

Sötvatten – förvaltning och restaurering med förändrat klimat

Slutrapport från projektet FRESHREST
(Sötvattenslandskapet – förvaltning och
restaurering i förändrat klimat)

LEONARD SANDIN, SERENA DONADI, KERSTIN HOLMGREN,
EDDIE VON WACHENFELDT & DOUGLAS JONES

RAPPORT 6942 • OKTOBER 2020



Sötvatten – förvaltning och restaurering med förändrat klimat

Slutrapport från projektet FRESHREST
(Sötvattenslandskapet – förvaltning och restaurering i förändrat klimat)

Leonard Sandin, Serena Donadi, Kerstin Holmgren,
Eddie von Wachenfeldt & Douglas Jones

Beställningar

Ordertel: 08-505 933 40

E-post: natur@cm.se

Postadress: Arkitektkopia AB, Box 110 93, 161 11 Bromma

Internet: www.naturvardsverket.se/publikationer

Naturvårdsverket

Tel: 010-698 10 00

E-post: registrator@naturvardsverket.se

Postadress: Naturvårdsverket, SE-106 48 Stockholm

Internet: www.naturvardsverket.se

ISBN 978-91-620-6942-1

ISSN 0282-7298

© Naturvårdsverket 2020

Tryck: Arkitektkopia AB, Bromma 2020

Omslagsfoto: Anders Asp



Förord

Rapporten presenterar resultaten från syntesprojektet ”Sötvattenslandskapets förvaltning och restaurering i förändrat klimat (FRESHREST)”. Det är en av två syntesanalyser inom utlysningen från 2017 med rubriken; Förvaltning av limniska miljöer i ett föränderligt klimat. Forskningsresultaten syftar till att sammanställa kunskap om förvaltning av akvatiska miljöer för att gynna biologisk mångfald och ekosystemfunktioner i ett förändrat klimat.

Limniska ekosystem förväntas drabbas hårt av klimatförändringar genom höjda luft- och vattentemperaturer, förändrade flöden och nederbörd. Klimatförändringarna kan också förstärka effekterna av annan mänsklig påverkan.

Projektet har finansierats med medel från Naturvårdsverkets miljöforskningsanslag vilket syftar till att finansiera forskning till stöd för Naturvårdsverket och Havs- och vattenmyndighetens kunskapsbehov.

Denna rapport är författad av Leonard Sandin, Serena Donadi, Kerstin Holmgren och Douglas Jones, samtliga vid SLU, Institutionen för akvatiska resurser, samt Eddie von Wachenfeldt, SLU, Artdatabanken.

Författarna ansvarar för rapportens innehåll.

Naturvårdsverket september 2020

Innehåll

FÖRORD	3
1. SAMMANFATTNING	5
2. SUMMARY	8
3. SYFTE OCH FRÅGESTÄLLNINGAR	11
4. INTRODUKTION	12
5. VIKTEN AV VATTEN	14
6. SÖTVATTEN I SVERIGE	17
7. MÄNSKLIG PÅVERKAN PÅ VATTEN – MULTIPLA STRESSORER	20
8. KLIMATFÖRÄNDRINGSEFFEKTER PÅ VATTENMILJÖER I SVERIGE	23
9. RESTAURERING AV VATTENMILJÖER	26
10. EKONOMISKA KOSTNADER KOPPLADE TILL RESTAURERING	29
11. HUR PÅVERKAS RESTAURERING AV FÖRÄNDRAT KLIMAT	33
12. REKOMMENDATIONER	37
13. FORTSATT ARBETE OCH KUNSKAPSLUCKOR	40
14. PUBLIKATIONER OCH ANDRA KOMMUNIKATIONSINSATSER	41
15. TACK	43
16. KÄLLFÖRTECKNING	44

1. Sammanfattning

Limniska ekosystem förväntas drabbas hårt av klimatförändringar. Ett förändrat klimat kommer att påverka sötvattens ekosystem genom höjda luft- och vattentemperaturer, förändrade flöden och nederbörd. Klimatförändringarna kan också förstärka effekterna av annan mänsklig påverkan såsom t ex övergödning. Ett ekosystem under stress har samtidigt ofta en försämrad motståndskraft (resiliens) mot andra störningar. Redan idag används flera förebyggande åtgärder och restaureringsmetoder för att motverka effekter av klimatförändringar. Det råder dock ofta osäkerhet kring restaureringsmetodernas effektivitet och dessutom är metoderna i många fall platsspecifika.

Projektets mål var att sammanfatta kunskapsläget när det gäller klimatförändringar och dess påverkan på limniska ekosystem. Mer specifikt försökte vi att (1) identifiera nyckelbiotoper och arter som är i behov av skydd, (2) utvärdera effekter av klimatförändringar på limniska ekosystem utsatta för multipla stressorer (flera typer av påverkan som samtidigt påverkar ett ekosystem) och (3) bedöma den ekologiska effektiviteten i nuvarande (och möjligen framtida) restaureringsåtgärder i sötvatten.

Sverige är ett av världens sjö- och vattendragsrikaste länder i förhållande till ytan. Landets sjöar utgör ca 9 % av den totala landarealen och det finns ca 50 000 mil älvar, åar och bäckar som i ett gigantiskt kapillärnätverk förenar grundvatten, sjöar och våtmarker med havet. Ekosystem i sötvatten har utsatts och utsätts framgent för många typer av mänsklig påverkan vars kumulativa effekter kan försämra systemets förmåga att klara av miljöförändringar. Nu är uppvärmningshastigheten snabbare än någonsin, men förståelsen för potentiella synergistiska effekter av lokala påverkansfaktorer (till exempel dämning, förändrad markanvändning, näringsläckage) och klimat är fortfarande mycket begränsad. Detta försämrar vår förmåga att planera och anpassa effektiva åtgärder för bevarande och restaurering i sötvattens ekosystem.

Vi använde data från 283 svenska vattendrag för att undersöka möjliga kumulativa effekter av markanvändning, dämningar och klimat på abundans hos öring. Vi fann att ett varmare klimat ger en negativ inverkan på öringpopulationer i avrinningsområden med högre grad av vattenreglering där en uppvärmning på 6 °C resulterar i att abundansen av öring minskar med i genomsnitt 75 %. I avrinningsområden utan eller med lägre grad av vattenreglering ökade istället abundansen av öring något med ett varmare klimat. Jordbruk och urban markanvändning hade en synergistisk negativ effekt på öring. Abundansen av öring minskade i avrinningsområden med en högre andel urban miljö men bara i avrinningsområden som också hade en hög andel jordbruksmark (≥ 20 %). Resultatet tyder på att 1) minskad vattenreglering i form av dämning skulle kunna minska de negativa effekterna av klimatförändringar för öring och 2) restaureringsåtgärder som reducerar effekter från jordbruket skulle underlätta rehabiliteringen av öring i avrinningsområden med urbana miljöer.

Vi genomförde också en litteraturstudie för att undersöka klimatförändringens effekter på sötvattens ekosystem. Förändringar i fysiska och till viss del kemiska parametrar, var mer förutsägbara än de mer komplexa biologiska förändringarna. Högre temperaturer resulterar i mindre isbildning (inklusive minskande glaciärer) och snötäcke, samt en minskning av vårflödet – vilket är en viktig komponent i naturliga boreala sötvattens ekosystem. En allmän uppvärmning av vattnet bör främja ökningen och spridningen av varmvattenarter samt spridningen av invasiva arter (inkl. parasiter, vilka ofta gynnas av varmare vatten) medan man kan förvänta sig en minskning av kallvattenarter. Många av effekterna kopplade till uppvärmning beräknas orsaka fysiska eller kemiska förändringar, vilka i sin tur påverkar ekologiska processer i sötvattens ekosystemens näringsväv. Ur mänskligt perspektiv går de flesta förutspådda förändringarna från mer till mindre eftersträvningsvärda tillstånd.

Restaurering innebär att återskapa eller återföra ekosystemets abiotiska eller biotiska komponenter till dess naturliga eller ursprungliga tillstånd. I Sverige spenderade centrala myndigheter ca 491 miljoner SEK specifikt på restaurering av vattenmiljöer under perioden 1995–2011 och den totala restaureringsbudgeten uppgick till cirka 1 miljard SEK. Mer än 75% av medlen gick till restaurering av vattendrag och våtmarker. Nästan hälften av programmen för vattendragsrestaurering fokuserar på enskilda arter av fisk, mollusker och kräftor. I svenska sjöar har fysiska restaureringsåtgärder haft fokus på att höja vattennivån i tidigare sänkta sjöar, ekologiskt anpassa vattennivån i reglerade sjöar, sedimentmuddra övergödda sjöar, restaurera strandzonen på olika sätt, ta bort dämmen i sjöutlopp och ersätta dem med stentrösklar som håller vattennivå i rätt läge. I vattendrag har mycket av restaureringsåtgärderna fokuserat på återställande av vegetationen i kantzonen, habitatförbättringar i vattendraget, dammrivningar, omstrukturering av vattendragsfåran, fiskpassagelösningar, flödesförändringar och återkoppling av vattendraget till svämplanet. Många av dessa åtgärder kommer att fortsatt rekommenderas i ett förändrat klimat.

Kostnaden för att skapa ökad konnektivitet vid samtliga kraftverksdammar i Sverige har uppskattats till 18 miljarder SEK. En tidigare beräkning för att åtgärda bristande kontinuitet landade på upp till 2,2 miljarder SEK för vattendrag och 0,35–0,74 miljarder SEK för sjöar, totalt nästan 3 miljarder SEK vilket förmodligen är i underkant. Nödvändiga åtgärder för att uppnå gynnsam bevarandestatus för sötvattens naturtyper (enligt art- och habitatdirektivets definitioner), uppskattas till cirka 1 miljard SEK och 2,2 miljarder SEK, för områden innanför respektive utanför Natura2000. För vägtrummor och omläggning av vägar uppgår åtgärdsuppskattningen till 208 miljoner SEK, men kan uppgå till 1 miljard SEK när det gäller allmänna vägar. Tidigare har behovet för omläggning av vägtrummor vid skogsbilvägar uppskattats till 2–4 miljarder SEK och järnvägstrummor till 2–4 miljarder SEK.

Eftersom det är svårt att förutsäga var och i vilken utsträckning klimatförändringar kommer att påverka sötvattens ekosystem, är det en stor utmaning att förutsäga dess effekter på nuvarande och framtida planerade restaurerings-

åtgärder. Det är dock möjligt att förvänta sig ett antal generella och mer specifika klimatrelaterade förändringar vid planering av restaureringsåtgärder. Vi undersökte sex vanliga restaureringsåtgärder kopplade till fysiskt påverkade vattendrag och hittade 25 relevanta artiklar inom detta ämne. I de publicerade artiklar som var kopplade till klimatförändring förväntades åtgärder som dammrivning och återskapande av naturliga flödesregimer bli allt viktigare i ett föränderligt klimat. Rinnande vatten som är fritt från hinder (dammar) eller med mer naturliga flödesregimer kommer sannolikt behöva färre restaureringsåtgärder i framtiden för att bibehålla viktiga funktioner och biodiversitet. Ett restaurerat system i balans kan kanske till och med förhindra eller motverka kolonisation av invasiva arter.

Det finns många exempel på dåliga eller icke-fungerande faunapassager i vattendrag. Framtidens klimat kommer att sätta stor press på passageeffektiviteten då extremväder och nederbörd kommer att öka med efterföljande förändringar i flödesregim. Den potentiella positiva effekten av habitat- eller lekplatsrestaurering ser något begränsad ut i ett framtida förändrat klimat. Det finns många vetenskapliga studier som påpekar vikten av landbaserade restaureringsåtgärder (t ex restaurering av strandzonen och våtmarker) i ett förändrat klimat.

Vi ger nio rekommendationer för hur framtida restaurering i sötvatten bör ta hänsyn till ett förändrat klimat: (1) Förbättra kunskapen om vilka sötvattensresurser vi har i Sverige och hur de kommer påverkas av ett ändrat klimat, (2) Använd en holistisk syn i restaureringsarbetet, (3) Beakta möjliga klimateffekter i planeringsfasen, (4) Identifiera, restaurera och skydda kallvattenrefugier, (5) Åtgärda vandringshinder, (6) Behåll och ge vattnet plats i landskapet, (7) Integrera land- och vattenbaserad förvaltning, (8) Justera restaureringsmålen så att de är förenliga med framtida klimat och (9) Öka satsningen på utvärdering av genomförda åtgärder.

Denna kunskapsöversikt över förändrat klimat på sötvattensrestaurering visar att det finns många kunskapsluckor. Många frågor skulle behöva besvaras genom fortsatt forskning, men vi vill särskilt peka ut forskningsbehov inom följande områden: (1) Identifiering av kallvattenrefugier i vattenlandskapet, (2) Kumulativa stresseffekter och dess påverkan på sötvattens ekosystem, (3) Utvärdering av biologiska effekter i ett förändrat klimat och (4) Koppling mellan konnektivitet och restaureringsåtgärder.

2. Summary

Rivers and lakes are expected to be hit hard by climate change. A changing climate will affect freshwater ecosystems through increased air and water temperatures, changing flows and precipitation. Climate change can also reinforce the effects of other human impacts such as eutrophication. At the same time, an ecosystem under stress often has a poor resilience to other stressors. Already today, several preventive measures and restoration methods are being used to combat the effects of climate change. However, there is often uncertainty about the effectiveness of restoration methods, and in many cases the methods used are site-specific.

The aim of this project was to summarize the state of knowledge of climate change and its impact on freshwater ecosystems. More specifically, we tried to (1) identify key biotopes and species in need of protection, (2) evaluate the effects of climate change on freshwater ecosystems exposed to multiple stressors (several types of impacts that simultaneously affect an ecosystem), and (3) assess the ecological efficiency of current (and possibly future) restoration measures in freshwaters.

Sweden is one of the countries in the world with the most amount of freshwater in relation to surface area. The country's lakes make up about 9% of the total land area and there are about 50,000 kilometres of rivers and streams that connect groundwater, lakes and wetlands with the sea. Freshwater ecosystems have been, and are exposed to many types of human impacts, the cumulative effects of which may impair the system's ability to cope with environmental changes. Now the temperature increase is greater than ever, but the understanding of potential synergistic effects of local impact factors (e.g. damming, land use change, nutrient leakage) and climate are still limited. This impairs our ability to plan and implement effective conservation and restoration measures in freshwater ecosystems.

We used data from 283 Swedish streams to investigate possible cumulative effects of land use, dams and climate on trout abundance. We found that a warmer climate has a negative impact on trout populations in river basins with a higher degree of water regulation where a warming of 6 °C results in a reduction in the abundance of trout by an average of 75%. In river basins without or with a lower degree of water regulation, the abundance of trout increased slightly with a warmer climate. Agriculture and urban land use had a synergistic effect, where the abundance of trout decreased in river basins, with a higher proportion of urban environments but only in catchment areas which also had a high share of agricultural land ($\geq 20\%$). The results suggest that (1) reducing water regulation in the form of damming could reduce the negative effects of climate change on trout and (2) restoration measures that reduce agricultural effects would facilitate the rehabilitation of trout in catchments with an urban land-use.

We also conducted a literature study to investigate the effects of climate change on freshwater ecosystems. Changes in physical, and to some extent

chemical parameters, were more predictable than the more complex biological changes. Higher temperatures result in less formation of ice (including declining glaciers) and snow cover, as well as a reduction in spring flow – which is an important component of natural boreal freshwater flow regimes. General warming of water should promote the increase and spread of warm water species and the spread of invasive species (including parasites, which often benefit from warmer water) while one might expect a reduction in cold water species. Many of the effects linked to warming are predicted to cause physical or chemical changes, which in turn affect ecological processes in the food-webs of freshwater ecosystems. From a human perspective, most predicted changes go from more to less desirable states.

Restoration involves recreating or returning the aquatic abiotic or biotic components to its natural or original state. In Sweden, central authorities spent approximately SEK 491 million specifically on the restoration of aquatic environments during the period 1995–2011 and the total restoration budget amounted to approximately SEK 1 billion. More than 75% of the funds went to the restoration of watercourses and wetlands. Almost half of the restoration programmes focus on individual species of fish, molluscs and crayfish. In Swedish lakes, physical restoration measures have focused on raising water levels in previously lowered lakes, ecologically adapting the water level in regulated lakes, sediment dredging in eutrophic lakes, restoring the riparian zone in different ways and restoring lake outlets to keep water level at the correct level. In watercourses, much of the restoration measures have focused on the restoration of vegetation in the riparian zone, habitat improvements in the watercourse, dam removals, restructuring watercourses, fish passage solutions, flow changes and reconnecting watercourses with floodplains. Many of these measures will continue to be recommended in a changing climate.

The cost of creating increased connectivity at all dams in Sweden has been estimated at SEK 18 billion. An earlier estimate to address the lack of continuity landed at up to SEK 2.2 billion for watercourses and SEK 0.35–0.74 billion for lakes, a total of almost SEK 3 billion, which is probably low. The necessary measures to achieve favourable conservation status for freshwater nature types (according to the definitions of the Species and Habitats Directive), are estimated at approximately SEK 1 billion and SEK 2.2 billion, for areas inside and outside Natura2000. For road culverts and the diversion of roads, the measures amounts to c. SEK 208 million, but can amount to as much as SEK 1 billion in terms of public roads. In the past, the need for rebuilding road culverts on forest roads has been estimated at SEK 2–4 billion and railway culverts at SEK 2–4 billion.

Since it is difficult to predict where and to what extent climate change will affect freshwater ecosystems, it is a major challenge to predict its effects on current and future planned restoration measures. However, it is possible to expect a number of general and more specific climate-related changes in the planning of restoration measures. We examined six common restoration measures linked to physically affected waterways and found 25 relevant

articles related to restoration measures and climate change. In the published articles that we found, measures such as dam removals and re-creation of natural flow regimes are increasingly important in a changing climate. Running water that is free from obstacles (dams) or with more natural flow regimes is likely to need fewer restoration measures in the future to maintain important functions and biodiversity. A restored system in balance may even prevent or counteract the colonization of invasive species.

There are many examples of poor or non-functioning fauna passages in watercourses. The climate of the future will put a lot of pressure on passage efficiency as extreme weather and precipitation will increase with subsequent changes in flow regime. The potential positive effect of restoration of habitats or spawning areas looks somewhat limited in a future changing climate. There are many scientific studies that point out the importance of land-based restoration measures (e.g. restoration of the riparian zone and wetlands) in a changing climate.

We give nine recommendations for how future restoration in freshwaters should take into account a changing climate: (1) Improve knowledge of what freshwater resources we have in Sweden and how they will be affected by a changing climate, (2) Use a holistic view in restoration work, (3) Consider possible climate effects in the planning phase, (4) Identify, restore and protect cold-water refugia, (5) Remove migration barriers, (6) Keep and give the water room in the landscape, (7) Integrate land and water-based management (8) Adjust the restoration objectives to be compatible with future climates, and (9) Increase efforts to evaluate the implemented restoration measures.

This overview of changing climate on freshwater restoration shows that there are many knowledge gaps. Many questions would need to be answered through further research, but we would particularly like to emphasise research needs in the following areas: (1) Identification of cold water refugia in the water landscape, (2) Cumulative stress effects and its impact on freshwater ecosystems, (3) Evaluation of biological effects in a changing climate, and (4) The link between connectivity and restoration measures.

3. Syfte och frågeställningar

Limniska ekosystem förväntas drabbas hårt av klimatförändringar. Effekter på biologin orsakade av förändringar i temperatur och nederbördsmonster konstateras allt oftare i många sjöar och vattendrag. Dessa effekter kan sträcka sig från t ex förändringar i ett makrovertebratsamhälles funktionella egenskaper till förändringar i tillväxt, ämnesomsättning och beteende hos fisk. Klimatsimuleringar från SMHI visar att årsmedeltemperaturen i Sverige år 2100 kommer ligga 4–8 °C högre än perioden 1961–1990. Detta inger föga hopp om enkla lösningar på utmaningar kopplade till ett förändrat klimat vi kommer att ställas inför. Nya data, bland annat från detta projekt (kapitel 7), antyder att klimatförändringarna kan förstärka effekterna av annan mänsklig påverkan såsom t ex övergödning. I så fall behöver vi förstå hur vi kan mildra effekterna av dessa förändringar och hur vi kan skydda våra limniska ekosystem. Idag används både förebyggande åtgärder och restaureringsarbete för att motverka effekter av klimatförändringar. Det råder ofta osäkerhet kring åtgärdernas effektivitet och åtgärderna är ofta platsspecifika.

Projektets mål var att sammanfatta kunskapsläget om klimatförändringar och dess påverkan på limniska ekosystem för att: (1) identifiera nyckelbiotoper och arter som är i behov av skydd, (2) utvärdera effekter av klimatförändringar på limniska ekosystem utsatta för multipla stressorer (påverkan) och (3) bedöma den ekologiska effektiviteten i nuvarande (och möjligen framtida) restaureringsåtgärder i sötvatten. Planen var att sammanställa praktiska riktlinjer om hur framtida restaurerings- och bevarandeåtgärder bör modifieras för att fungera i ett föränderligt klimat och identifiera var sådana åtgärder bör sättas in.

4. Introduktion

Sötvatten är viktiga för många så kallade ekosystemtjänster som är de direkta eller indirekta nyttor som naturen tillhandahåller människan, till exempel: skydd mot översvämning, tillhandahållande av livsmedel, upprätthållande av biogeokemiska cykler, upprätthållande av vattnets kretslopp, tillhandahållande av dricksvatten, rekreation och naturarv (Bergek m. fl. 2017). Biologisk mångfald och ekosystem i sötvatten är samtidigt bland de mest hotade sett ur ett globalt perspektiv (Strayer & Dudgeon 2010). Det totala antalet arter kopplade till sötvatten som antingen utrotats eller är kraftigt hotade uppskattas till mellan 10 000 och 20 000 (Sala m.fl. 2000). Människan påverkar de globala vattenflödena bland annat genom dämmen och kanaliseringar som inverkar på hur organismer kan röra sig i vattenlandskapet, ökar avdunstningen och påverkar vattentemperatur, sedimenttransport och ger ett förändrat habitat. Mängden vatten i vattensystemen påverkas också genom vattenuttag för bevattning och industrier och förenkling av avrinningsområdenas nätverksstruktur, vilket minskar landskapets vattenhållande kapacitet (Sabater 2008). Förutom direkt påverkan på flödet påverkas sötvattensekosystem negativt av bland annat habitatförstörelse, överexploatering, vattenföroreningar och främmande arter (Malmqvist & Rundle 2002).

Ett framtida förändrat klimat kommer att påverka sötvattensekosystem genom ökade luft- och vattentemperaturer, förändrade flöden och nederbörd (Poff m.fl. 2002). Ökade temperaturer och förändrad hydrologisk regim med effekter på biota, har redan observerats i både sjöar (Smol m.fl. 2005) och vattendrag (Finn m.fl. 2010). Dessa klimateffekter beräknas i framtiden i än större utsträckning påverka ekosystem i sjöar och vattendrag, i kombination med andra typer av påverkan som förändrad markanvändning (Moss m.fl. 2009). Ett förändrat klimat förutsägs också förändra organismsamhällen i sjöar och vattendrag, inklusive fisk, insekter, musslor och kräftdjur (Rosset & Oertli 2011). För svenska förhållanden visar simuleringar att lufttemperaturen kommer att öka, främst i norr. Nederbörden kommer också att öka, främst vår och höst, medan vårflödena kommer minska i stora delar av landet medan vattenflödena kommer att öka vintertid (Eklund m.fl. 2015).



Bild 1. Kraftig algblooming av cyanobakterier i den övergödda Hjälmaran, juli 2013. Död fisk och musslor återfinns ofta efter sådana episoder då syrenivåerna i bottenvattnet sjunker drastiskt. Med ett varmare klimat kommer syrebristen i bottenvattnet att accentueras.

Det svenska miljö kvalitetsmålet ”Levande sjöar och vattendrag” kommer inte att nås (Naturvårdsverket 2019), därför att fysisk påverkan, övergödning, försurning och miljögifter fortfarande orsakar problem. Antalet restaureringsåtgärder i sötvatten har globalt sett ökat de senaste decennierna (främst i rinnande vatten) och Naturvårdsverket rekommenderar ökad utvärdering av effekterna av restaurering i sjöar och vattendrag. Vetenskapliga bevis på långsiktiga, positiva effekter av åtgärder är få och kunskap saknas om vilka faktorer som påverkar om åtgärderna har en positiv effekt eller inte (Sandin m.fl. 2017, Bennett m.fl. 2016, Hering m.fl. 2015). Befintlig kunskap behöver sammanställas, speciellt om hur förvaltningen av biologisk mångfald och ekosystem bör anpassas för att förebygga negativa effekter av klimatförändringar i sötvatten och hur nuvarande och framtida restaureringsåtgärder påverkas av ett förändrat klimat.

5. Vikten av vatten

Ur ett globalt perspektiv är det ont om sötvatten. Sötvattensystemens totala areal är svår att beräkna, men uppskattas vara mindre än 1 % av jordens yta (Strayer & Dudgeon 2010). Trots att sötvatten är relativt ovanligt hyser dessa ekosystem en hög biologisk mångfald; med uppskattningsvis 6–12 % av alla beskrivna arter (Abramovitz 1996, Dudgeon m.fl. 2006, Strayer & Dudgeon 2010) och hela 25% av alla kända ryggradsdjur lever i sötvattensystem (<https://www.iucn.org/theme/water/our-work/thematic-work/freshwater-biodiversity>). Biologisk mångfald i terrester och marin miljö minskar tydligt med ökande avstånd från ekvatorn, men det finns bara ett svagt samband mellan latitud och biodiversitet i sötvatten (Hillebrand 2004, Kinlock m.fl. 2018). Det kan delvis bero på att stora mängder sötvatten och sötvattenshabitat är koncentrerade till nordliga tempererade och boreala zoner.



Bild 2. Den rödlistade flodpärlmusslan trivs i strömmande och kalla vattendrag. Den är beroende av främst öring, men även lax, för att sprida sina larver i vattensystemet. Med varmare vatten, en utarmad laxfiskfauna och fragmenterade vattendrag hotas arten.

Förutom den stora mångfalden av arter, möjliggör sötvattensystem några av våra viktigaste ekosystemtjänster, inte minst rent dricksvatten (Tabell 5.1). Över 50% av världens befolkning bor närmare än 3 km (och bara 10% längre än 10 km) från en vattenförekomst (Kummu m.fl. 2011). Vårt beroende av sötvatten är uppenbart, men användningen av sötvatten har skadat ekosystemen. Till exempel används cirka 70 % tillgängligt ytvatten årligen för

jordbruk (Wallace m. fl. 2003) och c. 45 000 stora dammar för bevattning eller kraftproduktion har byggts i världens stora floder och älvar (Nilsson m.fl. 2005). En ökande global befolkning i kombination med dålig förvaltning av en begränsad resurs har resulterat i att miljarder människor upplever kronisk vattenbrist (Mekonnen & Hoekstra 2016, WWAP 2018) eller bor i områden som är utsatta för stora hot mot vattensäkerheten (Vörösmarty m.fl. 2010). Sedan 1950-talet har efterfrågan på vatten överträffat befolkningstillväxten i takt med att vattenanvändningen per capita ökar (Boretti & Rosa 2019). År 2030 kommer efterfrågan på sötvatten att överstiga tillgången med 40% (Addams m.fl. 2009) och år 2050 uppskattas 6 miljarder människor bo i områden med vattenbrist (WWAP 2018). Mänsklig påverkan på sötvattens-ekosystem har orsakat kraftiga minskningar i biologisk mångfald och sötvattensarter förloras snabbare än i marina eller terrestra miljöer (Sala m.fl. 2000). Förlusten av biologisk mångfald kan förväntas öka med ökad efterfrågan på sötvatten och störst ökning av vattenuttag och dämning förväntas i utvecklingsländer med snabbt växande populationer (Moran m.fl. 2018, Boretti & Rosa 2019).

I samband med ökande behov av vatten, kommer klimatförändringarna att påverka det globala hydrologiska mönstret och interagera med nuvarande stressfaktorer. Globalt sett har temperaturen stigit med c. 0,9 °C jämfört med preindustriella förhållanden (<https://climate.nasa.gov/>). Med ytterligare klimatförändringar förväntas redan torra subtropiska regioner få mindre nederbörd och sannolikt en ökad konkurrens om vatten. På nordliga breddgrader förväntas istället mer nederbörd, men det finns inga bevis för förändring i översvämningsmagnitud. Med större variationer i översvämningsfrekvens ökar översvämningsrisken globalt. Dessutom kommer sötvattens-ekosystem sannolikt att påverkas starkt av förändringar i flödesregim och vattenkvalitet (Jimenez-Cisneros m.fl. 2014). Exempelvis var sommaren 2018 den varmaste som uppmätts i större delen av Götaland och Svealand. Denna sommar var också grundvattennivåerna mycket under de normala i framförallt södra Sverige.

Det finns en global oro för den nuvarande och kommande vattenkrisen. FN har förklarat 2018–2028 ”water action” decenniet och 2021–2030 decenniet för ”ecological restoration”. Syftet är att motverka klimatkrisen med ökad restaurering av påverkade och förstörda ekosystem och samtidigt förbättra livsmedelssäkerheten, vattenförsörjningen och den biologiska mångfalden. World Economic Forum (WEF) rangordnar vattenkrisen som en av de största globala riskerna (http://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_2015_Report15.pdf). Alliance for Freshwater Life är ett interdisciplinärt nätverk av forskare, pedagoger, beslutsfattare och olika intressenter. De har konstaterat att anspråket på dricksvatten och vatten som en viktig komponent i jordbruk, industri och vid elproduktion från vattenkraft kommer öka avsevärt under kommande decennier. De varnar för att de mänskliga behoven vanligtvis prioriteras framför icke-mänskliga vilket leder till oavsiktliga skador på sötvattens-ekosystem (Darwall m. fl. 2018). Det är uppenbart att skyddet av biologisk mångfald och ekosystemtjänster i sötvatten står inför allt större utmaningar, även i ett vattenrikt land som Sverige.

Tabell 5.1. Ekosystemtjänster från sötvatten och det hydrologiska kretsloppet. Anpassad från Aylward m.fl. 2005

Försörjande	Reglerande	Kulturella
<ul style="list-style-type: none">• Vatten för konsumtion• Akvatiska organismer (mat/medicin)	<ul style="list-style-type: none">• Vattenrening (filtrering)• Dämpa översvämningseffekter	<ul style="list-style-type: none">• Rekreation• Turism
Stödjande		
<ul style="list-style-type: none">• Näringskretslopp och primärproduktion• Ekosystemets resiliens		

6. Sötvatten i Sverige

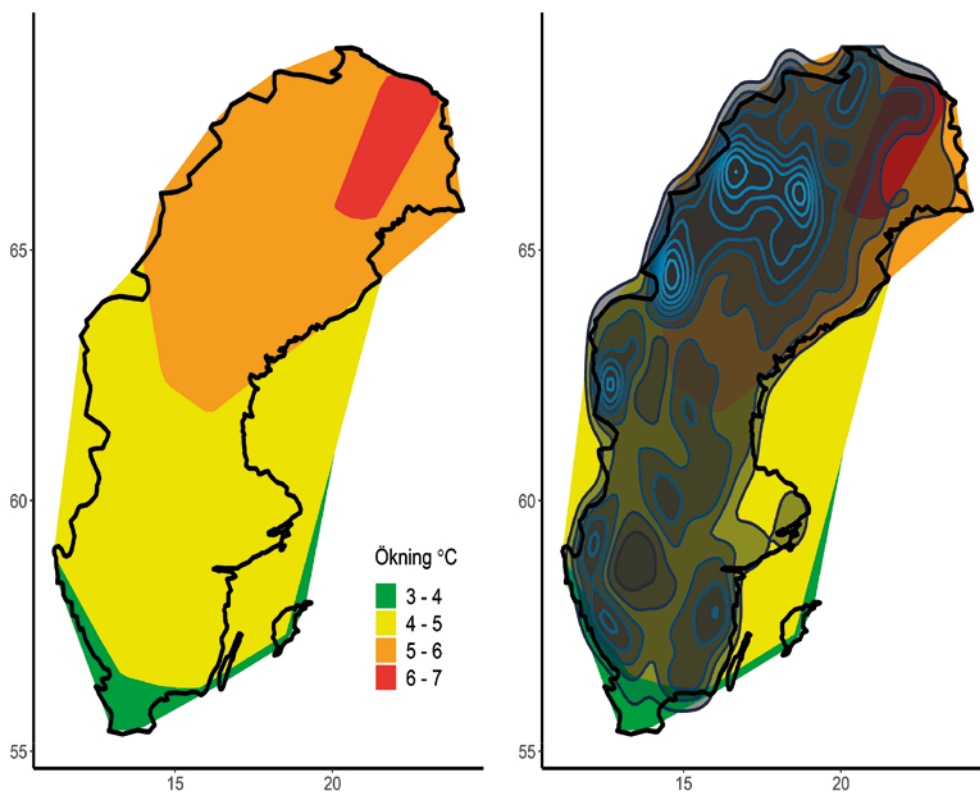
Sverige är ett av världens sjö- och vattendragsrikaste länder, där sjöar utgör ca 9 % av den totala landarealen och det finns c. 50 000 mil älvar, åar och bäckar som i ett gigantiskt kapillärnätverk förenar grundvatten, sjöar och våtmarker med havet. Även om det mänskliga trycket på våra sötvatten inte är lika stort som i många andra delar av världen så är vår sötvattensresurs redan föremål för stor mänsklig påverkan. I Sverige är det bara 49 respektive 32 % av sjöar och vattendrag som uppnår god eller hög ekologisk status (<https://viss.lansstyrelsen.se/>) enligt EU:s vattendirektiv och de flesta limniska naturtyperna uppnår inte gynnsam bevarandestatus enligt EU:s art- och habitatdirektiv (<https://www.artdatabanken.se/arter-och-natur/Dagens-natur/vara-sotvatten-mar-battre-i-norra-an-i-sodra-sverige/>). Det är framförallt vattenförekomster i södra Sverige och vattendrag som generellt som inte uppnår god ekologisk status eller gynnsam bevarandestatus. I den senaste utvärderingen av miljömålet ”Levande sjöar och vattendrag” konstaterade man att fragmentering av vattenlandskapet på grund av dammar och andra vandringshinder bedöms som den viktigaste orsaken till att miljö kvalitetsmålet inte uppnås till 2020. Försurning och övergödning samt exploateringstryck i strandzonen, till exempel vid nybyggnation av hus, bryggor och andra anläggningar är andra viktiga typer av påverkan (Havs- och vattenmyndigheten 2019).

Uppvärmning orsakade av klimatförändring har skett dubbelt så snabbt i Sverige jämfört med jordens medelvärde och förväntas fortsätta i en allt snabbare takt (<https://www.smhi.se/en/climate/climate-indicators/climate-indicators-temperature-1.91472>). Klimatförändringarna kommer att orsaka ökad stress på våra redan påverkade sötvattens ekosystem. De största förändringarna förväntas på våra nordliga breddgrader, med både ökande temperaturer och förändrade nederbördsmonster som följd. De globala utsläppen av koldioxid ökar år för år och det verkar som om vi är på väg mot den mest extrema av SMHI's klimatscenarier (RCP 8,5).

För en effektiv nationell förvaltning av våra sötvattensresurser behöver vi kunskap om var, hur mycket och vilken typ av vatten som finns och om den dominerande markanvändningen i olika delar av landet och i enskilda avrinningsområden. Vi behöver också veta hur stora temperatur- och nederbördsförändringar våra vattenförekomster kommer utsättas för.

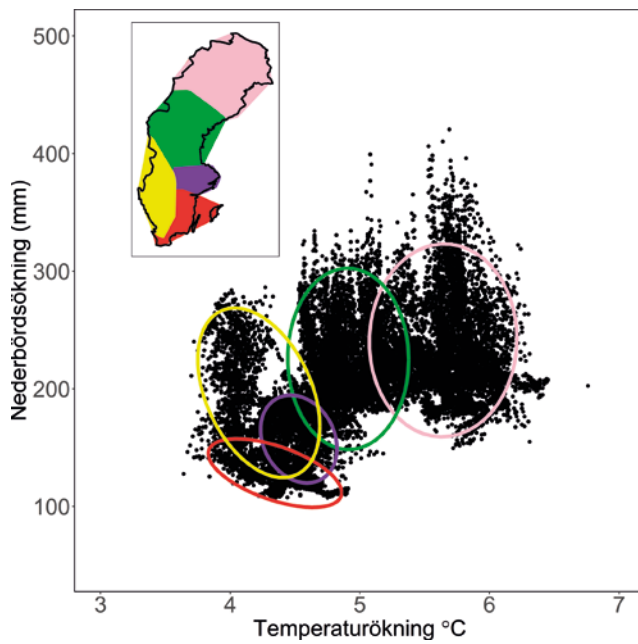
Vi använde Nationella Marktäckedata (www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Kartor), damm- och sjöregistret (SVAR, www.smhi.se/data/hydrologi) och klimatscenarios för Sverige (SMHI, www.smhi.se/klimat/framtidens-klimat) för att summera markanvändning per avrinningsområde och undersöka den geografiska spridningen av Sveriges sjöar (över 1 ha) i förhållande till framtidens klimat (RCP 8,5). Resultaten visade att majoriteten av sjöarna är små och de flesta finns i norra delen av landet (Figur 6.1), där större förändringar i temperatur och nederbörd (Figur 6.2) förväntas. Dessutom är skog (framförallt produktionsskog) den dominerande markanvändningstypen med relativt

sett få sjöar i jordbruks- och stadsmiljöer (Figur 6.3). Någon liknande analys gick inte att utföra för vattendrag då koordinater för enskilda vattendrag är kopplade till dess utlopp och gör att densitetsberäkningar blir missvisande.

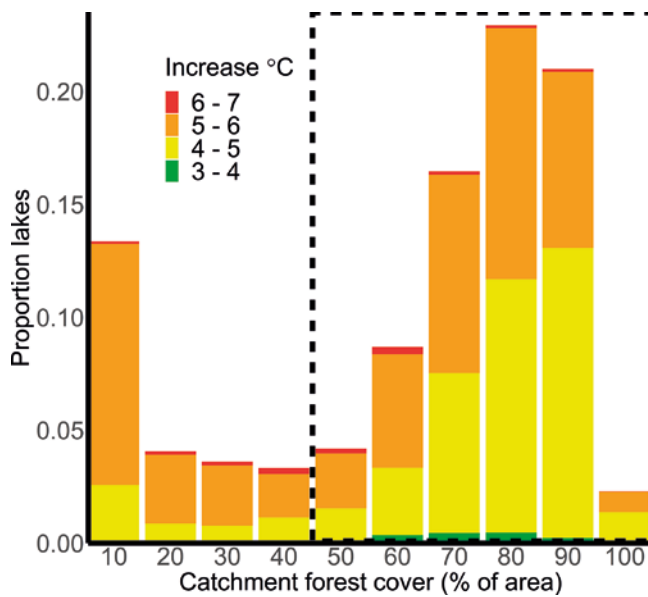


Figur 6.1. Förväntad medeluppvärmning för år 2100 (årsmedeltemperatur; klimatscenario RCP 8,5; vänster) i relation till sjödensitet (höger).

Sett ur ett nationellt perspektiv kan tillståndet hos de flesta ytvattnen i Sverige till stor del förklaras av faktorer som andel skog och skogsbruk. Däremot är sötvattensekosystemtjänster förmodligen viktigare i den södra delen av landet där befolkningstätheten är högre och där det finns mer jordbruksmark och urbana miljöer. Den stora majoriteten av svensk skog är ung, produktiv och har förvaltats intensivt under de senaste 100 åren (Lundmark m.fl. 2014); och endast cirka 6 % av denna produktiva skogsmark är formellt skyddad (Hedeklint & Olsson 2018).



Figur 6.2. Förväntad ökning av nuvarande årsmedelnederbörd och temperatur (RCP 8,5) i sjöar ($n \gg 96\,000$) över 1 ha år 2100. Det finns ett positivt samband mellan nederbörd och temperatur, men uppenbara regionala skillnader förekommer. Ellipserna innehåller 95 % av sjöarna för de fem svenska vattendistrikten (se karta).



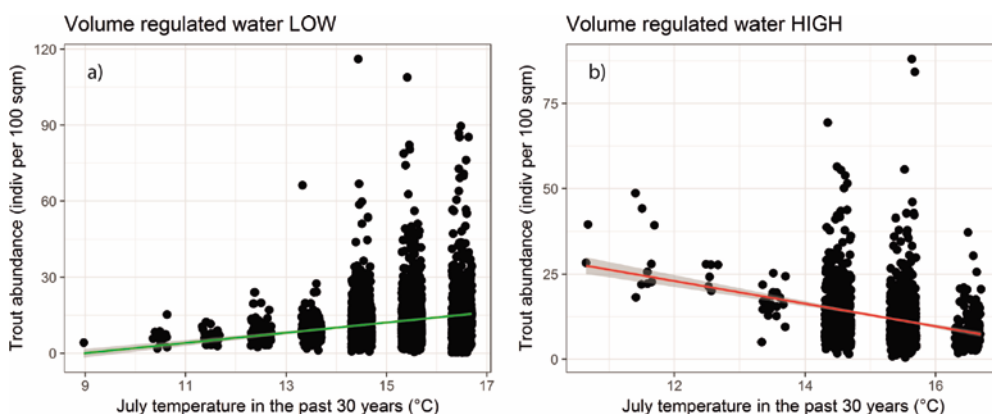
Figur 6.3. Proportionen sjöar i avrinningsområden med olika andel areal skog (% av total markyta). Cirka 75 % av sjöarna ($n > 70\,000$) är belägna i avrinningsområden med 50 % eller mer skog och kommer att vara utsatta för 4–7 °C uppvärmning år 2100 (RCP 8,5).

7. Mänsklig påverkan på vatten – multipla stressorer

När ekosystem utsätts för flera typer av mänsklig påverkan samtidigt kan kumulativa effekter av denna påverkan försämra systemets förmåga att klara av ytterligare miljöförändringar. Uppvärmningshastigheten är snabbare än någonsin, men förståelsen för synergistiska effekter av lokala påverkansfaktorer (till exempel dämning, förändrad markanvändning, näringsläckage) och klimat är fortfarande mycket begränsad. Detta försämrar vår förmåga att planera och anpassa effektiva åtgärder för bevarande och restaurering i sötvattens ekosystem.

I denna delstudie användes ett rikstäckande dataset från 283 vattendrag i Sverige för att undersöka interaktiva effekter av markanvändning, dämningar och klimat på abundans (individantal per ytenhet) hos öring. Data kommer från Svenskt ElfiskeRegiSter (SERS) vid SLU samt SMHI's Vattenweb. Vi fann att ett varmare klimat ger en negativ inverkan på öringpopulationer i avrinningsområden med högre grad av vattenreglering. I avrinningsområden med en låg grad av vattenreglering ökade abundansen av öring något med ett varmare klimat (Figur 7.1 a). Medan en uppvärmning på 6 °C minskade abundansen av öring med i genomsnitt 75 % (Figur 7.1 b) i vattendrag med en större andel vattenreglering. Jordbruk och urban markanvändning hade en synergistisk effekt; abundansen av öring minskade i avrinningsområden med en högre andel urban miljö men bara i avrinningsområden som också hade en hög andel jordbruksmark (≥ 20 %; Figur 7.2).

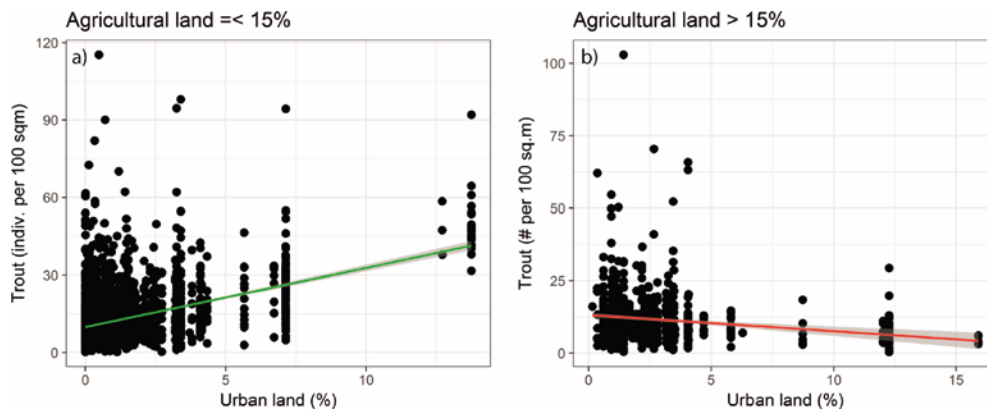
Resultatet tyder på att 1) minskad vattenreglering kan minska de negativa effekterna av klimatförändringar för öring och 2) restaureringsåtgärder som reducerar påverkan från jordbruket kan underlätta rehabiliteringen av öring i avrinningsområden med urbana miljöer.



Figur 7.1. Effekter på abundans av öring (antal individer per 100 m²) vid olika lufttemperatur i juli under de senaste 30 åren vid låga (vänster) respektive höga (höger) volymer av reglerat vatten i avrinningsområdet.



Bild 3. Öring (*Salmo trutta*). Foto: Ingemar Näslund.



Figur 7.2. Effekt på abundans av öring av urban markanvändning vid låg (vänster) och hög (höger) andel jordbruksmark i avrinningsområdet.

De kumulativa effekterna av vattenreglering och klimatförändring skulle motverkas genom att öka utbytet mellan ytvattnet och den hyporheiska zonen (vattendragsbotten och grundvatten) genom att ta bort finsediment som täpper till grusbottnar, att placera ut död ved, att tillåta tillfälliga översvämningar och att återskapa strömpartier i vattendraget. Andra möjliga åtgärder är att upprätthålla flöden som liknar den naturliga hydrologiska regimen (så kallade ekoflöden; Malm Renöfält & Ahonen 2016), att återställa strandvegetation, att riva dammar, att återställa vattnets kontakt med landmiljön och att öka tillgängligheten till- och mängden av kallvattenrefugier. De negativa synergistiska effekterna av jordbruk och urban markanvändning på sötvattens ekosystem kan minska genom att avsätta buffertzoner i strandzonen, minska gödselanvändningen nära sjöar och vattendrag, minska uttaget av vatten, återskapa våtmarker, lägga igen diken eller utföra miljövänligt underhåll av diken och bevara vattenväxter i vattendraget.

Denna studie visar på vikten av en helhetssyn i förvaltningsplaner och att flera olika påverkansfaktorer i avrinningsområdet beaktas samtidigt. Interaktiva effekter ökar sannolikheten för att uppnå tröskelvärden som leder till plötslig förändring (Scheffer m. fl. 2001, Wolff m.fl. 2019). Därför behövs ökad förståelse för hur olika faktorer tillsammans påverkar ett ekosystem.



Bild 4. Införd obrukad kantzon om 6 m i jordbruksmark. Detta förhindrar en stor del av uttransport av närsalter och sediment till vattendragen. Om även skuggande träd och buskar tillåts i kantzonen kommer vattendragets temperatur att minska, något som kommer att bli allt viktigare i framtiden.

8. Klimatförändringseffekter på vattenmiljöer i Sverige

För en effektiv förvaltning av våra sötvatten behöver vi kunskap om de sannolika effekterna av klimatförändringar och hur dessa kan komma att påverka sötvattens ekosystem. Sötvatten är redan påverkade av en rad mänskligt orsakade stressorer (kapitel 6) såsom fysisk påverkan, övergödning, dämning och utdikning. Klimatförändringar kan samverka med nuvarande stressorer med oförutsägbara resultat, ibland starkt negativa (kapitel 7). I denna studie använde vi publicerad, vetenskaplig litteratur för att sammanställa möjliga effekter av klimatförändring på sötvatten i det boreala området och specifikt i Sverige.

Vi använde två sökmotorer (ISI Web of Science och SCOPUS) och kombinationer av söktermer relaterade till 1) klimat (t ex klimatförändring, global uppvärmning), 2) vattentyper (sjö, våtmark, sötvatten, å, älv mm) och 3) område (Skandinavien, Sverige, Finland mm). Urvalet begränsades till vetenskapligt publicerade översiktsartiklar (reviews) eller artiklar med utförda metaanalyser. Sökningen gav 340 potentiella artiklar, Av dessa uteslöts 260 artiklar som inte innehöll sådan information vi var intresserade av, baserat på genomläsning av artiklarnas sammanfattning. Bland de resterande 80 artiklarna fanns 33 stycken med relevant information för vår studie.

Klimatförändringens effekter på sötvatten delades upp i fysikaliska, kemiska och biologiska förändringar (Figur 8.1). De fysikaliska och till viss del de kemiska förändringarna var mer förutsägbara än de mer komplexa biologiska förändringarna. Högre temperaturer resulterar i mindre isbildning (inklusive minskande glaciärer) och snötäcke, samt en minskad vårflod – vilket är en viktig komponent i naturliga boreala vattendrags flödesregimer. Vårflodens stora transport av sediment och hydromorfologiska påverkan formar flodfåran och ger en naturlig störning på botten och stränder. Sediment transporteras bort från viktiga lekområden för fisk och det ger till exempel livsutrymme för rödlistade arter som klådris (*Myricaria germanica*) och skalbaggen sandstrandjägare (*Cicindela maritima*) som kräver blottlagda stränder för att etableras och trivas. Vidare tillförs vattendraget närsalter och organiskt material från översvämmade områden samtidigt som dessa gynnas av sedimentande finmaterial.

En allmän uppvärmning av vattnet bör främja ökning och spridning av varmvattenarter (inkl. dess parasiter), som kan vara invasiva, medan kallvattenarter förväntas minska. Därmed kan artrikedomen öka lokalt, men samtidigt ändra ekosystemets funktion och ekologiska status. Högre temperaturer och en tidigare issmältning under våren kan medföra förändrad fenologi, dvs. ändrad tidpunkt för årligen återkommande händelser. Det leder ofta till misspassning (mismatch) av vårutvecklingen mellan djurplankton och växtplankton (Winder & Chindler 2004, Adrian m.fl. 2006), vilket kan få konsekvenser högre upp i näringskedjan (Wagner & Benndorf 2007) ända upp till fisk (Nyberg m fl. 2001).

	Ökning	Minskning
Fysikalisk	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatur • Nederbörd • Extremväder • Torka • Växtsäsong • Översvämning • Humus / brunifiering 	<ul style="list-style-type: none"> • Vårflod
Kemisk	<ul style="list-style-type: none"> • Löst organisk kol 	
Biologisk	<ul style="list-style-type: none"> • Tillväxthastighet • Varmvattensarter • Cyanobakterier • Invasiva arter • Parasiter • Diversitet (mångfald) • "mismatch" födoresurser 	<ul style="list-style-type: none"> • Kallvattensarter • Primärproduktion • Födovävs-stabilitet

Figur 8.1. Sammanfattning av effekterna av klimatförändringar på sötvattensekosystem i den boreala zonen.

Brunifiering av vatten orsakas av både utdikning av landskapet, omfattande ersättning av lövskog med barrskog, minskat surt nedfall och ett varmare och torrare klimat (Kritzberg 2017), som både sänker grundvattennivåerna och ökar nedbrytningen av organiskt material. Det organiska materialet, löst organiskt kol och humusämnen bidrar också till starkare temperaturskiktning av sjöar (Snucins & John, 2000).

I ytvatten med högre temperaturer kan cyanobakterier konkurrera ut växtplankton och potentiellt skapa giftiga blomningar (Paerl & Huisman 2008). Även om många sjöar ofta är naturligt näringsfattiga frigörs fosfor och löst organiskt kol (DOC) från jorden vid kalhuggning. Därmed blir vattnet både brunare och mer näringsrikt. Det främjar cyanobakteriers tillväxt, eftersom de kan använda atmosfäriskt kväve, men är fosforbegränsade (Prepas m.fl. 2001). Samtidigt har en minskning av atmosfäriskt svavel, tack vare reducerade utsläpp till luften, lett till mer basiska jordar och ökad löslighet av DOC (Evans m.fl. 2006). Förändring i DOC kan leda till förändringar i primärproduktion, vattentemperatur och syretillstånd. Samtidigt påverkas både interaktionen mellan visuellt jagande rovdjur och deras byten och produktiviteten i systemet (Solomon m.fl. 2015). Sekundärproduktionen (inkl. fiskproduktionen) kan först öka, tills primärproduktionen begränsas av minskat ljusinsläpp (Finstad m.fl., 2014). Planktonproduktionen kan också påverkas av en generell nederbördsökning som ökar transporten av organiskt kol från terrestra till akvatiska miljöer, och ökar vattnets omsättningstid i sjöar och vattendrag (Wojtal-Frankiewicz 2012). DOC-relaterade förändringar i primärproduktionen kan öka metylkvicksilverhalterna i organismer högre upp i födoväven/näringskedjan (deWit m.fl. 2016). En ökad frekvens och intensitet av extrem väderlek kan påverka biota direkt men också frigöra humusämnen

från jord till ytvatten (Tiwari m.fl. 2019). Sammanfattningsvis förutspås många uppvärmningsrelaterade effekter orsaka fysiska eller kemiska förändringar, vilka i sin tur påverkar ekologiska processer i sötvattenekosystemens näringsväv. Ur ett mänskligt perspektiv går de flesta förutspådda förändringarna i dessa studier från ett mer till ett mindre önskat tillstånd.



Bild 5. Närkeslätten (vid Irvingsholm) under vatten 23 december 2019. Året innan rådde extrem torka i samma område.

9. Restaurering av vattenmiljöer

Restaurering är den process som återskapar eller återför de abiotiska eller biotiska komponenterna hos ett ekosystem till dess naturliga eller ursprungliga tillstånd (Lake 2001). I sötvatten vet vi sällan exakt hur detta ekosystem har sett ut, men vi har generellt en ganska god bild av det historiska tillståndet. Samtidigt förändras ekosystem ständigt och samhällsnyttan av etablerade verksamheter värderas ofta högre än en fullständig restaurering (Brown m.fl. 2018). Ibland särskiljs restaurering från rehabilitering. Det senare innebär att återskapa förutsättningarna för de naturliga arterna och processerna så att ekosystemet fungerar uthålligt, snarare än ett ursprungligt tillstånd. Det kan jämföras med att bibehålla eller återskapa en återgång till strukturer, funktioner och processer, för att uppnå ”Gynnsam bevarandestatus” enligt Art- och habitatdirektivet” eller vattendirektivets ”God ekologisk status”.

Restaurering kan innefatta åtgärder från modifiering av enskilda strukturer (t ex rivning av en damm) i vattensystemet till manipulering av ekosystemprocesser (t ex flödesrestriktioner) och biota (t ex återintroduktion) på rumsliga skalor upp till avrinningsområden och tidsperioder upp till årtionden. Vid restaurering av vattendrag anses generellt att flödesåtgärder skall föregå faunapassager, som i sin tur föregår habitatrestaurering (Sandin m fl 2017). Då går processen från den stora (regionala) skalan ned till den lokala. Som nämnts tidigare börjar också akvatisk miljövard på land, genom att reducera negativ påverkan från markanvändning och återställa obrukade och beskogade kantzoner och våtmarker. Klimatet verkar på den stora skalan, men kräver åtgärder ned till den lokala. Att identifiera, restaurera och skydda kallvattenrefugier kommer därför att bli en viktig framtida uppgift.

I varje åtgärdsprojekt är det viktigt att definiera målet i form av förväntad effekt, både på organismer, det enskilda vattnet och avrinningsområdet. De stora delarna behöver vara på plats för att restaureringsarbetet ska få största möjliga effekt och fokus bör ligga på kostnadseffektiva åtgärder. De flesta åtgärder som idag används inom restaurering av vattendrag har dock en positiv effekt (Sandin m fl 2017).

Ytvatten används som recipient både för enskilda och kommunala avlopp och för processvatten i olika typer av industrier. Vattenkvaliteten påverkas därför i relation till befolkningstäthet. Omfattande påverkan finns också utanför tätorterna, där exempelvis skogs- och jordbruk orsakar läckage av näringsämnen och tillförande av bekämpningsmedel. Många skandinaviska vatten har försurats genom tillförsel av långväga transporterade försurande ämnen. I Sverige men även i Norge pågår långsiktiga och omfattande kalkningsprojekt för att bevara den biologiska mångfalden och naturliga produktionen i vattenekosystemen (Naturvårdsverket 2010). Vattendrag och sjöar har genom århundraden ändrats rent fysiskt utifrån människans behov. Skogs- och jordbruket har format om landskapet och påverkat vattendragens morfologiska (fysiska) strukturer i form av direkta ingrepp som dikningar och rensningar och indirekt genom ändrade växtsamhällen och brukningsmetoder. Det finns

över 10 000 dammar i Sverige, men de flesta används inte för kraftproduktion idag. Antalet markavvattningsföretag är cirka 30 000 och 2450 sjöar har sänkts (Sandin m.fl. 2017). Påverkan på våra vatten är således omfattande.

Våra sötvattensekosystem är viktiga men samtidigt väldigt påverkade av mänskliga aktiviteter både historiskt och i nutid. Därför finns ett stort behov av att restaurera och återställa ekosystemen. Många miljoner kronor spenderas varje år på restaurering av (främst) vattendrag i världen (Palmer m.fl. 2005). Sveriges centrala myndigheter spenderade cirka 491 miljoner SEK på restaurering av vattenmiljöer under perioden 1995–2011, vilket var mer än hälften av den totala restaureringsbudgeten. På den lokala nivån motfinansierades åtgärderna med ungefär samma belopp, så att restaureringsbudgeten blev totalt cirka 1 miljard SEK. Mer än 75% gick till restaurering av vattendrag och våtmarker, 9% till restaurering av sjöar och 2% till projekt som fokuserade på hela avrinningsområdet. Nästan hälften av vattendragsrestaureringsprogrammen fokuserar på enskilda arter såsom fisk, mollusker och kräftor (Borgström m.fl. 2016).

I denna rapport fokuserar vi helt på fysiska åtgärder i sjöar och vattendrag (med direkta eller indirekta effekter på biota). Åtgärder såsom utsättningar, återintroduktion, bekämpning av främmande arter och kemiskt fokuserade åtgärder såsom kalkning eller fällning av näringsämnen inkluderas inte. I svenska sjöar har fysiska restaureringsåtgärder syftat till att höja vattennivån i tidigare sänkta sjöar, ekologiskt anpassa vattennivån i reglerade sjöar, sedimentmuddra övergödda sjöar, restaurera strandzonen på olika sätt, ta bort dämmen i sjöutlopp och ersätta dem med stentrösklar som håller vattennivå i rätt läge (Degerman m.fl. 2017). I vattendrag har mycket av restaureringsåtgärderna fokuserat på återställande av vegetationen i kantzonen, habitatförbättringar i vattendraget och dammrivningar (Degerman 2008, Feld m.fl. 2011), omstrukturering av vattendragsfåran, fiskpassagelösningar, flödesförändringar och återkoppling av vattendraget till svämplanet (Wohl m.fl. 2015). Den svenska databasen ”Åtgärder i vatten” (<https://www.atgarderivatten.se>) innehåller information om genomförda åtgärder i svenska sjöar (och främst vattendrag). I databasen delas åtgärderna in i fyra huvudtyper: biotopvård, fiskvägar, hydrologisk restaurering och övriga fysiska åtgärder.

Biotopvårdsåtgärder inkluderar avsmalning av vattendragsfåran, öka beskuggningen av vattendraget inklusive åtgärder i kantzonen, utläggning av sten, grus och block för att öka habitatheterogeniteten och förbättra lekplatser för fisk, tillförsel av död ved, utläggning av risvasar i sjöar, att återskapa meandrande vattendragsfåror och öppna upp avstängda sidofåror. Åtgärder kopplade till fiskvägar kan vara: utrivning av dammar eller andra hinder, anläggning av fiskvägar, omläggning eller byte av vägtrummor. Fiskvägar brukar delas upp i två grupper; naturlika och tekniska (Calles m.fl. 2013). De naturlika fiskvägarna kan i sin tur delas upp i inlöp, omlöp och upptröskling. Gemensamt för de naturlika fiskvägarna är att de möjliggör för fler organismer än fisk att utnyttja passagen. Utformade i form av omlöp kan de till och med utgöra ett viktigt strömhabitat i system där strömhabitat

har dämpts bort (Tamarío m.fl. 2018). Även simsvaga arter eller mindre levnadsstadier kan i regel passera de naturlika fiskvägarna. Tekniska fiskvägar är sällan anpassade för de mest simsvaga fiskarterna och de utgör inga nya strömhabitat. Fiskvägarna kan bestå av fast utskov som utgörs av en öppning i dämnet där vatten ”spills” från dammen till fåran nedanför. De tre vanligaste varianterna är kammarrappa, slitsränna och denlränna. Det förekommer även kombinationer av dessa. Hydrologisk restaurering inkluderar anläggande eller återställande av våtmarker i eller utanför vattendraget, ändrad vattenreglering eller införande av minimitappning, minskat vattenuttag, återledning av vatten till vattendragsfåran, igenläggning av diken och sjöhöjning.



Bild 6. Tekniska fiskväg, en så kallad slitsränna, vid Islandsfallet i Fyrisån, Uppsala. Fiskvägen passeras av mängder av arter och storlekar av fisk och mängden fisk uppströms har ökat markant.

10. Ekonomiska kostnader kopplade till restaurering

Det finns relativt stor erfarenhet av restaurering, men det är svårare att få en överblick över kostnaderna och vad som ingår i de genomförda åtgärderna. Handboken för ekologisk restaurering (Degerman 2008) redovisar många kostnader för åtgärder. Åtgärdsbiblioteket i Vatteninformationssystem Sverige (VISS, www.viss.lst.se) samt ”Åtgärdsdatabasen” (<https://www.atgarderivatten.se/api/>) innehåller information om kostnader för praktiskt genomförda åtgärder. I VISS redovisas schablonkostnader och åtgärderna varierar utifrån lokala förutsättningar. I samband med uppskattning av kostnader är det inte alltid tydligt om t ex administrativa kostnader eller effektuppföljning ingår. Uppföljning behövs för att utröna om åtgärden har avsedd effekt. Det finns dock inte alltid budget för att mäta tillståndet före och att följa upp effekterna av åtgärden. Kostnaderna kan också bero på om det finns flera utförare som kan upphandlas eller inte och på transportavstånd och närhet till väg. Erfarenheter från utförda åtgärder inom LONA (lokala naturvårdsåtgärder) som finansieras av statliga medel (Naturvårdsverket) kan också användas för att uppskatta åtgärds-kostnader.

Här redovisas kostnader för de huvudsakliga åtgärderna för ekologisk restaurering i sötvatten. Några av åtgärderna kan motverka negativa förändringar i samband med ett förändrat klimat (se kapitel 7). Många vatten-ekosystem har påverkats av mänskliga aktiviteter och är i behov av åtgärder (kapitel 6). Flera åtgärder bidrar till att minimera påverkan av ett förändrat klimat (t ex förbättrad vattenhushållning). Andra åtgärder kanske inte uppnår avsedd effekt (t ex felaktigt placerade och utformade fiskvägar) eller kan bidra till spridning av främmande arter. Därför är planering utifrån ett avrinnings-områdesperspektiv viktigt, med hänsyn till grön infrastruktur och framtida klimat. Här behandlas främst åtgärder som bidrar till fungerande ekosystem, genom att bibehålla eller återskapa strukturer, funktioner och processer. Några av åtgärderna är inriktade på att bekämpa invasiva arter.

Vi gjorde en sammanställning av kostnader av relevanta åtgärder baserat på schablonuppgifter från VISS och uppgifter från LONA-projekt (Tabell 10.1). Flera av uppgifterna om LONA-projekt togs fram tillsammans med länsstyrelserna (redovisas inte närmare i tabellen).

Tabell 10.1. Mål och åtgärder för att upprätthålla eller återskapa funktionella sötvattensekosystem. Kostnader baseras på schablonkostnader från VISS och erfarenheter av LONA-åtgärder. Kostnader redovisas som median och min- och maxvärden, beloppen relaterar till angiven enhet.

Mål och åtgärd	Min-max	Median	Enhet
Upprätta god vattenkvalitet av försurade sjöar och vattendrag			
Kalkning – med flyg	1 700	1 700	Kr/ton
– med båt	1 000	1 000	Kr/ton
– med doserare	1 100	1 100	Kr/ton
– med annat fordon	900	900	Kr/ton
– med vattenkanna	57 143	57 143	Kr/ton
Askåterföring	2 900	2 900	Kr/ton
Retention av kväve och fosfor från områden med jordbruksmark			
Våtmark för näringsretention	41 480–258 532	217 052	Kr/ha
Våtmark – fosfordammar	807 504	807 504	Kr/ha
Vattenståndsförändring mot invasiva arter			
Störning av vattenståndet	225 000	225 000	(Kr per åtgärd, kan dock variera mycket beroende på insats)
Sjösänkning	500 000	500 000	Kr/styck
Sjöhöjning	40 000	40 000	Kr per tröskel
Minska beståndet av invasiva vattenväxter			
Maskinell röjning	32 500–400 000	80 000	Kr/ha
Rotorkultivering /urgrävning	45 000	45 000	Kr/ha
Manuellt upptag av vattenväxter	6 000	6 000	Kr/ha
Skörd – maskinell	10 000–40 000	25 000	Kr/ha
– med trailing knives	6 000	6 000	Kr/ha
– med klippaggregat	6 000	6 000	Kr/ha
– med slätterbalk	6 000–31 919	18 959	Kr/ha
Spridningshinder vattenväxter	100 000	100 000	Kr/ha
Återintroducering av inhemska arter	–	–	Kr/styck
Täckning (förhindra ljusinstrålning)	275 000	275 000	Kr
Utläggning av halm (lindra/förhindra algblooming)	75 000	75 000	Kr/ha
Minska beståndet av invasiva fisk- eller kräftarter			
Utfiskning – med nät	55 000	55 000	Kr/km ²
– med mjärde eller ryssja	25 000	25 000	Kr/km ²
– med elfiske	–	–	Krkm ²
Spridningshinder	150 000	150 000	Kr/styck
Skörd maskinell (snäckor och musslor)	10 000	10 000	Kr/styck
Skörd manuell (snäckor och musslor)	6 000	6 000	Kr/ha
Störning av litoralen	225 000	225 000	Kr/ha
Återintroducering av fisk, kräft- eller blötdjur	–	–	Kr/styck
Vandring av vattenlevande organismer förbi ett hinder			
Uppströmpassage	545 000	545 000	Kr/meter, fallhöjd
Nedströmpassage	1 222 920	1 222 920	Kr/m
Teknisk fiskväg (denilränna, bassängtrappa etc)	596 000	596 000	Kr/styck
Naturliknande fiskväg	510 000	510 000	Kr/m
Utrivning av vandringshinder	110 000	110 000	Kr/m
Utrivning av vandringshinder	10 000–554 500	282 250	Kr/m
Återkoppla biflöden till magasin eller huvudfåra	25 000	25 000	Kr/styck

Mål och åtgärd	Min-max	Median	Enhet
Klunkning av vatten	34 000	34 000	–
Omläggning/byte av vägtrumma	2 000–205 000	34 000	Kr/m ³
Utrivning av damm	16 900–2 520 000	1 268 451	Kr/styck
Återställning av biotoper			
Flottledsåterställning	121 000–2 067 350	1 322 789	Kr/ha
Utläggning av död ved	272 000	272 000	Kr/km
Restaurering av kantzoner	110	110	Kr/m
Återställning av rätat vattendrag	1 020 000	1 020 000	Kr/km
Ekologisk restaurering av vattendrag			
Avsmalning av åfåra	520	520	Kr/m
Tillförsel av habitatstrukturer (block, lekgrus, död ved mm)	110 000	110 000	Kr/ha
Minimitappning/vatten i fiskväg vid vattenkraft	–	–	
Miljöanpassade flöden	–	–	
Proppning av diken	1 000–3 000	2 000	Kr/styck
Breddning av vattendragsfåra	35	35	Kr/m ³
Återkoppla sidofåra eller bakvatten	16 600	16 600	Kr/styck
Ekologiskt funktionella kantzoner	54 000–364 000	209 000	Kr/ha
Återställa andra strukturer och funktioner			
Återställning av sänkta sjöar	500 000	500 000	Kr/ tröskel
Igentäppning av diken i skogs- och våtmark	10 000	10 000	Kr/styck
Tillföra högvattenflöden för svämplanet	–	–	–
Tillföra högvattenflöden för sediment	–	–	–
Förbättra sedimenttransport nedströms en damm	105 000	105 000	Kr/ha
Bryta sönder stenpäls	105 000	105 000	Kr/ha
Motverka förhöjd erosion	105 000–2 180 000	1 142 500	Kr/ha
Åtgärda försvagad erosion	105 000	105 000	Kr/ha
Åtgärder för onaturlig vattentemperatur	–	–	

Vid tidigare uppskattningar av totalt åtgärdsbehov för att åtgärda problem i sötvatten uppskattades kostnaden för att skapa ökad konnektivitet vid samtliga kraftverksdammar i Sverige till 18 miljarder SEK (Jonsson 2015). En tidigare beräkning för att åtgärda bristande kontinuitet på upp till 2,2 miljarder SEK för vattendrag och visade på behov på 0,35–0,74 miljarder SEK för sjöar vilket landar på nästan 3 miljarder SEK. Kostnader för åtgärder för att uppnå gynnsam bevarandestatus för sötvattensnaturtyper (enligt Art- och habitatdirektivets definitioner), uppskattas kosta cirka 1 miljard SEK, dels för att skapa fria vandringsvägar vid samtliga registrerade dammar inom Natura2000-områden och 2,2 miljarder SEK för områden utanför Natura2000 (von Wachenfeldt 2019). Under antagandet att utrivning av gamla dammar är den mest lämpliga åtgärden skulle ytterligare ca 340 respektive 480 miljoner SEK behövas för utrivningar inom och utanför Natura2000-områden. I områden utanför Natura2000 antogs att vandringshinder inom ett avstånd på åtminstone 500 m från ett Natura2000-område behöver åtgärdas.

För vägtrummor och omläggning av vägar uppskattas åtgärdskostnaden till 208 miljoner SEK, baserat på uppgifter från länsstyrelsernas inventeringar av vandringshinder. Det kan vara en underskattning då åtgärdskostnader kan uppgå till så mycket som 1 miljard SEK när det gäller allmänna vägar. I beräkningen användes en schablon om 103 500 SEK per objekt. Det är också osäkert om alla vägtrummor behöver åtgärdas. Tidigare uppskattades att kostnaden för omläggning av vägtrummor vid skogsbilvägar till 2–4 miljarder SEK, och ytterligare 2–4 miljarder SEK för att åtgärda järnvägstrummor.

Totalt uppskattas kostnaderna för att åtgärda bristande konnektivitet till 4,3 miljarder SEK. Att åtgärda alla objekt under en 27 års-period skulle kosta ca 159 miljoner SEK/år. För invasiva arter är det svårt att uppskatta både kostnader och behov av bekämpning. Förhindrande av spridning av främmande arter är första prioritet, för när arter har etablerat sig kan de vara mycket svåra att bekämpa eller utrota. Det gäller till exempel sjögull, skunkkalla och signalkräfta. Bekämpning och förhindrande av ytterligare spridning kan behöva pågå i flera år och kan bli mycket kostsamt. Kostnader som uppstår vid vattenbrist i och med förändrade nederbördsförhållanden och förändrad avrinning är också svårt att överblicka. Det behövs ett avrinningsområdesperspektiv så att åtgärder som innebär ökade flöden inte stjälar vatten från andra vattenbehov inom samma vattensystem. Det är därför viktigt att verksamheter och åtgärder har tillstånd eller anmälts till länsstyrelsen för att man ska kunna ha ett helhetsperspektiv på resursen sötvatten.



Bild 7. Sjögull (*Nymphoides peltata*) är en invasiv flytbladsväxt från södra Europa och Mindre Asien. Den är troligen införd av akvarister på 1800-talet, men har sedan också utplanterats aktivt i vissa sjöar för att ge skyddat habitat för fiskyngel. Bilden är från sjön Väringen där arten inplanterade 1933 och nu sprider sig nedströms i Arbogaån och ut i delar av Mälaren.

11. Hur påverkas restaurering av förändrat klimat

Det är en stor utmaning att förutsäga effekter av klimatförändring på genomförda och framtida restaureringsåtgärder, eftersom det är svårt att förutsäga exakt var och i vilken utsträckning förändringarna kommer att påverka sötvattens ekosystem. Några generella och mer specifika klimatrelaterade förändringar kan ändå förväntas och beaktas vid planering av restaureringsåtgärder. Fysisk påverkan från vattenkraftverk och andra dammar är ett av de främsta hoten mot biologisk mångfald och en stor anledning till att Sverige inte uppnår vattendirektivets ”god ekologisk status” eller de nationella miljökvalitetsmålen. Vi undersökte de möjliga effekterna av klimatförändringar (Figur 8.1, kapitel 8) för sex vanliga restaureringsåtgärder kopplade till fysiskt påverkade vattendrag (Sandin m.fl. 2017). Med hjälp av Google Scholar sökte vi i den vetenskapliga litteraturen efter en kombination av engelska söktermer relaterade till restaureringsåtgärder och klimateffekter. Vi hittade 25 relevanta artiklar gällande detta område (tabell 11.1). Utöver dessa specifika exempel föreslår vi också mer allmänna riktlinjer för bättre integrering av klimatförändringsaspekter i restaurering och förvaltning av sötvatten.

Enligt de publicerade artiklarna är dammrivning och återskapande av naturliga flödesregimer positiva i ett föränderligt klimat. I fritt rinnande vatten (utan dammar) och/eller med mer naturliga flödesregimer behövs sannolikt färre framtida åtgärder för att bibehålla viktiga funktioner och biodiversitet. Artsammansättningen uppströms dammen bör beaktas vid planerade dammrivningar och invasionsrisken av oönskade, invasiva arter från nedströms liggande områden bör övervägas i planeringsfasen. Särskild hänsyn ska tas där livskraftiga populationer av rödlistade, hotade eller kallvattensarter finns uppströms en damm.

Det finns många exempel på dåliga eller icke-fungerande faunapassager (Degerman 2008; Andersson 2005). Framtidens klimat kommer att sätta stor press på passage-effektiviteten om extremväder och nederbörd ökar med efterföljande förändringar i flödesregim. Mindre effektiva faunapassager kan hindra migration av inhemska arter eller målarter men också främja spridning av invasiva arter. Utöver flödesmängd, lutning, vattenhastighet och substratsammansättning är även vattentemperaturen viktig för välfungerande passager. För varmt vatten kan hindra kallvattensarters passage. I första hand utrivning av dammar och i andra hand fungerande faunapassager kommer sannolikt vara extremt viktiga i Sverige då det finns ett mål på 100 % förnybar energi år 2040 (där vattenkraften spelar en stor roll), samt våra åtaganden för att uppfylla EU:s ramdirektiv för vatten. Sveriges nationella plan för omprövning av vattenkraft (NAP) kommer sannolikt innebära byggandet av nya faunapassager för att miljöanpassa vattenkraften, men förhoppningsvis kommer dammutrivningar att dominera framöver.

Den potentiella positiva effekten av habitat- eller lekplatsrestaurering ser något begränsad ut i ett framtida förändrat klimat. Habitatrestaurering i vattendrag kan, till viss del, bidra till att bromsa upp och bibehålla vatten för att motverka perioder av torka/lågflöden. Däremot finns en viss risk att invasiva arter eller generalister snabbt koloniserar restaurerade sträckor istället för de målarter man vill få tillbaka. Habitat- och lekplatsrestaurering kommer sannolikt att kräva mer omfattande åtgärder alternativt återkommande underhåll då ökande förekomst av extremväder och högflöden förväntas i ett förändrat klimat (Beechie m. fl. 2013). Nuvarande rekommendationer för habitatrestaurering (Degerman 2008) behöver kompletteras med hänsyn till risken för fler och större extrema flöden. Det innebär att utlagt substrat och skyddande stengrupper kan behöva andra (grövre) dimensioner, för att ligga kvar i starkare strömmande vatten. Placeringen av åtgärder blir också viktigare, och områden med extrema vattenhastigheter bör undvikas, t ex raviner långt från sjöar.

Litteratursökningen fokuserade på vanliga restaureringsåtgärder i Sverige som är kopplade till fysisk påverkan på vattendrag. Sådana åtgärder utförs framförallt i vattnet, men även landbaserade restaureringsåtgärder (t ex restaurering av strandzonen och våtmarker) blir viktiga i ett förändrat klimat (t ex Seavy m.fl. 2009, Capon m.fl. 2013). Även den svenska restaureringshandboken för vattendrag påpekar att vattenvård börjar på land (Degerman 2008). En väl fungerande kantzon ger en skuggningseffekt, som minskar sommartemperaturen i vattendrag (Bowler m.fl. 2012, Johnson & Almlöf 2016). Funktionella kantzoner reglerar även tillförseln av näringsämnen och löst organiskt kol från land (McClain m.fl. 2003). Det ger upphov till viktiga livsmiljöer och mat till vattenlevande organismer (Tank m.fl. 2010) och främjar konnektivitet (Heino m.fl. 2019). Alla dessa faktorer blir viktiga för biologisk mångfald och ekosystemfunktion i ett förändrat klimat. Återställning för att bibehålla vatten i landskapet (inklusive restaurering och skapande av våtmarker) kommer att minska kväve- och fosforbelastning i sötvatten (Land m.fl. 2016) och till Östersjön, men kommer också att buffra effekterna av både ökad nederbörd, ökade översvämningar och torka. Stora områden i Sverige är utdikade/dränerade för att främja jord- och skogsbruk och längden diken är idag större än längden naturliga vattendrag (Esséen m.fl. 2004). Därmed rör vattnet sig snabbt genom landskapet och gör sötvattensmiljöerna mer känsliga för såväl höga flöden vid extrema nederbördsmängder som torka under perioder utan nederbörd. För att minska risken för översvämningar nedströms i vattensystemet behövs en storskalig rehabilitering av landskapets vattenhållande förmåga.

Tabell 11.1. Resultat av litteratursökning om möjliga effekter av klimatförändring på vanliga restaureringsåtgärder i Sverige.

Restaureringsåtgärd	Klimataspekt	Påverkan	Referens
Dammrivning	Nederbördsförändringar	Avrinningsområden med naturlig flödesregim anpassar sig till klimatförändringar så att klimatpåverkan buffras. Mer restaureringsåtgärder kommer behövas i hög-regulerade vattendrag.	Palmer m.fl. 2008
Dammrivning/E-flow	Invasiva arter	Att återställa den naturliga flödesregimen kan effektivt motverka eller ta bort invasiva arter. Å andra sidan kan dammar vara en effektiv barriär för invasiva arter.	Rahel och Olden 2008
E-flow	Temperatur och flöde	Utsläpp av hypo- eller epilimniskt vatten från dammar har en stor effekt på termisk regim och biota nedströms.	Olden och Naiman 2010
Dammrivning	Temperatur	Dammutrivning kan motverka/försena temperaturökning i vattendrag.	Perry m.fl. 2011
Dammrivning	Extremväder	Dammutrivning förhindrade utrotning av lax. Enligt modellerna kommer det att fortsätta bidra till laxens överlevnad i framtiden med ökande extremväder.	Battle m.fl. 2016
Dammrivning	Temperatur och torka	Artificiella refugier skapade av dammar kan vara viktigt i regioner som utsätts för torka. Dammar kan också fungera som en barriär för invasiva arter.	Beatty m.fl. 2017
Faunapassage	Nederbördsförändringar	Svårt för fisk att hitta ingång till passagen under högflöde och svårt för stora fiskar att passera under lågflöde.	Jensen och Aass 1995
Faunapassage	Nederbördsförändringar	Lågflödesförhållanden hindrar migration och begränsar faunapassagens effektivitet.	Arnekleiv och Kraabol 1996 Schmetterling m.fl. 2002 Noonan m.fl. 2012 Gauld m.fl. 2013
Faunapassage	Nederbördsförändringar	Ökad predation i faunapassager under lågflödesförhållande.	Gauld m.fl. 2013
Faunapassage	Temperatur	Hög vattentemperatur kan förhindra eller fördröja användning av faunapassager.	Gowans m.fl. 1999 Caudill m.fl. 2013 Keefer och Caudill 2016
Faunapassage	Invasiva arter och flöde	Ökad risk för spridning av invasiva kräftor via faunapassager under lågflödesförhållanden.	Rosewarne m.fl. 2013 Welsch och Loughman 2015

Restaureringsåtgärd	Klimataspekt	Påverkan	Referens
Habitat-lekplatsrestaurering	Översvämning	Ovanligt högflöde kan förstöra restaurerade områden. Hur bra enskild restaureringsåtgärd klarar högflöden beror på åtgärdstyp, ström-strahlerorder och åtgärdens position i vattendraget. Restaureringsåtgärder på meandrande sträckor med hög lateral konnektivitet är känsligare för höga flöden jämfört med relativt raka vattendragssträckor.	Schmetterling och Pierce 1999 Roper m.fl. 1998 Reich och Lake 2015
Habitat-lekplatsrestaurering	Extremt väder	Översvämning och torka påverkar populationsprocessor såsom dödlighet och rekrytering. Det gör att förbättringar i populationer och ekosystem, till följd av habitatrestaureringsåtgärder, kan ta längre tid.	Bond och Lake 2003
Habitat-lekplatsrestaurering	Invasiva arter	Arter som är snabba att kolonisera (ofta generalister och/eller invasiva) kan konkurrera ut målarter efter en restaureringsåtgärd.	Bond och Lake 2003
Habitat-lekplatsrestaurering	Generell	Fokusera habitat- och lekplatsrestaureringsåtgärder på vattendragssträckor med hög nuvarande påverkan. Man förutser en mindre förändring från ändrat klimat. Mer effekt av restaurering på ostörda sträckor som kommer att uppleva mycket förändring till följd av ett ändrat klimat.	Battin m.fl. 2007
Habitat-lekplatsrestaurering	Temperatur och flöde	Begränsad effekt av habitat och lekplatsrestaurering med ökande temperaturer och minskande flöde.	Beechie m.fl. 2013
Alla	Generell	Förändring i havsmiljön (till följd av klimatförändring) kan påverka havsvandrande arter så pass att restaureringsåtgärd på land/i sötvatten är mindre effektiva.	Scheurell och Williams 2005
Alla	Översvämning	Restaureringsåtgärd som bäst buffrar högflöden och översvämningar beror på lokala faktorer. Viktigt att tänka på hela avrinningsområdet.	Nilsson m.fl. 2018
Alla	Invasiva arter	Klimatförändringar kan göra att vissa arter inte längre kan överleva i en sjö eller vattendrag. Restaurering för att förbättra konnektiviteten blir irrelevant om målarten inte längre finns, eller inte kommer kunna överleva. Snarare blir det lättare för invasiva arter att etablera sig.	Rahel m.fl. 2008

12. Rekommendationer

Nedan följer nio rekommendationer om hur framtida restaurering i sötvatten bör ta hänsyn till ett förändrat klimat. Det innehåller förslag på både prioriterade åtgärder och på hur målbilder, integrerad vatten-landbaserad förvaltning och utvärdering av genomförda åtgärder kan planeras mer storskaligt.

- **Förbättra kunskapen om vilka sötvattensresurser vi har i Sverige och hur de kommer påverkas av ett ändrat klimat**

Klimatförändringarna kommer att orsaka ökad stress på redan påverkade sötvattensekosystem. De största förändringarna förväntas på nordliga breddgrader, med både ökande temperaturer och förändrade nederbörds-mönster som följd. För en effektiv nationell förvaltning av våra sötvattens-resurser behövs kunskap om var, hur mycket och vilken typ av vatten som finns, var det finns höga naturvärden att bevara eller som kan förstärkas, samt den dominerande markanvändningen i olika delar av landet och i enskilda avrinningsområden. Dessa kunskaper behöver sammanställas på ett sådant sätt att de kan användas vid planering och genomförande av praktiska restaureringsåtgärder. Vi behöver också information om hur stor förändring (t ex uppvärmning och nederbörd) våra sötvatten kommer att utsättas för i ett förändrat framtida klimat.

- **Använd en holistisk syn i restaureringsarbetet**

Ekosystem påverkas ofta av flera mänskliga störningar samtidigt (särskilt i sötvatten), till exempel av både vattenreglering och övergödning. Till detta kommer vi i framtiden också behöva lägga påverkan av ett förändrat klimat. Därför behövs en helhetssyn kring vilka åtgärder som kan och bör genomföras så att synergistiska (negativa) effekter av olika påverkan undviks. När det gäller jordbruk och urban markanvändning kan flera åtgärder genomföras, såsom att skapa buffertzoner i strand-zonen, minska gödselanvändningen nära sjöar och vattendrag, minska uttaget av vatten, återskapa våtmarker, utföra miljövänligt underhåll av diken och bevara vattenväxter i vattendraget.

- **Beakta möjliga klimateffekter i planeringsfasen**

För en effektiv förvaltning av våra sötvatten behöver vi kunskap om de sannolika effekterna av klimatförändringar och hur de kan påverka sötvattensekosystem. Förändringar hos fysiska och till viss del kemiska parametrar är mer förutsägbara än de mer komplexa biologiska förändringarna. Några av de viktigaste fysiska förändringarna att ta hänsyn till: minskad vårflod samt ökad temperatur, nederbörd, extremväder och mängd humusämnen/brunifiering. Biologiska effekter där man förutsäger en minskning av kallvattenarter, primärproduktion och födoävs-stabilitet och en ökning av (till exempel): varmvattensarter (inklusive invasiva arter), cyanobakterier, parasiter och en försämrad matchning mellan födoresurser (förändrad fenologi).

- **Identifiera, restaurera och skydda kallvattenrefugier**

Kallvattenrefugier kommer bli än viktigare i ett framtida, varmare klimat. Dessa habitat och vattenobjekt behöver därmed identifieras, restaureras och skyddas för att minimera påverkan av mänskliga aktiviteter. I många fall behöver kallvattenrefugier återskapas, till exempel genom buffrande kantzoner eller skydd av utströmningsområden. Viktigt är också att de görs åtkomliga för faunan (se nedan).

- **Åtgärda vandringshinder**

För att kallvattensarter skall kunna vandra till områden med lägre vattentemperaturer behövs fria vandringsvägar. Stora delar av det svenska vattenlandskapet är påverkat av dammar och andra vandringshinder (till exempel fellagda vägtrummor). Åtgärder som ger fria vandringsvägar blir än viktigare i ett varmare klimat. Dammar hindrar inte bara växters och djurs spridning i landskapet. De ökar också vattentemperaturen nedströms, ökar avdunstningen och hindrar transport av näringsämnen och sediment. Dammutrivning ska prioriteras före att anlägga fiskvägar.

- **Behåll och ge vattnet plats i landskapet**

I ett förändrat klimat kommer mängden vatten i systemen att variera i större omfattning än idag. Det kommer både innebära högre högflöden men även längre torrperioder (beroende på var i landet man befinner sig). Vatten behöver mer plats i landskapet, genom mer tillgängligt utrymme på svämplanet. Vattnet kan behållas längre i landskapet genom att återskapa försvunna våtmarker. I vattendrag som kan utsättas för extremt låga flöden kan det finnas behov av att smalna av fåror som är onaturligt vidgade och att samla vattenföringen, d.v.s. släppa vatten vid de tider på året då det är viktigast för de vattenlevande organismerna att det finns mycket vatten i systemet (vårflod).

- **Integrera land- och vattenbaserad förvaltning**

Många åtgärder i landmiljön kan få stora positiva effekter i sötvatten vid ett förändrat klimat. Det gäller till exempel markanvändningen i närzonen. Med en kantzon bestående av träd och högre vegetation bidrar beskuggning till sänkt vattentemperatur och rotsystemets filtrering av vatten minskar mängden näringsämnen och sediment som rinner ut i vattendraget.

- **Justera restaureringsmålen så att de är förenliga med framtida klimat**

Många restaureringsprojekt fokuserar på en specifik (mål-)art. Vid ett förändrat klimat är det inte alls säkert att de arter som tidigare funnits i systemet eller som man vill öka förekomsten av kommer att främjas. Fokus vid genomförandet av åtgärder bör därför ligga på att återskapa naturliga processer och funktioner istället för på att gynna enskilda arter.

- **Öka satsningen på utvärdering av genomförda åtgärder**

Vi behöver bättre förståelse för vilka åtgärder som har bäst effekt på organismer, funktion och ekosystem och hur resultaten av åtgärder påverkas av vattentyp, typ av åtgärd, annan mänsklig påverkan på ekosystemet etc. Det behövs ett fungerande övervakningsprogram vid genomförandet av åtgärder, för att förstå vad som ger förväntad effekt och för att värdera kostnadseffektiviteten av alternativa åtgärder. Övervakningen bör inkludera olika mått (responsvariabler) på ekosystemfunktion, biologiska, kemiska och fysiska (geomorfologiska) variabler kopplade till genomförd åtgärd. Det är också viktigt att övervakningen planeras och genomförs med en god statistisk design, så att förändringar efter genomförd åtgärd kan kopplas till uppmätta responsvariabler.

13. Fortsatt arbete och kunskapsluckor

Denna kunskapsöversikt över förändrat klimat på sötvattensrestaurering visar att det finns många kunskapsluckor. Det finns flera frågor som skulle behöva besvaras genom fortsatt forskning, men vi vill särskilt peka ut forskningsbehov inom följande områden:

- **Identifiering av kallvattensrefugier i vattenlandskapet**

På en nationell skala behöver vi förbättra kunskapen om var i vattenlandskapet vi finner kallvattensrefugier och hur dessa kommer påverkas av ett förändrat klimat. Vi behöver även förbättra kunskapen om hur dessa refugier påverkar ekosystemprocesser och funktion samt vilka organismer som har behov av dessa habitat (t ex källor och grundvattensutströmningspunkter), särskilt i ett förändrat klimat.

- **Kumulativa effekter och dess påverkan på sötvattens ekosystem**

Ekosystem i rinnande vatten utsätts för många typer av mänsklig påverkan vars kumulativa effekter kan försämra systemets förmåga att klara av miljöförändringar. I dagsläget, när uppvärmningshastigheten är snabbare än någonsin, är förståelsen för potentiella synergistiska effekter av lokala påverkansfaktorer (till exempel dämning, vattenreglering, förändrad markanvändning, näringsläckage) och klimat fortfarande mycket begränsad. Detta försämrar vår förmåga att planera och anpassa effektiva åtgärder för bevarande och restaurering i sötvattens ekosystem. Både observationsstudier och experiment behövs för att förbättra vår förståelse för när en påverkan är synergistisk och om det kan motverkas på något sätt.

- **Utvärdera biologiska effekter av ett förändrat klimat**

Vi har ett stort behov av att utöka vår kunskap om hur både naturligt förekommande arter och potentiellt invasiva arter reagerar på (miljö-) förändringar kopplat till ett förändrat klimat. Dessa förändringar pågår nu och därmed behövs det fortsatta undersökningar av pågående effekter (och inte enbart modeller/hypoteser) kring vilka förändringar som sker i våra sjöar och vattendrag.

- **Koppling mellan konnektivitet och restaureringsåtgärder**

Det räcker inte enbart med att genomföra åtgärder och restaurera sötvattensmiljöer. Det är också mycket viktigt att förstå hur arters spridningsmönster och förmåga att förflytta sig i vattensystemen ser ut. Speciellt i ett förändrat klimat när t ex ändrade flöden och temperatur ytterligare kommer att (negativt) påverka arters förmåga att migrera och ta sig till lämpliga habitat för t ex lek och övervintring.

14. Publikationer och andra kommunikationsinsatser

Publikationer

Donadi, S., L. Sandin, C. Tamario & E. Degerman. 2019. Country-wide analysis of large wood as a driver of fish abundance in Swedish streams: who benefits and where? *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 29: 706–716, doi: 10.1002/aqc.3107.

Donadi, S., E. Degerman, B.G. McKie, D. Jones, K. Holmgren & L. Sandin. (Submitted). How does land-use, dams and climate interact to affect brown trout populations in temperate and boreal streams?

Jones, D., S. Donadi, K. Holmgren & L. Sandin. (Submitted) Predicted effects of climate on freshwater ecosystems highlight the importance of keeping carbon in the soil.

Föredrag och postrar

Degerman, E. 2019. Akvatisk restaurering i ett förändrat klimat. Presentation på ”Sötvattensrestaurering – i ett förändrat klimat”, slutseminarium för projektet FRESHREST (Freshwater landscapes – management and restoration with climate change), arrangerat på Hotell C, Vasaplan 4, i Stockholm, 9 december 2019.

Donadi, S., E. Degerman, D. Jones, K. Holmgren & L. Sandin. 2019. Effects of multiple stressors and climate change on freshwater ecosystems. Presentation på ”Sötvattensrestaurering – i ett förändrat klimat”, slutseminarium för projektet FRESHREST (Freshwater landscapes – management and restoration with climate change), arrangerat på Hotell C, Vasaplan 4, i Stockholm, 9 december 2019.

Donadi, S., E. Degerman & L. Sandin. 2019. Brown trout in boreal streams. Need for restoration at catchment scale. Poster at “SER2019: 8th World Conference on Ecological restoration”, arranged by the Society of Ecological Restoration, in Cape Town, South Africa, 24–28 September 2019.

Jones, D. 2019. Climate scenarios and current data: predicting the effects of climate change for management of freshwater. Presentation at “Running water restoration in a changing climate”, Satellite symposium at “The Swedish Oikos Conference 2019”, organized by the Swedish University for Agricultural Sciences (SLU) and Uppsala University, in Ultuna, 4–7 February 2019.

Jones, D. 2019. Klimatförändringar och sötvatten –FRESHREST. Presentation på ”Sötvattensrestaurering – i ett förändrat klimat”, slutseminarium för projektet FRESHREST (Freshwater landscapes – management and restoration with climate change), arrangerat på Hotell C, Vasaplan 4, i Stockholm, 9 december 2019.

Jones, D., E. Degerman, S. Donadi, K. Holmgren, E. Petersson, E. von Wachenfeldt & L. Sandin. 2019. Klimatförändringar i sjöar och vattendrag: Förvaltning och restaurering. Presentation på "Life Triple Lakes: slutseminarium av förvaltning av framtidens vatten, arrangerat av Länsstyrelsen i Jämtlands län, på Clarion Hotel, i Östersund, 14–15 maj 2019.

Jones, D., E. Degerman, S. Donadi, K. Holmgren, E. von Wachenfeldt & L. Sandin. 2019. Klimatförändringars påverkan på ekologisk restaurering i sötvatten – erfarenheter från FRESHREST. Presentation på "Vattendrag, våtmark och skog – synergier mellan Natura 2000, vattenförvaltning och andra samhällsintressen", arrangerad av Skogsstyrelsen, på Härnösands bibliotek, i Härnösand, 13–14 november 2019.

Jones, D., S. Donadi, K. Holmgren, E. Petersson, E. von Wachenfeldt & L. Sandin. 2019. FRESHREST. Freshwater landscapes – management and restoration with climate change. Poster på "Vattendagarna 2019", arrangerat av Svenska Föreningen för Limnologi, på Elite Stadshotellet, i Västerås, 7–8 oktober 2019.

Sandin, L. 2019. Running water restoration in a changing climate. Introductory presentation at "Running water restoration in a changing climate", Satellite symposium at "The Swedish Oikos Conference 2019", organized by the Swedish University for Agricultural Sciences (SLU) and Uppsala University, in Ultuna, 4–7 February 2019.

Sandin, L. 2019. Sötvattensrestaurering. Presentation på "Sötvattensrestaurering – i ett förändrat klimat", slutseminarium för projektet FRESHREST (Freshwater landscapes – management and restoration with climate change), arrangerat på Hotell C, Vasaplan 4, i Stockholm, 9 december 2019.

Sandin, L., S. Donadi, K. Holmgren & D. Jones. 2019. Restoration in freshwater Ecosystems – taking climate change into account. Presentation at "SER2019: 8th World Conference on Ecological restoration", arranged by the Society of Ecological Restoration, in Cape Town, South Africa, 24–28 September 2019.

Sandin, L., D. Jones, S. Donadi, E. Petersson, K. Holmgren & E. von Wachenfeldt. 2019. FRESHREST. Freshwater landscapes – management and restoration with climate change. Poster at "The Swedish Oikos Conference 2019", organized by the Swedish University for Agricultural Sciences (SLU) and Uppsala University, in Ultuna, 4–7 February 2019.

Sandin, L., D. Jones, S. Donadi, E. Petersson, K. Holmgren, E. von Wachenfeldt, R. Jansson, B. Malm Renöfält, Å. Widén, M. Bryntesson, A.P. Berglund, E. Degerman & J. Segersten. 2019. EKOSPILL, FRESHREST och FRESHMAN. Presentation av tre projekt, i mässområdet på "Havs- och vattenforum 2019. Tema Klimatförändringar", arrangerat av Havs- och vattenmyndigheten, på Eriksberg, i Göteborg, 4–5 juni 2019.

15. Tack

Ett stort tack till alla föredragshållare och deltagare vid satellitsymposiet på Svenska OIKOS konferensen i Uppsala våren 2019: “Running water restoration in a changing climate” samt till föredragshållare och deltagare vid FRESHREST projektets slutseminarium ”Sötvattensrestaurering – i ett förändrat klimat” i Stockholm hösten 2019. Ett särskilt stort tack till FRESHREST projektets referensgrupp som består av Elisabet Andersson, Skogsstyrelsen, Jakob Bergengren, Tekniska verken i Linköping AB, Ingemar Näslund, Länsstyrelsen i Jämtlands län, Erik Årnfelt, Havs- och vattenmyndigheten och Erik Degerman, Sveriges lantbruksuniversitet. Alla fotografier utom en i rapporten har tagits av Erik Degerman.

16. Källförteckning

- Abramovitz, J. N. (1996). Imperiled waters, impoverished future: the decline of freshwater ecosystems. Worldwatch paper no. 128. Washington.
- Addams, L., et al. (2009). Charting our water future: economic frameworks to inform decision-making. McKinsey & Company. New York.
- Adrian, R., et al. (2006). Life-history traits of lake plankton species may govern their phenological response to climate warming. *Global Change Biology* 12(4): 652–661.
- Andersson, M. (2005). Fungerar våra fiskvägar? Miljömålsuppföljning i Västra Götalands län. Rapport 2005:56, 40 s.
- Arnekleiv, J. V. and M. Kraabøl (1996). Migratory behaviour of adult fast-growing brown trout (*Salmo trutta*, L.) In relation to water flow in a regulated Norwegian river. *Regulated Rivers: Research & Management* 12(1): 39–49.
- Aylward, B., et al. (2005). Freshwater ecosystem services. *Ecosystems and human well-being: policy responses* 3: 213–256.
- Battin, J., et al. (2007). Projected impacts of climate change on salmon habitat restoration. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104(16): 6720–6725.
- Battle, L., et al. (2016). The impact of dam removal and climate change on the abundance of the Formosan landlocked salmon. *Ecological Modelling* 339: 23–32.
- Beatty, S., et al. (2017). Rethinking refuges: Implications of climate change for dam busting. *Biological Conservation* 209: 188–195.
- Beechie, T., et al. (2013). Restoring salmon habitat for a changing climate. *River Research and Applications* 29(8): 939–960.
- Bennett, S., et al. (2016). Progress and challenges of testing the effectiveness of stream restoration in the Pacific Northwest using intensively monitored watersheds. *Fisheries* 41(2): 92–103.
- Bergek, S., et al. (2017). Ekosystemtjänster från svenska sjöar och vattendrag: Identifiering och bedömning av tillstånd. Havs- och vattenmyndighetens rapport 2017:7.
- Bond, N. R. and P. S. Lake (2003). Local habitat restoration in streams: constraints on the effectiveness of restoration for stream biota. *Ecological Management & Restoration* 4(3): 193–198.
- Boretti, A. and L. Rosa (2019). Reassessing the projections of the World Water Development Report. *npj Clean Water* 2(1): 1–6.

- Borgström, S., et al. (2016). Funding ecological restoration policy in practice – patterns of short-termism and regional biases. *Land use policy* 52: 439–453.
- Bowler, D. E., et al. (2012). What are the effects of wooded riparian zones on stream temperature? *Environmental Evidence* 1(1): 3.
- Brown, A. G., et al. (2018). Natural vs anthropogenic streams in Europe: history, ecology and implications for restoration, river-rewilding and riverine ecosystem services. *Earth-Science Reviews* 180: 185–205.
- Calles, O., et al. (2013). Anordningar för upp- och nedströmspassage av fisk vid vattenanläggningar: Underlag till vägledning om lämpliga försiktighetsmått och bästa möjliga teknik för vattenkraft. Havs- och vattenmyndighetens rapport 2013: 14, 114 sidor.
- Capon, S. J., et al. (2013). Riparian ecosystems in the 21st century: hotspots for climate change adaptation? *Ecosystems* 16(3): 359–381.
- Caudill, C. C., et al. (2013). Indirect effects of impoundment on migrating fish: temperature gradients in fish ladders slow dam passage by adult Chinook salmon and steelhead. *PloS one* 8(12): e85586.
- Darwall, W., et al. (2018). The Alliance for Freshwater Life: A global call to unite efforts for freshwater biodiversity science and conservation. *Aquatic Conserv: Mar Freshw Ecosyst* 28: 1015– 1022. <https://doi.org/10.1002/aqc.2958>
- de Wit, H. A., et al. (2016). Current browning of surface waters will be further promoted by wetter climate. *Environmental Science & Technology Letters* 3(12): 430–435.
- Degerman, E. (2008). Ekologisk restaurering av vattendrag, Naturvårdsverket.
- Degerman, E., C. Tamario, L. Sandin & J. Törnblom (2017). ”Fysisk restaurering av sjöar”. *Aqua Reports* 2017:10, 105 sidor.
- Dudgeon, D., et al. (2006). Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. *Biological reviews* 81(2): 163–182.
- Eklund, A., et al. (2015). Sveriges framtida klimat: Underlag till Dricks-vattenutredningen, SMHI.
- Esséen, P-A. et al. (2004). Linjära landskapselement i Sverige: skattningar från 2003 års NILS-data. *SLU Arbetsrapport* 127 2004. ISSN 1401–1204.
- Evans, C. D., et al. (2006). Alternative explanations for rising dissolved organic carbon export from organic soils. *Global Change Biology* 12(11): 2044–2053.
- Feld, C. K., et al. (2011). From natural to degraded rivers and back again: a test of restoration ecology theory and practice. *Advances in ecological research*, Elsevier. 44: 119–209.

Finn, D. S., et al. (2010). Physical and biological changes to a lengthening stream gradient following a decade of rapid glacial recession. *Global Change Biology* 16(12): 3314–3326.

Finstad, A. G., et al. (2014). Unimodal response of fish yield to dissolved organic carbon. *Ecology Letters* 17(1): 36–43.

Gauld, N., et al. (2013). Reduced flow impacts salmonid smolt emigration in a river with low-head weirs. *Science of the total environment* 458: 435–443.

Gowans, A., et al. (1999). Movements of adult Atlantic salmon in relation to a hydroelectric dam and fish ladder. *Journal of Fish Biology* 54(4): 713–726.

Havs- och vattenmyndigheten (2019). Levande sjöar och vattendrag. Förddjupad utvärdering av miljö kvalitetsmålen 2019. Havs- och vattenmyndighetens rapport 2019:2.

Hedeklint, K. and B. Olsson (2019). Protected nature 2018. Sveriges officiella statistik, statistiska meddelanden. URN:NBN:SE:SCB-2019-MI41SM1901_pdf. ISSN 1654-3947 Serie MI – Miljö. Utkom den 24 maj 2019.

Heino, J., et al. (2019). Improving ecological connectivity in boreal forests of the Barents region: Background, issues and recommendations, Nordiska Ministerrådet.

Hering, D., et al. (2015). Contrasting the roles of section length and instream habitat enhancement for river restoration success: a field study of 20 European restoration projects. *Journal of Applied Ecology* 52(6): 1518–1527.

Hillebrand, H. (2004). On the generality of the latitudinal diversity gradient. *The American Naturalist* 163(2): 192–211.

Jensen, A. J. and P. Aass (1995). Migration of a fast-growing population of brown trout (*Salmo trutta* L.) through a fish ladder in relation to water flow and water temperature. *Regulated Rivers: Research & Management* 10(2–4): 217–228.

Jiménez Cisneros, B. E., et al. (2014). Freshwater Resources. *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.* C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken et al. Cambridge, UK, Cambridge University Press: 229–269.

Johnson, R. K. and K. Almlöf (2016). Adapting boreal streams to climate change: effects of riparian vegetation on water temperature and biological assemblages. *Freshwater Science* 35(3): 984–997.

Jonsson, M. (2015). Rikedomar runt rinnande vatten. De ekonomiska värdena av en miljöanpassad vattenkraft. Sportfiskarna, WWF, Älvräddarna och Naturskyddsföreningen.

- Keefer, M. L. and C. C. Caudill (2016). Estimating thermal exposure of adult summer steelhead and fall C hinook salmon migrating in a warm impounded river. *Ecology of freshwater fish* 25(4): 599–611.
- Kinlock, N. L., et al. (2018). Explaining global variation in the latitudinal diversity gradient: Meta-analysis confirms known patterns and uncovers new ones. *Global ecology and biogeography* 27(1): 125–141.
- Kritzberg, E.S. (2017). Centennial-long trends of lake browning show major effect of afforestation. *Limnology and Oceanography Letters* 2: 105–112.
- Kummu, M., et al. (2011). How close do we live to water? A global analysis of population distance to freshwater bodies. *PloS one* 6(6): e20578.
- Lake, P. S. (2001). On the maturing of restoration: linking ecological research and restoration. *Ecological Management & Restoration* 2(2): 110–115.
- Land, M., et al. (2016). How effective are created or restored freshwater wetlands for nitrogen and phosphorus removal? A systematic review. *Environmental Evidence* 5(1): 9.
- Lundmark, T., et al. (2014). Potential roles of Swedish forestry in the context of climate change mitigation. *Forests* 5(4): 557–578.
- Malm Renöfalt, B. and J. Ahonen (2013). Ekologiska flöden och ekologiskt anpassad vattenreglering. Havs- och vattenmyndigheten rapport 2013:12.
- Malmqvist, B. and S. Rundle (2002). Threats to the running water ecosystems of the world. *Environmental conservation* 29(2): 134–153.
- McClain, M. E., et al. (2003). Biogeochemical hot spots and hot moments at the interface of terrestrial and aquatic ecosystems. *Ecosystems*: 301–312.
- Mekonnen, M. M. and A. Y. Hoekstra (2016). Four billion people facing severe water scarcity. *Science advances* 2(2): e1500323.
- Moran, E. F., et al. (2018). Sustainable hydropower in the 21st century. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115(47): 11891–11898.
- Moss, B., et al. (2009). Climate change and the future of freshwater biodiversity in Europe: a primer for policy-makers. *Freshwater reviews* 2(2): 103–131.
- Naturvårdsverket. (2010). ”Handbok för kalkning av sjöar och vattendrag”. Naturvårdsverket Handbok 2010:2, 89 sidor.
- Naturvårdsverket (2019). ”Miljömålen – Årlig uppföljning av Sveriges nationella miljömål 2019 – Med fokus på statliga insatser”. Naturvårdsverket Rapport 6880, 477 sidor.
- Nilsson, C., et al. (2005). Fragmentation and flow regulation of the world’s large river systems. *Science* 308(5720): 405–408.
- Nilsson, C., et al. (2018). Ecological restoration as a means of managing inland flood hazards. *BioScience* 68(2): 89–99.

- Noonan, M. J., et al. (2012). A quantitative assessment of fish passage efficiency. *Fish and Fisheries* 13(4): 450–464.
- Nyberg, P., Bergstrand, E., Degerman, E. & O. Enderlein, et al. (2001). Recruitment of pelagic fish in an unstable climate; studies in Sweden's four largest lakes. *Ambio* 30(8):559–564.
- Olden, J. D. and R. J. Naiman (2010). Incorporating thermal regimes into environmental flows assessments: modifying dam operations to restore freshwater ecosystem integrity. *Freshwater Biology* 55(1): 86–107.
- Paerl, H. W. and J. Huisman (2008). Blooms like it hot. *Science* 320(5872): 57–58.
- Palmer, M. A., et al. (2005). Standards for ecologically successful river restoration. *Journal of Applied Ecology* 42(2): 208–217.
- Palmer, M. A., et al. (2008). Climate change and the world's river basins: anticipating management options. *Frontiers in Ecology and the Environment* 6(2): 81–89.
- Perry, R. W., et al. (2011). Simulating daily water temperatures of the Klamath River under dam removal and climate change scenarios, US Geological Survey.
- Poff, N., et al. (2002). Aquatic ecosystems and global climate change. *Pew Center on Global Climate Change, Arlington, VA* 44: 1–36.
- Prepas, E. E., et al. (2001). Forest harvest impacts on water quality and aquatic biota on the Boreal Plain: introduction to the TROLS lake program. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 58(2): 421–436.
- Rahel, F.J. and Olden, J.D. (2008), Assessing the Effects of Climate Change on Aquatic Invasive Species. *Conservation Biology*, 22: 521–533.
- Rahel, F.J. et al. (2008), Managing Aquatic Species of Conservation Concern in the Face of Climate Change and Invasive Species. *Conservation Biology*, 22: 551–561.
- Reich, P. and P. S. Lake (2015). Extreme hydrological events and the ecological restoration of flowing waters. *Freshwater Biology* 60(12): 2639–2652.
- Roper, B. B., et al. (1998). Durability of Pacific Northwest instream structures following floods. *North American Journal of Fisheries Management* 18(3): 686–693.
- Rosewarne, P. J., et al. (2013). Do lowhead riverine structures hinder the spread of invasive crayfish? Case study of signal crayfish (*Pacifastacus leniusculus*) movements at a flow gauging weir. *Management of Biological Invasions* 4(4): 273–282.

- Rosset, V. and B. Oertli (2011). Freshwater biodiversity under climate warming pressure: identifying the winners and losers in temperate standing waterbodies. *Biological Conservation* 144(9): 2311–2319.
- Sabater, S. (2008). Alterations of the global water cycle and their effects on river structure, function and services. *Freshwater reviews* 1(1): 75–89.
- Sala, O. E., et al. (2000). Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science* 287(5459): 1770–1774.
- Sandin, L., et al. (2017). Ekologiska och ekonomiska strategier för optimering av vattenkraftsrelaterade miljöåtgärder, EKOLIV. Energiforsk rapport 2017–450.
- Scheffer, M., S. et al. (2001). Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature* 413: 591–596.
- Scheuerell, M. D. and J. G. Williams (2005). Forecasting climate-induced changes in the survival of Snake River spring/summer Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*). *Fisheries Oceanography* 14(6): 448–457.
- Schmetterling, D. A. and R. W. Pierce (1999). Success of instream habitat structures after a 50-year flood in Gold Creek, Montana. *Restoration Ecology* 7(4): 369–375.
- Schmetterling, D. A., et al. (2002). Efficacy of three Denil fish ladders for low-flow fish passage in two tributaries to the Blackfoot River, Montana. *North American Journal of Fisheries Management* 22(3): 929–933.
- Seavy, N. E., et al. (2009). Why climate change makes riparian restoration more important than ever: recommendations for practice and research. *Ecological Restoration* 27(3): 330–338.
- Smol, J. P., et al. (2005). Climate-driven regime shifts in the biological communities of arctic lakes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102(12): 4397–4402.
- Snucins, E. and G. John (2000). Interannual variation in the thermal structure of clear and colored lakes. *Limnology and Oceanography* 45(7): 1639–1646.
- Solomon, C. T., et al. (2015). Ecosystem consequences of changing inputs of terrestrial dissolved organic matter to lakes: current knowledge and future challenges. *Ecosystems* 18(3): 376–389.
- Strayer, D. L. and D. Dudgeon (2010). Freshwater biodiversity conservation: recent progress and future challenges. *Journal of the North American Benthological Society* 29(1): 344–358.
- Tamario, C., Degerman, E., Donadi, S., Spjut, D., Sandin, L., et al. (2018). Nature-like fishways as compensatory lotic habitats. *River Research and Applications* 2018:1–9.

Tank, J. L., et al. (2010). A review of allochthonous organic matter dynamics and metabolism in streams. *Journal of the North American Benthological Society* 29(1): 118–146.

Tiwari, T., et al. (2019). Contrasting responses in dissolved organic carbon to extreme climate events from adjacent boreal landscapes in Northern Sweden. *Environmental Research Letters* 14(8): 084007.

Wagner, A. and J. Benndorf (2007). Climate-driven warming during spring destabilises a *Daphnia* population: a mechanistic food web approach. *Oecologia* 151(2): 351–364.

Welsh, S. A. and Z. J. Loughman (2015). Upstream dispersal of an invasive crayfish aided by a fish passage facility. *Management of Biological Invasions* 6(3): 287–294.

Winder, M. and D. E. Schindler (2004). Climate change uncouples trophic interactions in an aquatic ecosystem. *Ecology* 85(8): 2100–2106.

Wohl, E., et al. (2015). The science and practice of river restoration. *Water Resources Research* 51(8): 5974–5997.

Wojtal-Frankiewicz, A. (2012). The effects of global warming on *Daphnia* spp. population dynamics: a review. *Aquatic Ecology* 46(1): 37–53.

Wolff, B. A., et al. (2019). Resilience and regime shifts: do novel communities impede ecological recovery in a historically metal-contaminated stream? *Journal of Applied Ecology*:1–12.

Von Wachenfeldt, E. (utkast). Prioriterade åtgärder i våtmarker och sötvatten. Analys och uppskattning av åtgärder för att uppnå gynnsam bevarandestatus. Rapport inom GRIP för LIFE-IP.

Vörösmarty, C. J., et al. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature* 467(7315): 555.

WWAP (United Nations world water assessment programme) (2018). The United Nations world water development report 2018: Nature based solutions for water. Paris, UNESCO.

Sötvatten – förvaltning och restaurering med förändrat klimat

RAPPORT 6942

NATURVÅRDSVERKET
ISBN 978-91-620-6942-1
ISSN 0282-7298

Rapporten uttrycker nödvändigtvis inte Naturvårdsverkets ställningstagande. Författaren svarar själv för innehållet och anges vid referens till rapporten.

Slutrapport från projektet FRESHREST (Sötvattenslandskapet – förvaltning och restaurering i förändrat klimat)

LEONARD SANDIN, SERENA DONADI, KERSTIN HOLMGREN,
EDDIE VON WACHENFELDT & DOUGLAS JONES

Rapporten sammanfattar kunskapsläget om hur sötvattens ekosystem påverkas av klimatförändringar. Forskarna har identifierat nyckelbiotoper och arter som behöver skydd, utvärderat effekter av klimatförändringar på ekosystem som är utsatta för flera samtidiga typer av påverkan och bedömt den ekologiska effektiviteten i restaureringsåtgärder i sötvatten.

I rapporten föreslås bland annat att vandringshinder bör åtgärdas och att kallvattenrefugier (habitat i ett vattendrag där vattentemperaturen är lägre) ska restaureras och skyddas. Författarna efterlyser en helhetssyn i restaureringsarbetet och att möjliga klimateffekter ska beaktas i planeringsfasen. Det är en fördel om land- och vattenbaserad förvaltning kan integreras.

Forskarna pekar ut ett antal kunskapsluckor, exempelvis hur kallvattenrefugier i vattenlandskapet kan identifieras och hur sötvattens ekosystem påverkas av kumulativa effekter av mänsklig påverkan.

Forskningen har finansierats av Naturvårdsverkets miljöforskningsanslag till stöd för Naturvårdsverket och Havs- och vattenmyndighetens verksamhet.

