



Pohjavedenoton hallinnointi digitaalisella kaksosella: Kokkolan tutkimusalue

Anna Autio,
Pekka Rossi

05.06.2026

Vesi- Energia- ja Ympäristötekniikan Yksikkö

Oulun Yliopisto

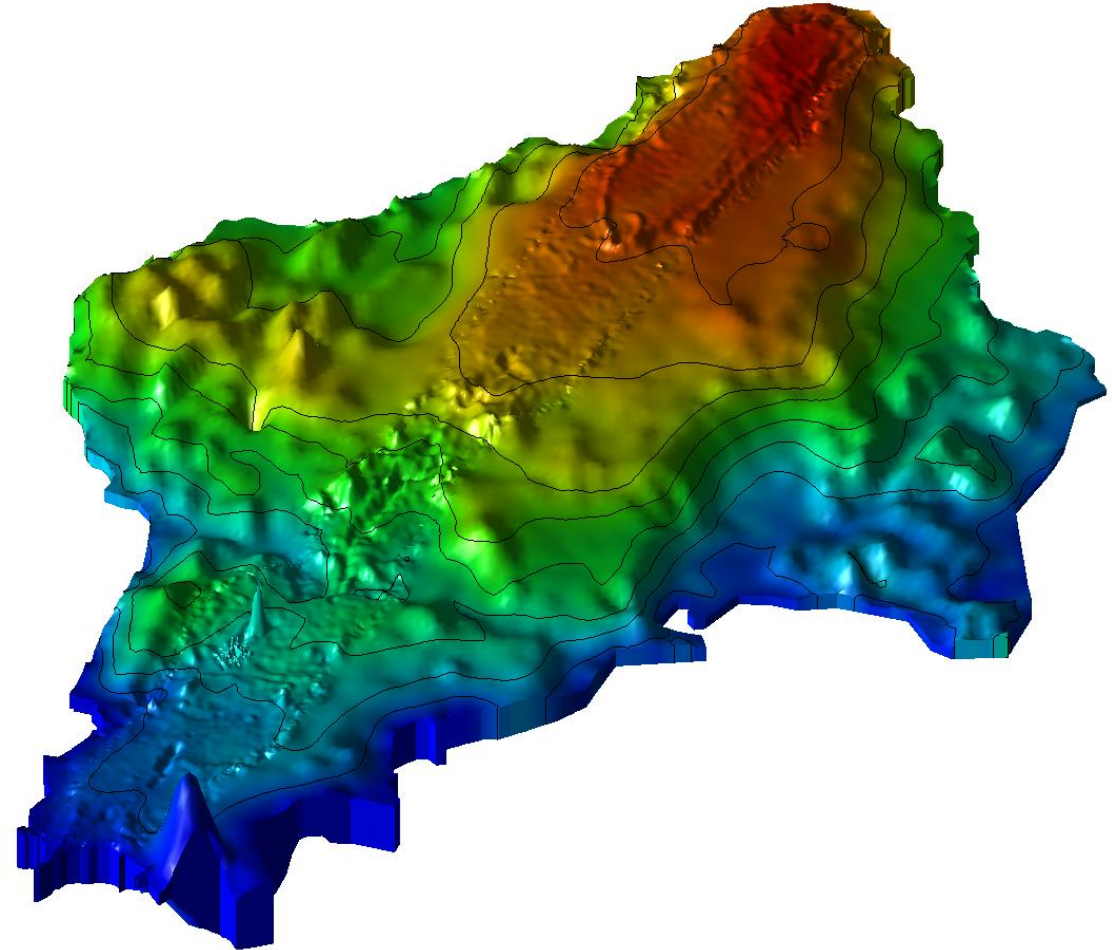


Esityksen sisältö

- Projektit:
 - Digitaaliset Vedet
 - WaterFall
- Digitaalisen kaksosen määritelmä
- Digitaaliset kaksoset vesivarojen hallinnassa
- Patamäen koekohde
 - Hahmoteltuja kaksosmallipalveluja
 - **Patamäen digitaalinen kaksonen**
 - DT:n vaatimukset ja ohjelmistot
 - Patamäen DT:n tutkimushankkeen vaiheet
 - Stationaarinen virtausmalli
 - Alueen hydrogeologinen seuranta
 - Tulevaisuuden haasteet

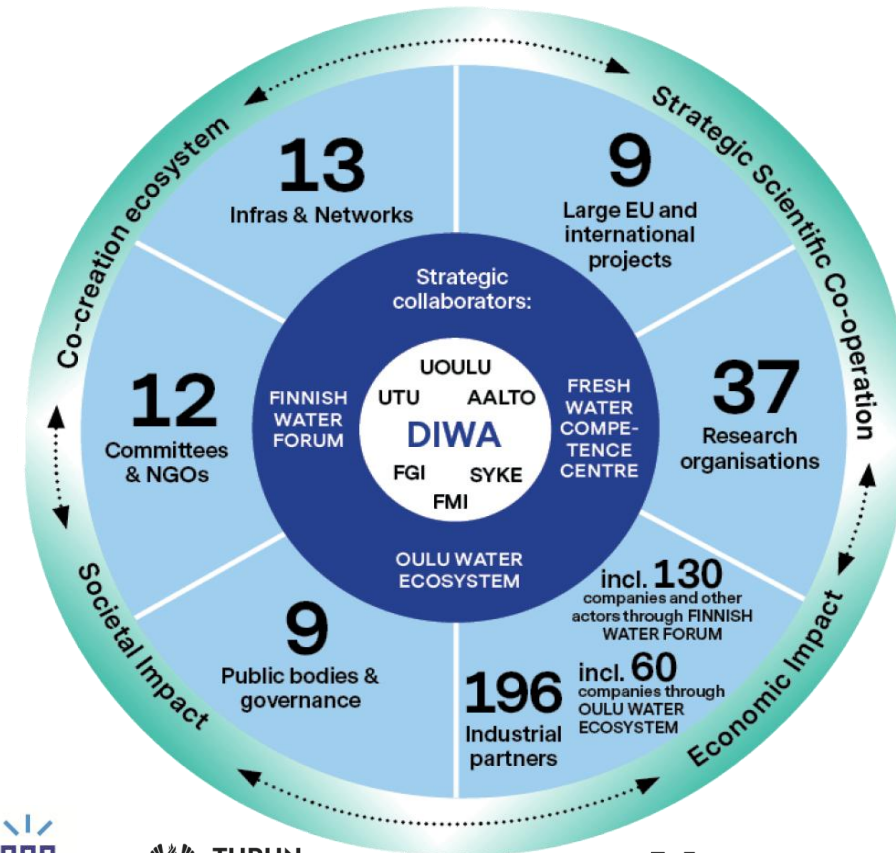
UGrid:
Head

22.4
19.9
17.4
14.9
12.4
9.9
7.4
4.9
2.4
-0.1



"Johtava tutkimus- ja innovaatioekosysteemi, joka tuo tutkimusta ja innovaatioita tukemaan vesialan päätöksentekoa ja johtamista – Digitaalisesti."

- Päärahoitus: Suomen Akatemia
- Päätaavoite: Tuottaa vesien havainnoinnin, mallintamisen ja digitalisaation avulla uutta tutkimustietoa sekä kestäviä ratkaisuja vesivarojen hallintaan.
- **Digitaaliset kaksosten sekä muiden digitaalisten ratkaisujen kehittäminen valikoiduille alueille**
- 276 Yhteistyökumppania (tutkimusinstituutiot, julkisen ja yksityisen toimijat, yritykset)





DIWA-tohtorikoulutuspilotti



**Yli 60
väitöskirjatutkijaa**
partneriyliopistoissa,
yhteistyössä
suomalaisten
tutkimusinstituutioiden
ja teollisuuden kanssa.



Yli 15 eri maasta
DIWA
tohtorikoulutuspilottin
väitöskirjatutkijat ovat
kotoisin Euroopasta ja
sen ulkopuolelta.



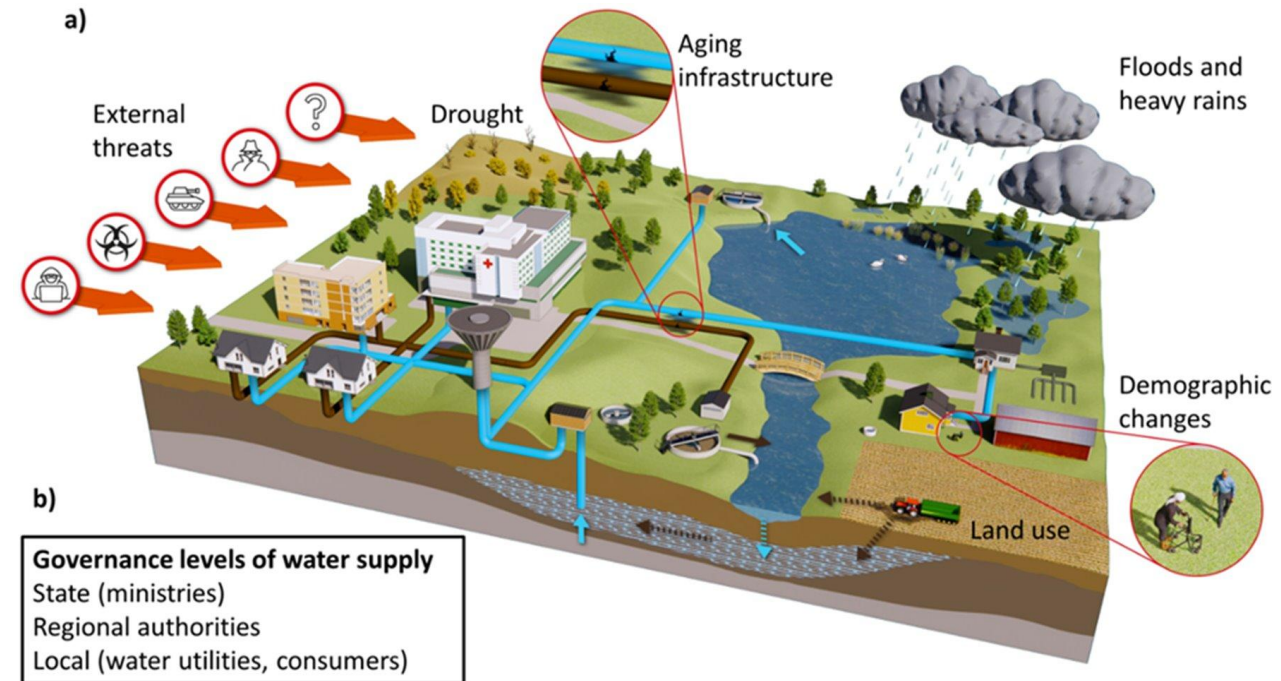
**Monitieteistä
tutkimusta**
Väitöskirjatutkijoiden
tutkimusaiheet vaihtelevat
ympäristöoikeudesta- ja
politiikasta robotiikkaan,
vesihuollon ekologiaan,
hydrologiaan, tekniikkaan
ja biologiaan.





Turvallista vettä kaikille (WaterFall)

- **Rahoitus:** Strateginen Tutkimus Neuvosto
- Osa **Vesi hyvinvoinnin, turvan ja rauhan elementtinä (WAVE)** -ohjelma: Kestäviä ja oikeudenmukaisia tiedepohjaisia ratkaisuja vesien ja meriympäristön hallintaan ja vesiturvallisuuden vahvistamiseen
- **Päätavoite:** vesiturvallisuuden ja vesihuollon toimintavarmuuden parantaminen raakavesilähteeltä kuluttajalle
- WP2 – Vesihuoltojärjestelmät (UOulu)
 - T2.2. Digitaaliset ratkaisut vesivarojen hallintaa ja ongelmien ennustamiseen:
 - **DT:n kehittäminen ja testaaminen keskikokoiselle vesilaitokselle (>5000 käyttäjää) pohjavesiveden oton hallinnan osana**



Partnerit:

- Terveyden ja hyvinvoinninlaitos (THL) – koordinaattori
 - Suomen ympäristökeskus (Syke)
 - Oulun yliopisto (UOulu)
 - Lapin yliopisto (Ulap)
 - Maanpuolustuskorkeakoulu (MPKK)
 - DemosHelsinki
- Oulun yliopisto



Mitkä ovat digitaaliset kaksoset?

- Englanniksi: Digital Twins (DT)
- Ei yhtenäistä määritelmää
- **Digitaaliset kaksoset ovat virtuaalisia esityksiä/”koppioita” reaalimaailman kohteista ja prosesseista, jotka ovat kaksisuuntaisessa vuorovaikutuksessa reaalimaailman kohteiden kanssa.**
- DT-tekniikan kehitystä ovat edistäneet IoT-antureiden yleistyminen, tehokkaammat tietokoneet sekä uusien mallien ja algoritmien, kuten tekoälyn, kehitys.
- Ensimmäinen dokumentoitu DT kehitetty NASA:n Apollo 13 avaruusmatkalle.
- Konseptin popularisoi Michael Grieves ja John Vickers tuotteen elinkaaren hallinnan innovaationa (Singh et al, 2021).





Mitkä ovat digitaaliset kaksoset?

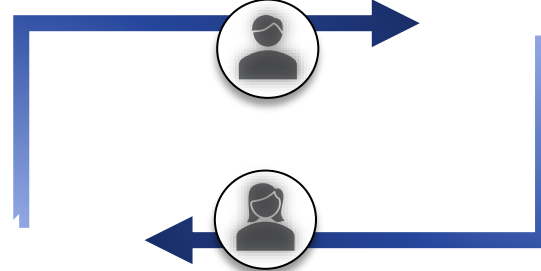
Fyysinen vastine

Anturit ja havainnointijärjestelmät, tiedonkeruu

Fyysisestä virtuaaliseen

Datafuusio, data assimilaatio, käänteiset ongelmat

Ihmisen ja digitaalisen kaksosen välinen vuorovaikutus



Ihmisen osallistuminen päätöksentekoon

Virtuaalinen esitys

Mallinnus ja simulointi (tekoäly, empiiriset ja fysiikkapohjaiset mallit)
Optimointi
Visualisointi

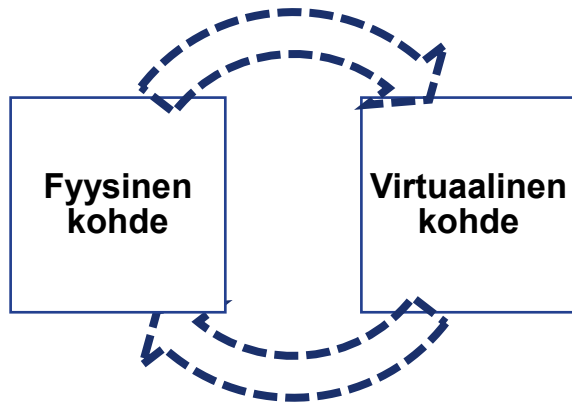
Virtuaalisesta fyysiseen

Automaattinen ohjaus ja päätöksenteko

Perustuu kaavioon teoksesta National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2024



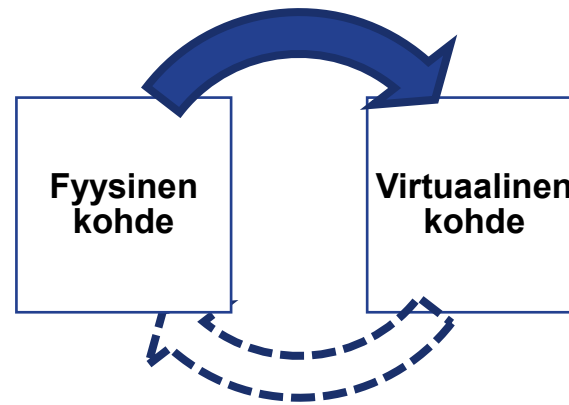
Mitkä ovat digitaaliset kaksoiset?



Digitaalinen malli (Perinteinen malli)

- Offline datan keruu
- Mallin data voidaan päivittää säännöllisellä aikavälillä

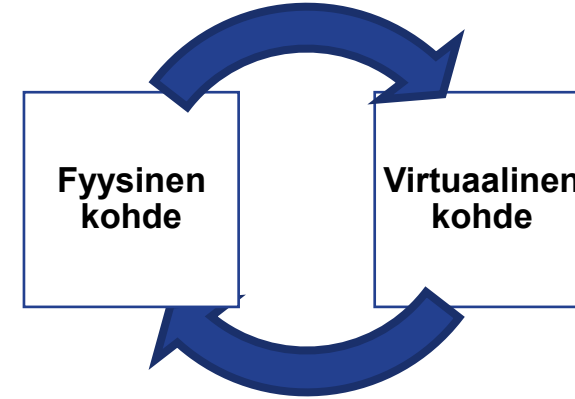
Esimerkki: Pohjaveden tason mallintaminen historiallisten aineistojen perusteella, vesilupaprosessit



Digitaalinen varjo

- Automatisoitu yksisuuntainen datavirta
- Reaaliaikainen ("online") datan keruu
- Malli päivittyy reaaliaikaisesti

Esimerkki: Pohjaveden tason ennustaminen assimiloimalla reaaliaikaiset mittaukset



Digitaalinen kaksonen

- Lähes reaaliaikainen kaksisuuntainen interaktio
- Automatisoitu reaaliaikainen dataintegroatio
- Automaattinen ohjaus ja päätöksenteko/ihmisen osallistuminen reaaliaikaiseen päätöksentekoon

Esimerkki: Pohjaveden tason ennustaminen assimiloimalla reaaliaikaiset mittaukset ja semiautomaattinen vedenoton ja puhdistusprosessin säätö



Manuaalinen datan kulku



Reaaliaikainen (semi-automattinen) datan kulku

Mukailtu lähteestä:
Kritzinger et al. 2018



Digitaaliset kaksoet vesivarojen hallinnassa

Hyödyt:

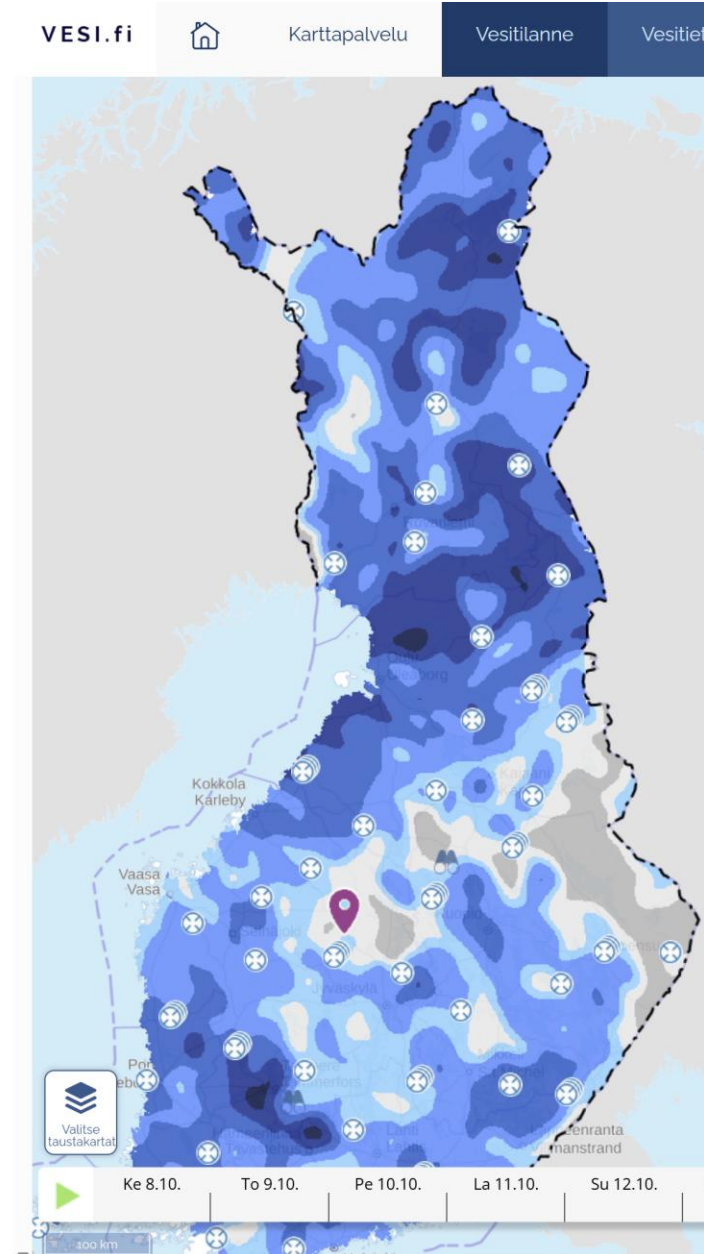
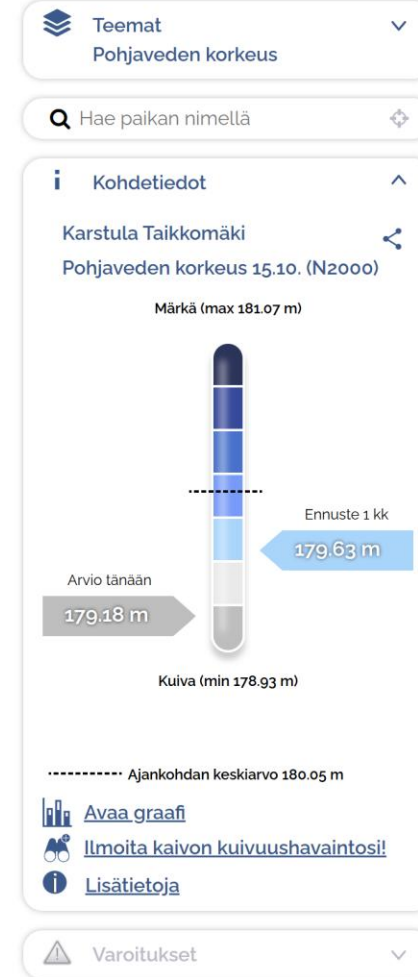
- Mahdollistaa parhaan mahdollisen tilan arvioinnin jatkuvalla mallin tilan päivityksellä
- Parantaa päätöksenteon tarkkuutta ja ennakoitavuutta
- Tukee kestäväää vesienhallintaa ja riskienhallintaa

Mahdolliset käyttökohteet:

- Tulvariskien ennakointi
- Vesistöjen säännöstely (padot ja vesilaitoksen)
- Vedenlaadun ja ravinnekuormituksen hallinta
- Jakeluverkostojen optimointi
- Maatalouspeltojen vesihallinta (kastelu/kuivaus)

Operatiiviset DT:t Suomessa:

- Vesistömallijärjestelmä (WSFS)
- Vedenlaadun ja ravinnekuormituksen mallinnus- ja arviointijärjestelmä WSFS-Vemala

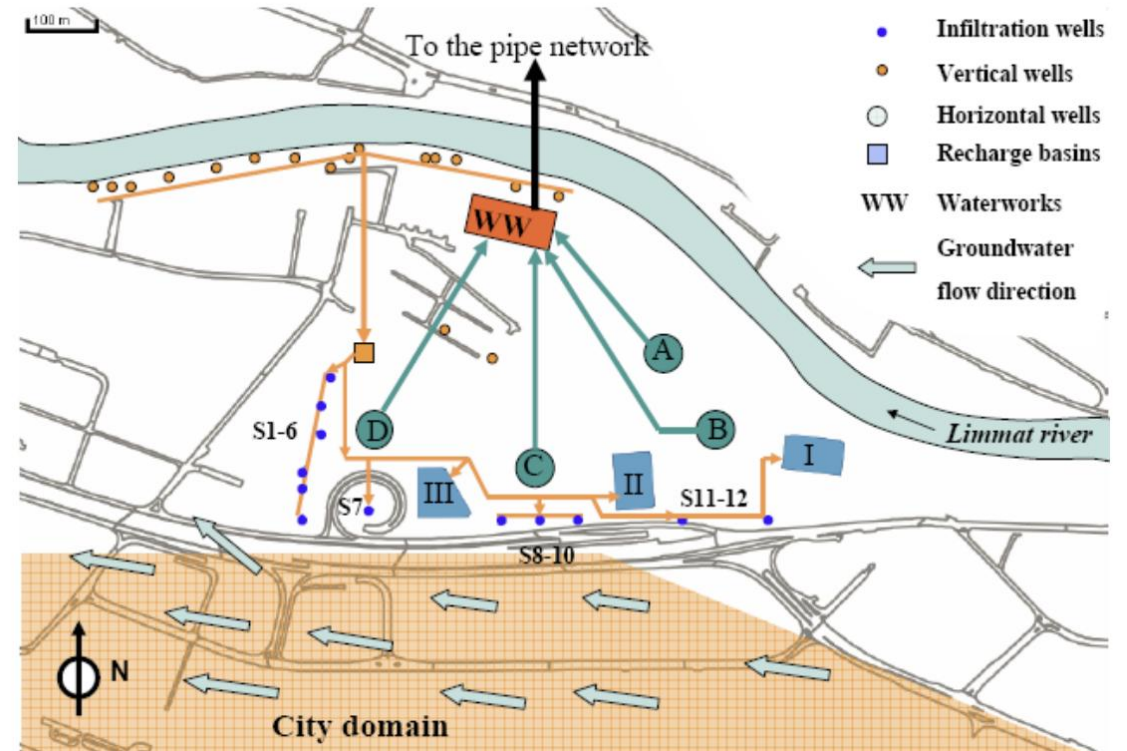




Miksi digitaaliset kaksoset pohjavesialueille?

- Operatiivisen käytön kehitettyjä DT-malleja hyvin vähän:
 - Zürich, Sveitsi
 - Guantao & Heihe, Kiina
 - Suomalaiset pohjavesialueet suhteellisesti pieniä ja vasteet suhteellisen nopeita
- ↓
- Pohjavesialueiden tila vaihtelee ajallisesti ilmasto-olosuhteiden ja vedenoton mukaan

Digitaaliset kaksoset?



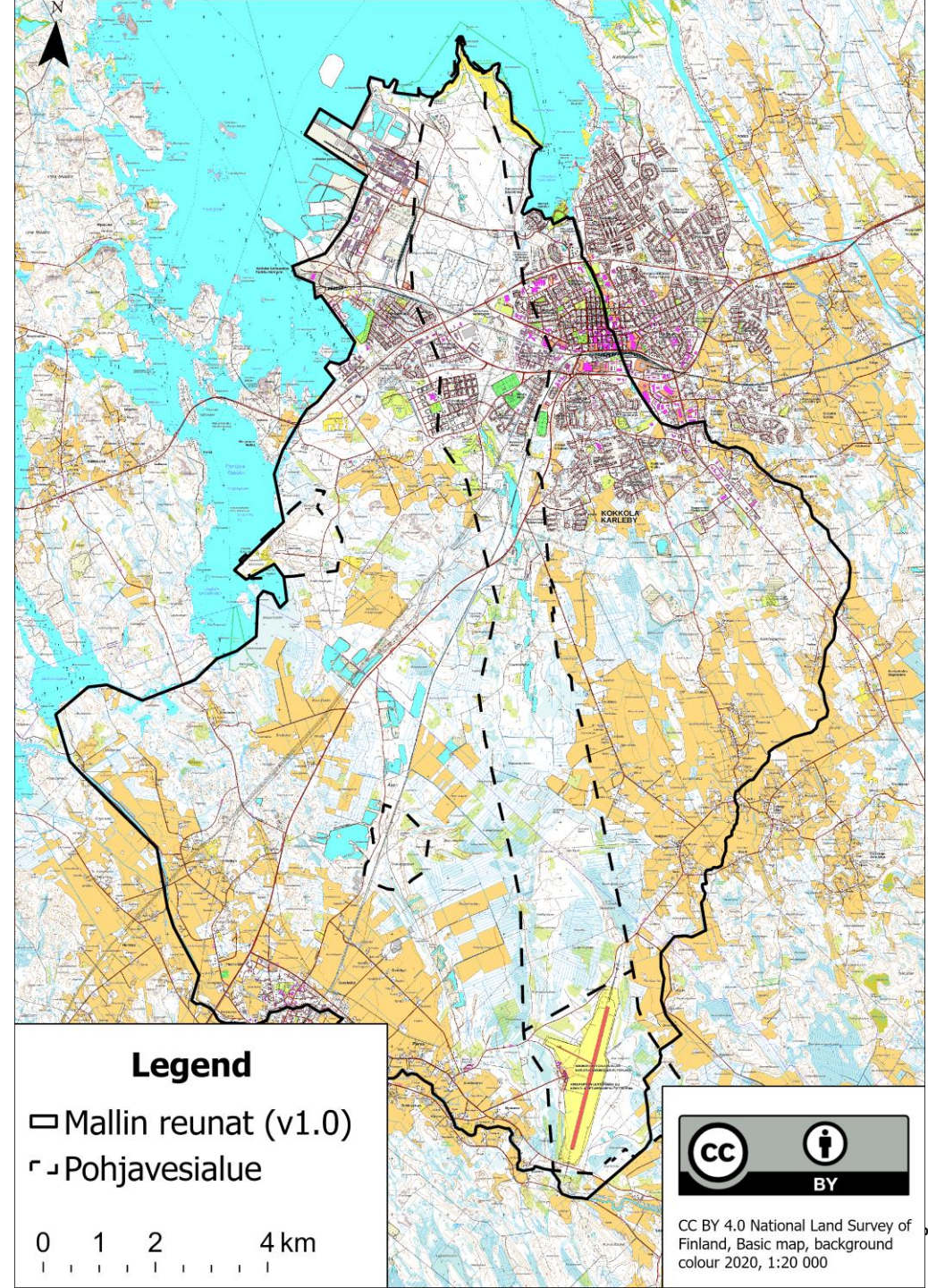
Bauser, G., 2011



Patamäen koekohde

- 1-luokkaan pohjavesialue: 26.78 km²
- Pohjaveden muodostumisalue: 21.18 km²
- Pituus ~17 km
- Pohjaveden otto ~6500 m³/d
- Kaksi vedenottamo: Patamäki (maks. 12 000 m³/d) ja Saarikangas (5 000 m³/d)

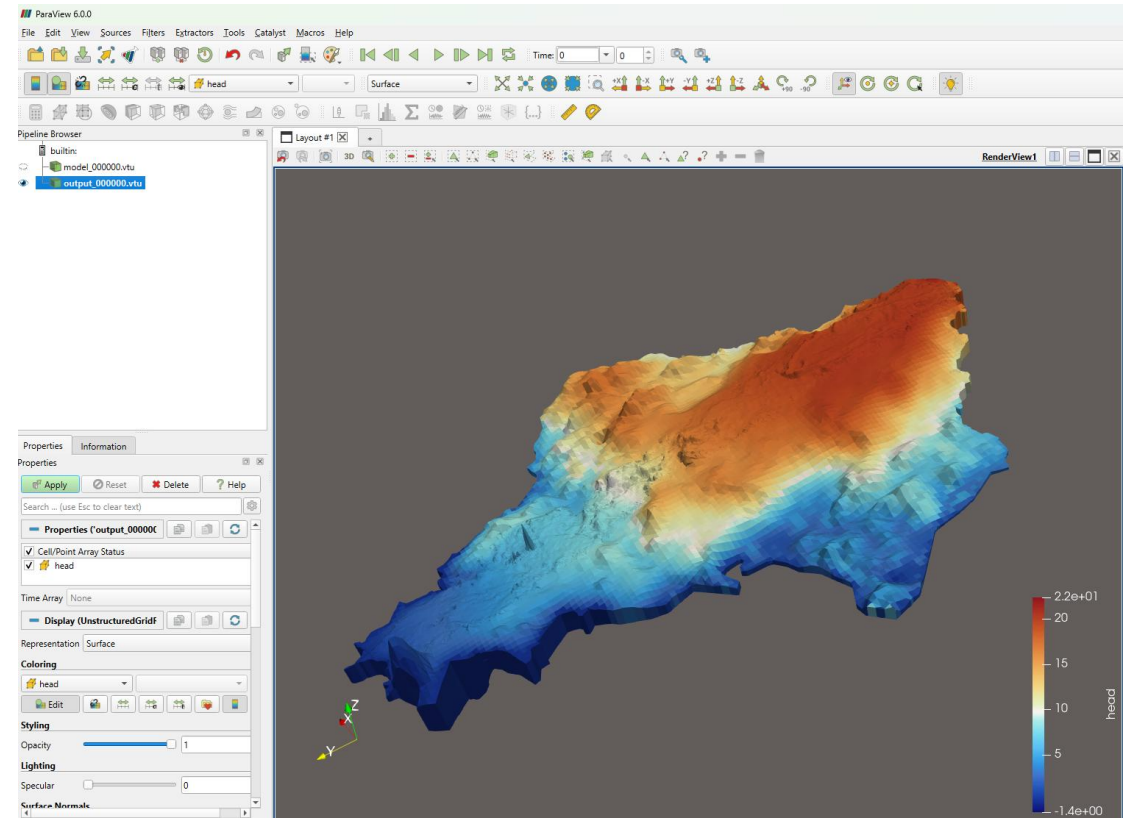
- Pohjavesialueen reunalla maankäyttöä, jolla voi olla haitallinen vaikutus pohjaveteen: teollisuus, hautausmaa, kaupunki sekä lentoasema
- Vedenoton tarve lisääntynyt viime vuosina
- Paljon geologisia tutkimuksia ja aiempia pohjaveden virtausmalleja (GTK)





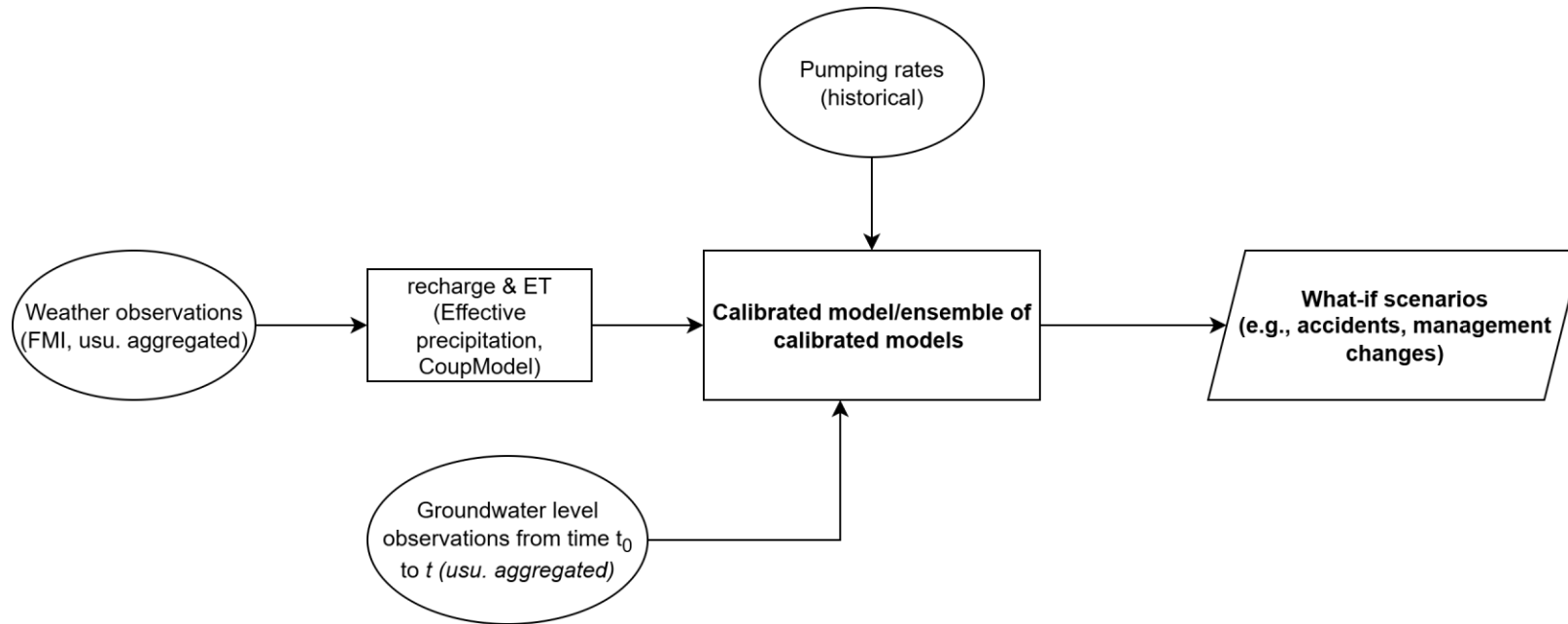
Hahmoteltuja kaksosmallipalveluja

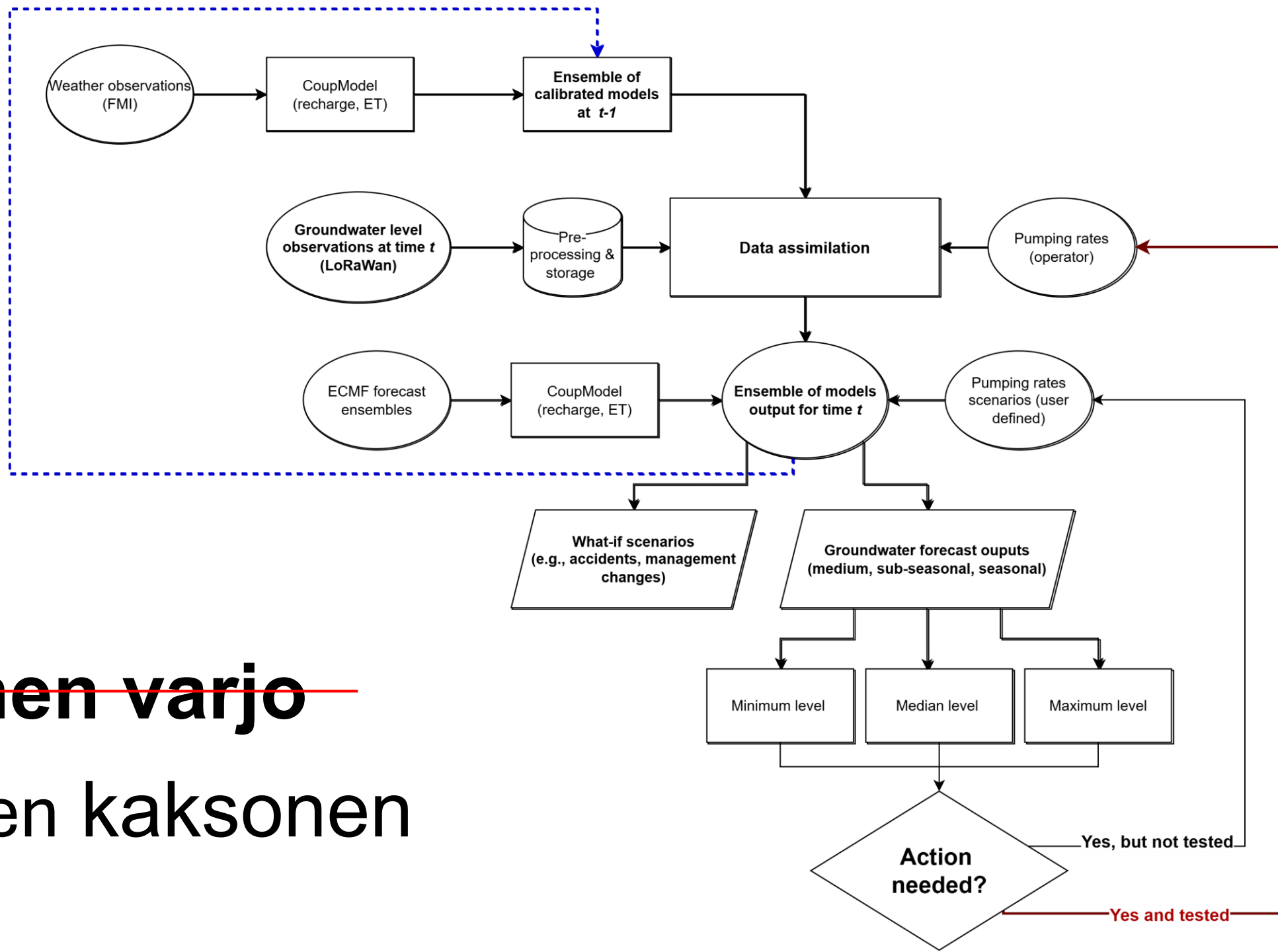
- Euroopan keskipitkien sääennusteiden keskuksen (EMCF) sääennusteisiin perustuvat pohjavesiennusteet:
 - Keskipitkän aikavälin ennusteet (15 päivää)
 - Pitkän aikavälin ennusteet (46 päivää)
 - Kausiennusteet (sääennusteet 13 kuukautta tulevaisuuteen)
- Tuotteet:
 - Alueelliset pohjavedenpintojen tasokartat
 - Kaivokohtaiset pohjavesitasot
 - Ottamokaivojen sieppausalueiden dynamiikka
 - Kaivojen välinen vedenoton optimointi





Perinteinen virtausmalli





~~Digitaalinen varjo~~

Digitaalinen kaksonen

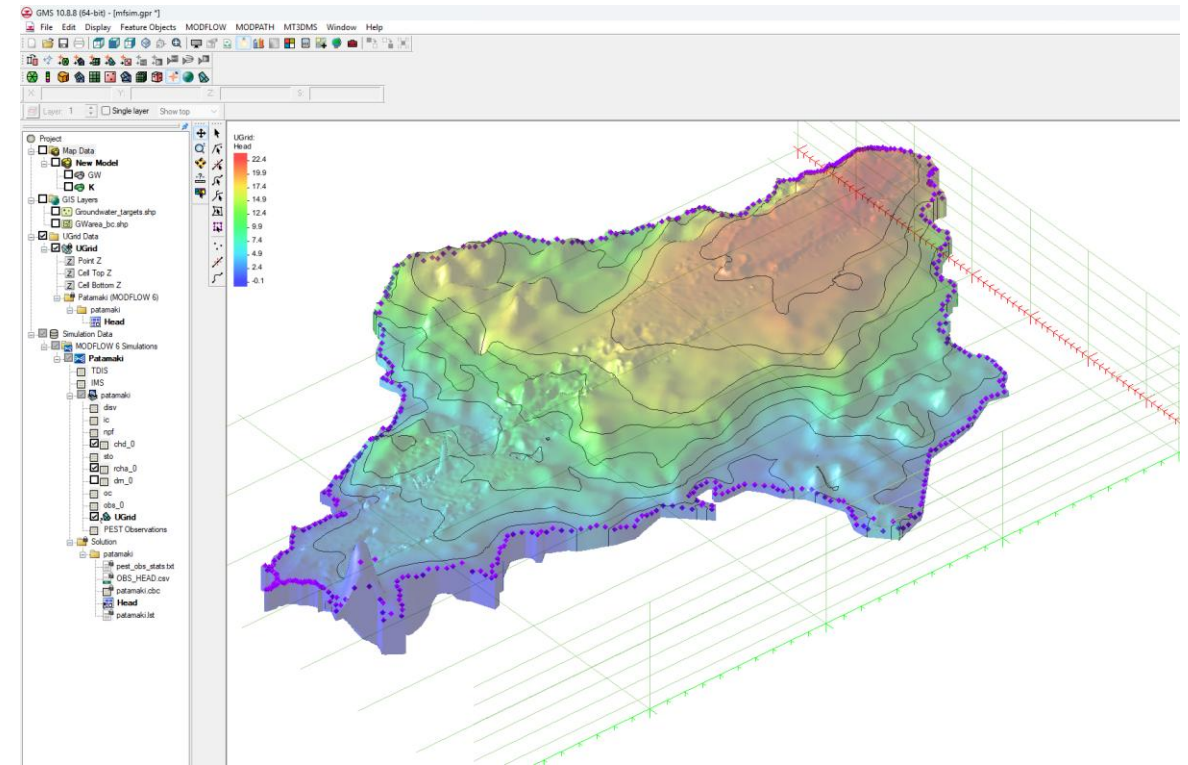


1. “Yksinkertaisen” virtausmalli
 - Päägeologialaiset piirteet (kalliopinta) ja spatiaalisesti vaihteleva maaperä
 - Spatiaalisesti ja ajallisesti vaihteleva pohjavedeksi suotautuvan veden määrä
 - (“unstructured”) laskentaverkko
 - Nopeat ajot→ Riittävästi hyvä malli

2. Ohjelmisto (luotettava, ei-kaupallinen):
 - MODFLOW 6 (Flopy python-paketti)
 - Kalibrointi/datan assimilaatio PEST++ (Pyemu python paketti)
 - Python datan käsittelyyn ja mallin tulosten visualisointiin

3. Kokonaisuus:
 - Toimiva tehokkaalla pöytäkoneella (turvallisuus)

DT:n vaatimukset ja ohjelmistot





Patamäen DT:n tutkimushankkeen vaiheet

Vaihe 1: Stationaarisen ("steady-state") virtausmallin rakentaminen ja kalibrointi

Vaihe 2: Muuttuva eli transientti virtausmallin rakentaminen ja kalibrointi

Vaihe 3: Data assimilaatio historialliselle aikasarjoille

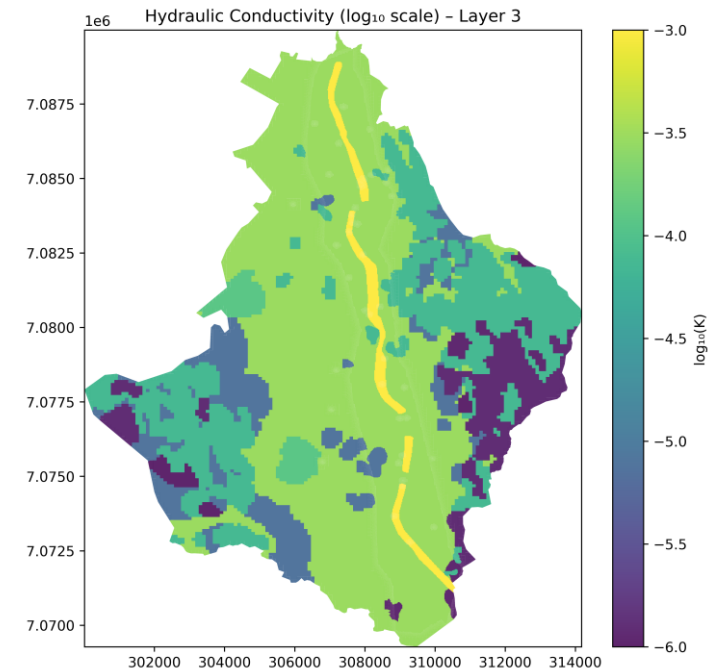
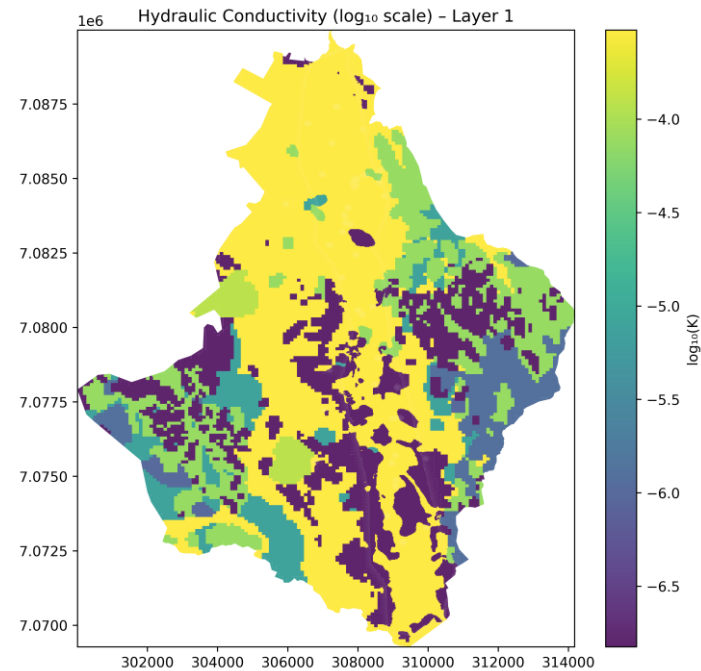
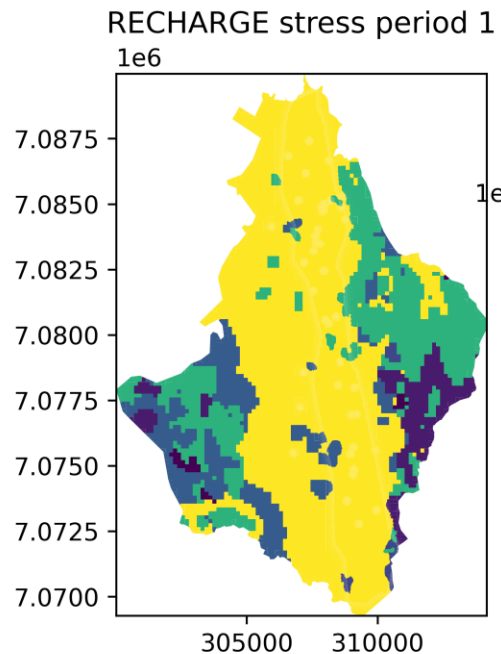
Vaihe 4: Reaaliaikaisen datan integraatio

Vaihe 5: Ennusteiden muodostamisen ja testaus



Stationaarinen ("steady-state") virtausmalli - rakenne

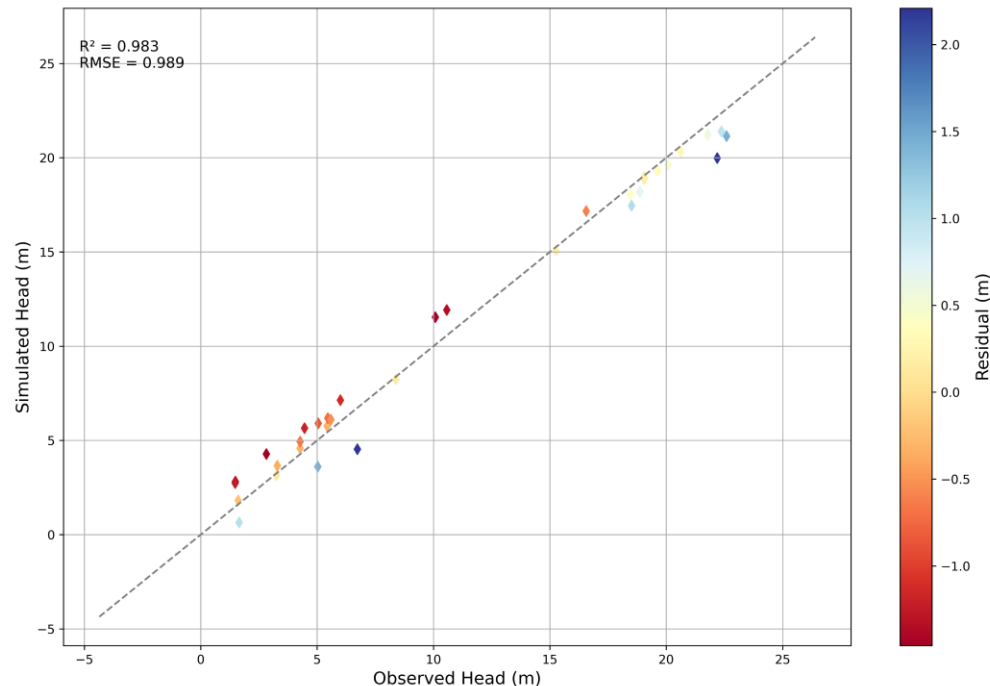
- Yksinkertainen virtausmalli laadittu MODFLOW6:lla Pythonin flopy-paketin avulla
- Perustuu geologisiin tutkimuksiin ja maaperäkarttoihin
- Vaihtelevat muodostumisnopeudet





Stationaarinen ("steady-state") virtausmalli - tulokset

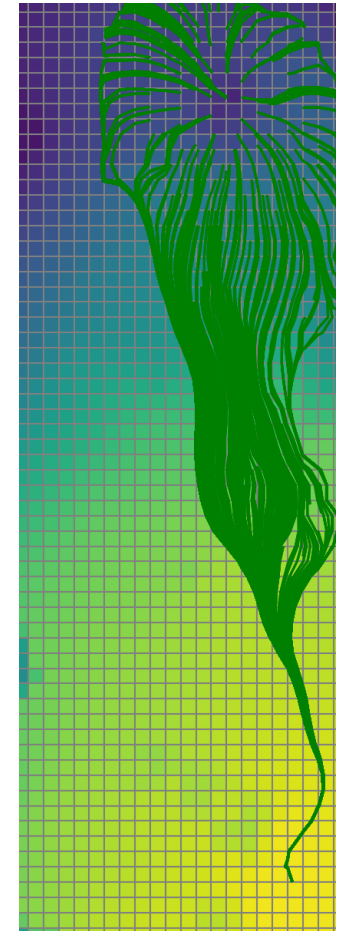
- PEST++-kalibrointi toteutettu Pythonin pyemu-paketin avulla
- Saavutettu tarkkuus on hyvä
- Mallissa on onnistuneesti käytetty partikkeliseurantaa (kaivojen sieppausalueet)



5 vuoden kulkeutumiskäyrät



"Steady-state"
kulkeutumiskäyrät

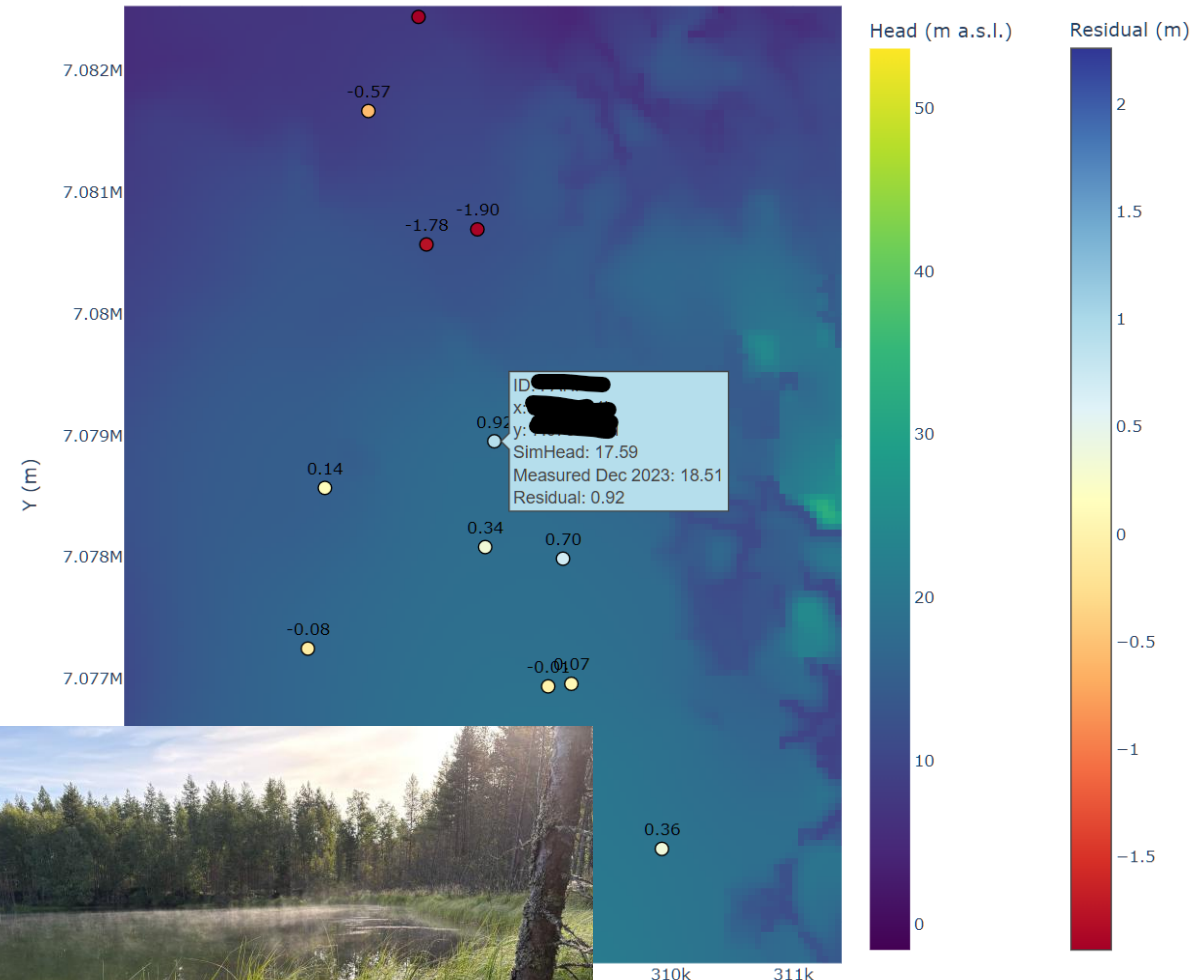




Seuraavat vaiheet

- Muuttuvan (transientin) virtausmallin rakentaminen ja kalibrointi vaihtelevissa sää- ja pumppausolosuhteissa
 - Pohjaveden virtauksen dynamiikan realistisempi kuvaus
- Avoimet kysymykset
 - **Harjun rakenne:** Onko harjun ytimessä katkoksia tai heikompia vyöhykkeitä?
 - **Teollisuusalue pohjavesialueen vierellä:** Voiko sieppausalue eri olosuhteissa laajeta, riskiä juomaveden laatuun?
 - Lampien rooli pohjaveden virtauksessa/varastokapasiteetissa?

Hydraulic Head Map (Layer 0) with Residuals (measured-simulated)





Alueen hydrogeologinen seuranta

- Jatkuva toimiva pohjaveden IoT-seuranta osana vesilaitoksen toimintaa
- Lisätään ymmärrystä pohjaveden muodostumisesta ja epäkyllästyneen vyöhykkeen dynamiikasta
- Maaperän kosteuden ja maaimun mittausta anturipareina
 - mittaussyvytydet 20 cm ja 50 cm





Tulevaisuuden haasteet



- Saavutetaanko hahmoteltuja hyötyjä?
- Turvallisuus (kriittinen infrastruktuuri)
- Käyttäjien digitaaliset taidot



Kiitos!

Mitä odottaisitte pohjavesien hallinnan digitaalisilta kaksoksilta?



Viitteet

Alzraiee, A. H., White, J. T., Knowling, M. J., Hunt, R. J., & Fienen, M. N. (2022). A scalable model-independent iterative data assimilation tool for sequential and batch estimation of high dimensional model parameters and states. *Environmental Modelling & Software*, 150, 105284. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2021.105284>

Bauser, G. (2011). *Real-time control of an urban groundwater well field: offline simulations and online application* (Doctoral dissertation, ETH Zurich). <https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-a-006717299>

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022. <https://doi.org/10.1016/J.IFACOL.2018.08.474>

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2024). Foundational Research Gaps and Future Directions for Digital Twins. In *Foundational Research Gaps and Future Directions for Digital Twins*. National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/26894>

Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E. P., Qiao, Y., Murray, N., & Devine, D. (2021). Digital Twin: Origin to Future. *Applied System Innovation* 2021, Vol. 4, Page 36, 4(2), 36. <https://doi.org/10.3390/ASI4020036>