

# EviWet: Evidensbaserat beslutsstöd för våtmarkers hydrologiska ekosystemtjänster

Kevin Bishop, Niclas Hjerdt,  
Reinert Huseby-Karlsen,  
Kristina Isberg, Göran Lindström,  
Jelmer Nijp, Charlotta Pers,  
Sara Schützer, Johan Strömqvist,  
Johan Temnerud, Claudia Teutschbein

RAPPORT 7144 | APRIL 2024



# EviWet: Evidensbaserat beslutsstöd för våtmarkers hydrologiska ekosystemtjänster

av Kevin Bishop, Niclas Hjerdt, Reinert Huseby-Karlsen, Kristina Isberg,  
Göran Lindström, Jelmer Nijp, Charlotta Pers, Sara Schützer, Johan Strömqvist,  
Johan Temnerud och Claudia Teutschbein

**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](http://www.naturvardsverket.se/publikationer)

**Naturvårdsverket**

Tel: 010-698 10 00

E-post: [registrator@naturvardsverket.se](mailto:registrator@naturvardsverket.se)

Postadress: Naturvårdsverket, SE-106 48 Stockholm

Internet: [www.naturvardsverket.se](http://www.naturvardsverket.se)

ISBN 978-91-620-7144-8

ISSN 0282-7298

© Naturvårdsverket 2024

Tryck: Arkitektkopia AB, Bromma 2024

Omslagsfoto: B. Abbott



# Förord

Här presenteras resultaten från forskningsprojektet ”Ewiwet: Evidensbaserat beslutsstöd för våtmarkers hydrologiska ekosystemtjänster”. Projektet är ett av åtta projekt som genomförts inom forskningssatsningen Våtmarkers ekosystemtjänster.

Med forskningsområdet ville Naturvårdsverket och Formas stödja forskning som kunde stärka möjligheterna att på bästa sätt restaurera och anlägga våtmarker i landskapet för att skapa så stor nytta som möjligt för ekosystemen. Projektet har finansierats med medel från Formas men har administrerats av Naturvårdsverket.

Rapporten har skrivits av Kevin Bishop (Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för vatten och miljö), Niclas Hjerdt (SMHI, Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut), Reinert Huseby-Karlsen (Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för vatten och miljö), Kristina Isberg (SMHI, Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut), Göran Lindström (SMHI, Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut), Jelmer Nijp (KWR Water Research Institute), Charlotta Pers (SMHI, Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut), Sara Schützer, Johan Strömqvist (SMHI, Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut), Johan Temnerud (SMHI, Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut) och Claudia Teutschbein (Uppsala universitet, Institutionen för geovetenskaper).

Rapporten har granskats för vetenskaplig kvalitet av Jerker Jarsjö (Stockholms universitet) samt för praktisk relevans av Karin Glaumann Andersson (Naturvårdsverket).

Författarna svarar för rapportens innehåll.

Stockholm i april 2024

Marie Uhrwing  
Avdelningschef, Hållbarhetsavdelningen

# Innehåll

<b>Sammanfattning</b>	5
<b>Summary</b>	7
<b>1. Inledning</b>	9
<b>2. Metod</b>	14
2.1 FF1 – Hur förändrar våtmarker mängden och tidpunkten för avrinning i jämförelse med skogsmark?	14
2.1.1 Evapotranspiration och hantering av dataluckor	16
2.1.2 Uppskattningar av vattenbalans och dynamisk lagring	17
2.1.3 Flödestillfälle-baserade analyser	17
2.1.4 Torvvolymförändringar	18
2.2 FF2 – Hur ska torvmarks hydrologiska funktioner simuleras under framtida klimatscenarier?	19
2.3 FF3 Hur kan de specifika frågorna kring våtmarksförvaltning hanteras i ett beslutsstödsverktyg?	21
2.3.1 YtSim beslutstöd utvecklingen i samarbete med referensgrupp	21
2.3.2 Operationell modellering med S-Hype	22
<b>3. Resultat</b>	27
3.1 FF1 – Hur förändrar våtmarker mängden och tidpunkten för avrinning i jämförelse med skogsmark?	27
3.1.1 Årliga vattenbalansanalyser	27
3.1.2 Analys av flödestillfällena (runoff episodes på engelska)	30
3.1.3 Mättningar av torvens lagringselasticitet	33
3.2 FF2 – Hur ska torvmarks hydrologiska funktioner simuleras under framtida klimatscenarier?	34
3.3 FF3 Hur kan de specifika frågorna kring våtmarksförvaltning hanteras i ett beslutsstödsverktyg?	37
3.3.1 YtSim beslutstöd utvecklingen i samarbete med referensgrupp	37
3.3.2 Operationell modellering med S-Hype	42
<b>4. Diskussion</b>	51
4.1 FF1 – Hur förändrar våtmarker mängden och tidpunkten för avrinning i jämförelse med skogsmark?	51
4.2 FF2 – Hur ska torvmarks hydrologiska funktioner simuleras under framtida klimatscenarier?	52
4.3 FF3 – Hur kan de specifika frågorna kring våtmarksförvaltning hanteras i ett beslutsstödsverktyg?	53
<b>5. Slutsatser och förslag</b>	54
<b>6. Tack</b>	56
<b>7. Källhänvisning</b>	57
<b>Bilaga 1: Vattenbalansdata och flödesberäkningar</b>	60
<b>Bilaga 2: Ordlista</b>	63

# Sammanfattning

Antaganden om att våtmarker dämpar extrema hög- och lågflöden används ofta för att motivera restaurering och anläggning av våtmarker som klimatanpassningsåtgärd. Den egentliga förmågan hos våtmarker att dämpa extremflöden beror till stor del på våtmarkers hydrologiska egenskaper i relation till klimat och placering i landskapet, men kunskaperna kring dessa samband är fortfarande bristfällig. Denna kunskapsbrist förhindrar dagens våtmarkssatsningar från att nå sin fulla kapacitet och tillgodoräkna sig de hydrologiska ekosystemtjänster som våtmarker kan leverera.

Kunskapsbristen beror delvis på att hydrologiska data från våtmarker är sällsynta. I detta projekt har nya mätningar från våtmarker karakteriserat våtmarkers vattenbalans i jämförelse med minerogena skogsmark för att bestämma hur våtmarker mellanlagrar vatten som flödar genom landskapet. EviWet studerade två sorts våtmarker: odikad torvmark i skogslandskap, och anlagda våtmarker med vattenspegel i jordbrukslandskap. En ny, konceptuell modell har skapats och använts för att undersöka hur olika ostörd (icke dikad) torvmark mellanlagrar vatten som flödar genom skogslandskapet. För anlagda våtmarker har ett befintligt scenarioverktyg för beräkning av åtgärdseffekter, YtSim, vidareutvecklats, också med hjälp av nya data.

Jämförelse av högupplösta vattenbalansdata har visat skillnader i avrinning mellan torvmark och skogsmark. En ökad torvareal sänker och fördröjer flödestoppar något, men perioden med höga flödena förlängs, delvis på grund av minskad evapotranspiration. Torvmarkernas förmåga att ändra sin vattenlagringskapacitet genom att expandera och krympa vertikalt bidrar till att torvmarker dämpar höga och låga flöden. Skillnaderna är dock mindre vid extrema flödestoppar när våtmarken redan hade en stor andel vatten. Vid de högsta flödesnivåerna som observerades under vårfloden höll torvmarkerna bara tillbaka några procent mer av det extra vatten som tillfördes avrinningsområdet jämfört med skogsmark. Förhållandena efter en längre sommartorka, då våtmarkens vattennivå inte är lika hög och den således har större kapacitet för ett upptag efter ett skyfall har inte undersökts. Ytterligare arbete behövs för att se hur viktiga torvmarker är för översvämningsskydd längre nedströms.

Den konceptuella modelleringen identifierade faktorer inom torvens ekohydrologi som bidrar till de observerade skillnaderna. Graden av skillnad är inte tillräckligt stor för att motivera ändringar i strukturen i den operationella hydrologiska modellen S-Hype. Projektet har också tagit fram ett verktyg för beslutsstöd i nära dialog med våtmarksförvaltare. Verktyget, YtSim, ökar möjligheten för kommuner, länsstyrelser och andra aktörer att utvärdera våtmarksprojekt i planeringen av projekt som ska skapa anlagda våtmarker (vattenspeglar).

Sammanfattningsvis kan sägas att den ekohydrologiska funktionaliteten av intakta (dvs icke dränerade) torvmarker i skogslandskapet påverkar vattenflödet. Men det inte är dämpningen av de mest extrema flödena där torvmarkerna har störst inflytande, utan det är den rutinmässiga "pulsen" av vatten genom landskapet. Torvmarker påverkar flöden något under hela året. Detta är förvisso av ekologisk betydelse, men kanske inte den reglering av översvämning/torka som man vanligtvis tänker på när det gäller torvmarker/våtmarker.

När det gäller den totala effekten av torvmarker i skogslandskapet kommer det att vara viktigt att sluta tänka på torvmark och skogsmark som separata komponenter i landskapet. Vi måste bättre förstå hur torvmarker påverkar grundvattnet i närliggande skogsmarker. Dessutom måste effekten av dränering och återvätning på torvmarkernas hydrologi kvantifieras. Högupplösta vattenbalansmätningar kommer att vara av stort värde och bör uppmuntras, med tanke på intresset för en bättre förståelse av torvmarkernas hydrologi när klimatet blir varmare.

# Summary

The capacity of wetlands to moderate extremes of flood and drought is an important rationale for including wetland restoration and construction in major climate adaptation investments. The success of such investments depends to a large extent on predicting the hydrological function of wetlands. The hydrological function of wetlands in Swedish landscapes, however, is not well characterized. Until this knowledge gap is rectified, it will undermine efforts to make effective use of the hydrological ecosystem services that wetlands can deliver.

Part of the knowledge gap is due to the shortage of relevant hydrological data from wetlands. In this project, new measurements from wetlands have characterized wetland water balance in comparison to minerogenic forest soils to determine how wetlands temporarily store water flowing through the landscape. A new, conceptual model has since been created and used to investigate how different undisturbed peatlands store water flowing through the forest landscape.

Comparison of comprehensive water balance data has shown differences in the runoff regimes from peatland and forest soils. Increased peat area reduces evapotranspiration and the length of stormflow events lengthens, which contributes to lowering and delaying flow peaks. The ability of peatlands to change their water storage capacity by expanding and contracting vertically contributes to the way peatlands moderate high and low flows. The differences between peatlands and forested areas, however, are less in extreme flow peaks. At the highest flow levels observed during spring flood, peatlands held back only a few percent more of the additional water added to the catchment during the peak flows. Further work on downstream flow routing is needed to see how significant peatlands are for flood protection at larger scales.

The conceptual modelling identified factors in peat ecohydrology that contribute to the observed differences. The degree of difference, however, is not of the kind that indicates the need to change the structure of the operational hydrological model S-Hype. The project has also developed a tool for decision support, YtSim, in close dialogue with wetland administrators. The tool increases the ability of municipalities, county administrative boards and other actors to evaluate wetland projects in the planning stage that create water mirrors.

In summary, intact peatlands in the forest landscape do affect the flow of water with ecohydrological functionality that is missing in minerogenic soils. But it may not be the damping of the most extreme events where peatlands have the greatest influence, instead it may be on the routine “pulse” of water through the landscape where peatlands have their greatest hydrological effect. Peatlands shape the peaks and timing of flow events across the full range of flows observed during the course of a year. This is certainly of ecological importance, but possibly not the flood/drought regulation usually thought of with regard to peatlands/wetlands. (NB this study focused on intact peatlands in the forest landscape. These are different than the small “vattenspegel” in the agricultural landscape which the preponderance of wetland restoration and creation has focused on prior to 2020.)

With respect to the overall effect of peatlands in the forest landscape, it will be important to move beyond thinking of peatland and forest soils as separate



components in the landscape. How peatlands affect groundwater in nearby forestlands also needs defined. Furthermore, the effect of drainage and rewetting on the hydrological function of peatlands needs to be quantified. High-resolution water balance measurements will be of great value and should be encouraged, given the interest in a better understanding of peatland hydrology as the climate warms.

# 1. Inledning

Antaganden om att våtmarker dämpar extrema hög- och lågflöden används ofta som en del av motivering för restaurering av torvmarker i skogslandskap och anläggning av våtmarker i jordbrukslandskap (e.g. LOVA Lokala vattenvårdsprojekt). Framgången för sådana investeringar beror till stor del på förutsägelser om våtmarkernas hydrologiska funktion i olika topografiska miljöer under det kommande århundradets klimat. Den egentliga förmågan hos våtmarker att dämpa extremflöden beror till stor del på våtmarkers hydrologiska egenskaper i relation till klimat och placering i landskapet, men kunskaperna kring dessa samband är fortfarande bristfällig (Naturvårdsverket, 2017).

Svenska våtmarker är i allmänhet torvmarker, byggda till stor del av mossor. Dessa behåller och släpper vatten annorlunda än mineraljordar på grund av torvens ekofysiologi som snabbt ändrar dess struktur, volym och vattenhållande förmåga som svar på nederbördstillgångar. (Acreman et al., 2007). De kortsiktiga förändringarna av torven som svar på fuktförhållanden är snabba (dagar till månader) och reversibla, men generellt olinjära (Waddington et al., 2015). På grund av dessa specifika egenskaper och torvmarkens "levande" karaktär har de upprepade gånger rapporterats vara kapabla att erbjuda flera ekosystemtjänster (till exempel Naturvårdsverket, 2009). Biologisk mångfald, vattenkvalitet, kollagring, påfyllning av grundvatten och begränsning av flödesextremer är några exempel på dessa tjänster. Anlagda våtmarker har inte nödvändigtvis torvsubstrat, men kan också uppnå viktiga ekosystemtjänster (Land et al., 2016). Storskalig återställande av våtmarker (både anläggning av våtmarker (vattenspeglar) i jordbrukslandskap och blockering av diken i skogslandskap kommer att ge snabba initiala svar (Richardson et al., 2011; Bufkova, Stíbal och Mikulášová, 2011). Återhämtningen av hydrologisk funktion som i en ostörd torvmark kommer tar mycket längre tid (McCarter och Price, 2013). När det gäller restaurering av torvtäkterna kan det ta 40 år för den hydrologiska dynamiken att närma sig naturliga nivåer. (Taylor och Price, 2015). Torvmarker genomgår också irreversibla förändringar som svar på mänskliga ingrepp såsom dränering eller restaurering (Bullock och Acreman, 2003).

I Sverige, med en våtmarkstäckning mellan 5–20 %, påverkas avrinningen med avseende på mängden och tidpunkten för flöden (Karlsen et al., 2016). Men med så små våtmarksområden är det svårt att skilja våtmarkernas specifika funktion från andra jordars funktion. Så det finns fortfarande ett stort behov av detaljerade studier av torvmarks/våtmarkshydrologiska dynamik som går från upptäckten att våtmarker förändrar den hydrologiska regimen till evidensbaserad planering av torvmarker/våtmarker i ett landskapsperspektiv för att förbättra ekosystemtjänsterna. Det faktum att olika torvmarkstypers hydrologiska funktionalitet varierar kraftigt understryker ytterligare behovet av dedikerade studier av våtmarkshydrologi (Bullock och Acreman, 2003).

Högupplösta hydrologiska data från våtmarks-/torvmarksdominerade avrinningsområden, inklusive kontinuerliga mätningar av grundvattennivå, och eller evapotranspiration, kommer därför att vara en användbar utgångspunkt för detta projekt. Laserskanning ger nu också mikro- och makrotopografi och lutning samt procentandelar av våtmarks- och skogstäckte, i skalor som är mycket användbara för hydrologiska analyser.

Den centrala frågan för detta projekt är att definiera hur torvmarker/våtmarker först lagrar nederbörd och sedan släpper ut vatten till avrinning och evapotranspiration. Tillfällig lagring av vatten i avrinningsområdet från timmar till månader skapar tidsförskjutningar mellan dessa in- och utflödena. Att veta hur dessa lagringar fungerar är avgörande för att planera tillgången på vatten i bäckar och akvifärer.

I Sverige har stora framsteg gjorts i denna typ av modellering för landskap, baserade på omfattande observationsdata. Detta har bidragit till det etablerade beslutsstödsverktyget, S-Hype, för prediktion av nuvarande och framtida flöden (Strömquist et al., 2012). Detta verktyg är en viktig del av svensk infrastrukturplanering från lokal till nationell skala. Det finns dock stora lokala skillnader i hur avrinningsområden lagrar och släpper ut vatten som vår forskning med hjälp av högupplösta avrinningsdata från små (25–1000 ha) avrinningsområden har identifierat (Karlsen et al. 2016a,b). I dessa analyser utmärkte sig våtmarker genom att fungera annorlunda än skog, både i avrinningsvolymen under årens lopp, men särskilt också i tidpunkten för avrinningen (Karlsen et al., 2019).

Skillnaderna i förhållande till skog beror dels på skillnaden mellan låg och hög vegetation, men också på de ekohydrologiska egenskaperna hos torvmarker som är helt skilda från andra jordtypers. En nyckel till detta är torvmarkernas förmåga att expandera vertikalt, vilket ökar lagringen med så mycket som 100 mm och förändrar torvens vattenhållande egenskaper (Nijp et al., 2017). Även om detta beteende är känt har det funnits en brist på relevanta data från enskilda avrinningsområdena. Sådant behövs för att kvantifiera torvmarksbeteende i tidsmässiga och rumsliga skalor som är lämpliga för att planera placeringen av våtmarker i landskap för att uppnå specifika ekosystemtjänsterna som för att minska översvämningar och torka (Waddington). et al., 2015).

Denna kunskapsbrist förhindrar dagens våtmarkssatsningar från att nå sin fulla kapacitet och tillgodoräkna sig de hydrologiska ekosystemtjänster som våtmarker kan leverera. Kunskapsbristen beror delvis på att hydrologiska data från våtmarker är sällsynta. Detta förklaras av att våtmarker ofta bara utgör en mindre del av de avrinningsområden som har stått för en stor del av de data som använts för att modellera avrinningshydrologi under svenska förhållanden.

Lyckligtvis har intresset för växthusgasutbyte mellan torvmarker och atmosfären resulterat i hydrologisk instrumentering av flera torvmarker som ofta inkluderar system som mäter evapotranspiration. Detta möjliggör detaljerade vattenbalansanalyser av hur torvmarker lagrar och släpper ut vatten, antingen lateralt som avrinning eller vertikalt tillbaka till atmosfären och regionala ångflöden. Samtidigt som intresset för våtmarker i skogslandskapet ökar, har den vanligaste typen av investering i våtmarker varit anläggande av våtmarker i jordbrukslandskapet. Trots att det finns tusentals sådana anlagda våtmarker finns det ett behov av att tillhandahålla planeringsverktyg även för dessa.

EviWet har haft som målsättning att använda nya, våtmarksspecifika datakällor för att fylla den nuvarande kunskapsluckan om våtmarkshydrologisk funktion. Denna evidensbas kan utvecklas till ett operativt beslutsstödsverktyg för planering av leverans av hydrologiska ekosystemtjänster från våtmarker.

EviWet angriper sin övergripande målsättning genom tre forskningsfrågor (FF).  
FF1 1 – Hur förändrar våtmarker mängden och tidpunkten för avrinning i jämförelse med skogsmark under Sveriges geografiska och klimatiska förhållanden?

FF 2 – Hur ska torvmarks hydrologiska funktioner simuleras under framtida klimatscenarier?

FF 3 – Hur kan de specifika frågorna kring våtmarksförvaltning hanteras i ett beslutsstödsverktyg som S-Hype för offentliga och privata aktörer med intresse i våtmarksförvaltning?

För FF1 har vi använt mångåriga mätningar från två våtmarker med över 40 % torvmark i avrinningsområdet. De ligger i skogslandskapet kring Vindelns Försöksparker, där det finns tre närliggande bäckar med betydligt mindre inslag av torv i avrinningsområden. Dessa data har utforskats, för att karaktärisera hur våtmarker mellanlagrar vatten som flödar genom landskapet. En del av analysen har fokuserat på en jämförelse av vattenbalanser från skog och myr. En annan del av analysen är inriktat på kortvarig lagring av vatten (dagar till veckor) i torv och skogsmark. Ytterligare mätningar av torvmarks ekohydrologiska förmåga att reglera vatten genom expansion/kontraktion har genomförts längs Sävar Rising Coastline Mire Chronosequence (SMC) norr om Umeå nära havskusten (Ehnvall; 2023). Huvudfrågan för detta arbete är om torvmark buffrar extremflödena (figur 1).



Figur 1. I vilken utsträckning är vattenfyllda torvmarker hydrologiska "stötdämpare"?

Även om nya mätningar är värdefulla är det svårt att generalisera från observationer på bara några få platser, särskilt när man försöker lösa de processer som kan skilja sig åt mellan torvmarker och skogsmark. Ostörda torvmarker innehåller många ekohydrologiska återkopplingar som kan stabilisera torvmarkernas vattenförråd och potentiellt förse torvmarksomgivningarna med vatten under torka (Waddington et al., 2015). Därför skapade FF2 en konceptuell modell, "PEatland ECOhydrology and Streamflow SIMulator" (PECOSIM, Nijp et al., in prep). Målet med modelleringen är att utreda hur självreglerande ekohydrologiska återkopplingar i torvmarker påverkar torvmarkers beteende när det gäller lagring och avgivning av vatten i förhållande till jordar utan ekohydrologiska återkopplingar (figur 2). Tanken har varit att om behov finns, kan den operationella S-Hype-modellen anpassas för att hantera hydrologiska funktioner i våtmark. För detta empiriska och relaterade modelleringsarbete har vi begränsat våra analyser till naturliga nordliga torvmarker (dvs icke dikade).

**Beteende:**

- Extrem flödena
- Fördröjning
- Lagring

**Funktion:**

- Evapotranspiration
- Lagringselasticitet



Figur 2. Högupplösta vattenbalansdata har analyserats med avseende på tre aspekter av hydrologiskt beteende: extrema flöden, fördröjning och lagring. Konceptuell modellering med PECOSIM har isolerat två processer som kan ändra flödesextremerna från torvmark jämfört med friskare skogsmark: lagringselasticitet (dvs vertikal kompression och expansion av torv) och evapotranspiration (den totala mängden och fördelningen under året).

I arbetet med observationer och modellering har det funnits tre hypoteser om torvmarks hydrologi som vi har försökt reda ut.

- a) Expansion av torv, särskilt levande vitmossa, lagrar regnvatten vilket minskar toppflöden.
- b) Mindre evapotranspiration från torv, liksom kontraktion, ökar basflödet.
- c) Dessa dämpande effekter av torv verkar inom ett begränsat intervall som inte kommer att buffra extrema översvämningar och torka.

Ett viktigt fokus i projektet är att utveckla verktyg som kan beskriva de hydrologiska effekterna av våtmarksrestaurering/-anläggning. Avsaknaden av sådana verktyg gör det idag svårt att bedöma hur stor effekt som en planerad våtmark kommer få på exempelvis höga och låga flöden nedströms, och är därför ett hinder för att identifiera optimala platser för anläggande eller restaurering av våtmarker.

Visionen för FF3 i projektet har varit att utveckla ett interaktivt verktyg på webben som varken kräver inloggning eller installation för att användas. Verktöget ska göra det möjligt att bedöma hur flöden och vattenstånd i nedströmsliggande områden påverkas av en eller flera anlagda våtmarker uppströms.

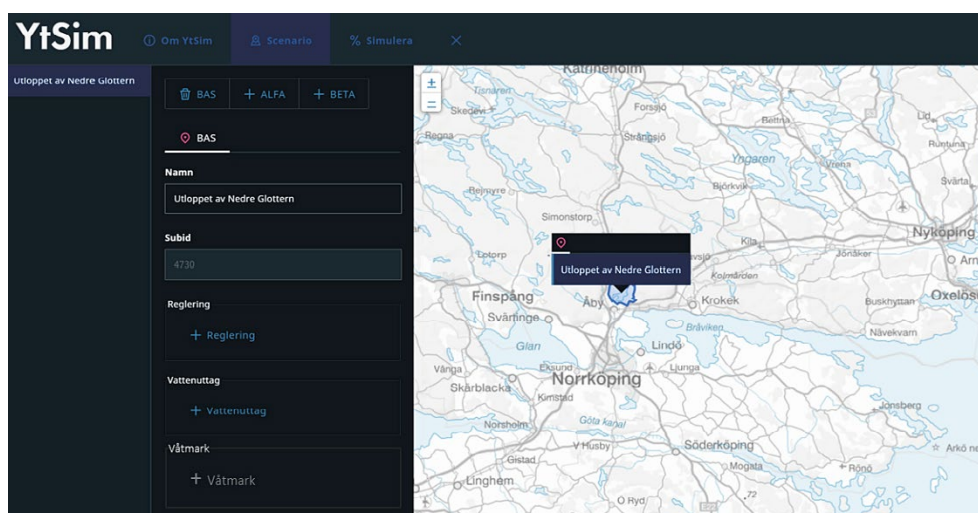
SMHI har drygt 15 års erfarenhet av att utveckla hydrologiska scenarioverktyg. I slutet av 2000-talet utvecklades scenarioverktyget HOME Vatten som stöd för arbete med vattenkvalitet, mer specifikt näringsämnen kväve och fosfor. Genom att logga in på en personlig sida kunde användaren ändra utsläpp av dessa ämnen och sedan beräkna effekter på koncentrationerna nedströms. Själva beräkningen skedde då på en server vid SMHI och det kunde ta flera timmar innan beräkningen blev klar. Den långa tidsåtgången bidrog till att HOME Vatten inte blev så användbart och verktyget avvecklades efter några år.

En annan typ av scenarioverktyg som SMHI arbetat med utgår från förberäknade scenarier, till exempel SMHI Klimatscenariotjänst. Dessa låter användaren växla mellan olika förberäknade scenarier och visualisera olika indikatorer i kartor och diagram. Inte heller denna typ av metod passar våtmarkshandläggare eftersom placering, storlek och utformning av en tilltänkt våtmark kan variera fritt och kan

få vitt skilda effekter. Dessutom kan effekten av en våtmark komma att påverkas av att andra våtmarker anläggs uppströms/nedströms vid senare tillfällen, så verktyget behöver kunna genomföra dynamiska beräkningar på begäran.

Under SMHIs regeringsuppdrag ”Åtgärder för att förhindra vattenbrist” 2018–2020 utvecklades en ny typ av scenarioverktyg. Verktyget bestod av två delar – en del förberäknat och en del som beräknas på begäran. Genom att kombinera dessa kunde beräkningarna utföras i själva webbläsaren väldigt snabbt, och verktyget upplevdes som interaktivt. Den första versionen av verktyget kunde beräkna scenarier med förändrade sjöregleringar och vattenuttag och verktyget döptes till YtSim som förkortning av ”ytvattensimulering”.

Kortfattat bestod den förberäknade delen av YtSim av variabler som beräknats med S-HYPE för ca 40 000 områden i Sverige med dygnsupplösning. Genom att läsa dessa data från en server vid SMHI kan flödesberäkningar i sjöar och vattendrag göras snabbt i webbläsaren. Den del som beräknas interaktivt i webbläsaren är hur vatten flödar från källa till hav genom sjöar och vattendrag (figur 3).

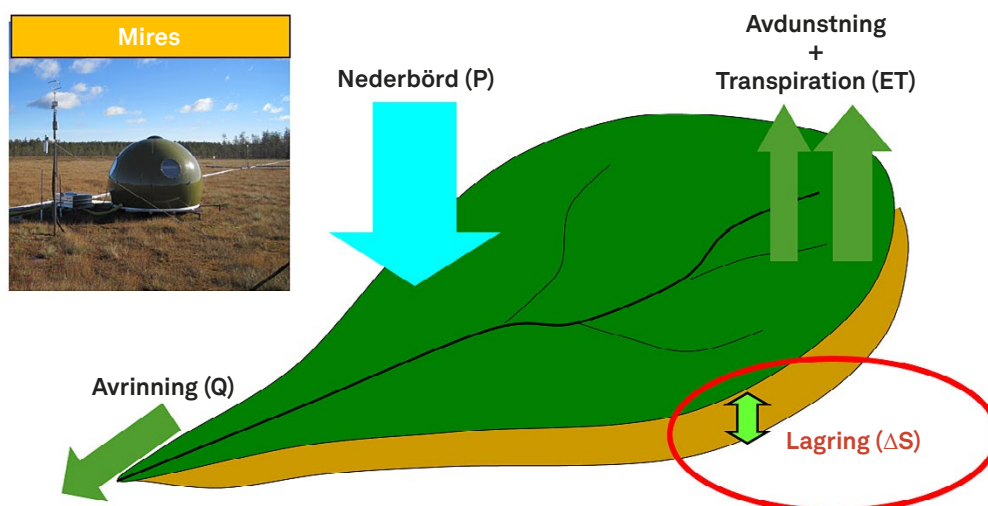


Figur 3. YtSim – Verktyg för beslutsstöd som simulerar effekter av anlagda våtmarker.

## 2. Metod

### 2.1 FF 1 – Hur förändrar våtmarker mängden och tidpunkten för avrinning i jämförelse med skogsmark?

Observationer av nederbörd, avrinning och evapotranspiration användes för att jämföra dynamiken och storleken på flödena och vattenlagringen i torvjordar jämfört med den i skogbevuxna mineraljordar (figur 4).



Figur 4. Vattenbalanser med nederbörd, avrinning och evapotranspiration uppmätt varje timme användes för att kvantifiera kortsiktiga förändringarna i myrens vattenmagasin. Detta möjliggjordes av placeringen av ett "eddy-kovarians" system vid myren som en del av forskningsinfrastrukturen ICOS Sweden. Resten av vattenbalansmätningarna stöddes av långtidsforskning vid SLU Vindeln Försöksparker (Kulbäcksliden och Svartberget) i Västerbotten 60 km NV från Umeå. Sedan 2013 har stöd också kommit från SITES nationella infrastruktur.

De mest omfattande torvmarksuppgifterna kommer från avrinningsområdet Degerö Stormyr, ett minerogent och ombrotroft blandmyrkomplex i norra Sverige, cirka 55 km NV om Umeå (64°N19°E) och 270 m.a.s.l. (tabell 1). Avrinningsområdet är 2.7 km<sup>2</sup>, med 70 % torv och 30 % skog på huvudsakligen podsoliska jordar med högre topografiskt läge. Vatten från de höglänta skogarna rinner in i den sydvästvästliga och nordöstra delen av avrinningsområdet och lämnar avrinningsområdet vid ett vattendrag som är utloppet Degerö/C18 (Noumonvi et al., 2023).



**Tabell 1. Avrinningsområdena med detaljerad vattenbalans data.**

Område	Program	Torv/Skog	Tidsperiod	Area (ha)	% torv	Lat./Long.
Degerö/C18	ICOS/SITES	myr	2005–2022	270	70	64°11'N, 19°33'E
Svartberget/C7	ICOS/SITES	skog	2015–2022	47	18	64°11'N, 19°33'E
Kallkällsmyren/C4	Kyrcklan/SITES	myr	2002–2022	18	44	64°11'N, 19°33'E
Risbäcken/C1	Kyrcklan/SITES	skog	2002–2022	48	0	64°11'N, 19°33'E
Västrabäcken/C2	Kyrcklan/SITES	skog	2002–2022	12	0	64°11'N, 19°33'E

\* Evapotranspiration från Eddy Covariance inte tillgängligt.

Torvmarkerna på Degerö och Kallkällsmyren bildades i lokala landskapssänkor som formats av istidens historia genom utfyllnad och efterföljande paludifiering av omgivningen. Den genomsnittliga torvtjockleken vid Degerö är 2.45 m, men lokalt kan den uppgå till 8 m (Peng et al., 2024). Torvavlagringarna är underlagrade av gnejsisk berggrund som hör till den svekokarelska orogensen (2.9–1.9 miljoner år sedan) och kvartär glacial morän. Klimatet klassificeras som borealt (Peel et al., 2007). Alla Degerö-data utom vattenföringen samlades in vid myrens centrum med en halvtimmes frekvens. Faktisk evapotranspiration laddades ner som latent värmefflöde från ICOS-databasen (tabell 2). Saknade data om temperatur och nederbörd fylldes med data från närliggande SMHI-stationer.

De fyra skogs- och myr-avrinningsområdena i denna studie förutom Degerö (tabell 1) ingår i Krycklans avrinningsområdesstudie, som också har stöd från den nationella forskningsinfrastrukturen SITES sedan 2013 (Laudon et al., 2021). De tre skogbevuxna avrinningsområdena (Svartberget/C7, Risbäcken/C1 och Västrabäcken/C2) domineras av barrskog på moränmark. Mer information om kvartäravlagringar (morän, torv), berggrundsgeologi, höjd, area, utloppsstation, virvelkovarians och fotavtryck, grundvattennivåer finns i Laudon et al., (2013).

**Tabell 2. Observationsdatavariabler och källor som använts för denna studie.**

Variabel	Datakälla	Referat
Avrinning	SITES	(“Water balance – stream discharge from Kallkällsbäcken, Catchment 7, 2004-09-30–2022-12-31,” 2023)
Lufttemperatur	ICOS, SITES	(“Meteorological data from Kulbäcksliden, 1991–2019, 2020–2021,” 2020; “Meteorological data from Svartberget, Hygget AWS, 2019–2020,” 2022)
Nederbörd	ICOS, SITES	
Relativ luftfuktighet	ICOS	(Andersson et al., 2021d, 2021a)
Kortvågig strålning	ICOS	
Nettostrålning	ICOS	
Vindhastighet	ICOS	
Marktemperatur	ICOS	(Andersson et al., 2021e, 2021b)
Grundvattennivå	ICOS	
Latent värmefflöde	ICOS	(Andersson et al., 2021f, 2021c)



Vattenföringen övervakas vid dessa avrinningsområden i uppvärmda stugor, vilket möjliggör mätningar året runt. Fyra av avrinningsområdets utloppsstationer är utrustade med utskov med 90-graders vinkel med skarpa krön (Karlsen et al., 2016). På Degerö mäts vattenföringen med hjälp av en trapetsformad ränna sedan 2012 (Noumonvi et al., 2023). Vattennivån mäts kontinuerligt med hjälp av MJK 3400 ventilerade tryckgivare, med TruTrack WT-HR kapacitansgivare som fungerar som backup vid alla mätstationer. Vattennivån styrs manuellt varannan vecka till en gång i månaden, och vid båda stationerna kalibreras de teoretiska ekvationerna för mätstrukturerna med manuella flödesmätningar över ett brett spektrum av förhållanden från lågt till högt flöde. Vattenföringsdata är tillgängliga via SITES-programmet (<https://www.fieldsites.se>).

Meteorologiska observationer, mark- och grundvattenobservationer samt latent värmeflöde erhöles från ICOS Sveriges mätprogram (<https://www.icos-sweden.se>). I händelse av att meteorologiska data saknades använde vi de referensklimatstationer som finns tillgängliga via SITES-programmet. ICOS-stationerna ligger inom avrinningsområdena, medan referensklimatstationerna ligger endast cirka 1 km från avrinningsområdets gränser. Atmosfäriskt ångtrycksunderskott (VPD) beräknades med hjälp av den observerade lufttemperaturen och den relativa luftfuktigheten.

## 2.1.1 Evapotranspiration och hantering av dataluckor

Evapotranspiration (ET) beräknas utifrån latent värmeflöde (LE) enligt följande

$$ET = LE/\lambda \quad (\text{Eq. 1})$$

där  $\lambda$  är den latent förångningsvärmens i  $\text{MJ kg}^{-1}$ , LE i  $\text{MJ m}^{-2} \text{T}^{-1}$  och resulterande ET i  $\text{kg m}^{-2} \text{T}^{-1}$ . Den latent förångningsvärmens beräknas utifrån lufttemperaturen enligt Allen et al. (1998)

$$\lambda = 2.501 - (2.361 \times 10^{-3}) \times T_a \quad (\text{Eq. 2})$$

där  $T_a$  är lufttemperaturen i grader Celsius.

Svartbergets latent värmeflödesdata innehöll dataluckor under de hydrologiska åren 2015–2018. Dessa luckor ifylldes på en daglig tidsskala med hjälp av slumpmässig skogsregression i syfte att beräkna en löpande vattenbalans i avrinningsområdet. Den slumpmässiga skogsmodellen tränades på lokala meteorologiska data och justerades med hjälp av K-Fold-korsvalidering med  $K = 5$ , där test- och träningsdatauppsättningen delas iterativt i olika delmängder från den fullständiga datauppsättningen, och testuppsättningen är 20 % av fullständiga data. Modellträning utfördes med hjälp av Scikit-learn v.1.1.2 (Pedregosa et al., 2011). Mer information om den slumpmässiga skogsmodellen och träningsfunktionerna finns i stödinformationen.

Referens ET (RET) för båda avrinningsområdena beräknas enligt ASCE Penman-Monteith-metoden (Technical Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration, 2005) på en timtidsskala med hjälp av väderdata från respektive ICOS-mätplats.

## 2.1.2 Uppskattningar av vattenbalans och dynamisk lagring

Vattenbalansen beräknades med två olika tillvägagångssätt, baserat på observationer och med hjälp av HBV-modellen. Vattenbalansen baserad på dagliga observationer löstes med hjälp av följande ekvation,

$$\Delta S = I - Q - ET \quad (\text{Eq. 3})$$

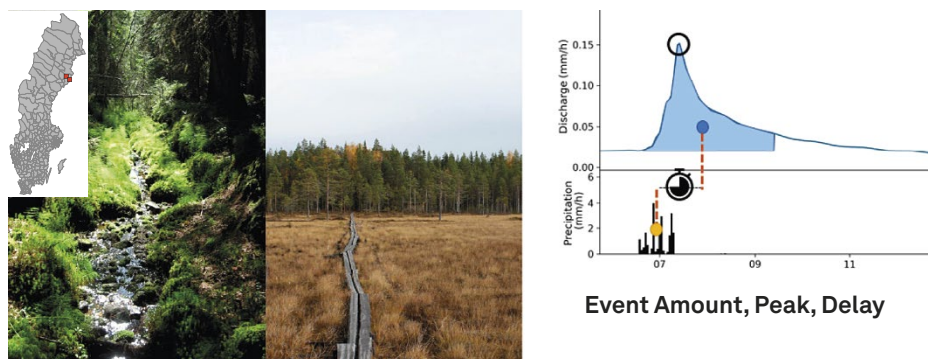
där  $\Delta S$  är förändring i avrinningsområdets vattenlagring,  $I$  är tillförsel av flytande vatten (dvs nederbörd och snösmältning),  $Q$  är avrinningsområdesflöde och  $ET$  är avrinningsområdes evapotranspiration. Detta förutsätter att vattenflöden som inte inkluderas i Eq. 3, till exempel grundvattenflöden in eller ut ur avrinningsområdet, är försumbara.

HBV-modellen (HBV-light version 4.0.0.25, Seibert och Vis (2012)) med en struktur med tre grundvattenlådor kalibrerades på det dagliga tidssteget för båda avrinningsområdena. Totalt 100 kalibrerade parameteruppsättningar producerades för varje avrinningsområde, och ensemblemedelvärdet användes för lagringsuppskattningar, liknande det tillvägagångssätt som används av Karimi et al. (2022). Vi beräknar två olika dynamiska lagringsuppskattningar från HBV-modelleringen, den totala dynamiska lagringen (dvs mark- och grundvattenlagringslådor i modellen) och grundvattenlagringen som representerar direkt dynamisk lagring. Det årliga lagringsintervallet beräknades sedan som skillnaden mellan maximum och minimum för varje lagringsuppskattning och för varje hydrologiskt år, och vi beräknar också lagringsintervallet mellan den 95:e och 5:e percentilen.

Mer detaljer om beräkning av vattenbalans och dynamisk lagring finns i Bilaga 1.

## 2.1.3 Flödestillfälle-baserade analyser

De flödestillfällesbaserade analyserna är inriktade på kortvarig lagring av vatten (dagar till veckor) i torv och skogsmark. Enskilda avrinningstillfällen identifierades systematiskt under sju hydrologiska år (2014–2020) från två torvdominerade avrinningsområden (Degerö/C18 och Kallskällsmyren/C4, tabell 1), samt tre skogsdominerade avrinningsområden. För varje tillfälle beräknades tre värden (figur 5), maximal avrinning (mm/timme), total mängden avrinning (mm), och fördröjning av avrinning (timme, tidsskillnad mellan centroid av nederbörd och avrinning).



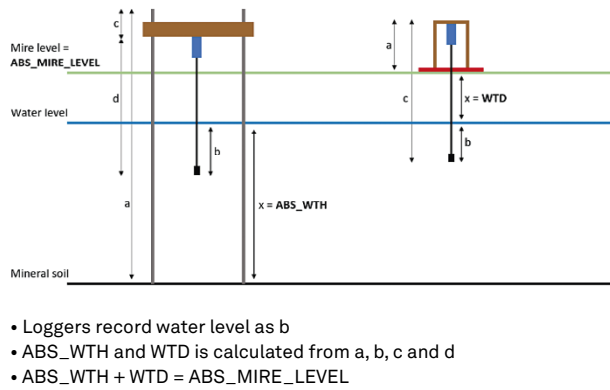
Figur 5. Event scale hydrologi som jämför respons från två våtmarksdominerade avrinningsområden och tre skogsdominerade avrinningsområden. Flödestillfälle ("episodes" på engelska) identifierades systematiskt och tre egenskaper hos varje episod beräknades: total mängd avrinning, maximal avrinning, och fördröjning mellan nederbörd och avrinning (beräknad som tidsskillnaden mellan centroiderna hos nederbörden och avrinningstillfället).

En egenskap hos torv som är viktig för dessa funktioner är förmågan att svälla under våta perioder och krympa under torrperioder. Denna förändring av torvvolym är relaterad till fluktuationer i grundvattennivå och kan även ha en buffrande effekt på grundvattendjupet (avståndet från markytan till grundvattenytan), vilket påverkar flertalet ekohydrologiska funktioner såsom kolcykel, vegetationsammansättning och biogeokemiska processer.

## 2.1.4 Torvvolymförändringar

I ett försök att fylla i kunskapsluckorna kring detta fenomen undersöktes torvvolymförändringar i flera torvmarker, eller myrar, i närheten av Umeå baserat på data för grundvattennivåer och nivån på myrars markyta som erhållits under sommaren 2021. Syftet var att identifiera trender och egenskaper hos de olika myrarnas förändring i grundvattennivån och myrnivå, samt att ta reda på om det finns någon skillnad i torvens kapacitet för att svälla och krympa hos myrar med olika ålder och därmed näringsstatus.

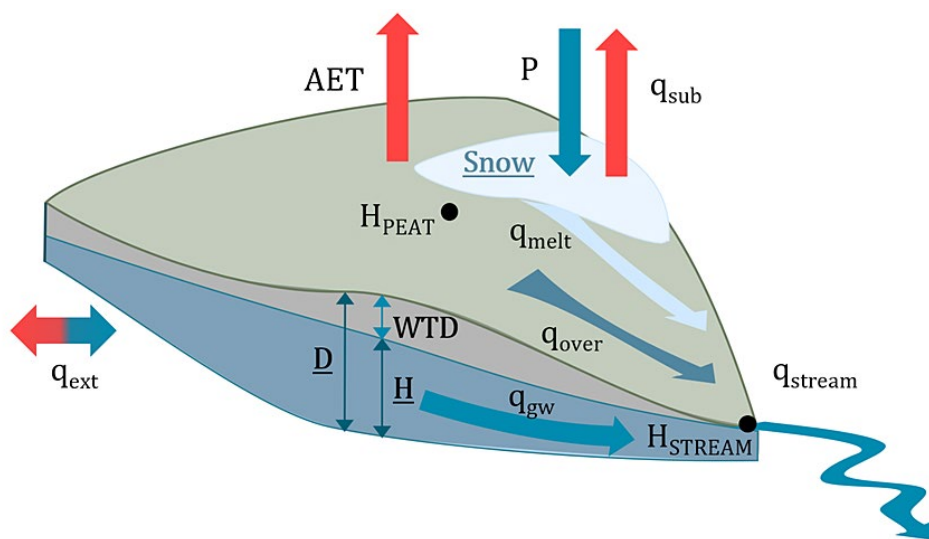
Sommaren 2021 placerades mätutrustning ut på 15 myrar utanför Umeå i Västerbotten för att mäta just torvens volymförändring (figur 6). Det bedrivs redan omfattande forskning på flera av dessa myrar och volymförändringen är en viktig pusselbit. När torven sväller och krymper märks detta främst på att myrens markyta höjs och sänks. För att mäta torvens svällning och krympning användes mätutrustning fixerad med hjälp av järnstänger i det mer fasta och statiska mineraljordlagret under torven för att mäta grundvattennivån relativt en fast punkt, samt även mätutrustning som var förankrad i det rörliga översta lagret och för att mäta avståndet ner till grundvattenytan. Med dessa data gick det att beräkna markytans position på myren. Resultatet av sommarens mätkampanj var ett stort dataset som visar hur myrens markyta, grundvattennivå och grundvattendjup varierar över tid. Insamlade data från sommarens mätkampanj användes för att undersöka volymförändringen hos torv med syftet att ta reda på om det finns någon skillnad i torvens kapacitet för att svälla och krympa hos myrar med olika ålder. De studerade myrarna är särskilt intressanta då de är en del av den ”Sävar Rising Coastline Mire Chronosequence” (SMC) norr om Umeå nära havskusten (Ehnvall; 2023). SMC är en grupp geografiskt närliggande myrar med liknande egenskaper men med olika ålder, som bildats till följd av landhöjningen som pågått sen dess att inlandsisarna smälte bort. På grund av att de ligger i så nära anslutning till varandra delar de många egenskaper som påverkas av klimatförhållanden, geologi och vegetationsammansättning, men de har en tydlig skillnad i ålder. Tre platser på Degerö Stormyr också undersöktes. Degerö är ännu äldre än de äldsta på kronosekvensen.



Figur 6. Parning av absoluta och relativa grundvattennivåmätningar. Den absoluta grundvattennivåmätaren fixeras i förhållande till mineraljordarna under myren med järnstolpar som drivs genom myren ner i den underliggande mineraljorden. Den relativa grundvattennivåmätaren "flyter" på torvmarksytan och mäter grundvattennivåerna i förhållande till torvytan. Skillnaden mellan de två grundvattennivåerna över tid beror på torvens expansion och sammandragning (krympning). Detta är en viktig ekohydrologisk egenskap hos torvjordar som inte finns i mineraljordar.

## 2.2 FF2 – Hur ska torvmarks hydrologiska funktioner simuleras under framtida klimatscenarier?

En ny simuleringsmodell utvecklades för att konceptualisera ekohydrologiska processer i torvmarker: Pecosim (PEatland ECOhydrology and Streamflow SIMulator, figur 7). Syftet var att simulera intern vattenlagringsdynamik (grundvattendjup) samt interaktion med den regionala vattencykeln genom vattenflöde som lämnar torvmarkernas avrinningsområde och externa vattenflöden inom dygnet. I stället för att sträva efter att fullt ut fånga den rumsliga komplexiteten inom torvmarker följer vi konceptet parsimoni och håller modellen så enkel som möjligt för att fokusera på effekten av återkopplingar och minimera antalet parametrar som krävs för att (a) möjliggöra tillämpning under dataglesa och avlägsna förhållanden och (b) minimera ekvifinalitetsproblem (Beven, 2006). Vi använde oss därför av en konceptuell men ändå fysikaliskt-baserad modellmetod, där parametrar och återkopplingar ("feedbacks" på engelska) kunde approximeras och begränsas med mätbara kvantiteter i fält (tabell 3). Meteorologiska drivkrafter, parameterisering, kalibrering och validering baserades på 7-års observationer av Degerö Stormyr. Modellen drivs av lufttemperatur, nederbörd och potentiell evapotranspiration. PECOSIM har utvecklats i R-programvara (version 4.2.2) och använder en modulär struktur där processer kan slås på och av. Den är utformad för att möjliggöra enkel inkoppling av ytterligare processer. Vilken tidsupplösning som helst kan användas. Här använder vi timupplösning.



Figur 7. Schematisk översikt över modelldomänen med vattenflöden och tillståndsvariabler (fetstil och understruken). Tillståndsvariabler:  $H$  = hydraulisk fallhöjd i förhållande till gränssytan mellan torv och mineraljord,  $D$  = torvtjocklek,  $S_n$  = snövattenekvivalenter,  $WTD$  = grundvattendjup ( $D-H$ ).  $H_{PEAT}$  och  $H_{STREAM}$  är hydrauliska uppföringshöjder i torv och bäck och styr lutningen.  $P$  = nederbörd,  $AET$  = faktisk evapotranspiration,  $q_{sub}$  = sublimering,  $q_{gw}$  = lateralt grundvatten,  $q_{melt}$  = snösmältning,  $q_{over}$  = infiltrationsöverskott av vattenflöde ovan markytan,  $q_{stream}$  = avrinningen =  $q_{gw} + q_{overland} + q_{melt} + q_{ext}$  är ett externt flöde som kan representera lateralt och/eller vertikalt in-/utflöde vid gränsen för modelldomänen.

Modellen lämpar sig väl för användning i olika torvmarkstyper med milda sluttningar ( $\approx 0.005$  m/m), som täcker landskapsmiljöer från både myrar och kärr. En snö- och tjälrutin möjliggör applicering i både tempererade och boreala klimat. I följande avsnitt beskriver vi först platsen och data som användes för modellvalidering. Detta följs av en beskrivning av modellen med alla återkopplingar aktiverade (nedan kallad "fullständig modell") och hur effekten av återkopplingar bedöms. Vi fokuserar på de viktigaste och nya aspekterna av modellstrukturen.

**Tabell 3. Sammanfattning av hur de tre ekohydrologiska återkopplingarna som implementeras i modellen.**

Process	Beskrivning och angreppssätt
"Transmissivitets återkopplingen	Reducera transmissivitet med djupare grundvattennivå genom att ta hänsyn till en kraftigt avtagande hydraulisk konduktivitet med djupet.
Lagringselasticitet återkopplingen	Lagringselasticitet koncept enligt Niijp, Metselaar et al. (2017b) genom att inkludera en specifik lagringsparameter.
Evapotranspiration – WTD återkopplingen	Minska potentiell evapotranspiration vid djupare grundvattennivåer
Inga processer som är specifika för torvmarker	Basscenario: Den hydrauliska konduktiviteten är homogen i hela torvprofilen. Ingen lagringselasticitet: specifik lagring = $0 \text{ m}^{-1}$ . Ingen effekt av grundvattennivån på faktisk evapotranspiration: $fWTD = 1$ .

För PecoSIM-modelleringsarbetet användes grundvattennivåerna på Degerö. Medianen för grundvattendjupet (WTD) som samlats in vid fyra grundvattenbrunnar inom fotavtrycket i olika mikroformer användes för att representera medelvärdet för WTD och vattenmagasinet i myren. Tidsserierna validerades med hjälp av manuella mätningar varannan vecka. Under den frostfria vegetationsperioden

(21 maj–30 september; dag på året (DOY) 141–273) nådde WTD inte över torvtytan, vilket tyder på en mindre roll för flödet ovan mark. Alla Degerö-data samlas in från SITES-portalen (SITES CCBY4 Data Licence; Svartbergets fältforskningsstation (2020)).

## 2.3 FF3 Hur kan de specifika frågorna kring våtmarksförvaltning hanteras i ett beslutsstödsverktyg?

### 2.3.1 YtSim beslutstöd utvecklingen i samarbete med referensgrupp

Första steget i utvecklingen av ett verktyg för våtmarkshandläggare var att tillätta en referensgrupp av potentiella användare. Inbjudningar skickades ut i olika nätverk och annonserades även i kommunikationskanaler, vilket resulterade i tolv deltagare (tabell 4). Under projektets gång har några av deltagarna ersatts av andra namn på grund av jobbyte.

**Tabell 4. Deltagare i referensgruppen.**

Namn	Funktion	Arbetsplats
Torbjörn Davidsson	Vattnekolog	Ekologigruppen, Lund
Anna Eklund	LEVA-åtgärdssamordnare/Blackstaån	Hjälmarens vattenvårdsförbund
Matti Ermold	Våtmarkshandläggare, Landskapsenheten	Naturvårdsverket
Eva Frölander	Ideell förening Aquabrava	Katthammarsvik, Gotland
David Hjortenkrans	Våtmarkssamordnare Vattnenheten	Länsstyrelsen i Kalmar län
Jessica Lerstorp	Vattenhandläggare	Länsstyrelsen i Östergötlands län
Linda Johansson	Projektledare EMRA	Länsstyrelsen i Norrbottens län
Jan Lannér	Skogskonsulent	Skogsstyrelsen i Skånes distrikt
Jenny Lonnstad	Landskapsenheten, NL	Naturvårdsverket
Steven Sims	VA-konstruktör/Projektör	WSP Samhällsbyggnad, Göteborg
Geraldine Thiere	Hållbarhetsingenjör klimatanpassning	Ängelholms kommun
Anna Walient	Vattenhandläggare Fiske- och restaureringsenheten	Länsstyrelsen i Skånes län

Arbetet med att utveckla ett verktyg för beslutsstöd kan sammanfattas av följande tre delmoment:

- Kontakter, träffar, demonstrationer och enkäter till referensgruppen för att identifiera behov, beskriva projektplaner, och få kontinuerlig feedback på utvecklingen av YtSim.
- Avstämningar mellan olika grupperingar inom SMHI för att säkerställa att beräkningar i YtSim görs på ett vetenskapligt korrekt sätt. Detta inkluderar diskussioner om kopplingen mellan S-HYPE och YtSim, och hur parametrar och variabler bör användas för våtmarkssimuleringar.
- Beställning av dokumentation, utveckling och driftsättning av YtSim till olika IT-funktioner vid SMHI. IT-funktionerna har inkluderat experter på gränssnitt (UX designers), systemutvecklare och webbutvecklare.

De tre delmomenten har pågått parallellt under projektets gång men i realiteten har avstämningar med referensgruppen behövt invänta den tekniska utvecklingen och omvänt.

## 2.3.2 Operationell modellering med S-Hype

### S-HYPE OCH TORVAREA

S-HYPE är en detaljerad hydrologisk modell som beskriver flödena av vatten och ämnen i mark, vattendrag och sjöar. Hela landet beskrivs i hög rumslig upplösning. Den första uppsättningen av S-HYPE utvecklades av Strömquist et al. (2012). S-HYPE är i sin tur en tillämpning av den hydrologiska modellkoden HYPE ("Hydrological Predictions for the Environment"), ursprungligen utvecklad av Lindström et al. (2010). Både HYPE-koden och S-HYPE-modellen har vidareutvecklats betydligt sedan dessa två publikationer skrevs. Modellresultat från S-HYPE görs tillgänglig via vattenwebb (<https://vattenwebb.smhi.se/>). Under den tid som projektet Eviwet har pågått har fem versioner av S-HYPE lanserats i vattenwebb: S-HYPE2016e, S-HYPE2016f, S-HYPE2016g, S-HYPE2016h och S-HYPE2016i. I modellen knyts vissa av egenskaperna mot markanvändning och jordart. Vattenföringen i S-HYPE kalibreras i två steg, först mark- och jordartsparametrar, och sedan lokala inställningar för parameterregioner. I och med projektet har extra fokus lagts på beskrivningen av våtmarker i modellen, både anlagda våtmarker och torvmarker, i de framtagna modellversionerna.

I S-HYPE ingår cirka 600 vattenföringsstationer från SMHI:s arkiv. Av alla dessa har endast en station en våtmarksandel i området uppströms som överstiger 50 %. Detta område är Hulubäcken som avvattnar Komosse högt upp i Nissans avrinningsområde. Vid utplaceringen av temporära stationer för vattenförvaltningsarbetet, se "Temporära stationer" (<https://vattenwebb.smhi.se/station/>) valdes därför punkter i områden med hög andel våtmark ut. Det visades sig svårt att hitta bra mätpunkter i områden med hög andel våtmark. Våtmarkerna finns ofta insprängda i skogsområden, som gör det svårt att hitta stora typområden med stor andel opåverkad våtmark. Vidare tillkommer problemen att bestämma vattendelare och att hitta lämpliga sektioner för vattenföringsmätningar.

Vattendelare för de temporära stationerna som gick att använda för detta syfte togs fram. En databas över områden med minst 25 % myr- och våtmarker eller torv togs fram för S-HYPE2016g, vari de temporära stationerna ingår. Databasen togs fram baserad på Svenska marktäckesdata (SMD). Under projektets gång har marktäckesdata i S-HYPE bytts från Svenska marktäckesdata (SMD) till Nationella marktäckesdata (NMD), men med vissa kompletteringar från SMD. Utanför Sveriges gränser har CORINE använts.

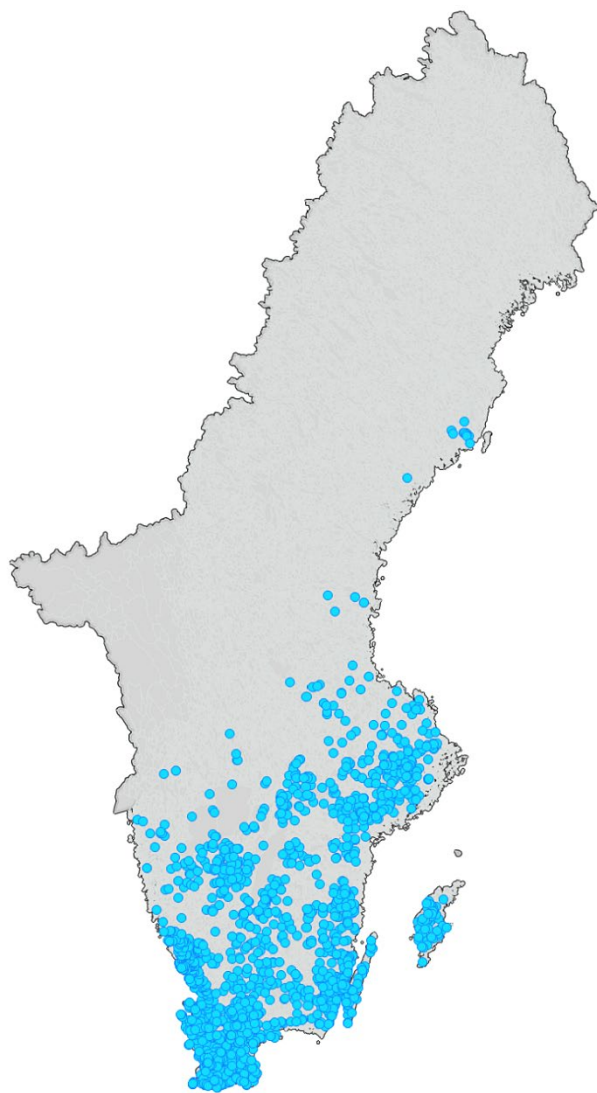
I skrivande stund pågår färdigställandet av en ny version av S-HYPE, kallad för S-HYPE2022a. Den baseras på den nya indelningen SVAR-2022. Denna delområdesindelning är i sin tur framtagen baserad på Lantmäteriets högupplösta höjddatabas, med en upplösning på 1 meter. Den framtagna indelningen är den första versionen av S-HYPE för den nya delområdesindelningen. Den nya indelningen omfattar cirka 26 000 delområden, något färre än i föregående modellversioner. Delavrinningsområdena delas i sin tur in enligt markanvändning, jordart och jorddjup. Jordartsdata och jorddjupsdata kommer från SGU.

I S-HYPE finns sedan några år tillbaka databasen för anlagda våtmarker inlagda (Lindström, 2019). Till den nu framtagna versionen har databasen kompletterats

med ny tillkommen information. Till databasen rapporteras anlagda våtmarker in från främst Naturvårdsverket, Jordbruksverket och Vattenmyndigheterna. För var och en av dessa våtmarker har SMHI beräknat uppströmsarealer. För detta användes Lantmäteriets höjddata med 1 meters upplösning, som SMHI har samplat om till 10 meter. Upplösningen minskas för att:

- Mängden data skall bli hanterbar.
- Resultaten ska bli mindre känsliga för lokala höjdavvikelser, som till exempel enstaka stenbumlingar.
- Datasetet skall bli harmoniserat med andra dataset (främst NMD som har samma upplösning).

Datasetet är inte bara omsamplat utan också korrigerat utifrån hydrografi (vattendragsnätverket, sjöar, bifurkationer) samt vägar, rör, sjöar med flera utlopp.



Figur 8. Anlagda våtmarker enligt våtmarksdatabasen från 2023.



En ny version av Våtmarksdatabasen erhöles i oktober 2023. Antalet rapporterade anlagda våtmarker har utökats från 3 701 till 4 069 sedan Våtmarksdatabasen från 2022. Ett delavrinningsområde kan innehålla fler än en anlagd våtmark. I dessa fall beräknades en viktad uppströmsareal, där de ingående vikterna beräknades utifrån från de ingående våtmarkernas arealer. Denna parameter, som anger hur stor del av delavrinningsområdets lokala avrinning som dräneras genom våtmarkerna, kallas i HYPE för *iwetcatch*. Vid införandet av de anlagda våtmarkerna i modellen måste övriga markanvändningen justeras. Våtmarkerna ersatte därvid i första hand icke-jordbruks-klasserna. Figur 8 visar de anlagda våtmarker enligt våtmarksdatabasen från 2023.

Andelen torvmark som är dikad lades också in i S-HYPE-modellen. Denna baserades på den databas som tagits fram av Sveriges Lantbruksuniversitet, genom kombinationer av karteringar och artificiell intelligens (AI) (Lidberg et al., 2020). Uppskattningen har gjorts med en upplösning av 2 meter. Runt varje uppskattat dike antogs i modellen att grundvattenytan påverkan 20 meter åt båda hållen.

Det saknas kunskap angående anlagda våtmarkers hydrologiska egenskaper, vilket delvis beror på att hydrologiska data från våtmarker är sällsynta. Eviwet har sammanställt tidsserier av vattennivåer för anlagda våtmarker i södra Sverige som kan användas för att beskriva våtmarkers påverkan på nedströms vattenflöden. Under 2021 tillfrågade SMHI 78 stycken personer via epost om hydrologiska data för anlagda våtmarker. De tillfrågade var personer anställda som konsulter, vid universitet och högskolor, länsstyrelser, kommuner och de inom referensgruppen (tabell 5).

**Tabell 5. Antal tillfrågade och hur många som delade med sig av data.**

Grupp	Tillfrågade	Ja
Referensgruppen	18	1
Universitet och högskolor	37	3
Kommuner	4	1
Konsulter	12	3
Lst & Skogsstyrelsen/Sveaskog	7	1
Summa	78	9

Som komplement till analysen av nivåmätningar i våtmarker gjordes en liknande sammanställning av nivåmätningar i sjöar, baserat på SMHI:s vattenståndsmätningar. Detta gjordes för 50 oreglerade sjöar med vattenståndsmätningar i S-HYPE2016g, för åren 2011–2020.

De anlagda våtmarkerna är typiskt små till ytan, och har inte särskilt stor inverkan på flödet utom lokalt nedströms (se exempelvis Lindström, 2019). Torvmark täcker betydligt större arealer i landet. Hur denna torvmark reglerar flödet studerades därför utgående från de data som finns samlade i S-HYPE. Alla oreglerade områdena i SH16I som har mindre än 2 % sjö och en uppströmsarea mindre än 2 000 km<sup>2</sup> utnyttjades för detta. Korrelationen mellan olika karakteristiska flöden, här även kallade flödessignaturer, och markegenskaper uppströms beräknades. De karakteristiska flödena som vanligen används (MQ, MLQ och MHQ) kompletterades med variationskoefficienten CV, basflödet Q30 (30 %-percentilen) och FLASH (1-autokorrelationen), som mäter hur snabbt flödena varierar.

## S-HYPE JÄMFÖRELSE AV BARRSKOG PÅ MORÄN OCH MOSSE PÅ TORV

Kompletterande analyser av parametervärdena i S-HYPE gjordes för två typområden: barrskog på morän och mosse på torv (21 % respektive 5 % av hela arean i S-HYPE). Dessa är de vanligaste klasserna för skog och våtmark i S-HYPE. I den första analysen valdes 10 små, sjölösa områden ut med så god geografisk spridning som möjligt. Vart och ett av de 10 områdena simulerades som om de bestod av enbart barrskog på morän respektive mosse på torv, med det uppmätta vädret från respektive plats. Därmed fås en möjlighet att studera eventuella skillnader som kan identifieras i och med kalibreringen av S-HYPE, som har pågått i många år, och i många områden.

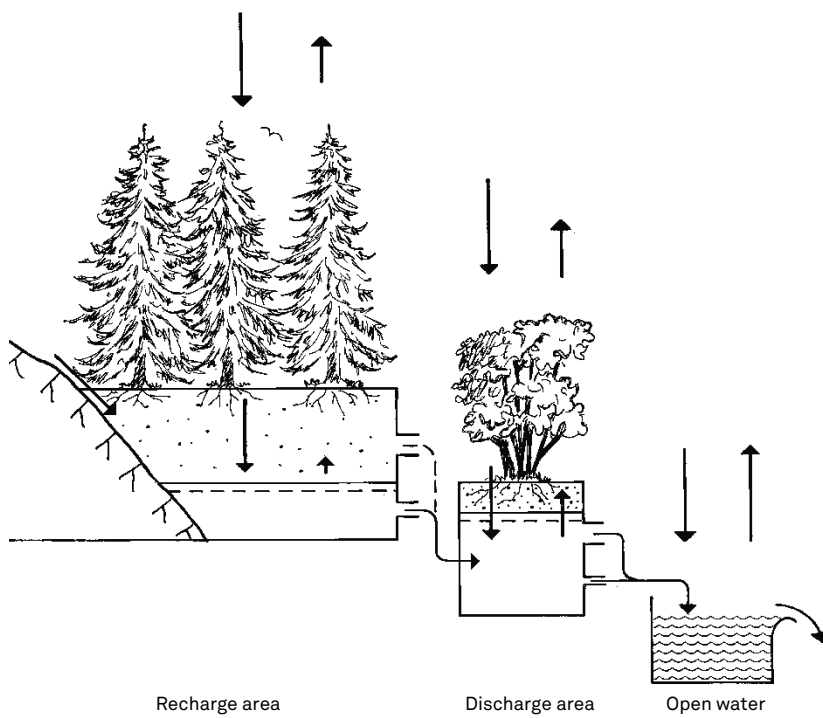
I tidigare avsnitt redogjordes för skillnaderna i andel våtmark mellan olika versioner av S-HYPE, samt komplexiteten i att beskriva var i landskapet som våtmarkerna finns. Dessa skillnader mellan versioner visas i tabell 6 för det 1 km<sup>2</sup> stora området Stubbetorp i Kilaåns avrinningsområde, som var ett av SMHI:s fältforskningsområden på 1980- och 1990-talen.

**Tabell 6. Andel våtmark i Stubbetorp för olika versioner av S-HYPE, från och med den första versionen SH08A till och med den kommande versionen SH22A.**

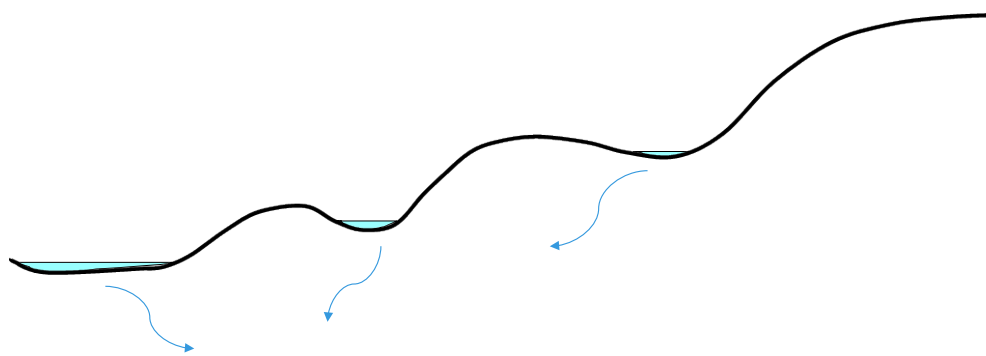
Version	SH08A	SH10A	SH12A	SH16A	SH16G	SH16I	SH22A
Andel	0	0	0	0.06 %	0.06 %	5.8 %	6.0 %

## S-HYPE STUDIER OM LOKALISERING AV TORVMARK I SKOGLANDSKAPET

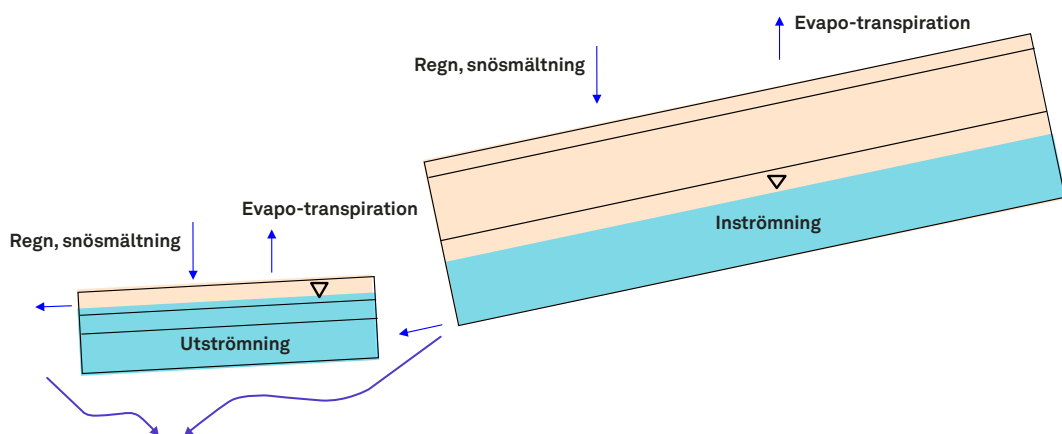
I en variant av HBV-modellen, PULS, gjordes tidigare en uppdelning i in- och utströmningsområden, för just Stubbetorp (Bergström och Lindström, 1992, se figur 9). I området finns en tydlig mosse, liksom utströmningsområden i låglänta områden, trots att dessa inte framgick av de markanvändningsdata som användes i tidiga S-HYPE-versioner (tabell 6). PULS-varianten med in- och utströmningsområden gav bättre anpassning till sommarflöden, och grundvattenmätningar i området. I de tidiga uppsättningarna av S-HYPE, baserade på grövre markanvändningsdata, underskattades alltså andelen våtmark. I just detta område är skillnaden mellan uppsättningarna mycket stor (tabell 6). Förutom den lite större våtmarken i Stubbetorp finns dessa spridda i området, i utströmningsområden beroende på topografin. Att göra en korrekt rumslig beskrivning av varje våtmarks läge i terrängen skulle vara alldeles för komplext för en modell av HYPE-typ. Däremot kan det finnas tillämpningar där man vill kunna simulera den högre grundvattentytan som kan uppstå i våtmarker på grund av att de tar emot vatten från omkringliggande mark (figur 10). Därför utvecklades en ny HYPE-version (se figur 11) med in- och utströmningsområden. I modellen får varje marktyp anses tillhöra respektive kategori, eller räknas som helt frikopplade från de andra klasserna såsom i den ursprungliga HYPE-strukturen.



Figur 9. In- och utströmningsområden i HBV/PULS-modellen (från Bergström och Lindström, 1992).



Figur 10. Principskiss för in- och utströmningsområden baserat på topografarin.



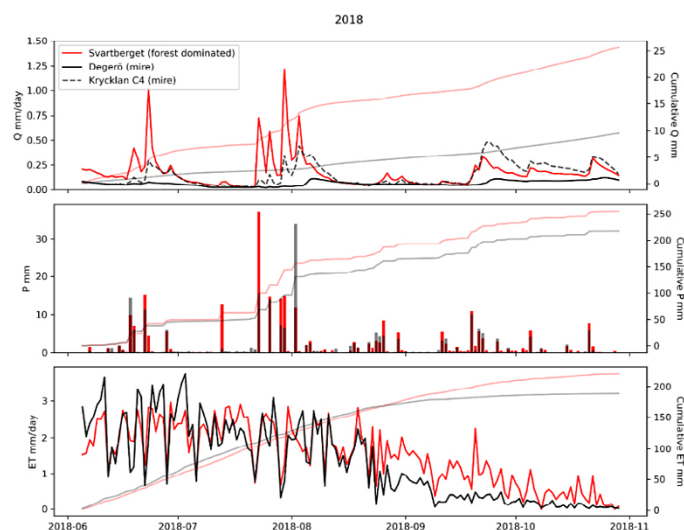
Figur 11. In- och utströmningsområden i HYPE.

# 3. Resultat

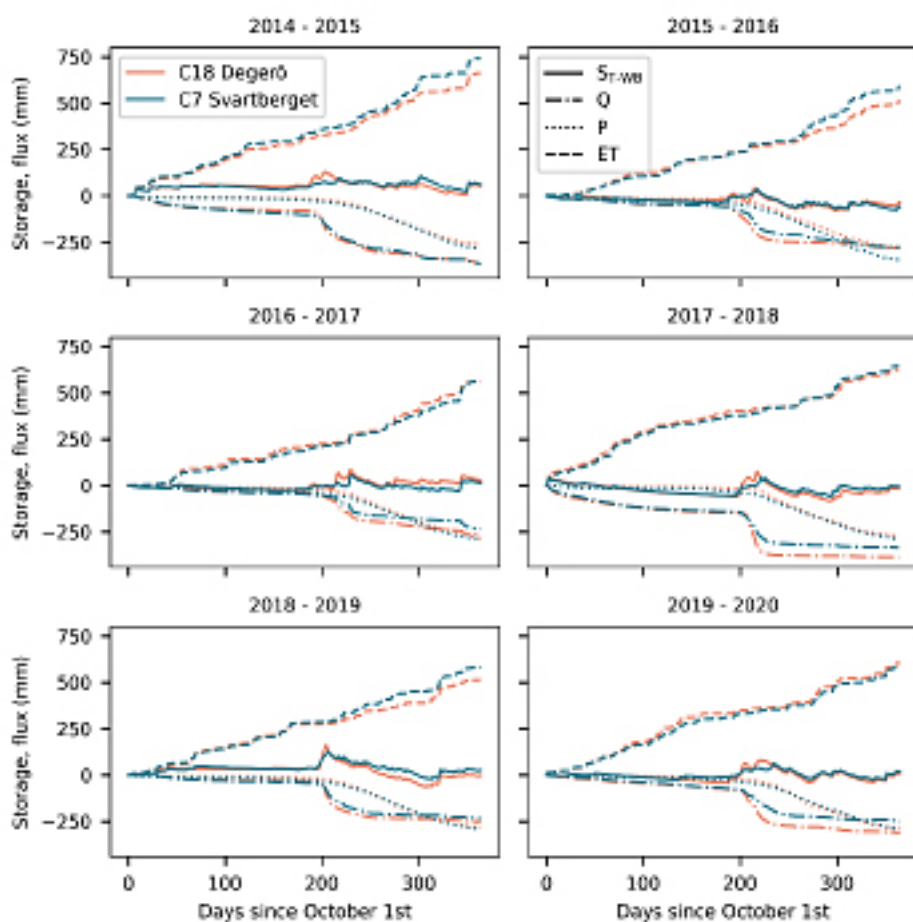
## 3.1 FF 1 – Hur förändrar våtmarker mängden och tidpunkten för avrinning i jämförelse med skogsmark?

### 3.1.1 Årliga vattenbalansanalyser

Timtidsserierna av nederbörd, avrinning och evapotranspiration från Degerö och Svartberget låg till grund för de mest detaljerade jämförelserna av torv- och skogsavrinningsområden (figur 12). Den årliga avrinningen är genomgående högre från torvmarken (tabell 7). Det är viktigt att notera att detta delvis beror på 7 % högre nederbörd (40 mm mer per år i genomsnitt) på det skogbevuxna Svartberget än på Degerö myr under studieåren (tabell 7, figur 13). Avrinningskoefficienten från Degerö är 10 % högre än det skogsdominerade avrinningsområdet (0.54 vs 0.45, tabell 8). Torvmarker har högre avrinning under våta förhållanden på våren och hösten. (Data visas inte). Den genomsnittliga årliga evapotranspirationen är 16 % högre från skogen, eller om man jämför med den totala nederbörden endast 4 % högre ET/P-kvot. Evapotranspirationen är ganska stabil från år till år, med undantag för 2016 för skogen, och ökar inte för år med högre nederbörd. Avdunstningen överstiger avrinningen juni till september, resten av året överstiger avrinningen evapotranspirationen (tabell 7, figur 14).



Figur 12. Exempel av den högupplöst, kvalitetssäkrad data från ett torv-dominerat avrinningsområde (Degerö Stormyr/C18) och ett närliggande avrinningsområde dominerat av barrskog på mineraljord (Svartberget C7) under fem snöfria månader under 2018.



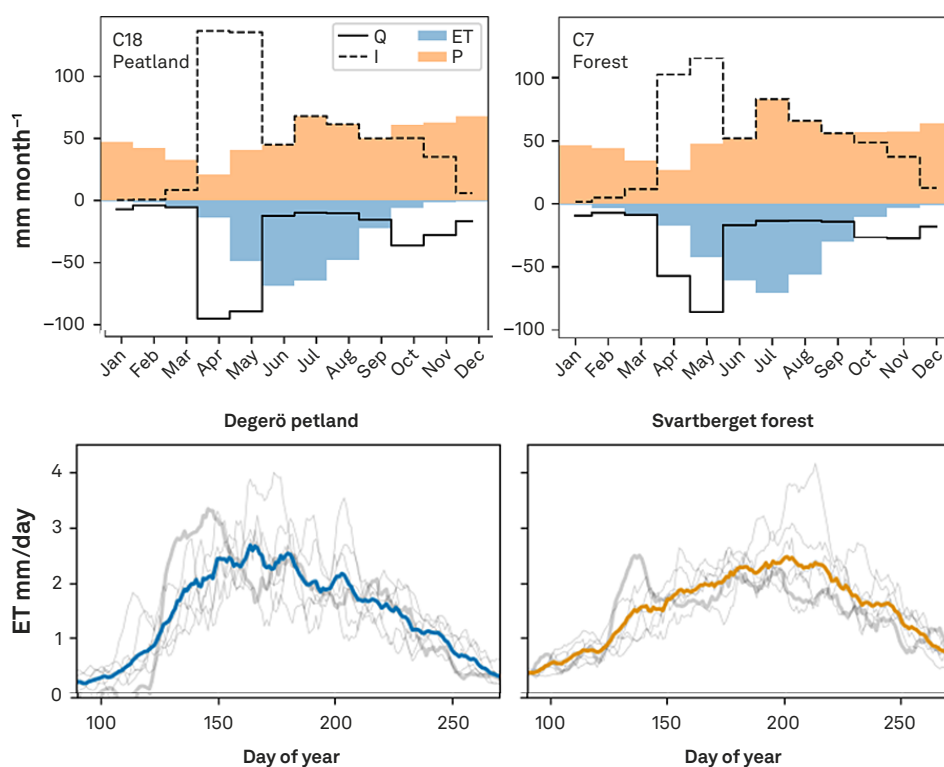
Figur 13. Kumulativa flöden och vattenbalanslagring (ST-WB) för varje hydrologiskt år från ett torv-dominerat avrinningsområde (Degerö Stormyr/C18) och det närliggande avrinningsområdet dominerat av barrskog på mineraljord (Svartberget C7).

Tabell 7. Årliga flöden (i mm) och förhållandet mellan skog och torvmark.

Hydrological year	Precipitation			Discharge			Evapotranspiration (EC system)		
	Degree Peatland	Svartberget forest	Forest/Peatland	Degerö Peatland	Svartberget forest	Forest/Peatland	Degerö Peatland	Svartberget forest	Forest/Peatland
2015-09-30	663	741	1.12	365	364	1.00	249	293	1.18
2016-09-30	513	592	1.15	283	279	0.99	246	361	1.47
2017-09-30	558	559	1.00	285	236	0.83	251	293	1.17
2018-09-30	627	647	1.03	385	334	0.87	262	293	1.12
2019-09-30	514	581	1.13	253	234	0.93	277	292	1.05
2020-09-30	601	593	0.99	312	249	0.80	289	289	1.00
Average	579	619	1.07	314	283	0.90	262	303	1.16

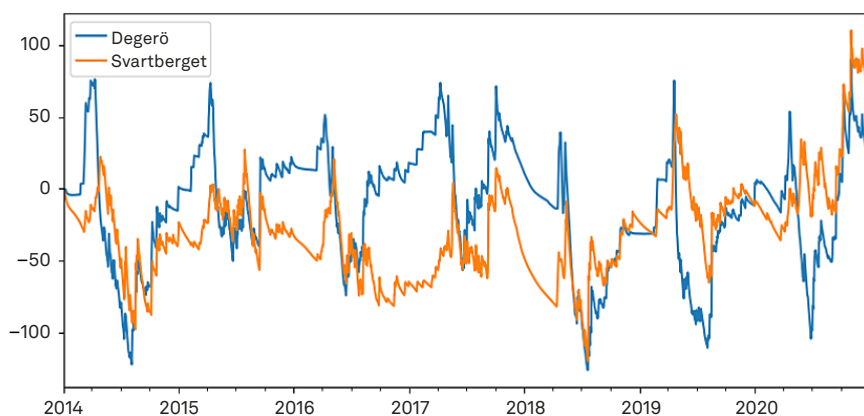
Tabell 8. Avrinningskvot (Q/P), kvot mellan evapotranspiration och nederbörd (ET/P), och kvot mellan referensevapotranspiration och evapotranspiration (RET/ET).

Hydrological year	Q/P		ET/P (EC system)		ET/RET (EC system)	
	Degerö Peatland	Svartberget forest	Degerö Peatland	Svartberget forest	Degerö Peatland	Svartberget forest
2015-09-30	0.55	0.49	0.38	0.40	0.58	0.64
2016-09-30	0.55	0.47	0.48	0.61	0.56	0.77
2017-09-30	0.51	0.42	0.45	0.52	0.58	0.65
2018-09-30	0.61	0.52	0.42	0.45	0.50	0.54
2019-09-30	0.49	0.40	0.54	0.50	0.58	0.57
2020-09-30	0.52	0.42	0.48	0.49	0.59	0.55
Average	0.54	0.45	0.46	0.50	0.57	0.62



Figur 14. Medelvärde för månadsflöden 2014–2020. I är simulerad infiltration, det vill säga summan av snösmältning och nederbörd. Daglig evapotranspiration under växtsäsongen för varje år med medelvärdet som tjock linje. Den tjockare grå linjen är 2018 med mycket vatten under vårfloren och sedan torra under sommaren.

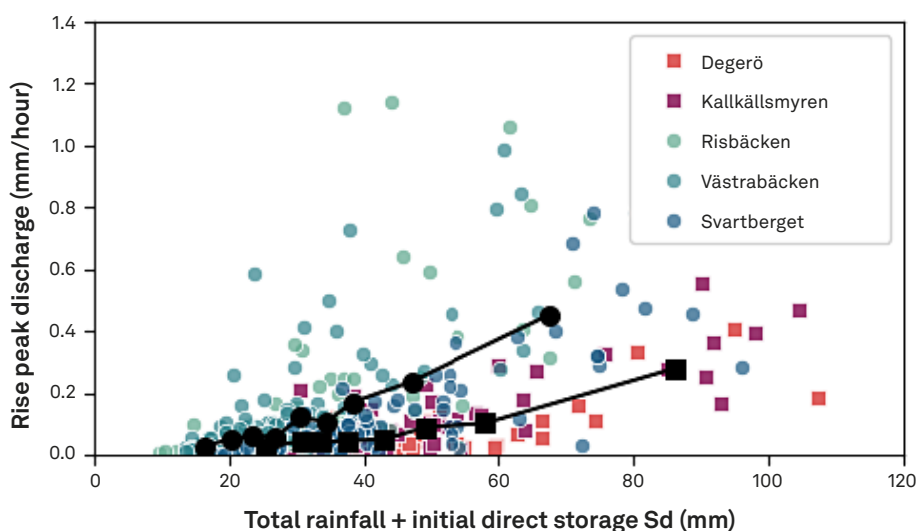
Torvmarkernas lagringsdynamik visar ett större variationsintervall inom varje år jämfört med skogen, både högre maximalt lager på våren som svar på snösmältning och lägre minimilager under torra somrar 2018 och 2019 (figur 15). Dessa större lagringsvariationer är dock begränsade till låga överskridanden, vilket innebär att de bara inträffar en liten andel av tiden under mycket våta förhållanden. Vi förväntar oss att skogen har en större lagringskapacitet på grund av en tjockare omättad zon, förutsatt att avrinningen till största delen drivs av mättad zon (grundvatten).



Figur 15. Dynamik i vattenlagring – som visar stor variation under åren. För ett genomsnittligt hydrologiskt år  $S_{max}-S_{min}$  Degerö(torv): ~160 mm (125–200 mm), Svartberget(skog): ~110 mm (70–135 mm).

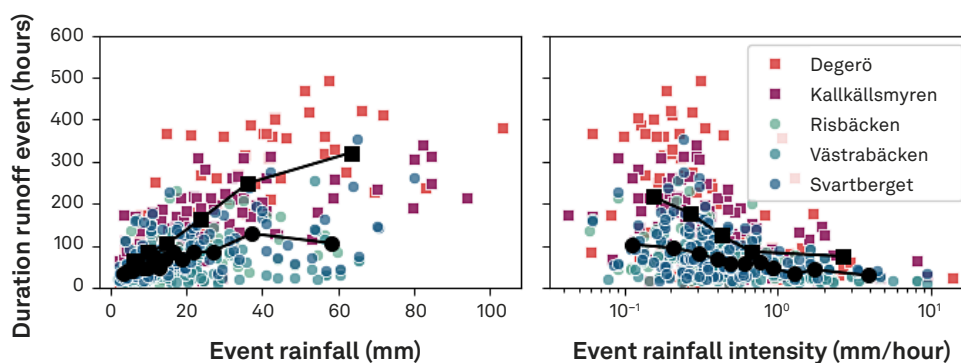
### 3.1.2 Analys av flödestillfällena (runoff episodes på engelska)

Om man flyttar fokus från den årliga vattenbalansen till analysen av enskilda flödestillfällena identifierades 120 flödestillfällen under perioden från början av 2014 till slutet av 2020 i vart och ett av fem mindre avrinningsområden: två torvdominerade avrinningsområden och tre avrinningsområden som domineras av skog på mineraljordar (tabell 1). Den maximala vattenföring som uppnåddes vid varje händelse ökade i förhållande till mängden nederbörd under timmarna före och under flödestillfällena (figur 16). För en given mängd nederbörd och initial lagring var toppflödets höjd högre från de tre skogbevuxna avrinningsområdena än för de torvmarksdominerade avrinningsområdena.



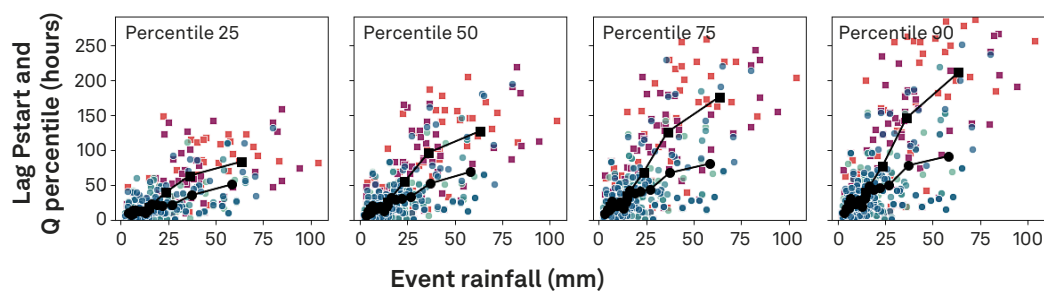
Figur 16. Ökning av avrinning till flödestopp (topp – initial avrinning). Svarta punkter representerar grupperade medelvärden för torvmarks- respektive skogsmarksdominerade områden.

Varaktigheten av flödestillfällena ökade med mängden nederbörd och minskade med intensiteten av nederbörden. Med andra ord gav mindre mängder av mer intensiv nederbörd kortare flödestillfällen än större mängder med mindre intensiv nederbörd. Torvmarkerna hade längre varaktighet av flödestillfällena än skogsavrinnsområdena, särskilt när den totala nederbörden var över 20 mm (figur 17).



Figur 17. Avrinnings varaktighet i förhållande till nederbördsvolym (vänster) och nederbördsintensitet (höger). Svarta punkter representerar grupperade medelvärden för torvmarks- respektive skogsmarksdominerade områden.

För att få en uppfattning om hydrograferas form, analyserades hur lång tid det tog mellan nederbördens början och när 25 %, 50 %, 75 % och 90 % av flödestillfällena hade runnit av (figur 18). I alla stadier av hydrografen tog det längre tid för vattnet att lämna torvtäkterna, särskilt mot slutet av flödestillfällena. Detta bekräftar att avrinningen från torvmarker är mer utspridd över tid.

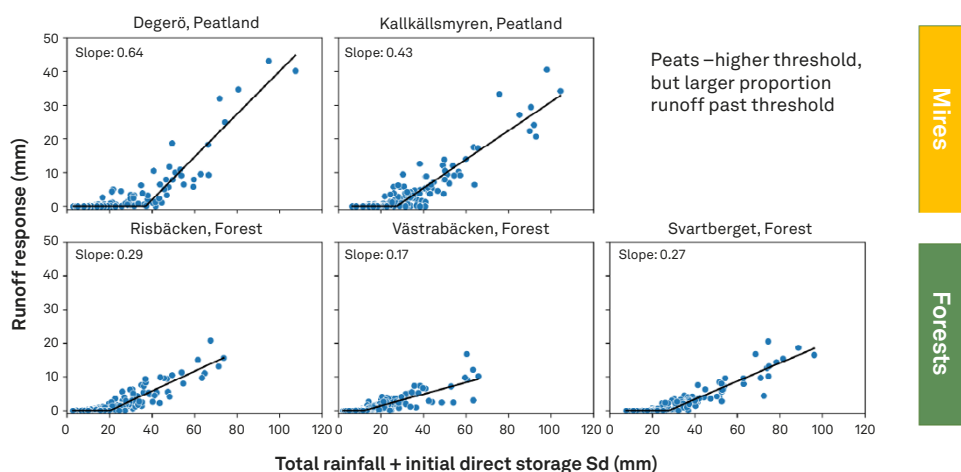


Figur 18. Fördröjning mellan nederbördens början och percentilerna för den totala vattenföringen, för percentilerna 25, 50, 75 och 90. Saker att notera: Skillnaderna främst för händelser > 20 mm. Absolut fördröjningsskillnad ökar med percentilen.

Tröskeln vid vilken avrinningsområden övergick från att lagra vatten till att släppa ut vatten plottades som en funktion av den initiala lagringen av vatten i avrinningsområdet och den totala mängden nederbörd. Alla avrinningsområden uppvisade ett tröskelvärdet för avrinningsrespons (figurerna 19 och 20). Om man bortser från de större flödestillfällena som drivs av snösmältning och endast tittar på nederbördsdrivna flödestillfällena där den totala mängden regn och den ursprungliga lagringen var mindre än 100 mm (figur 19) kan man se att efter att flödet har inletts rinner en stor del av den tillkommande nederbörden bort från torvmarkernas avrinningsområden (lutningar på 0.43 och 0.60 för förhållandet mellan avrinning och nederbörd)

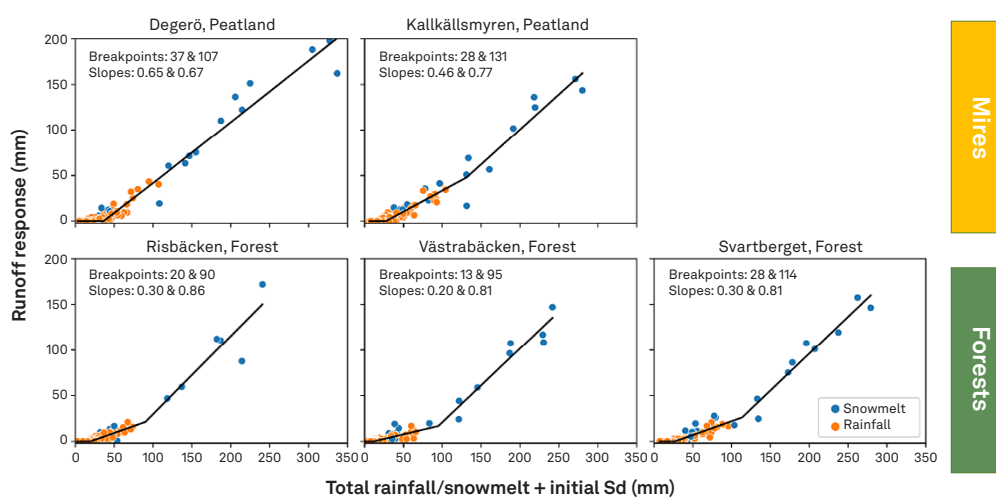


jämfört med skogsavrinningsområdena där lutningarna var under 0.3). Tröskeln för initiering varierade kraftigt mellan olika flödestillfällena och det fanns en tendens till en något högre tröskel för vattenlagring i avrinningsområdet innan avrinningen började öka från torvmark, men den stora spridningen gör att man inte kan säga att torvmarker nödvändigtvis har en högre tröskel.



Figur 19. Tröskelvärde för avrinning (nederbörd + föregående lagring) för regndrivna flödestillfällena. Linjer anpassade med bitvis linjär regression med noll lutning för första segmentet och en brytpunkt.

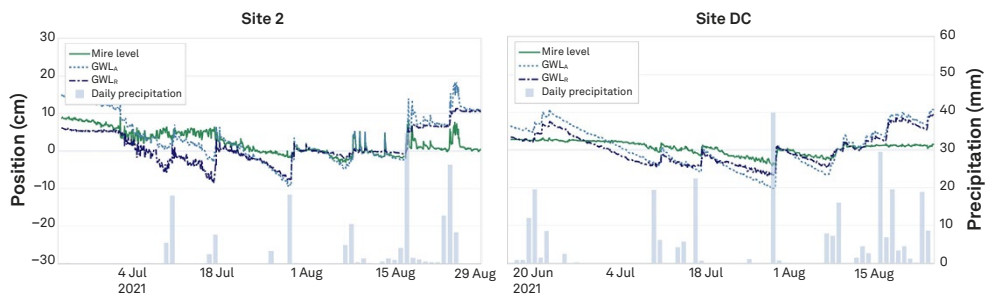
När man räknar in flödestillfällena med en total mängd initial vattenlagring och nederbörd/snösmältning som överstiger 100 mm, lämnar mer än två tredjedelar av det tillförda vattnet avrinningsområdet som avrinning under flödestillfällena (figur 20). Detta gäller för både torvmark och skogsavrinningsområden, där lutningen för extra tillförsel i förhållande till avrinning är 0.67 och 0.77 för de två torvmarkerna, och mellan 0.81 och 0.86 för de skogbevuxna avrinningsområdena.



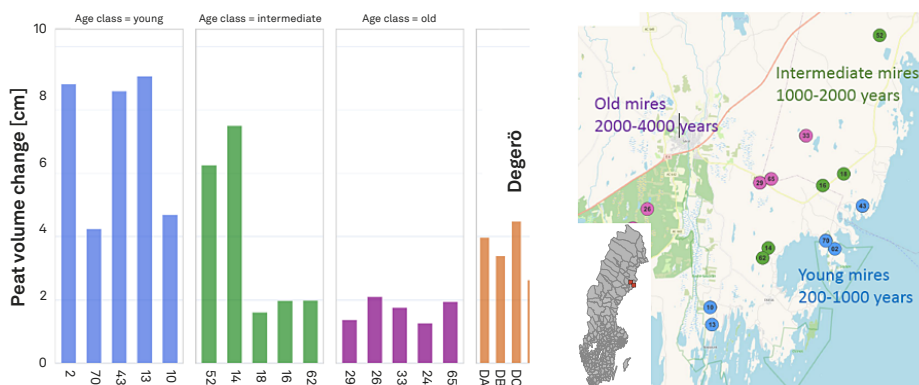
Figur 20. Initieringströskel för avrinning (nederbörd + föregående lagring) där snösmältnings flödestillfällena ingår. Linjer anpassade med bitvis linjär regression med noll lutning för första segmentet och två brytpunkter.

### 3.1.3 Mätningar av torvens lagringselasticitet

En av de ekohydrologiska processer som kan orsaka skillnader i hur torvmark transformerar nederbörd till avrinning är lagringselasticitet – torvmarkens förmåga att expandera eller krympa i vertikal led. Kontinuerliga mätningar av absolut och relativ grundvattennivå kvantifierade detta beteende på 15 myrar med olika geokemiska förutsättningar i ett liknande klimat, samt på Degerö Stormyr. Exempel av mätningar på en yngre och en äldre myr visar skillnader i torvytan, som beräknas från skillnader i den absoluta och relativa grundvattennivåer (figur 21).



Figur 21. Tidsserier av markytans nivå, absoluta vattenstånd och grundvattendjup i förhållande till myr ytan för lokalisation 2, en av de unga kronosekvenslokalerna (vänstra panelen), samt Degerö Stormyr/DC en av de äldre myrarna (högre panelen). Dygnsnederbörd som regn från stationen Umeå-Röbäcksdalen för Site 2 och Vindelns-Sunnansjönäs för den äldre myren.

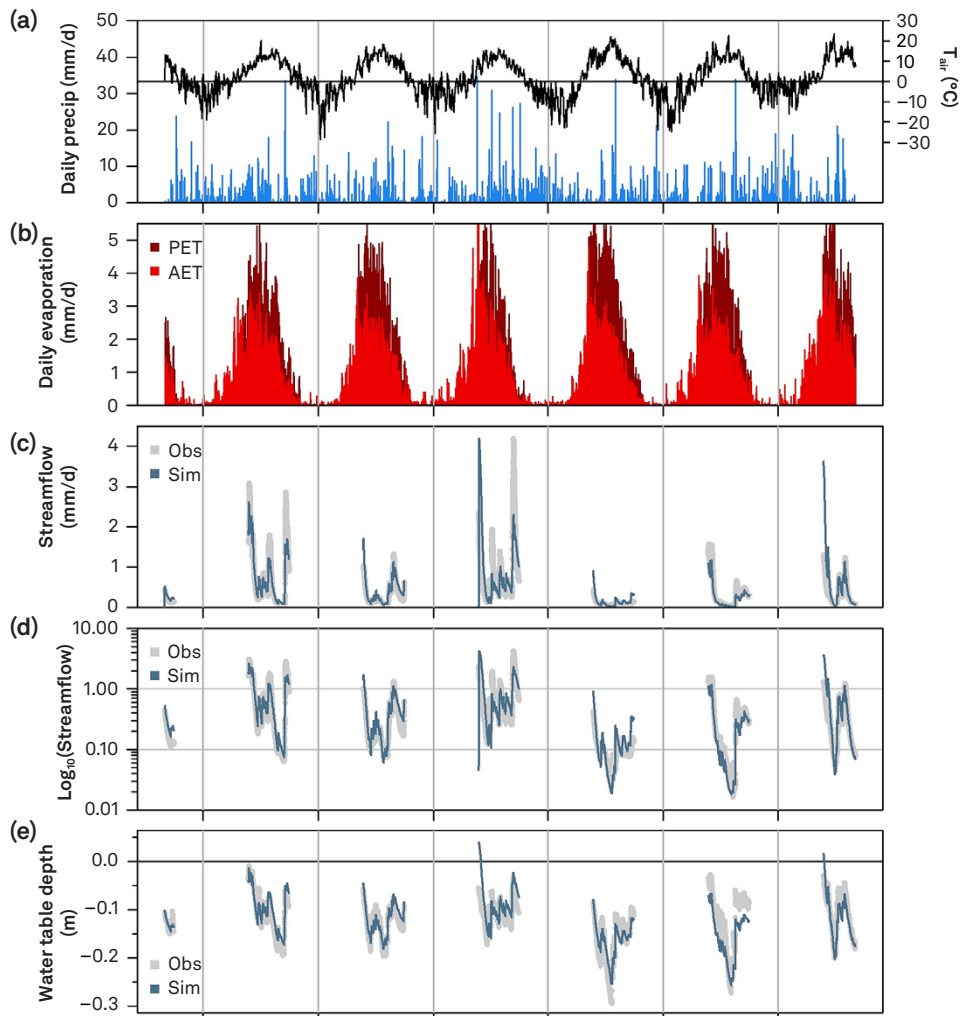


Figur 22. Torvens krympning och expansion tolkade som skillnaden mellan absolut och relativ grundvattenyta (90:e–10:e percentilen, vänster). Lokalisering av myrarna i ”Rising Coastline Mire Chronosequence” (SMC) områden nära Sävar, två mil norr om Umeå (höger). De tre ”Degerö” ytor är från Degerö Stormyr.

Resultatet visade att alla myrar hade lagringselasticitet (kapacitet att svälla och krympa), med en systematisk skillnad mellan de äldre (äldre än 2000 år) SMC myrar, som är mer näringsfattig i studieområdet, jämfört med yngre myrar (yngre än 1000 år) som är mer näringsrik (figur 22). Elasticiteten hos de äldre myrarna varierade mellan 15 och 20 mm, medan de yngre hade ett spann av 40–90 mm.

## 3.2 FF 2 – Hur ska torvmarks hydrologiska funktioner simuleras under framtida klimatscenarier?

Den nyutvecklade modellen PECOSIM kunde fånga dynamiken i torvmarksvattenlagring och vattenflöde. Både allmänna säsongsmönster och reaktioner på regn simulerades väl. Detta framgår av statistik över modellens prestanda (tabell 9) och visuell bekräftelse av de simulerade tidsserierna (figur 23). WTD kunde uppskattas med ett genomsnittligt fel (RMSE) på 0.02 m, där den återstående missmatchningen huvudsakligen härrör från för ytligt simulerat WTD under torkan 2018. RMSE för avrinningen är 0.53 mm/d, vilket återspeglas av den lägre KGE av qgs (0.78) jämfört med log(qgs) (0.87) orsakas av en underskattning av flödestoppar som en konsekvens av optimeringskriteriet  $\phi$  som fokuserar på log-transformering av avrinningen (figur 23d).



Figur 23. Drivdata (nederbörd, temperatur och evapotranspiration) och simuleringar med hjälp av den optimala parameteruppsättningen för optimeringskriteriet  $\phi$ . a) Dygnssummor av nederbörd och dygnsmedeltemperatur. b) Daglig potentiell och faktisk evapotranspiration. c) Observerat och simulerat vattenflöde. d) logaritmskt omvandlat vattenflöde. e) grundvattendjup.

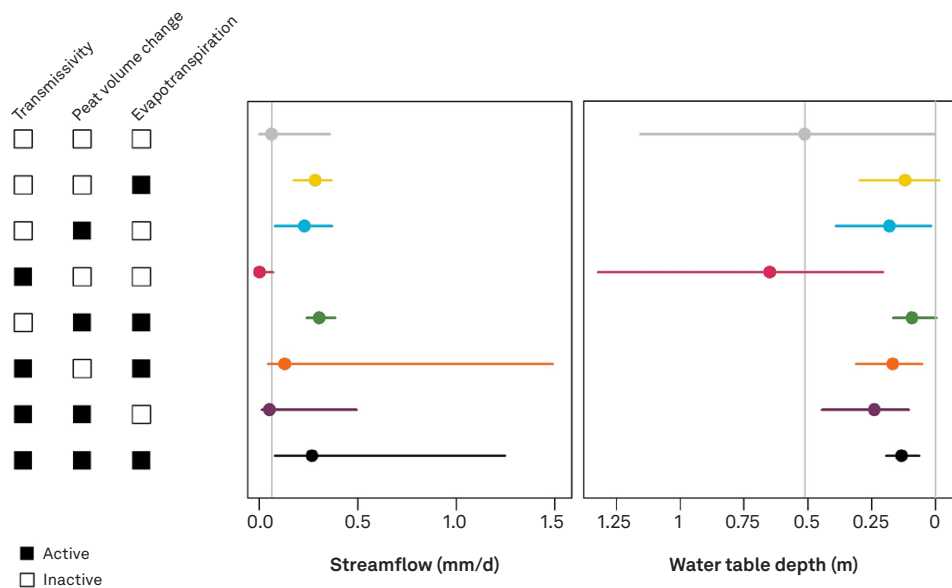
Om man optimerar enbart för avrinning eller grundvattennivå skulle modellens prestanda vara ännu bättre för variabeln av intresse (tabell 1). Det finns en kompromiss där optimering för grundvattendjup resulterar i minskad prestanda för simulering av avrinning och vice versa, och optimeringskriteriet  $\phi$  maximerar prestanda för båda. Modellens prestanda för årsflöde är sämre (KGE  $\log(q) = 0.75$ ) än för växtperioden (KGE  $\log(q_{gs}) = 0.87$ ).

**Tabell 9.** Översikt över modellens prestanda för olika målfunktioner med hänsyn till vattenföring ( $q$ ) och grundvattendjup (WTD) för hela året eller växstsäsongen (nedsänkt  $gs$ ). För alla målfunktioner presenteras Kling-Gupta-modellens effektivitetsvärden (KGE), förutom  $\phi$ .  $\phi$  är den viktade normaliserade NRMSE-målfunktionen (root mean square error) som tar hänsyn till både avrinning och WTD. De fetstilta värdena på diagonalen representerar målfunktionsvärdet för målet, kursivt modellprestanda för den simulering som används.

Objective	$q$	$q_{gs}$	$\log(q)$	$\log(q_{gs})$	WTD	WTD <sub>gs</sub>	$\phi$	RMSE $q_{gs}$ (mm/d)	RMSE WTD <sub>gs</sub> (m)
$q$	<b>0.76</b>	-0.4	0.46	0.4	-0.57	-0.35	37.2	1.25	0.16
$q_{gs}$	0.38	<b>0.78</b>	0.34	0.3	0.36	0.36	16.0	0.37	0.04
$\log(q)$	0.59	0.63	<b>0.75</b>	0.78	0.55	0.55	15.2	0.49	0.05
$\log(q_{gs})$	0.5	0.37	0.66	<b>0.87</b>	0.59	0.52	10.1	0.68	0.03
WTD	0.5	0.13	0.03	0.07	<b>0.87</b>	0.88	15.1	0.86	0.02
WTD <sub>gs</sub>	0.5	0.13	0.03	0.07	0.87	<b>0.88</b>	15.1	0.86	0.02
$\phi$	0.4	0.64	0.51	0.85	0.82	0.87	<b>10.3</b>	0.53	0.02

Med alla återkopplingar aktiverade var det simulerade medianflödet 313 % större än med en modell utan återkopplingar (figur 24; (se tabell 10). Kombinationen av alla återkopplingar leder till det största basflödet och medianflödet av alla andra enskilda kombinationer. Jämfört med referensen utan återkopplingar främjar elasticitet och WTD-ET-återkoppling basflöde och medianflöde, men toppflödet förblir detsamma. Det totala flödet under växstsäsongen ökade 88 % genom lagringselasticiteten och 131 % genom WTD-ET-återkopplingen, i förhållande till referensen utan återkopplingar. Effekterna av dessa två återkopplingar är dock inte unikt additiva, eftersom deras kombination resulterar i en ökning på 150 % i förhållande till referensen. När båda dessa återkopplingar är i drift är intervallet mellan basflöde och toppflöde mindre, vilket indikerar att flödet är utjämnat.

I motsats till vår hypotes minskar ”transmissivity feedback” simulerat basflöde, medelflöde och toppflöden jämfört med referensen utan återkopplingar. Detta framgår av ett basflöde ( $q_{10}$ ) på 0 mm/d när ”transmissivity feedback” är aktiverat, oavsett om det är i kombination med elasticitet eller inte, vilket innebär att vattendrag nedströms torkar ut. Orsaken är att den höga transmissiviteten nära markytan tömmer det lagrade vattnet redan i början av växstsäsongen. Medianen för transmissiviteten under växstsäsongen var  $2.1 \text{ m}^2\text{d}^{-1}$  och djupmedelvärdet för  $K_s$  är 0.92 m/d, men varierade kraftigt över tid beroende på hur mycket vatten som var i avrinningsområdet. Transmissiviteten och profilgenomsnittet  $K_s$  varierade under växstsäsongen mellan 0.6 och  $11.5 \text{ m}^2\text{d}^{-1}$  och 0.26 och 4.79 m/d, vilket motsvarar kvantilen 5 % respektive 95 %.



Figur 24. Effekten av återkopplingar på specifik vattenföring (vänster) och grundvattendjup (höger) under den frostfria växetsäsongen (21 maj – 30 september). Linjernas ändpunkter representerar basflöde och toppflöde (5 % och 95 % kvantil; vänster) och det djupaste och grundaste grundvattendjupet (5 % och 95 % kvantil; höger). Cirkelar representerar medianflödet (vänster) och medianvattendjupet (höger). Den vertikala grå linjen representerar referensens medianvärde utan återkopplingar.

Tabell 10. Sammanfattning av hur de tre ekohydrologiska återkopplingarna implementeras i modellen.

Process	Symbol	Beskrivning och angreppssätt
Transmissivity feedback	C	Minska transmissiviteten med djupare grundvattennivå genom att ta hänsyn till en kraftig minskning av hydraulisk konduktivitet med djupet
Elastic storativity feedback	S	Elastiskt lagringskoncept enligt Nijp, Metselaar et al. (2017b) genom att inkludera en specifik lagringsparameter
Evapotranspiration – WTD feedback	E	Minska potentiell evapotranspiration vid djupare grundvattennivå
None	B	Basscenario: Den hydrauliska konduktiviteten är homogen i hela torvprofilen. Ingen elastisk lagring: specifik lagring = 0 m <sup>-1</sup> . Ingen effekt av grundvattennivån på faktisk evapotranspiration: fWTD = 1

## 3.3 FF 3 Hur kan de specifika frågorna kring våtmarksförvaltning hanteras i ett beslutsstödsverktyg?

### 3.3.1 YtSim beslutstöd utvecklingen i samarbete med referensgrupp

Arbetet med de tre delmomenten (kontakter med referensgruppen, avstämningar mellan projektgrupper, beställningar till IT-funktioner) pågick mellan 2020 och 2023.

Referensgruppen fick under oktober 2020 svara på en enkät med 18 frågor för att hjälpa projektet identifiera behoven av beslutsstöd för våtmarksplanering. Frågorna bestod av såväl flervalsfrågor som öppna frågor. Referensgruppen fick sedan ta del av de sammanställda svaren. Pandemin förhindrade fysiska möten med referensgruppen under en längre tid så alla kontakter fick ske digitalt.

Efter enkätsvaren sammanställdes började diskussionerna mellan projektgrupper om hur YtSim kan vidareutvecklas för att inkludera scenarier med anlagda våtmarker. Forskare från SMHI beskrev hur anlagda våtmarker hanteras i S-HYPE och detta blev vägledande för hur de skulle hanteras i YtSim. Kortfattat behöver våtmarkers area och variationer i inflöde och utflöde beskrivas med ett antal parametrar och variabler som till stor del kan hämtas från S-HYPE och andra forskningsinsatser inom EviWet.

Den 22 april 2021 arrangerades ett digitalt referensgruppsmöte för att informera om projektarbetet och hämta synpunkter inför olika vägval. Delar som diskuterades under mötet var syftet med EviWet, vad som händer just nu, lärdomar från enkätsvaren, skiss över verktyg för beslutsstöd (YtSim), samt planen för det fortsatta arbetet och hur referensgruppen ska involveras.

Under det kommande året genomfördes en större IT-insats då en våtmarks-komponent utvecklades i YtSim. Den 14 juni 2022 lanserades verktyget för den breda allmänheten i SMHI Vattenwebb. Denna version av YtSim kunde simulera effekter av anlagda våtmarker, dvs våtmarker som dämms upp med fri vattenyta, men krävde relativt höga tekniska kunskaper för att användas (figur 25). Referensgruppen testade verktyget och flera medlemmar återkom snabbt med önskemål om ett enklare och mer användarvänligt gränssnitt.

← → ↻ vattenwebb.smhi.se/ytsim/

# YtSim

Om YtSim Scenario % Simulera X

## Om YtSim

YtSim är ett scenarieredskap som beräknar hur ytavrinningspåverkan av vädervariation, regleringar och vattenuttag. Verktyget kan användas för att utvärdera olika åtgärdsrelativa effekter på ytavrinningsgången i en övergripande kanslighetsanalys.

### Resurser

- Ladda ner användarmanual [.pdf]
- Ladda ner Om-verktyget YtSim 1.0 [.pdf]
- Ladda ner beräkningsexempel för våtmark [.pdf]

Läs om hur tjänsterna på vattenwebb.smhi.se uppfyller lagen om tillgänglighet till digital offentlig service.

Tillgänglighetsredogörelse för SMHI Vattenwebb

← → ↻ vattenwebb.smhi.se/ytsim/

# YtSim

Om YtSim Scenario % Simulera X

Vid mätstation

BAS + ALFA + BETA

BAS

Namn  
Vid mätstation

Subid  
4308

Våtmark

Våtmark

Area [ha]  
10

Wetrate  
0,177

Wetexp  
2

Inflödesfaktor

← → ↻ vattenwebb.smhi.se/ytsim/

# YtSim

Om YtSim Scenario % Simulera X

Vid mätstation

## Simulera

Startdatum: 2004-01-01 Slutdatum: 2004-12-01

Kör simulering Spara scenario Öppna scenario

### Resultat

Utförelse för Vid mätstation

Figur 25. Den första versionen av YtSim med våtmarksfunktion lanserades i juni 2022 och hade tre flikar: Om YtSim, Scenario, samt Simulera.

Under 2023 genomfördes detaljerade intervjuer med fem olika medlemmar ur referensgruppen av två UX designers från SMHI. Syftet med intervjuerna var att kartlägga hur våtmarkshandläggare helst vill arbeta med ett verktyg för beslutsstöd och på så sätt lägga grund för en förbättrad och mer användarvänlig version av YtSim. Intervjuerna sammanfattades och gav inspel till ny utveckling av verktyget. Den 4 december 2023 lanserades en ny, förbättrad version av YtSim som anpassats efter önskemål från referensgruppen (figur 26). Den nya versionen är både enklare och snabbare att använda för att simulera effekter av anlagda våtmarker i landskapet, dvs våtmarker med vattenspegel.

Många förbättringar skedde mellan den första och andra versionen av YtSim:

- Uppdaterad användarmanual på första sidan.
- Nytt gränssnitt med förenklade instruktioner.
- Bättre stöd för våtmarkssimulering:
  - Nytt ritverktyg för våtmarker i kartan.
  - Automatisk beräkning av våtmarkens area när man ritat en våtmark i kartan.
  - Automatisk beräkning av våtmarkens uppströmsarea, dvs storleken på våtmarkens tillrinningsområde.
  - Standardvärde för våtmarkens utflödeskoefficient som baseras på mätningar från uppmätta våtmarker, och som kan redigeras av användaren vid behov.
  - Summering av resultat i översiktlig tabell, inklusive mått på ”flödesdämpning” som våtmarken bidrar med.
- Resultaten från simuleringarna kan sparas i pdf-format och läggas som bilaga till ansökningar, planer eller rapporter.
- Alla resultat kan laddas ner i excel format, och scenarier kan sparas/öppnas för senare bruk eller för delning med andra användare.

Direktlänk till nya YtSim: <https://vattenwebb.smhi.se/ytsim-eviwet/>

Nya YtSim har kommunicerats till referensgruppen, på SMHI Vattenwebb (<https://vattenwebb.smhi.se>) och på projektets webbsida (<https://www.smhi.se/eviwet/nyheter-eviwet/uppdaterat-scenarioverktyg-1.202562>). I början av 2024 kommer kommunikation om verktyget ske i flera kanaler.



YtSim - Simulering av åtgärdseffekter

**Kort instruktion**

**Välj område**  
Du kan välja ett eller flera områden (rubid) i kartan där du vill simulera ett scenario.

**Skapa scenario**  
Du kan skapa scenarier med våtmarker, sjöregleringar och vattenuttag.  
Det går också att anlägga en lokal våtmarkssimulering i ett avgränsat område. Detta görs genom att rita inom ett fast område, ett subid.

**Kör simulering**  
När du skapat ett scenario kan du beräkna effekterna av ditt scenario genom att köra en simulering och jämföra flöden och vattennivåer med utan scenario.  
Det går att köra simulering utan att göra egna inställningar.

[Kom igång →](#)

**För mer information:**  
[Ladda ner användarmanual](#)  
Läs om hur tjänsterna på vattenwebb.smhi.se uppfyller lagen om tillgänglighet till digital offentlig service.  
[Tillgänglighetsredogörelse](#)

YtSim - Simulering av åtgärdseffekter

**Välj område**  
Välj område  
Vid mätstation  
Subid: 4308  
Ta bort område

**Skapa scenario**  
Våtmark Reglering Vattenuttag  
Rita ett område där du vill skapa en lokal våtmarkssimulering. Detta område ska vara inom Vid mätstations gränser.

[Redigera våtmark](#)

Area: 4 ha  
Uppströmsarea: 743.53 ha

Utfliedskoefficient: 0.437  
Faktor för hur snabbt vatten kan tömmas ur våtmarken.

**Kör simulering**  
Startdatum: 2018-01-01  
Slutdatum: 2018-12-31  
Tidsgång: 1981-01-01  
Senast: 2018-12-31  
[Kör simulering →](#)

YtSim - Simulering av åtgärdseffekter

**Simulering**  
Välj område  
Vid mätstation  
Subid: 4308

**Sammanfattning**  
[Ladda ner scenario](#) [Ladda upp scenario](#)

Variabel	Grundmodell	Scenario
Maxflöde (m³/s)	0.43	0.49
Minflöde (m³/s)	0.00	0.00
Flödesamplitud (m³/s)	0.43	0.49
Flödesdämpning (%)		22.23

**Utfliede för Vid mätstation**

[Ladda ner dataseter: Utfliede för Vid mätstation \[xlsx\]](#) [Visa dataseter](#)

Figur 26. Den andra versionen av YtSim med enklare och mer användarvänligt gränssnitt.

Våtmarksberäkningen i YtSim går kortfattat till på följande sätt:

1. Användaren ritar en våtmark i kartan och arean hos den ritade polygonen beräknas av verktyget.
2. Våtmarkspolygonen överlagras ett 10\*10 meters raster med förberäknad uppströmsarea (se tidigare kapitel **S-HYPE och anlagda våtmarker**). Den rastercell med högst uppströmsareal antas beskriva våtmarkens uppströmsareal.
3. Våtmarkens uppströmsareal jämförs med modellområdets (subid) area:
  - a. Om den är mindre beräknas kvoten mellan dessa arealer och våtmarkens inflöde beräknas som denna kvot multiplicerad med den lokala markavrinningen i modellområdet (subid).
  - b. Om den är större beräknas våtmarkens inflöde som det totala flödet från alla uppströmsliggande modellområden (subid).
4. Våtmarkens inflöde subtraheras från totala inflödet i modellområdet.
5. Våtmarkens vattennivå och utflöde beräknas genom balans mellan inflöde, mellanlagring och utflöde. Utflödet beräknas med avbördningssambandet  $Q = k \times W^2$ , där  $Q$  är utflödet i m<sup>3</sup>/s,  $k$  är utflödeskoefficient, och  $W$  i meter är våtmarkens vattenstånd ovan utloppströskeln. Verktyget uppskattar ett rimligt värde för utflödeskoefficienten  $k$  baserat på mätningar från anlagda våtmarker, men  $k$  kan även väljas fritt av användaren.
6. Våtmarkens utflöde adderas till totala inflödet i modellområdet och beskriver nu våtmarkens dämpning och fördröjning av vattenflödet.

En komplett teknisk dokumentation av verktyget som skrivits av SMHIs systemutvecklare finns tillgänglig. Verktyget YtSim förvaltas tills vidare inom ramen för SMHIs arbete med vattenförvaltning och är tillgängligt för allmänheten via SMHI Vattenwebb, en portal för vattenrelaterade tjänster vid SMHI med ca 200 000 besök årligen.

YtSim erbjuder nu ett verktyg för att utvärdera hydrologiska effekter av anlagda våtmarker med några få knapptryckningar, och resultaten kan sparas i pdf-format som bilaga till våtmarksprojektansökningar. De anlagda våtmarkerna beskrivs på ett liknande sätt som i S-HYPE och baseras på mätdata. I framtida projekt kan funktionerna vidareutvecklas ytterligare och det finns flera önskemål från referensgruppen:

- Beskriva våtmarkens tillrinningsområde mer detaljerat (utsträckning i kartan, typer av markanvändning, etc.).
- Simulera effekter av pluggade diken i torvmarker, dvs den typ av våtmarksrestaurering som också undersökts inom EviWet.
- Simulera effekter av klimatförändringar, dvs utvärdera hydrologiska effekter av våtmarksprojekt i ett förändrat klimat.
- Beräkna effekter på ekologisk status, dvs utvärdera hur våtmarksprojekt påverkar status hos den hydrologiska regimen i nedströmsliggande områden.

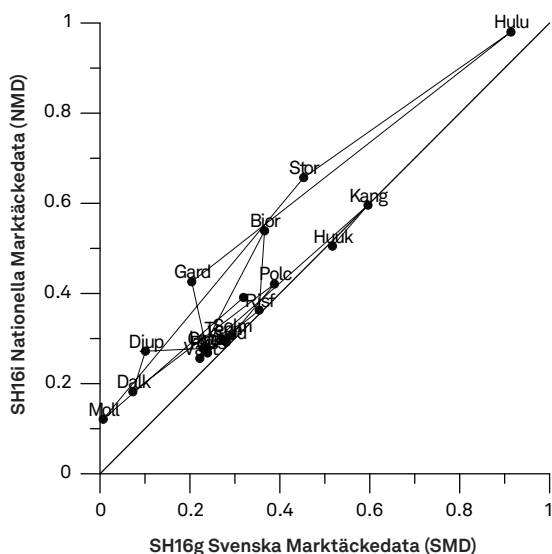
### 3.3.2 Operationell modellering med S-Hype

#### S-HYPE OCH TORVAREA

I den databas som sammanställdes över områden i S-HYPE med hög andel våtmark (tabell 11) redovisas dels den ursprungliga andelen våtmark, från SMD, och dels den andel som togs fram baserat på den senare använda NMD. Vad som räknas som myrar och våtmarker skiljer alltså en hel del mellan olika databaser, med en genomsnittligt högre andel i den nyare databasen, även om skillnaderna i allmänhet inte är så stora som i exemplet Stubbetorp ovan. Skillnaderna mellan de två markanvändningarna framgår även i figur 27. Notera att alla områdena med högst andel våtmark, utom Hulubäcken, är av kategorin temporära stationer, med endast några få års data. De temporära stationerna har stationsnummer över 90 000.

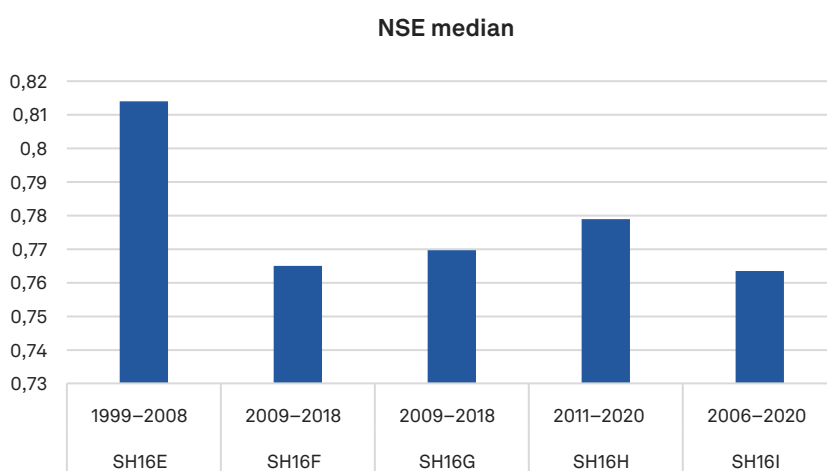
**Tabell 11. Databas över SMHI:s vattenföringsstationer i områden med minst 25 % myr- och våtmarker eller torv i S-HYPE2016g, baserad på SMD.**

STNNR	STATIONSNAMN	HARO	SH16g SMD	SH16i NMD	Torv
90016	Huuki	1	52 %	51 %	61 %
90017	Kangos	1	60 %	60 %	69 %
1740	Övre Lansjärv	4	24 %	28 %	36 %
1963	Vuoddasbäcken	7	28 %	29 %	37 %
2002	Solmyren	7	29 %	31 %	33 %
90076	Polcirkeln	7	39 %	42 %	52 %
2409	Dalkarså	25	7 %	18 %	25 %
90054	Djupmyran	25	10 %	27 %	38 %
1574	Gråtanbäcken	38	23 %	28 %	33 %
90011	Björnån	40	37 %	54 %	64 %
90013	Risflokojan	40	35 %	36 %	52 %
2397	Västra Ärnäs	53	22 %	26 %	28 %
90043	Tennan	53	27 %	30 %	34 %
90044	Ryssån	53	24 %	27 %	31 %
1207	Gårdsilt	100	20 %	43 %	43 %
2305	Hulubäcken	101	91 %	98 %	96 %
90023	Store mosse Gislaved	101	45 %	66 %	64 %
90025	Mollsjönäs	108	1 %	12 %	33 %
Medel			32 %	39 %	46 %



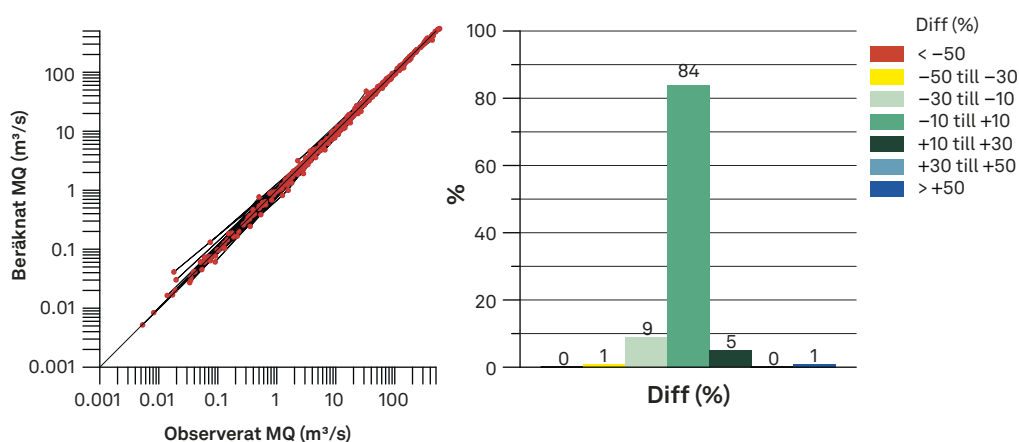
Figur 27. Andel myrmark myr- och våtmarker i S-HYPE16g mot andel myrmark i S-HYPE16i.

Figur 28 visar vilka versioner av S-HYPE som har kommit ut i vattenwebb under projektet EviWets gång (2020–2023). Antalet vattenföringsstationer har under tiden ökat från 492 till 525. Detta bidrar till att anpassningsmålet NSE har sjunkit från SH16E till SH16F. Den största orsaken till det lägre anpassningsmålet är dock att tidsperioden har flyttats fram. Då kommer inte de blöta åren runt år 2000 längre med i kalibreringen. Under dessa blöta år är det helt enkelt lättare att få ett högt NSE. Förbättringar som påverkar våtmarkerna har införts i S-HYPE succesivt under projektets gång, liksom kommit till nytta i andra studier, såsom exempelvis uppskattning av nedströmseffekter från återvätning av dikad skog på torv (Shützer m.fl., 2023).



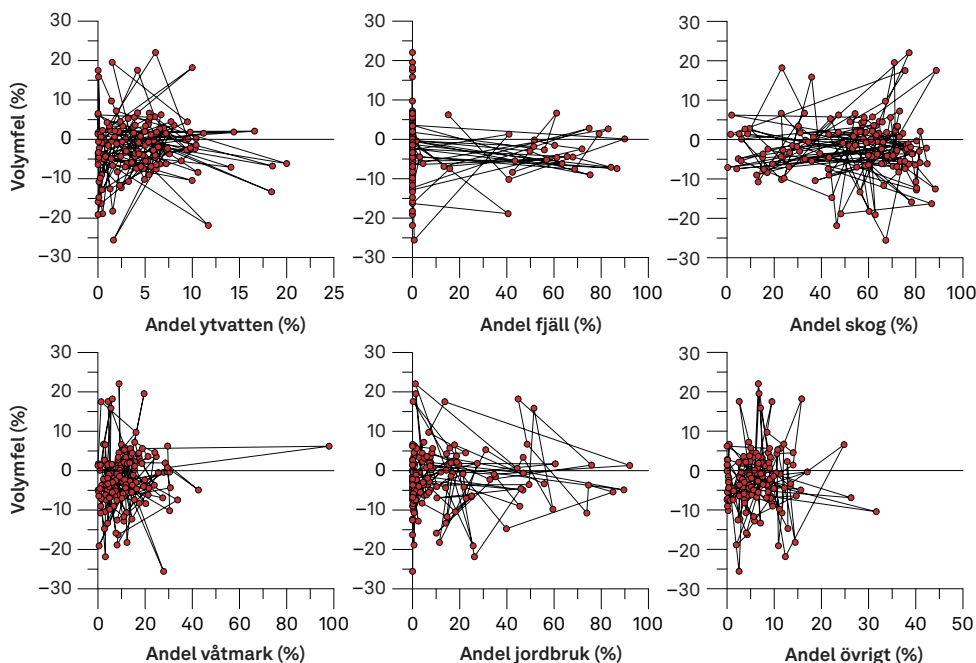
Figur 28. Versioner av S-HYPE som har kommit ut i vattenwebb under projektet Eviwets gång (2020–2023) och tillhörande anpassningsmätt NSE.

Anpassningen för den senaste versionen i vattenwebb (SH16i) sammanfattas i figur 29. Medelavrinningen, som mäts med hjälp av volymfelet stämmer som synes i figuren i de allra flesta områdena i modellen.



Figur 29. Volymfelet för kalibreringsperioden vid de mätstationer som ingår i S-HYPE, version SH16i. I 84 % av mätstationerna ligger volymfelet inom 10 % (höger).

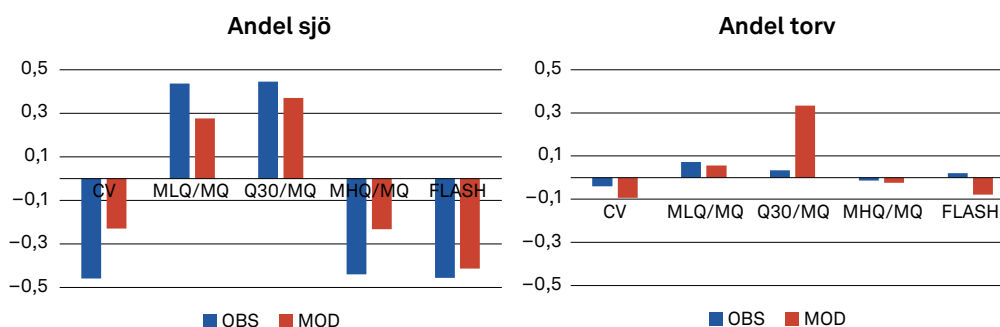
Figur 30 visar resultatet av kalibreringen för de parametrar som beror av markanvändning, varav våtmarker är en. Figuren visar att volymfelen är okorrelerade med vilka marktyper som finns uppströms stationerna. Hulubäcken framträder tydligt i grafen för våtmark, med en andel över 90 %.



Figur 30. Volymfelet för kalibreringsperioden vid de mätstationer som ingår i kalibreringen av S-HYPE, version SH16I, små och medelstora områden.

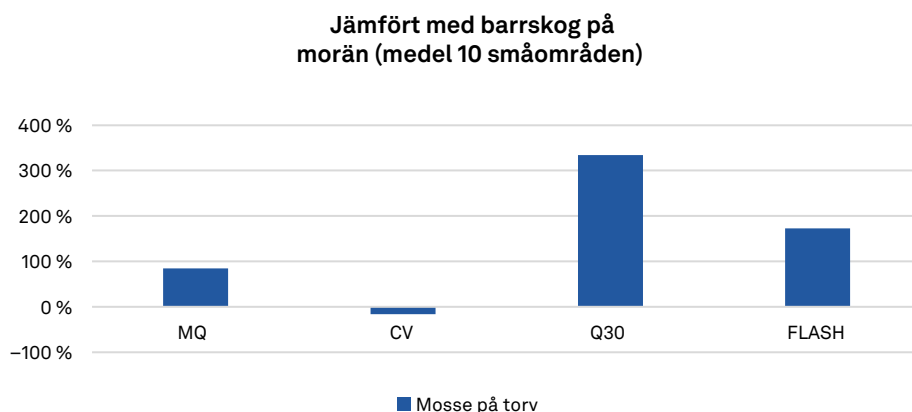
### S-HYPE JÄMFÖRELSE AV BARRSKOG PÅ MORÄN OCH MOSSE PÅ TORV

Figur 31 visar korrelationen mellan olika flödessignaturer och andel sjö respektive andel torv. Analysen gjordes både för mätvärdena (OBS) och för de beräknade värdena från S-HYPE (MOD). För mätningarna (OBS) är alla signaturerna signifikant korrelerade med andelen sjö, medan för modellen (MOD) är endast Q30/MQ och FLASH signifikanta. Andelen torv är endast signifikant korrelerad med modellens Q30/MQ. Resultaten visar att den klart viktigaste faktorn är andelen sjö, och att effekten av andelen torv är liten. Visare ses att S-HYPE i stort sett beskriver sjöarnas effekt på ett bra sätt, men alltså underskattar betydelsen av sjöarna en aning, och överdriver torvens positiva betydelse för basflödet Q30/MQ.



Figur 31. Korrelationen mellan olika flödessignaturer och andel sjö respektive andel torv. Kalibreringsdata för SH16I, 2006–2020.

Skillnaderna i simulerad avrinning mellan våtmark på torv och barrskog på morän som baserat på de parametervärden som erhållits genom modellkalibreringen framgår av figur 32. Medelavrinningen (MQ) från våtmarker är betydligt högre än från barrskogen. Även basflödet Q30 blev betydligt högre, delvis dock troligen beroende på den högre avrinningen (MQ). Här kan det dock vara värt att påpeka att analysen ovan om flödessignaturer antydde att S-HYPE överskattade Q30 för torv. Att medelavrinningen från våtmark skulle vara så mycket högre än från barrskog är möjligen oväntat. Samtidigt kom Lindström (2019, figur 17) fram till att avdunstningen från våtmark var cirka hälften så stor som från skog, vilket alltså överensstämmer kvalitativt med resultatet här. För övriga undersökta flödessignaturer var skillnaderna små. I norra Sverige gav en högre snösmältningshastighet en tidigare snösmältning för våtmarksklassen jämfört med skogsklassen, och därigenom en tidigare och ibland också högre vårtopp för mossens avrinning. Fortsatta studier av hur mark- och jordarter påverkar avrinningen bör göras för att minska osäkerheter i modellberäkningar, och helt nya möjligheter till detta finns nu i och med den samlade informationen i S-HYPE.



Figur 32. Skillnader i flödessignaturer mellan mosse på torv och barrskog på morän, enligt S-HYPE-simuleringar.

## S-HYPE OCH ANLAGDA VÅTMARKER

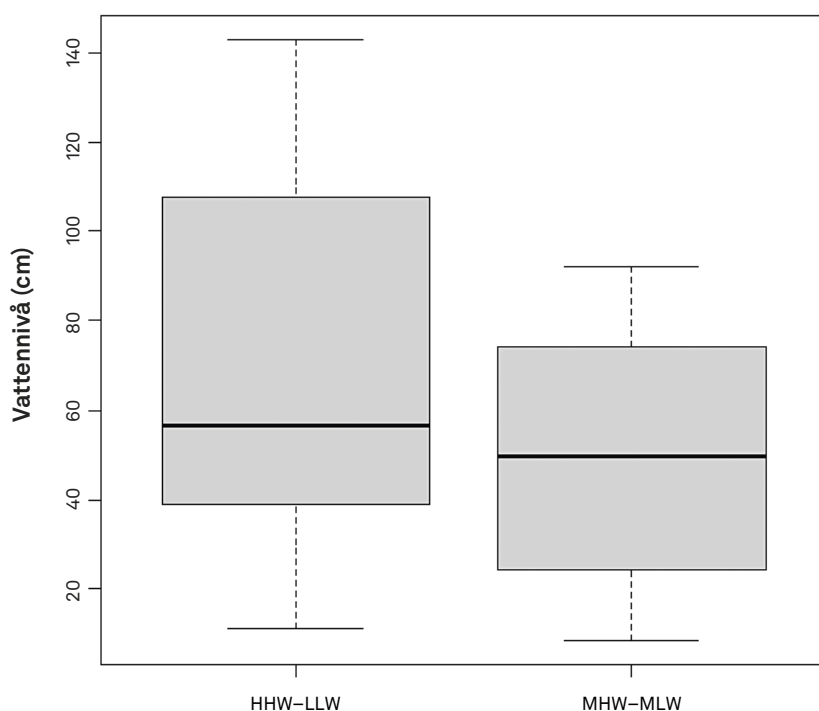
Nio svar inkom efter förfrågan om nivåmätningar i våtmarker. Dessa omfattade totalt mätdata från 14 anlagda våtmarker. För 12 stycken anlagda våtmarker fanns tidsserier (dock olika tidsperioder) och för dessa beräknades olika variationsmått, främst den normala vattenståndsvariationen över året. Detta beräknades som medel av årshögsta – medel av årslägst (MHW–MLW). Medelvärdet för detta mått, över alla områdena blev 50 cm (tabell 13 och figur 33). För de 4 stycken dikade, eller sänkta, våtmarkerna blev HHW–LLW 93 cm (högsta–lägsta) och MHW–MLW 66 cm (tabell 12). Medelvärdet för skillnaden mellan högsta och lägsta vattennivå (HHW–LLW) för våtmarkerna med tidsserier blev 69 cm (tabell 12). Mätningarna spänner över olika tidsperioder, från år 1994 till 2020, med de flesta observationer från cirka år 2010. Tillrinningsarean för dessa 12 stycken anlagda våtmarker bedömdes i genomsnitt vara cirka 134 km<sup>2</sup>. Med hjälp av dessa värden går det att bättre modellera anlagda våtmarkers hydrologiska effekter i landskapet, och specifikt hur våtmarker fylls på och dräneras på vatten under varierande väderförhållanden. Lagringskapaciteten är en viktig faktor för att bedöma våtmarkers påverkan på nedströms vattenflöden.

**Tabell 12. Sammanfattning av variationen i vattennivå (cm) för 14 stycken anlagda våtmarker och 4 stycken dikade våtmarker. HHW–LLW = högsta–lägsta, MHW–MLW = medel av årshögsta – medel av årslägsta.**

<b>Anlagda våtmarker</b>	<b>HHW–LLW</b>	<b>MHW–MLW</b>
Råbytorp (H7)	129.5	92
Genarp (H38)	39	29
Slogstorp (K129)	73	49
Böringe	60.5	34.9
Fru Alstad	42.8	17.3
Husebymaden	143	74.9
H37	22.1	19.4
H25	52.9	50.2
H57	11	8.4
H80	120.6	73.2
H78	91.2	69.4
Stångbydammen	107.7	84.8
Bergaholm	23.2	--
Nybble	49.6	--
<b>Dikade våtmarker</b>		
Mycklemossen, N-stream-1	49	30.6
Mycklemossen, S-stream-5	51.8	36.0
Kävsjön	156	113
Häradsösjön	116	85

**Tabell 13. Statistik av värden i tabell 2 för anlagda våtmarker. HHW–LLW = högsta–lägsta, MHW–MLW = medel av årshögsta – medel av årslägsta.**

<b>Vattennivåskillnad (cm)</b>	<b>HHW–LLW</b>	<b>MHW–MLW</b>
Medelvärde	69.0	50.2
Standardavvikelse	42.8	28.5
Min	11.0	8.4
25-perc	40.0	26.6
Median	56.7	49.6
75-perc	103.6	73.6
Max	143.0	92.0
Antal	14	12
Saknade värden	0	2



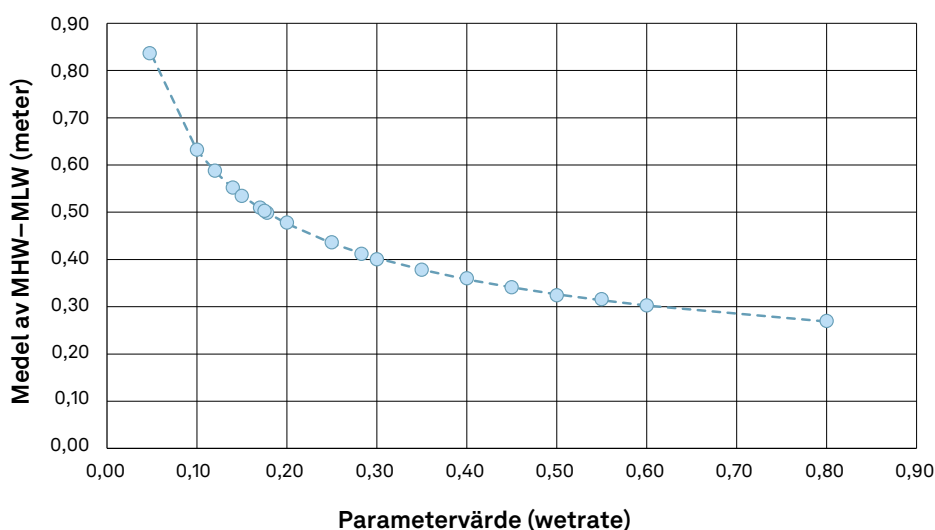
Figur 33. Statistik över vattenståndsvariationerna i 12 våtmarker. HHW-LLW = högsta-lägsta, MHW-MLW = medel av årshögsta – medel av årslägsta.

Parametern *wetrate* i S-HYPE, ställdes in så att den genomsnittliga vattenståndsvariationen i de anlagda våtmarkerna i modellen blev 50 cm, det vill säga medelvärdet för MHW-MLW i tabell 13. Anpassningen bygger på variationerna i alla de anlagda våtmarkerna som är inlagda i S-HYPE, för tidsperioden 2017–2021. Det erhållna parametervärdet blev = 0.177. Parametern styr hur mycket vatten per tidsenhet som flödar ut ur den anlagda våtmarken vid ett visst vattenstånd. Anpassningen framgår av figur 34, som också illustrerar hur vattenståndsvariationen beror av parametervärdet. Detta värde skaleras i HYPE efter uppströmsarea *areapp* så att den effektiva avbördningsparametern *rate* blir:

$$rate = wetrate \times areapp^{0.45}$$

Skaleringen för uppströmsarea i form av exponenten 0.45 bygger på erfarenheten från modellering av sjöar i S-HYPE. Det framtagna värdet på parametern *wetrate* är tänkt att kunna användas som en första uppskattning av avbördningsförmågan hos en anlagd våtmark i YtSim, och som standardvärde i S-HYPE. I YtSim kallas parametern *rate* för ”utflödeskoefficient”.

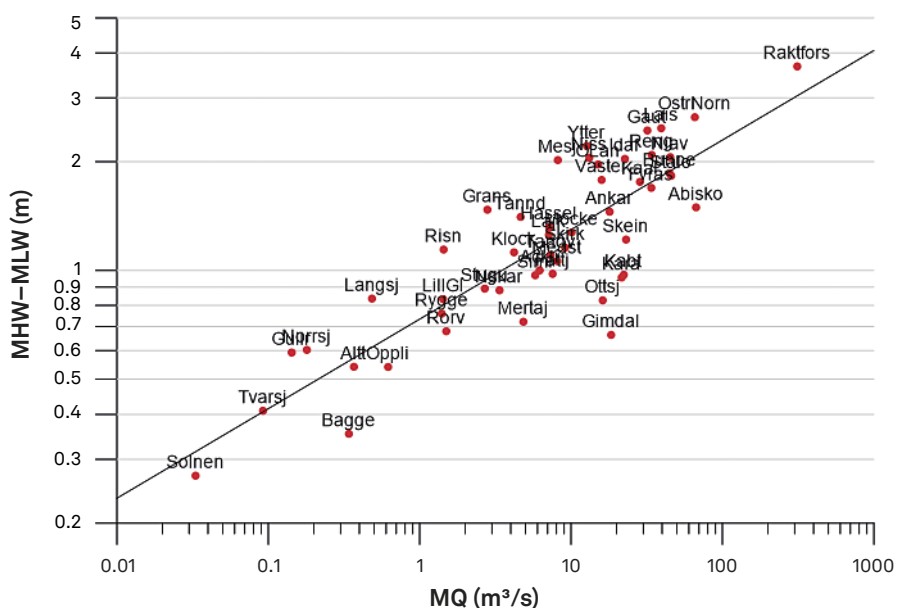




Figur 34. Genomsnittlig vattenståndsvariation för de anlagda våtmarkerna i S-HYPE beroende av modellparametern wetrate. MHW-MLW = medel av årshögsta – medel av årslägsta.

En viktig detalj gällande anlagda våtmarker är vilken typ av utlopp som de har, alltså hur vattennivån regleras. Regleringsmunkar är ett tämligen vanligt sätt att reglera vattennivån men det är oklart vilket avbördningssamband som ska användas.

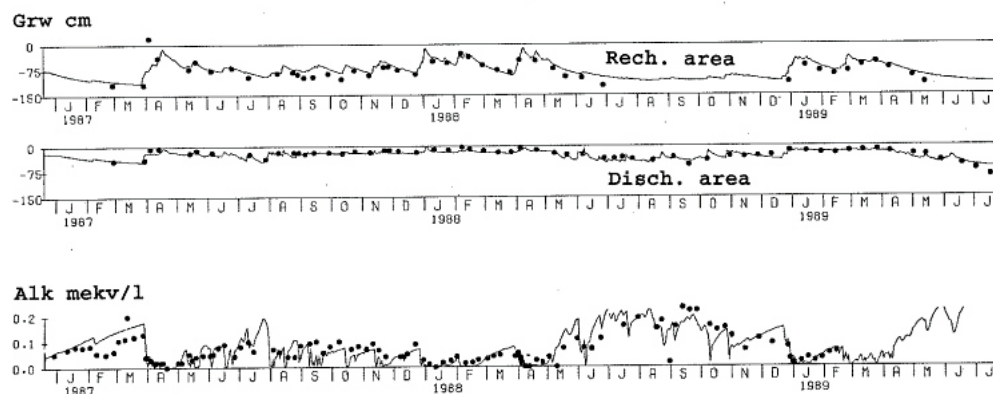
Som komplement till analysen av vattenstånden i anlagda våtmarker visar figur 35 den normala vattenståndsvariationen (MHW-MLW) över året i de 50 analyserade sjöarna. Linjen visar anpassningen  $MHW-MLW = 0.7337 \times MQ^{0.2478}$ . Med en bedömd medelavrinning på 6–20 l/s/km<sup>2</sup> i södra Sverige (se exempelvis Brandt m.fl., 1994) skulle motsvarande magasinering i en sjö bli cirka 0.7–0.9 meter, alltså något högre än de 0.5 meter som här uppskattades för våtmarkerna. Betydelsen av uppströmsarealen, eller egentligen flödet genom sjöarna, framgår tydligt i figuren.



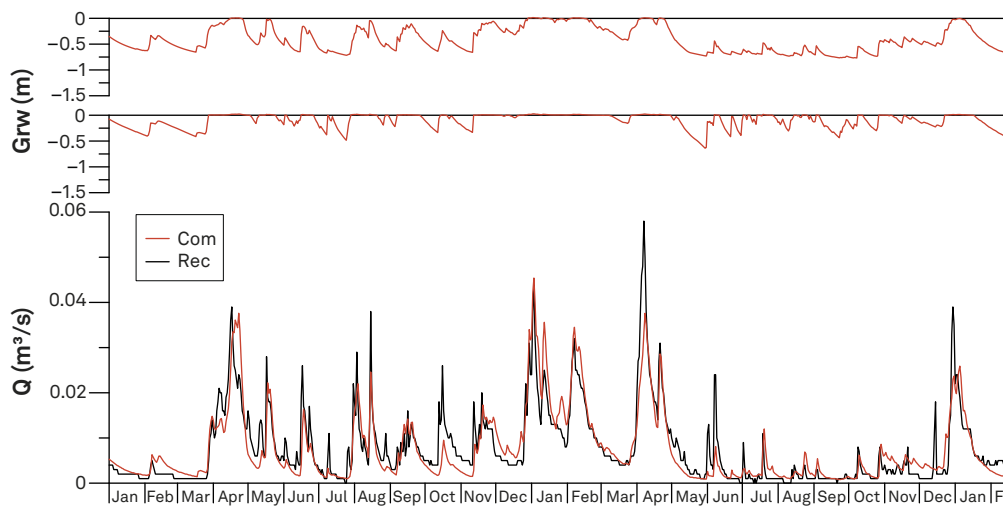
Figur 35. Normal vattenståndsvariation över året (medel av årshögsta-årslägsta) för 50 sjöar med vattenståndsmätningar i S-HYPE2016g, åren 2011–2020. Linjen visar anpassningen  $MHW-MLW = 0.7337 \times MQ^{0.2478}$ . MHW-MLW = medel av årshögsta – medel av årslägsta.

## S-HYPE STUDIER OM LOKALISERING AV TORVMARK I SKOGLANDSKAPET

De stora skillnaderna i flödessignaturer mellan marktyper som antyds av parametervärdena, såsom högre avrinning från våtmarken än från skogen, leder också till frågan om det kan finnas andra skäl till dessa skillnader än marktypen i sig. En möjlighet är att topografin bidrar till att avrinningen samlas i våtmarkerna och strömmar ut därifrån, genom att vatten från inströmningsområdena samlas i låglänt terräng. Detta sammanfaller i sin tur med fuktigare förhållanden och torvjordar. Detta var också en bidragande orsak till varför HYPE-modellen inom projektet vidareutvecklades med funktioner för in- och utströmningsområden. Figur 36 visar ett beräkningsexempel med in- och utströmningsområden i den äldre modellen HBV/PULS, och i figur 37 visas motsvarande beräkning för HYPE, för samma period. Modellen behöver kalibreras om för de klasser som påverkas, eftersom flödet fördröjs i två seriekopplade magasin, snarare än i två parallellkopplade dito. Förändringen innebär också vissa problem med den källfördelning som görs för till exempel kväve och fosfor. Den nya modellstrukturen är inte fullt utvärderad, utan behöver testas mer mot mätdata. Fler hypoteser som testas i fortsatt modellutveckling är att väga in lutningen på nya sätt i grundvattenberäkningen. Dessa fortsatta tester rör själva HYPE-modellens kärna, som till stor del varit oförändrad sedan modellen tillkom för cirka 15 år sedan.



Figur 36. In- och utströmningsområden i HBV/PULS-modellen, för Stubbetorp (från Bergström och Lindström, 1992)..



Figur 37. In- och utströmningsområden i HYPE, simuleringsexempel för Stubbetorp.

Grundvattentytorna i exemplet för HBV/PULS stämmer bättre med mätningarna än vad HYPE gör i detta exempel. Samtidigt kalibrerades HBV/PULS lokalt mot just dessa mätningar, medan grundvattendelen i HYPE-simuleringen inte har anpassats mot dessa mätningar, utan endast mot det uppmätta flödet.

# 4. Diskussion

## 4.1 FF 1 – Hur förändrar våtmarker mängden och tidpunkten för avrinning i jämförelse med skogsmark?

Den övergripande fråga som EviWet svarar på är om våtmarker påverkar dämpning av extrema hög- och lågflöden. EviWet studerade två sorts våtmarker: odikad torvmark i skogslandskap, och anlagda våtmarker med vattenspegel i jordbrukslandskap. För ett första svar om torvmark, jämfördes vattenbalansen för två avrinningsområden, Degerö/C18 (70 % torvmark, 270 ha avrinningsområde) och Svartberget/C7 (18 % torvmark, 47 ha). Degerö hade en högre andel av nederbörd som blev avrinning under sex års tid (54 % mot 45 % från Svartberget, tabell 8.) Denna årliga skillnad orsakas delvis av 16 % mer evapotranspiration (40 mm årliga i medeltal, tabell 7) från det mer beskogade Svartberget. Så det blir mer avrinning under året, även under lågflöde, ju mer torv som finns på grund av mindre årlig evapotranspiration. Den maximala dagliga evapotranspiration var inte större från skog än från torvmark, och under våren var evapotranspiration från torvmarken större än från skogen (figur 14), men skogen hade mer evapotranspiration under den senare delen av växtsäsongen.

Skillnader i lagring av vatten i torvmark och skogsmark är en väsentlig faktor i reglering av avrinning. Variation i vattenlagring var 50 mm större i Degerö än Svartberget (160 mm vs 110 mm som ett medelvärde av årlig variation i lagring (figur 15). Detta tyder på en större kortvarig kapacitet att lagra vatten i odikad torvmark. Den maximala lagringen i torvmark är kortvarig, eftersom hög vattenlagring leder till hög avrinning. Detta sker i samband med stora regnmängder (mer än 30 mm under en vecka) och särskilt under vårfloden när vinterns snö smälter.

Beräkning av torvytan från skillnad i absolut och relativ grundvattennivå bekräftade att en del av torvens lagringskapacitet härstammar från förmågan att expandera under blöta förhållanden, och krympa när det bli torrare (figur 22). Denna skillnad i torvytan påverkar lagring genom den höga vattenhållande kapaciteten hos torvmark. Den ekofysiologiska betydelsen för torven är att vitmossor (*Sphagnum species*) som saknar rötter, kan hålla sitt optimala avstånd till grundvattenytan under större delen av växtsäsongen. (Waddington et al., 2015). Skillnaden i torvmarksyta (mellan 15 mm och 80 mm) är i samma storleksordning som skillnaden i vattenlagring mellan Degerö Stormyr och Svartberget (40 mm, figur 15).

Observationerna från "Sävar Rising Coastline Mire Chronosequence" och Degerö (figur 22) gav en djupare förståelse för torvmarkens förmåga att svälla och krympa och faktorerna relaterade till detta fenomen, vilket är av betydelse för vidare forskning om torvmarkers ekohydrologi (Engman, 2022). Det betyder inte att lagringselasticitet är den viktigaste förklaringen till skillnader mellan torvmark och beskogad skogsmark med en stor andel mineraljord, men att det kan vara en process som bidrar till skillnader i avrinning kopplade till torvmarkensareal. En annan faktor som kan bidra till större lagring på Degerö är kortvariga samlingar av vatten på den plana torvmarksytan (Kværner and Kløve, 2008).

Med tanke på spännvidden i olika typer av myr och skogsmark får man vara försiktig med att generalisera från en jämförelse mellan två avrinningsområden, även om dessa områden är bland de mest väl observerade i Sverige. Även här finns osäkerheter i mätningar, och en tydlig skillnad i årlig nederbörd (7 % eller 40 mm, tabell 7) trots att de två avrinningsområdena bara ligger 10 km från varandra.

En viktig aspekt av torvmarkens hydrologiska egenskaper är förmågan att buffra flödestoppar. Den detaljerad analysen av 120 flödestoppar mellan 2014 och 2020 från två torv-dominerade och tre skogs-dominerade avrinningsområden (också i närheten av Vindeln) visar att en större andel torvmark förlängde avrinningen från enskilda flödestoppar (figur 16–18). Den totala mängden av avrinnande vatten från varje flödeshändelse var inte så annorlunda, även om mer vann avdunsta från torvmarken under det utdragna flödesförloppet. Omformningen av hydrografen hängde samman med både lägre och fördröjda flödestoppar.

För mycket stora snösmältningshändelser fanns mindre skillnad mellan landskapstyperna, men den maximala mängden avrinning var något större för torvmarker på grund av den större simulerade snöackumuleringen (och senare tillförsel av vatten från snösmältning). Av störst betydelse för extrema flödestoppar är hur stor andel av den ökade vattentillförseln som blev avrinning, och den kvoten var hög för både de torvdominerade avrinningsområdena (0.67 och 0.77) och de skogsdominerade avrinningsområdena (mellan 0.81 och 0.86) (figur 20). Det är värt att nämna att för både torvmark och skogsmark, så har mängden nederbörd och hur mycket vatten som finns lagrat i marken före nederbördstillfället stor betydelse för flödestoppens timing och storlek (figur 19). Förhållandena efter en längre sommartorka, då torvmarkens vattennivå inte är lika hög och den således har större kapacitet för ett upptag efter ett skyfall, har inte undersökts.

## 4.2 FF2 – Hur ska torvmarks hydrologiska funktioner simuleras under framtida klimatscenarier?

Hydrologisk självreglering har ofta antagits vara en viktig egenskap hos intakta torvmarker som skiljer deras hydrologiska respons från mineraljordar i skogslandskap. Detta har dock varit svårt att kvantitativt bedöma. I denna studie visade PECOSIM-modellen att ekohydrologiska återkopplingar är starka regulatorer av den interna vattencykeln i torvmarker och vattenflöden som lämnar torvmarkernas avrinningsområden (figur 24). Detta ökar vattenlagringen i torvmarker och ökar basflödet jämfört med ett scenario där alla återkopplingar är inaktiva. Bevarandet av vatten förbättrar både de interna torvmarksekosystemens funktion och minskar torkans inverkan på ekosystem och andra vattenanvändare nedströms (till exempel för jordbruk).

Kombinationen av alla tre ekohydrologiska återkopplingar upprätthåller basflödet (Q10) under växstsäsongen. Modellresultaten tyder på att utan dessa återkopplingar kan vattentillförseln till bäcken avstanna, vilket leder till att bäcken torkar ut snabbare. Detta är också fallet om endast den avtagande hydrauliska konduktiviteten med djupet aktiveras (figur 24). Basflödet ökas både av den extra lagringen på grund av torvens kompressabilitet och minskad evapotranspiration vid djupvattennivån.

Sammantaget visar denna forskning på betydelsen av naturliga processer i torvmarker för att reglera både den interna och regionala vattencykeln. Att störa eller eliminera dessa system från landskapet minskar sannolikt återkopplingsstyrkan och resulterar i djupgående negativ inverkan på vattenresurserna under perioder av torka. (OBS denna jämförande studie fokuserade på intakta torvmarker i skogslandskapet, vilket skiljer sig från skapandet av små anlagda våtmarker (vattenspeglar) i jordbrukslandskapet som har varit fokus för våtmarksrestaurering och -anläggning före 2020, figur 8.)

### 4.3 FF 3 – Hur kan de specifika frågorna kring våtmarksförvaltning hanteras i ett beslutsstödsverktyg?

Beskrivningen av våtmarker i S-HYPE har förbättrats i flera avseenden, såsom högupplöst markanvändningsdata, noggrannare bestämning av magasineringen i anlagda våtmarker, bättre kartering av dikad skogsmark, tillrinningsområden till anlagda våtmarker och bättre beskrivning av grundvattennivåer genom tillflöden från inströmningsområden. Modellen är en samlad beskrivning av Sveriges hydrologi, och kan användas som analys av avrinningens variation i tid och rum, liksom för scenarier. De följande är de viktigaste insikter eller förbättringar av S-Hype som EviWet har bidragit till:

- Fastställandet att den typiska vattenståndsvariationen över året i anlagda våtmarker är cirka 50 cm, mellan årshögsta och årslägsta. Motsvarande värde för sjöar, med ungefär samma uppströmsareal, är något högre.
- Nya marktäckesdata används nu. Den höga upplösningen ger högre andel våtmark än tidigare, och säkrare underlag för analyser av våtmarkers betydelse för hydrologin.
- S-HYPE beskriver skillnaderna i avrinning mellan våtmark och andra marktyper utan systematisk över- eller underskattning. Avrinningen från våtmarker är högre än från andra marktyper, enligt de egenskaper som identifierats genom kalibreringen av S-HYPE.
- Sjöar har mycket större betydelse för magasinering i avrinningsområden än torvmark, i förhållande till den avrunna volymen. S-HYPE beskriver sjöarnas betydelse väl, men underskattar betydelsen en aning.
- En vidareutvecklad HYPE-modell med in- och utströmningsområden kan användas för beskrivning av högre grundvattennivåer i våtmarker.

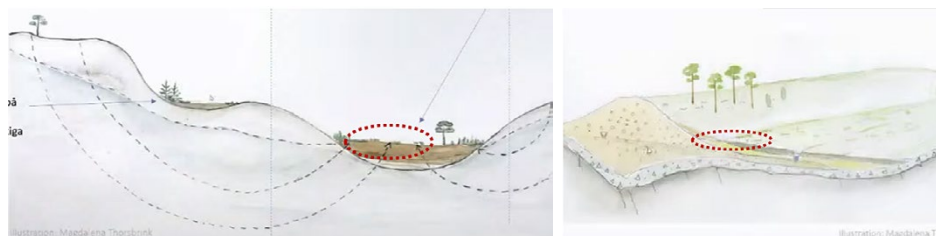
Beslutsstödsverktyget YtSim vidareutvecklades inom projektet med förbättrade funktioner och hjälp vid uppskattningar av magasineringen i anlagda våtmarker med vattenspegel. YtSim bygger på S-HYPE, och kan ses som en förenkling den fullständiga modellen. Genom kopplingen till S-HYPE kan externa användare interaktivt dra nytta av den samlade hydrologiska informationen som finns i S-HYPE, och även förbättringar som kommer i framtida modellversioner.

## 5. Slutsatser och förslag

1. Detaljerade observationer från de fem avrinningsområdena kring Vindeln visade på skillnader mellan flera våtmarks- och skogsdominerade avrinningsområden med avseende på hur nederbörd omvandlas till avrinning. Ökad torvareal utan påverkan från dikning bidrar till förlängning av "flödesepisoderna" och fördröjningen minskar enskilda flödestoppar. Torvmarkernas förmåga att expandera och krympa, och därmed ändra sin lagringskapacitet, bidrar till torvmarkernas hydrologiska påverkan.
2. Vid de högsta uppmätta flödena (under vårflod) höll dock torvmarkerna tillbaka bara några procent mer än skogsmark av det extra vatten som tillfördes avrinningsområdet under de högsta flödena som var förknippade med snösmältningen på våren (figur 20). Ytterligare arbete behövs för att utvärdera intakta torvmarkers betydelse för översvämningsskydd.
3. Den nya processmodellen, PECOSIM visade betydelsen av torvmarksspecifika ekohydrologiska processer och är ett användbart verktyg för att utforska torvmarkernas beteende ytterligare, särskilt under scenarier med klimatförändringar. PECOSIM indikerade att vid låga flöden finns det mer vatten i torvlandskapet på grund av lägre ET. Detta, och den ekohydrologiska funktionen, kan upprätthålla flödet i vattendrag längre under torrperioder. Men det handlar inte om att främja regional grundvattenbildning, och det är oklart om torvmarker kan förstärka flödet tillräckligt för att ha någon betydelse längre nedströms under extrem torka.
4. Beskrivningen av våtmarker i den nationella S-HYPE-modellen har förbättrats i flera avseenden, såsom högupplöst markanvändningsdata, noggrannare bestämning av magasineringen i anlagda våtmarker, bättre kartering av dikad skogsmark, tillrinningsområden till anlagda våtmarker och bättre beskrivning av grundvattennivåer genom tillflöden från inströmningsområden. Modellen är en samlad beskrivning av Sveriges hydrologi, och kan användas som analys av avrinningens variation i tid och rum, liksom för scenarier.
5. Analys av avrinning över hela Sverige med den operationella hydrologiska modell S-Hype indikerar att andel torv i avrinningsområdena har mindre påverkan på hydrologi än andelen sjöar. Anlagda våtmarker kan betraktas som mindre sjöar. Medelavrinningen från våtmarker var också högre än från barrskogen på grund av skillnader i evapotranspiration från skog och myr.
6. YtSim är ett scenarioverktyg för beräkning av åtgärdseffekter som kan användas för planering och utvärdering av anlagda våtmarker med vattenspegel. Funktionaliteten i YtSim utvecklats i projektet. Trots att det finns relativt få mätningar av vattenstånd och utflöde från anlagda våtmarker har projektet samlat in mätdata för att beräkna standardparameter för lagring och avbördning hos anlagda våtmarker i både S-HYPE och YtSim. YtSim ger användare möjlighet att dra nytta av den samlade hydrologiska informationen som finns i S-HYPE och tillämpa denna för beräkningar av åtgärdseffekter. Säkerheten i YtSims prognoser lider nu från brist av valideringsdata. I samband med att sådana data blir tillgängligt och används för utveckling av YtSim, kommer säkerheten i YtSims prognoser förbättras.

Sammanfattningsvis, intakta (icke dränerad) torvmarker i skogslandskapet påverkar vattenflödet med ekohydrologisk funktionalitet som saknas i minerogena jordar. Men det kanske inte är dämpningen av de mest extrema flödena där torvmarkerna har störst hydrologiskt inflytande, utan det är den rutinmässiga ”pulsen” av ytvatten genom landskapet som torvandelen i landskap påverkar mest. Torvmarker formar toppar och tidpunkt för flödeshändelser över hela spektrumet av flöden som observerats under åren. Detta är förvisso av ekologisk betydelse, men kanske inte den reglering av översvämning/torka som man vanligtvis tänker på när det gäller torvmarker/våtmarker. Detta gäller för intakta torvmarker i skogslandskapet, vilket skiljer sig från skapandet av små anlagda våtmarker (vattenspeglar) i jordbrukslandskapet.

Mer observationsarbete kommer att bidra till en bättre förståelse för hur intakta torvmarker påverkar avrinningsområdets hydrologi. Det största behovet av observationsarbete för att bättre förstå intakta torvmarkernas effekter på låga flöden, och kanske till och med toppflöden, är att först förstå hur torvens placering påverkar grundvattnet i de höglänta jordar som rinner ut i torven (figur 38). Det är denna fråga som FORMAS-metaanalysen avslöjade en brist på publicerad information om (Bring et al., 2023). Det andra observationsbehovet är att se hur dränering/restaurering påverkar torvens roll i förhållande till vad vi har sett i denna studie av intakta torvmarker. Av särskilt intresse är den rikligt förekommande bäcktorv som finns längs så många av Sveriges källflöden och även många dräneringsdiken i skogslandskapet. Ytterligare ett område att undersöka är i vilken omfattning intakta myrar skiljer sig åt beroende på vegetationens sammansättning och framför allt då vilka vitmossor som är dominerande.



Figur 38. Torvmarker i ett landskapsperspektiv: Håller de mer vatten i skogshöglandet? För detta kommer gränssnittet mellan mineraljordar och organogena jordar att vara avgörande. (Ursprungliga bilder ritade av Magdalena Thorsbrink, modifierad från SGU, 2017).



## 6. Tack

Tack till Swedish Integrated Carbon Observation System (ICOS) och Swedish Infrastructure for Ecosystem Science (SITES) för värdefulla data och stöd. Särskilt tack till Joshua Ratcliffe och Anne Klosterhalfen på ICOS-stationerna Svartberget och Degerö för deras hjälp och tillhandahållande av lokalt optimerade LE-data för Degerö och Svartberget.

# 7. Källhänvisning

- Acreman et al., 2007, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 11(1):158–169.
- Andersson, T., De Simon, G., Dignam, R., Holst, J., Linderson, M.-L., Lindgren, K., Löfvenius, P., Marklund, P., Mölder, M., Nilsson, M., Peichl, M., Smith, P., Öquist, M., Sweden, I., 2021a. Ecosystem meteo time series (ICOS Sweden), Svartberget, 2014-01-01–2020-12-31.
- Andersson, T., De Simon, G., Dignam, R., Holst, J., Linderson, M.-L., Lindgren, K., Löfvenius, P., Marklund, P., Mölder, M., Nilsson, M., Peichl, M., Smith, P., Öquist, M., Sweden, I., 2021b. Ecosystem eco time series (ICOS Sweden), Svartberget, 2014-01-01–2020-12-31.
- Andersson, T., De Simon, G., Dignam, R., Holst, J., Linderson, M.-L., Lindgren, K., Löfvenius, P., Marklund, P., Mölder, M., Nilsson, M., Peichl, M., Smith, P., Öquist, M., Sweden, I., 2021c. Ecosystem fluxes time series (ICOS Sweden), Svartberget, 2014-01-01–2020-12-31.
- Andersson, T., De Simon, G., Dignam, R., Holst, J., Linderson, M.-L., Lindgren, K., Löfvenius, P., Marklund, P., Mölder, M., Nilsson, M., Peichl, M., Smith, P., Sweden, I., 2021d. Ecosystem meteo time series (ICOS Sweden), Degero, 2014-01-01–2020-12-31.
- Bergström, S., & Lindström, G. (1992). Recharge and discharge areas in hydrological modelling – a new model approach. *Vannet i Norden*, 3, 5–12.
- Beven, K. (2006). A manifesto for the equifinality thesis. *Journal of Hydrology*, 320(1-2), 18–36.
- Bring, A., Thorslund, J., Rosén, L., Tonderski, K., Åberg, C., Envall, I., & Laudon, H. (2022). Effects on groundwater storage of restoring, constructing or draining wetlands in temperate and boreal climates: a systematic review. *Environmental Evidence*, 11(1), 38.
- Bufkova et al., 2011, *Restoration of Lakes, Streams, Floodplains, and Bogs in Europe: Principles and Case Studies*, 331–354. doi: 10.1007/978-90-481-9265-6
- Bullock and Acreman, 2003. The role of wetlands in the hydrological cycle. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, European Geosciences Union, 7(3): 358–389.
- Ehnavall, B. (2023). Catchment controls on mire properties in the post-glacial landscape. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae*, (2023: 73).
- Engman, A. (2022). Quantification of peat volume change in Northern peatlands: A study of mires capacity to swell and shrink and its relation to mire age and land management. Uppsala Universitet Examensarbete, UPTEC W 22018, ISSN 1401–5765.
- Karimi, S., Seibert, J., Laudon, H., 2022. Evaluating the effects of alternative model structures on dynamic storage simulation in heterogeneous boreal catchments. *Hydrol. Res.* 53, 562–583. <https://doi.org/10.2166/nh.2022.121>
- Karlsen, R.H., Bishop, K., Grabs, T., Ottosson-Löfvenius, M., Laudon, H., Seibert, J., 2019. The role of landscape properties, storage and evapotranspiration on variability

- in streamflow recessions in a boreal catchment. *J. Hydrol.* 570, 315–328.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.065>
- Karlsen et al., 2016a. Landscape controls on spatiotemporal discharge variability in a boreal catchment. *Water Resources Research*, 52(8):6541–6556,  
 doi:10.1002/2016wr019186
- Karlsen, R.H., Seibert, J., Grabs, T., Laudon, H., Blomkvist, P., Bishop, K., 2016b. The assumption of uniform specific discharge: unsafe at any time? *Hydrol. Process.* 30, 3978–3988. <https://doi.org/10.1002/hyp.10877>
- Kværner, J., Kløve, B., 2008. Generation and regulation of summer runoff in a boreal flat fen. *J. Hydrol.* 360, 15–30. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.009>
- Land et al., 2016. How effective are created or restored freshwater wetlands for nitrogen and phosphorus removal? A systematic review. *Environmental Evidence*, 5: 9, [doi.org/10.1186/s13750-016-0060-0](https://doi.org/10.1186/s13750-016-0060-0)
- Laudon, H., Hasselquist, E.M., Peichl, M., Lindgren, K., Sponseller, R., Lidman, F., Kuglerová, L., Hasselquist, N.J., Bishop, K., Nilsson, M.B., Ågren, A.M., 2021. Northern landscapes in transition: Evidence, approach and ways forward using the Krycklan Catchment Study. *Hydrol. Process.* 35. <https://doi.org/10.1002/hyp.14170>
- Laudon, H., Taberman, I., Ågren, A., Futter, M., Ottosson-Löfvenius, M., Bishop, K., 2013. The Krycklan Catchment Study – A flagship infrastructure for hydrology, biogeochemistry, and climate research in the boreal landscape. *Water Resour. Res.* 49, 7154–7158. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20520>
- Lidberg, W., Nilsson, M., & Ågren, A. (2020). Using machine learning to generate high-resolution wet area maps for planning forest management: A study in a boreal forest landscape. *Ambio*, 49(2), 475–486.
- Lindström, G. (2019). Hydrologiska aspekter på åtgärder mot vattenbrist och torka inom avrinningsområden. SMHI HYDROLOGI Nr 122, 2019.
- 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.
- McCarter and Price, 2013. The hydrology of the Bois-des-Bel bog peatland restoration: 10 years post-restoration. *Ecological Engineering*, 55: 73–81, doi: 10.1016/j.ecoleng.2013.02.003.
- Naturvårdsverket, 2009. Multifunktionella våtmarker: Skydd vid torka. Rapport 5926. Stockholm. 64 pp. ISBN 978-91-620-5926-2.
- Naturvårdsverket, 2017, Kunskapsunderlag om våtmarkers ekologiska och vattenhushållande funktion. Redovisning av regeringsuppdrag (M2017/0954/NM).
- Nijp, J. J., Metselaar, K., Limpens, J., Teutschbein, C., Peichl, M., Nilsson, M. B., van der Zee, S. E. A. T. M. (2017b). Including hydrological self-regulating processes in peatland models: effects on peatmoss drought projections. *Science of The Total Environment*, 580, 1389–1400. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.12.104

- Noumonvi, K. D., Ågren, A. M., Ratcliffe, J. L., Öquist MG, Ericson L, Tong CHM, Järveoja J, Zhu W, Osterwalder S, Peng H, Erefur C, Bishop K, Laudon H, Nilsson MB and Peichl M (2023), The Kulbäcksliden Research Infrastructure: a unique setting for northern peatland studies. *Front. Earth Sci.* 11:1194749. doi: 10.3389/feart.2023.1194749
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., Duchesnay, E., 2011. Scikit-learn: Machine Learning in Python. *J. Mach. Learn. Res.* 12, 2825–2830.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633–1644.
- Peng, H., Nijp, J. J., Ratcliffe, J. L., Li, C., Hong, B., Lidberg, W., ... & Nilsson, M. B. (2024). Climatic controls on the dynamic lateral expansion of northern peatlands and its potential implication for the ‘anomalous’ atmospheric CH<sub>4</sub> rise since the mid-Holocene. *Science of The Total Environment*, 908, 168450.
- Richardson et al., 2011. Integrated stream and wetland restoration: A watershed approach to improved water quality on the landscape. *Ecological Engineering*, 37(1): 25–39, doi: 10.1016/j.ecoleng.2010.09.005
- Schützer, S., Elenius, M., Isberg, K. & Temnerud, J. (2023) Nedströmseffekter från återvätning av dikad skog på torv. SMHI Rapport Hydrologi Nr 130. ISSN: 0283-7722.
- Seibert, J., Vis, M.J.P., 2012. Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 3315–3325. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3315-2012>
- SGU 2017. Grundvattenbildning och grundvattentillgång i Sverige (in Swedish). Rapportering av regeringsuppdrag: kunskapsunderlag om grundvattenbildning RR 2017:09, 57pp.
- Strömquist, 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.
- Svartberget Field Research Station. (2020). Meteorological from Degerö.
- Taylor and Price, 2015. Soil water dynamics and hydrophysical properties of regenerating Sphagnum layers in a cutover peatland. *Hydrological Processes*, 29(18): 3878–3892, doi: 10.1002/hyp.10561
- Technical Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration, 2005. The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. American Society of Civil Engineers, Reston, VA. <https://doi.org/10.1061/9780784408056>
- Waddington, J. M., Morris, P. J., Kettridge, N., Granath, G., Thompson, D. K., & Moore, P. A. (2015). Hydrological feedbacks in northern peatlands. *Ecohydrology*, 8(1), 113–127. doi:10.1002/eco.1493

# Bilaga 1: Vattenbalansdata och flödesberäkningar

## Avrinning

Vattenföringen övervakas vid båda avrinningsområdena i uppvärmda stugor, vilket möjliggör mätningar året runt. Svartbergsstationen är utrustad med en 90-graders V-notch sharp crested weir och har varit i drift sedan 1981 (Karlsen et al., 2016). På Degerö mäts vattenföringen med hjälp av en trapetsformad ränna sedan 2012 (Noumonvi et al., 2023). Steget mäts kontinuerligt med hjälp av MJK 3400 ventilerade tryckgivare, med TruTrack WT-HR kapacitanssensorer som fungerar som sekundär backup vid båda mätstationerna. Stage styrs manuellt varannan vecka till en gång i månaden, och vid båda stationerna kalibreras de teoretiska ekvationerna för mätstrukturerna med manuella flödesmätningar över ett brett spektrum av förhållanden från lågt till högt flöde. Utsläppsdata är tillgängliga via SITES-programmet (<https://www.fieldsites.se>).

## Meteorologiska data, flödes- och markdata

Meteorologiska observationer, mark- och grundvattenobservationer samt latent värmeflöde erhöles från ICOS Sveriges mätprogram (<https://www.icos-sweden.se>). I händelse av att meteorologiska data saknades använde vi de referensklimatstationer som finns tillgängliga via SITES-programmet. ICOS-stationerna ligger inom avrinningsområdena, medan referensklimatstationerna ligger endast cirka 1 km från avrinningsområdets gränser. Atmosfäriskt ångtrycksunderskott (VPD) beräknades med hjälp av den observerade lufttemperaturen och den relativa luftfuktigheten.

## Evapotranspiration och utfyllnad

Evapotranspiration (ET) beräknas utifrån latent värmeflöde (LE) enligt följande

$$ET = \frac{LE}{\lambda} \quad (\text{Eq. B1})$$

där  $\lambda$  är den latent förångningsvärmens i  $\text{MJ kg}^{-1}$ , LE i  $\text{MJ m}^{-2} \text{T}^{-1}$  och resulterande ET i  $\text{kg m}^{-2} \text{T}^{-1}$ . Den latent förångningsvärmens beräknas utifrån lufttemperaturen enligt Allen et al. (1998)

$$\lambda = 2.501 - (2.361 \times 10^{-3}) \times T_a \quad (\text{Eq. B2})$$

där  $T_a$  är lufttemperaturen i grader Celsius.

Svartbergets latent värmeflödesdata innehöll dataluckor under de hydrologiska åren 2015–2018. Dessa luckor fylldes på en daglig tidsskala med hjälp av slumpmässig skogsregression i syfte att beräkna en löpande vattenbalans i avrinningsområdet. Den slumpmässiga skogsmodellen tränades på lokala meteorologiska data och justerades

med hjälp av K-Fold-korsvalidering med  $K = 5$ , där test- och träningsdatauppsättningen delas iterativt i olika delmängder från den fullständiga datauppsättningen, och testuppsättningen är 20 % av fullständiga data. Modellträning utfördes med hjälp av Scikit-learn v.1.1.2 (Pedregosa et al., 2011). Mer information om den slumpmässiga skogsmodellen och träningsfunktionerna finns i stödinformationen.

Referens ET (RET) för båda avrinningsområdena beräknas enligt ASCE Penman-Monteith-metoden (Technical Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration, 2005) på en timtidsskala med hjälp av väderdata från respektive ICOS-mätplats.

## Uppskattningar av vattenbalans och dynamisk lagring

Vattenbalansen beräknades med två olika tillvägagångssätt, baserat på observationer och med hjälp av HBV-modellen. Vattenbalansen baserad på dagliga observationer löstes med hjälp av följande ekvation,

$$\Delta S = I - Q - ET \quad (\text{Eq. B3})$$

där  $\Delta S$  i s förändring i avrinningsområdets vattenlagring,  $I$  är tillförsel av flytande vatten (dvs nederbörd och snösmältning),  $Q$  är avrinningsområdesflöde och  $ET$  är avrinningsområdes evapotranspiration. Detta förutsätter att försumbart vatten går förlorat eller erhålls genom grundvattenflöde över avrinningsområdets gränser.

HBV-modellen (HBV-light version 4.0.0.25, Seibert och Vis (2012)) med en struktur med tre grundvattenlådor kalibrerades på daglig tidsnivå för båda avrinningsområdena. Totalt 100 kalibrerade parameteruppsättningar producerades för varje avrinningsområde, och ensemblemedelvärdet användes för lagringsuppskattningar, liknande det tillvägagångssätt som används av Karimi et al. (2022). Vi beräknar två olika dynamiska lagringsuppskattningar från HBV-modelleringen, den totala dynamiska lagringen (dvs mark- och grundvattenlagringslådor i modellen) och grundvattenlagringen som representerar direkt dynamisk lagring.

## Modellering av snösmältning

Vattenbalansmetoden kräver att mängden flytande vatten,  $I$  i ekvation (3), kommer in i systemet på en daglig tidsskala, och vi använde HBV-snörutinen för att beräkna snöackumulering och smältning.  $ET$ -termen för vattenbalansen, som är baserad på latent värmeflödesobservationer, inkluderar alla vertikala vattenförluster, inklusive från snötäcket. HBV-snörutinen innehåller en parameter för snöfallskorrigeringsfaktor (SFCF) för att korrigera för snötäckesförluster. Dessa förluster av snötäcke bör inte räknas två gånger (dvs en gång under  $I$ -terminen och en andra gång under  $ET$ -terminen) när ekvation (3) tillämpas. Således, för att beräkna den totala dynamiska lagringen baserat på vattenbalansen, reducerades de latent värmeflödesförlusterna för varje snösäsong med samma mängd som den simulerade snöfallskorrigeringen i HBV-snörutinen.

## Uppskattningar av dynamisk lagring

Dynamisk lagring beräknas med hjälp av observationer och HBV-vattenbalansmodellen. Vi använder samma definition av dynamisk lagring som Dralle et al. (2018), där den totala dynamiska lagringen delas upp i direkt dynamisk lagring ( $S_d$ ) och indirekt dynamisk lagring ( $S_i$ ), där den förstnämnda är den del av lagringen som driver utflödet och den senare kan variera utan att direkt påverka utflödet. Tillsammans utgör dessa den totala dynamiska lagringen ( $S_T$ ), som erhålls genom att köra en vattenbalans i avrinningsområdet. Totalt fyra olika skattningar av dynamisk lagring för de två avrinningsområdena, två för ”total” dynamisk lagring ( $S_T$ ) och två för ”direkt” dynamisk lagring ( $S_d$ ). Dessutom beräknar vi grundvattenmagasinets förändring under den isfria säsongen på Degerö torvmark med hjälp av grundvattendjupsmätningar.

Total dynamisk lagring ( $S_T$ ) Använda vattenbalans ( $S_{T-WB}$ ) och summerad modellerad jord- och grundvattenlagring ( $S_{T-HBV}$ ).

Den totala dynamiska lagringstidsserien med hjälp av vattenbalansen beräknades med hjälp av dagliga tidsserier av de flöden som beskrivs ovan.

$$S_{T-WB}(t) = \sum_{i=1}^t (I_i - Q_i - ET_i) \quad (\text{Eq. B4})$$

Lagring av vattenbalans  $S_{T-WB}$  justeras linjärt så att det inte finns någon trend i heltidsserier 2014–2020. Avrinningsområde ET ( $ET_C$ ) är en skalenlig produkt av den ET som observerats vid de två flux-tornen, där Degerö ( $ET_{DEG}$ ) representerar torvmarken och Svartberget ( $ET_{SVB}$ ) representerar skogsmarkens användning.  $S_{T-WB}$  i s skalas till andelen torvmark och skog i avrinningsområdena (jfr tabell 1), så att

$$ET_C = ET_{DEG} * p_{peat} + ET_{SVB} * p_{forest}, \quad p_{peat} + p_{forest} = 1 \quad (\text{Eq. B5})$$

där  $P_{peat}$  och  $P_{forest}$  är andelen torvmark respektive skog som omfattas av markanvändningen.

Direkt dynamisk lagring, lagring som direkt driver bäckflödet, med hjälp av flödesanalys (Q)  $S_{d-Q}$  och modellerad HBV-grundvattenlagring  $S_{d-HBV}$ .

Den dynamiska lagringssuppskattningen med hjälp av dagliga vattenflödesserier följer den allmänna metoden som beskrivs i Kirchner (2009), där vi beräknar förändring i dynamisk lagring från förändring i utflödet med hjälp av ett känslighetsförhållande mellan lagring och utflödet med potenslag. För att fastställa sambandet analyserar vi recessionshastigheter för utvalda dagar då vi antar att vattenflödet inte påverkas av evapotranspiration, nederbörd eller snösmältning. Urvalskriterierna var 1) minskande vattenföring, 2) ingen nederbörd eller snösmältning under innevarande och de två föregående dagarna, 3) under månaderna november till mars med försumbar ET från underjordisk lagring. För mer information om metoden, se Kirchner (Kirchner, 2009) och Karlsen et al. (Karlsen et al., 2019).

Det årliga lagringsintervallet beräknades sedan som skillnaden mellan maximum och minimum för varje lagringssuppskattning och för varje hydrologiskt år, och vi beräknar också lagringsintervallet mellan den 95:e och 5:e percentilen.

# Bilaga 2: Ordlista

**Avbördningsförmåga:** Kapaciteten att avbörda, det vill säga släppa ut, vatten ur till exempel en damm.

**Eddy-kovarians:** Metod för uppskattning av avdunstning genom mätning av fuktinnehållet i turbulenta, vertikala virvlar.

**Ekvifinalitet:** Situation när data inte är tillräckliga för att skilja mellan olika förklaringar. Ett klassiskt exempel är när olika kalibreringar av en hydrologisk modell ger resultat som matchar kalibreringsdata lika väl. En mer allvarlig ekvifinalitet är när olika processförklaringar fungera lika väl för att reproducera tillgängliga observationer.

**Ekohydrologi:** ett tvärvetenskapligt vetenskapsområde som studerar interaktioner mellan vatten och ekologiska system. Det är en underdisciplin av hydrologi, med ett ekologiskt fokus.

**Hydrograf:** Tidsserie över vattenföring, alltså vattenflöde, vanligen mätt i liter/sekund eller kubikmeter/sekund.

**Lagringselasticitet:** Torv har förmågan att svälla vid vätning och komprimeras under torkning. Den elastiska torvmatrisen ger också vattenlagring

**Latent värmeflöde:** Det värmeflöde som sker genom transport av vattenånga, som mått på avdunstning.

**Mikro- och makrotypografi:** Mikrotopografi representerar variationen i terränghöjd observerad i en liten (t.ex. submeter) rumslig skala över en studieplats. Exempel på makrotopografiska särdrag är våtmarks”ås och swale”-komplex vars bassänger är depressionsmässiga landskapsläge och förekommer på terrasser och in översvämningsslätter.

**Paludifiering:** paludifiering är processer som långsamt förvandlar mineraljord till torvmark när organiskt material ackumuleras.

**Parsimoni:** Strävan efter att hålla beräkningar och modeller så enkla som möjligt.

**Transmissivitet:** Ett mått på hur mycket vatten som kan överföras horisontellt genom ett givet jorddjup.

**Utskov:** Anordning för att styra utflödet av vatten från en damm, till exempel med hjälp av en vinkel eller lucka.



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

# EviWet: Evidensbaserat beslutsstöd för våtmarkers hydrologiska ekosystemtjänster

Vissa våtmarker kan jämna ut höga och låga vattenflöden i naturen, och därigenom mildra översvämningar och torka. Hur väl en våtmark förmår att dämpa extremflöden beror på var i naturen de ligger och vilken sorts våtmarkstyp det är.

Vi vet för lite om våtmarkers hydrologiska egenskaper och betydelsen av placering i landskapet. Forskarna i EviWet har undersökt torvens vattenhållande förmåga, och därifrån skapat modeller för ekohydrologi, samt utvecklat beslutsstöd för operationell modellering.

Projektet har finansierats med Formas medel för det Nationella forskningsprogrammet om klimat men administrerats av Naturvårdsverket.