</sup> IVA (2020), <https://www.iva.se/globalassets/bilder/iva-aktuellt/iva-nr-5-2020-lagupplöst.pdf>

variabilitet. På så sätt kan batteriet hantera de mycket snabba förändringarna och vattenkraften de mer långsamma förändringarna i systemet.

Luleå Tekniska universitet har tillsammans med en rad forskningsorganisationer nyligen (2021) startat ett forskningsprojekt<sup>40</sup> för att undersöka två nya metoder för att minska slitaget på vattenturbiner när de används som reglerkraft. Målet med projektet är att utveckla, implementera och validera ett aktivt flödeskontrollsystem för att minska slitage (tryckpulsationer) på vattenturbiner när de körs på ett sätt de inte är designade för. Projektet ska möjliggöra att vattenturbinerna kan köras med ett mer varierande flöde som optimerar användningen av vattenresurser men också kan bidra positivt till klimatförändringseffekterna.

I arbetsgruppen diskuterades även behovet av att vattendomar i högre grad tillåts bli flexibla så att större regleramplituder tillåts.

#### 4.3 EXTREMA NEDERBÖRDSMÄNGDER PÅ OLIKA TIDSSKALOR – EXEMPEL PÅ MÖJLIGA ÅTGÄRDER

Åtgärder för att minska konsekvenserna av extrema nederbörds mängder på olika tidsskalor handlar framförallt om att säkra anläggningar och tillfartsvägar mot översvämningar och att ras- och skredsäkra känsliga områden.

Beredskapen för säkerhet är en naturlig del av vattenkraften och här finns lång erfarenhet och mycket arbete som gjorts och görs inom branschen, se mer i bilaga A om hur dammsäkerhetsarbetet bedrivs i Sverige idag.

Exempel på några åtgärder för att minska effekterna av extrema nederbörds mängder som har diskuterats i arbetsgruppen är att säkra tillfartsvägar och transformatorstationer mot skyfall och översvämningar liksom att skred- och rassäkra känsliga delar av älvsträckor.

Bland annat Kumar m.fl. (2011) och EEA (2019) framhåller det potentiella behovet av att investera i turbinblad med ökad motståndskraft mot slitage på grund av ökade mängder sedimentpartiklar i vattnet, som bedöms öka i ett förändrat klimat. Denna typ av åtgärder kan t.ex. vidtas i samband med uppgraderingar/reinvesteringar i kraftverken.

Ytterligare åtgärder som har diskuterats i arbetsgruppen är att branschen bör säkerställa att villkoren i kommande miljötillstånd för vattenkraften tar höjd för ett förändrat klimat. Inte minst på grund av den bedömda risken för fler perioder med höga nederbörds mängder. Det kan innebära att i villkor tillåta ökade marginaler för regleramplituden.

Det är även viktigt att på förhand bygga upp ett nära samarbete mellan berörda myndigheter och organisationer för samordnade insatser vid höga flöden. IAEA (2019) lyfter också behovet av ökad underhållsfrekvens och underhållsåtgärder på grund av risken för ökade mängder drivgods under perioder med höga flöden.

<sup>40</sup> AFC4Hydro <https://www.ltu.se/research/subjects/Stromningslara/Nyheter-och-aktuellt/Nya-metoder-mojliggor-en-mer-flexibel-vattenkraft-1.208037>

#### 4.4 TORRPERIODER – EXEMPEL PÅ MÖJLIGA ÅTGÄRDER

Bland annat SMHI och Kumar m.fl. (2011) lyfter vikten av en ökad samordning och kontakt mellan vattenkraftbolag och myndigheter, organisationer och närliggande verksamheter och närboende vad gäller vattenresursplanering i de delar av landet där risk för vattenbrist redan i dag förekommer.

Stensen (2019b) har lyft att man i den kommande omprövningen av vattenkraften även bör ta hänsyn till risker för vattenbrist och fundera på åtgärder för att säkra vattentillgången i vissa områden (till exempel vad gäller möjligheterna att använda reglermagasin för detta ändamål).

Från myndighetshåll har det också diskuterats en rad åtgärder som kan komma att få konsekvenser för vattenkraften kopplat till vattenbrist och perioder med låga flöden i vattendragen. Inom ramen för den nationella planen för omprövning av vattenkraften föreslås införande av högre mintappningsnivåer just i perspektivet av ett förändrat klimat. Något som också nämns i planen<sup>41</sup> kopplat till torka och påverkan på vattendrag är åtgärder i form av faunapassager. Detta skulle vara en form av klimatanpassning av ekosystem, för att underlätta för vattenorganismer att förflytta sig inom avrinningsområdet vid perioder med lite vatten men också när vattentemperaturerna ökar i vattendragen. En invändning kan vara att s.k. ekologiskt motiverad tappning under torrperioder förutsätter en relativt stor planerbar vattenvolym. Det senare kan vara svårt att upprätthålla under längre torrperioder. Hur dessa förslag påverkar vattenkraftens förutsättningar behöver därför klarläggas.

I arbetsgruppen diskuterades möjligheterna till mer flexibla miljötillstånd och villkor för att ha en marginal för perioder med ökad risk för vattenbrist.

#### 4.5 ISBILDNING – EXEMPEL PÅ MÖJLIGA ÅTGÄRDER

Inom arbetsgruppen har diskuterats vikten av att föra över kunskap inom branschen vad gäller isrelaterade problem mellan dem som idag har erfarenheten till dem som kommer behöva anpassa sig till nya förutsättningar i ett förändrat klimat. Som beskrivs i kapitel 3 bedöms bältet för nollgenomgångar troligen kommer att förflytta sig norrut i landet, vilket innebär att andra delar av landet i framtiden kommer att behöva hantera problem kopplat till ett ökat antal nollgenomgångar jämfört med hur det ser ut idag. I diskussionerna med arbetsgruppen framhölls därför att man inom branschen överför kunskap som idag finns hos anläggningsägare i södra delen av landet till anläggningsägare längre norrut.

Casselgren m.fl. (2015) och Karlsson (2009) lyfter ett antal möjliga åtgärder som idag används vid kravisrelaterade problem kopplat till igenfrusna intag. Det handlar dels om mekanisk rensning på intagsgrindar, dels om uppvärmning av intagsgaller. Även Casselgren m.fl. framhåller vikten av överföring av kunskap inom branschen. Författarna lyfter att kunskapen främst finns hos servicetekniker vid de enskilda anläggningarna som idag får hantera denna typ av problem.

<sup>41</sup> <https://www.havochvatten.se/download/18.1bd43926172bdc4d64881cc1/1593175482312/bilaga-2-nationell-plan-moderna-miljovillkor.pdf>

Problemen uppstår oftast vid enstaka tillfällen och särskilda förhållanden som oftast kan bero på lokala, mycket platsspecifika förhållanden. Det finns därför relativt lite dokumentation om hur förhållandena ser ut när problemen väl har uppstått. Förbyggande åtgärder handlar, som nämns i kapitel 3.5, om att sänka hastigheten på vattnet och därigenom "lägga isen".

Casselgren m.fl. nämner vidare åtgärder för andra isrelaterade problem, t.ex. fastfrusna spilluckor och isproppar, i form av luftaggregat och infravärme som förhindrar igenfrysning.

#### 4.6 ÖKAD VATTENTEMPERATUR – EXEMPEL PÅ MÖJLIGA ÅTGÄRDER

Brodin (2020) lyfter behovet av att ytterligare öka kunskapen om invasiva arter i form av att bevaka och inventera förekomsten. Dels för att om möjligt kunna förebygga utbredning, dels för att kunna hantera konsekvenserna. Lennartsson & Simonsson (2007), Settele m.fl. (2014) och IUCN (2021) framhåller också behovet av att ytterligare öka kunskapen om hur specifikt klimatförändringar påverkar ekosystemen i vattenmiljöerna vid ökade vattentemperaturer.

Lindblom & Holmgren (2016) och Brodin (2020) lyfter fram behovet av att vid design av konnektivitetshöjande åtgärder som t.ex. faunapassager vara medveten om och hantera den ökade risken för spridning av invasiva arter.

För att förebygga slitage vid varmare vattentemperaturer kan det finnas behov av att investera i korrosionsresistenta turbiner vid uppgradering av kraftverk (se t.ex. Kumar m.fl., 2011).

#### 4.7 SKOGSBRÄNDER – EXEMPEL PÅ MÖJLIGA ÅTGÄRDER

Som diskuteras i delrapporten om bioenergi i föreliggande projekt (Hansson m.fl., 2021) är det troligt att Sverige kommer att vidta ett flertal åtgärder för att minska risken för skogsbränder.

Exempel på åtgärder för vattenkraften som bland annat nämns i Jenvald & Morin (2019) är att man bör se över beredskapsplaner, skapa direktkanaler till räddningstjänst och arbeta med omvärldsbevakning för att upptäcka tidiga risker för bränder. Vidare är det viktigt att tidigt bygga upp resurser för och samordning av eftersläckning och brandbevakning. Andra direkta åtgärder är att säkerställa tillfartsvägar till dammanläggningar under störda förhållanden.

Utöver detta kan man se till att bygga upp personalens beredskap och etablera samarbeten mellan kraftbolagen för att kunna hjälpas åt vid stora bränder vad gäller tillgång till extra personal och utrustning.

## 5 Fallstudie av förändrad tillrinning i Ljungan

Som tidigare nämnts har det på grund av budgetmässiga skäl inte varit möjligt att ta fram nya hydrologiska klimatscenarier. Projektet har förlitat sig på redan tillgängligt material om framtidens klimat, baserat på atmosfäriska klimatmodeller. Ingen klimatmodellering har gjorts inom projektet. Kompletterande hydrologisk modellering i stor skala skulle kräva resurser som inte har funnits.

Efter diskussioner och önskemål från arbetsgruppen för vattenkraften kunde projektet ändå, med hjälp av Vattenfall R&D och genom att SMHI internt omallokerade resurser, genomföra en mindre fallstudie för att modellera produktionskonsekvenserna av en förändrad tillrinning i Ljungan. Arbetet genomfördes av Jonas Funkqvist och Lars Abrahamsson på Vattenfall R&D och hydrologerna Peter Berg och Yeshewatesfa Hundecha på SMHI. Lisa Göransson och Viktor Walter på Chalmers Energiteknik tog fram indata till vattenkraftmodellen i form av prissignaler att styra produktionsoptimeringsmodellen mot.

I detta avsnitt ges en mycket översiktlig beskrivning av metod och resultat från fallstudien. Fallstudien ledde vidare till ett fortsättningsprojekt som beskrivs nedan i avsnitt 6.3.

### 5.1 LJUNGANS ÄLVSYSTEM

Ljungan är en 40 mil lång älv som har sitt källflöde i Sylarna i Härjedalen och mynnar ut i Bottenhavet söder om Sundsvall (se Figur 23). Det är Sveriges åttonde största vattenkraftsälv med 15 större vattenkraftverk som ägs av fyra bolag. Den installerade sammanlagda effekten uppgår till 610 MW som producerar en årlig elproduktion på mellan ca 1,5 och ca 2,3 TWh.



Figur 23 Karta som visar Ljungans läge med källflöde i Härjedalen och utlopp i Bottenhavet.

## 5.2 METODIK FÖR ATT BERÄKNA TILLRINNING TILL MAGASINEN LÄNGS LJUNGAN IDAG OCH I ETT FRAMTIDA KLIMAT

Den lokala tillrinningen i varje magasin som används för vattenkraftproduktion längs Ljungan togs fram av SMHI genom beräkningar med S-HYPE-modellen.

S-HYPE är en hydrologisk modell för Sverige som bygger på den generella hydrologiska modellen HYPE (*Hydrological Predictions for the Environment*). I nuvarande version av modellen är Sverige indelat i omkring 40 000 delavrinningsområden med en medianstorlek på 7 km<sup>2</sup>. Modellen använder dygnsnederbörd och dygnsmedeltemperatur för att beräkna variabler för hydrologi och vattenkvalitet med en tidsupplösning på dygnsnivå. Som en grund för beräkningen av tillrinningen till magasinerna längs Ljungan användes dygnsmedelvärden på vattenflödet i älven.

Totalt omfattade beräkningarna sjutton magasin längs älven (se karta i Figur 4). Tillrinningen för referensperioden beräknades baserat på modellsimuleringen under perioden 1971-2000 genom att driva modellen med observerad data för dygnsnederbörd och temperatur från den meteorologiska databasen PTHBV som används operationellt vid SMHI för hydrologiska simuleringar. Det lokala



medelvärde av tillrinning till magasinen utgjordes av vattenflödet mellan eftervarandra liggande magasin efter att man försummat utflöden från uppströms liggande magasin.

Tre olika hydrologiska år (1 oktober – 30 september) valdes ut för att representera ett "normalt år" (50:e percentilen), ett torrt år (10:e percentilen) samt ett våtår (90:e percentilen). Den förändrade tillrinningen för dessa typår analyserades sedan för tre klimatscenarier: +1,5, +2 samt +3 graders global uppvärmning.

### 5.3 ÖVERSIKTLIG BESKRIVNING AV VATTENFALLS PRODUKTIONSOPTIMERINGSMODELL FÖR LJUNGAN

För beräkningarna av vattenkraftsproduktionen i Ljungan i ett förändrat klimat använde Vattenfall en produktionsoptimeringsmodell av älvsystemet. Modellen beräknar en optimal produktionsplan för älven utifrån ett antal målfunktioner och parametrar. Stationerna i modellen beskrivs med ekvivalenter, dvs. det är ett linjärt samband mellan turbinvattenföring och producerad effekt. Magasinen beskrivs med tabeller som anger hur volym och vattenstånd är relaterade. Ett antal villkor (vattenhushållningsbestämmelser) kan kopplas till respektive magasin.

I Figur 4 (kapitel 1) visas en schematisk karta av Ljungans älvsystem med dess kraftstationer och reglermagasin.

### 5.4 RESULTAT

Modellanalysen visade på allmänt ökande tillrinningsenergier vid högre temperaturnivåer. Ju högre temperatur, desto mer nederbörd och tillrinning vilket innebar ökad elproduktion i alla scenarier jämfört med dagens elproduktion i Ljungan.

Tillrinningsenergierna ökad från omkring +1,5 TWh i torråret i 1,5-gradersscenariot upp till ca +3,5 TWh i våtåret vid 3-gradersscenariot. Idag producerar Ljungans vattenkraftssystem omkring 1,5-2 TWh el årligen. Modellanalysen indikerade därmed att elproduktion i Ljungan vid 3 graders global uppvärmning skulle kunna öka till omkring det dubbla jämfört med idag.

Allmänt sågs en spetsigare och tidigare vårflod i de fjällnära stationerna, vilket avviker från den allmänna bedömningen för vattenkraften i Sverige om ett mer utjämnat årsmönster. Detta syntes däremot i de mer nedströms liggande och kustnära stationerna som uppvisade en plattare och mer utjämnad årscykel i ett förändrat klimat. En spetsigare vårflod i de fjällnära, högt liggande stationerna skulle potentiellt kunna innebära problem för systemet vad gäller flexibilitetsförmåga och vattendomar. Det senare blev framförallt tydligt i 3-gradersscenariot där villkor för maxspill överskreds i vissa magasin i Ljungan, en tendens som även sågs i 2-gradersscenariot.

### 5.5 DISKUSSION

Vilka slutsatser som egentligen kan dras av denna mindre fallstudie är mycket osäkert. Resultaten indikerar en ökad produktionspotential för Ljungan och

potentiella svårigheter för systemet vad gäller flexibilitetsförmåga och att hantera dagens vattendomar.

Endast en älv har modellerats och frågan är dels hur representativ Ljungan är i jämförelse med andra älvar i Sverige och vilken systempåverkan de förändringar som indikeras kan få, dels vad som är en metodpåverkan från modellerna på resultaten.

För att svara på detta behövs mer forskning och inte minst en utveckling av modellerna för att i högre grad kunna koppla dagens befintliga vattenkraftsmodeller på älvnivå till elsystemmodellerna i syfte att visa på den möjliga systempåverkan av klimatförändringen beaktat framtidens förändrade elsystem. Detta är något som kommer att tas vidare inom ramen för det fortsättningsprojekt som beskrivs i avsnitt 6.3.

## 6 Diskussion och slutsatser

**Klimatförändringens direkta påverkan på vattenkraften handlar främst om hur förändringar i nederbörd och temperatur leder till förändrad tillrinning och därmed förändrade förutsättningar för elproduktion och reglerförmåga på olika tidsskalor. Dessutom finns indirekt påverkan genom förändringar i konsumtionsmönster och annan produktion, eftersom vattenkraften är den främsta resursen att anpassa till nya behovssituationer i kraftsystemet både på kort och lång sikt.**

**I jämförelse med andra energislag är det för vattenkraften svårare att dra generella slutsatser om klimatförändringens konsekvenser. Detta beror dels på de enskilda kraftverkens och dammarnas mycket platspecifika förutsättningar, dels på att vattenkraften är starkt beroende av och påverkat av resten av elsystemet.**

I föregående kapitel har vi beskrivit de olika väder- och klimatrelaterade faktorer som på olika sätt kan komma att påverka vattenkraften i ett framtida klimat samt de möjliga konsekvenserna för vattenkraften av dessa. I detta kapitel sammanfattas de huvudsakliga resultaten och slutsatserna som har dragits utifrån främst de diskussioner som har förts inom arbetsgruppen för vattenkraft tillsammans med analyser och litteraturstudier av projektgruppen.

Som redan har nämnts har projektet utgått från nederbörd som ett mått på tillrinningen i ett framtida klimat. Denna projektrelaterade begränsning betyder att inga kvantifieringar av produktionspotential i ett framtida klimat har kunnat göras samt att mer säkra slutsatser om konsekvenser kopplat till framtida tillrinning har varit svårare att dra.

### 6.1 PROJEKTETS HUVUDSAKLIGA SLUTSATSER OM VATTENKRAFTEN

Projektets viktigaste slutsatser från analyserna i detta projekt kan delas in i tre huvudsakliga grupper: för det första klimatförändringens påverkan på vattenkraften vad gäller de viktigaste klimatfaktorerna, för det andra övriga identifierade konsekvenser av klimatförändringen och för det tredje de mer systemrelaterade slutsatserna om vattenkraftens roll i ett förändrat energisystem i ett förändrat klimat.

En av de tydligaste slutsatserna som har dragits i projektet och som är viktig att framhålla inledningsvis är att konsekvenserna av olika aspekter av klimatförändringen på vattenkraften är mycket platspecifika och därför svåra att bedöma på en mer generell nivå. För att kunna göra det krävs högupplösta hydrologiska klimatscenarier som sedan kan användas för modellering av det svenska vattenkraftssystemet.

Slutsatserna vad gäller klimatförändringens påverkan på vattenkraften för viktigaste klimatfaktorerna sammanfattas i följande punkter:

- Nederbörd och temperatur är de två viktigaste klimatfaktorerna för vattenkraften. Bägge dessa klimatfaktorer hänger delvis ihop vad gäller påverkan på vattenkraften eftersom temperaturen avgör om nederbörden faller som regn eller snö, när i tiden som snösmältningen sker samt också om det uppstår isbildning.
- En ökad nederbörd och en ökad tillrinning kan potentiellt innebära möjligheter till ökad elproduktion, huruvida den kan realiserats är dock avhängig en rad olika faktorer som till exempel värdet på el, hur stor avdunstningen är samt tillgång till lagringskapacitet i vattenkraftmagasinen.
- En ökad mängd nederbörd över året och en mindre andel som faller som snö förändrar säsongsmönstret, tidpunkten för vårfloden och vattenkraftens årscykel. Detta påverkar produktionsplaneringen och förutsägbarheten i planeringen på årsbasis, förändringar som börjar bli märkbara i redan idag.

Utöver mer generella förändringar i nederbörd och temperatur över året och över säsong har projektet identifierat ett antal klimatkonsekvenser som kan påverka vattenkraften i större eller mindre grad i framtiden:

- Ökade vattentemperaturer riskerar orsaka fler problem med invasiva arter som kan skapa problem för vattenkraften, framförallt i södra Sverige. Det gäller t.ex. arter som vandarmusslan och vattenpest vilka redan idag ställer till problem för vattenkraftsägare i sydöstra Sverige.
- Ökade temperaturer innebär att bältet med frekventa nollgenomgångar flyttar norrut. Isrelaterad påverkan på vattenkraften kommer därför potentiellt i högre grad behöva hanteras i andra delar av landet än där man idag har erfarenhet kring denna problematik.
- Om vi skulle se fler varma och torra somrar som den 2018, med en stor påverkan på driftsförutsättningarna för vattenkraften i södra Sverige på grund av långvarig torka, kan vi se problem med tillhandahållande av systemtjänster i det lokala elsystemet. Det finns även en möjlig risk för konkurrens om vatten som resurs samt problem med att uppfylla miljövillkor för mintappning.
- En ökad risk för fler skogsbränder kan lokalt påverka elproduktionen eftersom det försvårar tillgängligheten till anläggningarna och kan innebära tidvis stora störningar i elnätet.
- I de kommande omprövningarna av vattenkraften och då tillsyns- och tillståndsmyndigheter beslutar om miljöanpassningsåtgärder för enskilda kraftverk är det viktigt att även ta höjd för vilka eventuella möjligheter och utmaningar som klimatförändringen kan skapa för branschen.

Slutligen, vad gäller de mer systemrelaterade frågorna kring vattenkraften i ett förändrat klimat har projektet dragit följande slutsatser:

- Konsekvenserna för vattenkraften av klimatförändringen beror i hög grad på vattenkraftens roll och värde i det framtida elsystemet.
- Med största sannolikhet kommer utvecklingen av det framtida el- och energisystemet, tillsammans med kommande miljöanpassningskrav att ha en större påverkan för vattenkraften än den klimatförändring vi ser framför oss. Viktiga faktorer för utvecklingen av elsystemet är den snabba tillväxten av vindkraft med tilltagande variabilitet på elmarknaden och förväntningar på en kraftigt ökad elanvändning och som skapar ett tryck att använda vattenkraften

med förändrat körmönster. Det betyder dock inte att klimatförändringens påverkan på vattenkraften är obetydlig, och den måste beaktas vid utformningen av morgondagens elsystem.

- Vattenkraftsföretagen är mycket bra på att hantera både vädermässiga och kraftsystemmässiga variationer, men klimatförändringen innebär ytterligare en komponent som måste beaktas i den långsiktiga planeringen av vattenkraften.

## 6.2 DISKUSSION

Vattenkraften är ett väderberoende kraftslag som i hög grad påverkas av dagens och framtida klimat, och klimatförändringen kan komma att påverka vattenkraften på ett antal olika sätt.

Eftersom det är stora skillnader mellan enskilda kraftverk och dammar vad gäller plats- och anläggningsspecifika förutsättningar är det för vattenkraften svårt att dra generella slutsatser om klimatförändringens konsekvenser (se t.ex. Hamududu & Killingtveit, 2010; Schaepli, 2015).

### 6.2.1 Förändringar i nederbörd och temperatur har en tydlig påverkan på vattenkraften i framtidens klimat

Nederbörd och temperatur är de två viktigaste klimatfaktorerna för vattenkraften (se t.ex. Bonjean Stanton m.fl., 2016; IAEA, 2019). Dessa klimatfaktorer hänger delvis ihop vad gäller påverkan på vattenkraften eftersom temperaturen avgör om nederbörden faller som regn eller snö, när i tiden som snösmältningen sker samt också om det uppstår isbildning. Främst handlar det om hur förändringar i nederbörd och temperatur leder till en förändrad tillrinning och därmed förändrade förutsättningar för elproduktion och reglerförmåga på olika tidsskalor (se t.ex. Hamududu & Killingtveit, 2012; François m.fl., 2014; Gaudard m.fl.; 2016; EEA, 2019; IAEA, 2019).

Flera tidigare studier, som t.ex. Gode m.fl., (2007) och SOU (2007), har dragit slutsatsen att klimatförändringen sannolikt innebär en ökad produktionspotential för vattenkraften i Sverige. I detta projekt har vi inte kunnat styrka att denna slutsats är robust eftersom omvärldsförutsättningarna för vattenkraften i Sverige idag och framöver ser helt annorlunda ut. En kombination av flera omvärldsfaktorer bedöms få stor påverkan på vattenkraftens förutsättningar och funktion i det framtida elsystemet. Det handlar bland annat om omställningen av energisystemet med en allt större andel vindkraft och sol, samtidigt som behov av el förväntas öka kraftigt inom transport- och industrisektorn.

Den generella trenden som lyfts i många studier (se t.ex. Farinotti m.fl., 2011; Vliet m.fl., 2013; Bonjean Stanton m.fl., 2016; Anghileri m.fl., 2018; EEA, 2019; IAEA, 2019) är dock att det i de norra delarna av Europa syns en ökad potential för vattenkraftsproduktion, medan tendensen är den motsatta i de södra och östra delarna av Europa inklusive Alpregionen.

En ökad nederbörd och en ökad tillrinning kan alltså potentiellt innebära möjligheter till ökad elproduktion. Huruvida den kan realiseras är dock avhängig

en rad olika faktorer som till exempel värdet på el, hur stor avdunstningen är samt tillgång till lagringskapacitet i vattenkraftmagasinen (se t.ex. Energimyndigheten, 2014; Ebinger & Vergara, 2011). En ökad mängd nederbörd över året och en mindre andel som faller som snö förändrar säsongsmönstret, tidpunkten för vårfloden och vattenkraftens årscykel (se t.ex. Kumar m.fl.; 2011; Hamududu & Killingtveit, 2012; Gaudard m.fl., 2016). Detta påverkar produktionsplaneringen och förutsägbarheten i planeringen på årsbasis, förändringar som börjar bli märkbara redan idag (se t.ex. Anghileri m.fl., 2018; IAEA, 2019).

### 6.2.2 Ytterligare väder- och klimatrelaterade faktorer som kommer att påverka vattenkraften i ett förändrat klimat

Vid diskussionerna i arbetsgruppen har en rad konsekvenser av klimatförändringen diskuterats utöver de mer generella förändringarna i nederbörd och temperatur.

Mer specifikt handlar det om problem kopplat till ökade vattentemperaturer, förflyttningar av bältet för nollgenomgångar, risken för skogsbränder och potentiella problem i södra Sverige med torra.

Vad gäller ökade vattentemperaturer på grund av klimatförändringen riskerar det att orsaka fler problem med invasiva arter som kan skapa problem och kostnader för vattenkraften (se t.ex. Rahel & Olden, 2008; Havs- och Vattenmyndigheten, 2016; Benateau m.fl., 2019), framförallt i södra Sverige. Det gäller t.ex. arter som vandarmusslan och vattenpest vilka redan idag ställer till problem för vattenkraftsägare i sydöstra Sverige.

Klimatförändringen kan innebära både positiva och negativa konsekvenser för vattenkraftsproduktionen i kalla regioner vad gäller förändrade isbildningsförhållanden.

En positiv konsekvens kan vara en generellt kortare issäsong vilket minskar problematiken, medan negativa konsekvenser kan kopplas till en ökad frekvens av vintrar med fler nollgenomgångar (se t.ex. Gebre m.fl., 2014). Projektets analyser pekar på att ökade temperaturer generellt innebär att bältet med frekventa nollgenomgångar flyttar norrut i Sverige. Det innebär att isrelaterad påverkan på vattenkraften i högre grad kan komma att behöva hanteras i andra delar av landet än där man idag har erfarenhet kring denna problematik. Som framhålls av bland annat Karlsson (2009), Gebre m.fl. (2013) och Timalina m.fl. (2015) kan isrelaterad problematik innebära relativt stora ekonomiska förluster för vattenkraften, främst på grund av antingen tvingande eller övervägda begränsningar i produktionen. I diskussionerna med arbetsgruppen har därför lyfts behovet av att man inom branschen överför den kunskap som idag finns hos anläggningsägare i södra delen av landet till anläggningsägare längre norrut (en generell åtgärd vad gäller isrelaterad problematik som även lyfts av t.ex. Casselgren m.fl., 2015).

I diskussionerna inom projektet har även lyfts problemen som syntes i södra Sverige under den torra sommaren 2018. Även om just 2018 års sommar var ovanlig och det inte ses någon allmän tendens till att denna typ av mycket varma och torra somrar kommer att öka i Sverige framöver på grund av den fortsatta klimatförändringen så finns det dock en risk för torra i södra, främst sydöstra,

Sverige. Inom gruppen konstaterades att om vi skulle se fler somrar som den 2018, då det var en stor påverkan på driftsförutsättningarna för vattenkraften i södra Sverige på grund av långvarig torka, kan vi komma att se samma problem med tillhandahållande av systemtjänster i det lokala elsystemet. Det skulle även finnas en möjlig risk för konkurrens om vatten som resurs och, som flera vattenkraftsägare i södra Sverige upplevde 2018, leda till problem med att uppfylla miljövillkor för mintappning.

Som konstateras i de klimatscenarioanalyser som har gjorts inom projektet bedöms det som troligt med en ökad risk för skogsbränder i ett fortsatt förändrat och varmare klimat, särskilt i södra Sverige. I diskussionerna i arbetsgruppen har man särskilt lyft risken för en lokal påverkan på elproduktion vid en ökad risk för fler skogsbränder. Dels för att det försvårar tillgängligheten till anläggningarna, dels för att det tidvis kan innebära stora störningar i elnätet och därmed elförsörjningen. Detta blev tydligt inte minst i den stora branden i Kårböle vid Ljusnan sommaren 2018.

Under diskussionerna i arbetsgruppen har man också vid flera tillfällen lyft de kommande omprövningarna av vattenkraften och vikten av att man även tar höjd för vilka eventuella möjligheter och utmaningar som klimatförändringen kan skapa för branschen.

Det handlar till exempel om att i tillståndsprocessen även ta hänsyn till klimatförändringen vad gäller miljöanpassningsåtgärder, regleramplituder och villkor för spill då tillståndsmyndigheter beslutar om villkor och åtgärder för enskilda kraftverk och/eller älvsträckor. Till exempel lyfter Lindblom & Holmgren (2016) och Brodin (2020) behovet av att vid design av konnektivitetshöjande åtgärder som t.ex. faunapassager vara medveten om och hantera den ökade risken för spridning av invasiva arter.

### **6.3 KONSEKVENSERNA FÖR VATTENKRAFTEN AV KLIMATFÖRÄNDRINGEN BEROR I HÖG GRAD PÅ VATTENKRAFTENS ROLL OCH VÄRDE I DET FRAMTIDA ELSYSTEMET**

Under diskussionerna i projektet har det blivit mycket tydligt att konsekvenserna för vattenkraften av klimatförändringen i hög grad beror på vattenkraftens roll och värde i det framtida elsystemet. Som framhålls av bl.a. Gaudard m.fl., 2016 är vattenkraften, i dess centrala roll som reglerkraft, starkt beroende av och påverkat av resten av el- och energisystemet.

Som har diskuterats i arbetsgruppen och som också lyfts av t.ex. Gaudard m.fl. (2016), Anghileri m.fl. (2018) och Schaepli (2015) är det troligt att systemfaktorerna kan komma att överskugga storleken på effekterna av klimatförändringen. Dock innebär klimatförändringen ytterligare en komponent att ta hänsyn till (se t.ex. Schaepli, 2015). Som lyfts av t.ex. Mukheibir (2013) och Gaudard m.fl. (2016) är det framförallt vindkraftens framtida utveckling men också hur stort det framtida el- och effektbehovet blir i framtiden som kommer ha betydande konsekvenser på vattenkraften och dess förutsättningar framöver. Elsystemets utveckling med en allt högre andel icke-planerbar elproduktion kommer att innebära att kraven och förväntningarna på vattenkraftens förmåga och betydelse för att kunna balansera

systemet förändras. Vilka konsekvenser vi tror oss se utifrån klimatförändringen på vattenkraften beror alltså på vilket värde och vilken roll vi tillmäter vattenkraften vid bedömningen. Det gäller redan idag, men blir i än högre grad betydande när vi ska göra en bedömning av konsekvenserna i ett framtida system och ett framtida klimat.

Som framhålls av bl.a. Schaepli (2015) är det dock av stor vikt att förstå och öka kunskapen om klimatförändringens påverkan på vattenkraften. Inte minst hur klimatförändringen påverkar hur vattenkraften kommer att kunna bidra i det framtida elsystemet. Vattenkraftsföretagen är dock mycket bra på att hantera både vädermässiga och kraftsystemmässiga variationer. Men, som Gaudard m.fl. lyfter innebär klimatförändringen ytterligare en komponent som måste beaktas i den långsiktiga planeringen av vattenkraften framöver.

#### 6.4 FORTSATT FORSKNING OCH UTVECKLING INOM OMRÅDET

För att ytterligare öka kunskapen inom området startade Energiforsk hösten 2020 med stöd från Energimyndigheten och vattenkraftsföretagen/energiföretagen forskningsprojektet KLIVA (*Klimatförändringarnas inverkan på vattenkraften*).

KLIVA bygger vidare på de lärdomar som har dragits under detta projekt. Med hjälp av SMHI:s hydrologiska klimatmodeller kommer projektet att analysera hur ett förändrat klimat kan påverka förutsättningar för vattenkraften och i förlängningen hur det kan komma att påverka den långsiktiga utvecklingen av Sveriges elsystem samt hur detta i sin tur ställer nya krav på vattenkraften.

Förhoppningen är att skapa en djupare förståelse för inte bara utmaningarna men också möjligheterna som kan finnas av till exempel ökad nederbörd och förändrad tillrinning totalt sett över året i kombination med en förändrad årsdynamik.

KLIVA utförs av hydrologer på SMHI och energisystemforskare på Chalmers, KTH, Profu och Energiforsk. Mer om projektet finns att läsa på Energiforsks hemsida.

I fråga om klimatförändringars påverkan på dammsäkerhet inleds nu en fördjupad uppföljning av Klimatkommitténs samlade utvärdering inom området som genomfördes 2008-2011. Den fördjupade uppföljningen planeras, liksom förra gången, att genomföras i nära samverkan mellan Svenska kraftnät, kraft- och gruvindustrin samt SMHI (se vidare i Bilaga A till denna rapport).



## 7 Referenser

- Andréasson, J., Bergström, S., Gardelin, M., German, J., Gustavsson, H., Hallberg, K. & Rosberg, J. (2011). Dimensionerande flöden för dammanläggningar för ett klimat i förändring – metodutveckling och scenarier. Elforsk rapport 11:25.
- Anghileri, D., Botter, M., Castelletti, A., Weigt, H. & Burlando, P. (2018). A Comparative Assessment of the Impact of Climate Change and Energy Policies on Alpine Hydropower. *Water Resources Research*, 54, 9144-9161.
- Arheimer, B. & Lindström, G. (2015). Climate impacts on floods: changes in high flows in Sweden in the past and future (1911-2100): *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 771-784, 2015.
- Benateau, S., Gaudard, A., Stamm, C. & Altermatt, F. (2019). Climate change and freshwater ecosystems: Impacts on water quality and ecological status. Hydro-CH2018 Project. Federal Office for the Environment (FOEN), Bern, Switzerland.
- Berga, L. (2016). The Role of Hydropower in Climate Change Mitigation and Adaptation: A Review. *Engineering 2* (2016) 313-318.
- Bergström, S., Jóhannesson, T., Adalgeirsdóttir, G., Andreassen, L.M., Beldring, S., Hock, R., Finndís Jonsdóttir, Rogozova, S. & Veijalainen, N. (2007). Hydropower, Chapter 6 i: Impacts of Climate Change on Renewable Energy Sources: Their role in the Nordic energy system. A comprehensive report resulting from a Nordic Energy Research Project. Ed: Fenger, J., Nord 2007:003.
- Bladh, J. (2016). Vattenkraftens förmåga att balansera stora mängder vindkraft. NEPP-seminarium den 17 mars 2016.  
[http://www.nepp.se/etapp1/pdf/Bladh\\_vattenkraftens.pdf](http://www.nepp.se/etapp1/pdf/Bladh_vattenkraftens.pdf)
- Blomqvist, P., Gode, J., Kjellström, E. & Strandberg, G. (2021). Klimatförändringarnas inverkan på elnätet. *Energiforsk rapport 2021:740*.
- Bonjean, M.C., Dessai, S. & Paavola, J. (2016). A systematic review of impacts of climate variability and change on electricity systems in Europe. *Energy* 109 (2016) 1148-1159.
- Brodin, T. (2020). Bilaga 5.10. Främmande arter. Vägledning för fisk- och faunapassager. Havs och Vattenmyndigheten.
- Casselgren, J., Hellström, G. & Lundberg, A. (2015). Recent river ice research and river ice management in Scandinavia. *Energiforsk rapport 2015:203*.
- De Ridder, G. (2020). Lightning in Scandinavia – Historical and Future conditions in a High-resolution Regional Climate Model. Master Thesis, Meteorologiska institutionen, Stockholms universitet.
- Ebinger, J. & Vergara, W. (2011). Climate Impacts on Energy Systems. Key Issues for Energy Sector Adaptation. World Bank Study.

- EEA (2019). Adaptation challenges and opportunities for the European energy system. Building a climate-resilient low-carbon energy system. EEA Report, No 01/2019. European Environment Agency.
- Eklund, A., Stensen, K., Alavi, G. & Jacobsson, K. (2018). Sveriges stora sjöar idag och i framtiden Klimatets påverkan på Väneren, Vättern, Mälaren och Hjälmaren. Kunskapssammanställning februari 2018. SMHI, Klimatologi, Nr 49. ISSN: 1654-2258.
- Energimyndigheten (2014). Vad avgör ett vattenkraftverks betydelse för elsystemet? Underlag till nationell strategi för åtgärder inom vattenkraften. ER 2014:12.
- Energimyndigheten & Havs- och Vattenmyndigheten (2014). Strategi för åtgärder i vattenkraften. Avvägning mellan energimål och miljö kvalitetsmålet Levande sjöar och vattendrag. Havs- och vattenmyndighetens rapport 2014:14.
- Engblom, A., Hjerdt, N. & Stensen, K. (2020). Uttag, utsläpp och påverkade sträckor inom vattenkraften. Delprojekt inom RU Ökad information om vattendrag. Bilaga 5. SMHI Hydrologi 126.
- Farinotti, D., Usselman, S., Huss, M., Bauder, A. & Funk, M. (2011). Runoff evolution in the Swiss Alps: projections for selected high-alpine catchments based on ENSEMBLES scenarios. *Hydrological Processes*, Vol. 26, Issue 13, 30 June 2012, p. 1909-1924.
- François, B., Hingray, B., Hendrickx, F. & Creutin, J.D. (2014). Seasonal patterns of water storage as signatures of the climatological equilibrium between resource and demand. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 3787-3800, 2014.
- Fremling, S., Karlin, T., Raab, B., Edquist, E. & Eklund, A. (2012). Is på sjöar och älvar. Erfarenheter sammanställda av statshydrolog Sven Fremling 1951. Bearbetade 1991 och 1997 av Thore Karlin och Birgitta Raab. SMHI Hydrologi Nr 117.
- Gaudard, L., Gabbi, J., Bauder, A. & Romerio, F. (2016). Long-term Uncertainty of Hydropower Revenue Due to Climate Change and Electricity Prices. *Water Resource Management* (2016) 30: 1325-1345.
- Gebre, S., Alfredsen, K., Lia, L., Stickler, M. & Tesaker, E. (2013). Review of Ice Effects on Hydropower Systems. *Journal of Cold Regions Engineering*, Vol. 27, No. 4, December 1, 2013.
- Gebre, S., Timalisina, N. & Alfredsen, K. (2014). Some Aspects of Ice-Hydropower Interaction in a Changing Climate. *Energies* 2014, 7(3), 1641-1655.
- Gode, J., Axelsson, J., Eriksson, S., Holmgren, K., Hovsenius, G., Kjellström, E., Larsson, P., Lundström, L. & Persson, G. (2007). Tänkbara konsekvenser för energisektorn av klimatförändringar. Effekter, sårbarhet och anpassning. Elforsk rapport 07:39.
- Hamududu, B. & Killingtveit, Å. (2010). Estimating Effects of Climate Change on Global Hydropower Production. Conference: Hydropower 2010, Tromsø, Norway.

- Hamududu, B. & Killingtveit, Å. (2012). Assessing Climate Change Impacts on Global Hydropower. *Energies* 2012, 5(2), 305-322.
- Hansson, J., Hellsten, S., Gode, J., Kjellström, E. & Strandberg, G. (2021). Klimatförändringarnas inverkan på bioenergi. *Energiforsk rapport 2021:739*.
- Havs- och Vattenmyndigheten (2005). *Dreissena polymorpha*, Vandrar mussla. Faktablad, uppdaterad senast 20 december 2016, Sture Nellbring.
- Havs- och Vattenmyndigheten (2015). Miljöåtgärder i vattenkraftverk. Sammanställning av åtgärder för att nå god ekologisk status och god ekologisk potential. Havs- och vattenmyndighetens rapport 2015:26.
- Havs- och Vattenmyndigheten (2017). Vattenpest, *Elodea canadensis*. Informationsblad, september 2017.
- Havs- och Vattenmyndigheten, Energimyndigheten och Svenska Kraftnät (2019). Förslag till nationell plan för omprövning av vattenkraft. Med beskrivning av vattenmiljö och effektiv tillgång till vattenkraftsel samt identifierade behov för fortsatt arbete. Bilaga 2 till Nationell plan för moderna miljövillkor. <https://www.havochvatten.se/download/18.1bd43926172bdc4d64881cc1/1593175482312/bilaga-2-nationell-plan-moderna-miljovillkor.pdf>
- Holst, J. & Thanke Wiberg, J. (2019). Dammsäkerhet i ett förändrat energisystem. *Energiforsk rapport 2019:620*.
- IAEA (2019). *Adapting the Energy Sector to Climate Change*. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2019.
- IHA (2019). *Hydropower Sector Climate Resilience Guide*. International Hydropower Association. London, United Kingdom. [www.hydropower.org](http://www.hydropower.org)
- IPCC (2013). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2018). Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.
- IUCN (2021). *Invasive Alien Species and Climate Change*. International Union for Conservation of Nature, Issues Brief. February 2021.
- IVA (2015). *Elproduktion. Tekniker för produktion av el*. IVA-projektet Vägval el.

- Jacob, D. m.fl. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14, 563-578 (2014).
- Jansson, R. m.fl. (2015). Future changes in the supply of goods and services from natural ecosystems: Prospects for the European North. *Ecology and Society*, 20(3):32. September 2015.
- Jenvald, J. & Morin, M. (2019). Skogsbranden 2018 – erfarenheter ur ett dammsäkerhetsperspektiv. *Energiforsk rapport 2019:614*.
- Karlsson, J. (2009). Isrelaterade produktionsförluster inom storskalig vattenkraft. Examensarbete, Luleå tekniska universitet, Civilingenjörsprogrammet Maskinteknik, Institutionen för Tillämpad fysik, maskin- och materialteknik. Avdelningen för energiteknik.
- Kjellström, E., Strandberg, G. & Lin, C. (2021). Förändringar i klimatet som påverkar energisektorn i Sverige. *Energiforsk Rapport 2021:745*.
- Krönert, F., Holtz, C., Dyab, L., Yeomans Rundqvist, G., Sahlén, K., Pettersson, K., Yuen Lasson, K., Badano, A. & Xylia, M. (2020). Lösningar för det svenska kraftsystemets utveckling. En rapport till Skellefteå Kraft. SWECO, 2020-10-13.
- Kumar, A., Schei, T., Ahenkorah, A., Caceres Rodriguez, R., Deverna, J.-M., Freitas, M., Hall, D., Killingtveit, Å., Liu, Z. (2011). Hydropower. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Changes Mitigation [Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlömer, S., von Stechow, C. (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Lehner, B., Czisch, G. & Vassolo, S. (2005). The impact of global change on the hydropower potential in Europe: a model-based analysis. *Energy Policy* 33 (2005) 839-855.
- Lennartsson, T., & Simonsson, L. (2007). Biologisk mångfald och klimatförändringar. Centrum för Biologisk Mångfald, april 2007, SLU.
- Lindblom, E. & Holmberg, K. (2016). Den småskaliga vattenkraftens miljöpåverkan och samhällsnytta. En syntesstudie. IVL Svenska Miljöinstitutet. Nr B 2258, april 2016.
- Länsstyrelsen Dalarna (2017). Dalälvens vattenkraftssystem. Energiproduktion och reglerkraftnytta samt påverkan på vattenflöden och vattennivåer. Rapportnummer 2017:03.
- Löfblad, R. (2020). Miljörättsliga aspekter kring effektökning i vattenkraftverk. Del 3 – Den nationella planen för omprövning av vattenkraft samt eventuella ändringar avseende organisationen för vattenförvaltningen i Sverige. NEPP, oktober 2020.
- Majone, B., Villa, F., Deidda, R. & Bellin, A. (2016). Impact of climate change and water use policies on hydropower potential in the south-eastern Alpine region. *Science of the Total Environment*. Vol. 543, Part B, 1 February 2016, p. 965-980.

- Mukheibir, P. (2013). Potential consequences of projected climate change impacts on hydroelectricity generation. *Climatic Change* (2013) 121:67-78.
- NEPP (2014). Reglering av ett framtida svenskt kraftsystem. NEPP rapport, nov 2014.
- NEPP (2016). Fortsättning – Reglering av ett framtida svenskt kraftsystem. NEPP Rapport Feb 2016.
- NEPP (2019). Varför utnyttjas inte all vattenkraft under ansträngda tidsperioder på elmarknaden? Resultat i korthet, November 2019.  
[https://www.nepp.se/pdf/varfor\\_utnyttjas\\_inte\\_all\\_vattenkraft.pdf](https://www.nepp.se/pdf/varfor_utnyttjas_inte_all_vattenkraft.pdf)
- NEPP (2020a). Insikter och vägval i energiomställningen – slutrapport från NEPP:s andra etapp. [https://www.nepp.se/pdf/Insikter\\_och\\_vagval.pdf](https://www.nepp.se/pdf/Insikter_och_vagval.pdf)
- NEPP (2020b). Eleffektfrågan – utmaningar och lösningar.  
<https://www.nepp.se/pdf/Eleffektfragan.pdf>
- Rahel, F.J. & Olden, J.D. (2008). Assessing the effects of climate change on aquatic invasive species. *Conservation Biology*, Vol. 22, No. 3, June 2008, p. 521-533.
- Rydén, B., Unger, T., Sköldberg, H., Bruce, J., Walsh, R., Iuvchik, T. & Montin, S. (2018). Flexibilitet – i en ny tid. Hur mycket flexibilitet behövs i det svenska elsystemet i framtiden? Slutrapport, maj 2018.
- Schaepli, B. (2015). Projecting hydropower production under future climates: a guide for decision-makers and modelers to interpret and design climate change impact assessments. *WIREs Water, Advanced Review*, Vol. 2, Issue 4., July/August 2015, p. 271-289.
- Settele, J., Scholes, R., Betts, R., Bunn, S., Leadley, P., Nepstad D., Overpeck, J.T., & Taboada, M.A. (2014). Terrestrial and inland water systems. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R. and White, L.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 271-359.
- SGI (2012). Skredrisker i Göta älvdalen i ett förändrat klimat. Slutrapport Del 2 – Kartläggning. Göta älvutredningen 2009-2011. Statens geotekniska institut. Linköping 2012.
- Sharma, S., Blaggrave, K., Magnuson, J.J., O'Reilly, C.M., Oliver, S., Batt, R.D., Magee, M.R., Straile, D., Weyhenmeyer, G.A., Winslow, L. & Woolway, I. (2019). Widespread loss of lake ice around the Northern Hemisphere in a warming world. *Nature Climate Change* 9, 227-231 (2019).
- Sjökvist, E., Abdoush, D. & Axén, J. (2019). Sommaren 2018 – en glimt av framtiden? SMHI Klimatologi Nr 52, 2019.

Stensen, K., Tengdelius-Brunell, J., Sjökvist, E., Andersson, E., & Eklund, A. (2017). Vattentemperaturer och is i Mälaren - Beräkningar för dagens och framtidens klimutförhållanden, SMHI Klimatologi Rapport nr 41, Norrköping.

Stensen, K., Krunegård, A., Rasmusson, K., Matti, B. & Hjerdt, N. (2019a). Sveriges vattentillgång utifrån perspektivet vattenbrist och torka – Delrapport 1 i regeringsuppdrag om åtgärder för att motverka vattenbrist i ytvattentäkter. SMHI Hydrologi 120. Oktober 2019.

Stensen, K., Matti, B., Rasmusson, B. & Hjerdt, N. (2019b). Modellstudie för att undersöka åtgärder som påverkar lågflöden – Delrapport 2 i regeringsuppdrag om åtgärder för att motverka vattenbrist i ytvattentäkter. SMHI Hydrologi Nr 121, 2019.

Svenska Kraftnät (2019). Dammar och dammteknik. En introduktion. Ärendenummer SVK 2019/3255.

Svenska Kraftnät, Svensk Energi, SveMin & SMHI (2011). Dammsäkerhet och klimutförändringar. Slutrapport från Kommittén för dimensionerande flöden för dammanläggningar i ett klimutförändringsperspektiv. December 2011.

Söder, L. (2014). På väg mot en elförsörjning baserad på enbart förnybar el i Sverige: en studie om behov av reglerkraft och överföringskapacitet. Version 4.0. 2014-06-22. KTH.

Thanke Wiberg (2014). Local Impacts of Climate Change on Fortum's Hydropower Production. Examensarbete inom teknikområdet Energi och Miljö, KTH, Stockholm.

Timalsina, N.P., Alfredsen, K.T. & Killingtveit, Å. (2015). Impact of climate change on ice regime in a river regulated for hydropower. Can. J. Civ. Eng. 42: 634-633 (2015).

van Vliet, M.T.H., Vögele, S. & Rübhelke, D. (2013). Water constraints on European power supply under climate change: impacts on electricity prices. Environ. Res. Lett. 8 (2013) 035010 (10pp)

WMO (2020). State of the Global Climate 2020 - Provisional report  
[https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice\\_display&id=21804#.YBv1fCV7muV](https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21804#.YBv1fCV7muV)

Åstrand, S. & Persson, F. (2017). Metod för analys och hantering av drivgod. Energiforsk rapport 2017:446.

## Bilaga A: Dammsäkerhet

*Följande bilaga är ett bidrag från Flödeskonferensen<sup>42</sup> och den ger en övergripande beskrivning av dammsäkerhet i ett förändrat klimat.*

### Bakgrund om dammsäkerhet

Kunskapen om klimat och förändringar av detsamma har under flera årtionden utvecklats avsevärt. Samhällets utsläpp av växthusgaser har redan påverkat klimatet och ytterligare förändringar är att vänta inom den tekniska livslängden för dammanläggningar. Klimatet i Sverige förändras mot varmare och mer nederbördsrikt jämfört med idag, även om det finns skillnader mellan olika regioner och säsonger.

Vattencykeln är nära kopplad till meteorologiska förhållanden men flertalet frågeställningar rörande dammanläggningar kräver en hydrologisk ansats, exempelvis trender, dynamik och extremer för is, snö och vattenföring. I ett framtida klimat kan det inte uteslutas att hydrologiska extremer ändrar karaktär eller att ogynnsamma förhållanden kan sammanfalla på ett sätt som inte förekommer idag. Vidare kan förändringar i driftsmönster och omvärldsfaktorer som beror av klimatförändringar eller utvecklingen av energisystemet innebära förändrade säkerhetsmarginaler. Effekter av ett förändrat klimat är relevant ur ett dammsäkerhetsperspektiv, med avbördningskapacitet och avbördnings säkerhet i särskilt fokus.

I Sverige sker förändringar av klimatet och omvärldsfaktorer med betydelse för dammanläggningar. Antalet berörda anläggningar är potentiellt stort och tidsperspektivet för anpassningsåtgärder långt. För att kartlägga sårbarhet och möta behov på regional eller nationell skala behöver klimatfrågan behandlas löpande och strukturerat.

### Dammsäkerhet i ett klimat i förändring

I flera avseenden styr ovanliga eller extrema händelser kravbilden inom dammsäkerhetsområdet, medan vanligt förekommande förhållanden samt relativt stor säsongs- och mellanårsvariation hanteras inom normal drift för elproduktion. Förändringar i extremer är således av stor betydelse för dammanläggningar, både sett till storlek och förekomst.

### Tillrinning

Extrem tillrinning har en särställning för dammsäkerhet och är en aspekt av klimatförändringar som analyserats under snart 20 år av vattenkraftbranschen (KFR, SOU 2007, Klimkomm 2011). Svenska kraftnät, Energiföretagen Sverige och SveMin har i samverkan med SMHI tagit fram Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar. Huvudmännen för riktlinjerna och SMHI samverkar inom ramen för den s.k. Flödeskonferensen som verkar för

<sup>42</sup> Skrivet av Maria Bartsch, Svenska Kraftnät och Kristoffer Hallberg, WSP.

att riktlinjerna ska vara ändamålsenliga och utvecklas, samt att tillämpningen ska vara enhetlig.

Tillrinning och dess dynamik påverkas av en mängd faktorer och förändringar är inte enbart en följd av meteorologiska förhållanden. Hydrologiska analyser har visat sig nödvändiga för att spegla huvuddragen i den hydrologiska cykeln, tidsförlopp samt inverkan av vattenreglering. I Sverige finns regioner som har principiellt olika säsongsdynamik för vattenföring och olika bakomliggande processer för extrema flöden vilka tenderar att förändras olika i ett förändrat klimat. Dammanläggningar har anpassats till rådande lokala förhållanden och vattenhushållning genom den projektering som gjorts och den efterföljande prövningen i vatten- och miljödomstolar. Känslighet för förändringar i t.ex. höga flöden är kopplat till förändringens storlek men även till befintliga marginaler vid respektive anläggning.

Extrem tillrinning är en kombination av många olika faktorer som den mängd snö som finns i terrängen och som kan smälta, magasinens storlek och förmåga att lagra vårfloeden, det regn som kan falla under snösmältningen eller under höstperioder då regleringsmagasinen kan vara fyllda, den temperatur som leder till att nederbörd faller som snö eller regn och som även styr hastigheten i avsmältning av snö, markens fuktighet och vegetationsperiodens längd. Alla dessa faktorer hanteras inom den metodik som, i enlighet med riktlinjerna, ligger till grund för beräkning av det dimensionerande flödets storlek och tidpunkt under året. I flera olika studier har dessa olika faktorer studerats separat och tillsammans.

Arbetet med tillämpning av riktlinjerna har ökat kunskapen om de flöden som kan inträffa vid dammanläggningarna, och har sedan 1990-talet föranlett ett stort antal åtgärder för att öka säkerhetsmarginalerna vid dammanläggningar. Beräkningsmetodiken har kommit att tillämpas inte endast för dimensionering av dammanläggningar, utan har blivit standard vid beräkning av extrema flöden och översvämningar i landet. Riktlinjerna inkluderar även rekommendationer för användningen av klimatscenarier för dimensioneringsberäkningar i ett föränderligt klimat.

Klimatanpassningsåtgärder för dammar har relativt lång genomförandetid, då de typiskt inbegriper tillståndprocesser, tekniska utmaningar och stora kostnader. Tidsperspektivet för att vid behov genomföra såväl omfattande icke-strukturella som strukturella åtgärder är relativt långt, vilket återspeglas i de långa tidsperspektiv som tillämpas i klimat- eller känslighetsanalyser. Av tidsperspektivet följer att ett stort utfallsrum av klimatprojektioner som beskriver möjliga klimatförändringar behöver beaktas.

#### *Andra klimatrelaterade faktorer*

Även andra faktorer än tillrinningar har betydelse för driften av dammanläggningarna med potentiell påverkan på säkerheten. Det kan vara temperatur och isförhållanden vilket inbegriper frågeställningar om när is lägger sig på magasinet eller älvsträckan, om istäcket ligger varaktigt under vintern eller bryts upp, istäckets isolerande påverkan på det flödande vattnets temperatur så att det inte närmar sig nollpunkten med risk för isbildning på intag till kraftstationen och behov att spilla genom utskoven, isbildning på och runt utskov om de behöver



användas under vintern, upprepade frostsprängningar av is på betongkonstruktioner som leder till ökad degradering och behov av ett ökat underhåll.

I en väl fungerande verksamhet innebär dessa typer av effekter inte någon direkt påverkan på dammsäkerheten. Men om driften och underhållet av dammanläggningarna inte hanteras systematiskt och om några av dessa faktorer inträffar samtidigt kan även situationer som inte är extrema i sig påverka dammsäkerheten. Faktorer som is- och drivgodsproblematik, vindgenererade vågor, vindsnedställning av magasinet, fränslag i kraftstationen m.m. kan då förvärra en redan svår situation under perioder med höga flöden.

Utöver direkta effekter på anläggningarna är det även viktigt att ta höjd för hur klimatiförändringar kan påverka förutsättningarna att kunna övervaka och fjärrstyra anläggningarna, liksom att säkerställa att drift- och underhållspersonal kan ta sig till anläggningarna under svåra väderförhållanden. Det kan gälla exempelvis situationer då skyfall, stormfällan och skogsbränder försvårar framkomligheten på tillfartsvägar och tillgängligheten till anläggningarna.

***Kort historik – viktiga forsknings och utvecklingsinsatser (med relevanta referenser)***

På initiativ av Flödeskonferensen<sup>43</sup> bildades år 2002 Kommittén för komplettering av Flödeskommitténs riktlinjer, KFR. I slutrapporten år 2005 nämns en övergripande strategi för hur klimatfrågan bör hanteras, vilket i korthet sammanfattas i att frågan fortlöpande bevakas och att flexibilitet och marginaler skapas där så är lämpligt.

I Klimat- och sårbarhetsutredningens slutbetänkande (SOU 2007:60) lämnades flera förslag som gavs till Svenska kraftnät i regleringsbrev för år 2008 att utreda i samverkan med kraftbranschen, SMHI och gruvindustrin. Uppdraget sammanfattas i följande punkter:

- Analys av hur förändringar i tillrinningsförhållanden och drift av vattenkraftssystem kan påverka dimensionerande flöde samt risken för översvämningar.
- Utveckling av metoder för samt beräkning av flöden av betydelse för dammar av flödesdimensioneringsklass I och II i ett förändrat klimat.
- Utveckling av metoder för kartläggning av sårbarheten hos dammar av flödesdimensioneringsklass I och II, med avseende på klimatiförändringar, samt genomförande av en sådan kartläggning.
- Analys av gruvdammars säkerhet med avseende på långsiktiga klimatiförändringar.

De fyra frågeställningarna med koppling till varandra behandlades i samverkan mellan Svenska kraftnät, Svensk Energi (numera Energiföretagen Sverige), SveMin och SMHI genom "Kommittén för dimensionerande flöden för dammar i ett klimatiförändringsperspektiv", i det följande benämnd Kommittén. Arbetet

<sup>43</sup> Samverkansforum för huvudmännen för Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar, dvs. Svenska kraftnät, Energiföretagen och SveMin samt SMHI.

företogs under år 2008 – 2011 och dokumenterades i Kommitténs slutrapport<sup>44</sup>. Rekommendationer gavs för såväl hur dimensioneringsberäkningar för dammar bör anpassas till ett klimat i förändring som för aspekter att inkludera i en nationell strategi för att hantera klimatförändring i dammsäkerhetsarbetet. En viktig slutsats var att även om de förändringar som signalerats är på 50-100 års sikt kan det vara lämpligt att redan nu utarbeta och tillämpa ett förhållningssätt som beaktar klimatfrågan.

Sedan 2011 har kunskapsbasen vidareutvecklats inom flera nyckelområden. Kommitténs rekommendationer har inarbetats i inarbetats i riktlinjerna för bestämning av dimensionerande flöden och tillämpas vid förnyade dimensioneringsberäkningar längs hela vattendrag och för fördjupade studier och anpassningsåtgärder för enskilda anläggningar. Nedan följer ett utdrag från riktlinjerna (2015):

*Mot bakgrund av bland annat de osäkerheter som ett förändrat klimat tillför, bör beräkningsförutsättningarna ses över regelbundet. Jämförelser mellan inträffade flödessituationer och beräknade dimensionerande flöden bör utföras fortlöpande. Systemets känslighet för klimatförändringar bör analyseras genom utnyttjande av klimatscenarier. Härvid bör alternativa klimatscenarier som beskriver höga respektive mindre höga antaganden om framtidens utsläpp av växthusgaser användas. Vidare bör minst tre olika globala klimatmodeller utnyttjas, för vart och ett av de olika antagandena om framtida utsläpp av växthusgaser. För nedskalning till den regionala skalan bör en vetenskapligt förankrad och dokumenterad metod användas. För närvarande rekommenderas dynamisk nedskalning.*

*Nya förutsättningar kan leda till att dimensioneringsberäkningarna behöver revideras. Osäkerheter får dock inte hindra att nödvändiga dammsäkerhetshöjande åtgärder vidtas. På grund av dessa osäkerheter bör dessutom flexibilitet och marginaler skapas där så är rimligt.*

De stora kraftverksälvarna är komplexa system med många dammar som påverkar varandra, och att såväl flödeshantering som förslag på ombyggnadsåtgärder kräver samverkan mellan flera intressenter. Under senare år har dammägare låtit utföra förnyade flödesdimensioneringsberäkningar med nyare modellgenerationer, och även känslighetsanalyser för klimatförändringar har tillkommit i stor utsträckning. Omräkningen av dimensionerande flöden med dagens moderna modellverktyg och beräkningsansatser på vissa älvsträckor ger högre dimensionerande flöden och nivåer, vilket kan föranleda nya utrednings- och åtgärdsbehov.

I operationell flödesdimensionering har metodiken för att nyttja klimatscenarier använts i flertalet större och mindre vattendrag. 2020 pågick en andra omgång flödesdimensioneringsberäkningar och studier till följd av dessa för Luleälven, Skellefteälven, Umeälven, Ångermanälven, Indalsälven och Göta älv. Beräkningar har också utförts för Gideälven, Moälven, Nätraån, Lagan, Nissan, Viskan, Gullspångsälven och Upperrudsälven och för särskilda dammanläggningar i Dalälven och Klarälven. Vidare pågick åtgärder, eller planering av åtgärder, för att

<sup>44</sup> Dammsäkerhet och klimatförändringar. Slutrapport från Kommittén för dimensionerande flöden för dammanläggningar i ett klimatförändringsperspektiv. Svenska kraftnät et. al. 2011.

öka säkerhetsmarginalerna för ett 20-tal av vattenkraftindustrins dammanläggningar med de högsta konsekvenserna i händelse av haveri vid höga flöden.

Energiforsk har inom sitt dammsäkerhetstekniska utvecklingsprogram genomfört avgränsade tekniska utredningar med betydelse för analys, riskbedömning och flödesdimensionering (exempelvis Elforsk 14:27, SMHI Klimatologi Nr 51, Energiforsk 2020:645). Vidare har konsekvenser vid dammhaveri kartlagts genom beredskapsplaneringsprojekt i ett 20-tal kraftverksälvar.

Sedan tidpunkten för Kommitténs slutrapport år 2011 har även lagstiftning och flertalet styrdokument av betydelse förändrats, exempelvis Miljöbalken med dess konsekvensbaserade klassificering av dammanläggningar, Riktlinjer för dammsäkerhet (RIDAS) år 2019, Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar år 2015 samt den Nationella strategin för klimatanpassning år 2018 och Förordning om myndigheters klimatanpassningsarbete år 2018.

Breda politiska överenskommelser har lagt fast målbilden om ett helt förnybart energisystem år 2040 och en nationell plan för moderna miljövillkor för vattenkraften. Genom Energiforsk har dammsäkerhetsaspekter av ett förändrat energisystem (Energiforskrapport 2019:620) och miljöanpassningar (Energiforskrapport, 2019:573) belysts samt erfarenheter från skogsbrand (Energiforskrapport, 2019:614) dokumenterats.

### **Framåtblick – vidare utvecklingsinsatser inom dammsäkerhet och klimatiförändringar**

Det faktum att det gått ca tio år sedan Klimatkommittén slutförde en samlad utvärdering av frågor om dammsäkerhet i ett klimat i förändring och omvärldsförändringar som omställningen av energisystemet, ny lagstiftning m.m. har aktualiserat behov av att genomföra en förnyad uppföljning av klimatiförändringars påverkan på dammsäkerhet.

Planering för en sådan samlad uppföljning inleddes 2020 kopplat till Flödeskonferensen. Syftet är att värdera klimatfrågans betydelse för dammsäkerheten och stärka utvecklingen vad gäller avbördningssäkerhet och klimatanpassning av dammar. Det övergripande målet är att tillgängliggöra aktuell och tillräcklig information som kan utgöra grund för strategiskt klimatanpassningsarbete rörande dammar. Denna fördjupade uppföljning planeras liksom 2008-2011 genomföras i nära samverkan mellan Svenska kraftnät, kraft- och gruvindustrin samt SMHI. I korthet planeras uppföljningen innehålla att:

- Sammanställa kunskap rörande klimatiförändringars påverkan på dammsäkerhet (extrem nederbörd, höga flöden, vinterförhållanden, skogsbrandrisk, framkomlighet på vägar etc).
- Analysera hur förändringar i tillrinningsförhållanden och drift av vattenkraftssystem kan påverka dimensionerande flöde samt risken för höga flöden.

- Genomföra en kartläggning av sårbarheten hos dammar i dammsäkerhetsklass A, B och C, med avseende på höga flöden och klimatförändringar.
- Utredda och beskriva hur den nationella strategin för klimatanpassning och dess principer bör tillämpas inom dammsäkerhetsområdet.



# KLIMATFÖRÄNDRINGARNAS INVERKAN PÅ VATTENKRAFTEN

Det svårare att dra generella slutsatser om klimatförändringens konsekvenser för vattenkraften jämfört med andra energislag. Det beror både på de enskilda kraftverkens förutsättningar och på att vattenkraften är starkt beroende av hur el- och energisystemet i övrigt utvecklas.

Den direkta påverkan på vattenkraften handlar främst om hur ändrad nederbörd och temperatur leder till en förändrad tillrinning och nya förutsättningar för elproduktion och reglerförmåga. Det blir också en indirekt påverkan genom ändrade konsumtionsmönster och annan produktion, eftersom vattenkraft är den resurs som framför allt används för att anpassa till nya behovs i kraftsystemet både på kort och lång sikt.

Vattenkraftsföretagen är bra på att hantera både vädermässiga och kraftsystemmässiga variationer, men klimatförändringen innebär ytterligare en komponent som man måste ta hänsyn till i den långsiktiga planeringen.

## Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. [www.energiforsk.se](http://www.energiforsk.se)