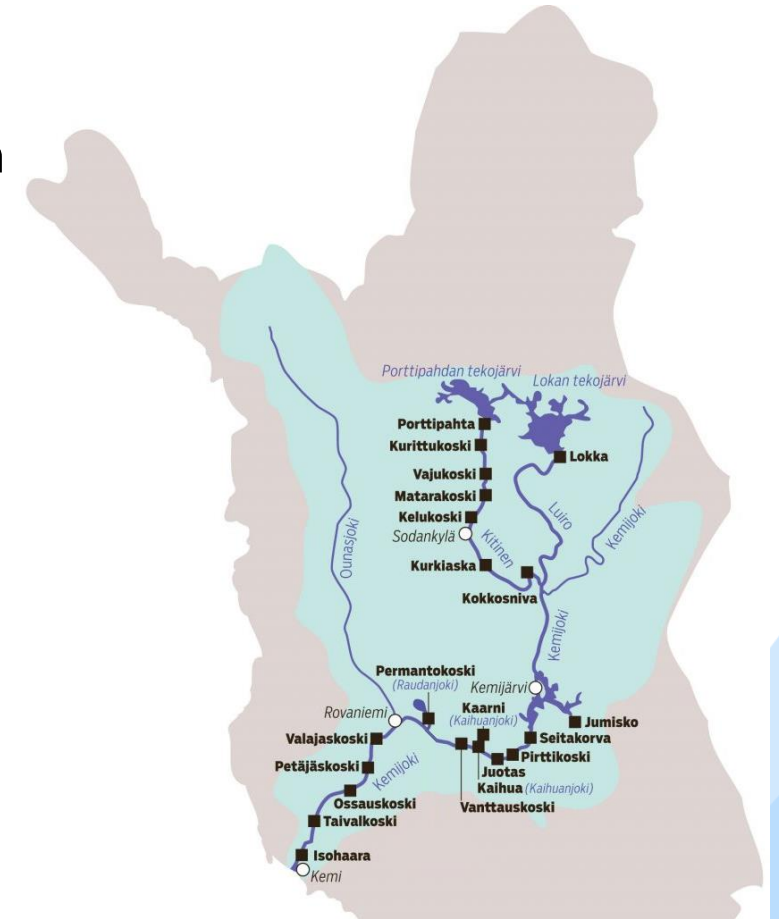
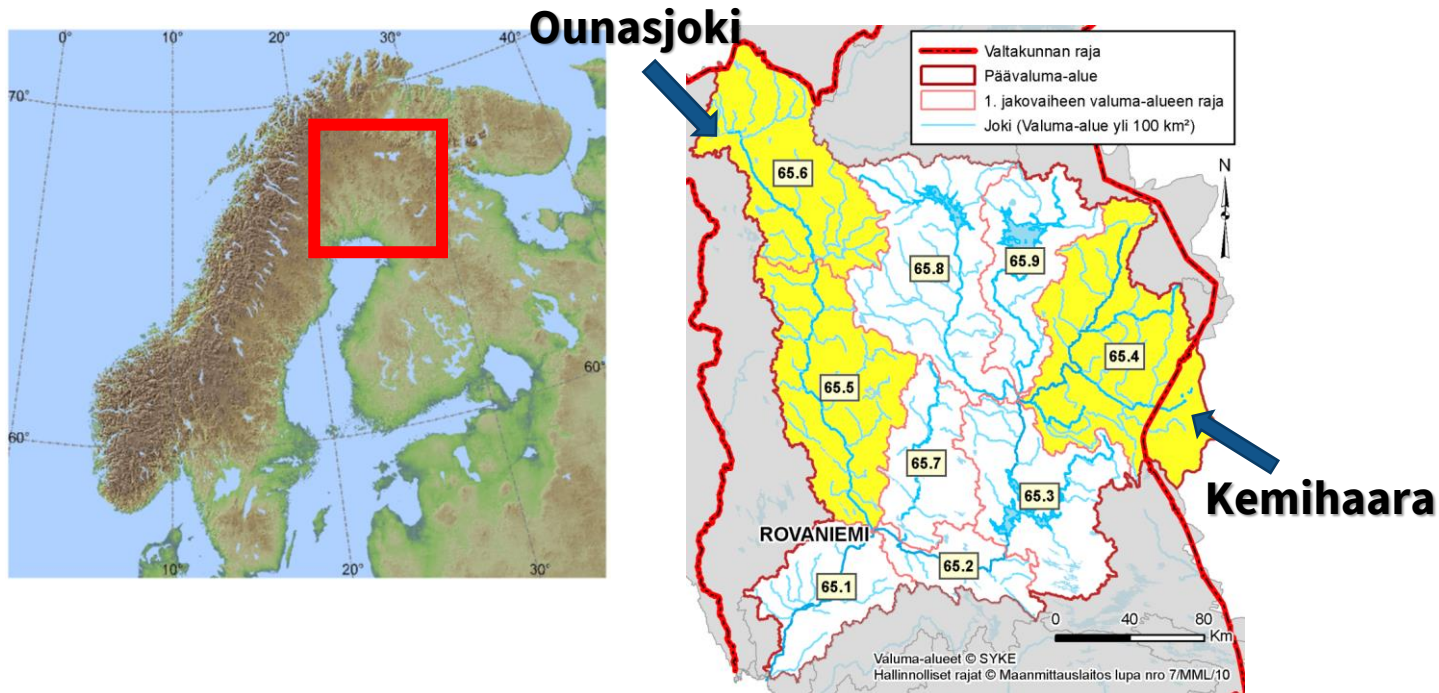


Lumihydrologia ja ennustemalli kehitys Kemijoen valuma-alueella

Jaakko Ikonen, Anna Kontu, Ioanna Merkouriadi, Milad Anboohi
Ilmatieteen laitos

Vesivoima, lumi ja Kemijoen valuma-alue

- Suomen suurin vesivoimatuotannon valuma-alue
 - 16 vesivoimalaitosta
- 55–70 % vuotuisesta virtaamasta peräisin keväisestä lumen sulannasta
- Suuria sääntelemättömiä sivu-uomia (Ounasjoki, Kemihaara)
 - Haasteellisia vesivoimayhtiölle
 - Mutta hyödyllisiä mm. prosessimallinnus tutkimukselle

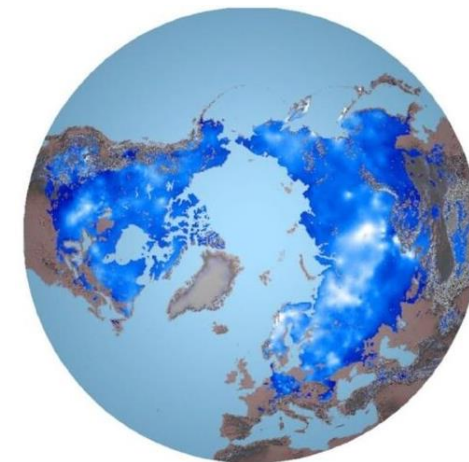


Miksi teemme tätä?

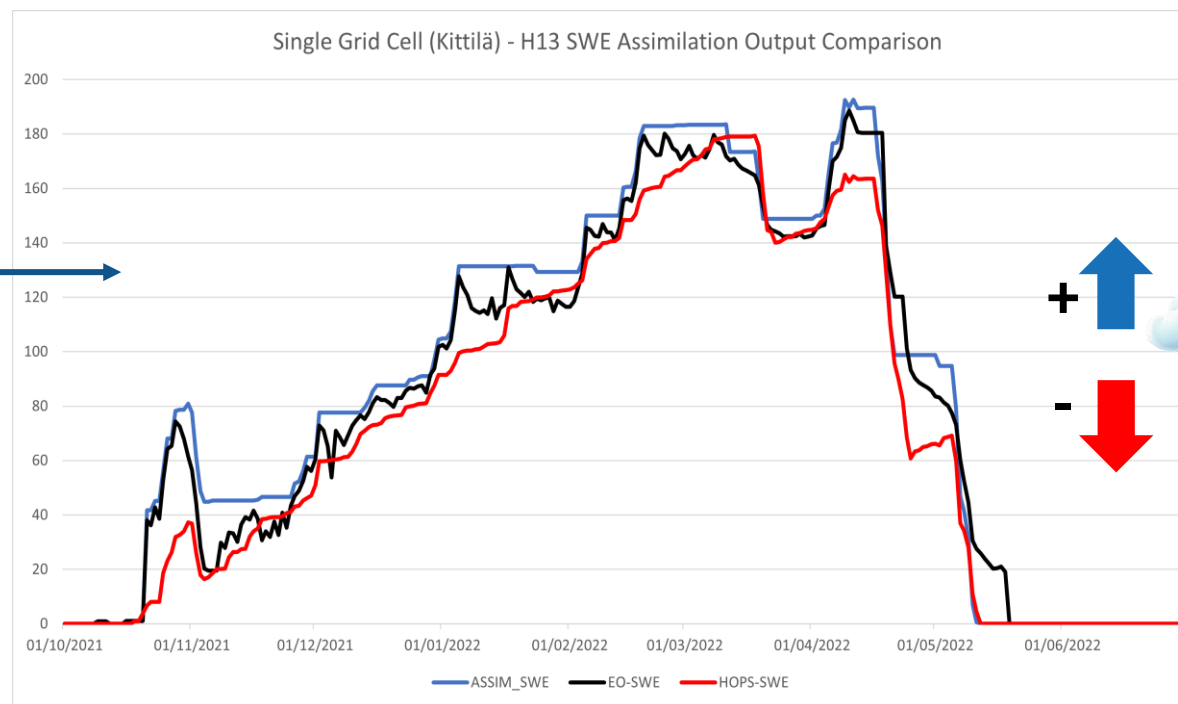
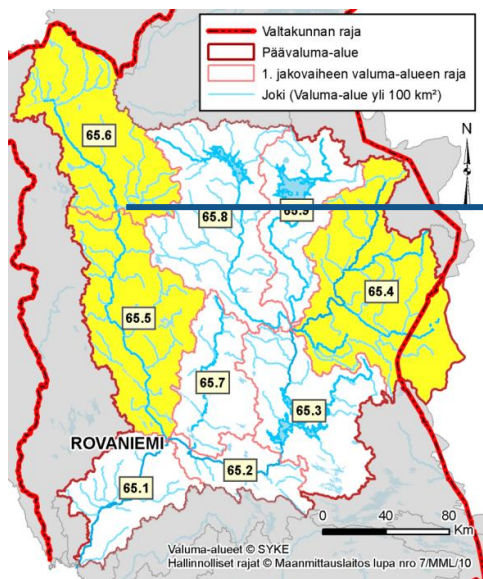
- SYKE vastaa operatiivisista hydrologisista ennusteista Suomessa
 - Nykyinen järjestelmä toimii hyvin
- IL kehittää rinnakkaista mallinnuskapasiteettia
 - Tavoite: menetelmäkehitys, kokeilu ja innovaatio
 - Yhteistyö Kemijoki Oy:n kanssa
 - Mahdollinen vientipotentiaali(?)
- Lumimassan määrä ja lumensulaminen ovat keskeisiä tekijöitä
 - Ilmatieteen laitoksella pitkä historia lumenmittaamisessa eri menetelmin

Satelliitti-pohjainen lumenvesiarvo (SWE) -assimilaatio

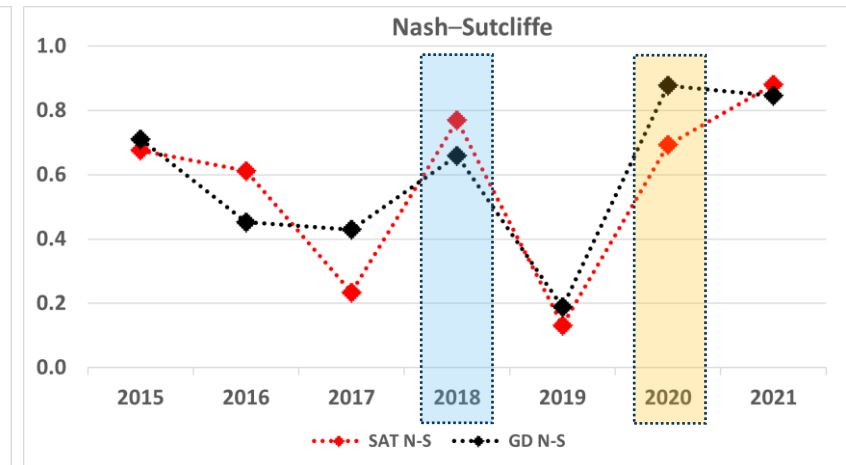
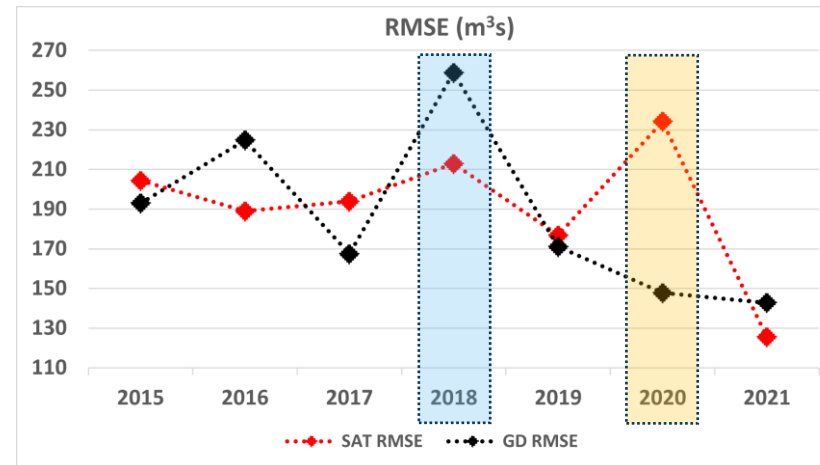
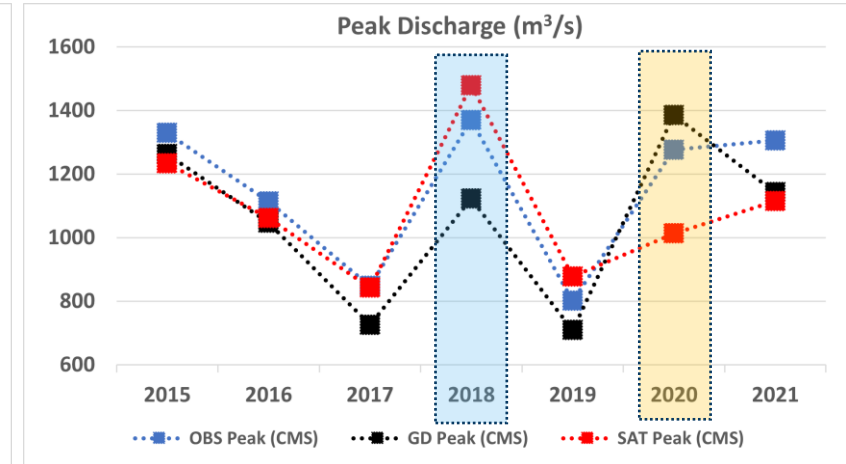
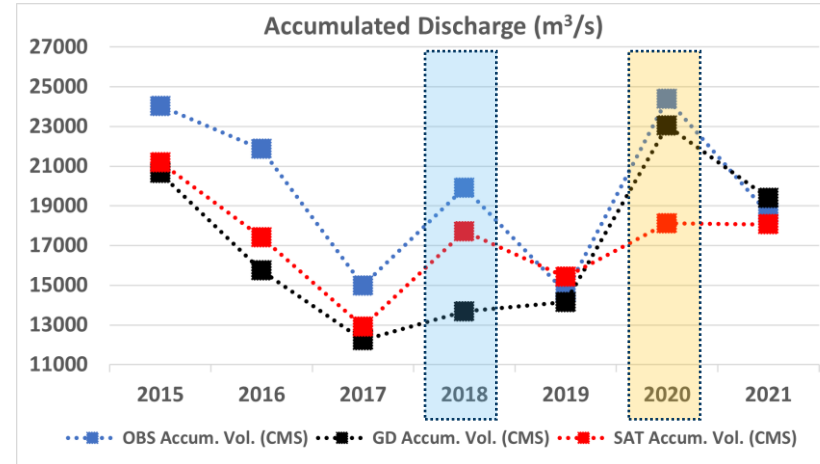
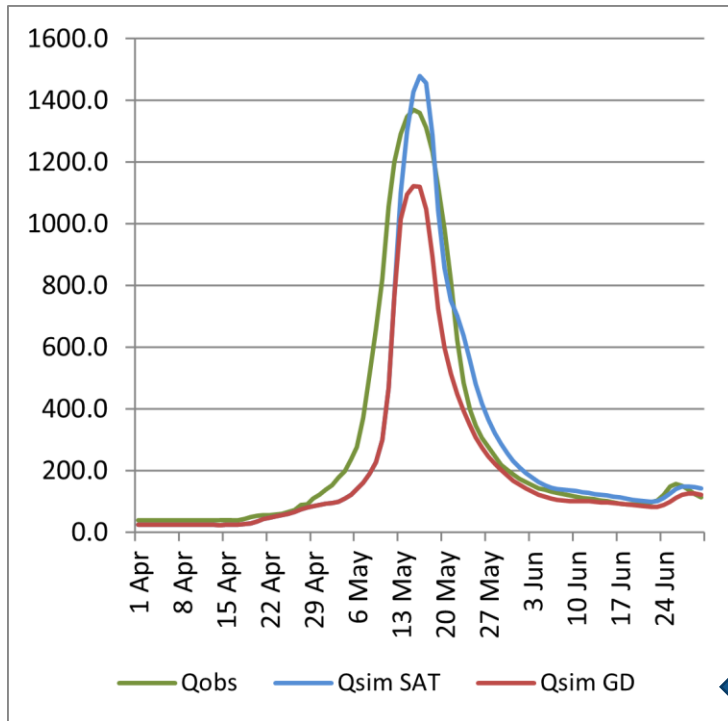
- Passiiviset mikroaalto SWE tuotteet ovat luotettavia kertymävaiheessa
 - Assimilaatio auttaa rajoittamaan simuloitua lumivarastoa
 - Käytössä operatiivisesti FMI/HOPS-järjestelmässä
 - Perustuu lumisateen “korjaukseen”



Globaali kattavuus
Ei pilviherkkä



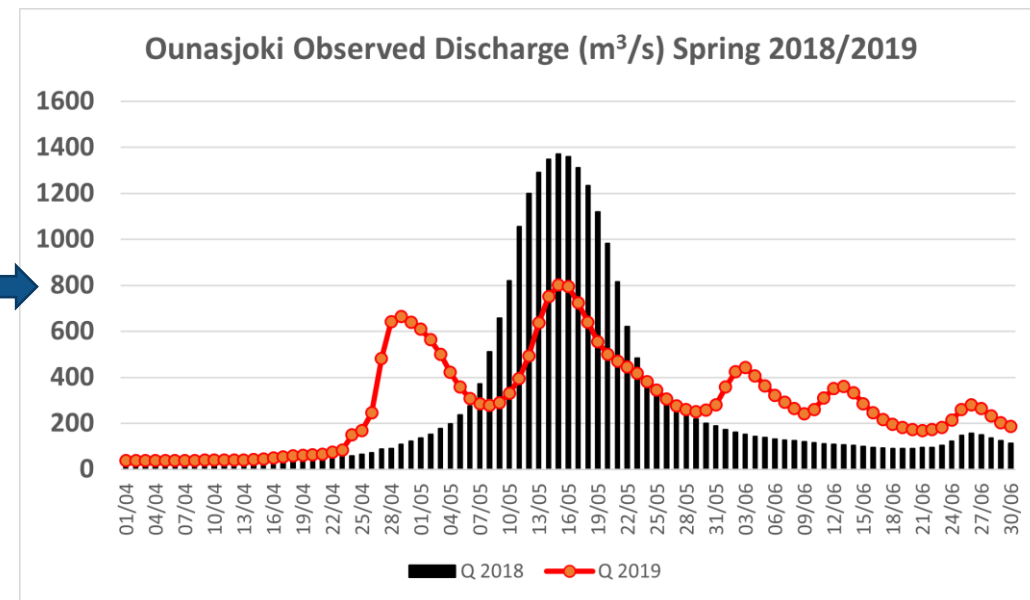
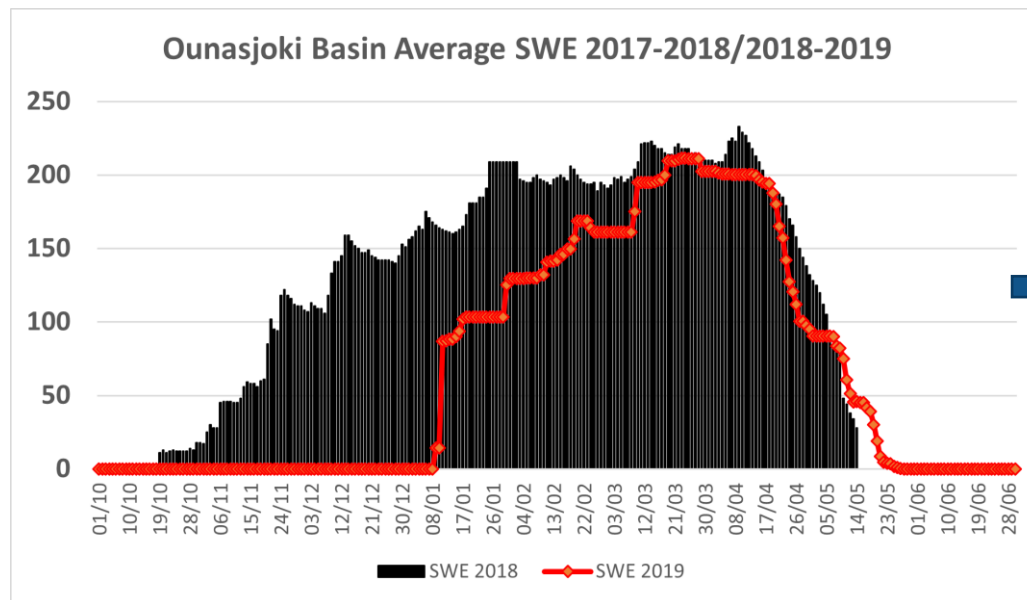
- Yleisesti ottaen assimilaatio parantaa hieman kokonaisvirtaamaa ja huippuvirtaamien ennustamista
- **Kevät 2020** poikkeuksellinen → satelliitti ei kyennyt havaitsemaan todellista suurta lumimäärää



← Kevät 2018 – Esimerkki tilanne satelliitti-pohjaisen SWE tuotteen hyödystä

Lumimassan määrä on tärkeä tieto – mutta sulanta nopeus ja ajoitus ratkaisevaa

- Lumimassan määrä määrittää kokonaisvirtaaman
- Sulamisnopeus määrittää hydrograafin muodon
- Sulamisen ajoitus määrittää (osin) huippuvirtaaman

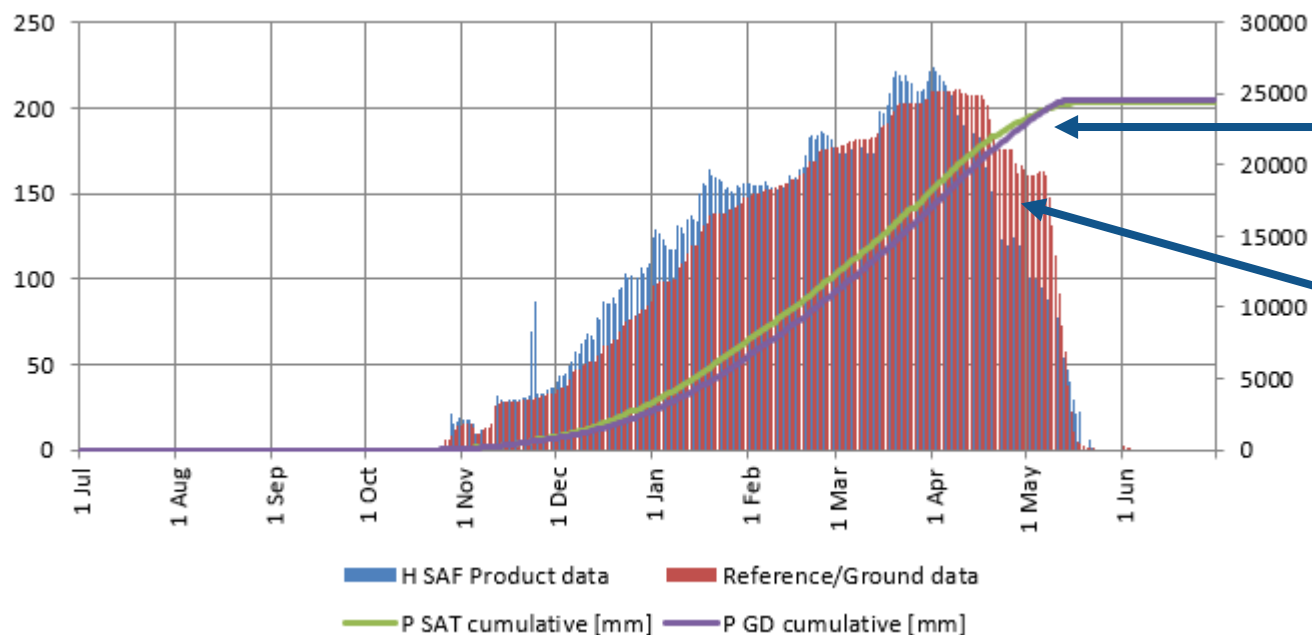


- Pieni ero Lumimassan määrässä → suuri ero huippuvirtaamassa

Satelliitti-pohjaisen SWE tuotteen haasteita

- Sulamiskaudella märkä lumi vääristää satelliittihavaintoja
 - Sulamisen suora assimilaatio epäluotettavaa
 - Sulamisnopeutta ei voida johtaa suoraan satelliitti-pohjaisesta datasta

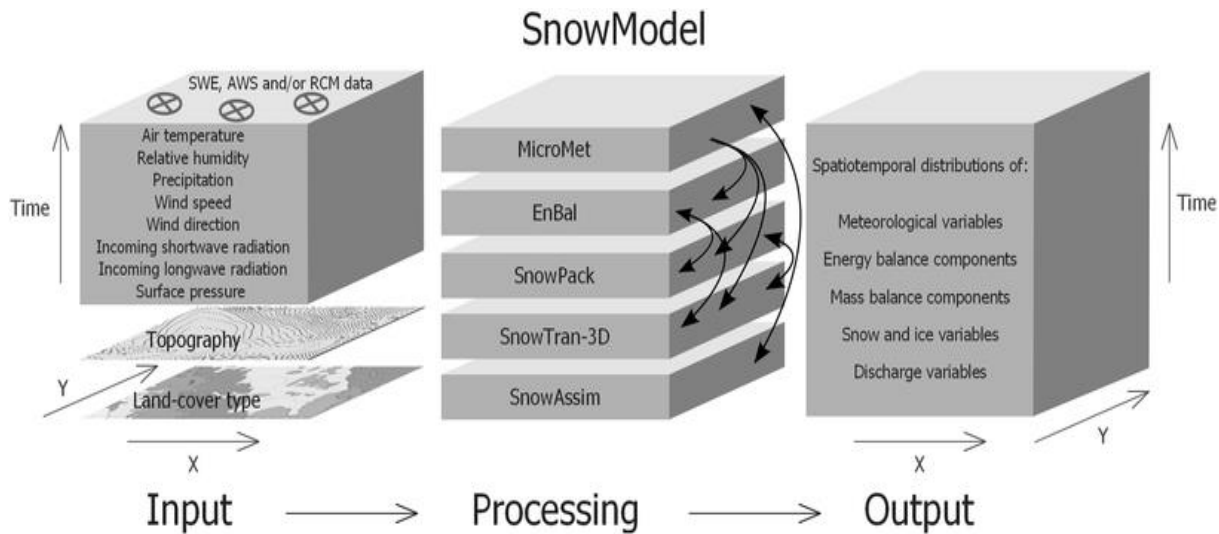
“Satelliitti kertoo paljonko lunta on, mutta ei miten ja kuinka nopeasti se sulaa”



Kevät 2023 :

- Satelliitti SWE ja HOPS SWE hyvin samankaltaisia kokonaisvolyymien osalta
- Satelliitti sulaa yleensä liian aikaisin verrattuna HOPS-simulaatioon

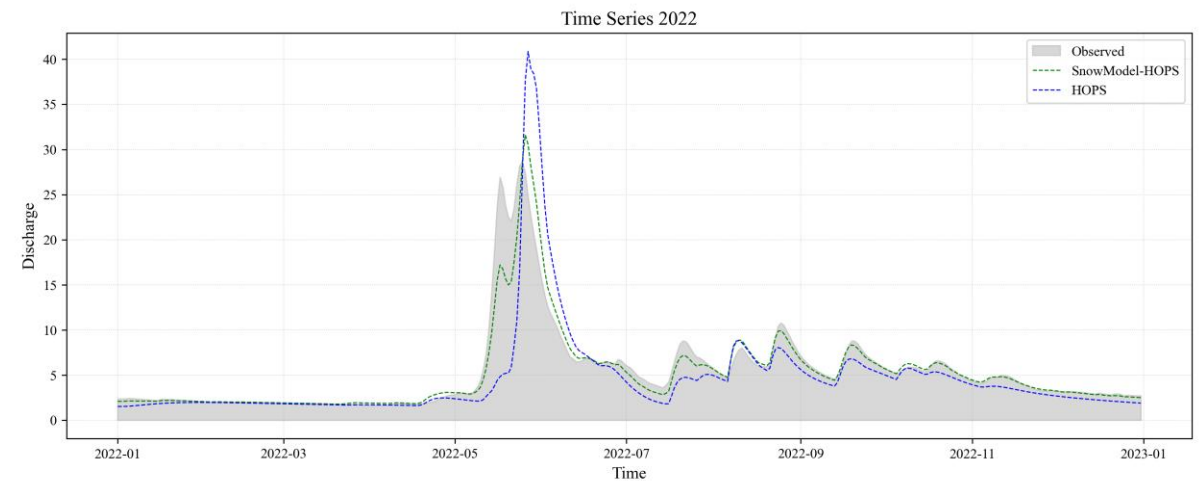
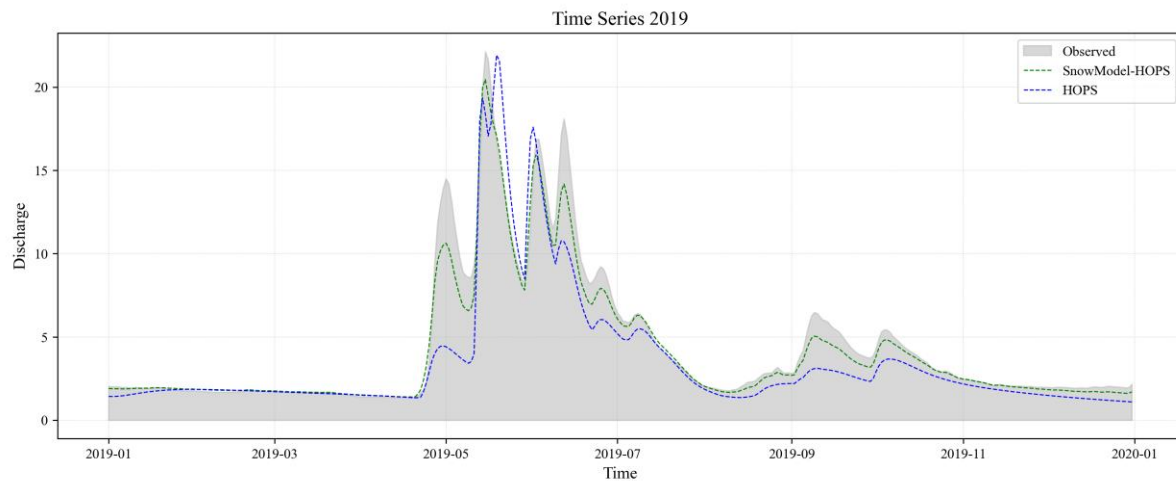
From Snow Mass to Snowmelt Dynamics



- The SnowModel (by Glen E. Liston)
- Fysikaalinen, alueellisesti hajautettumalli
 - Suomessa, 250 × 250 m resoluutiolla
- Edut verrattuna ”aste-päivä”-malleihin:
 - Realistisempi lumen alueellinen jakauma
 - Parempi “rain-on-snow” -tilanteiden simulointi
 - Ei herkkä vuosien välisille vaihtelulle:
 - Tulokset eivät perustu kalibrointiin
 - Parempi sulamisen alkamisen ajoitus
 - Parempi sulamispiikkien mallinnus

Prosessipohjainen mallinnus: HOPS vs. HOPS–SnowModel

- SnowModelin tulosten assimilointi HOPS-malliin
- Parempi sulamisen ajoitus
 - Parempi kevätvirtaamien ennustetarkkuus
- Testattu Ounasjoen osa-alueella (Ounasjärvi ~363 km²)
 - Tarvitaan lisää testejä ennen operatiivista käyttöä
 - SnowModel itsessään vaati vielä lisätöitä voidakseen toimia operatiivisena mallina

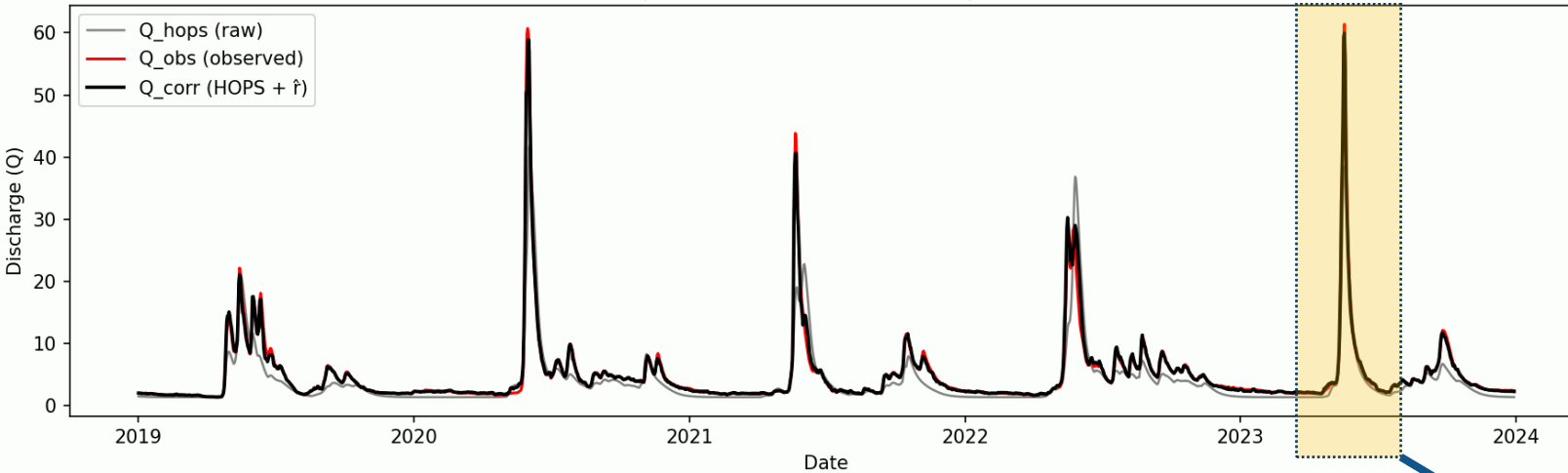


- Kaksi eri mallityyppiä kokeilussa
 1. GRU-neuroverkko-malli
 2. HOPS-XGBoost-malli
 - Hybridimalli: HOPS + ML (residuaalikorjaus)
 - Käytetään koneoppimista ennustamaan HOPS mallin virheitä, sitten korjataan ennustetta virhe-ennusteella
 - Korjattu ennuste = HOPS + residuaali
 - Haitta: Hyvin riippuvainen (ns. Q-lag arvoista) – edellisten päivien virtaamista
 - Hyöty: Huomattavaa parannusta ennusteisiin lyhyellä aikavälillä

HOPS-XGBoost: HOPS + ML (residuaalikorjaus)

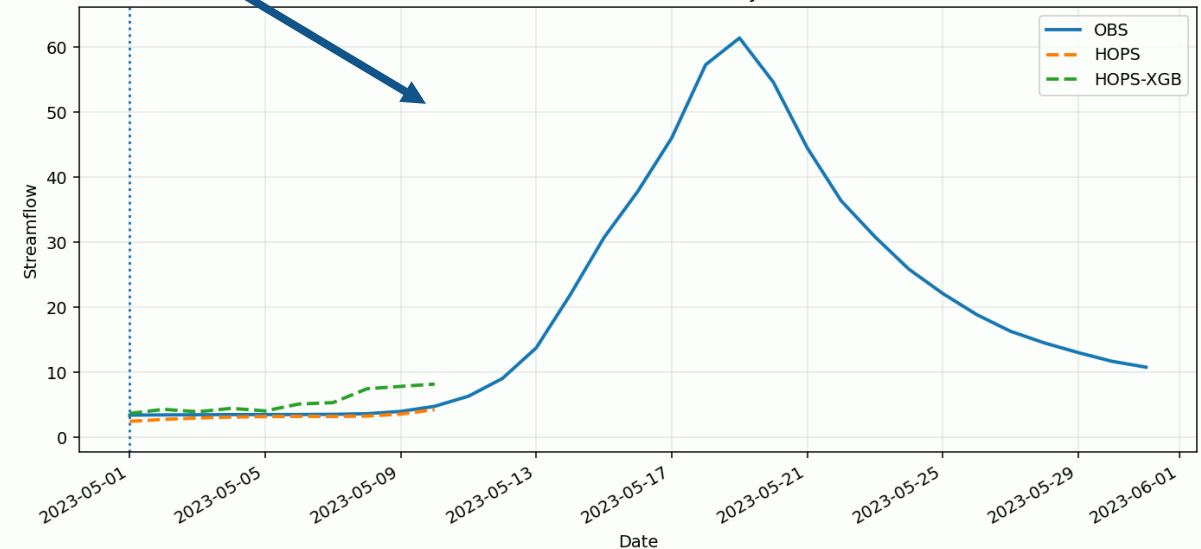


Corrected Q (+1d) [per-season models] | NSE base→corr: 0.76→0.99 | RMSE base→corr: 3.01→0.72 — continuous



- Hybridi-HOPS ML -mallin prototyyppi tuottaa tarkempia ennusteita noin 5 vuorokauden ennustehorisonttiin asti
- Operatiivisessa käytössä yhdistetään ”raaka” HOPS-ennusteet ja hybridi-ennusteen ja tuotamme yhdistetyn (fuusoidun) ennusteen

Forecast initialisation: 01 May 2023



1. GRU-neuroverkko-malli

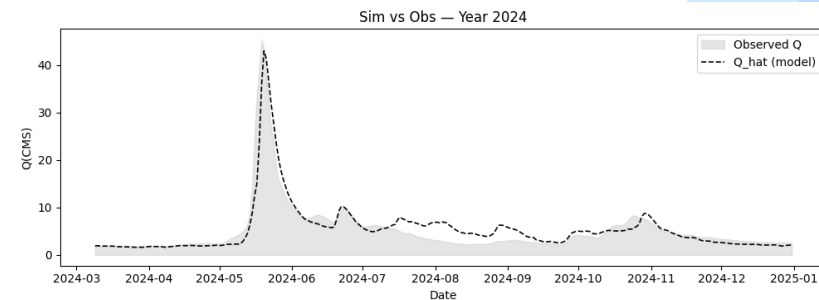
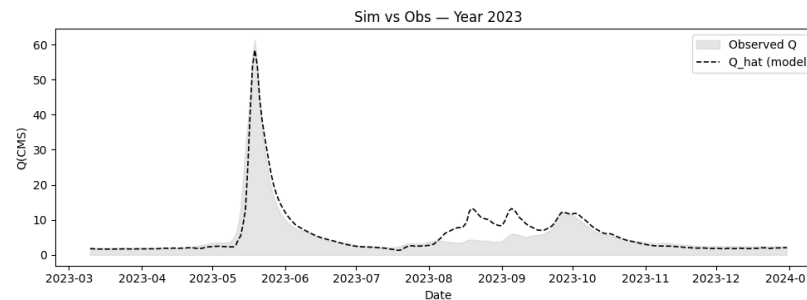
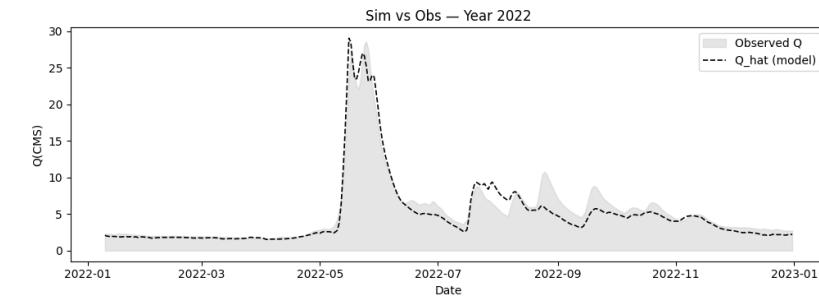
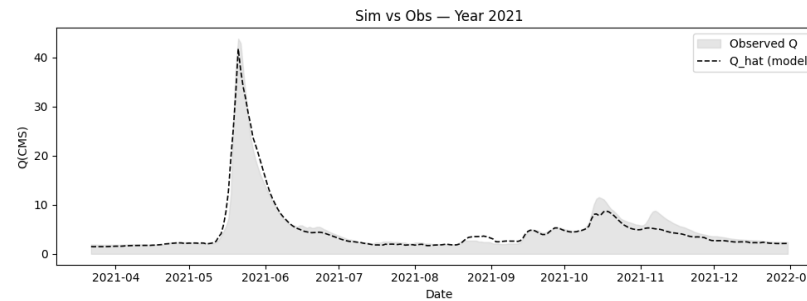
- Käyttää pelkästään fysikaalisesti merkittäviä ennustemuuttujia, kohteena virtaama
 - Esim. SWE (varasto), lumen sulantakertymät, valuntakertymät (HOPS mallista) & meteorologinen data
 - “Ikään kuin tiivistetty hydrologinen malli”
- Hyöty:
 - Ei vaadi (ns. Q-lag arvoja) – edellisten päivien virtaamista
 - Parempi pitkän aikavälin ennusteissa
- Haitta:
 - Heikompi lyhyen aikavälin tarkkuus
 - Potentiaalisesti herkkä poikkeaville vuosille / tilanteille

2. HOPS-XGBoost-malli

Prototype GRU Neural Network Model

| | set | NSE | KGE | R2 | RMSE | Bias% | n |
|---|-----------------|----------|----------|----------|----------|-----------|------|
| 0 | TRAIN | 0.992957 | 0.965403 | 0.992957 | 0.482401 | 1.957870 | 4923 |
| 1 | VAL (2021–2022) | 0.944302 | 0.918499 | 0.944302 | 1.262033 | -7.710928 | 641 |
| 2 | TEST (2023) | 0.879007 | 0.911399 | 0.879007 | 2.725601 | 6.528567 | 297 |
| 3 | TEST (2024) | 0.842660 | 0.892123 | 0.842660 | 2.339031 | 3.115861 | 298 |

- Hyvä pitkän aikavälin ennustetarkkuus
- Kevätvirtaamat mallintuvat hyvin
- Kesä–syksy dynamiikka realistinen, mutta toissijaiset piikit hieman tasoittuvat



Yhteenveto: Miksi teemme tätä?

- Rinnakkais-mallinnus:
 - Tutkimus ja ”kokeilut” mahdollistavat innovaatiota
- Sulamisen ajoitus ratkaisee huippuvirtaaman ajankohdan
 - SWE-assimilaatio ei riitä yksin
 - Fysikaaliset lumimallit parantavat tuloksia
- Koneoppiminen parantaa erityisesti lyhyen aikavälin ennusteita ja yleisesti kevätvirtaama ennusteita

Missio: “Tutkimuksesta operatiiviseksi tuotteiksi”

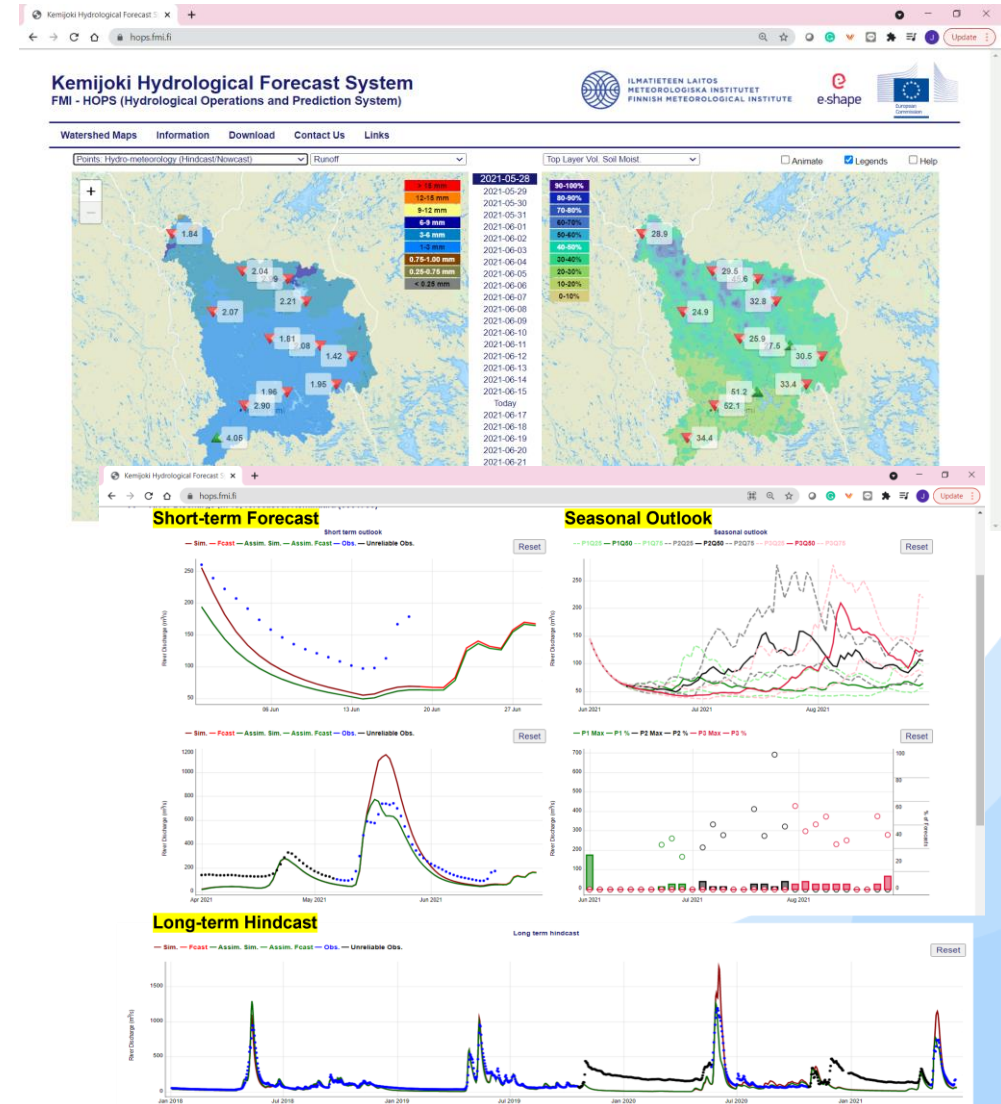
Nykyinen ennustejärjestelmä

Ilmatieteen laitoksen sisäinen web-palvelu (<https://hops.fmi.fi/>)

- (päivittymässä)
- Päivittäiset 10 vrk ennusteet deterministiset ennusteet
 - Meteorologisen pakotteena käytetään ECMWF H-RES ainestoa

Palvelussa on 4 pääkomponenttia:

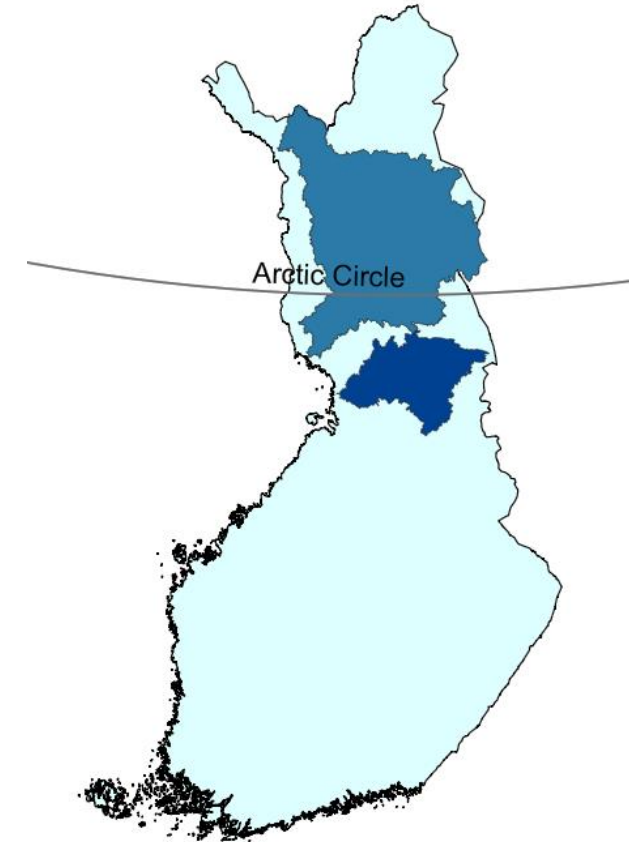
1. HOPS maanpintamalli (5×5 km, aliruudukot)
 - 5×5 km + aliruudukot (metsä, avoinalue, suot)
2. HOPS Virtausreititys
3. Koneoppimiseen pohjautuvat virtaamaennusteet (päivittymässä)
4. Ulkoisten lumituotteiden assimilaatio (päivittymässä)
 - Satelliitti-pohjainen lumenvesiarvo (SWE) -assimilaatio
 - SnowModelin tulosten assimilointi HOPS-malliin



SUHO – Projekti (SYKE & Oulun Yliopisto)



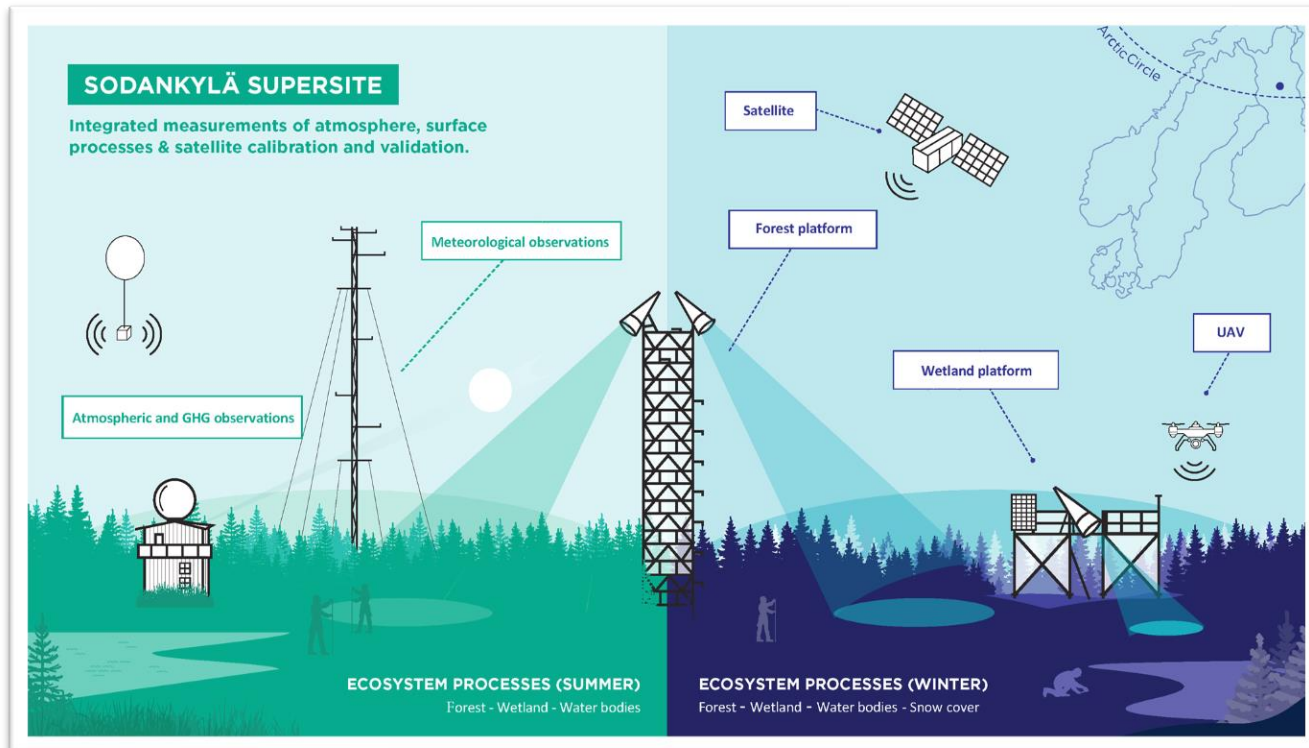
- SYKE:n ja Oulun yliopiston uusi akatemia-hanke
 - Vastuulliset johtajat: Enso Ikonen (UOULU) ja Noora Veijalainen (Syke)
 - Suomen Akatemia / temaattisen tutkimuksen jaosto: Tulevaisuuden kestävien energiaratkaisujen tutkimuksen haku
- Kohdevesistöt: Kemijoki ja Iijoki
- Vesivoimatuotannon, tulvariskien hallinnan ja ekologisten vaatimusten yhteensovittaminen
 - Säännöstelyn optimointi eri tavoitteiden näkökulmasta, ilmastonmuutos huomioiden
 - Oulun yliopistossa tehdään verkon taajuussäädön analyysia - "Eli miten vesivoimaa käytetään sähköverkon stabilointiin" → uusiutuvan energian (tuuli/aurinko) tasapainotus
 - SYKE (WSFS) → Hydrologisten ennusteiden kehittäminen ja epävarmuuden parempi arviointi
- Yhteistyökumppanit: EVK ja vesivoimayhtiöt, Fingrid



Sodankylän Supersite



- Fokuksena arktis-boreaalinen tutkimusympäristö
- Satoja havaintoja useista lähteistä
- Tukee Copernicus- ja ESA-missioita (Cal/Val toiminta)
- Keskeinen rooli lumen ja hydrologian tutkimuksessa



Seuraavat kolme vuotta, 2026–2028:

- Alueen, infrastruktuurin ja tieteellisen toiminnan strateginen laajentaminen yhteistyössä teollisuuden kanssa
- Mittalaitteiden hankinnan toteutus, uusien tuotteiden kehittäminen sekä mittauskampanjoiden käyttöönotto

Yhteystiedot:

Hannakaisa.Lindqvist@fmi.fi

Anna.Kontu@fmi.fi

Kiitos!



Suomen
Akatemia