

Sähkön varastointi Suomessa ja Pyhäjärvelle suunnitellun pumppuvoimalaitoksen kannattavuus

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



Santtu Karhinen

Suomen ympäristökeskus SYKE

10.12.2019

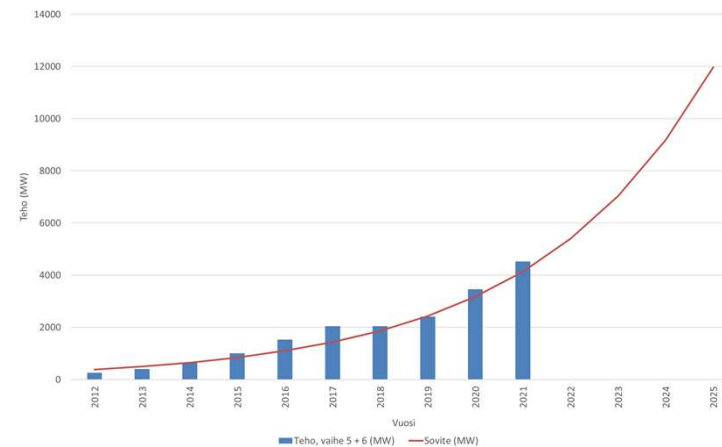
Tämä materiaali on tuotettu osana Elinvoimaa Pohjois-Pohjanmaalle vähähiilisillä ja resurssiviisailla ratkaisuille (Väre) -hanketta, jota rahoittavat Pohjois-Pohjanmaan liitto Euroopan aluekehitysrahaston varoista sekä Haapajärven, Nivalan ja Pyhäjärven kaupungit ja Iin, Lumijoen, Muhoksen, Tyrnävän ja Utajärven kunnat.

Sähkömarkkinamurros

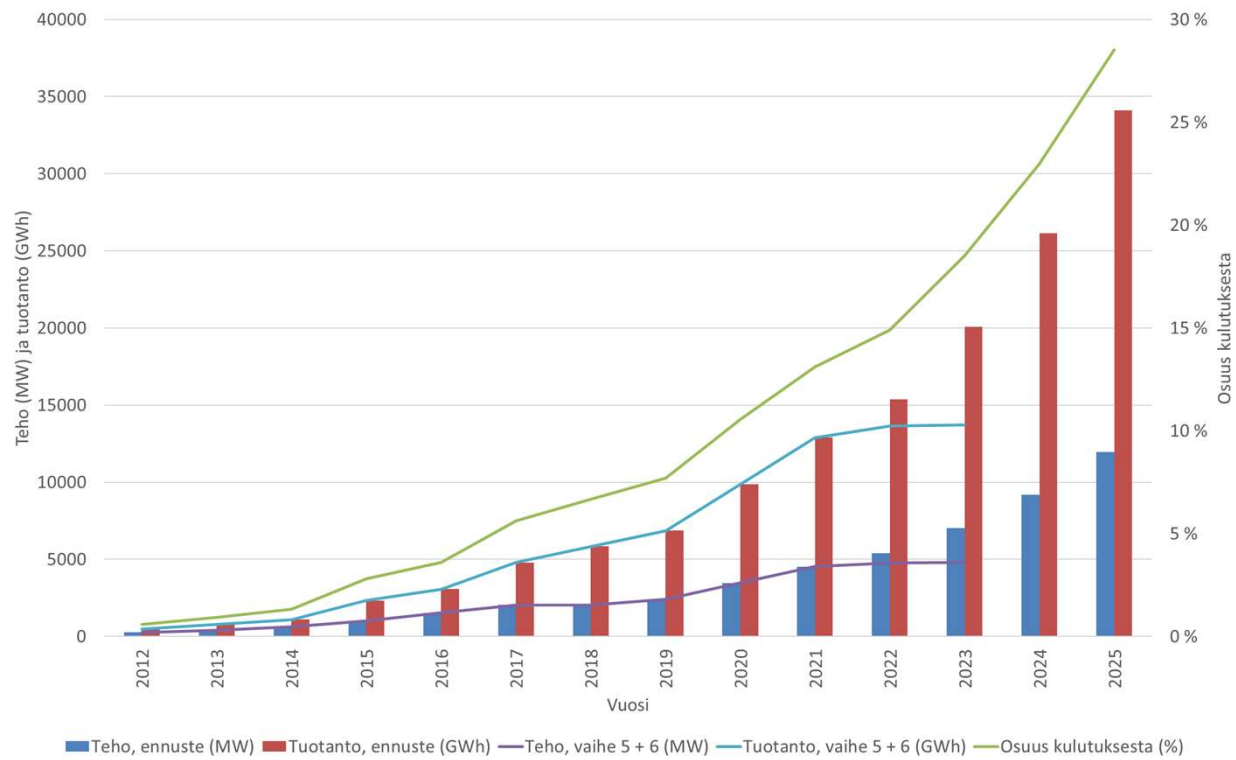
- Sähkön tuotanto tulee muuttua päästöttömäksi
- Keskiössä
 - Tuuli-, aurinko-, vesi- ja ydinvoimatuotanto sekä
 - Älykäs sähkön kulutus
- Ydinvoima on perusvoimaa, tuuli- ja aurinkovoima vaihtelevaa tuotantoa
- Vesivoima kompensoi tuuli- ja aurinkovoimatuotannon vaihtelevuutta
- Sähkön kysyntä tulee kasvamaan yhteiskuntaa sähköistettäessä (liikenne, lämmitys, teollisuus)
 - Pientuotanto, pienvarastointi, automaatio ja kulutusjousto

Tuulivoima

- Tuulivoimatuotannon määrä kasvaa nopeasti
- Syöttötariffi 2013–2017, mutta nykyään markkinaehtoista
- Jo rakennusvaiheessa ja täysin luvitettua tehoa yli 2700 MW vuosina 2019–2023
- Aiemmissa valmisteluvaiheissa lisäksi 3500 MW vuoteen 2023 mennessä



Tuulivoima



Mistä joustoa sähköjärjestelmään?

ESITUKSEN PITÄJÄ, SYKE 20.1.2022

Sähköjärjestelmän joustavuus

- Vesivoimalla hoidetaan valtaosa järjestelmän tasapainotuksesta
 - Vesivoimatuotantoa ei ole merkittävästi lisättävissä
 - Ympäristörajoitteet mahdollisesti tiukentumassa
- Kulutus nähdään joustoelementtinä tulevaisuudessa
 - Automaatioteknologioiden kehitys
 - Uudet markkinatoimijat (aggregaattorit, virtuaalivoimat) tuottavat joustopalveluita
- Sähkön varastointi



Sähkön varastointi

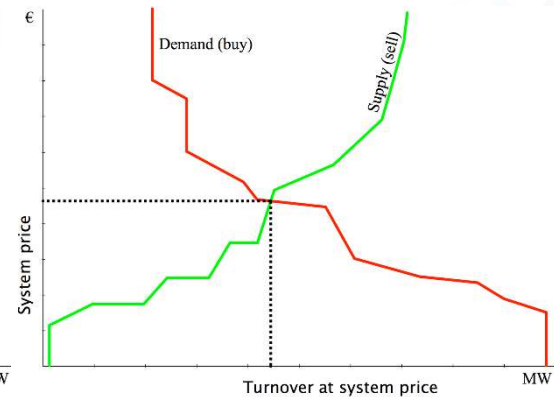
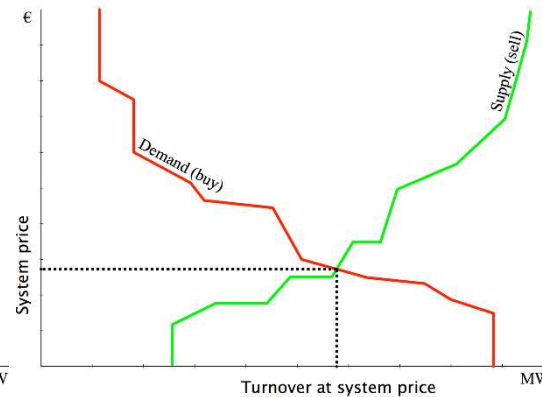
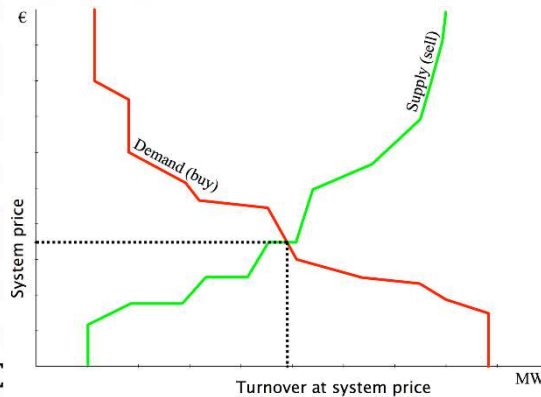
- Useita vaihtoehtoisia sähkön varastointimuotoja on olemassa jo nyt – niiden kypsyys vaihtelee
 - Suuren mittakaavan ”kypsät” ratkaisut perustuvat pumppuvoimaloihin, vauhtipyöriin ja paineilmaan
 - Sähkökemialliset varastot ovat vielä kehitysvaiheessa, josta investointikustannukset tulevat laskemaan
- Sähkön varastoinnin kannattavuus on tapauskohtaista – sähkön hintavaihtelu määrittävä tekijä
- Tuulivoimatuotanto kasvattaa hintavaihtelua



Sähkömarkkinat

Päivää edeltävä ja päivän sisäinen markkina

- Päivää edeltävällä spot-markkinalla (deadline 12 CET)
- Päivänsisäinen markkina aukeaa spot-markkinan sulkeuduttua
- Tuulivoiman odotettu vaihtelu vaikuttaa hinnanmuodostukseen spot-markkinalla



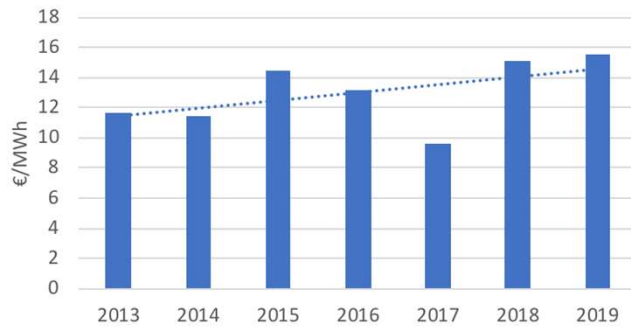
Reservit ja säätösähkö

- Kantaverkko-operaattori käyttää taajuusohjattuja reservejä järjestelmän tasapainottamisessa
- Säätösähkömarkkinoilta voidaan hankkia lisää säädettävää tehoa
- Viime vuosina säätökykyistä kapasiteettia poistunut markkinoilta tuhansia megawatteja
- Tuulivoiman odottamaton vaihtelu vaikuttaa reservien ja säätöelektrisuuden määrään ja hintaan

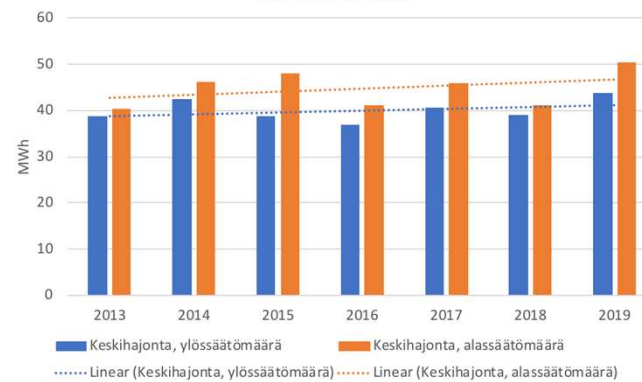


Markkinastatistiikkaa

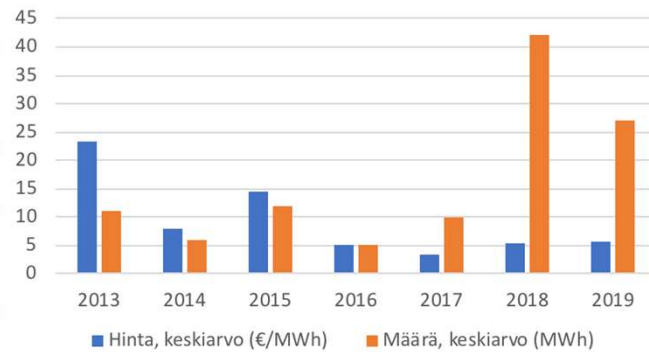
Hinnan keskihajonta, päivää edeltävä spot-markkina



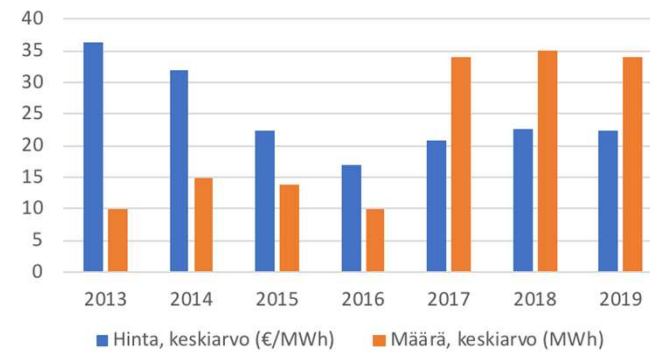
Säätösähkömarkkina



FCR-D



FCR-N



SYKE

Pumppuvoimala Pyhäsalmen kaivokseen

Tutkimus

- Artikkel ”Private and social benefits of a pumped hydro energy storage with increasing amount of wind power”, Energy Economics, 2019, vol. 81, 942–959
- Mallissa voimala voi toimia päivää edeltävällä, päivän sisäisellä ja tasapainotusmarkkinalla
- Optimoidaan voimalan käyttö siten, että tuotot maksimoidaan
- Optimoinnissa huomioidaan mm.
 - Varastokapasiteetin rajoitteet
 - Pumpun sekä turbiinin maksimitehot
 - Tasapainotusmarkkinoilla realisoituvien hintojen epävarmuus

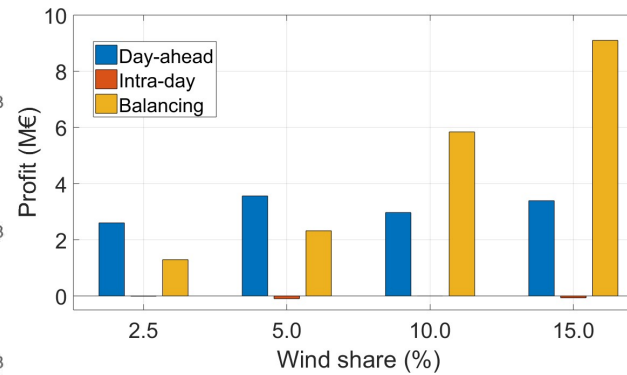
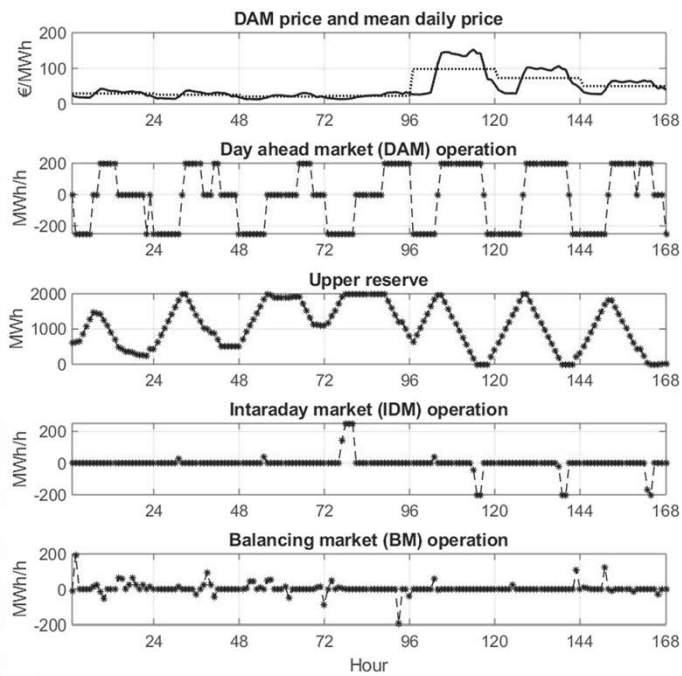


Tutkimus

- Sähkön markkinahinnat ovat keskeinen kannattavuuden määrittäjä
- Mallinnetaan tilastollisin menetelmin sähkön hintojen muodostuminen tuulivoimatuotannon sekä sähkön kysynnän funktiona
- Kontrolloidaan polttoaineiden ja päästöoikeuksien hintojen vaikutus, vesivoimavarastojen tilanne, tuulivoimatuotanto ja sähkön kulutus muualla Pohjoismaissa
- Simuloidaan tulevat sähkön hinnat huomioiden markkinamuutokset



Tutkimuksen tulokset



- Voimalan investoinnin sisäinen korkokanta vaihteli 7,52 ja 10,65 % välillä

Investoinnin kannattavuuden herkkyys

Investointiin vaikuttavia tekijöitä

- Sähkön hintakehitys
 - Sähkön kulutuksen kehitys
 - Markkinatoimijoiden investointipäätökset ja kapasiteetin poistuma
 - Markkina-alueiden integrointi toisiinsa
- Poliittinen ohjaus
 - Tuet
 - Verot
 - Päästövähennystavoitteet
- Ympäristörajoitteet ja rakennusluvut



Herkkyystarkastelu

- Investoinnin kannattavuuden herkkyyttä voidaan tarkastella mallin oletuksien suhteen
 1. Simuloidaan vaihtoehtoisia tulevaisuuden päivää edeltävän markkinan hintaprofiileja
 2. Simuloidaan vaihtoehtoisia tulevaisuuden tasapainotusmarkkinan hintaprofiileja – oletetaan eri määrät muuta tarjontaa/kilpailua
 3. Tarkastellaan kannattavuutta eri hyötysuhteilla
 4. Investointikustannukset



Herkkyystarkastelu

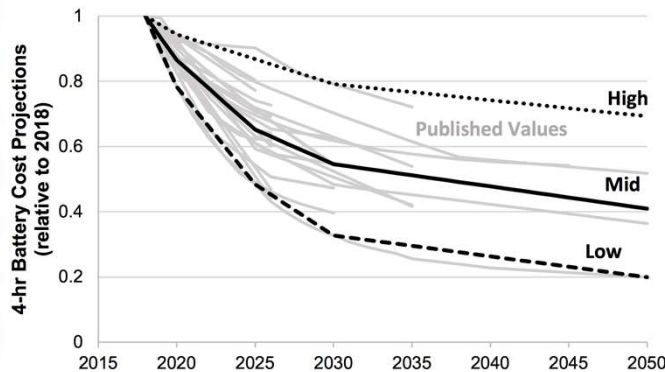
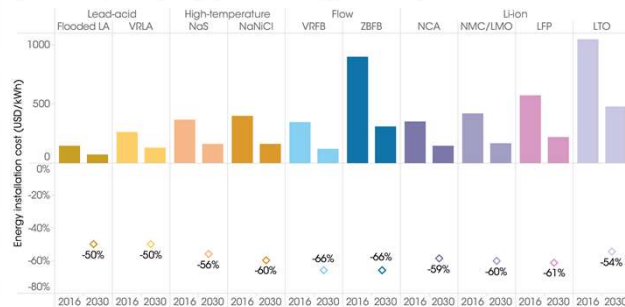
- Herkkyystarkastelun tuloksena saadaan sisäisten korkokantojen vaihteluväli
- Mallinnetuista skenaarioista voi valita oman näkemyksen mukaisen yhdistelmän, ja laskea niiden avulla kannattavuuden



Akku vaihtoehtona pumppuvoimalalle?

Sähkökemiallinen varasto

Figure ES6: Battery electricity storage system installed energy cost reduction potential, 2016-2030



- Tarkastellaan samankokoisen akkuvarastoinvestoinnin kannattavuutta
- Oletetaan samanpituisen tarkasteluajanjakso (50–70 vuotta)
- Uusitaan akkukapasiteettia siinä vaiheessa, kun sen hyödyt ylittävät akkukapasiteetin vähenemisestä seuranneet menetetyt tuotot

Sähkökemiallinen varasto

- Huomioidaan akun käyttötavan vaikutus sen elinkaareen
 - Lataus-purkusyklien lukumäärä
 - Purkauksen syvyys
- Tehdään samat herkkyystarkastelut kuin pumppuvoimalalle
- Lasketaan investointikustannuksen taso, jolla kannattavuus on sama kuin pumppuvoimalan tapauksessa



**LIITE:
Pumppuvoimalan
toimintaperiaate ja kannattavuus
(englanniksi)**

Carbon neutral electricity system

- European Union has committed to become carbon neutral by 2050
 - Current Finnish Government has set even more ambitious target of reaching the same goal by 2035
- The political commitments lead to finding new ways to produce green energy, where variable wind and solar power are key technologies
 - The variability creates new challenges to power system operators as cost-efficient operation requires additional flexibility in the power systems
- Value of flexibility is increased by variable electricity generation
 - The key question is: Who will provide the flexibility and at what price?

Pumped hydro energy storage

- Pumped hydro energy storage (PHES) technology is one of the most well-known energy storage solutions since the 1950s
- The structure of a PHES is simple: there is a generator turbine and pump between the upper and lower reservoirs
- The key idea is that water is discharged, and electricity generated, during high-priced times, while it is pumped back up during low-priced times

Value of flexibility in the future

- Variable electricity generation will increase possibilities for price arbitrage in the future power markets
- The focus is shifted more towards maintaining power balance with frequency containment reserves and in balancing power markets
- There are limited amount of technologies capable of providing balancing power
- A PHES can exploit different marketplaces in a power system, as its operation can be shifted rapidly – therefore, it is not dependent on the current market situation in some specific marketplace

Pyhäsalmi PHES

- Pyhäsalmi mine provides a unique environment for PHES with a high round-trip efficiency
- Profitability analyses show that the internal rate of return is maximized with 50 MW and 75 MW power options

Size	IRR (%)	With 10 % subsidy	With 30 % subsidy
50 MW	7.8	8.7	11.1
75 MW	7.8	8.7	11.1
100 MW	7.2	8.1	10.4
200 MW	5.1	5.9	8.0

- The key marketplace is reserve and balancing power markets as around 70 % of revenue is expected to be collected from them

Uncertainties

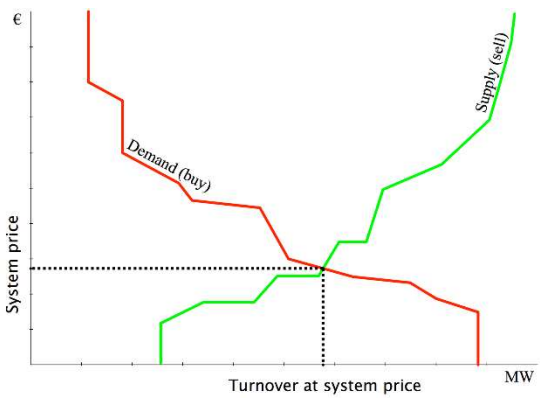
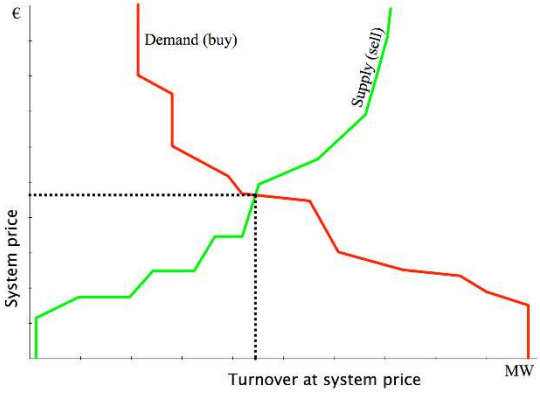
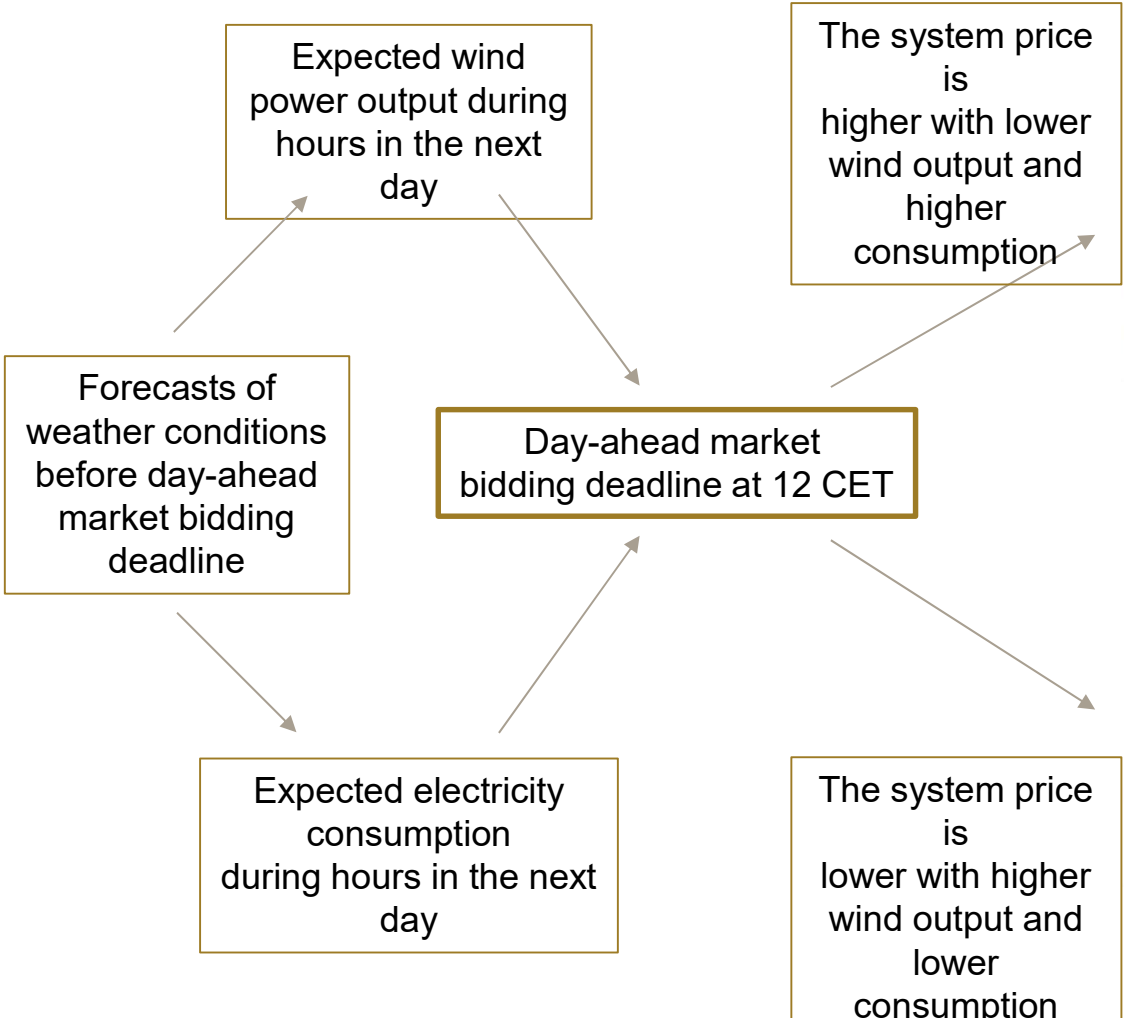
- Most of the profitability uncertainty is related to availability of other sources of flexibility in reserve and balancing power markets
- For instance, the following may have an impact
 - Power trading with Sweden and Norway
 - The amount of thermal power generation
 - Increasing environmental pressure faced by hydro power
 - Demand flexibility
 - Cost efficiency of other energy storage technologies

Conclusions

- Multiple separate technologies are needed to achieve carbon neutrality in energy sector – pumped hydro energy storage among them
- Pumped hydro energy storage can be considered as hydro power without environmental operation constraints, with the ability to
 - Provide high balancing power capacity with known technology and costs as well as low material usage and carbon footprint
 - Operate efficiently in different marketplaces
 - Store energy over long time periods
- Lastly, profitability analyses show strong internal rate of return with a long operational time horizon

LIITE: Pumppuvoimalaitoksen käytön optimointi (englanniksi)

Day-ahead market price formation



Energy storage operation in day-ahead market

- Pumped hydro energy storage (PHES) operator receives weather forecasts before bidding deadline
- Based on the forecasts it formulates an expectation on
 - Day-ahead market prices
 - How much reserve and balancing power is needed in the next day
 - Wind power forecast errors are higher when the amount of wind output is higher – increased need for additional balancing power
 - Consumption forecast errors are higher when the level of consumption is higher – increased need for additional balancing power
- Based on the expectations, PHES offers certain amount of its production to the day-ahead market

Maintaining power balance with reserves and balancing power sources

Part of variation in wind power output and electricity consumption are forecasted correctly

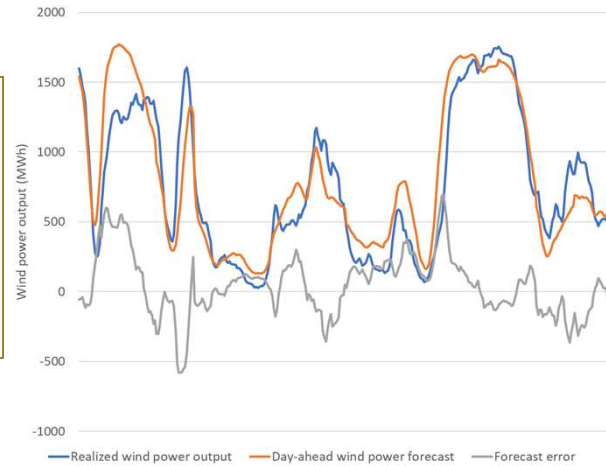
Still, the anticipated variation must be balanced by the flexible generation sources



The next day starts

Part of variation in wind power output and electricity consumption cannot be forecasted

The unexpected variation must be balanced with rapidly-adjustable flexible generation sources



Energy storage operation in intraday markets

- Before the next day starts, the PHES operator has committed to
 - Yearly reserve markets that guarantee a capacity payment and generation is compensated based on the hourly market prices
 - Hourly reserve markets in the previous day – given the expectation of reserve demand, PHES operator offers some capacity to the reserves
- As the next day starts, PHES operator observes current market situation
 - In case it can adjust its operation, either pumping or generating, it can make offers to balancing power markets
 - If all of its capacity is in use based on the day-ahead and reserve market bidding it cannot participate to balancing

Optimization

- PHES operator optimizes its operation in day-ahead, reserve and balancing markets
- The profitability is determined by the ability to utilize low prices for pumping and high prices for generation
- Efficient operation requires having correct expectations of the reserve and balancing power markets in the day-ahead market bidding
- When optimizing, the operator must take into account technical restrictions related to
 - Amount of water in the lower and upper reservoirs
 - Pumping and generating capacity