

Hydrologiska aspekter på åtgärder mot vattenbrist och torka inom avrinningsområden

Göran Lindström



Pärmbild.

Bilden föreställer Uttorkat tillflöde till Stora Älgsjön, Åby, 23 september 2018.

Foto Niclas Hjerdt

HYDROLOGI Nr 122

Hydrologiska aspekter på åtgärder mot vattenbrist och torka inom avrinningsområden

Göran Lindström

Denna sida är avsiktligt blank

Sammanfattning

Vattenbrist och torra har varit i fokus i Sverige under senare åren. 2016-2018 var särskilt torra i södra Sverige. Syftet med denna rapport är främst att jämföra de senaste åren med tidigare förhållanden och att analysera effekten av olika åtgärder mot vattenbrist och torra. Hydrologiska mätserier analyserades, ända sedan 1807 fram till och med 2018. Tonvikten är på perioden från och med 1900, eftersom få stationer var igång innan dess. Vattenföringen minskar inte generellt i Sverige. Lågflödena har ökat i norra Sverige, troligen beroende på milda vintrar på senare år. I sydöstra Sverige har lågflödena i stället minskat, eventuellt delvis på grund av regleringar. 2016-2018 var mycket torra i sydost. Vilket år som har varit torrast beror på var i landet man avser och vad man menar med torrt. Lågflöden analyserades både med statistiska metoder och med den hydrologiska modellen S-HYPE. Osäkerheten i uppskattningar av lågflöden är stor i båda metodvalen. Några sätt att förbättra metodiken föreslås i rapporten. Effekten av olika scenarier beräknades både med en statistisk metod och med S-HYPE. Den faktor som har störst effekt för att höja lågflödena är att man sparar vatten i sjöar, särskilt om man reglerar dem så att vatten sparas till sommaren. De flesta av de simulerade förändringarna i landskapet gav mindre effekt. Sammanfattningsvis är det framförallt vädret och klimatet som avgör vattenflödet. Att det var så torrt åren 2016-2018 beror främst på att det regnade så lite. Effekterna av torrperioder kan mildras genom att man sparar vatten i till exempel sjöar eller dammar.

Förord

Arbetet som beskrivs i denna rapport har utförts vid SMHI:s hydrologiska forskningsenhet. Förutom författaren har flera personer bidragit. Charlotta Pers och Johan Strömqvist har varit med och utvecklat HYPE-modellen för projektets räkning, speciellt rutinen för anlagda våtmarker i kapitel 6. Yeshewatesfa Hundecha har bidragit till de statistiska beräkningarna i kapitel 12. Niclas Hjerdt har bidragit med idéer och erfarenhetsutbyte under arbetet, samt omslagsbilden. Jörgen Rosberg hjälpte till med att göra kartorna. Ekonomiskt stöd har erhållits från Havs- och vattenmyndigheten (HaV). Ett stort tack riktas till alla som har bidragit till arbetet!

Denna sida är avsiktligt blank

Innehållsförteckning

FÖRORD	0
1 BAKGRUND	1
2 SYFTE	1
3 METODIK, DATA OCH DEFINITIONER.....	2
3.1 Definitioner och begrepp.....	2
4 STATISTISK ANALYS AV LÅNGA MÄSERIER	0
4.1 Vattenföring.....	0
5 FÖRENKLADE LÅNGTIDSPROGNOSER	0
6 ANLAGDA VÅTMARKER	1
7 VATTENUTTAG	2
8 VATTENBALANSBERÄKNINGAR	3
9 ANALYS AV MARKANVÄNDNINGENS BETYDELSE	4
10 MODELLERING AV LÅGFLÖDEN.....	6
11 SCENARIOBERÄKNINGAR MED S-HYPE.....	11
12 SCENARIOBERÄKNINGAR MED STATISTISKA METODER.....	15
13 DISKUSSION.....	19
14 SLUTSATSER	19
15 REFERENSER	21
16 APPENDIX	23

Denna sida är avsiktligt blank

1 Bakgrund

Vattenbrist och torka har varit i fokus inom många samhällsområden under de senaste åren, särskilt i södra Sverige. 2016 var mycket torrt, med vattenbrist på många håll, bland annat på Öland och Gotland. Vattenståndet i Hjälmarens var rekordlångt under hösten 2016, men återhämtade sig en aning under 2017. Mot bakgrund av problemen med vattenförsörjning och låga vattennivåer och vattenflöden gav Havs- och vattenmyndigheten i uppdrag åt SMHI:s hydrologiska forskningsavdelning att studera den aktuella torrperioden och undersöka vilken effekt olika åtgärder skulle kunna ha på vattentillgången under sådana perioder. Arbetet påbörjades under hösten 2017.

SMHI har utvecklat en hydrologisk modell, S-HYPE, för att beskriva vattentillgång och flödesvariationer i hög rumslig upplösning för hela Sverige. Modellresultat finns tillgängliga för bland annat vattenförvaltningsarbetet via <http://vattenweb.smhi.se/>. S-HYPE används även inom den hydrologiska varningstjänsten vid SMHI sedan 2013. För varningstjänsten har fokus varit på höga flöden, och modellen har förbättrats kontinuerligt. Lågvattenflöden har haft lägre prioritet, och S-HYPE överskattar i allmänhet lågvatten mätt som MLQ i södra Sverige (se till exempel utvärderingsverktyget <http://vattenweb.smhi.se/modeldiff/>).

Bland annat som en effekt av vattenbristen under 2016 har en hel del arbeten relaterade till lågvatten påbörjats vid SMHI. Vid varningstjänsten har man börjat göra klimatologiska prognoser med S-HYPE för 6 månader framåt. Med klimatologiska prognoser avses här att man utifrån de hydrologiska förhållanden som råder vid beräkningens start, räknar 6 månader framåt med det uppmätta vädret under tidigare år. Normalt kan man då använda 30-50 års data, och får därmed fram intervall som kan uttryckas i form av sannolikheten för vattenbrist under prognosperioden. Resultaten presenteras som risk för vattenbrist på SMHI:s hemsida. För lågvattenberäkningarna har varningstjänsten tagit fram en version av S-HYPE med något förändrade parametrar, som inte överskattar lågflöden lika ofta.

Många studier har naturligtvis gjorts genom åren över vilka effekter som olika åtgärder i landskapet kan ha på vattenföringen. På SMHI har flera studier tidigare gjorts med HBV-modellen, men oftast har en åtgärd i taget studerats, och dessutom i få områden. Fokus har ofta varit på höga flöden. Exempel på åtgärder som simulerats är myrdikning (Johansson, 1993) och kalavverkning (Brandt et al. 1988). Vattenbrist och torka har fått förhållandevis lite uppmärksamhet vid SMHI, även om det finns vissa undantag som till exempel Eriksson et al. (1987). Nu finns en möjlighet att simulera många förändringar, i hög rumslig upplösning, i och med att S-HYPE finns uppsatt för hela landet, med mestadels god anpassning mot uppmätta vattenföringsdata.

2 Syfte

Projektets syfte är att:

- Jämföra nuvarande torrperiod med tidigare förhållanden.
- Förbättra hur S-HYPE beskriver lågvattenförhållanden.
- Simulera vilken effekt åtgärder i landskapet kan ha för att höja vattentillgången under torrperioder.

3 Metodik, data och definitioner

Den hydrologiska modelluppsättningen S-HYPE användes i projektet. S-HYPE är en beskrivning av flödena av vatten och ämnen i mark, sjöar och vattendrag. Hela landet beskrivs i hög rumslig upplösning. Den första uppsättningen av S-HYPE beskrivs av Strömqvist et al. (2012). S-HYPE är i sin tur en tillämpning av den hydrologiska modellkoden HYPE ("Hydrological Predictions for the Environment"), se Lindström et al. (2010). Både HYPE-koden och S-HYPE-modellen har dock vidareutvecklats avsevärt sedan dessa publikationer skrevs.

Under projektets gång har tre nya versioner av S-HYPE lanserats i vattenwebb. Den nu använda SVAR-indelningen (SVAR2016) har ca 40000 delområden. Den typiska storleken för ett delavrinningsområde är ca 7 km². Delavrinningsområdena är i sin tur indelade enligt markanvändning och jordart. Det mesta av detta arbete har gjorts inom SMHI:s vattenförvaltningsarbete, men fokus på lågvatten har ökat i och med detta projekt. Det har dock visat sig vara svårt att förbättra beskrivningen av lågflöden utan att samtidigt försämra andra delar i beräkningen. Ett problem har varit att vi har saknat ett bra sätt att beräkna noggrannheten i lågflödesberäkningarna, på grund av att lågflödena ofta blir noll (eftersom man inte kan beräkna relativa fel när nämnaren är noll etc.).

Resultaten som redovisas i denna rapport är framtagna med S-HYPE-versionerna 2016b och 2016c, men med vissa rutiner som inte finns med i modellen i vattenwebb. Nästa officiella version av S-HYPE planeras till hösten 2019. Förbättringar från detta projekt har kommit med succesivt i S-HYPE.

Mätningar av vattenstånd och vattenföring från SMHI:s arkiv har använts för de statistiska analyserna.

3.1 Definitioner och begrepp

Q Vattenföring.

LLQ Lägsta dygnsvärdet under perioden.

MLQ Medelvärdet under perioden av de enskilda årens lägsta dygnsvärden.

MHQ Medelvärdet under perioden av de enskilda årens högsta dygnsvärden.

MQ Medelvärdet av alla dygnsflödena, antingen per år, eller under hela perioden.

NSE Anpassningsmättet Nash-Sutcliffe Efficiency (Nash & Sutcliffe, 1970). Det maximala värdet = 1, vilket motsvarar en perfekt överensstämmelse under hela perioden.

PTHBV Databas för interpolerad nederbörd och temperatur på 4x4 km skala, för hela landet.

SVAR Svenskt Vattenarkiv

Vattenwebb <https://www.smhi.se/data/hydrologi/vattenwebb>. Visualisering och nedladdning av observationer, modelldata och register gällande sjöar, vattendrag och kustområden i Sverige.

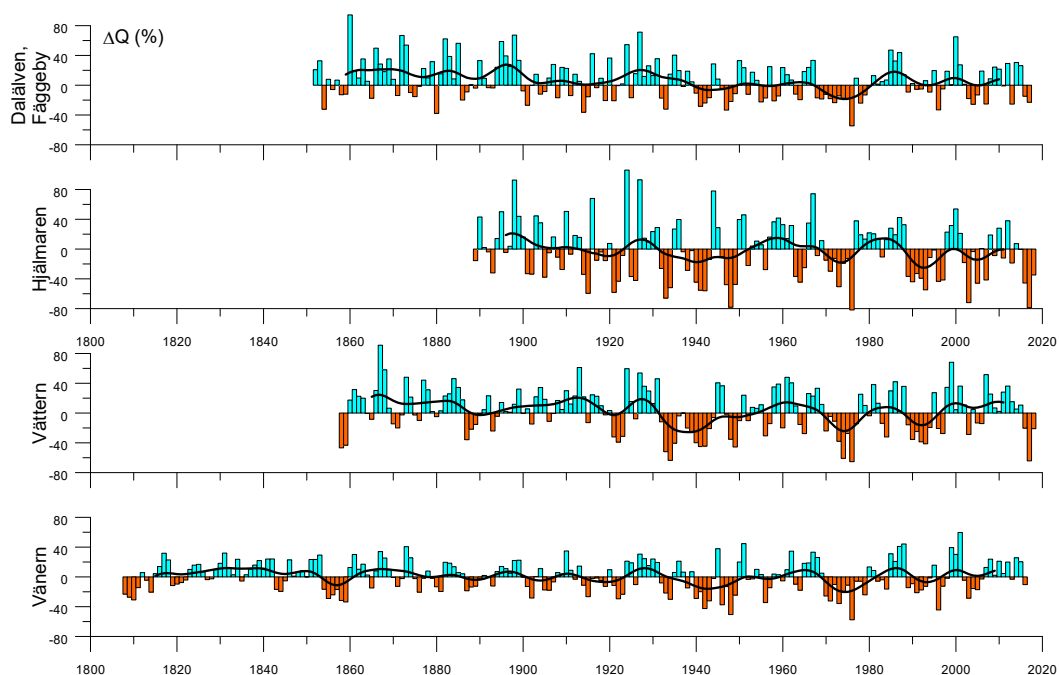
4 Statistisk analys av långa mätserier

För att få perspektiv på torrperioden 2016-2018 gjordes statistisk analys av långa tidsserier över både vattenföring och sjövattnstånd. Hur förhåller sig de senaste åren till tidigare torrår, som till exempel rekordåret 1976? Kvalitetskontroll av föregående års data görs av SMHI:s observationsenhet under efterkommande år, varför det blir en viss eftersläpning i data. De flesta mätserierna har kontrollerats och rättats i början av efterföljande år, men vissa serier blir klara först efter sommaren. Med externa data kan det dröja flera år innan de finns tillgängliga i SMHI:s arkiv.

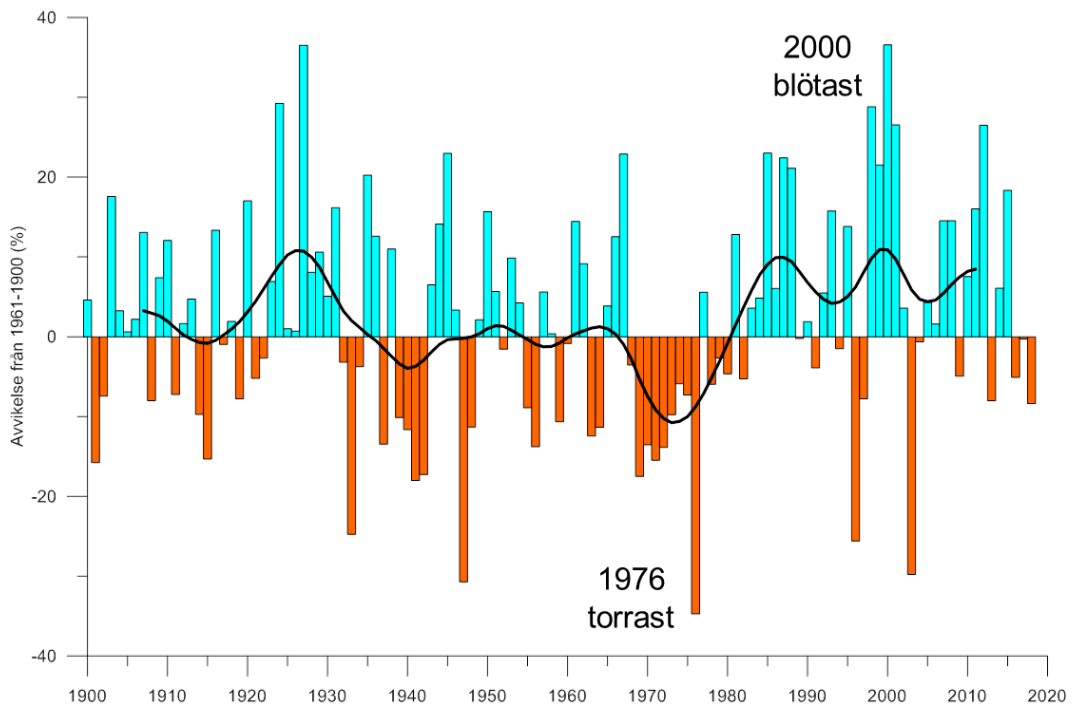
4.1 Vattenföring

De längsta mätserierna i SMHI:s arkiv presenteras i figur 1. Generellt kan man säga att vattenföringen har varit förhållandevis stabil under 1900-talet, men att den var lite högre under 1800-talet, framförallt i Dalälven. Torråren 2016-2018 syns tydligt i avrinningen från Hjälmarén och Vättern.

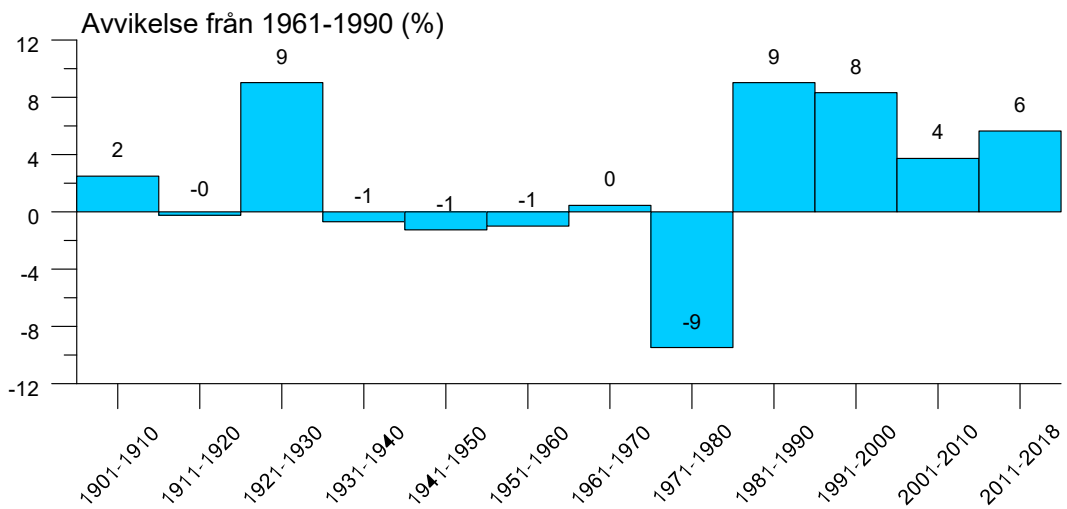
Den summerade avrinningen från hela Sverige, baserat på mätserier från 18 stora avrinningsområden, visas i figurerna 2 och 3. För hela landet framgår torråren på 1970-talet tydligt. Referensperioden 1961-1990 är cirka 2 % torrare än genomsnittet för alla åren 1901-2018. Torråren 2016-2018 är inte särskilt framträdande i detta sammanhang. Summeringen bygger på mätningar från de största vattendragen, och datamaterialet är en aning glest de senaste åren, speciellt för 2018. Figur 4 visar hur den summerade avrinningen från fyra regioner varierat. Även här är materialet en aning glest på slutet.



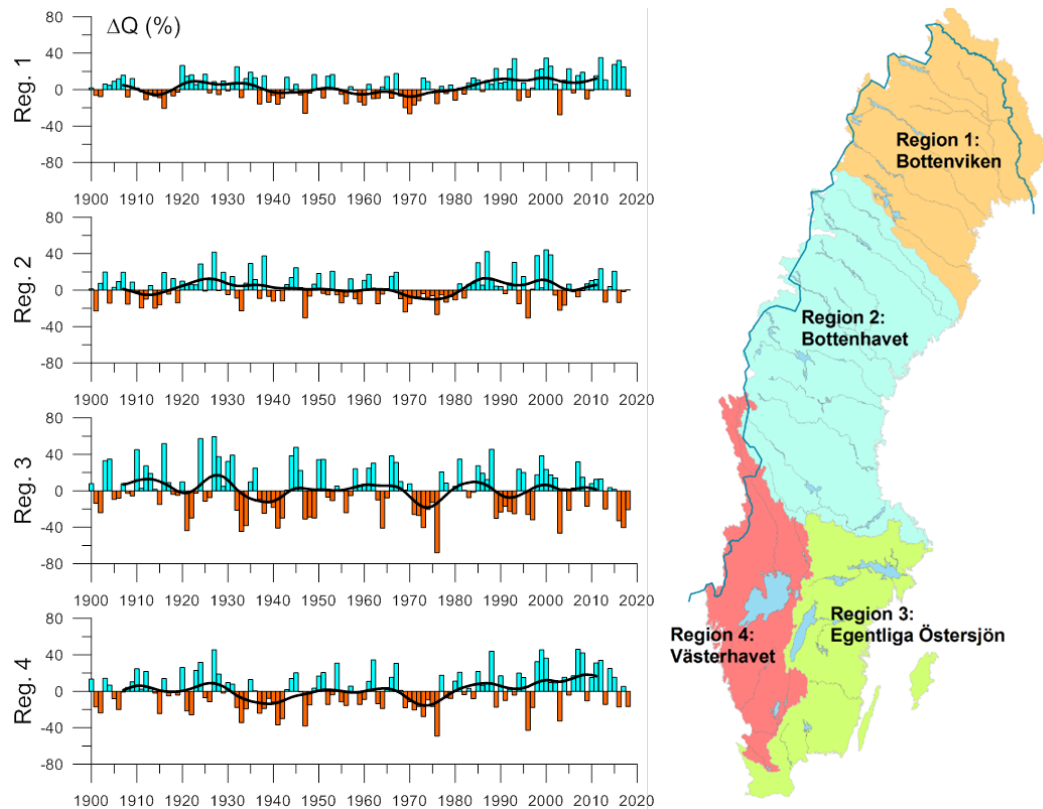
Figur 1. Årsmedelvattenföringen i våra fyra längsta observationsserier, som avvikelser mot medelvärdet för 1961-1990. 2017 och 2018 saknas för Vänern, 2018 saknas för Fäggeby.



Figur 2. Summerad avrinning från hela Sverige, årsvärden 1900-2018, som avvikelse mot medelvärdet för 1961-1990.

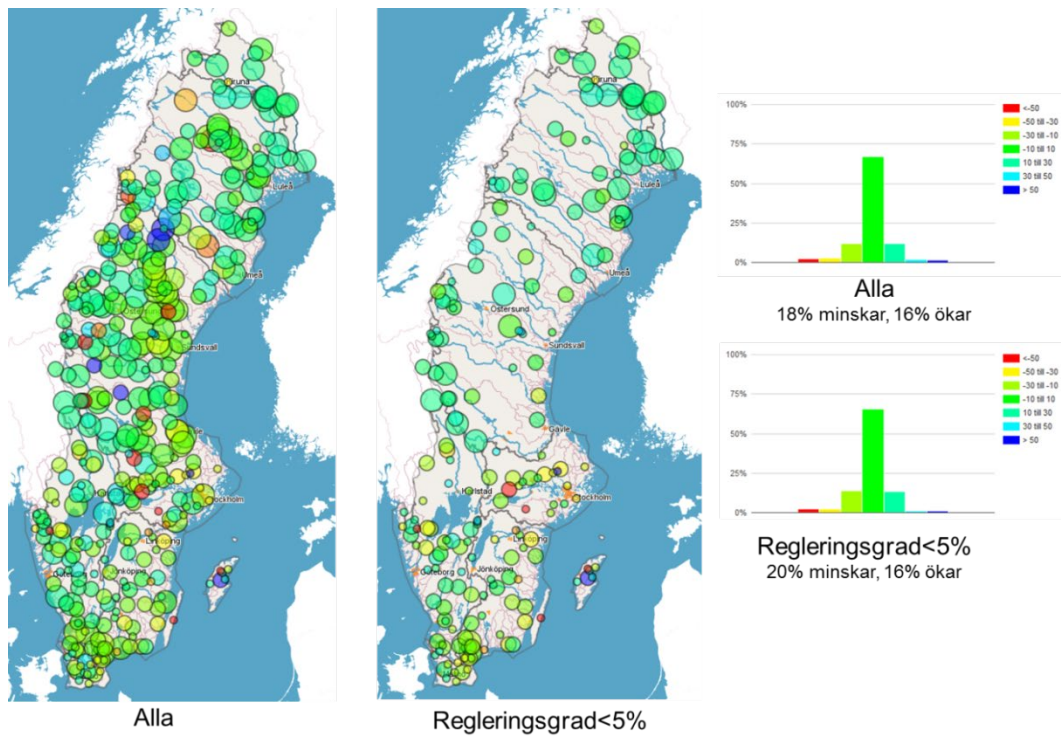


Figur 3. Summerad avrinning från hela Sverige, årtionden 1900-2018, som avvikelse mot medelvärdet för 1961-1990.



Figur 4. Summerad avrinning för fyra regioner, årsvärden 1900-2018, som avvikelser mot medelvärdet för 1961-1990.

Figur 5 visar trendanalys (% per årtionde) för lägsta veckomedelvärdet för vattenföringen under varje år, 1961-2018, för serier med minst 30 års data. Veckomedel användes för att filtrera bort bruset från korttidsreglering vid kraftverk. Man kan trots detta se en del ökning i de lägsta flödena i en del reglerade älvar. Ur Vombsjön rapporterades till exempel utflödet vara = 0 m³/s under en lång rad av år före 2003. Från och med detta år finns det inga så låga dygnsvärden i rapporteringen. Generellt är förändringarna under perioden små. Långt över hälften av stationerna befinner sig i det gröna intervallet i stapeldiagrammet. Andelarna av områden med ökande respektive minskande lågflöden är ungefär lika stora.

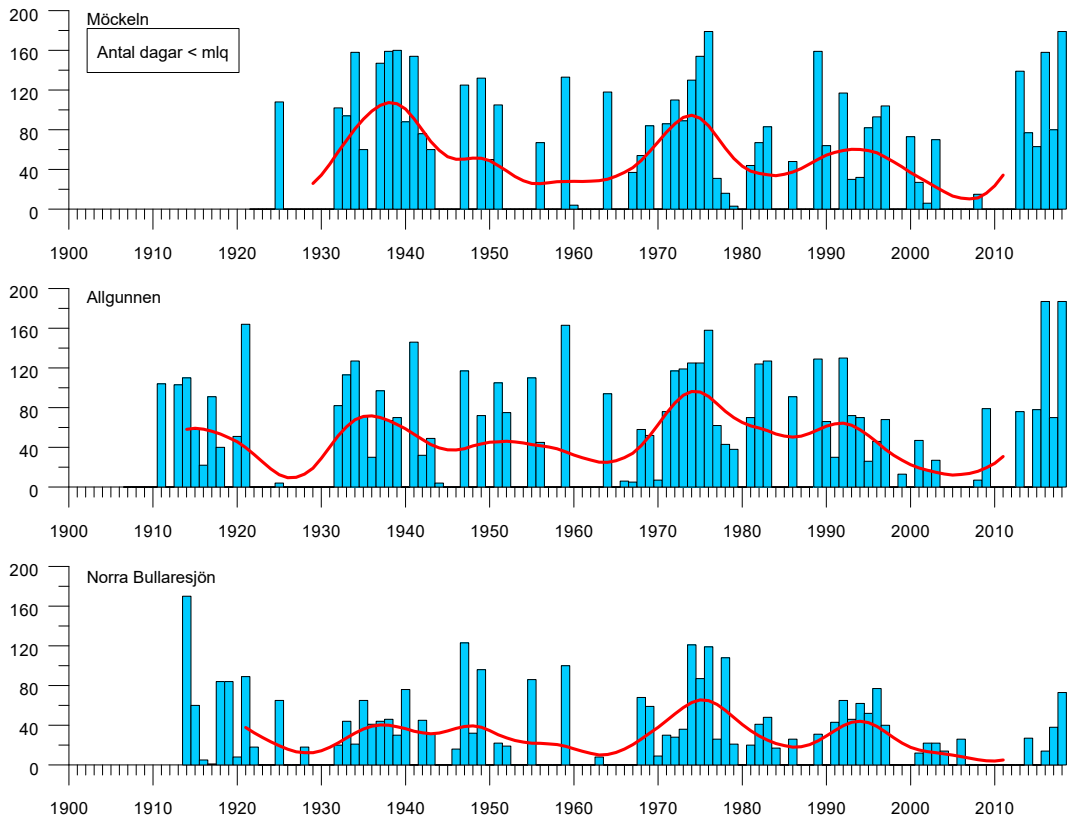


Figur 5. Trendanalys (% per årtionde) för lägsta veckomedelvärdet för vattenföringen under varje år. 1961-2018, serier med minst 30 års data. Grönt = små förändringar, gult/rött = minskande, blått = ökande).

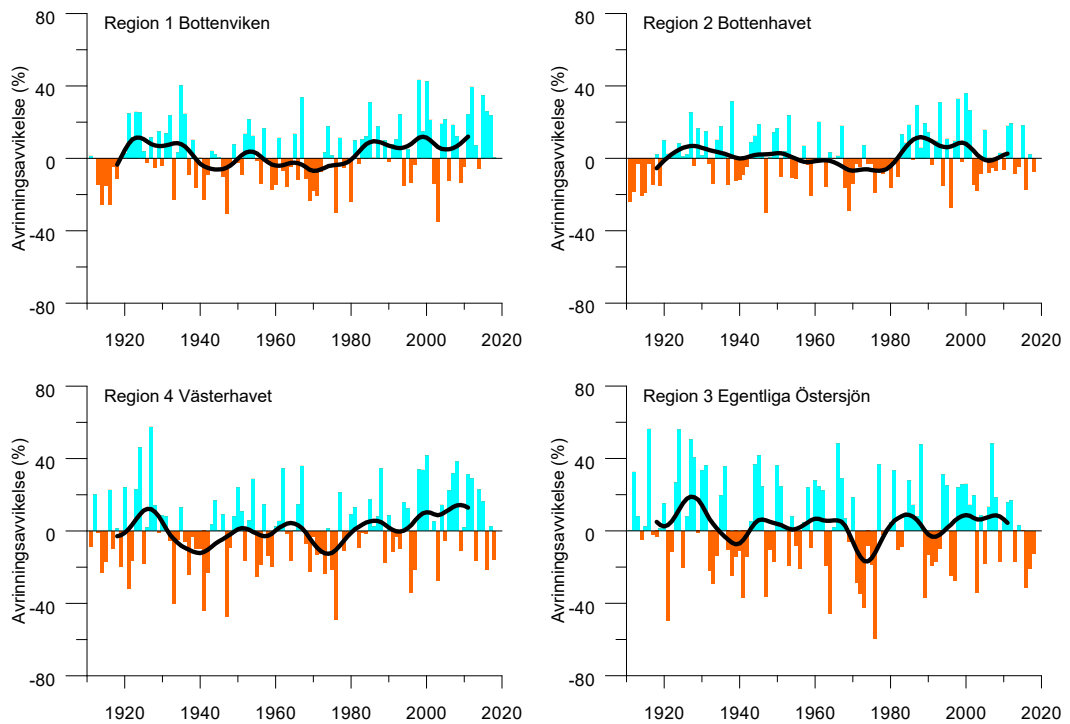
Antalet dagar under MLQ, eller liknande mått på underskott, är ett alternativt sätt att beskriva torkans svårighetsgrad, eller varaktighet. I många mindre vattendrag kan vattenföringen sina, varför det inte går att skilja ut torkans magnitud mellan år med nollflöde. Eftersom de uppmätta lågflödena dessutom är mycket osäkert bestämda kan torkans varaktighet därför vara ett bättre mått, än vattenföringsvärdet självt. Figur 6 visar en sådan analys av antalet dagar under MLQ för tre mätserier. I alla mätserierna framträder det torra 1970-talet, liksom i viss mån 1930-talet. För Möckeln och Allgunnen i Småland, syns 2016 och 2018 tydligt, med ungefär lika långa torrperioder som de längsta tidigare registrerade.

Figurerna 7 - 9 visar regionala sammanvägningar för årsmedelflöden, lågflöden och antalet dagar med ett flöde < MLQ. Analyserna baseras på 69 stationer, främst i mindre och medelstora, oreglerade områden. Urvalet har tidigare främst använts för analys av högflöden (se till exempel Hellström & Lindström, 2008). Stationsurvalet är alltså inte detsamma som till exempelvis figur 4. Här syns ökande lågflöden i norr, och minskande lågflöden i sydost. Figurerna 10 och 11 visar motsvarande tidsserier för utvalda stationer. För de 15 stationerna i figur 11 understiger flödet MLQ 8 % av tiden i genomsnitt. Det innebär att flödet i genomsnitt understiger MLQ med så mycket som en månad per år vid dessa stationer.

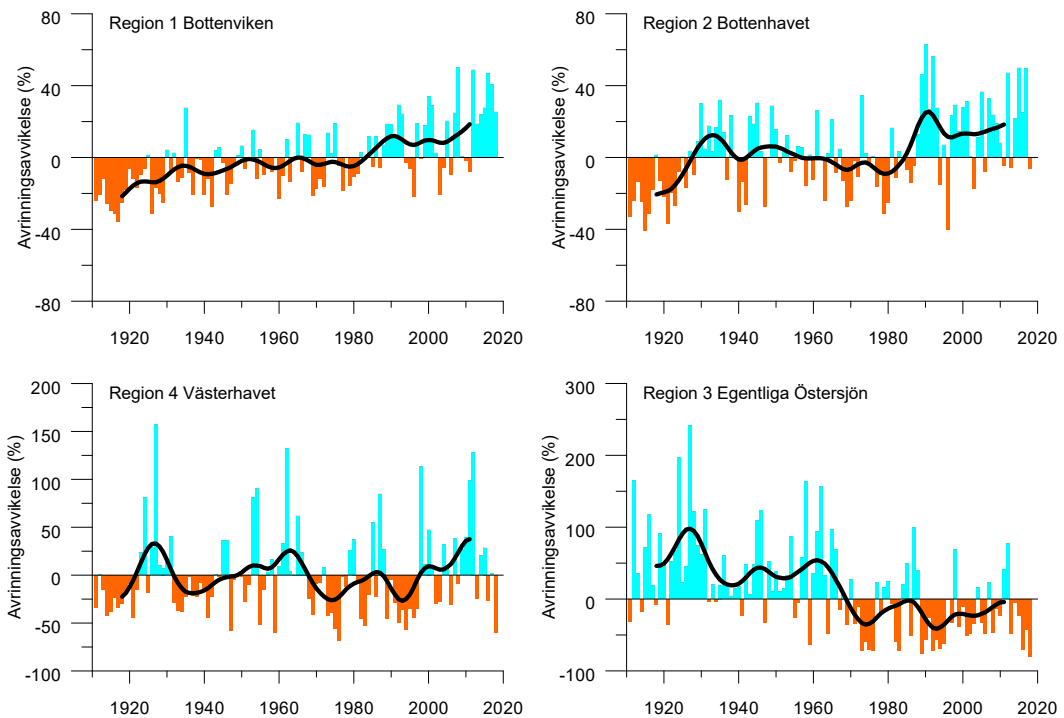
I figur 10 och 11 framgår åter de ökande lågflödena i norr, sannolikt en effekt av kortare vintrar på grund av ökad temperatur. I sydost sticker framförallt Helge å ut (figurerna 8 - 11). Mätvärdena är här hämtade från Torsebro kraftverk. För Helge å är den totala regleringsgraden försumbar, men de lägsta flödena orsakas av korttidsreglering i små kraftverksdammar. Förändringen vid Torsebro syns tydligt omkring år 1970 i figurerna 10 och 11. Även Viskan påverkas av en liknande, om än svagare, korttidsreglering. En del av minskningarna av lågflödena i sydost beror alltså sannolikt på att även svagt reglerade vattendrag och mätserier påverkar resultaten. I figur 12 visas vattenföringens säsongsfördelning, för åren före 1991 och åren därefter. I figuren kan man se en något tidigare vårflod i norr, och mindre snösmältning och högre vinterflöden i söder. För Helge å, som diskuterades ovan, kan man i denna analys inte se någon tydlig minskning av sommarflödena. Figurerna illustrerar även hur stora skillnaderna kan bli i uppskattat MLQ beroende på vilken tidsperiod som väljs.



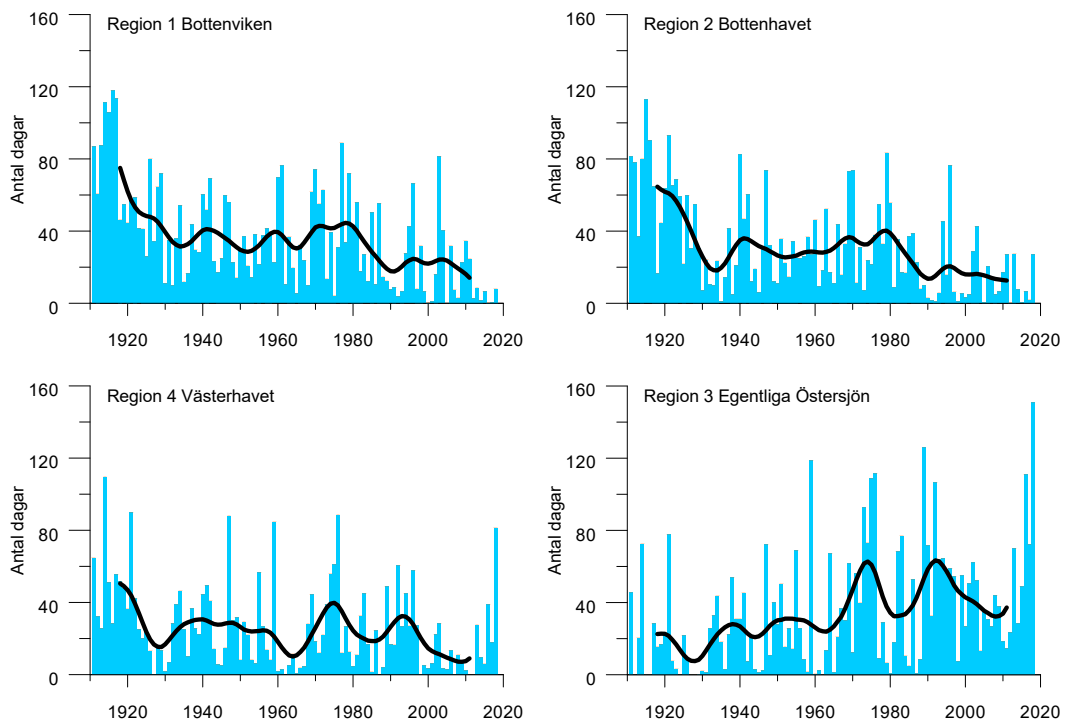
Figur 6. Antal dagar med vattenföring under MLQ, varje år, vid ett urval stationer.



Figur 7. Summerad avrinning för fyra regioner, årsvärden 1911-2018, som avvikelser mot medelvärdet för 1961-1990.



Figur 8. Medelavvikelse för LQ för fyra regioner, årsvärden 1911-2018, som avvikelse mot medelvärdet för 1961-1990.



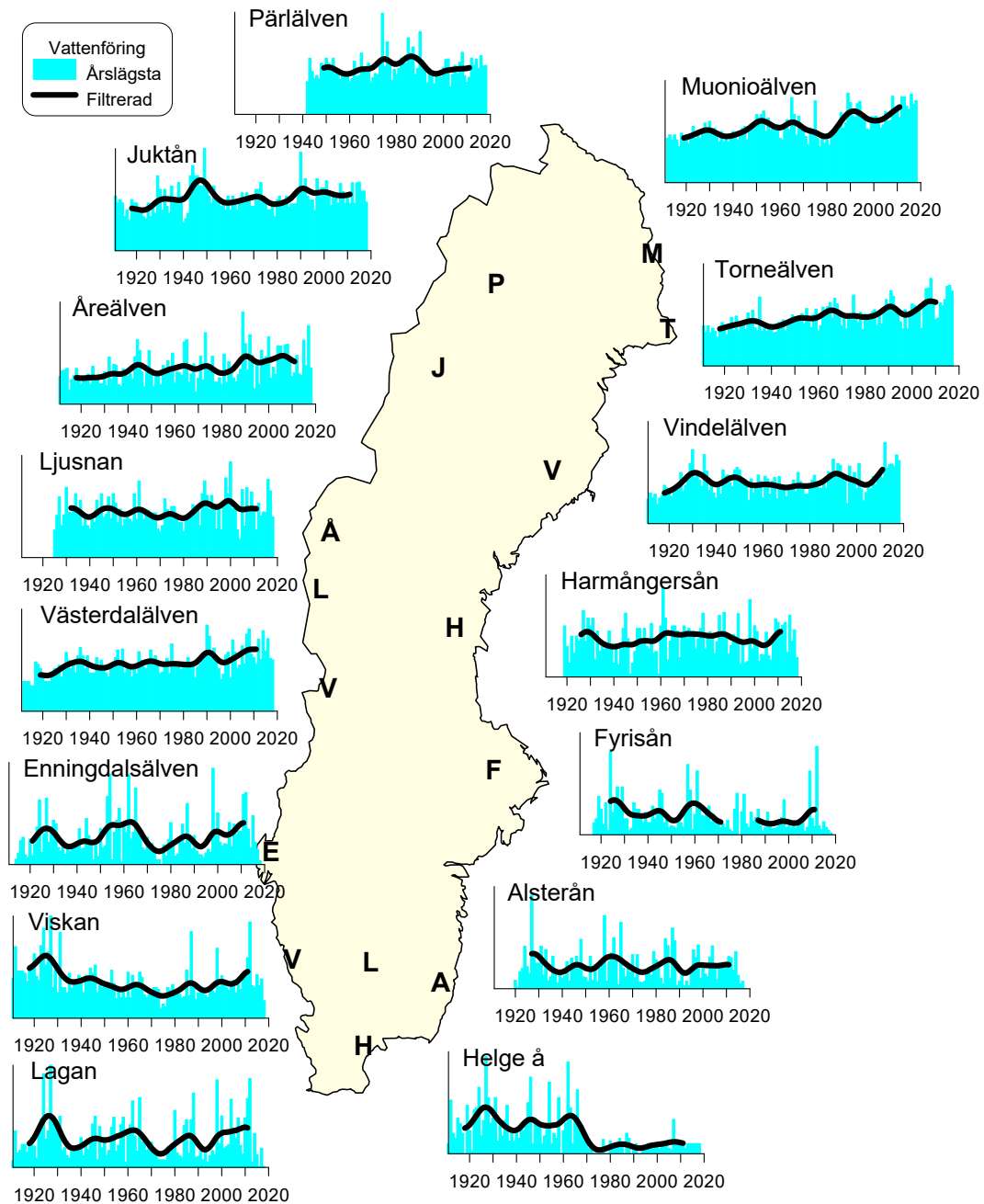
Figur 9. Antal dagar med vattenföring under MLQ, 1911-2008, som genomsnitt för fyra regioner.

Trendanalys baserad på minsta värdena varje år är vansklig eftersom osäkerheterna i lågflöden är så stora. Den samlade bedömningen av den statistiska analysen blir att:

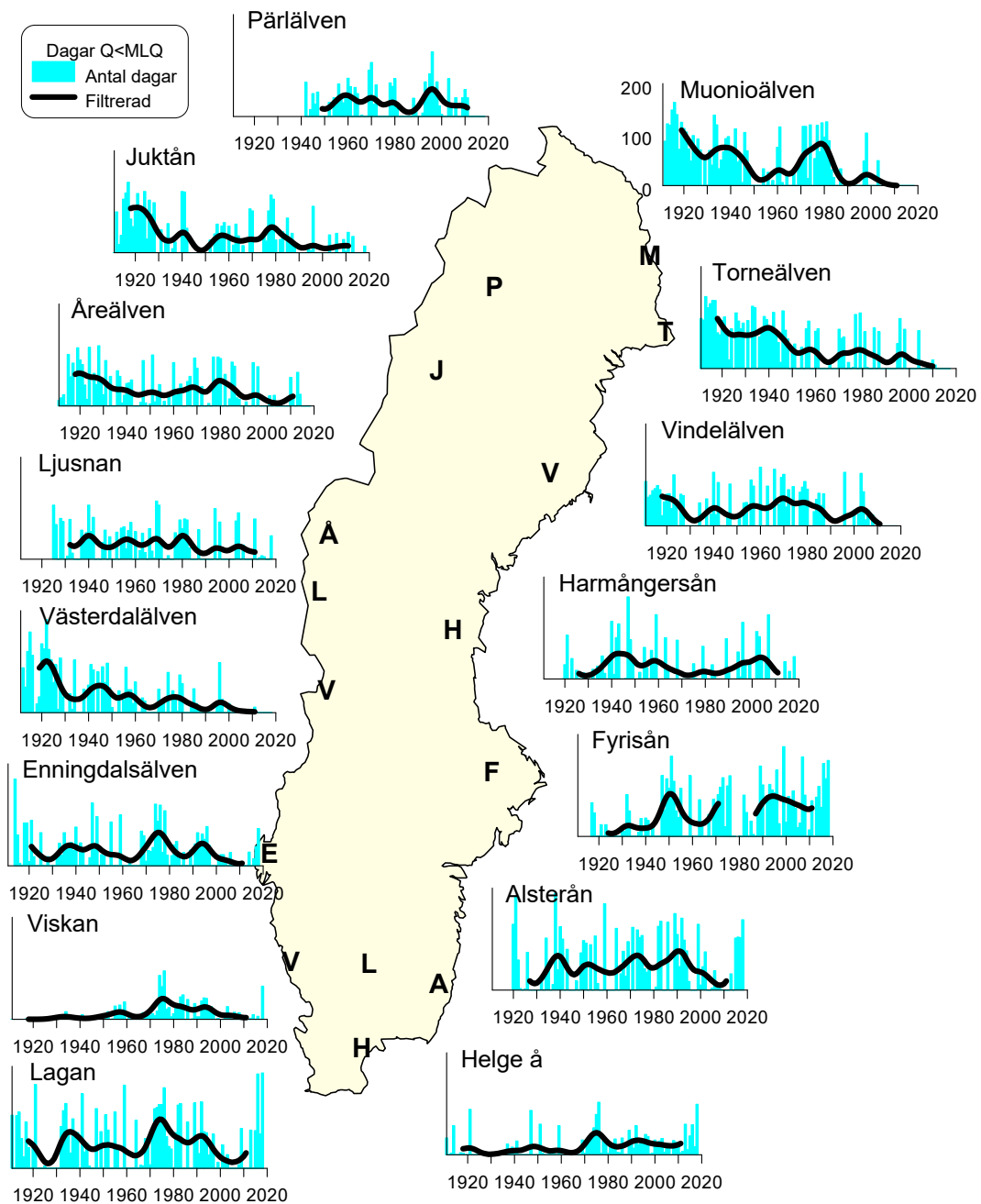
- Vattenföringen minskar inte generellt.
- Lågflödena har ökat i norra Sverige, medan de har minskat i sydöstra Sverige, eventuellt delvis på grund av regleringar.

- 2016-2018 har varit mycket torra i sydost. Vilket år som har varit torrast beror på var man befinner sig och vad man menar med torrt.
- År 2018 var året med flest dagar under MLQ i sydost.

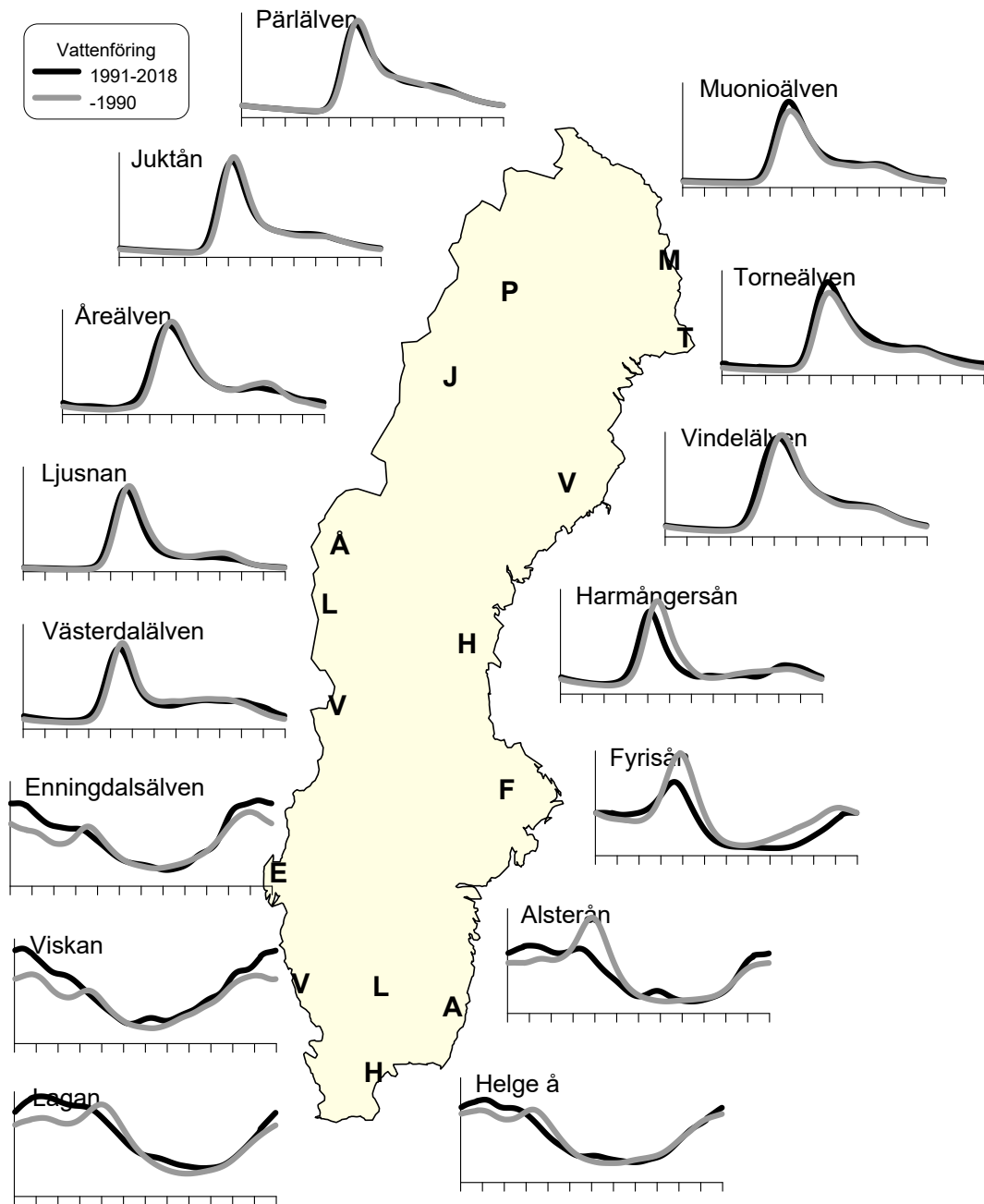
Lågflödenas variation över tiden har också studerats av bland andra Hisdal et al. (2001) och Charpentier Ljungqvist et al. (2019). De kom fram till att lågflöden och torka inte generellt har blivit vanligare.



Figur 10. Lägsta flödet varje år (LQ) för utvalda stationer. De olika diagrammen har olika skalor på y-axeln så att variationen över tiden ska framgå så tydligt som möjligt. Första bokstaven i namnet anger var stationen ligger.



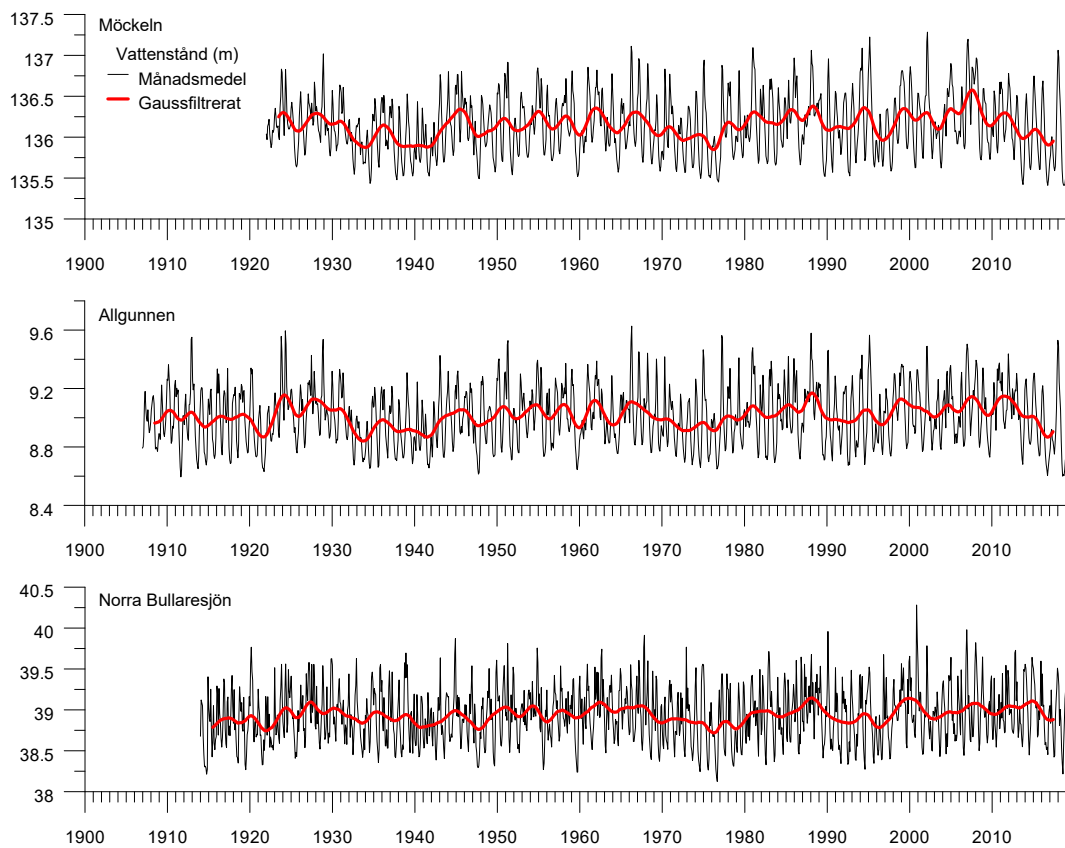
Figur 11. Antal dagar under MLQ (för hela perioden) för utvalda vattendrag. Maxvärdet på skalan är 200 dagar i alla diagrammen. Första bokstaven i namnet anger var stationen ligger.



Figur 12. Vattenföringens säsongsfördelning, före 1991 och från och med 1991. De olika diagrammen har olika skalor på y-axeln så att variationen över tiden ska framgå så tydligt som möjligt. Första bokstaven i namnet anger var stationen ligger.

4.3 Vattenstånd

Normalt görs klimatanalyser för vattenföring, men det kan finnas fördelar med att även använda vattenståndsdata. De senare kan ge kompletterande information om hur svår torkan är. Flödet kan under torrperioder sjunka ned till noll, varför lägsta flödet under ett år kan vara ganska missvisande utan kompletterande uppgifter om torrperiodens längd. Vattenståndet ger direkt information om graden av vattenbrist, eftersom vattenståndet kan mätas upp även då utflödet från en sjö sinar. Statistisk trendanalys av sjövattenstånd har inte tidigare gjorts i nämnvärd omfattning vid SMHI, eftersom vattenståndet främst har behandlats som en intermediär variabel som endast har använts för bestämning av vattenföring. Figur 13 visar exempel på långa tidsserier med vattenståndsdata för tre sjöar: Möckeln i Helge å, Allgunnen i Lagans huvudavrinningsområde och Norra Bullaresjön i Enningdalsälven



Figur 13. Vattenståndsmätningar i tre sjöar (månadsmedel), samt Gauss-filterat. Korta dataluckor är ifyllda.

Analys av långa vattenståndsserier tycks ge mindre ny information än förväntat. Det finns ganska få stationer där man har mätt vattenståndet på exakt samma plats över lång tid. Likaså kan utflödeströsklar ha förändrats över tiden. Långa vattenföringsserier, å andra sidan, skapas ofta genom att man skarvar ihop mätningar från olika mätpunkter, där flödet bedöms vara praktiskt taget lika, men där man kan ha behövt flytta mätstationen av någon anledning. Vattenståndsdata kvalitetsgranskas inte på samma sätt som vattenföringsdata. Felaktigheter och dämningar, korrigeras inte för. Luckor fylls inte i för vattenstånd, medan det däremot görs för vattenföringsdata.

Analysen av vattenståndsserier tillförde inte så mycket mer information än vad som erhålls ur till exempel vattenföringsseriernas varaktighet eller underskottet under MLQ. Resultaten från analysen av vattenståndsdata motsäger dock inte resultaten baserade på vattenföringsdata

5 Förenklade långtidsprognoser

En vanlig situation under en torrperiod är att man vill veta när vattenföringen kan tänkas börja vända upp igen. Vanliga väderprognoser sträcker sig 10 dagar fram i tiden. Dessa kompletteras ofta av klimatologiska prognoser, som kallas för långtidsprognoser. Metoden innebär att man utgår från förhållanden vid prognosens start och driver en hydrologisk modell med väderdata från tidigare år, för att få en ensemble av utfall. Ofta använder man mittvärdet i utfallet som den troligaste prognosen, och spridningen runt detta mittvärde antas säga något om osäkerheten i den erhållna långtidsprognosen. Normalt gör man denna typ av prognoser för några månader framåt, till exempel inför snösmältningen eller torrperioder på sommaren. Nackdelar med metoden är att starttillståndet inte är helt känt, den hydrologiska modellen innehåller förenklningar, och att det kan finnas systematiska fel i drivdata (nederbörd och temperatur). En enkel metod för att göra klimatologiska prognoser direkt utifrån mätdata utvecklades och utvärderades, med fokus på lågflöden.

Fördelen med att utgå från mätdata direkt är att man inte blandar in någon hydrologisk modell alls, och undviker de osäkerheter som tillkommer i modellen. Man slipper också problem med bias i nederbörds- och temperaturdata. Dessutom kräver vanliga klimatologiska prognoser mycket stora beräkningsresurser, medan denna metod är mycket beräkningseffektiv. Metoden testades dels utgående från vattenståndsdata och dels utgående från vattenföringsdata. Beräkningarna utifrån vattenföringsdata var enklare, varför endast denna metod redovisas här. Som torrperioder definierades här perioder då uppmätta flödet var under MLQ.

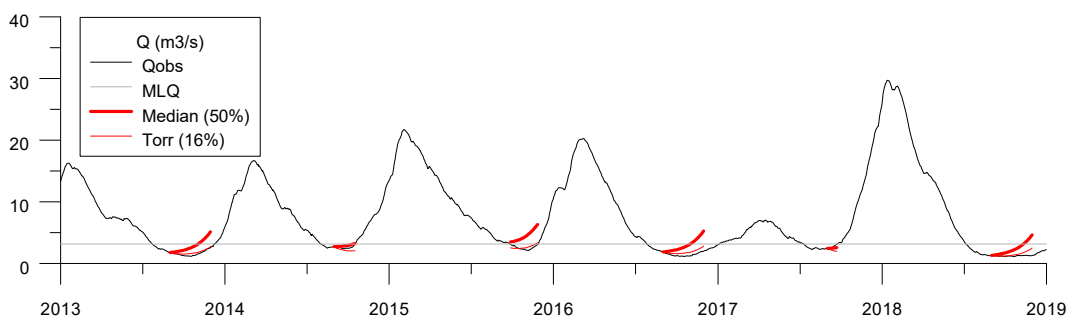
Metoden testades för vattenföringsstationerna Rörvik, Möckeln och Brusafors, för åren 1961-2018. Metoden innebär att man utgår från det uppmätta flödet en viss dag. Därifrån antar man att vattenföringen utvecklas på samma sätt som under tidigare år. Man driver då beräkningen med tidigare uppmätta vattenföringsdata, i stället för med tidigare uppmätt väder. Starttillståndet tas hänsyn till genom att man gör en uppdatering med AR-metoden (autoregressiv prognos för felet, se t.ex. Carlsson och Lindström, 2001) från den senaste tillgängliga vattenföringsobservationen (vilket normalt även görs vid en traditionell beräkning med en hydrologisk modell). Här gjordes hypotetiska prognoser 3 månader framåt, med start 1 september varje år. Som drivdata användes vattenföringsdata från åren 1961-2018. Anpassningen mättes för alla åren, utom för innevarande år som undantogs från klimatsensemblen. En lognormalfördelning anpassades för utfallet, eftersom fördelningen är skev (flödet blir aldrig under 0). Ett antal olika percentiler i utfallet utvärderades, bland annat medianen och medianen minus en standardavvikelse. Den sistnämnda kallas här för ”lågflödesprognosen”. Sannolikheten för att utfallet ska bli så lågt är cirka 16 %, medan medianen motsvarar 50 %.

Prestanda jämfördes med en persistens-prognos, i vilken vattenföringen antas fortsätta oförändrat på samma värde som det senaste tillgängliga. Utvärderingen gjordes enbart för

torrperioder, det vill säga då $Q_{obs} < MLQ$. Medianprognosen var i alla tre testade områdena betydligt sämre än persistens-prognosen. Det visade sig att medianen av prognoserna stiger för snabbt tillbaka mot normala nivåer (se figur 14). Lågflödesprognosen, däremot, gav förbättringar i NSE (se Arheimer et al. 2011 för definition) med mellan 74 och 78 % i de tre områdena, jämfört med persistens.

Figur 14 visar ett utdrag för åren 2013-2018, för utflödet från sjön Möckeln i Helge å. Lågflödesprognosen (torr) fungerade ganska bra för åren 2013, 2015, 2016 och 2018, men blev för låg t.ex. 2017 då vädret, efter en torr försommar, slog om mitt i sommaren och det började regna. Eftersom prognosen här gäller utflödet ur en sjö så kan man även räkna ut sjöns vattenstånd med hjälp av en avbördningsekvation.

Iakttagelsen att medianprognosen verkar återhämta sig för snabbt mot normalare förhållanden har även gjorts för traditionella, väderbaserade långtidsprognoser med S-HYPE. Den lågflödesprognos som gav bäst resultat här kanske på ett bättre sätt tar hänsyn till de låsningar i väderläget och trögheter i systemet, som kan leda till långvariga torrperioder. Ett liknande urval kan kanske även förbättra de traditionella långtidsprognoserna. Där diskuteras det ibland att man skulle välja bort vissa år ur långtidsprognoserna, till exempel för att undvika att använda regniga somrar under ett torrår. Lågflödesprognosen är för pessimistisk under blöta år, men då är prognoserna för vattenbrist och torka ändå inte så intressanta.



Figur 14. Exempel på klimatologiska långtidsprognoser för avrinningen från Möckeln. Q_{obs} = det uppmätta flödet. Torrprognosen ritas endast då $Q_{obs} < MLQ$.

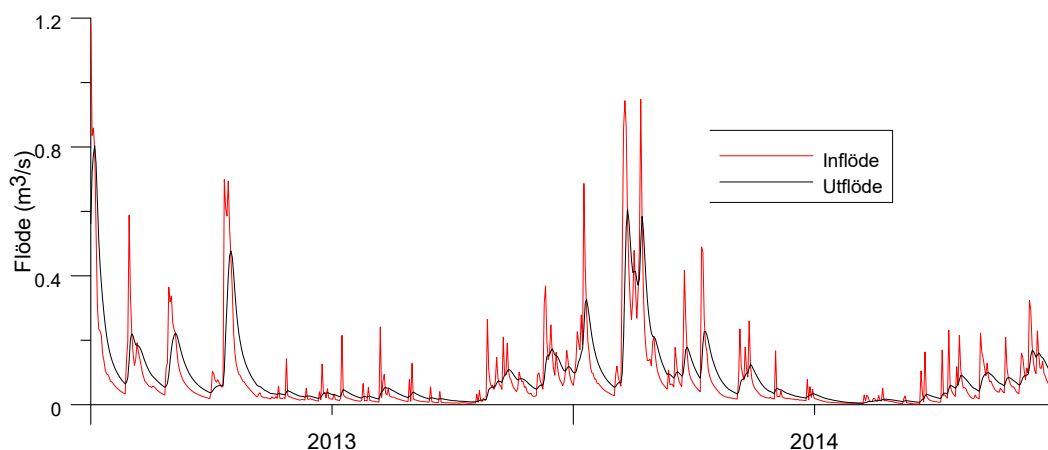
6 Anlagda våtmarker

Våtmarker förespråkas ofta som en metod för att både sänka toppflödena och öka lågflödena. I HYPE-modellen fanns sedan tidigare en enkel våtmarksrutin som påverkar flödet av kväve och fosfor. Däremot sker ingen magasinering av vatten i modellens våtmarksrutin. Rutinen påverkar alltså inte vattenflödena. Detta är en avsevärd brist, eftersom man vill kunna kvantifiera hur stor effekt som våtmarker har för att jämna ut flödena. En ny modellrutin för anlagda våtmarker, som magasinerar vatten, har därför utvecklats till HYPE. De nya våtmarkerna tar emot vatten från uppströms liggande områden, antingen från ytor inom det delavrinningsområde där de är belägna, eller från hela avrinningsområdet i de fall de är belägna på huvudvattendraget. Utflödet från våtmarkerna sker enligt en enkel avbördnings-ekvation då vattennivån i våtmarken överstiger ett tröskelvärde. Inflöden till våtmarken räknas ut av modellen, men användaren måste specificera våtmarkernas djup, yta och tillrinningsarea. Resultatet blir ett utflöde som är utjämnat i förhållande till inflödet till våtmarken (se exempel Figur 15).

Även beskrivningen av hur kväve och fosfor påverkas av anlagda våtmarker har omarbetats. Den nya rutinen är tänkt att komma med i den nya versionen av S-HYPE (klar hösten 2019) och för detta krävs att modellen även kan räkna på näringsämnen. De processer som har lagts till i våtmarker är denitrifikation, sedimentation, växtupptag och adsorption till botten-sediment.

SMHI lagrar information om anlagda våtmarker från Jordbruksverket och länsstyrelserna i en våtmarksdatabas. Syftet är att samla och förvalta en nationell databas för anlagda våtmarker i Sverige samt erbjuda information om anlagda våtmarker för nedladdning. Databasen presenteras på vattenwebb där information om drygt 2000 anlagda våtmarker finns tillgänglig. Dessa data har bearbetats och lagts in i S-HYPE och kommer med i den version som publiceras under hösten 2019. Information om våtmarkers djup, ytor och tillrinningsområden har sammanställts för alla delavrinningsområden i S-HYPE.

Naturliga våtmarker omfattar mycket större arealer än de anlagda våtmarkerna. Dessutom har stora arealer våtmarker dränerats under årens lopp, för att skapa bättre förutsättningar för jordbruk och skogsbruk. Dessa förändringar i landskapet beskrivs inte uttryckligen i S-HYPE, förutom att jordbruksmarken antas vara täckdikad i modellberäkningarna. Beskrivningen av naturliga och utdikade våtmarker är något som behöver förbättras i S-HYPE.



Figur 15. Exempel på simulerat inflöde och utflöde från en anlagd våtmark i Norrköping.

7 Vattenuttag

Vattenuttag har i S-HYPE beskrivits på ett ganska förenklat sätt. Några stora dricksvattenuttag har funnits beskrivna i modellen under lång tid, men de allra flesta vattenuttagen har saknats. Däremot har vatten lagts till vid punktkällor (reningsverk, industrier, enskilda avlopp) för beräkningen av näringsämnen. Källorna har alltså funnits med men inte motsvarande uttag. Detta skulle kunna bidra till att S-HYPE oftast har överskattat lågvattenföringarna i framförallt södra Sverige. Det finns inte något sammanhållet register över vattenuttag, utan informationen finns utspridd i landet hos olika aktörer. SMHI har fått i uppdrag av regeringen att öka kunskapen om vattenuttagen i Sverige. Uttagen kan ske för bevattning, dricksvatten och andra ändamål. Tanken är att dessa uppgifter därefter även ska läggas in i S-HYPE. En svårighet som man har stött på är den sekretess som gäller för dessa data. Inom det här beskrivna projektet har därför ingen extra insats gjorts inom detta område. I stället har den förenklade beskrivningen av uttag fortsatt, bland annat med beskrivning av uttag för Göta kanal. Dessutom har alla punktkällor i S-HYPE balanserats med motsvarande ett lika stort uttag, så att vattenbalansen är uppfylld i detta avseende.

8 Vattenbalansberäkningar

Vattenbalansen över en längre period kan uttryckas som långtidsmedelvärden (i t.ex. mm/år):

$$Q = P - E$$

där Q = avrinningen, P = nederbörden och E = avdunstningen. En vattenbalansmodell sattes upp för hela landet i vilken den lokala avrinningen i varje delområde i modellen uppskattades enligt vattenbalanskvationen. Tre typer av beräkning av avdunstningen testades i olika kombinationer:

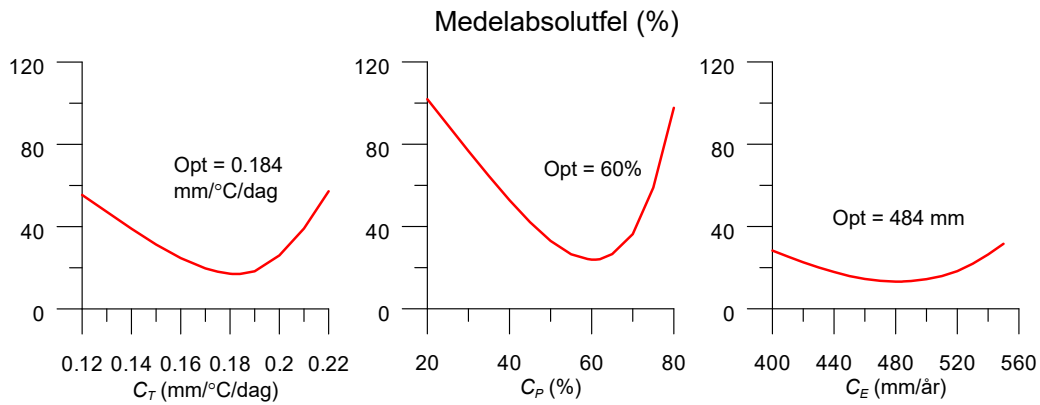
$$E = C_T \cdot T$$

$$E = C_P \cdot P$$

$$E = C_E$$

I den första metoden är avdunstningen proportionell mot temperaturen T . Det är i princip en graddagarsmetod, något som används i olika varianter i hydrologiska modeller (se t.ex. Lindström et al. 1994 eller Rodhe et al. 2006). Den andra metoden bygger på antagandet att avdunstningen ökar med ökande vattentillgång, och att en andel av nederbörden ($=C_P$) alltså avdunstar. Andelen som inte avdunstar, utan rinner av, kallas avrinningskoefficienten, "runoff coefficient" på engelska. Den blir alltså $1-C_P$. I den tredje metoden är avdunstningen alltså lika stor i hela området ($=C_E$).

Information om nederbörd och temperatur hämtades från S-HYPE. Dessa värden är interpolerade till alla ingående delområden med PTHBV-metoden. Markanvändning, arealer, vattendragsnätverk, vattenuttag, bifurkationer och överledningar samt vattenföringsdata togs också från S-HYPE. Som tidsperiod användes 1999-2008, som är den period som vattenföringen i S-HYPE främst kalibreras för. Vattenbalansberäkningen gjordes endast för södra Sverige, söder om Dalälven. Den lokala avrinningen från varje delområde i S-HYPE omvandlades till vattenföring i m^3/s och summerades nedströms i det hydrologiska nätverket. Vid de 177 st hydrologiska mätstationerna som ingick i beräkningsområdet jämfördes den beräknade medelvattenföringen med uppmätt medelvattenföring. Metodiken är liknande den som finns i NET-modellen, som är ett generellt uppskalningsverktyg för uppskalning av flöden av vatten och näringsämnen med mera (Lindström et al. 2018). Resultaten från kalibreringar av de olika metoderna visas i figur 16. Bäst anpassning (medelabsolutfel = 13 %) erhöles något överraskande med den enklaste metoden, i vilken samma avdunstning antogs i hela området (484 mm/år). Näst bäst resultat (17 % fel) erhöles med temperaturberoendet. Optimet 0.184 mm/°C/dag motsvarar 67 mm/°C/år. Sämst fungerade den nederbördsberoende metoden (24 % fel). Den bästa anpassningen erhöles då avdunstningen var 60 % av nederbörden. Det innebär också att andelen av nederbörden som rinner av blev 40 % i det studerade området.



Figur 16. Kalibrering av parametrarna för avdunstning.

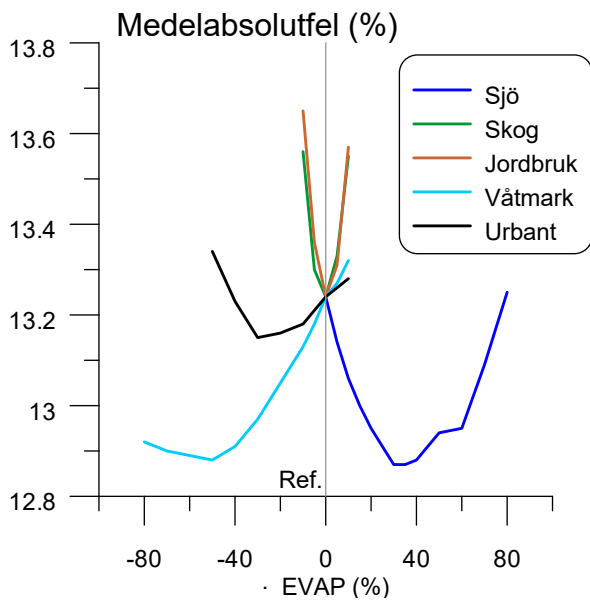
Hur avdunstningen beror av olika marktyper studerades genom att olika avdunstningar C_E antogs för respektive markklass och sammanviktades enligt respektive areaandelar a_i i varje delområde:

$$Q = P - \sum_i a_i \cdot C_{E,i}$$

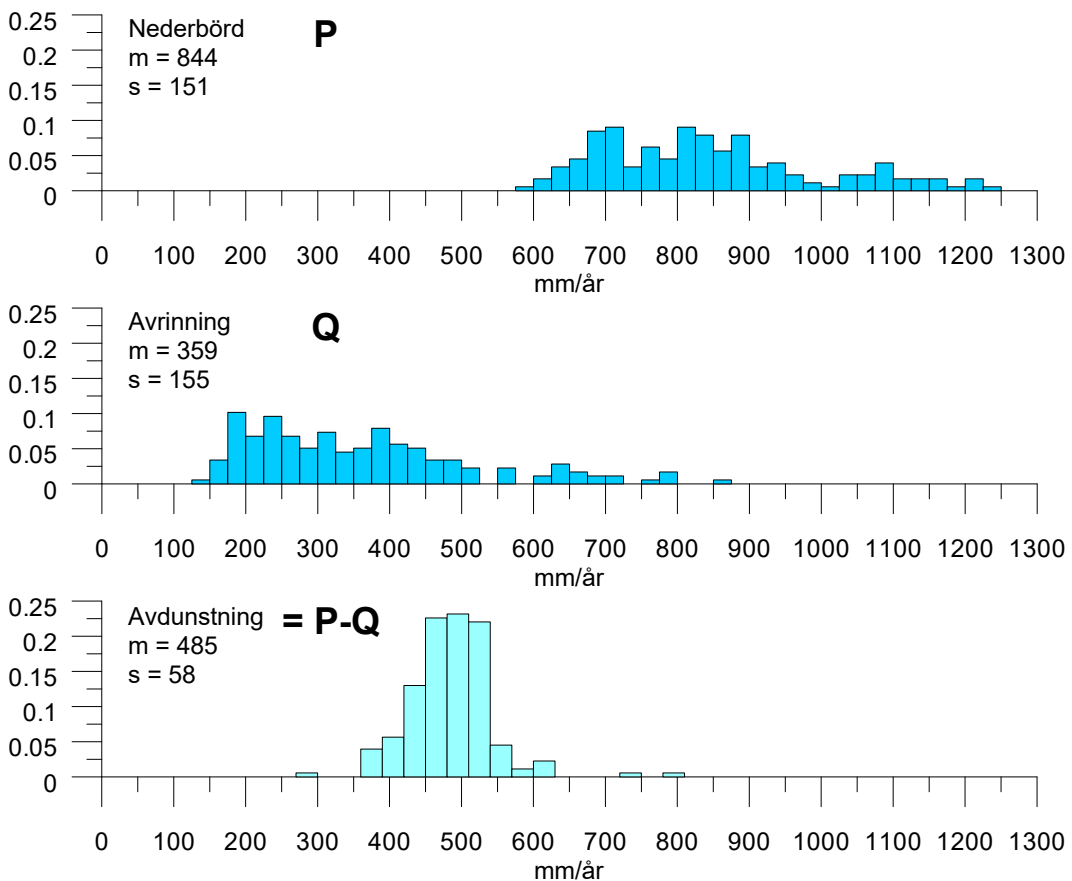
Avdunstningen varierades för en klass i taget, medan de övriga justerades för att motverka försämringen som det oftast innebar att en klass förändrades. Figur 17 visar resultaten från denna kalibrering. Enligt denna analys är avdunstningen från sjötytor cirka 30 % högre än medelvärdet för övriga områden. För våtmarker och urbana områden blev de uppskattade avdunstningarna i stället lägre, men här är antalet områden med höga andelar av dessa klasser ganska få, varför resultaten är mer osäkra. Avdunstningen från skog och jordbruk blev snarlik. Att de också sammanföll med medelvärdet för alla klasser är ganska naturligt eftersom skog är den dominerande klassen i det studerade området (södra Sverige).

Att metoden med konstant avdunstning gav så bra resultat är lite anmärkningsvärt med tanke på hur mycket klimatet, främst nederbörden, och markförhållandena, varierar inom området. Figur 18 visar hur stor spridningen i nederbörd och avdunstning är inom området, medan avdunstningen är betydligt mer samlad runt medelvärdet 485 mm/år, vilket för övrigt stämmer mycket bra med ovanstående beräkning (484 mm/år). Regionala skillnader i avrinning verkar alltså bero mer på skillnader i nederbörd än skillnader i avdunstning. Skillnaderna i avdunstning mellan olika marktyper och geologiska förhållanden verkar alltså vara relativt små.

I figuren över avdunstning framträder även en del avvikande punkter ("outliers"). Det är framförallt tre stationer som avviker: Hulubäcken (282 mm/år), Bostället (805 mm/år) och Krokbräcke (728 mm/år). Alla dessa avrinningsområden är små (< 9 km²). Det kan därför vara svårt att definiera vattendelare för yt- och grundvatten för dessa områden, i synnerhet för Hulubäcken med hög andel våtmark.



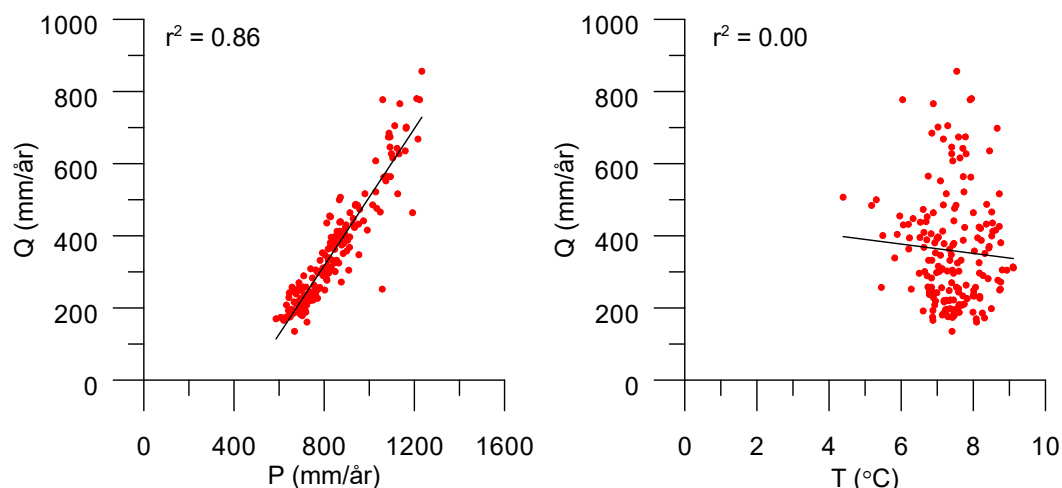
Figur 17. Kalibrering av avdunstningen för olika markklasser.



Figur 18. Uppmätt nederbörd (P) och avrinning (Q) och beräknad avdunstning ($P-Q$). Långtidsmedelvärden för åren 1999-2008. m =medelvärde, s =standardavvikelse.

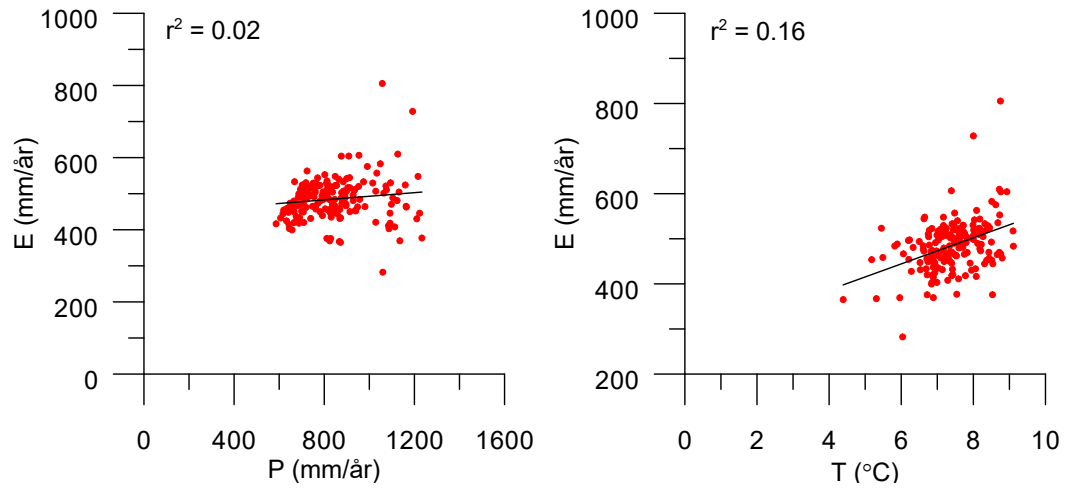
Figurerna 19 och 20 visar samband mellan avrinning och nederbörd respektive avrinning och temperatur. I figur 19 framgår hur starkt avrinningen styrs av nederbörden, medan inverkan av temperaturen är försumbar. Figur 20 visar att avdunstningen beror mycket svagt på nederbörden men lite starkare på temperaturen. Dessa resultat stämmer överens med att den temperaturberoende avdunstningen gav bättre resultat än den nederbördsstyrda beräkningen ovan.

Vid en rumslig analys av resultaten från beräkningarna ovan framträder vissa mönster, bland annat att vattenföringen i sjörika områden överskattas om avdunstningen antas vara densamma överallt (C_E -metoden). Figur 21 visar resultaten från en beräkning med C_E -metoden (484 mm/år), men med 30 % högre avdunstning från sjöar, 50 % lägre från våtmark och 30 % lägre från urbana områden (enligt resultaten i figur 17). Färgen visar volymfelet i beräkningen där grönt betyder försumbart volymfel, gult-rött betyder underskattad avrinning och blått betyder överskattad avrinning. Resultaten blir något bättre med dessa justeringar för markanvändning, medelabsolutfelet minskar från 13.2 till 12.6 %. De rumsliga mönster som nämndes ovan försvinner också i stor utsträckning. Två av de avvikande stationerna framträder tydligt i figur 21 som blå cirklar: Bostället norr om Ängelholm och Krokbräcke i Bohuslän. Resultaten är förhållandevis bra, särskilt med tanke på att beräkningen bara innehåller fyra parametrar. Medelavdunstningen är ganska noggrant bestämd, medan avvikelserna för markanvändning är mer osäkra.

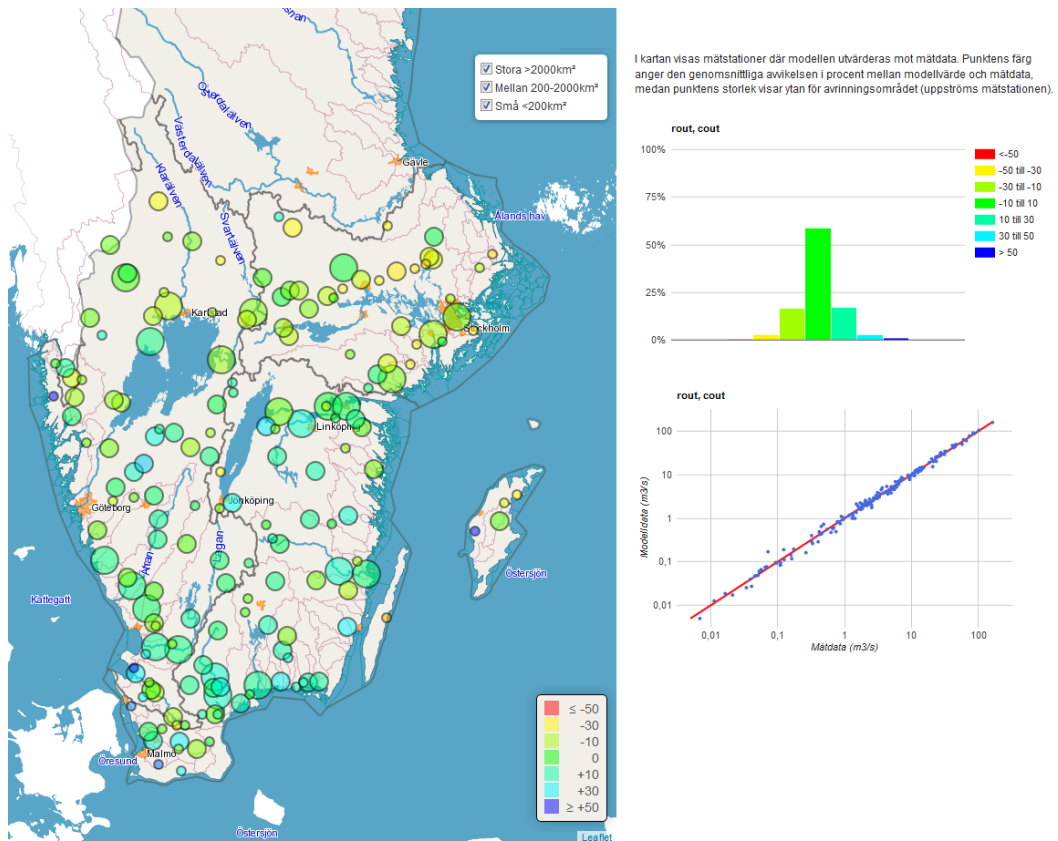


Figur 19. Uppmätt avrinning mot nederbörd (till vänster) och mot temperatur (till höger). r^2 är förklarad varians för de anpassade linjerna.

Den sammantagna bedömningen av analysen är att nederbörden är den klart dominerande faktorn för hur stor medelavrinningen ska bli. Temperatur och markanvändning har viss betydelse. Ingen skillnad i avdunstning mellan skog och jordbruk kunde urskiljas. En viss tendens till att avdunstningen från sjöar är högre än från övriga marktyper kunde skönjas.



Figur 20. Uppskattad avdunstning mot nederbörd (till vänster) och mot temperatur (till höger). r^2 är förklarad varians för de anpassade linjerna.



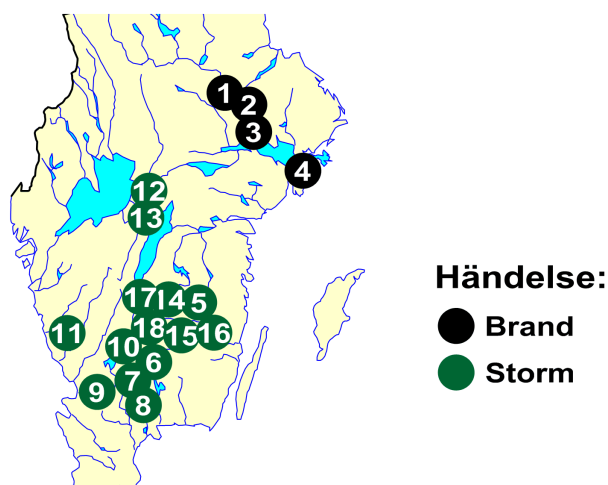
Figur 21. Volymfelet i avrinning med C_E -metoden, men med högre avdunstning från sjöar och lägre avdunstning från våtmarker och urbana områden. Cirklarnas storlek illustrerar uppströmsarea i tre klasser (<200, 200-2000 respektive >2000 km²).

9 Analys av markanvändningens betydelse

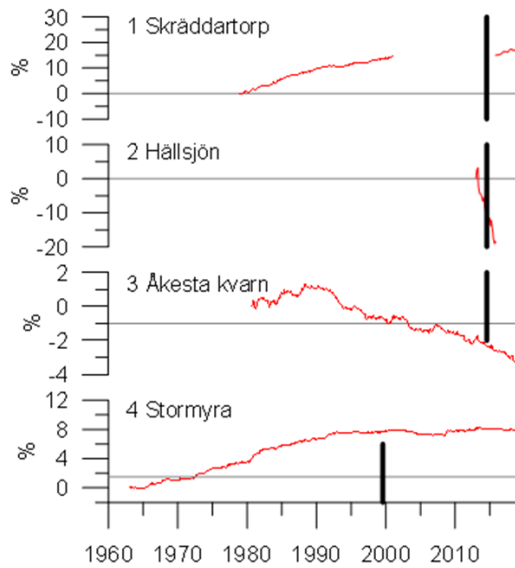
Avrinningen bestäms av nederbörd och avdunstning. Hur stor betydelse som markanvändningen har för vattentillgången debatteras ständigt. I till exempel HBV-modellen (se t.ex. Bergström, 1990) gör man endast indelningar i öppen mark och skog, medan i S-HYPE görs indelningar i ett tiotal markanvändningar. I allmänhet är skillnaderna i avrinning mellan markanvändningar svåra att urskilja. De flesta något så när stora avrinningsområden innehåller blandade markförhållanden, varför eventuella skillnader suddas ut. Förutom att avrinningen beror av klimatet tillkommer påverkan av jordart, topografi, mänskliga ingrepp, etc. Här gjordes två studier av markanvändningens betydelse för vattentillgången.

Den första studien bygger på tillämpning av S-HYPE där områdena med kända förändringar i markanvändning studeras. I S-HYPE är markanvändningen statisk, och modellen kommer därmed inte reagera på verkliga förändringar i markanvändning. Verkliga förändringar, till exempel genom kalavverkning, stormfälld skog och skogsbränder kan därmed orsaka att överensstämmelsen mellan modell och mätdata påverkas, i den mån förändringen verkligen leder till en förändring i avrinning. S-HYPE används då som en referens, som beräknar hur avrinningen hade fortsatt om inte händelsen hade inträffat. Denna teknik har bland annat använts av Brandt et al. (1998) för att påvisa en effekt på avrinningen från små avrinningsområden efter omfattande kalavverkning. Grimvall et al. (2014) använde liknande teknik för att konstatera minskande kvävehalter i avrinningen från Sveriges vattendrag till havet, speciellt i jordbruksområden.

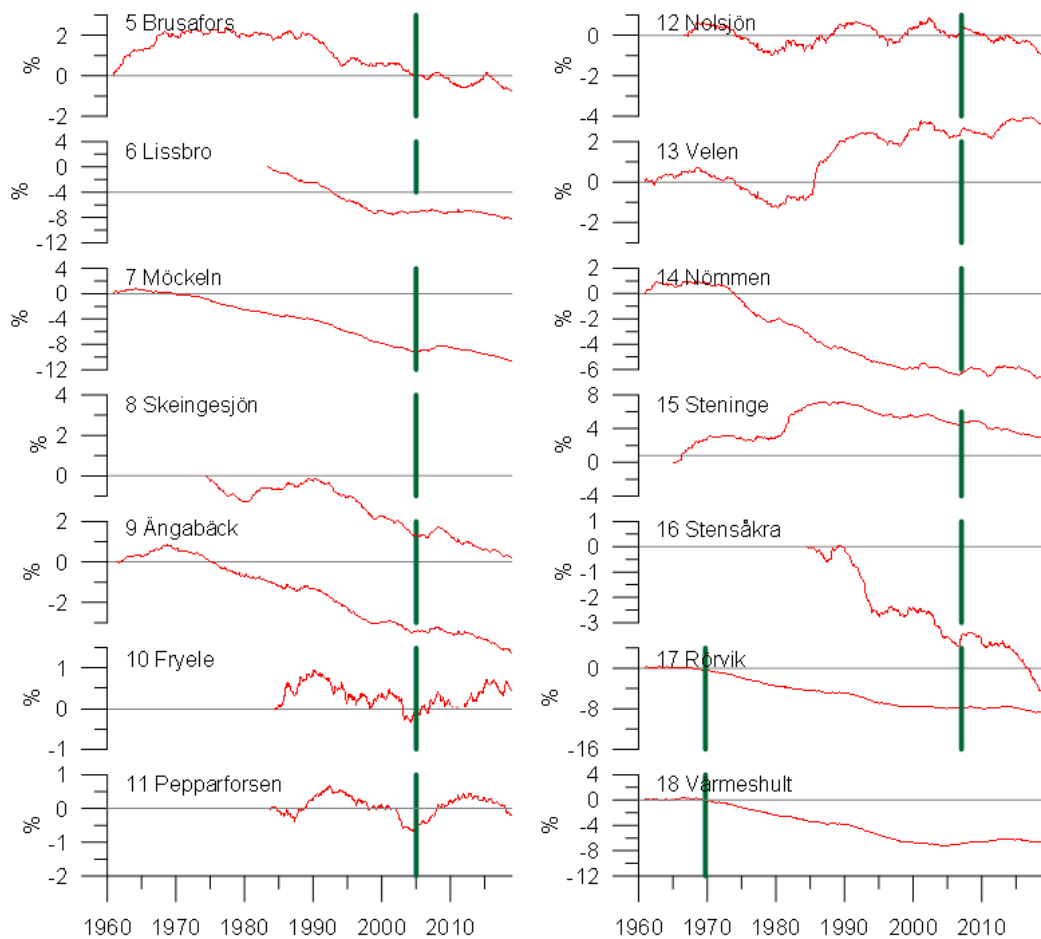
Effekten av ett antal skogsbränder och stormar undersöktes på detta sätt, se kartan i figur 22. Händelserna som undersöktes är skogsbranden i Sala, 2014, skogsbranden i Tyresta nationalpark 1999, stormarna Gudrun, 2005 och Per, 2007, samt stormen 1969. Resultaten sammanfattas i figurerna 23 och 24. En förändrad avrinning i verkligheten skulle framgå som en förändring i lutningen, ett ”knyck i kurvan”, som visar den ackumulerade skillnaden mellan uppmätt och modellberäknat flöde. En ökad avrinning skulle innebära en knyck uppåt.



Figur 22. Områden som användes i analysen av påverkan från förändrad markanvändning i samband med bränder och stormar.



Figur 23. Ackumulerad differens (i %) mellan uppmätt vattenföring och simulerad vattenföring enligt S-HYPE för utvalda avrinningsområden som påverkats av skogs Modellering av lågflöden



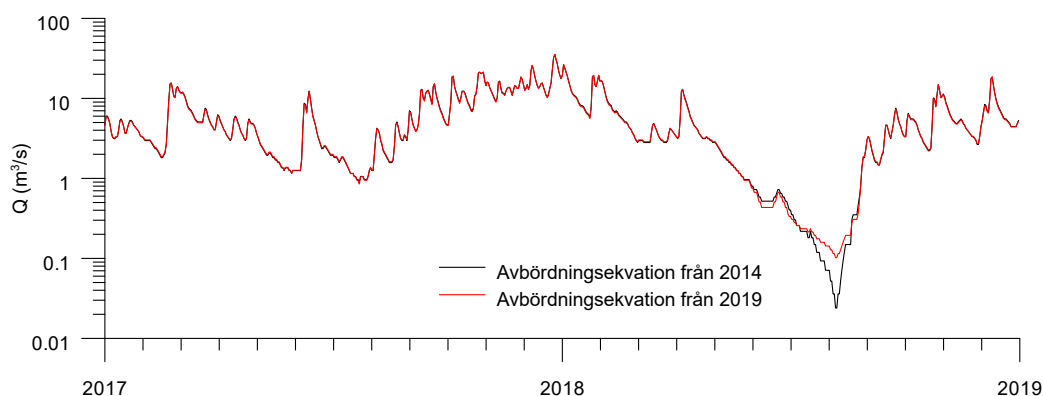
Figur 24. Ackumulerad differens (i %) mellan uppmätt vattenföring och simulerad vattenföring enligt S-HYPE för utvalda avrinningsområden som påverkats av stormar. Tidpunkten för stormar markeras med en vertikal stapel. Till vänster: stormen Gudrun, till höger: stormen Per och stormen 1969.

Man ser inga tydliga förändringar i vattenbalansen i resultaten. Detta kan jämföras med resultaten som Brandt et al. redovisade, där man fick stora lokala ökningar i avrinningen i samband med kalavverkning. I de här studerade områdena är den påverkade andelen förhållandevis låg, typiskt cirka 25 % av området, vilket kan vara en delförklaring. Samtidigt visar den ackumulerade differensen väldigt varierande mönster. Bristande noggrannhet i både den hydrologiska modellen, drivdata och uppmätt vattenföringen bidrar sannolikt med så pass mycket brus att det är svårt att detektera de små effekter som eventuellt uppstår i avrinningen i samband med dessa händelser.

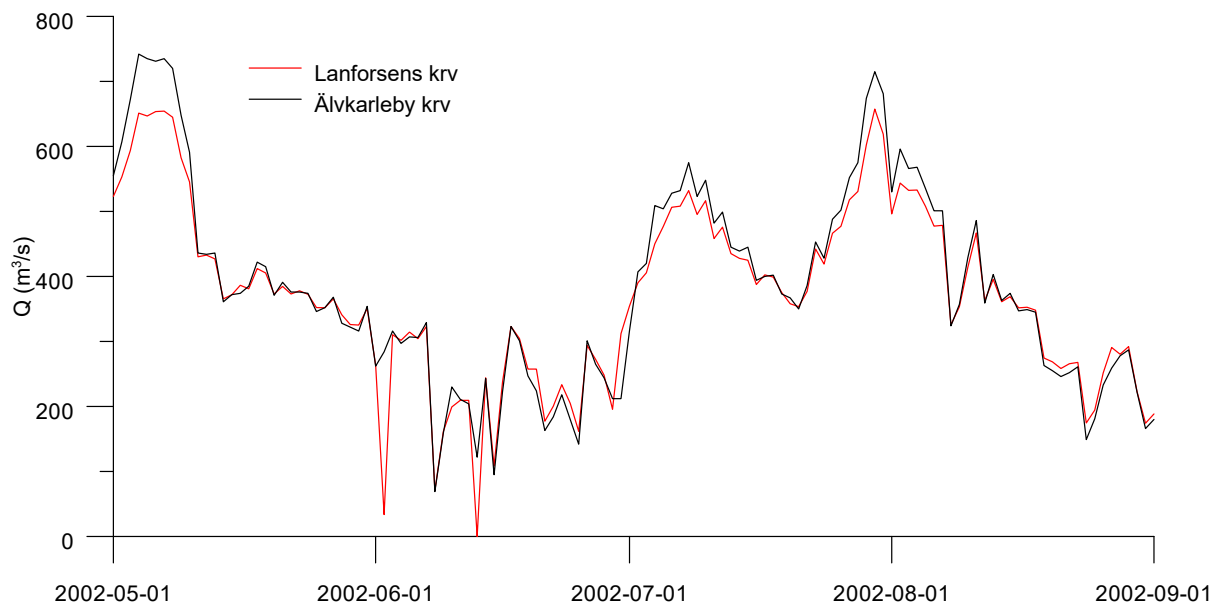
10 Modellering av lågflöden

S-HYPE har en tendens att underskatta de högsta flödena och överskatta de lägsta flödena, medan medelvattenföringen i allmänhet stämmer bra. Överskattningen av lågflödena är tydligast i sydöstra Sverige. I norr, däremot, underskattar S-HYPE ofta lågflödena. Dessa inträffar dock vintertid så mekanismen är en annan. Det är dock inte bara modelleringen av lågflöden som är svår, utan även mätvärden är extra osäkra vid låga flöden. Egentligen är det inte vattenföringen som mäts vid de allra flesta mätstationerna som ingår i SMHI:s stationsnät. Man mäter normalt ett vattenstånd och beräknar därefter flödet med ett samband mellan mätningar av vattenstånd och vattenföring. Sambandet kallas avbördningskvation, och bygger oftast på mellan 3 och 10 parametrar, som måste kalibreras. Många gånger tvingas man göra extrapolationer utanför tidigare uppmätta intervall. Ekvationen kan även bygga på få lågflödesmätningar. Tvärsektioner kan också förändras över tiden, och ibland dämjas av till exempel vegetation sommartid, eller is vintertid. Det finns alltså en rad källor till osäkerheter även i det som i dagligt tal benämns uppmätta flöden. Under torråren 2016-2018 genomförde SMHI ett antal lågflödesmätningar för att förbättra noggrannheten i flödesmätningarna. Figur 25 visar som exempel skillnaden i ”uppmätt” vattenföring vid stationen Simlängen, för åren 2017 och 2018, enligt den gamla avbördningskvationen (från 2014) och den nya (från 2019) som togs fram efter lågflödesmätning sommaren 2018. Den nya ekvationen gav ett ”uppmätt” lägsta flöde som var 325 % högre än det ”uppmätta” lägsta flödet enligt den gamla ekvationen.

I praktiken får man vid hämtning av vattenföringsdata från SMHI:s databas flödesdata i m^3/s med 3 decimaler. Den minsta upplösningen i data är alltså 1 liter/sekund. Alla värden under 0.5 liter/sekund avrundas alltså till 0. Nollvärden är svåra att hantera när man räknar relativa fel, eller logaritmiska anpassningsmått. Ett nytt sätt att beräkna anpassningsmått för lågvatten formulerades därför, för att även klara av nollflöden. Detta mått används numera i utvärdering av HYPE-modellens lågflöden (MLQ) i vattenwebb. Det nya måttet ökar möjligheten att utvärdera modellens prestanda för lågflöden och kan därmed göra det enklare att förbättra anpassningen. Metoden, här kallad 3-decimalsmetoden, innebär att man betraktar 1 liter/sekund som den minsta upplösningen i både beräknade och uppmätta vattenföringar. Noll betyder då enbart att flödet är < 0.5 liter/sekund. Detta kan betraktas som en detektionsgräns. Observera att det till exempel skiljer lika mycket mellan 0.5 l/s och 0.5 dl/s som mellan 100 och 1000 m^3/s , i relativa tal, trots att båda de två förstnämnda talen är försumbart låga i dessa sammanhang, och i allmänhet omöjliga att mäta. Många gånger ser man även att man under dagar med låga flöden helt enkelt har försummat det låga flödet som trots allt har varit, genom att ange noll m^3/s . Detta gäller särskilt i reglerade älvar, där det i verkligheten alltid finns ett visst läckage genom damm och luckor, vilket i sammanhanget försummas. Figur 26 visar uppmätt vattenföring vid Lanforsens kraftverk och Älvkarleby kraftverk i nedre Dalälven. Arealskillnaden mellan de två punkterna är helt försumbar (0.04%). Trots det anges flödet = 0 den 13 juni 2002 vid Lanforsen, men 122 m^3/s vid Älvkarleby, ungefär 1 km nedströms, vilket inte kan stämma. Nollvärdet vid Lanforsen är ett exempel på ett orimligt flöde, vilket ställer till problem vid beräkningen av relativa anpassningsmått. 3-decimalsmetoden klarar å andra sidan av denna situation. Det låga värdet i början av juni är för övrigt det näst lägsta under hela mätperioden (mer än 10 år).



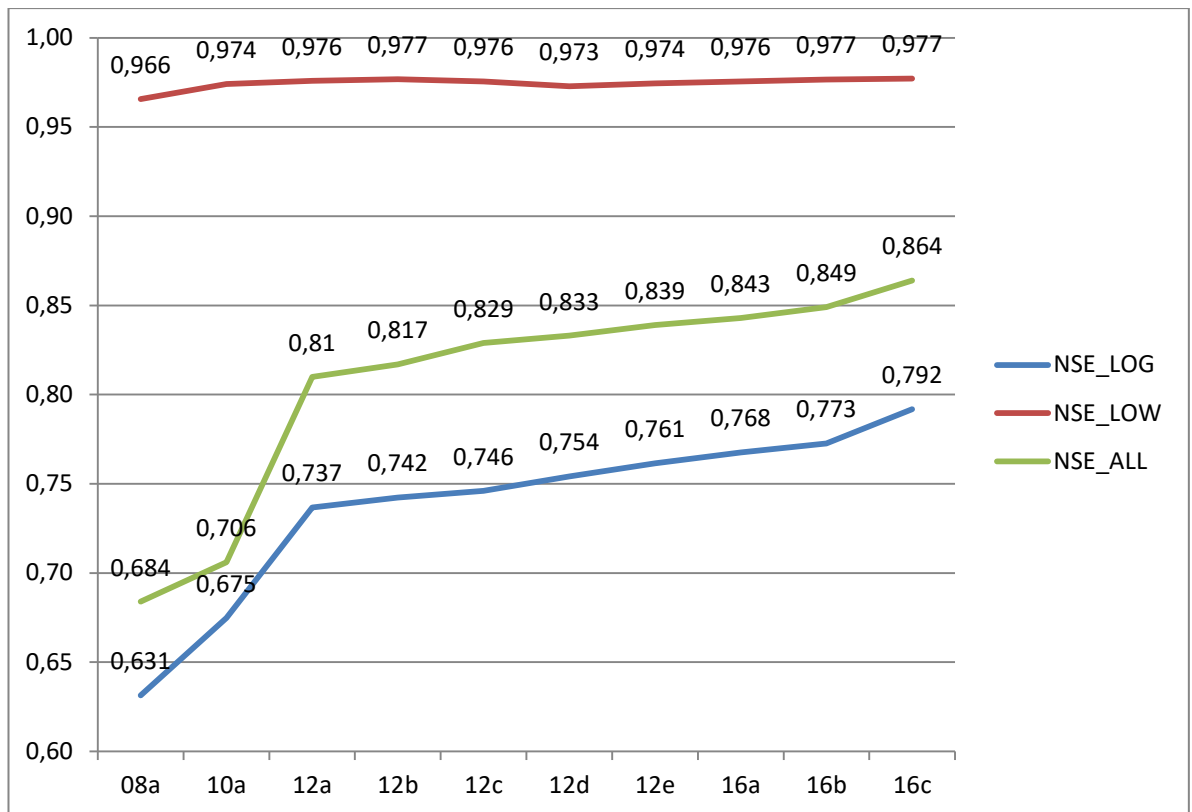
Figur 25. Uppmätt vattenföring vid stationen Simlängen, för åren 2017 och 2018, enligt den gamla avbördningsekvationen (från 2014) och den nya (från 2019) som togs fram efter lågflödesmätning sommaren 2018.



Figur 26. Uppmätt vattenföring vid Lanforsens kraftverk och Älvkarleby kraftverk, alldeles nedströms.

Det har visat sig svårt att förbättra anpassningen mellan S-HYPE och mätvärden över åren för lågflöden. Ovan nämnda svårigheter bidrar antagligen till detta. Figur 27 visar anpassningen över tiden, för alla dagar, för dagar med lågflöden, och för alla dagar fast mätt med NSE för logaritmiska flöden (med 3-decimalmetoden). De successiva förbättringarna som har gjorts syns för de två NSE-måtten för alla dagarna, men knappt alls för lågvatten (NSE_LOW).

Många försök att förbättra lågflödesbeskrivningen i S-HYPE har gjorts under åren. Här redovisas några ytterligare försök som gjordes inom projektet. I HYPE-modellen sker traditionellt ingen avdunstning från det tredje markskiktet (det kan maximalt finnas 3 markskikt i modellen). Detta leder till att basflödena inte avtar på grund av avdunstning från marken sommartid, och kan vara en delförklaring till att S-HYPE ofta överskattar lågvattenflödena. En modifierad avdunstningsrutin (med avdunstning från alla tre markskikten) utvecklades därför och lades in i HYPE. En enkel schablonberäkning av uttaget för bevattning lades också in. Ett uttag motsvarande 5 mm per månad över all åkermark togs ut under juni, juli och augusti. På ytor tillhörande klassen radsådda grödor, bland annat potatis, dubblerades uttaget. Ytterligare ett antal modellversioner med kapillär uppstigning från grundvattenzonen till rotzonen testades. Dessa utvecklades av SGU, för att förbättra grundvattensimuleringar under torrår.



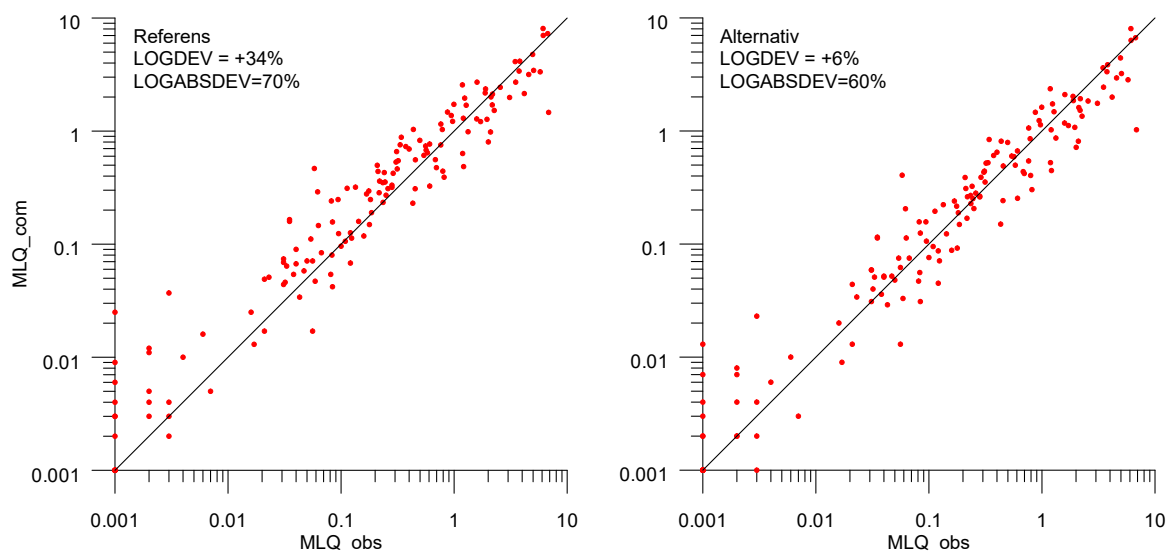
Figur 27. NSE (medianvärden) för olika versioner av S-HYPE (ett jämförbart urval av stationer, 284 st).

Tabell 1 sammanfattar några utvalda resultat för 151 oreglerade vattendrag med en uppströmsarea < 2000 km². NSE är det mått som främst har använts för utvärdering av S-HYPE. RE är de systematiska felen ("Relative Error"). Tabellen visar att NSE påverkas ganska lite av de olika testerna, och att volymfelet (RE_Q) är nära noll i alla testerna, att RE_MHQ är i genomsnitt < 0 och att RE_MLQ är i genomsnitt > 0. Man kan åstadkomma ett försumbart systematiskt fel i MLQ, och även MHQ, till exempel genom att halvera den effektiva porositeten (E.p.) i marken, men på bekostnad av sämre överensstämmelse i tiden (lägre NSE och NSE_log). Utvärderingen av MLQ för detta fall visas i figur 28. Figur 29 visar en detaljstudie för ett av de 151 områdena: stationen Källstorp i Ljungbyån. Med halveringen av den effektiva porositeten sänks visserligen de lägsta flödena en aning, men inte med tillräckligt mycket.

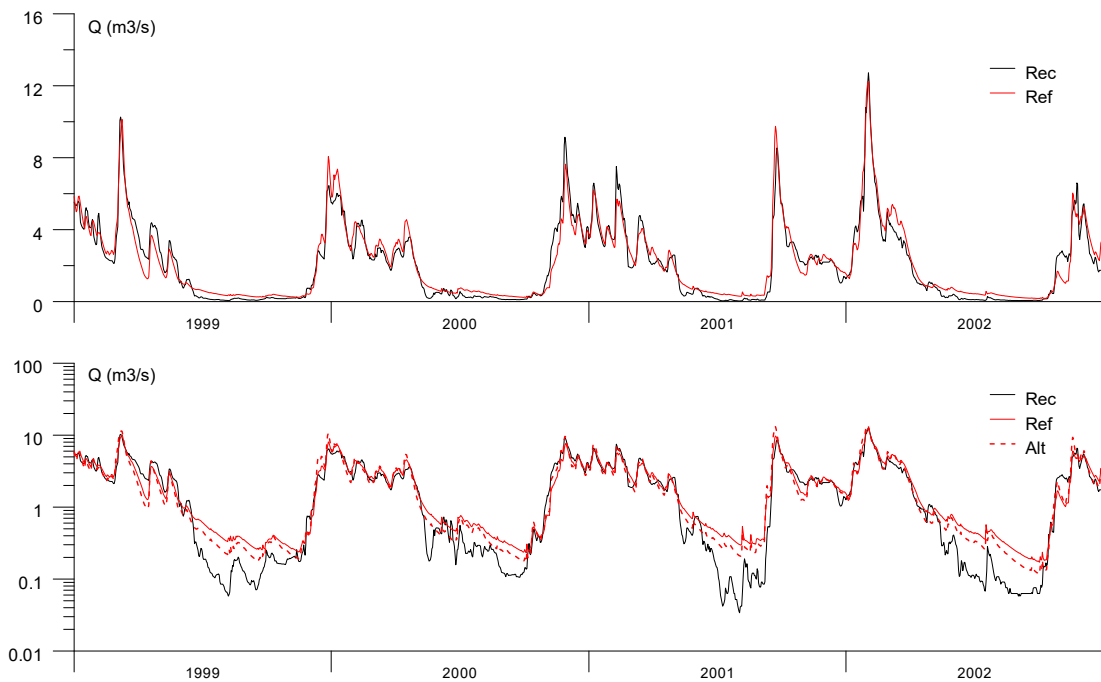
Tabell 1 visar vidare att modellen med avdunstning från tredje skiktet inte gav några genomgående förbättringar. Bevattningsberäkningarna leder ofta till orimligt låga flöden i jordbruksmark, troligen beroende på något annat fel i inställningen av parametrarna. Vissa små förbättringar kunde dock erhållas i beskrivningen av lågflöden, främst genom att rotzonen gjordes djupare. Modellerna med kapillär uppstigning gav tyvärr inga förbättringar för lågvattenföringen och anpassningsmåten redovisas därför inte här.

Tabell 1. Resultat från utvalda modelltester med syfte att förbättra lågflödena.
¹⁾inklusive andra omkalibreringar.

Modell	NSE (medel)	RE_Q (%) (medel)	RE_MHQ (%) (median)	RE_MLQ (%) (median)	NSE_log (medel)
Referens	0.832	-0.8	-11	+27	0.771
Enskilda avlopp bort	0.832	-0.9	-11	+26	0.771
Bevattning	0.832	-1.4	-11	+17	0.757
E.p. -10%	0.832	-0.9	-10	+24	0.770
E.p. -50%	0.812	-1.1	-3	+5	0.735
Avd. 3e skiktet ¹⁾	0.831	-1.1	-10	+20	0.769
Recessionen i skikt 3 +10%	0.832	-0.7	-11	+25	0.770
Bäckdjupet 10 cm ytligare ¹⁾	0.830	-1.0	-10	+12	0.763
Rotzonen 10 cm djupare ¹⁾	0.833	-1.3	-11	+12	0.768



Figur 28. MLQ för modellberäkningar respektive mätvärden. Referensmodellen till vänster, och en alternativ modell (E.p.-50 % i tabell 1) till höger.



Figur 29. Exempel från originalmodellen (Ref) och efter omkalibrering (Alt, motsvarande E.p.-50 % i tabell 1). Stationen Källstorp i Ljungbyån. Rec = uppmätta värden. Överst: linjär skala, nederst: logaritmisk skala.

11 Scenarioberäkningar med S-HYPE

Det centrala momentet i projektet var att simulera effekten av åtgärder för att höja vattentillgången under torrperioder. Många av faktorerna har studerats var för sig, och ofta i få områden. I denna studie gjordes en större, mer systematisk jämförelse av olika scenarier och åtgärder. För simuleringarna användes S-HYPE2016b, men med de förbättringar som gjordes i det föregående avsnittet (tabell 1, sista raden). Beräkningarna avser åren 1981-2010, de år som används som normalperiod för vattenföringsstatistik i vattenwebb. Sex vattendrag ingick i simuleringarna, se tabell 2. Resultaten avser mynningspunkterna för respektive vattendrag. De åtgärder som har simulerats redovisas i tabell 3.

Tabell 2. Beskrivning av områdena i scenariosimuleringarna. Regl. = regleringsgrad, Hårdgjort = hårdgjorda ytor, MLQ beräknat enligt mätningar från en vattenföringsstation nära mynningarna.

Vattendrag	Area (km ²)	Sjö (%)	Regl. (%)	Jordbr. (%)	Skog (%)	Hårdgjort (%)	MLQ (L/s/km ²)
Svartån, Närke	1440	6.5	8.4	15	66	1.5	1.2
Emån	4470	5.9	10.9	11	76	0.6	1.3
Ljungbyån	758	0.7	0	13	78	0.9	0.14
Lyckebyån	810	4.3	1.2	6	82	0.5	0.5
Höje å	347	0.5	0	60	15	3.8	1.4
Gothemån	479	0.1	0	47	43	0.1	0.09

Tabell 3. Scenarier (åtgärder eller förändringar) som simulerades med S-HYPE.

Scenario nr:

0. Referens.

1. Nederbörd + 10 %.

2. Temperatur + 1 °C.

3. ILAKE +1% (andelen sjö ökas med 1 procentenhet inom varje delområde, dock ej vid utloppet).

4. OLAKE +1% (andelen sjö ökas med 1 procentenhet i alla områden, vid utloppet av varje delområde).

5. Ändrad reglering (sommarflödet i befintliga regleringar ökas med 100 %).

6. Vattendrag +100% (längden och därmed arean ökas).

7. Dricksvattenuttag. Scenariot innebär ett ökat vattenuttag med 150 liter/person/dygn med en befolkningstäthet av 60 personer/km² (som är ungefär den genomsnittliga befolkningstätheten i södra Sverige).

8. Bevattning jordbruk 10 mmm/månad (egentligen 10 mm/månad för rotfrukt och majs, 5 för övriga grödor, se beskrivning ovan).

9. Dräneringsrör tas bort (gäller jordbruksmark).

10. Jordbruksmark → skog (all jordbruksmark omvandlas till skog, dräneringsrören tas också bort).

11. Dränering i all skog (1 m djup, med långsammare dränering än genom dräneringsrören i jordbruksmark).

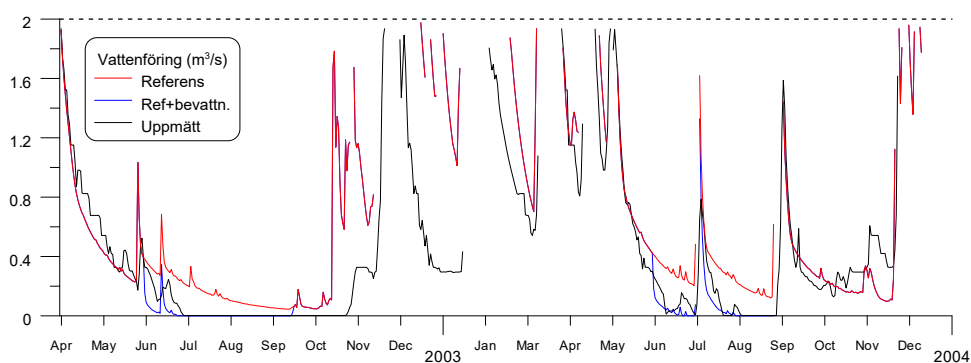
12. Befintliga anlagda våtmarker (de anlagda våtmarkerna i SMHIs våtmarksdatabas läggs in).

13. Anlagda våtmarker +1% (våtmarker anläggs i alla delområden).

14. Hårdgjorda ytor → semiurban mark.

15. Torraste året utav 30, vilket kan betraktas som ett mått på den naturliga variabiliteten inom en trettioårsperiod (en klimatologisk normalperiod).

I en scenariosimulering påverkas flera faktorer. Beroende på skillnader i lokala förhållanden kan resultatet slå åt olika håll vid samma förändring. Eftersom S-HYPE-modellen är en förenkling av verkligheten kan effekterna av de olika åtgärderna inte kvantifieras exakt. Resultaten kan ändå ge en fingervisning om betydelsen av olika förändringar. Skillnaderna i vattentillgång bör också ställas i relation till variationer i vattentillgång mellan år. Figur 30 visar ett exempel på resultat från ett av scenarierna, nämligen bevattningsuttaget. Modellen ger utan bevattningsuttaget för hög avrinning under sommaren, och när bevattningsuttaget är med i beräkningen beskriver modellen lågflöden betydligt bättre, i detta specifika fall.

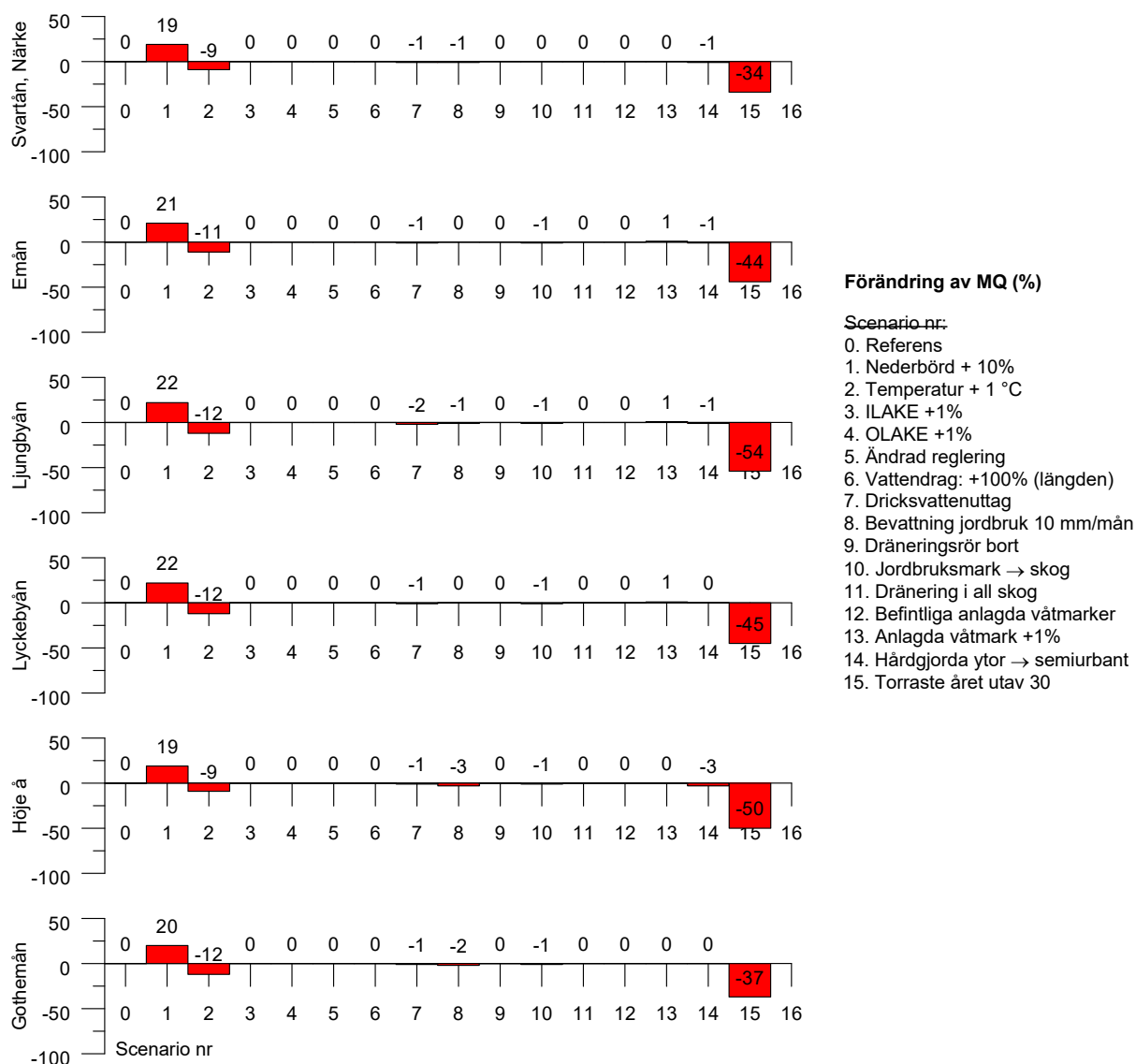


Figur 30. Exempel på en scenariosimulering S-HYPE, för Høje å nära Lund, referens (dagens förhållanden) och scenariot med hypotetiskt uttag för bevattning.

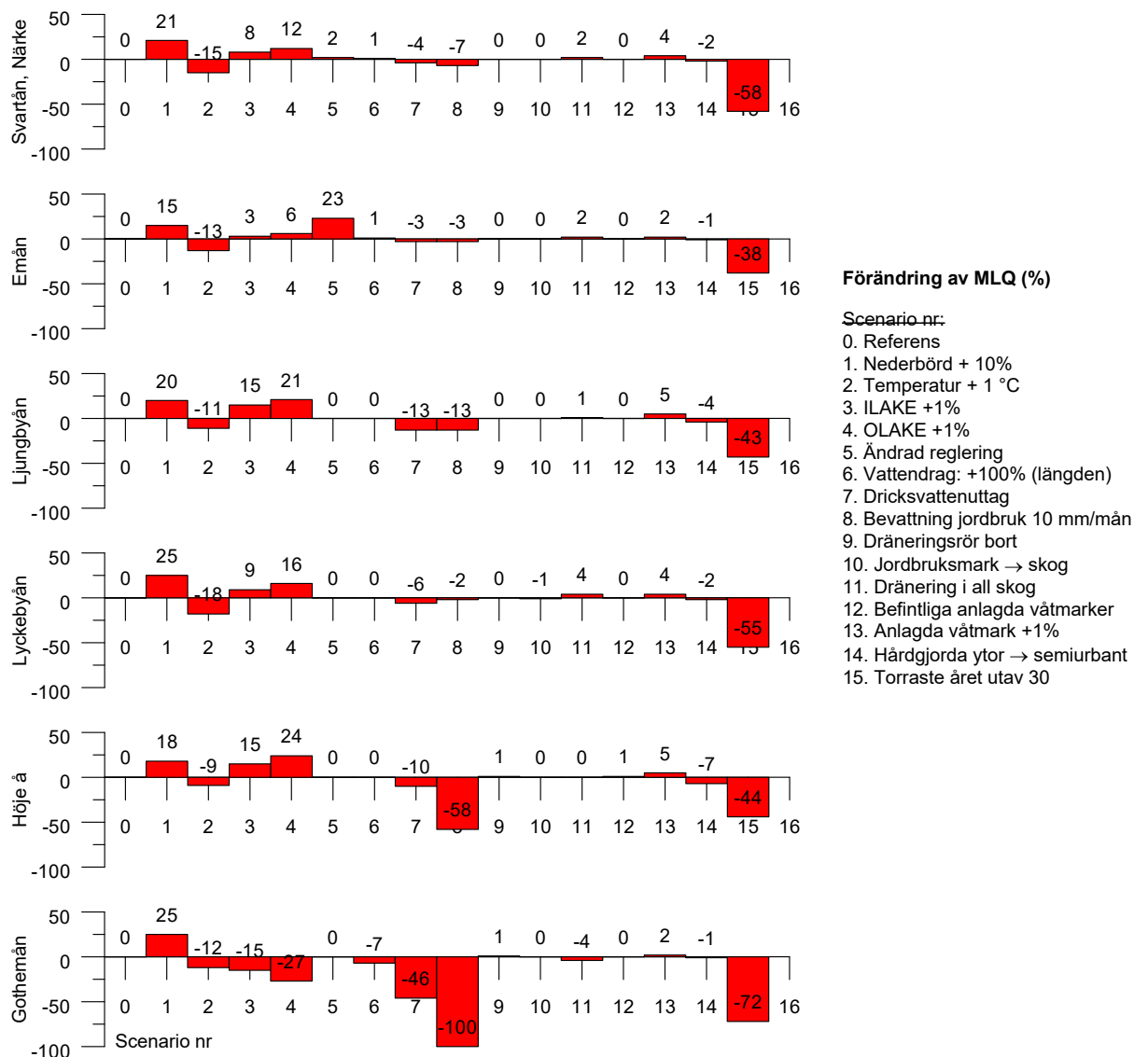
Figur 31 visar effekten som de olika scenarierna i tabell 3 har på medelvattenföringen MQ, enligt simuleringarna med S-HYPE. Det är framförallt klimatet som påverkar vattentillgången på årsnivå. Utslagen är förhållandevis lika i alla områdena. Figur 32 visar motsvarande effekt på lågflödesmättet MLQ. Här skiljer resultaten mer mellan områdena, beroende på olika lokala förhållanden. I sjöfattiga områden skulle en ökad sjöprocent leda till ökade lågflöden, medan effekten i Emån är procentuellt sett mindre på grund av att sjöprocenten redan idag är hög (tabell 2). I Gothemån på Gotland skulle en ökad sjöprocent till och med kunna ge lägre lågflöden, troligen för att ökad avdunstning från sjön skulle betyda mer än den förbättrade lagringen i sjöar. Förändrad reglering av befintliga sjöar skulle ha störst betydelse i Emån, med hög andel existerande sjöar. Vattenuttag skulle kunna ha stor betydelse, där särskilt det gotländska området verkar känsligt för uttag. MLQ är där mycket lågt redan i dagens förhållanden (tabell 2). Dränering i jordbruket har enligt beräkningarna liten betydelse. Förändringen i vattendragslängd gav mycket små skillnader. Lite överraskande gav borttagande av hårdgjorda ytor en minskning av lågflödena. Detta beror antagligen på att man i naturmark kan bygga upp ett markfuktighetsunderskott sommartid, medan hårdgjorda ytor bidrar till avrinning varje gång som det regnar. Resultaten stämmer överens med dem som Stensen et al. (2019) redovisade i en liknande studie, i de delar som även finns med i denna rapport.

Resultaten visar att effekten av de hittills anlagda våtmarkerna är försumbar i de utvärderade punkterna. Betydligt större arealer skulle behöva tas i bruk för att man ska uppnå en påtaglig effekt. Lokalt nedströms våtmarker kan effekten dock vara större (jämför figur 15). För att få bättre kunskap om hur stor magasineringskapaciteten är i anlagda våtmarker skulle det vara värdefullt med mätningar av vattenstånd i våtmarker. Detta är enkelt att genomföra och man behöver inte mäta mer än några år (se till exempel Lindström, 2016).

I appendix visas kartor över förändringen i MLQ vid två av scenarierna i tabell 3. En ökad sjöandel skulle enligt beräkningarna höja MLQ i de flesta delarna av södra Sverige, särskilt i områden med tunna jordar som exempelvis Bohuskusten. Å andra sidan skulle ökad avdunstning kunna ta överhanden på bland annat Öland och Gotland. Anlagda våtmarker torde ge ett liknande regionalt mönster. Kustområdena verkar vara mer känsliga för ett ökat vattenuttag, än till exempel sydsvenska höglandet.



Figur 31. Effekt (i %) på medelvattenföringen MQ som de olika scenarierna i tabell 3 har enligt simuleringarna med S-HYPE.



Figur 32. Effekt (i %) på lågflödesmättet MLQ som de olika scenarierna i tabell 3 har enligt simuleringarna med S-HYPE.

12 Scenarioberäkningar med statistiska metoder

En statistisk studie av hur lågvattenföringen (MLQ) enligt uppmätt vattenföring beror av områdesegenskaper gjordes. Här användes endast mätdata, och studien kan därför komplettera de övriga momenten som i första hand bygger på modellering.

Markanvändning, klimatdata (nederbörd och temperatur), regleringsgrad och uppmätt vattenföring sammanställdes från S-HYPE. 502 vattenföringsstationer med minst 5 kompletta år under perioden 1960-2016 användes. Lågflödet MLQ jämfört med MQ visas i figur 33. Man ser att MLQ förklaras till mycket större del av MQ för de oreglerade serierna, än för de reglerade serierna, där spridningen är större. Det är därför betydligt svårare att med hjälp av en hydrologisk modell, som S-HYPE, nå en hög noggrannhet i MLQ i reglerade vattendrag än i oreglerade vattendrag. För vidare studier valdes samma stationer som i vattenbalansberäkningarna ovan ut, det vill säga endast områden söder om Dalälven. Därefter valdes dessutom alla reglerade stationer bort. Efter dessa filtreringar återstod 87 stationer. Även MLQ korrigerat för areal (mm/dygn) var, som förväntat,

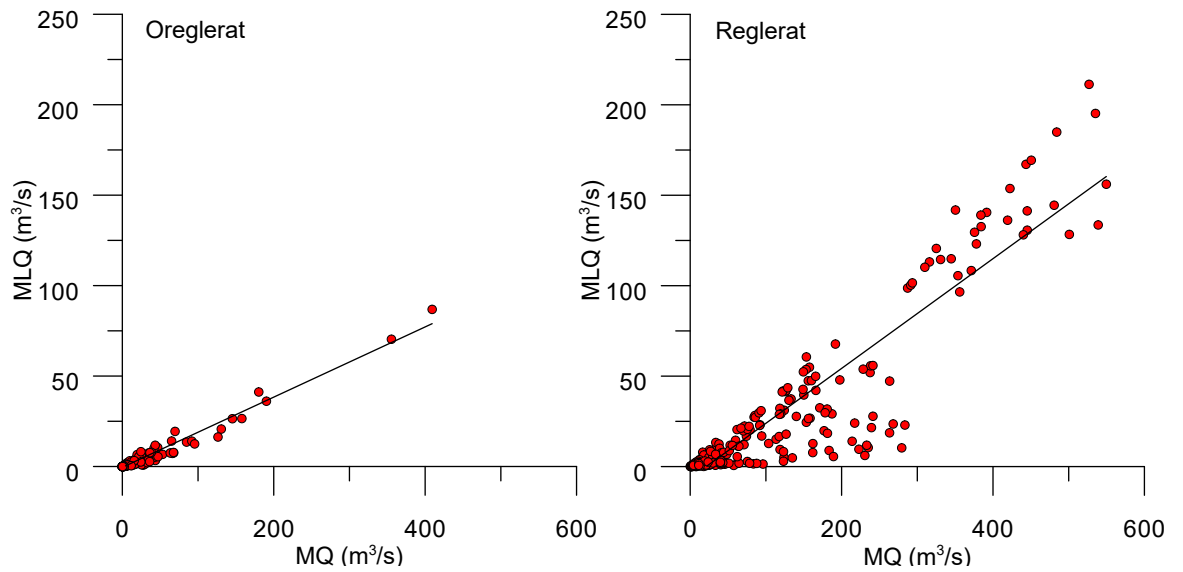
positivt korrelerat med motsvarande medelvattenföring MQ (mm/år) (figur 34). Punkten med högst specifik MLQ i figur 34 (nästan 0.5 mm/dygn) är mätstationen Sved, i Svedån som mynnar i Vättern. Området har hög andel isälvsmaterial och ett högt basflöde.

Man kan även normalisera MLQ genom att dela med MQ och därigenom minska beroendet av nederbörden, som ju förklarar en stor del av variationen i MQ (se figur 19). Sjöprocenten bidrar till höjt MLQ, och effekten framträder tydligare när man har normaliserat MLQ på det beskrivna sättet (figur 34). Figur 35 visar korrelationen mellan MLQ/MQ och fler områdesegenskaper. Isälvsmaterial bidrar enligt resultaten till högt MLQ, medan bland annat lera bidrar till lägre MLQ. Tunna jordar, hedmark och framförallt jordbruksmark bidrar också till låga MLQ, medan skog var positivt korrelerat med MLQ. Att MLQ är negativt korrelerat med de flesta markklasserna kan delvis bero på att ökande markandel innebär minskad sjöprocent. Större area leder ofta till högre MLQ, på grund av fördröjningar i avrinningsområdet. Figuren visar att S-HYPE i allmänhet beskriver variationen i MLQ ganska bra. Anmärkningsvärt är dock att S-HYPE visar en positiv betydelse för MLQ för morän, medan mätningarna slår åt motsatt håll, om än mycket svagt. Samtidigt måste man tolka figuren lite försiktigt eftersom temperaturen skiljer ganska mycket inom området (som är hela området söder om Dalälven), och många av faktorerna är sinsemellan korrelerade. Till exempel finns de flesta jordbruksområdena längst i söder.

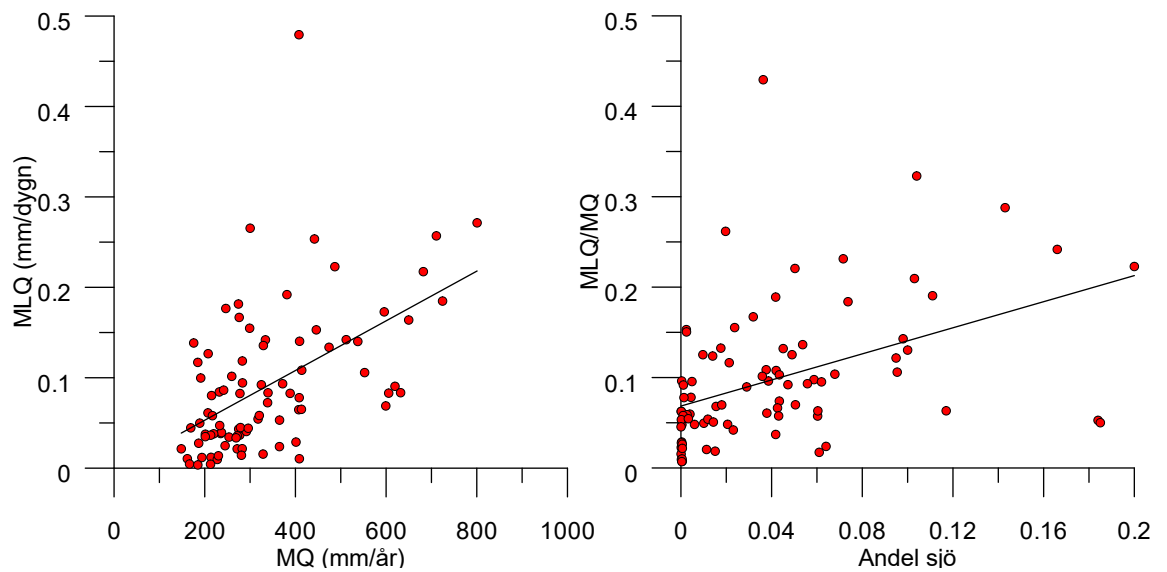
En statistisk modell för förklaring av MLQ som funktion av klimat, markanvändning och regleringsgrad byggdes med hjälp av metoden för principalkomponenter. Denna metod innebär att man först konstruerar oberoende kombinationer av de ingående förklaringsvariablerna. Därefter görs en multipel regression mellan MLQ å ena sidan och de konstruerade kombinationsparametrarna. Redan efter ett fåtal av dessa nya parametrar har man i allmänhet förklarat en stor del av den totala rumsliga variationen i MLQ. En fördel jämfört med traditionell regression är att alla variablerna ingår i varje av de konstruerade variablerna. Man försummar härmed inte effekten av egenskaper med mycket låg förklaringsgrad, utan effekten av alla variabler kommer med, om än svagt. MLQ beräknades endast för positiva vattenföringsvärden (3-decimalmetoden).

Den framtagna modellen användes sedan till en scenarioanalys av liknande slag som med S-HYPE-modellen. Resultaten redovisas i figur 36. MLQ ökar ungefär ca 20 % om nederbörden ökar med 10 %, vilket är i samma storleksordning som vad som erhålls med S-HYPE (figur 32). Däremot är känsligheten för en temperaturökning motsatt mot den som fås med S-HYPE. Detta antyder att den statistiska modellen kanske inte är så lämplig för detta scenario, men också att effekten i S-HYPE kan vara överdriven. Resultaten för sjöar och våtmarker är ganska lika mellan den statistiska modellen och S-HYPE, men med större utslag i den statistiska beräkningen. Ökad andel tätort innebar ökade MLQ enligt båda metoderna. Ökningen av skogsmark och jordbruk gav samma utslag enligt den statistiska analysen.

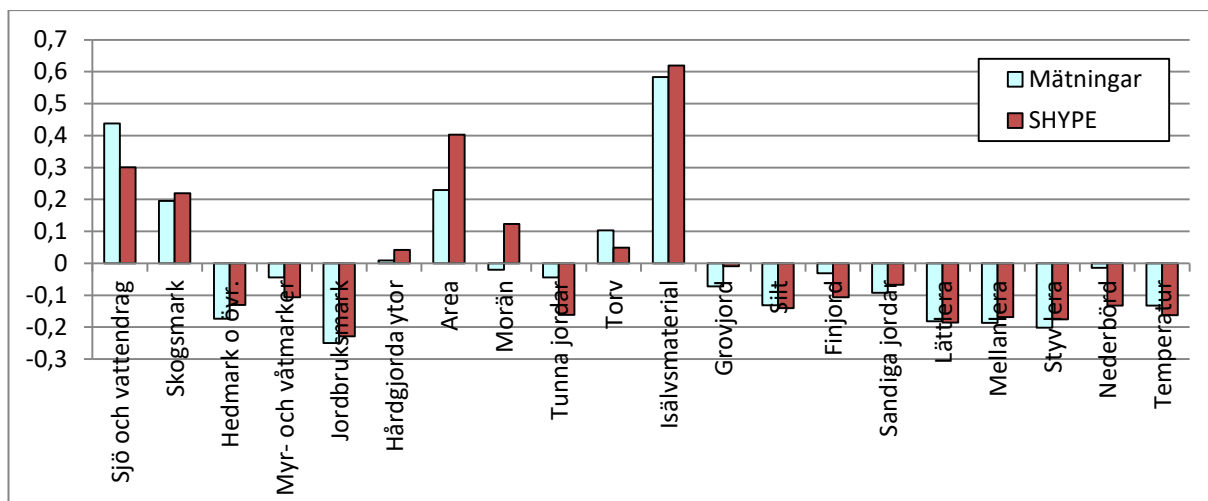
Figur 37 visar slutligen MLQ uppskattat med den statistiska modellen respektive S-HYPE, jämfört med MLQ uppskattat från mätningar. I S-HYPE ingår här de anpassningar som gjordes för lågflöden inom detta projekt. Endast oreglerade områden ingick i analysen. S-HYPE ligger oftare för högt än för lågt (figur 37), särskilt i små områden, medan medelvärdet för alla områdena enligt den statistiska modellen stämmer överens med medelvärdet för mätningarna. Detta beror på att den statistiska modellen helt enkelt har konstruerats med detta villkor. Den typiska överskattningen i S-HYPE är här drygt 20 %. Å andra sidan förklarar S-HYPE skillnaderna mellan områdena bättre än den statistiska modellen, kanske beroende på att den har många fler parametrar som har ställts in mot mätvärden. De genomsnittliga avvikelserna i absoluta tal är således cirka 60 % för S-HYPE och 70 % för den statistiska modellen. S-HYPE stämmer alltså sammantaget något bättre än den statistiska modellen i dessa punkter. Det är dock sannolikt att den statistiska modellen skulle stämma bättre i oberoende punkter, eftersom den har färre parametrar.



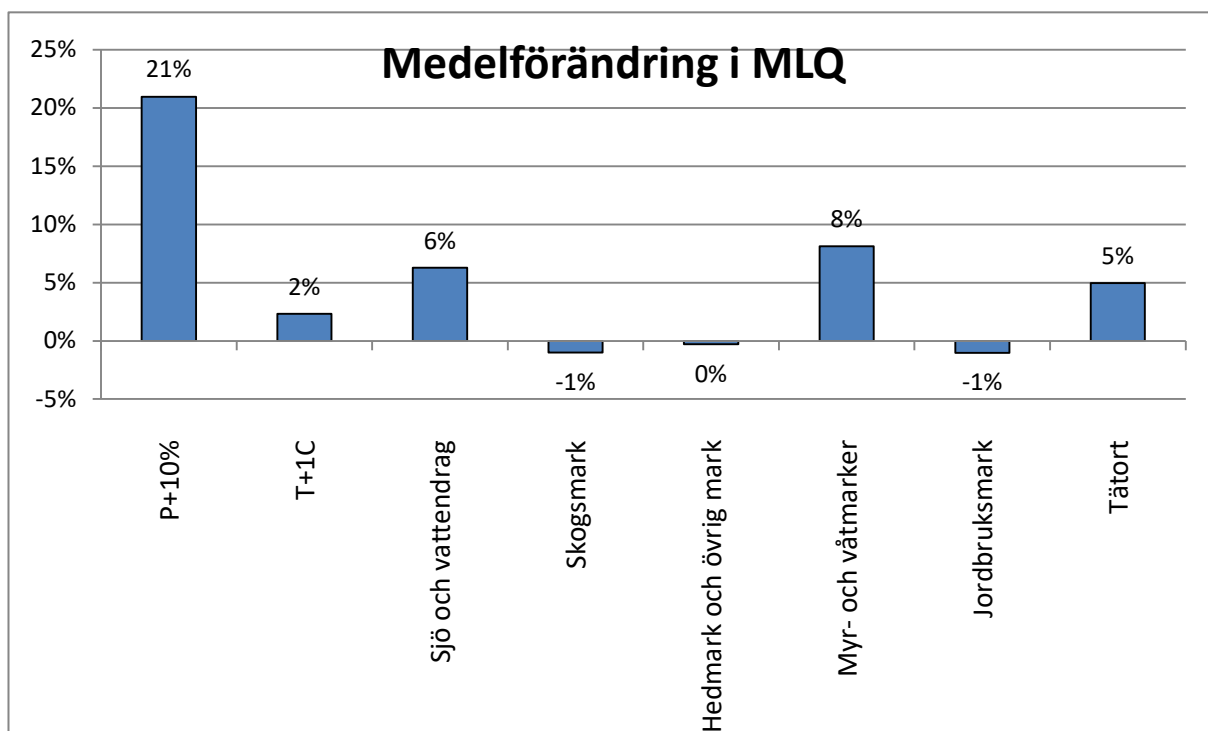
Figur 33. *MLQ jämfört med MQ, båda i m³/s. Till vänster: 228 oreglerade vattendrag (<1 % regleringsgrad), till höger: 274 reglerade vattendrag (≥1% regleringsgrad).*



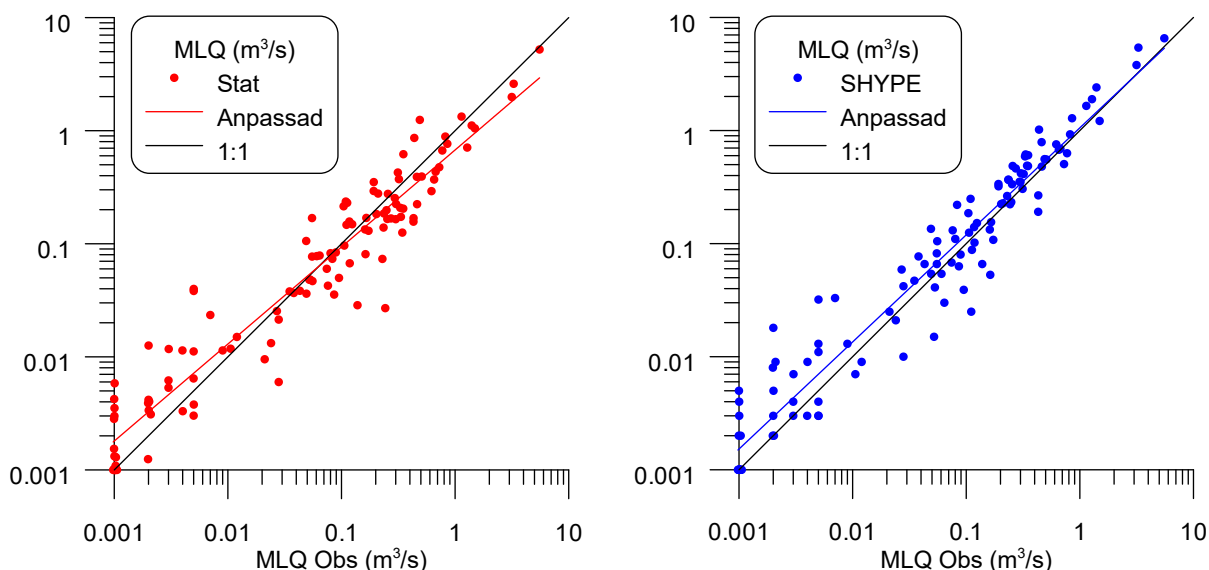
Figur 34. *Till vänster: MLQ (mm/dygn) jämfört med MQ (mm/år) för 87 oreglerade vattendrag söder om Dalälven. Till höger: MLQ/MQ som funktion av andel sjö.*



Figur 35. Korrelation mellan MLQ/MQ och områdesegenskaper, dels för vattenföringsmätningar och dels för S-HYPE-simuleringar.



Figur 36. Resultat från scenarioanalysen gjord med statistisk analys av vattenföringsdata. Alla markklasser ökades med 1 procentenhet. Analysen omfattar 139 områden i södra Sverige, med regleringsgrad=0%, och minst 5 års observationer.



Figur 37. *MLQ uppskattat med två olika metoder, jämfört med MLQ uppskattat från mätningar. Till vänster: den statistiska modellen, till höger S-HYPE med de anpassningar som gjordes för lågflöden inom detta projekt. Perioden är 1961-2019.*

13 Diskussion

Det finns många svårigheter med analys av lågflöden. Osäkerheterna blir procentuellt sett stora i både mätvärden och modellberäkningar eftersom flödena i absoluta tal är små. Några speciella förhållanden lyfts fram i denna rapport. Mätvärden som har rapporterats som noll kan snarare betyda att flödet betraktas som försumbart lågt. Vid hämtning av mätvärden från SMHIs databaser fås data standardmässigt i m^3/s , med tre decimaler. Det innebär att flödet 1 L/s kan betraktas som en undre detektionsgräns. Vid procentuella jämförelser i rapporten plockades därför både uppmätta och beräknade flöden under 1 L/s bort, i vad som kan kallas för 3-decimalmetoden. Utöver detta problem med avrundning är avbördningssekvationerna ofta mycket osäkra, i procent, för lågflöden. Regleringar kan påverka lågflöden både uppåt och nedåt. Även i vattendrag med mycket låg total regleringsgrad så kan korttidsreglering i ett kraftverk lokalt sänka lågflödena betydligt. Det betyder att man antingen helt bör undvika reglerade områden i till exempel trendanalyser, eller utjämna serierna till veckomedel.

14 Slutsatser

Trendanalys av vattenföringsdata är vanskelig eftersom osäkerheterna i lågflöden är så stora, särskilt om man bara baserar analysen på det lägsta dygnsvärdet för varje år. Det är svårt att både beräkna och mäta de lägsta vattenföringarna. Osäkerheterna i relativa termer, till exempel procent, blir mycket stora. Några förslag till hur dessa problem kan hanteras ges i rapporten. Den samlade bedömningen av den statistiska analysen av vattenförings- och vattenståndsdata är att:

- Vattenföringen minskar inte generellt i Sverige.
- Lågwaterföringen har ökat i norra Sverige, troligen beroende på de milda vintrarna på senare år. I sydöstra Sverige har den i stället minskat, eventuellt delvis på grund av regleringar.
- 2016-2018 har varit mycket torra i sydost. Vilket år som har varit torrast beror på var i landet man avser och vad man menar med torrt.
- År 2018 var året med flest dagar under MLQ i sydöstra Sverige.

Inga tydliga skillnader i medelavrinning från olika markanvändningar framkom i analysen. Avdunstningen från skogs- och jordbruksmark var enligt resultaten väldigt lika varandra. Över huvud taget verkar avdunstningen vara ungefär lika stor i hela södra Sverige, cirka 485 mm/år som långtidsmedel. En något högre avdunstning från sjöar än från andra markklasser kunde skönjas.

Scenarioanalys för lågflöden gjordes både med den hydrologiska modellen S-HYPE och med statistisk analys. Resultaten stämde i allmänhet ganska bra överens mellan de två metoderna.

Faktorer som påverkar lågflödena:

- Nederbörden är den viktigaste faktorn. Effekten är relativt säker.
- Ökad temperatur påverkar lågflödena, genom ökad avdunstning. Möjligen ger den hydrologiska modellen med nuvarande parameterinställningar en överskattad uttorkning med ökad temperatur. Resultaten är därför lite mer osäkra.
- Sjöar har stor effekt, särskilt om de regleras. Vatten sparas till torrperioder. Resultaten är ganska säkra. I torra områden kan sjöar dock fungera som sänkor och ge lägre lågflöden, på grund av hög avdunstning.
- De hittills anlagda våtmarkerna har haft försumbar effekt på lågflödena i regional skala, eftersom de använda arealerna är små. Resultaten är ganska osäkra eftersom magasineringen av vatten i våtmarker inte är känd. Mätningar av vattenstånd i våtmarker skulle ge ytterligare kunskap om effekten. Rätt utformade skulle våtmarker kunna ha en positiv effekt, särskilt lokalt.
- Förlängda vattendrag verkar ha liten betydelse för lågflödena.
- Markanvändningen tycks ha liten effekt, men resultaten är mer osäkra.
- Isälvsmaterial bidrar enligt resultaten till högt MLQ, medan bland annat lera bidrar till lägre MLQ.
- Vattenuttag och bevattning kan ha ganska stor effekt. Effekten av vattenuttag är förstås enkel att beskriva i en beräkning. Däremot är vattenuttagen ännu ganska dåligt kända, och svåra att komma åt för modellberäkningar.
- Jordbruksdräneringen påverkar lågflödena ganska lite enligt beräkningarna.

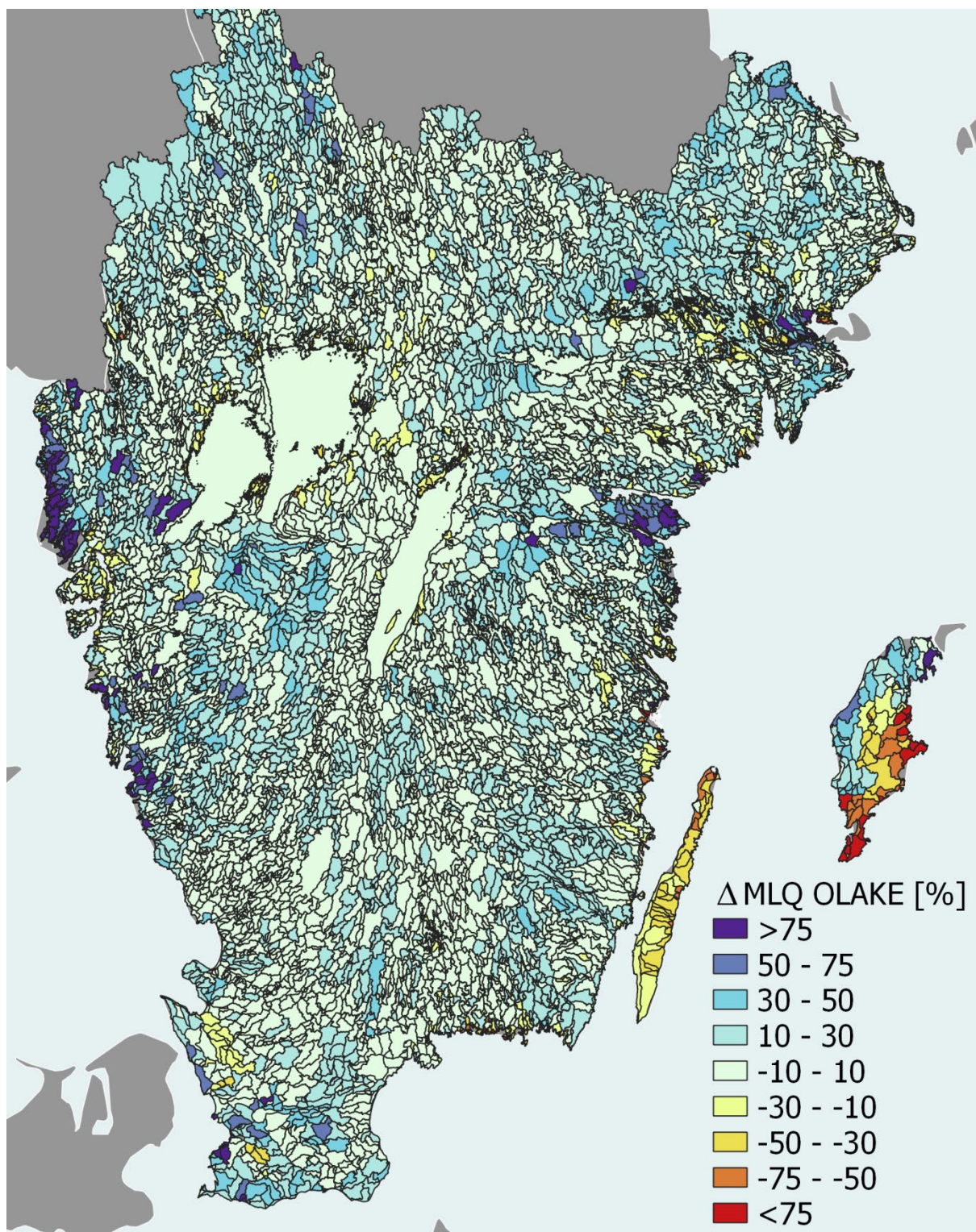
Sammanfattningsvis är det framförallt vädret och klimatet som avgör vattenflödet. Att det var så torrt åren 2016-2018 beror främst på att det regnade så lite. Effekterna av torrperioder kan mildras genom att man sparar vatten i till exempel sjöar eller dammar.

15 Referenser

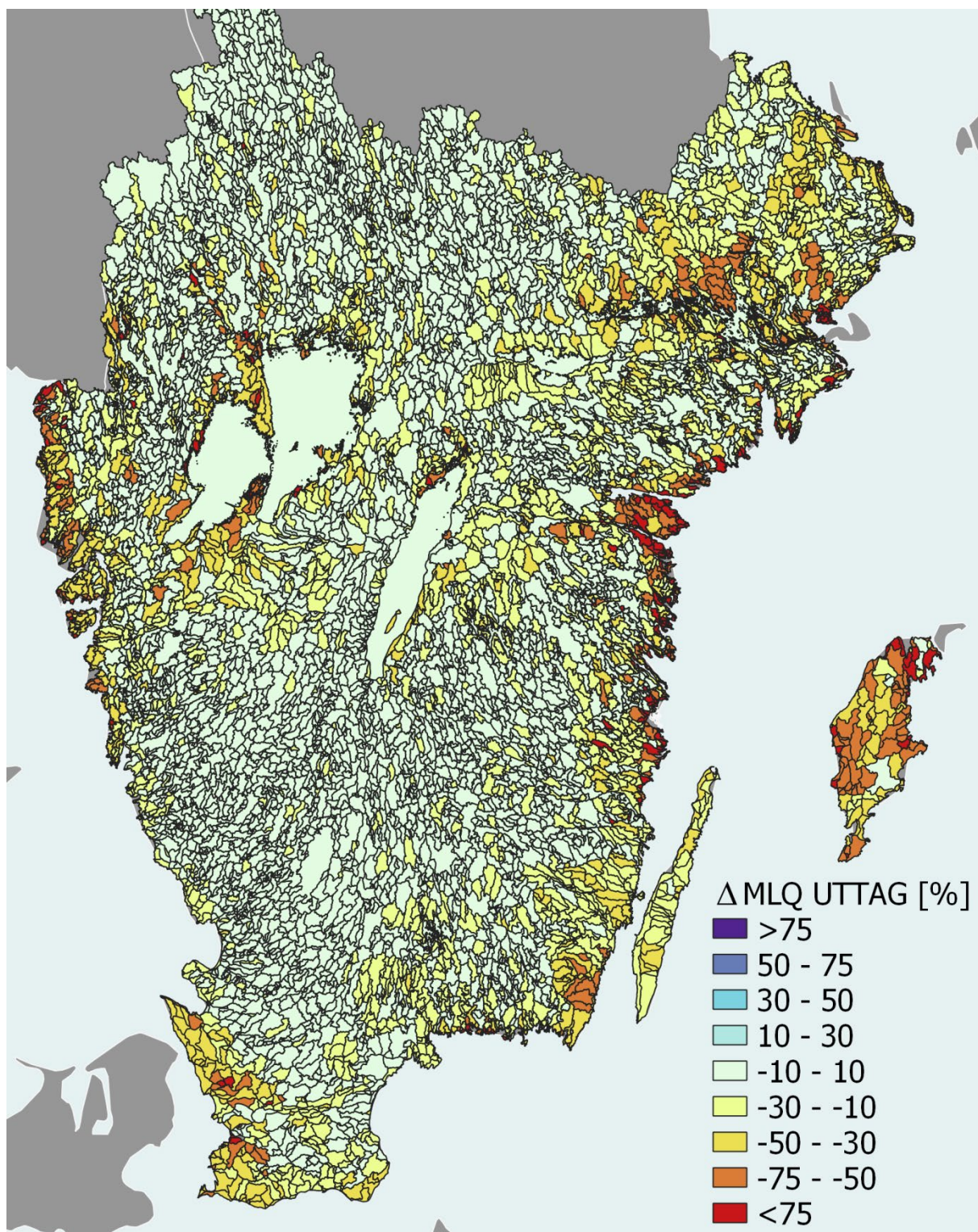
- Arheimer, B., Lindström, G. & Olsson, J. (2011) A systematic review of sensitivities in the Swedish flood-forecasting system. *Atmospheric Research* 100 (2011) 275–284. doi:10.1016/j.atmosres.2010.09.013
- Bergström, S. (1990) Parametervärden för HBV-modellen i Sverige. Erfarenheter från modellkalibreringar under perioden 1975-1989. SMHI, Rapport Hydrologi Nr 28.
- Brandt, M., Bergström, S. & Gardelin, M. (1988) Modelling the effects of clearcutting on runoff - Examples from Central Sweden. *Ambio*, 17, 5: 307-313.
- Carlsson, B. & Lindström, G. (2001) HBV-modellen och flödesprognoser. SMHI Hydrologi Nr 85, 2001.
- Charpentier Ljungqvist, F., Seim, A., Krusic, P.J., González-Rouco, J.F., Werner, J.P., Cook, E.R., Zorita, E., Luterbacher, J., Xoplaki, E., Destouni G., García-Bustamante, E., Melo Aguilar, C.A., Seftigen, K., Wang, J., Gagen, M.H., Esper, J., Solomina, O., Fleitmann, D. & Büntgen, U. (2019) European warm-season temperature and hydroclimate since 850 CE *Environmental Research Letters*, Volume 14, Number 8.
- Eriksson, B., Johansson, B., Losjö, K. & Vedin, H. (1987) Skogsskador - klimat. SMHI Rapport Hydrologi Nr 17.
- Grimvall, A., von Brömssen, C. & Lindström, G. (2014) Using process-based models to filter out natural variability in observed concentrations of nitrogen and phosphorus in river water. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186:5135-5152. doi: 10.1007/s10661-014-3765-y.
- Hellström, S. & Lindström, G. (2008) Regional analys av klimat, vattentillgång och höga flöden. SMHI Rapport Hydrologi nr 110.
- Hisdal, H., Stahl, K., Tallaksen, L.M. & Demuth, S. (2001) Have streamflow droughts in Europe become more severe or frequent? *International Journal of Climatology*, Vol. 21, pp. 317-333.
- Johansson, B. (1993) Modelling the effects of wetland drainage on high flows. SMHI RH No. 8.
- Lindström, G. (2016) Lake water levels for calibration of the S-HYPE model. *Hydrology Research* 47, 4, pp. 672-682. doi: 10.2166/nh.2016.019.
- Lindström, G., Bartosova, A., Hjerdt, N. & Strömqvist, J. (2018) Upphållstider i ytvatten i relation till vattenkvalitet - NET, ett generellt uppskalningsverktyg. SMHI Rapport Hydrologi Nr. 119. ISSN 0283-7722.
- Lindström, G., Gardelin, M. & Persson, M. (1994) Conceptual modelling of evapotranspiration for simulations of climate change effects. SMHI RH No. 10.
- Lindström, G., Pers, C., Rosberg, J., Strömqvist, J. & Arheimer, B. (2010) Development and testing of the HYPE (Hydrological Predictions for the Environment) water quality model for different spatial scales. *Hydrology Research* 41.3–4, 295-319.
- Nash, J.E. & Sutcliffe, J.V. (1970) River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, Vol. 10(3), pp. 282-290.
- Rodhe, A., Lindström, G. Rosberg, J. & Pers, C. (2006) Grundvattenbildning i svenska typjordar – översiktlig beräkning med en vattenbalansmodell. Uppsala Universitet, Institutionen för geovetenskaper, Luft- och vattenlära. Report Series A No. 66.
- Stensen, K., Matti, M., Rasmusson, K. & Hjerdt, N. (2019) Modellstudie för att undersöka åtgärder som påverkar lågflöden – Delrapport 2 i regeringsuppdrag om åtgärder för att motverka vattenbrist i ytvattentäcker. SMHI Rapport Hydrologi 121.

Strömqvist, J., Arheimer, B., Dahné, J., Donnelly, C. & Lindström, G. (2012) Water and nutrient predictions in ungauged basins: set-up and evaluation of a model at the national scale, *Hydrological Sciences Journal*, 57:2, 229-247.

16 Appendix



Effekt (i %) på lågflödesmättet MLQ som scenariot OLAKE har enligt simuleringarna med S-HYPE. Scenariot innebär att andelen sjö ökas med 1 procentenhet i alla områden, vid utloppet av varje delområde.



Effekt (i %) på låglödesmättet MLQ som scenariot dricksvattenuttag har enligt simuleringarna med S-HYPE. Scenariot innebär ett ökat vattenuttag med 150 liter/person/dygn med en befolkningstäthet

SMHI Publikationer

SMHI publicerar sju rapportserier. Tre av dessa, R-serierna är avsedda för internationella läsare och skrivs oftast på Engelska. I de övriga serierna används oftast Svenska men även Engelska.

Seriernas namn	Publiceras sedan
RMK (Report Meteorology and Climatology)	1974
RH (Report Hydrology)	1990
RO (Report Oceanography)	1986
METEOROLOGI	1985
HYDROLOGI	1985
OCEANOGRAFI	1985
KLIMATOLOGI	2009

I serien HYDROLOGI har tidigare utgivits:

1. Bengt Carlsson (1985)
Hydrokemiska data från de svenska
fältforskningsområdena
2. Martin Häggström och Magnus Persson
(1986)
Utvärdering av 1985 års vårflödesprognoser
3. Sten Bergström, Ulf Ehlin, SMHI, och Per-
Eric Ohlsson, VASO (1986)
Riktlinjer och praxis vid dimensionering av
utskov och dammar i USA. Rapport från en
studieresa i oktober 1985
4. Barbro Johansson, Erland Bergstrand och
Torbjörn Jutman (1986)
Skåneprojektet - Hydrologisk och
oceanografisk information för
vattenplanering - Ett pilotprojekt
5. Martin Häggström (1986)
Översiktlig sammanställning av den
geografiska fördelningen av skador främst på
dammar i samband med septemberflödet
1985
6. Barbro Johansson (1986)
Vattenföringsberäkningar i Södermanlands
län - ett försöksprojekt
7. Maja Brandt (1986)
Areella snöstudier
8. Bengt Carlsson, Sten Bergström, Maja
Brandt och Göran Lindström (1987)
PULS-modellen: Struktur och tillämpningar
9. Lennart Funkquist (1987)
Numerisk beräkning av vågor i
kraftverksdammar
10. Barbro Johansson, Magnus Persson,
Enrique Aranibar and Robert Llobet (1987)
Application of the HBV model to Bolivian
basins
11. Cecilia Ambjörn, Enrique Aranibar and
Roberto Llobet (1987)
Monthly streamflow simulation in
Bolivian basins with a stochastic model
12. Kurt Ehlert, Torbjörn Lindkvist och Todor
Milanov (1987)
De svenska huvudvattendragens namn och
mynningspunkter
13. Göran Lindström (1987)
Analys av avrinningsserier för uppskattning
av effektivt regn
14. Maja Brandt, Sten Bergström, Marie
Gardelin och Göran Lindström (1987)
Modellberäkning av extrem effektiv
nederbörd
15. Håkan Danielsson och Torbjörn Lindkvist
(1987)
Sjökarte- och sjöuppgifter. Register 1987
16. Martin Häggström och Magnus Persson
(1987)
Utvärdering av 1986 års vårflödesprognoser

17. Bertil Eriksson, Barbro Johansson, Katarina Losjö och Haldo Vedin (1987)
Skogsskador – klimat
18. Maja Brandt (1987)
Bestämning av optimalt klimatstationsnät för hydrologiska prognoser
19. Martin Häggström och Magnus Persson (1988)
Utvärdering av 1987 års vårflödesprognoser
20. Todor Milanov (1988)
Frysförluster av vatten
21. Martin Häggström, Göran Lindström, Luz Amelia Sandoval and Maria Elvira Vega (1988)
Application of the HBV model to the upper Río Cauca basin
22. Mats Moberg och Maja Brandt (1988)
Snökartläggning med satellitdata i Kultsjöns avrinningsområde
23. Martin Gotthardsson och Sten Lindell (1989)
Hydrologiska stationsnät 1989. Svenskt Vattenarkiv
24. Martin Häggström, Göran Lindström, Luz Amelia Sandoval y Maria Elvira Vega (1989)
Aplicacion del modelo HBV a la cuenca superior del Río Cauca
25. Gun Zachrisson (1989)
Svåra islossningar i Torneälven. Förslag till skadeförebyggande åtgärder
26. Martin Häggström (1989)
Anpassning av HBV-modellen till Torneälven
27. Martin Häggström and Göran Lindström (1990)
Application of the HBV model for flood forecasting in six Central American rivers
28. Sten Bergström (1990)
Parametervärden för HBV-modellen i Sverige. Erfarenheter från modellkalibreringar under perioden 1975 – 1989
29. Urban Svensson och Ingemar Holmström (1990)
Spridningsstudier i Glan
30. Torbjörn Jutman (1991)
Analys av avrinningens trender i Sverige
31. Mercedes Rodriguez, Barbro Johansson, Göran Lindström, Eduardo Planos y Alfredo Remont (1991)
Aplicacion del modelo HBV a la cuenca del Río Cauto en Cuba
32. Erik Arnér (1991)
Simulering av vårflöden med HBV-modellen
33. Maja Brandt (1991)
Snömätning med georadar och snötaxeringar i övre Luleälven
34. Bent Göransson, Maja Brandt och Hans Bertil Wittgren (1991)
Markläckage och vattendragstransport av kväve och fosfor i Roxen/Glan-systemet, Östergötland
35. Ulf Ehlin och Per-Eric Ohlsson, VASO (1991)
Utbyggd hydrologisk prognos- och varningstjänst.
Rapport från studieresa i USA
1991-04-22—30
36. Martin Gotthardsson, Pia Rystam och Sven-Erik Westman (1992)
Hydrologiska stationsnät 1992/Hydrological network. Svenskt Vattenarkiv
37. Maja Brandt (1992)
Skogens inverkan på vattenbalansen

38. Joakim Harlin, Göran Lindström, Mikael Sundby (SMHI) och Claes-Olof Brandesten (Vattenfall Hydropower AB) (1992)
Känslighetsanalys av Flödeskommitténs riktlinjer för dimensionering av hel älv
39. Sten Lindell (1993)
Realtidsbestämning av arealnederbörd
40. Svenskt Vattenarkiv (1995)
Vattenföring i Sverige. Del 1. Vattendrag till Bottenviken.
41. Svenskt Vattenarkiv (1995)
Vattenföring i Sverige. Del 2. Vattendrag till Bottenhavet.
42. Svenskt Vattenarkiv (1993)
Vattenföring i Sverige. Del 3. Vattendrag till Egentliga Östersjön
43. Svenskt Vattenarkiv (1994)
Martin Vattenföring i Sverige. Del 4. Vattendrag till Västerhavet
44. Martin Häggström och Jörgen Sahlberg (1993)
Analys av snösmältningförlopp
45. Magnus Persson (1993)
Utnyttjande av temperaturens persistens vid beräkning av volymsprognoser med HBV-modellen
46. Göran Lindström, Joakim Harlin och Judith Olofsson (1993)
Uppföljning av Flödeskommitténs riktlinjer
47. Bengt Carlsson (1993)
Alkalinitets- och pH-förändringar i Ume-älven orsakade av minimitappning
48. Håkan Sanner, Joakim Harlin and Magnus Persson (1994)
Application of the HBV model to the Upper Indus River for inflow forecasting to the Tarbela dam
49. Maja Torbjörn Jutman och Hans Alexandersson Brandt, (1994)
Sveriges vattenbalans. Årsmedelvärden 1961 - 1990 av nederbörd, avdunstning och avrinning
50. Svenskt Vattenarkiv (1994)
Avrinningsområden i Sverige. Del 3. Vattendrag till Egentliga Östersjön och Öresund
51. Martin Gotthardsson (1994)
Svenskt Vattenarkiv.
Översvämningskänsliga områden i Sverige
52. Åsa Evremar (1994)
Avdunstningens höjdberoende i svenska fjällområden bestämd ur vattenbalans och med modellering
53. Magnus Edström och Pia Rystam (1994)
FFO - Stationsnät för fältforskningsområden 1994
54. Zhang Xingnan (1994)
A comparative study of the HBV model and development of an automatic calibration scheme
55. Svenskt Vattenarkiv (1994)
Svenskt dammregister - Södra Sverige
56. Svenskt Vattenarkiv (1995)
Svenskt dammregister - Norra Sverige
57. Martin Häggström (1994)
Snökartering i svenska fjällområdet med NOAA-satellitbilder
58. Hans Bertil Wittgren (1995)
Kvävetransport till Slätbaken från Söderköpingsåns avrinningsområde
59. Ola Pettersson (1995)
Vattenbalans för fältforskningsområden.
60. Barbro Johansson, Katarina Losjö, Nils Sjödin, Remigio Chikwanha and Joseph Merka (1995)
Assessment of surface water resources in the Manyame catchment - Zimbabwe

61. Behzad Kouchehi (1995)
Älvtemperaturers variationer i Sverige under en tioårsperiod
62. Svenskt Vattenarkiv (1995)
Sänkta och torrlagda sjöar
63. Malin Kanth (1995)
Hydrokemi i fältforskningsområden
64. Mikael Sundby, Rikard Lidén, Nils Sjödin, Helmer Rodriguez, Enrique Aranibar (1995)
Hydrometeorological Monitoring and Modelling for Water Resources Development and Hydropower Optimisation in Bolivia
65. Maja Brandt, Kurt Ehlert (1996)
Avrinningen från Sverige till omgivande hav
66. Sten Lindell, Håkan Sanner, Irena Nikolushkina, Inita Stikute (1996)
Application of the integrated hydrological modelling system IHMS-HBV to pilot basin in Latvia
67. Sten Lindell, Bengt Carlsson, Håkan Sanner, Alvina Reihan, Rimma Vedom (1996)
Application of the integrated hydrological modelling system IHMS-HBV to pilot basin in Estonia
68. Sara Larsson, Rikard Lidén (1996)
Stationstäthet och hydrologiska prognoser
69. Maja Brandt (1996)
Sedimenttransport i svenska vattendrag exempel från 1967-1994
70. Svenskt Vattenarkiv (1996)
Avrinningsområden i Sverige. Del 4. Vattendrag till Västerhavet
71. Svenskt Vattenarkiv (1996)
Svenskt sjöregister. 2 delar
72. Sten Lindell, Lars O Ericsson, Håkan Sanner, Karin Göransson SMHI Malgorzata Mierkiewicz, Andrzej Kadlubowski, IMGW (1997)
Integrated Hydrological Monitoring and Forecasting System for the Vistula River Basin. Final report
73. Maja Brandt, Gun Grahn (1998)
Avdunstning och avrinningskoefficient i Sverige 1961-1990. Beräkningar med HBV-modellen
74. Anna Eklund (1998)
Vattentemperaturer i sjöar, sommar och vinter - resultat från SMHIs mätningar
75. Barbro Johansson, Magnus Edström, Katarina Losjö och Sten Bergström (1998)
Analys och beräkning av snösmältningsförlopp
76. Anna Eklund (1998)
Istjocklek på sjöar.
77. Björn Bringfelt (1998)
An evapotranspiration model using SYNOP weather observations in the Penman-Monteith equation
78. Svenskt Vattenarkiv (1998)
Avrinningsområden i Sverige. Del 2 Vattendrag till Bottenhavet
79. Maja Brandt, Anna Eklund (1999)
Snöns vatteninnehåll Modellberäkningar och statistik för Sverige
80. Bengt Carlsson (1999)
Some facts about the Torne and Kalix River Basins. A contribution to the NEWBALTIC II workshop in Abisko June 1999
81. Anna Eklund (1999)
Isläggning och islossning i svenska sjöar
82. Svenskt Vattenarkiv (2000)
Avrinningsområden i Sverige. Del 1. Vattendrag till Bottenviken

83. Anna Eklund, Marie Gardelin, Anders Lindroth (2000)
Vinteravdunstning i HBV-modellen - jämförelse med mätdata
84. Göran Lindström, Mikael Ottosson Löfvenius (2000)
Tjäle och avrinning i Svartberget – studier med HBV-modellen
85. Bengt Carlsson och Göran Lindström (2001)
HBV-modellen och flödesprognoser
86. Josef Källgården (2001)
Snow distribution in a mountainous region. A remote sensing study
87. Johan Andréasson, Anders Gyllander, Barbro Johansson, Josef Källgården, Sten Lindell, Judith Olofsson, Angela Lundberg (2001)
Snötaxering med georadar - Bättre vårflödesprognoser med HBV-modellen?
88. Deliang Chen, Barbro Johansson (2003)
Temperaturens höjdberoende – En studie i Indalsälvens avrinningsområde
89. Agne Lärke, Håkan Sanner, Anna Johnell (2003)
Utvärdering av SMHI:s prognos- och varningstjänsts verksamhet under flödena januari t o m mars 2002 i sydvästra Sverige
90. Johan Jansson (2003)
Satellite data on snow cover in the HBV model. Method development and evaluation
91. Charlotta Pers (2003)
BIOLA – BIOgeochemical LAke Model Manual
92. Carl Granström (2003)
Utvärdering av SMHI:s prognos- och varningstjänsts verksamhet under flödet i området runt Emån juli 2003
93. Carl Granström (2003)
Modell för prognos av tidpunkt och karaktär för islossningen i Torne älv
94. Maja Brandt och Gun Grahn, SMHI. Erik Årnfelt och Niclas Bäckman, Länsstyrelsen Östergötland (2004)
Anpassning av TRK-systemet från nationell till regional nivå samt scenarieräkningar för kväve – Tester för Motala Ström
95. Carl Granström (2004)
Utvärdering av SMHI:s hydrologiska prognos- och varningstjänst under flödet i södra Lappland juli 2004
96. Carl Granström (2004)
Utvärdering av SMHI:s hydrologiska prognos- och varningstjänst under flödet i Småland juli 2004
97. Carl Granström (2004)
Utvärdering av SMHI:s hydrologiska prognos- och varningstjänst under flödet i nordvästra Lappland juli 2004
98. Tahsin Yacoub, Ylwa Westman, Håkan Sanner, Bernth Samuelsson (2005)
Detaljerad översvämningskarta för Eskilstunaån. Ett projekt inom KRIS-GIS
99. Carl Granström (2005)
Utvärdering av SMHI:s hydrologiska prognos- och varningstjänst under vårfloden i fjällen juni 2005
100. Tahsin Yacoub, Håkan Sanner (2006)
Vattenståndsprognoser baserade på översiktlig kartering. En fallstudie
101. Göran Lindström (2006)
Regional kalibrering av HBV-modellen
102. Kurt Ehlert (2006)
Svenskt Vattendragsregister
103. Charlotta Pers (2007)
HBV-NP Model Manual
104. Barbro Johansson, Göran Lindström, Jonas Olsson, Tahsin Yacoub, Günter Haase, Karin Jacobsson, Anna Johnell, Håkan Sanner (2007)
Översvämningsprognoser i områden med ofullständiga data. Metodutveckling och utvärdering

105. Carl Granström, Anna Johnell, Martin Häggström (2007)
Utvärdering av SMHIs hydrologiska prognos- och varningstjänst under höga flöden i sydvästra Sverige - nov 2006 till jan 2007
106. Johan Andréasson, Sara-Sofia Hellström, Jörgen Rosberg, Sten Bergström (2007)
Översiktlig kartpresentation av klimatförändringars påverkan på Sveriges vattentillgång - Underlag till Klimat- och sårbarhetsutredningen
107. Berit Arheimer, Charlotta Pers (2007)
Kväveretention i svenska sjöar och vattendrag – betydelse för utsläpp från reningsverk
108. Calle Granström, Martin Häggström, Sten Lindell, Judith Olofsson, Anna Eklund (2007)
Utvärdering av SMHIs hydrologiska prognos- och varningstjänst under höga flöden i Götaland – juni och juli 2007
109. Niclas Hjerdt, Markus Andersén, Christer Jonsson och Dan Eklund (2007)
Hydraulik i Klarälvens torrfåra vid tappningar från Höljes kraftverksdamm
110. Sara-Sofia Hellström, Göran Lindström (2008)
Regional analys av klimat, vattentillgång och höga flöden
111. Calle Granström, Linda Gren, Magdalena Dahlin, Sara-Sofia Hellström (2008)
Utvärdering av SMHIs hydrologiska prognos- och varningstjänst under höga flöden under vårfloden 2008
112. Gitte Berglöv, Jonas German, Hanna Gustavsson, Ulrika Harbman, Barbro Johansson (2009)
Improvement HBV model Rhine in FEWS. Final report
113. Katarina Norén, Carl Granström, Roger Eriksson (2010)
Utvärdering av SMHIs hydrologiska prognos- och varningstjänst under vårfloden i södra Sverige 2010
114. Katarine Norén, Carl Granström, Roger Eriksson (2010)
Utvärdering av SMHIs hydrologiska prognos- och varningstjänst under vårfloden i Norrland 2010
115. Gunn Persson, Sara-Sofia Asp, Karin Dyrestam, Dan Eklund, Anders Gyllander, Kristoffer Hallberg, Anna Johnell, Yacoub Tahsin och Else-Marie Wingqvist (2011)
Detaljerad översvämningsskartering av nedre Torneälven
116. Jonas Olsson, Johan Södling, Fredrik Wetterhall (2011)
Högupplösta nederbördsdata för hydrologisk modellering: en förstudie
117. Sven Fremling, Thore Karlin, Birgitta Raab, Eva Edquist, Anna Eklund (2012)
Is på sjöar och älvar
118. Gunn Persson (2011)
Islossning i Torneälven
119. Göran Lindström, Alena Bartosova, Niclas Hjerdt och Johan Strömqvist (2017)
Uppehållstider i ytvatten i relation till vattenkvalitet -NET, ett generellt uppskalningsverktyg
120. Katarina Stensen, Aino Krunegård, Kristina Rasmusson, Bettina Matti, Niclas Hjerdt (2019)
Sveriges vattentillgång utifrån perspektivet vattenbrist och torka – Delrapport 1 i regeringsuppdrag om åtgärder för att motverka vattenbrist i ytvattentäkter. (Ej publicerad)
121. Katarina Stensen, Bettina Matti, Kristina Rasmusson, Niclas Hjerdt (2019)
Modellstudie för att undersöka åtgärder som påverkar lågflöden – Delrapport 2 i regeringsuppdrag om åtgärder för att motverka vattenbrist i ytvattentäkter. (Ej publicerad)

Denna sida är avsiktligt blank

SMHI

Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut
601 76 NORRKÖPING
Tel 011-495 80 00 Fax 011-495 80 01

ISSN 0283-7722