

Opinnäytetyö (AMK)

Insinööri, Energia- ja ympäristötekniikka

2023

Oskari Hiironen

**ATES -
POHJAVESIVARANTOJEN
HYÖDYNTÄMINEN LÄMMÖN JA
KYLMIÄN VARASTOINNISSA**

Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Insinööri, Energia- ja ympäristötekniikka

2023 | 44 sivua

Oskari Hiironen

ATES – POHJAVESIVARANTOJEN HYÖDYNTÄMINEN LÄMMÖN JA KYLMÄN VARASTOINNISSA

Opinnäytetyö esittelee lämmönvarastointia sekä siihen liittyviä tekniikoita, ja keskittyy erityisesti ATES-järjestelmään eli pohjavesilämpövarastoon, sen toimintaan, vaatimuksiin ja potentiaaliin toimia Suomessa, sekä selvittää kahden Ruotsissa toimivan ATES-järjestelmän toimintaa.

ATES-järjestelmä on lämpöenergian varastointijärjestelmä, jossa varastoidaan lämpöä ja kylmää kausittain pohjavesivarantoihin. Tätä lämpöenergiaa käytetään rakennusten lämmittämiseen ja viilentämiseen.

Nyky maailmassa yritetään ilmastonmuutoksen torjumiseksi vähentää hiilidioksidipäästöjä. Käytetystä energiasta iso osa kuluu lämmittämiseen ja jäähdyttämiseen. Tämä jäähdyttämisen ja lämmittämisen tarve lisää kysyntää lämmönvarastointiin, joista ATES on vähäpäästöinen sekä varastointikapasiteetiltaan hyvä vaihtoehto. Suomessa ATES-järjestelmä on käytössä vain yhdessä kohteessa, vaikka naapurimaassa Ruotsissa, jossa on maantieteellisesti Suomen kanssa samankaltaiset olosuhteet, on käytössä useita.

Opinnäytetyö on tehty Turun Ammattikorkeakoululle. Tutkimusmenetelmänä käytettiin kirjallisia lähteitä sekä asiantuntijahaastattelua.

Asiasanat:

ATES, Pohjavesilämpövarasto, Geoenergia, Lämpöenergian kausivarastointi, Maanalainen lämpöenergian varastointi, Tuntuva lämpöenergian varastointi

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Energy and environmental engineering

2023 | 44 pages

Oskari Hiironen

ATES – UTILIZATION OF AQUIFERS IN STORAGE OF HEAT AND COLD

This thesis introduces thermal energy storage and the technologies related to it, with a particular focus on the operation, requirements and potential usage of the ATES (Aquifer Thermal Energy Storage) system in Finland. The operation of two ATES systems operating in Sweden is also examined.

ATES is a thermal energy storage system that stores heat and cold seasonally in aquifers. This thermal energy is used to heat and cool buildings.

In the current world, efforts are being taken to reduce carbon dioxide emissions to combat climate change. A large portion of the energy used is spent on heating and cooling. The need for heating and cooling increases the demand for thermal energy storage, for which ATES is a low-emission option with high storage capacity. In Finland, ATES systems are only used in one location, whereas in neighboring Sweden, which has geographically similar conditions to Finland, several ATES systems are in use.

The thesis was commissioned by the Turku University of Applied Sciences. The research methods used were literature sources and a specialist interview.

Keywords:

ATES, Aquifer Thermal Energy Storage, Geoenergy, Seasonal Thermal Energy Storage, Underground Thermal Energy Storage, Sensible Heat Storage

Sisältö

Käytetyt lyhenteet ja sanasto	7
1 Johdanto	8
2 TES – LÄMPÖENERGIAN VARASTOINTIJÄRJESTELMÄT	9
2.1 Lämpöenergian varastointityypit	10
2.1.1 Tuntuva lämmönvarastointi (SHS)	10
2.1.2 Latenttilämmön varastointi (LHS)	12
2.1.3 Termokemiallinen energian varastointi (TCS)	13
2.2 Geoenergia	13
2.2.1 Energian kausivarastointi UTES-järjestelmiin	14
2.2.1.1 BTES - porareikälämpövarasto	15
2.2.1.2 CTES - luolalämpövarasto	15
2.2.1.3 PTES - allaslämpövarasto	16
2.2.1.4 TTES – säiliölämpövarasto	17
3 ATES ELI POHJAVESILÄMPÖVARASTO	18
3.1 Lämpötila	20
3.2 Vaatimukset järjestelmälle	21
3.2.1 Akviferi	21
3.2.2 Kaivojen alueellinen jakauma	25
3.2.3 Lämmön tasapaino	27
3.2.4 Lämpöpumppu	29
3.3 Lämmön talteenoton hyötysuhde	30
3.4 Lämpötilojen erotukset	31
3.5 Vaikutuksia päästöihin	32
3.6 Vaikutuksia pohjaveden laatuun	33
3.7 Käytössä olevia järjestelmiä	33
3.7.1 Arlandan lentoasema, Ruotsi	35
3.7.2 Solna, Tukholma, Ruotsi	36
4 PÄÄTELMÄT	39

Kaavat

Kaava 1: Varastomateriaalin massaan varastoitunut lämpömäärä (Dincer ym. 2011, 110)

Kaava 2: ATES-kaivon lämpösäde (Beernik ym. 2022, 4)

Kaava 3: ATES-järjestelmän energiatasapainosuhte (Sommer ym. 2014, 267-268)

Kaava 4: Kaivosta ulos saatu kylmä energia (Sommer ym. 2014, 268)

Kaava 5: Kaivosta ulos saatu lämmin energia (Sommer ym. 2014, 268)

Kaava 6: Lämmön talteenoton hyötysuhde (Sommer ym. 2013, 8133)

Kaava 7: Kaivon veden lämpötilojen erotus (Fleuchaus ym. 2019, 1538)

Kaava 8: Lämpötilan muutos varastoinnin aikana (Fleuchaus ym. 2019, 1538)

Kaava 9: Lämpimän ja kylmän kaivon lämpötilojen erotus (Fleuchaus ym. 2019, 1538)

Kuvat

Kuva 1. TES-järjestelmän varastointisyklit (Cabeza 2014, 1). 9

Kuva 2. CTES-järjestelmä (Nordell 2000, 6). 16

Kuva 3. Havainnekuva Kulomäessä sijaitsevasta Hyvinkään Lämpövoiman vuodeksi 2024 valmistuvaksi suunnitellusta PTES-järjestelmästä (Hyvinkään Lämpövoima Oy). 17

Kuva 4. Vedenkierto ATES-järjestelmässä (The Azimut Project). 19

Kuva 5. Erilaisia akviferityyppejä (National Ground Water Association). 22

Kuva 6. Suomessa kaupunki- ja teollisuusalueiden lähellä sijaitsevat lämpöenergian hyödyntämiseen potentiaalisesti käyttöön otettavat akviferit. 24

Kuva 7. ATES-kaivon lämpösäde ja hydraulinen säde (Duijff 2019, 6). 26

Kuva 8. Etäisyyden vaikutus saman- ja vastakkaislämpöisiin ATES-kaivoihin. (Beernik ym. 2022, 4). 27

Kuva 9. Lämpöpumpullisen ATES-järjestelmän toimintaperiaate (Dincer & Rosen 2011, 124). 30

Kuva 10. ATES-järjestelmän lämpötilojen erotukset (Fleuchaus ym. 2019, 1539).	32
Kuva 11. Maailmalla vuonna 2018 käytössä olevat ATES-järjestelmät (Fleuchaus ym. 2018, 868).	34
Kuva 12. ATES-järjestelmälle potentiaaliset alueet maailmalla (Lu ym. 2019, 794)	35
Kuva 13. Arlandan lentoaseman ATES-järjestelmä (Wigstrand n.d., 3).	36
Kuva 14. Poikkileikkauskuva ATES-järjestelmästä (Abuasbeh ym. 2021, 5)	37

Kuviot

Kuvio 1. Vuodenaikojen mukainen maankamaran lämpötila lähellä maanpintaa (Ahtola ym. 2012, 36).	14
---	----

Taulukot

Taulukko 1. Lämmön varastointimenetelmien parametreja (Sarbu & Sebarchievici 2018, 3).	10
Taulukko 2. Tuntuvassa lämmönvarastoinnissa käytettävien materiaalien lämpökapasiteettiarvoja (Khatod ym. 2022, 8).	12
Taulukko 3. UTES-järjestelmien vertailu (Fleuchaus ym. 2018, 862.)	20

Käytetyt lyhenteet ja sanasto

Akviferi	Pohjavesivarasto
ATES	Aquifer Thermal Energy Storage, pohjavesilämpövarasto
BTES	Borehole Thermal Energy Storage, porareikälämpövarasto
CTES	Rock Cavern Thermal Energy Storage, luolalämpövarasto
HT-ATES	High Temperature ATES, korkean lämpötilan ATES-järjestelmä
LHS	Latent Heat Storage, latenttilämmön varastointi
LT-ATES	Low Temperature ATES, matalan lämpötilan ATES-järjestelmä
PCM	Phase-Change Material, faasimuutosmateriaali
PTES	Pit Thermal Energy Storage, allaslämpövarasto
SHS	Sensible Heat Storage, tuntuva lämmön varastointi
TCS	Thermo-Chemical Energy Storage, termokemiallinen energian varastointi
TES	Thermal Energy Storage, lämpöenergian varastointi
TTES	Tank Thermal Energy Storage, säiliölämpövarasto
UTES	Underground Thermal Energy Storage, maanalainen lämmön varastointi

1 Johdanto

Ilmastonmuutos ja ympäristön tilan huononeminen ovat merkittäviä haasteita nykymaailmassa. Näiden haasteiden ratkaisemiseksi tarvitaan uusia ympäristöystävällisiä ja tehokkaita energiaratkaisuja, jotka voivat vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä ja päästöjä. IRENA:n (2020, 11) mukaan lämmittämiseen ja jäähdyttämiseen kuluu noin puolet maailman tuotetusta energiasta. Tämä on lisännyt kiinnostusta lämpöenergian varastointimenetelmiin, jotka auttavat tasapainottamaan energian tuotannon sekä kysynnän eroa, varastoimalla lämpöä ja kylmää käytettäväksi myöhemmin lämmitys- ja viilennysjärjestelmissä.

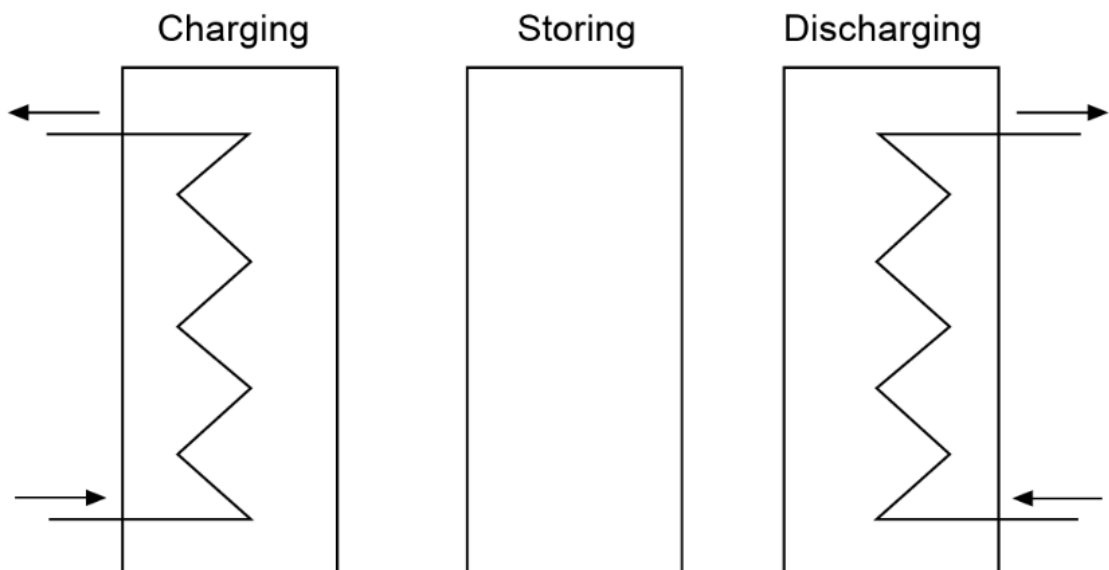
Tämä opinnäytetyö esittelee erilaisia lämmönvarastointitekniikoita, joista se keskittyy ATES-järjestelmän (Aquifer Thermal Energy Storage eli pohjavesilämpövaraston) toimintaan ja tekniikkaan sekä sen potentiaaliin Suomessa. Suurin osa maailman ATES-järjestelmistä painottuu Eurooppaan, etenkin Alankomaihin, mutta Suomessa tekniikkaa käytetään vasta vain yhdessä kohteessa. Työssä selvitetään kahden Ruotsissa toimivan ATES-järjestelmän toimintaa.

ATES-tekniikkaa käytetään pääasiassa rakennusten lämmittämiseen ja jäähdyttämiseen varastoimalla kausittaista, luonnollista lämpöä ja kylmää pohjavesivarantoihin, mutta sitä voi myös käyttää varastoimaan muun muassa teollisuuden hukkalämpöä. Järjestelmän päästöt riippuvat täysin sen käyttämästä sähköstä – jos järjestelmän lämpöpumppu käyttää uusiutuvilla, päästöttömillä energialähteillä tuotettua sähköä, sillä ei ole toiminnan aikaisia päästöjä.

2 TES – LÄMPÖENERGIAN VARASTOINTIJÄRJESTELMÄT

Lämpöenergian varastointijärjestelmän (TES-järjestelmä, Thermal Energy Storage) tarkoitus on varastoida lämpöä tai kylmää varastointimateriaaliin myöhempää käyttöä varten. Sen pääasiallinen käyttötarkoitus on tasoittaa energiantuotannon ja -kulutuksen epäsuhdetta. TES-järjestelmiä käytetään pääosin rakennuksissa ja teollisuuden prosesseissa, ja ne ovat erityisen sopivia uusiutuvan energiantuotannon kanssa, sillä uusiutuvat energialähteet, kuten aurinko ja tuuli, ovat energiantuotannoltaan ailahtelevia. (Sarbu & Sebarchievici 2017, 1.)

Systemi sisältää kuvan 1 mukaisesti kolme vaihetta, energian latauksen (charging), varastoinnin (storing) ja purun (discharging) (Dincer & Rosen 2011, 86).



Kuva 1. TES-järjestelmän varastointisyklit (Cabeza 2014, 1).

Vaatimukset TES-järjestelmän rakentamiseen ovat varastointimateriaalin korkea energian varastointikapasiteetti, hyvä lämmönjohtavuus lämmönsiirtonesteen ja varastointimateriaalin välillä, varastointimateriaalin ja

säiliömateriaalin välinen yhteensopivuus, varastoinnin aikaiset vähäiset lämpöhäviöt, helppo kontrolloitavuus sekä syklien täydellinen palautus. (Cabeza 2014, 2.)

2.1 Lämpöenergian varastointityypit

TES-järjestelmässä käytetään kolmea varastointimenetelmää, tuntuvaa (Sensible Heat Storage, SHS), latenttista (Latent Heat Storage, LHS) sekä termokemiallista (Thermo-Chemical Energy Storage, TCS) lämmönvarastointia. Se, mitä menetelmää käytetään, riippuu pääasiassa siitä, kauanko energiaa pitää varastoida, taloudellisista olosuhteista sekä käyttökohteesta. (Dincer & Rosen 2011, 85.) Näiden kolmen lämmönvarastointimenetelmän varastointikapasiteettia, latauksen ja purun tehoa, energian varastoinnin hyötysuhdetta, lämmön tai kylmän varastoinninkauden pituutta sekä kustannuksia suhteessa hyödynnettyyn energiaan verrataan taulukossa 1.

Taulukko 1. Lämmön varastointimenetelmien parametreja (Sarbu & Sebarchievici 2018, 3).

Varastointimenetelmä	Kapasiteetti (kWh/t)	Teho (MW)	Hyötysuhde (%)	Kustannus (€/kWh)
Tuntuva (vesi)	10-50	0,001-10,0	50-90	0,1-10
Latenttilämpö (PCM)	50-150	0,001-1,0	75-90	10-50
Termokemiallinen	120-250	0,01-1,0	75-100	8-100

2.1.1 Tuntuva lämmönvarastointi (SHS)

Tuntuva lämmönvarastointi (Sensible Heat Storage) on yleisin sekä yksinkertaisin lämmön varastointimenetelmä. Tuntuvassa lämmönvarastointijärjestelmässä varastoidaan lämpöä tai kylmää nestemäiseen

tai kiinteään varastomateriaaliin, jolloin varastomateriaalin tuntuva lämpö muuttuu. Tuntuva lämpö on energiaa, jota vaaditaan vaihtamaan aineen lämpötilaa ilman faasimuutosta. (Rosen 2017, 44.)

Vesi on yleisin varastomateriaali tuntuvasa lämmönvarastoinnissa, koska sillä on sekä rakennusten lämmittämiseen että viilentämiseen sopiva korkea ominaislämpökapasiteetti. Lisäksi vesi on edullinen materiaali, se kulkeutuu nesteenä systeemissä helposti ja sillä on hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet. (Dincer & Rosen 2011, 87.) Taulukossa 2 esitetään yleisiä tuntuvasa lämmönvarastoinnissa käytettyjä materiaaleja sekä niiden lämpökapasiteettiarvoja.

Varastomateriaalin massaan varastoitunut lämpömäärä Q (J) lasketaan seuraavalla kaavalla (Dincer ym. 2011, 110):

$$Q = mC_p\Delta T \quad (1)$$

jossa

m (kg) on varastomateriaalin massa

C_p (J/kgK) on varastomateriaalin ominaislämpökapasiteetti

ΔT (K) on lämpötilaero.

Taulukko 2. Tuntuvaassa lämmönvarastoinnissa käytettävien materiaalien lämpökapasiteettiarvoja (Khatod ym. 2022, 8).

Materiaali	Lämpötilan vaihteluväli (°C)	Tiheys (kg/m ³)	Ominaislämpökapasiteetti (kJ/kgK)	Tilavuuslämpökapasiteetti kJ/m ³ K
Vesi	0-100	997	4,19	4180
Tiili	0-1000	1400-1900	0,84	1176-1596
Natrium	100-800	975-1203	1,3	750-925
Puu	20	700	2,390	1673
Lasi	20	2710	0,837	2268
Hiekka	20	1555	0,8	1244
Alumiini	20	2710	0,896	2428
Magneetti	20	5177	0,752	3893
Savitiili	20	1700	1	1700
Pikkukivet	20	510	0,88	1410
Teräs	20	7850	0,48	3800
Rauta	20	7900	0,452	3571
Betoni	20	2000	0,880	1760
Sorainen maa-aines	20	2050	1,840	3772

2.1.2 Latenttilämmön varastointi (LHS)

Faasimuutoksesta johtuvaa lämmönsiirtoa kutsutaan latenttilämmöksi.

Latenttilämmön varastointijärjestelmä (Latent Heat Storage) lataa energiaa varastoon tai purkaa energiaa varastosta materiaalin faasimuutoksesta johtuen, materiaalin samalla pitäen lämpötilan vakiona. (Rosen 2017, 46.)

Latenttilämmön varastointijärjestelmässä käytettävää varastointimateriaalia kutsutaan faasimuutosmateriaaliksi (PCM, Phase-Change Material).

Lämmönvarastointi latenttilämmön varastointijärjestelmään on tuntuva lämmönvarastointia tehokkaampaa ja kalliimpaa, ja teknologia on vasta kehitysvaiheessa. (Sarbu & Sebarchievici 2018, 10, 28.)

2.1.3 Termokemiallinen energian varastointi (TCS)

Termokemiallisessa energian varastoinnissa (Thermo-Chemical Energy Storage) käytetään termokemiallisia materiaaleja, jotka varastoivat ja vapauttavat lämpöä palautuvan endotermisen tai eksotermisen reaktioprosessin kautta. Näihin termokemiallisiin materiaaleihin johdetaan lämpöä, mikä johtaa reaktioon, joka synnyttää kaksi reaktiotuotetta, jotka voidaan erotella ja varastoida. Kun energia halutaan purkaa varastoinnista, reaktiotuotteet sekoitetaan keskenään sopivassa paine- ja lämpötilaolosuhteissa, mikä vapauttaa energian. (Sarbu & Sebarchievici 2018, 22-23.)

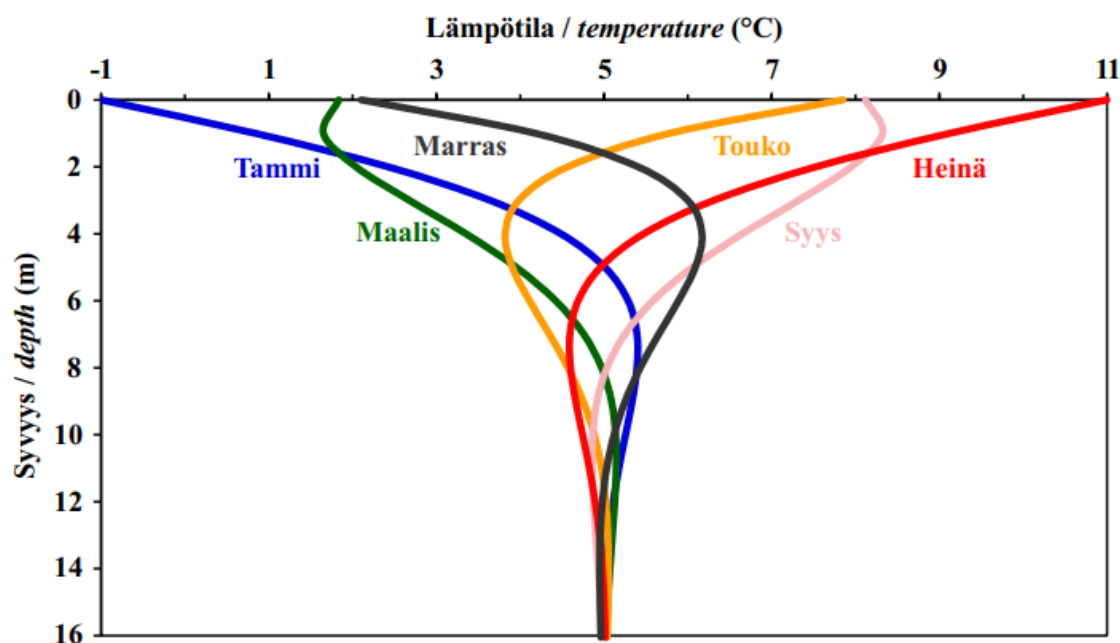
TCS-järjestelmä on monimutkainen ja kustannuksiltaan kallis, mutta sillä on korkea energian varastointikapasiteetti. TCS-järjestelmät ovat toistaiseksi vasta kehitysvaiheessa. (Sarbu & Sebarchievici 2018, 27-28.)

2.2 Geoenergia

Maa- ja kalliperään varastoitunutta auringosta tullutta energiaa kutsutaan geoenergiaksi tai matalaksi geotermiseksi energiaksi. Geoenergiaa ei pidä sekoittaa geotermiseen energiaan, joka päättyy maankuoreen johtamalla maan ytimestä, jossa se syntyy radioaktiivisista hajoamisista. (Energiateollisuus n.d.) Suomessa on määritelty, että alle kilometrin syvyinen geoterminen energiajärjestelmä on matala lämmönsiirtojärjestelmä, 1-3 kilometrin syvyinen on keskisyvä lämmönsiirtojärjestelmä ja yli 3 kilometriä syvä järjestelmä on syvä lämmönsiirtojärjestelmä. (Seismologian instituutti n.d.)

Maanpinnan lämpötila vaihtelee ilman lämpötilan mukaan, ja sen vuotuinen keskilämpötila on lämpimästä lumipeitteestä johtuen muutaman celsiusasteen ilman vuotuista keskilämpötilaa lämpimämpi. Syvemmälle mentäessä kausittainen lämpötilanvaihtelu tasoittuu kuvion 1 mukaisesti, ja noin 15 metrin syvyydessä maankamaran lämpötila on tasainen vuoden ympäri, Etelä-Suomessa tasoltaan 6-10°C ja Pohjois-Suomessa 2-3°C. Tästä syvemmälle

mentäessä maankamaran lämpötila nousee $0,5-1^{\circ}\text{C} / 100\text{m}$, sillä geoterminen energia vaikuttaa siihen. (Ahtola ym. 2012, 35.)



Kuvio 1. Vuodenaikojen mukainen maankamaran lämpötila lähellä maanpintaa (Ahtola ym. 2012, 36).

2.2.1 Energian kausivarastointi UTES-järjestelmiin

Energiaa tuotetaan epätahdissa energian tarpeen kanssa, joten sen kausivarastoinnilla voidaan tasata tämä epätasapaino. Lämpöä tai kylmää voidaan varastoida aikoina, jolloin niitä tuotetaan liiaksi, usean kuukauden ajaksi käytettäväksi silloin, kun niitä tarvitaan.

Varastoidessa lämpöä tai kylmää maanalaiseen järjestelmään puhutaan UTES-järjestelmästä (Underground Thermal Energy Storage). Näihin maanalaisiin lämmönvarastointijärjestelmiin kuuluvat ATES-järjestelmä (Aquifer Thermal Energy Storage), BTES-järjestelmä (Borehole Thermal Energy Storage), CTES-järjestelmä (Rock Cavern Thermal Energy Storage) ja PTES-järjestelmä (Pit Thermal Energy Storage). Muihin lämmönvarastointijärjestelmiin kuuluu TTES-järjestelmä (Tank Thermal Energy Storage). (Novo ym. 2009, 390-391.) Näitä

järjestelmiä käydään läpi tässä kappaleessa lukuunottamatta ATES-järjestelmää, jota käydään läpi tarkemmin kappaleessa kolme.

UTES-järjestelmä voi olla avoimen kierron (open-loop) tai suljetun kierron (closed-loop) järjestelmä. Avoimen kierron järjestelmässä pohjavesi pumpataan maaperästä tai pohjavesivarannosta lämmön tai kylmän talteenottamiseksi, jonka jälkeen vesi pumpataan takaisin maahan. Suljetun kierron UTES-järjestelmässä lämmönsiirtoaine kulkeutuu maahan asennetussa suljetussa putkistossa, josta se kerää maaperästä lämpöä tai kylmää, joka siirtyy lämmönsiirtimen kautta lämmitettävään tai viilennettävään rakennukseen. (Cabeza 2014, 149.)

2.2.1.1 BTES - porareikälämpövarasto

BTES-järjestelmä (Borehole Thermal Energy Storage) on suljetun kierron järjestelmä, ja se sisältää yhden tai useamman lähekkäin asetellun vertikaalisen porareian. Ylimääräistä lämpöä tai kylmää varastoidaan kausittain lämmönsiirtimen kautta porareikiin, joissa lämpöenergia varastoituu putkessa kulkevaa lämmönsiirtonestettä pitkin varastointimateriaaliin.

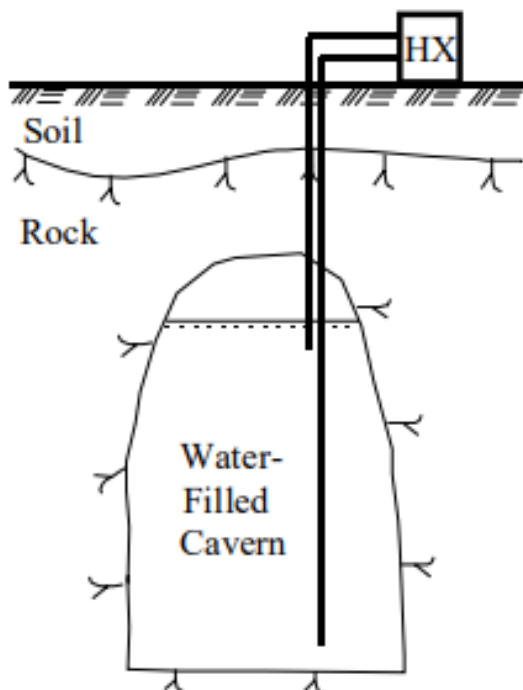
Varastointimateriaalina toimii porareikiä ympäröivä maa, joka on yleensä kiveä, savea, hiekkaa tai maaperää. Järjestelmää ei ole eristetty pohjasta tai seinistä, joten lämpöhäviötä tapahtuu maahan ja pohjaveden virtaukseen. Järjestelmä on yleensä eristetty päältä. (Gehlin 2016, 295-305.)

2.2.1.2 CTES - luolalämpövarasto

CTES-järjestelmässä (Rock Cavern Thermal Energy Storage) lämpöenergiaa varastoidaan maanalaiseen luolaan. Varastointimateriaalina toimii vesi, jolla luola on täytetty. Luolan veteen muodostuu lämpötilakerrostumista, joten varaston yläosassa on lämmin vesi ja alaosassa on kylmä vesi.

Lämpötilakerrostuneisuutta ylläpidetään tasapainossa lisäämällä ja poistamalla lämmintä vettä varaston yläosasta, sekä lisäämällä ja poistamalla kylmää vettä

varaston alaosasta. CTES-järjestelmä on avoimen kierron järjestelmä. (Nordell 2000, 6.)



Kuva 2. CTES-järjestelmä (Nordell 2000, 6).

2.2.1.3 PTES - allaslämpövarasto

PTES-järjestelmässä (Pit Thermal Energy Storage) lämpöä varastoidaan maahan kaivettuun kuoppaan, joka on yleensä täytetty vedellä, joka toimii järjestelmän varastointimateriaalina. Kuopan seinämät ovat yleensä maainesta, mutta ne voidaan myös tehdä teräksestä tai betonista, jolloin järjestelmän valmistuskustannukset nousevat. Kuoppa päällystetään lämpöhäviöiden minimoimiseksi eristävällä kannella. Kuopat on yleensä suunniteltu sivuilta kaltevaksi, sillä sen on havaittu lisäävän lämpötilakerrostumista, mikä vähentää järjestelmän lämpöhäviöitä. (Dahash ym. 2019, 301; Xiang ym. 2022, 4-5.)



Kuva 3. Havainnekuva Kulomäessä sijaitsevasta Hyvinkään Lämpövoiman vuodeksi 2024 valmistuvaksi suunnitellusta PTES-järjestelmästä (Hyvinkään Lämpövoima Oy).

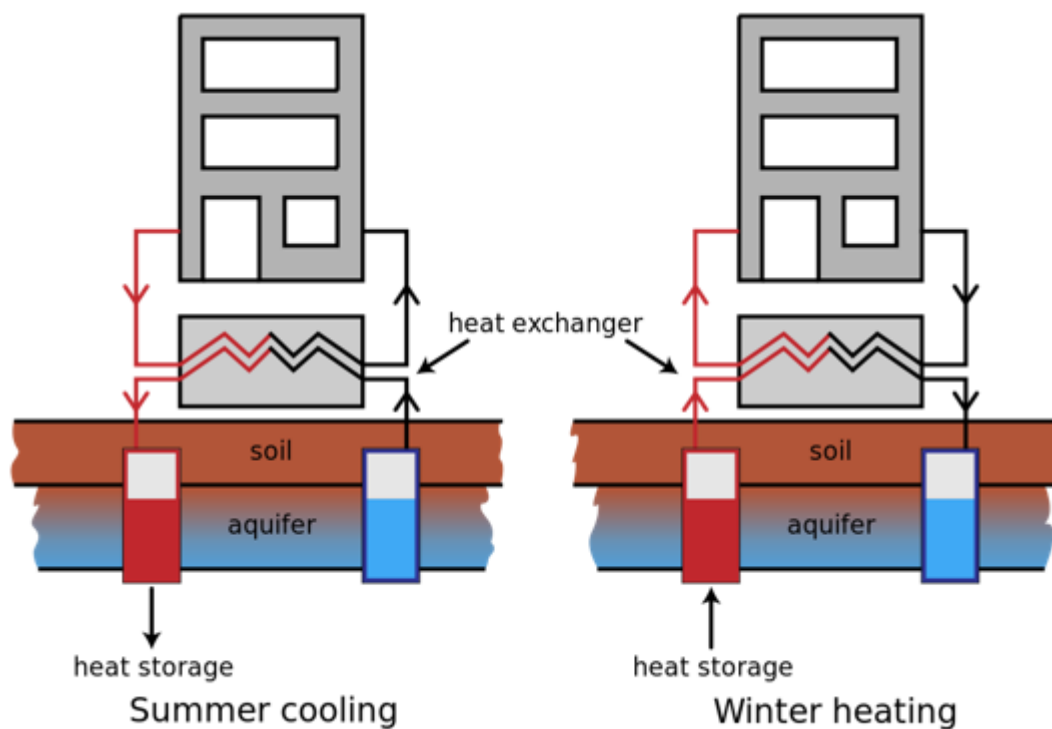
2.2.1.4 TTES – säiliölämpövarasto

TTES-järjestelmä (Tank Thermal Energy Storage) on toimintaperiaatteeltaan samanlainen kuin PTES-järjestelmä. Siinä lämpöä varastoidaan teräksestä tai betonista valmistettuihin säiliöihin, jotka on yleensä haudattu kokonaan tai osittain maan alle, vaikka suuremman luokan järjestelmissä ne saattavat olla täysin maanpinnan päällä. Varastointimateriaalina näissä käytetään yleensä vettä. Tankissa olevalle vedelle tapahtuu lämpöä varastoidessa lämpötilakerrostumista, mitä on hyvä ylläpitää järjestelmän lämpöhäviöiden minimoimiseksi. (Dahash ym. 2019, 301.)

3 ATES ELI POHJAVESILÄMPÖVARASTO

ATES-järjestelmän (Aquifer Thermal Energy Storage) toiminta perustuu siihen, että lämpiminä kesäaikoina lämpöä varastoidaan akviferiin eli pohjavesivarantoon veden mukana, mitä voidaan hyödyntää kylmempinä talviaikoina lämmittämään haluttua kohdetta. Vastaavasti, kylminä talvikuukausina luonnollista kylmyyttä varastoidaan akviferiin, jota voidaan hyödyntää lämpiminä päivinä viilentämään kohdetta. Järjestelmä pitää sisällään vähintään kaksi kaivoa, kylmän ja lämpimän, jotta lämmin ja kylmä vesi eivät sekoitu keskenään. Suuremman kokoluokan järjestelmissä käytetään useita kylmiä ja lämpimiä kaivoja. (Nordell, 2012, 2; Cabeza 2014, 87.)

Järjestelmä on avoimen kierron järjestelmä, ja sen vedenkierto on kuvan 4 mukainen: Talvella vettä tuodaan lämpimästä ATES-kaivosta lämmönsiirtimeen, jossa lämpöenergia siirtyy tuodusta vedestä lämmitettävän kohteeseen. Tämän jälkeen viilentynyt vesi ohjautuu kylmää vettä varastoivaan kaivoon, jossa se imeytetään akviferiin. Kesällä prosessi on vastaavasti vastakkainen: Kylmää vettä tuodaan akviferistä lämmönsiirtimeen, jossa lämmitettävän kohteen lämpöenergia siirtyy akviferistä pumpattuun veteen. Tämä lämmennyt vesi varastoidaan lämpimään kaivoon, jossa se imeytyy akviferiin.



Kuva 4. Vedenkierto ATES-järjestelmässä (The Azimut Project).

Erilaisia UTES-järjestelmiä verrataan ATES-järjestelmään taulukossa 3. ATES-järjestelmän etuja muihin maanalaisiin lämmönvarastointijärjestelmiin verrattuna ovat korkea energian varastokapasiteetti sekä korkea tilavuus varastomateriaalille. Negatiivinen puoli ATES:ssa on, että sen käyttöönotto vaatii huolellista suunnittelua järjestelmän sijainnin sekä toiminnan suhteen. (Fleuchaus ym. 2018, 826.)

Taulukko 3. UTES-järjestelmien vertailu, jossa +++ on arvoltaan korkea, ++ on keskivertainen ja + on matala (Fleuchaus ym. 2018, 862.)

	PTES / TTES	ATES	BTES
Varastomateriaali	Vesi; vesi / sora	Pohjavesi / sedimentti	Pohjavesi / sedimentti
Pinnanalaiset vaatimukset	+	+++	++
Vaadittava esiselvitys	+	+++	++
Max. varastokapasiteetti (kwh/m ³)	+++	++	+
Varastotilavuus	+	+++	++
Investointi kustannukset	+++	+	++
Kunnossapidon tarve	+	+++	+
Vuorovaikutukset ympäristön kanssa	+	+++	++

3.1 Lämpötila

Lämpötilan perusteella järjestelmät voidaan jaotella matalan lämpötilan (LT-ATES, low temperature) ja korkean lämpötilan (HT-ATES, high temperature) ATES-järjestelmiksi. LT-ATES-järjestelmässä varastoidun veden lämpötila on tyypillisesti alle 40°C, kun taas HT-ATES-järjestelmässä lämpötila on yli 40°C, ja korkeimmillaan se voi nousta jopa 100°C:n. Lähes jokainen ATES-järjestelmä maailmalla on LT-ATES. Vuonna 2018 maailmalla oli vain 5 käytössä olevaa HT-ATES-järjestelmää. (Fleuchaus ym. 2018, 866.)

LT-ATES-järjestelmässä varastoitava lämpö ja kylmä ovat lämmitys- ja jäähdytysprosessista aiheutuvia, ja sen käyttökohteet ovat pääasiassa rakennusten lämmitys ja jäähdytys. HT-ATES-järjestelmässä taas lämpöenergianlähde on erillään lämmitys- ja jäähdytysprosessista. Sen lähteinä ovat mahdollisesti uusiutuva energialähde, kuten aurinkokeräimillä kerätty auringon lämpö tai geoterminen energia, tai teollisuuden ylijäämlämpö. (Fleuchaus ym. 2020, 2.)

Korkeamman lämpötilan veden varastoimisessa akvifereihin on haasteensa, ja siksi HT-ATES-järjestelmät ovat harvassa. Suurimmassa osassa Euroopan maita on lailla kielletty varastoida yli 18-25°C:sta vettä akvifereihin, mutta Suomessa ei ole varastoitavan veden lämpötilaa lailla säännöstelty (Haehnlein ym. 2010, 2619). Kappaleessa 3.6 käydään läpi akviferin lämpötilan nostattamisen vaikutuksia pohjaveden laatuun.

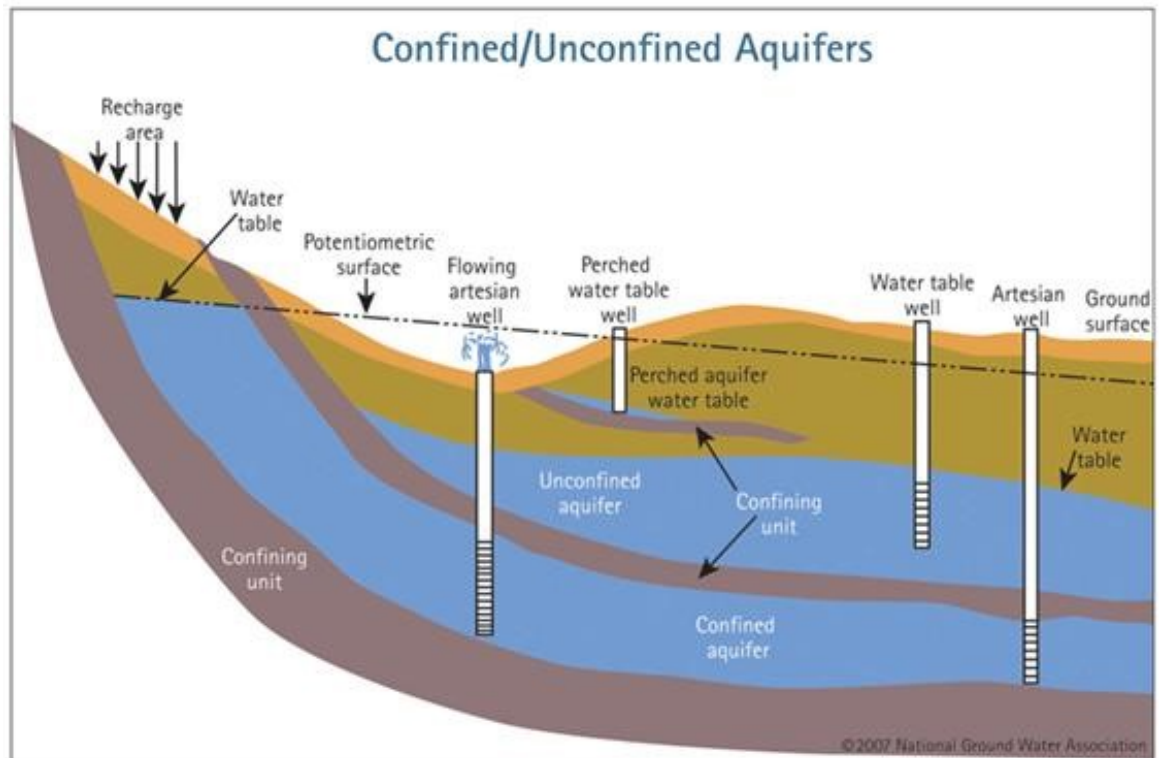
3.2 Vaatimukset järjestelmälle

ATES-järjestelmän pystyttäminen vaatii huolellista suunnittelua ja tutkimusta. Järjestelmän täytyy sijaita maantieteellisesti alueella, jossa on riittävän suuret lämpötilavaihtelut vuodenaikojen välillä. Lämmitettävä kohde pitää sijaita lähellä akviferiä, joista saadaan tarpeeksi korkealla virtausnopeudella vettä. Lisäksi lämmitettävän kohteen lämmitys- ja jäähdytyskuorma on oltava suhteellisen korkea, jotta järjestelmän laatiminen on kannattavaa. (Schmidt ym. 2018, 587.)

3.2.1 Akviferi

Pohjavesivaranto eli akviferi on pohjavedellä kyllästynyt maa- tai kallioperästä koostuva, hydraulisesti yhtenäinen muodostuma, joka sisältää käyttökelpoisia määriä pohjavettä. Kuva 5 havainnollistaa erilaisia akviferityyppejä. Akviferia kutsutaan vapaaksi akviferiksi (unconfined aquifer), jos sen yläpuolella on vettä johtavaa maaperää. Salpavedeksi tai paineelliseksi akviferiksi (confined aquifer) taas kutsutaan akviferia, jonka yläpuolella on tiivis, salpaava kerros savea tai

kalliota. Orsivesiakviferi (preached aquifer) taas on kviferi, joka on varsinaisen pohjavedenpinnan yläpuolella, ja sen alla on huonosti vettä johtava kerrostuma. (Suomen Vesiyhdistys, 2005.) Suomessa yleisin kviferityyppi on vapaa kviferi. Salpavesiä käytetään vedenhankintaan enemmän rannikkoalueilla, missä vapaat kviferit ovat harvinaisempia. (Britschgi ym. 2009, 7.)

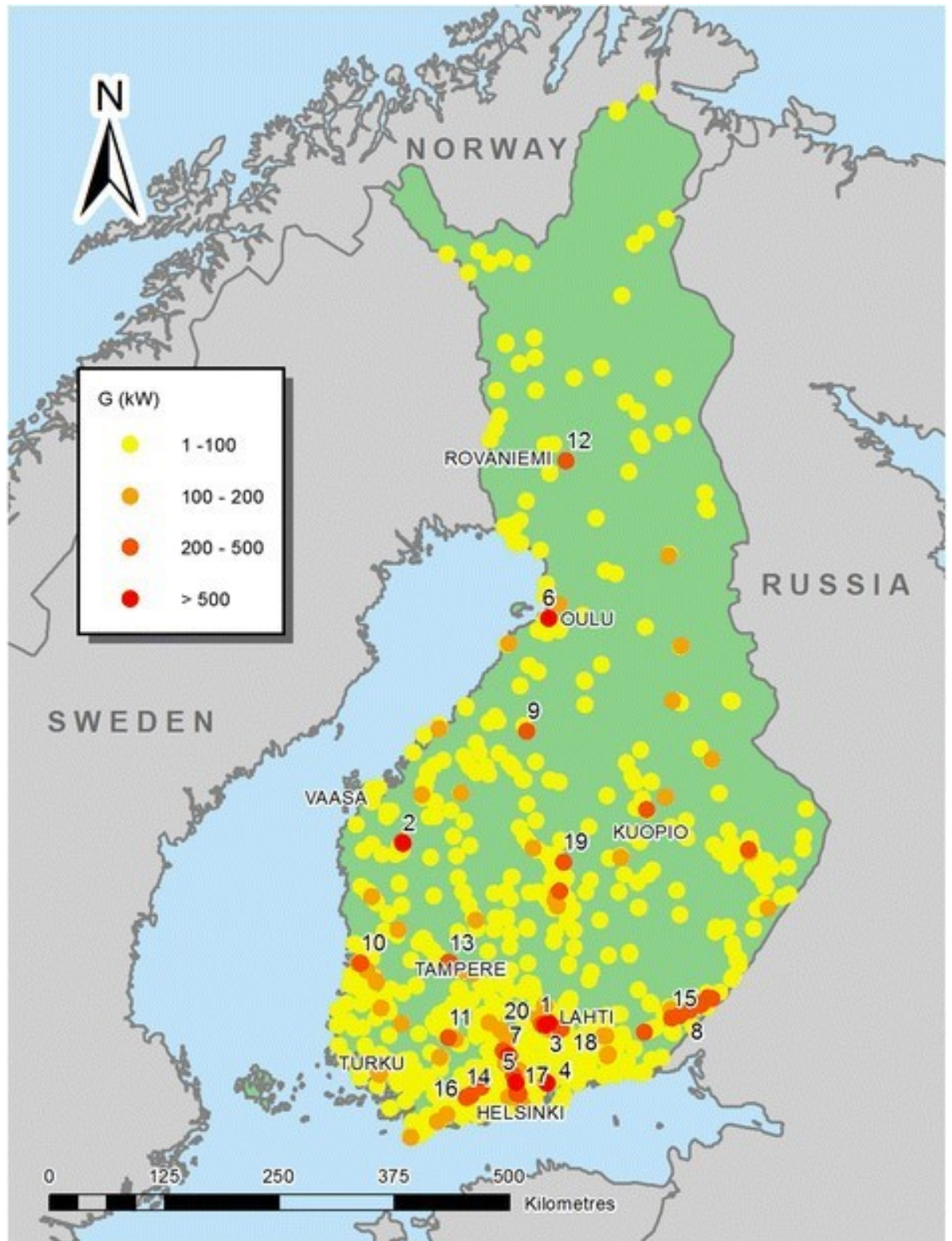


Kuva 5. Erilaisia kviferityyppejä (National Ground Water Association).

Vapaan kviferin ja salpaveden käytöllä ATES-järjestelmässä on molemmilla etunsa. Vapaa kviferi on helpompi rajata käyttöön, ja kaivojen asentaminen niihin on halvempaa. Syvissä salpavesissä taas pohjaveden virtaus on olematonta, sen lämpötilaan ei vaikuta vuodenaikojen vaihtelut, ja niiden luonnollinen lämpötila on geotermisen lämmön vaikutuksen takia vapaata kviferia korkeampi. (Dincer & Rosen 2011, 120.)

ATES-järjestelmän käyttöön valitulla kviferillä pitää olla hyvä veden läpäisykyky, mikä käytännössä tarkoittaa, että maaperän on oltava hiekkaa tai soraa. Suomessa sopivaa maata on siis sora- ja hiekkaperäisessä harjussa

sekä salpausselissä. Ihmiskasutus on usein keskittynyt alueille, jossa on pohjavettä helposti saatavilla, mikä on kätevää rakennusten lämmittämisen ja viilentämisen ATES-järjestelmällä kannalta. (Arola, 2023.) Kuvasta 6 ilmenee kaupunki- ja teollisuusalueiden lähellä sijaitsevia lämpöenergian hyödyntämiseen potentiaalisesti käyttöön otettavia akvifereja. Ylivoimaisesti suurimman lämpöenergiapotentiaalin omaava akviferi sijaitsee Lahdessa, ja sillä on 2,7MW lämpöenergiantuottopotentiaali (Arola 2014, 11).



Kuva 6. Suomessa kaupunki- ja teollisuusalueiden lähellä sijaitsevat lämpöenergian hyödyntämiseen potentiaalisesti käyttöön otettavat akviferit. Numerot 1-20 näyttävät 20 akviferia suurimmalla potentiaalilla, missä 1 on suurin (Arola 2014, 11).

Järjestelmän suunnittelun kannalta oleellista on pohjaveden ominaisuudet. Veden laatu vaikuttaa järjestelmän elinikään ja huoltojen määrään, sillä epäpuhdas vesi voi tukkouttaa kaivosuodattimet. Suolaista vettä sisältävä akviferi tulee järjestelmälle kalliimmaksi kuin makeaa vettä sisältävä, sillä se pitää suojata suolaisen veden aiheuttamaa korroosiota vastaan. Pohjaveden virtaus täytyy myös ottaa huomioon, sillä jos pohjaveden virtaus on korkea, varastoitua lämpöä ja kylmää voi mennä hukkaan virtaavan veden mukana. (Ramos-Escudero ym. 2022, 4.)

Akviferin heterogeenisuus tarkoittaa, että se ei ole tasalaatuista tai -rakenteista, joten sen vedenjohtavuus vaihtelee paikoitellen. Mitä enemmän akviferi on heterogeeninen, sen heikompi on kaivon lämmön talteenoton hyötysuhde. Lämmön talteenoton hyötysuhteesta puhutaan kappaleessa 3.3. (Sommer ym. 2016, 8136.)

3.2.2 Kaivojen alueellinen jakauma

ATES-järjestelmän kaivojen sijainti toisiinsa nähden vaikuttaa niiden lämmön talteenoton tehokkuuteen. Kun vettä imeytetään kaivoon, imeytetty vesi muodostuu sen ympärille sylinterin muotoiseen alueeseen. Tämän alueen sädettä kutsutaan hydrauliseksi säteeksi R_h (hydraulic radius). Hydraulisen säteen reunamien veden lämpötilat muuttuvat maaperän lämpötilaksi. Alueen sisällä on pienempi sylinterin muotoinen alue, jossa veden lämpötila on sama kuin kaivon lämpötila. Tämän alueen sädettä kutsutaan lämpösäteeksi R_{th} (thermal radius). Nämä säteet havainnollistetaan kuvassa 7. (Duijff 2019, 6.) Jos kaksi tai useampi lämpötilaltaan samanlainen kaivo, eli joko lämmin tai kylmä kaivo, ovat lähekkäin, eli alle kahden lämpösäteen päässä toisistaan, ne vaikuttavat toisiinsa positiivisesti. Jos taas lämpötilaltaan kaksi tai useampi erilaista kaivoa ovat lähellä toisiaan, niiden lämmön talteenoton hyötysuhde laskee. (Beernik ym. 2022, 2.)

ATES-kaivon lämpösäde R_{th} (m) lasketaan kaavalla 2 (Beernik ym. 2022, 4):

$$R_{th} = \sqrt{\frac{c_w V}{c_a \pi L}} \quad (2)$$

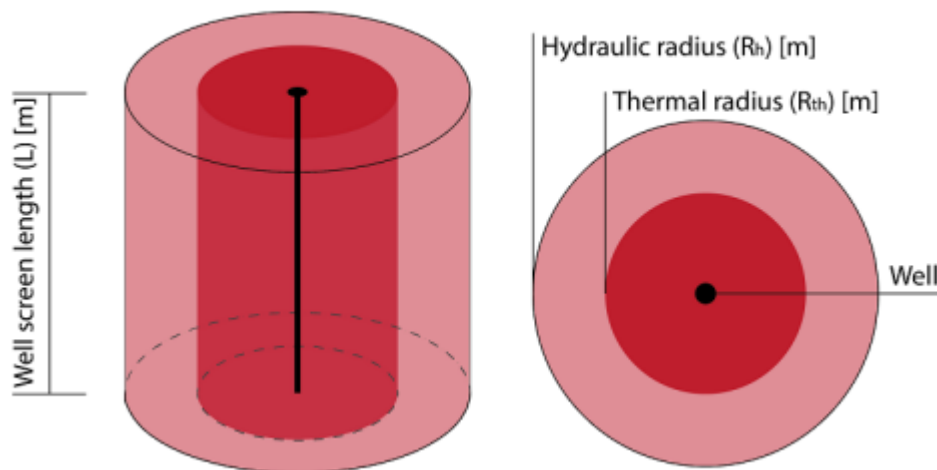
jossa

c_w on veden tilavuuslämpökapasiteetti [J/(K*m³)]

c_a on akviferin veden sekä sedimentin yhteistilavuuslämpökapasiteetti [J/(K*m³)]

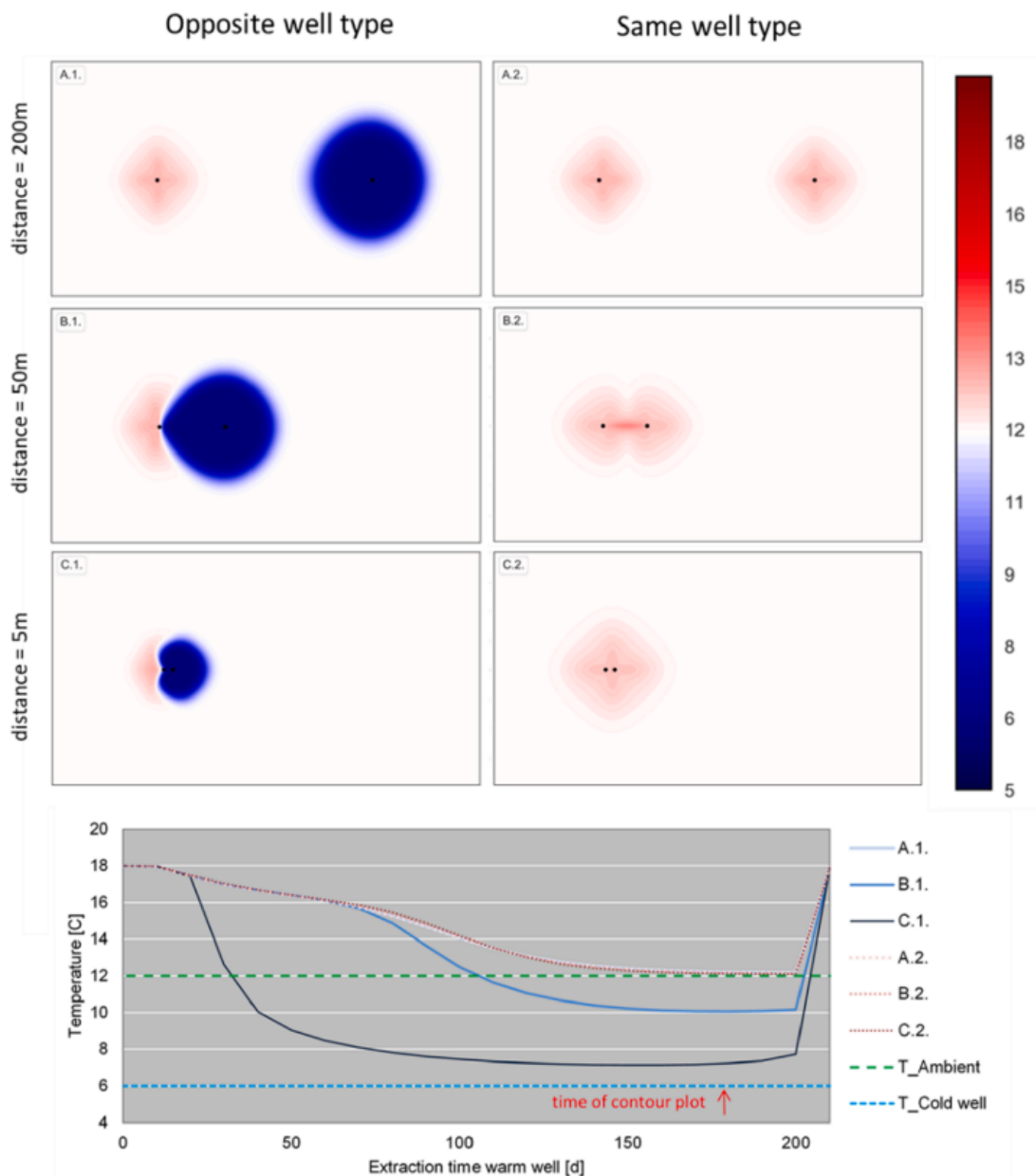
V on varastointiin imeytetyn veden tilavuus (m³)

L on pohjaveden kyllästämän alueen paksuus (m)



Kuva 7. ATES-kaivon lämpösäde ja hydraulinen säde (Duijff 2019, 6).

Kuvassa 8 on kuusi erilaista tapausta, joista näkee, miten kaivojen etäisyys toisistaan vaikuttaa niiden lämpötiloihin. Tapausten alla olevassa kaaviossa on mitattu lämpimien kaivojen lämpötilaa 200 päivän ajan, mihin sisältyy kylmän kauden varastointi sekä lopussa lämpimän veden varastoiminen. Kaaviosta näkee, että tapauksissa C1 ja B1 kylmät kaivot ovat vaikuttaneet radikaalisti lämpimien kaivojen veden lämpötilaan.



Kuva 8. Etäisyyden vaikutus saman- ja vastakkaislämpöisiin ATES-kaivoihin. Kaavio näyttää yllä olevien tapausten vasemmanpuoleisten kaivojen, eli kaikissa tapauksissa lämpimän kaivon, lämpötilan kehityksen (Beernik ym. 2022, 4).

3.2.3 Lämmön tasapaino

ATES-järjestelmä on harvoin lämmön kannalta tasapainossa, sillä lämmitettävä kohde vaatii yleensä eri määrän lämpöä talvella kuin kylmää kesällä. Jos

esimerkiksi kaivoista otetaan vuosittain enemmän kylmää ulos kuin lämpöä, lämmin varasto laajenee ja se voi saavuttaa kylmän varaston, jolloin järjestelmän suorituskyky viilennyksen kannalta heikkenee. Tämä lämmön tasapaino mitataan energiatasapainosuhteella EBR (Energy Balance Ratio), joka saadaan seuraavalla kaavalla (Sommer ym. 2014, 267-268):

$$EBR = \frac{E_{Abs,c} + E_{Abs,h}}{E_{Abs,c} - E_{Abs,h}} \quad (3)$$

jossa

$E_{Abs,c}$ on kaivosta ulos saatu kylmä energia (J)

$E_{Abs,h}$ on kaivosta ulos saatu lämmin energia (J)

EBR kertoo tietyllä aikavälillä järjestelmästä saatavan lämmön ja kylmän energian suhteen, ja arvoltaan nolla oleva EBR olisi tasapainoltaan täydellinen. Ulos saadut energiat lasketaan seuraavilla kaavoilla (Sommer ym. 2014, 268):

$$E_{Abs,c} = \int_{Viilentämistila} c_w(T_{Abs} - T_{natural})Q_{Abs}dt \quad (4)$$

$$E_{Abs,h} = \int_{Lämmitystila} c_w(T_{Abs} - T_{natural})Q_{Abs}dt \quad (5)$$

jossa

c_w on veden ominaislämpökapasiteetti (J/kgK)

T_{Abs} on kaivosta pumpatun veden lämpötila (K)

$T_{natural}$ on akviferin luonnollinen lämpötila (K)

Q_{Abs} on kaivosta ulos pumpatun veden virtaus (kg/s)

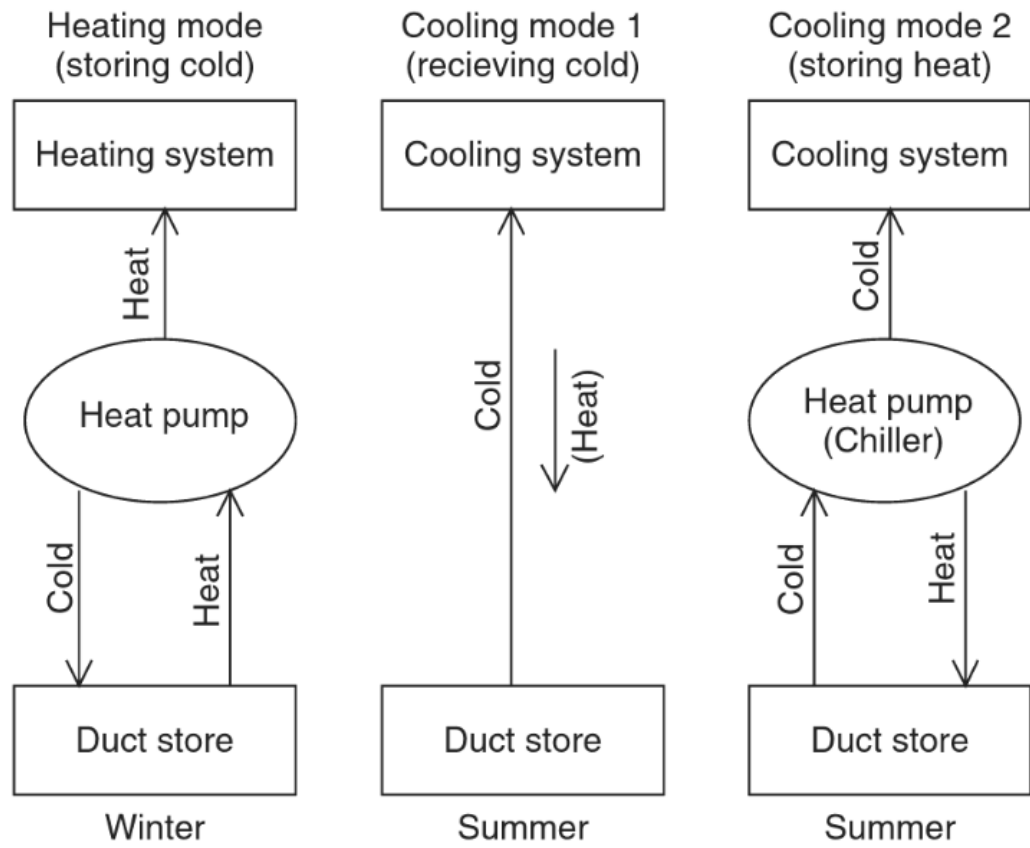
dt on aika-askel.

ATES-järjestelmän ollessa lämmön kannalta epätasapainossa se täytyy tasapainottaa, esimerkiksi lisäämällä energiaa muista lämmön tai kylmän

lähteistä. Yksi yleinen kylmän lähde on kylmä ulkoilma, joka kerätään jäähdytystorneilla, kuivakylmäkoneella tai lämmönvaihtimella. Yleisin lämmönlähde on kesäisin rakennuksen viilentämiseen käytettävän lämpöpumpun hukkalämpö. (Cabeza 2014, 89.)

3.2.4 Lämpöpumppu

ATES-järjestelmässä käytetään usein lämpöpumppua kuvan 9 mukaisesti, jotta lämmitettävään tai viilennettävään kohteeseen voidaan saavuttaa riittävät lämpötilat. Talvella kaivosta saatava lämmin vesi viilenee luonnollisesti luovuttaessa lämpöä lämmitettävään kohteeseen. Lämpöpumpulla voidaan ottaa vedestä vielä enemmän lämpöä irti, jolloin vesi viilenee vielä enemmän (heating mode). Kesällä järjestelmän toiminta on vastakkainen. Jos varastossa on tarpeeksi kylmää vettä, sillä voidaan jäähdyttää kohdetta ilman lämpöpumppua eli vapaajäähdytyksenä (cooling mode 1). Jos varastoitu vesi on liian lämmintä tai kohteen jäähdytystarve on korkea lämpimien keliin vuoksi, voidaan käyttää lämpöpumppua rakennuksen jäähdyttämiseen käytettävän veden jäähdyttämiseksi, jolloin lämpöpumpun hukkalämpö varastoidaan kaivoon (cooling mode 2). (Dincer & Rosen 2011, 123-124.)



Kuva 9. Lämpöpumpullisen ATES-järjestelmän toimintaperiaate (Dincer & Rosen 2011, 124).

3.3 Lämmön talteenoton hyötysuhde

ATES-kaivon lämmön talteenoton hyötysuhde (thermal recovery efficiency) määrittää kaivon varastointitehokkuuden. Kaivosta ulos saatavan lämpöenergian sekä kaivoon varastoidun lämpöenergian suhde on lämmön talteenoton hyötysuhde (kaava 6). Lämmön talteenoton hyötysuhde on aina alle 1, sillä pohjaveden virtaus sekä lämmönjohtuminen vie lämpöenergiaa hukkaan varastosta. Lämmön talteenoton hyötysuhde voi olla 0,75 luokkaa alueilla, joilla pohjaveden virtaus on olematonta, sekä alle 0,4 alueilla, joilla pohjaveden virtausnopeus ylittää 150 metriä vuodessa. (Sommer ym. 2015, 323.)

Lämmön talteenoton hyötysuhde η_{rec} lasketaan kaavalla (Sommer ym. 2013, 8133):

$$\eta_{rec} = \frac{E_{Abs}}{E_{Inj}} = \frac{\int_{t_0}^t (T_{Abs} - T_{natural}) Q_{Abs} dt}{\int_{t_0}^t (T_{Inj} - T_{natural}) Q_{Inj} dt} \quad (6)$$

jossa

E_{Abs}	on kaivosta ulos saatava lämpöenergia (J)
E_{Inj}	on kaivoon varastoitu lämpöenergia (J)
T_{Abs}	on kaivosta pumpatun veden lämpötila (K)
T_{Inj}	on kaivoon varastoidun veden lämpötila (K)
$T_{natural}$	on akviferin luonnollinen lämpötila (K)
Q_{Abs}	on kaivosta ulos pumpatun veden virtaus (kg/s)
Q_{Inj}	on kaivoon varastoidun veden virtaus (kg/s)
dt	on aika-askel.

3.4 Lämpötilojen erotukset

Lämpötilaeroilla voidaan myös havainnollistaa ATES-kaivon suorituskykyä.

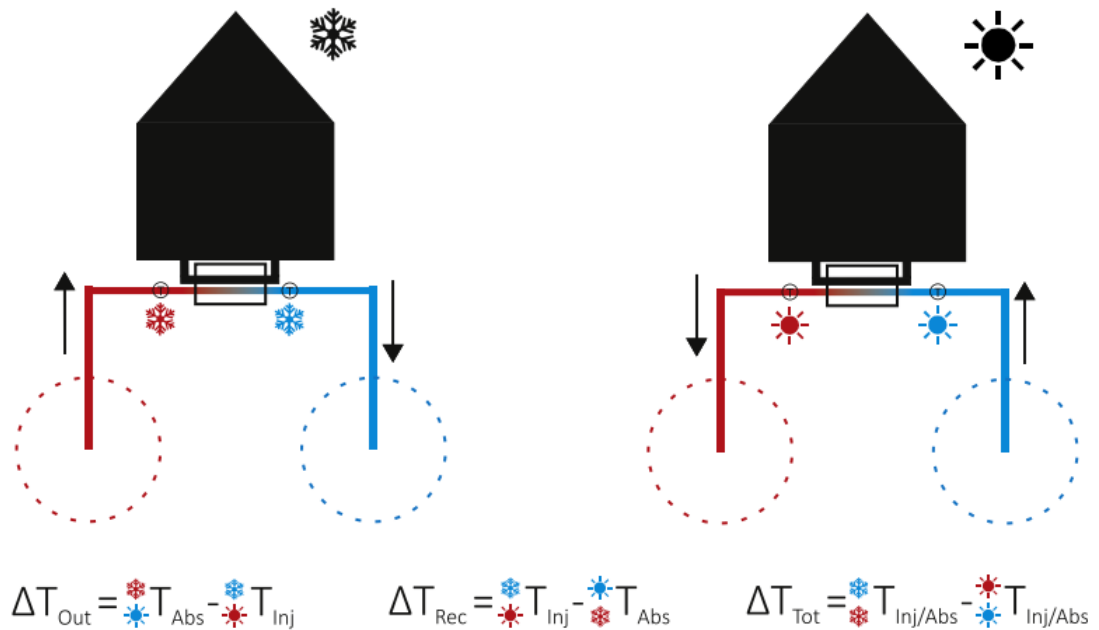
ΔT_{out} kertoo kaivosta pumpatun veden sekä kaivoon pumpatun veden lämpötilojen erotuksen ja se lasketaan kaavalla 7. Mitä korkeampi tämä erotuslämpötila on, sitä potentiaalisesti paremmat ovat kaivon latauslämpötilat ja energian siirto kaivosta lämmitettävään kohteeseen. ΔT_{Rec} mittaa lämpötilan muutosta varastoinnin aikana ja se lasketaan kaavalla 8. Mitä vähemmän lämpötila on muuttunut varastoinnin aikana, sitä vähemmän on lämpöhäviötä tapahtunut. ΔT_{Tot} kertoo lämpimän ja kylmän kaivon lämpötilojen erotuksen ja se lasketaan kaavalla 9. (Fleuchaus ym. 2019, 1538.):

$$\Delta T_{Out} = T_{Abs} - T_{Inj} \quad (7)$$

$$\Delta T_{Rec} = T_{inj} - T_{abs} \quad (8)$$

$$\Delta T_{Tot} = \Delta T_{Out} - \Delta T_{Rec} \quad (9)$$

Kuva 10 havainnollistaa äskeiset laskukaavat. Kuvassa punainen väri tarkoittaa lämmintä vettä, kun taas sininen väri tarkoittaa kylmää vettä. Aurinko symboloi kuvassa kesäkautta ja lumihiihtale symboloi talvikautta.



Kuva 10. ATES-järjestelmän lämpötilojen erotukset (Fleuchaus ym. 2019, 1539).

3.5 Vaikutuksia päästöihin

Stemmler ym. (2021) suorittamien testien mukaan ATES-järjestelmällä voidaan saavuttaa lämmitysöljyyn verrattuna n. 74% ja maakaasuun verrattuna n. 67% säästöt kasvihuonekaasupäästöissä, kun näitä käytetään lämmitysjärjestelmissä. Viilennysjärjestelmissä, joissa käytetään ATES-järjestelmää sähköisten jäähdytysjärjestelmien sijasta voidaan säästää 59% kasvihuonekaasupäästöissä. Huomioitavaa on, että näissä järjestelmissä käytetty sähkö oli saksalaista sähköverkko-sähköä, jonka tuotannossa käytetään paljon fossiilisia polttoaineita. ATES-järjestelmän kasvihuonekaasupäästöt tulevat sähköstä, jota käytetään veden pumppaamiseen sekä mahdollisesti

lämpöpumppuun. Tämä tarkoittaa, että käyttämällä vähäpäästöisesti tuotettua sähköä järjestelmän operointiin voidaan vähentää kasvihuonekaasupäästöjä.

3.6 Vaikutuksia pohjaveden laatuun

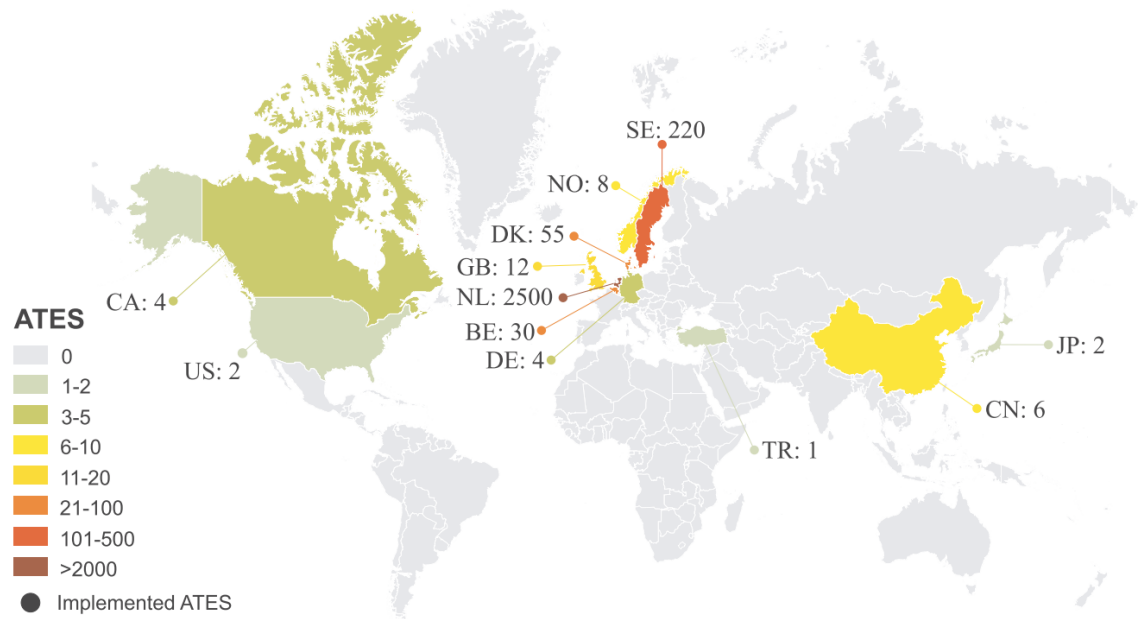
Suomessa pohjavettä suojellaan lailla pohjaveden pilaamiskiellolla. Sen mukaan pohjaveteen ei saa laittaa ainetta tai energiaa, mikä aiheuttaisi siinä terveydelle tai ympäristölle haitallista muutosta, tai huonontaisi olennaisesti sen laatua (Ympäristönsuojelulaki, 27.6.2014/527, 2:17). ATES-järjestelmän vaikutuksia pohjavedelle Suomessa on tutkittu vähän. Kun pohjaveden lämpötilaa muutetaan luonnollisesta tilasta, saattaa aiheutua muutoksia sen mikrobiologisessa aktiivisuudessa. Suomessa riski nostaa pohjaveden lämpötila haitalliselle tasolle on pieni, sillä Suomessa pohjaveden luonnollinen lämpötila on hyvin alhainen, joten sen lämpötilan nostattaminen haitalliselle tasolle on hankalaa. Korkeamman lämpötilan HT-ATES-järjestelmissä, joissa varastoidaan korkealämpöistä vettä kaivoihin, on mahdollista, että haitallisia alkuaineita liukenee maaperästä pohjaveteen. (Arola 2023.)

Belgiassa suoritettujen testien mukaan ATES-järjestelmä, jonka kaivot toimivat 6-16°C:n lämpötiloissa, ei huomattu lämpötilan muutoksista johtuvaa vaikutusta pohjaveden laatuun. Muutoksia laadussa tapahtui, kun sekoitettiin matalaa pohjavettä, jossa on mahdollisia epäpuhtauksia, syvän pohjaveden kanssa. Tämä laadullinen muutos ei vaikuttanut pohjaveden kelpoisuuteen juomavetenä. (Possemiers ym. 2014, 31.)

3.7 Käytössä olevia järjestelmiä

Maailmalla ATES-järjestelmiä oli vuonna 2018 tiedettävästi yli 2800. Järjestelmät sijoittuvat maailmalle kuvan 11 mukaisesti. 85% kaikista järjestelmistä on Alankomaissa, ja 10% järjestelmistä on Belgiassa, Ruotsissa ja Tanskassa. Maailman kaikki ATES-järjestelmät tuottavat arviolta yli 2,5 TWh vuodessa lämpöä ja kylmää.

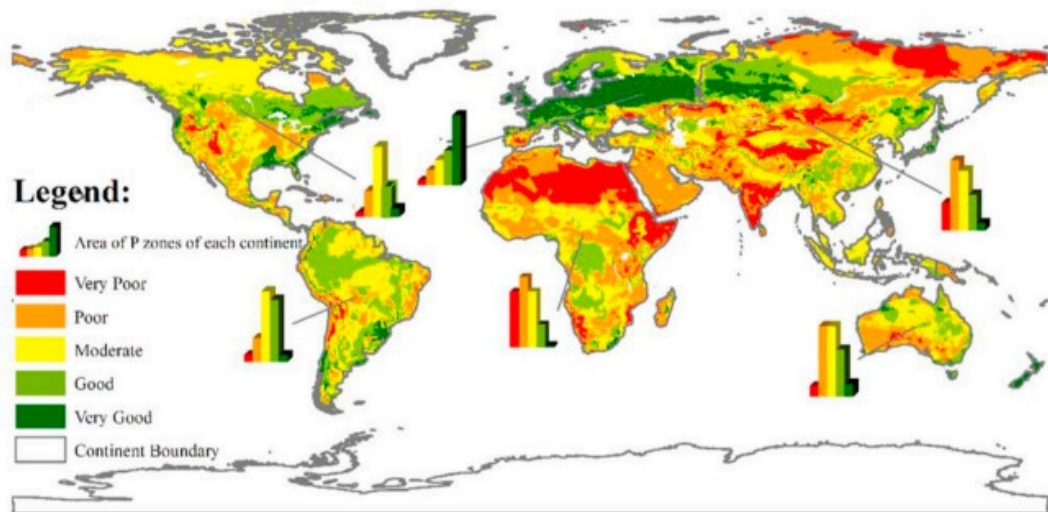
Alankomaiden valtavan ATES-järjestelmien määrän selittää viranomaisten ATES-järjestelmille asettamat kannustinohjelmat sekä tuet. Alankomaissa n. 70% ATES-järjestelmistä tuottaa energiaa julkisille ja kaupallisille rakennuksille, kuten sairaaloille ja ostoskeskuksille. Loput n. 30% järjestelmistä tuottaa energiaa teollisuus- ja asuinrakennuksille. (Fleuchaus ym. 2018, 866-867.)



Kuva 11. Maailmalla vuonna 2018 käytössä olevat ATES-järjestelmät (Fleuchaus ym. 2018, 868).

Suomesta löytyy myös yksi ATES-järjestelmä Lahdessa Askonalueelta. Askonalueen ATES-järjestelmä otettiin käyttöön vuonna 2019, joten sitä ei ole merkitty kuvaan 11, joka on vuodelta 2018. Askonalueen ATES-järjestelmä pitää sisällään yhden kylmän kaivon sekä yhden lämpimän kaivon, ja se tuotti vuonna vuonna 2019 473 MWh lämpöä ja 48 MWh kylmää, tehden 55 t:n vähennykset CO₂ päästöihin. (Arola ym. 2020, 39.)

Euroopasta löytyy erityisen paljon potentiaalisia alueita ATES-järjestelmälle, kuten kuvasta 12 näkee, mikä selittänee niiden sijoittumisen erityisesti Eurooppaan. Huomioitavaa on, että Ruotsissa, josta löytyy lukuisia ATES-järjestelmiä, on Suomen kanssa samankaltaiset olosuhteet ATES-järjestelmälle.

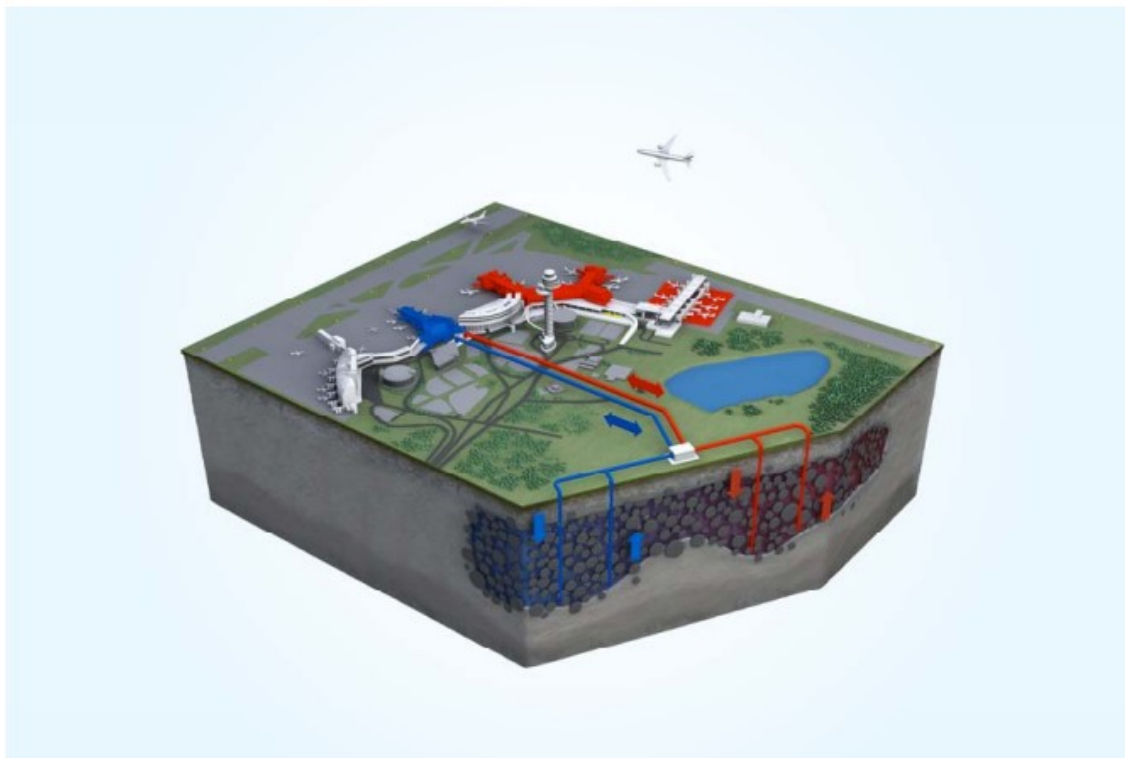


Kuva 12. ATES-järjestelmälle potentiaaliset alueet maailmalla (Lu ym. 2019, 794)

3.7.1 Arlandan lentoasema, Ruotsi

Ruotsissa sijaitseva Tukholma Arlandan lentoasema käyttää vuodesta 2009 asti laitoksen lämmittämiseen ja viilentämiseen apuna maailman suurinta ATES-järjestelmää. Lentoasema tuottaa ATES-järjestelmällä vuosittain lämpöä 15 GWh verran sekä säästää vuosittain sähkön kulutuksessa 4 GWh. (Swedavia, n.d.) Järjestelmä kestää 8 MW viillennys- tai lämmityskuormaa, ja veden virtaama on korkeintaan 720 m³/h. Järjestelmän investointikustannukset olivat 5 miljoonaa euroa, ja sen takaisinmaksuaika oli viisi vuotta.

ATES-järjestelmä näyttää kuvan 13 mukaiselta. Akviferi ja kaivot sijaitsevat muutaman kilometrin päästä lentoaseman terminaalia paikallisessa Långåsen -nimisessä harjussa. Akviferin toisella puolella on 5 kylmää kaivoa ja toisella puolella on 6 lämmintä kaivoa. Kylmiin kaivoihin on varastoituneena 3-5°C vettä ja lämpimiin kaivoihin 15°C vettä. Lämmintä vettä käytetään talvisin lentoaseman tuloilman lämmitykseen sekä lumen sulattamiseen tietyillä alueilla, kylmää vettä käytetään aseman viilentämiseen. (Wigstrand n.d., 2-4.)

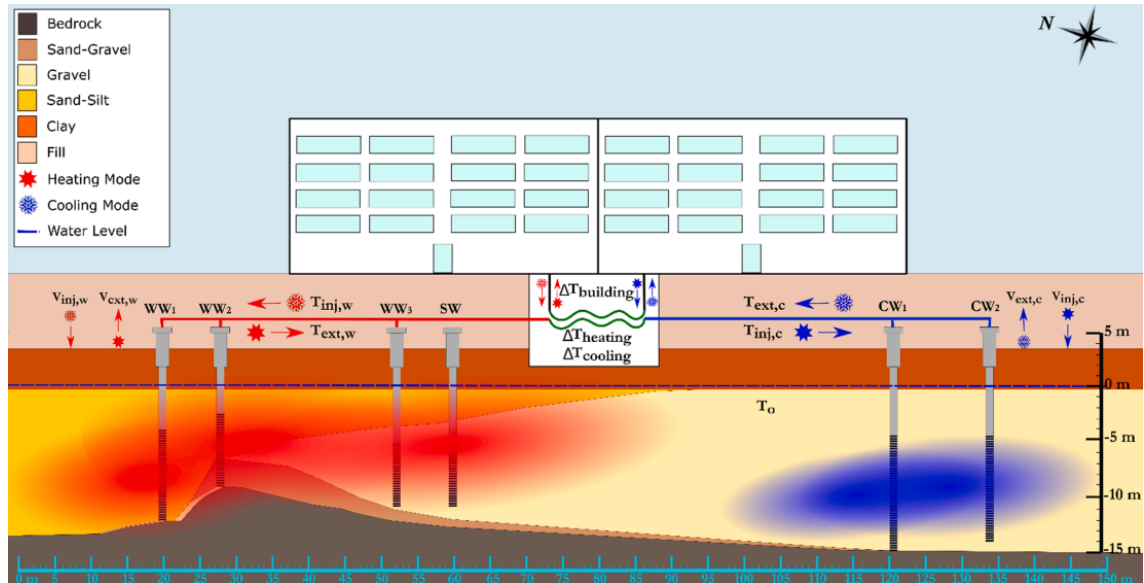


Kuva 13. Arlandan lentoaseman ATES-järjestelmä (Wigstrand n.d., 3).

3.7.2 Solna, Tukholma, Ruotsi

Pohjois-Tukholmassa sijaitsevat Vasakronan -kiinteistönvälitysyhtiön omistamat kaksi toimistorakennusta, joiden lämmityksessä on käytetty vuodesta 2016 asti ATES-järjestelmää. Toimistorakennusten yhteenlaskettu lämmitettävä pinta-ala on 18 000m², ja niiden vuosittainen lämmöntarve on 500MWh ja kylmän tarve 600MWh.

Järjestelmän kaivot ovat asennettu Tukholma-harjuun, ja siihen kuuluu neljä lämmintä kaivoa, joista yksi ei ole käytössä, ja kaksi kylmää kaivoa, joista pumpataan molempiin suuntiin vettä jopa 50 l/s. Lämmityksen ja viilennyksen tukena järjestelmä käyttää lämpöpumppua. Kuvasta 14 nähdään kaivojen sijainnin toisiinsa nähden sekä niiden syvyudet. Lämpimien kaivojen ryhmittymän keskipiste on noin 90m päässä kylmien kaivojen keskipisteen ryhmittymästä. Kuvassa WW tarkoittaa lämmintä kaivoa, CW tarkoittaa kylmää kaivoa ja SW tarkoittaa varakaivoa.



Kuva 14. Poikkileikkaukkuva ATES-järjestelmästä (Abuasbeh ym. 2021, 5)

Järjestelmän suorituskykyä mitattiin sen ensimmäisen kolmen ja puolen toimintavuoden aikana. Ensimmäisenä vuonna kylmien kaivojen lämmön talteenoton hyötysuhde R_{th} oli 7%, kun taas lämpimien kaivojen oli 70%. Viimeisenä vuonna kylmien kaivojen R_{th} oli 89% ja lämpimien kaivojen oli 26%. Tämä viittaa siihen, että kaivoja pidettiin lämmöiltään epätasapainossa, ja kylmä kaivo vaikutti negatiivisesti lämpimään kaivoon. Epätasapaino johtui osittain ylimitotetuista lämpöpumpuista, joita ei voitu käyttää liian pienten lämpökuormien aikaan, jolloin rakennusten lämmittämisen piti tukeutua kaukolämpöön. Osittain epätasapaino johtui vähentyneestä lämmityksen tarpeesta kahtena viimeisenä vuonna. Lisäksi viilennyksen tarve kasvoi alkuperäisestä tarpeesta, mutta ylimitoitettuja lämpöpumppuja ei voitu käyttää viilennyksen tukena pienten kylmäkuormien aikana, mikä johti liialliseen kylmän kaivoveden käyttöön, joka puolestaan piti lämmenneenä imeyttää lämpimään kaivoon.

Kylmää vettä saatiin jäädytyskaivoista ensimmäisenä vuonna 49 000m³, johon sidottiin energiaa rakennuksen viilentämiseksi 235 MWh. Viimeisenä vuonna vedenotto oli noussut 112 000 kuutiometriin, jolla viilennettiin rakennuksia kyseisenä vuonna 272 MWh. Lämpimää vettä pumpattiin ensimmäisenä vuonna

37 000m³, josta saatiin lämpöä 189 MWh, mutta viimeisenä vuonna vedenotto oli vain 13 000m³ ja lämpöenergian määrä 83 MWh. (Abuasbeh ym. 2021.)

4 PÄÄTELMÄT

ATES on lämpöenergian varastointijärjestelmä, joka hyödyntää akviferejä eli pohjavesivarantoja lämmön ja kylmän varastointiin. ATES-järjestelmällä on paljon potentiaalia toimia Suomessa, sillä Suomessa on paljon järjestelmän käyttöön soveltuvia pohjavesivarantoja. Silti jostain syystä Suomessa ATES:a ei ole otettu yleisempään käyttöön.

Muihin lämmön varastointijärjestelmiin verrattuna ATES:lla on korkea lämpöenergian varastokapasiteetti sekä korkea varastomateriaalin varastointitilavuus. Nämä asiat tekevät ATES:sta loistavan vaihtoehdon otettavaksi käyttöön suuren lämmitys- ja viilennystarpeen kohteissa. Toisaalta järjestelmä vaatii paljon suunnittelua ja tutkimista sekä käytönaikaista valvomista, jotta varastoidusta lämmöstä ja kylmästä voidaan hyödyntää mahdollisimman iso määrä.

Tärkeitä vaatimuksia ja huomioonotettavia seikkoja ATES-järjestelmän käyttöönotossa ovat akviferin laatu ja sen tyyppi. Lämpö- ja kylmäkaivojen riittävä etäisyys toisistaan sekä lämmön tasapainon ylläpitäminen varmistaa sen, että kylmien ja lämpimien kaivojen vedet eivät sekoitu keskenään, mikä vaikuttaisi negatiivisesti kaivojen lämmön ja kylmän talteenottoon.

Opinnäytetyössä selvitettiin kahden ATES-järjestelmää käyttävän kohteen toimintaa, joista Arlandan lentoaseman järjestelmä on hyvä esimerkki onnistuneesti suunnitellusta järjestelmästä. Solnan ATES-järjestelmä taas on esimerkkitapaus siitä, miten kylmien ja lämpimien kaivojen keskenään sekoittuminen vaikuttaa järjestelmän toimintaan.

Hyvä jatkotutkimusaihe tästä olisi selvittää, miten ATES-järjestelmässä pohjaveden lämpötilojen muuttaminen vaikuttaa pohjaveden mikrobiologiaan sekä veden laatuun.

Lähteet

Abuashbeh, M.; Acuña, J.; Lazzarotto, A. & Palm, B. 2021. Long term performance monitoring and KPIs' evaluation of Aquifer Thermal Energy Storage system in Esker formation: Case study in Stockholm. Viitattu 18.4.2023. Saatavissa:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375650521001267>

Arola, T. 2023. GTK:n geoenergian johtavan asiantuntijan haastattelu 6.4.2023, haastattelijana Oskari Hiironen

Arola, T.; Eskola, L.; Hellen, J. & Korkka-Niemi, K. 2014. Mapping the low enthalpy geothermal potential of shallow Quaternary aquifers in Finland. Viitattu 10.4.2023. Saatavissa: <https://geothermal-energy-journal.springeropen.com/articles/10.1186/s40517-014-0009-x>

Arola T.; Kauppila K. & Vallin S. 2020. Pohjavesienergian hyödyntäminen – Turun Skanssin alue. Viitattu 23.4.2023. Saatavissa:

https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/66_2020.pdf

Beernink, S.; Bloemendal, M.; Kleinlugtenbelt, R. & Hartog, N. 2022. Maximizing the use of aquifer thermal energy storage systems in urban areas: effects on individual system primary energy use and overall GHG emissions. Viitattu 11.4.2023. Saatavissa:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626192200068X>

Britschgi, R.; Antikainen, M.; Ekholm-Peltonen, M.; Hyvärinen, V.; Nylander, E.; Siiro, P. & Suomela, T. Pohjavesialueiden kartoitus ja luokitus. Ympäristöopas. 2009. Viitattu 21.4.2023. Saatavissa:

<https://helda.helsinki.fi/handle/10138/38830>

Cabeza, LF. 2014. Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications. Elsevier Science & Technology, Cambridge. Viitattu: 5.6.2022. Saatavissa: ProQuest Ebook Central

Dahash, A.; Ochs, F.; Janetti, MB. & Streicher, W. 2019. Advances in seasonal thermal energy storage for solar district heating applications: A critical review on large-scale hot-water tank and pit thermal energy storage systems. Viitattu 10.4.2023. Saatavissa:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919301837>

Dincer, I & Rosen, M.A. 2011. Thermal Energy Storage: Systems and applications, second edition. Wiley. Viitattu 3.3.2023. Saatavissa: ProQuest Ebook Central

Duijff, R. 2019. Interaction between multiple ATEs systems – Analysis of thermal and geohydrologic performance. Viitattu 15.4.2023. Saatavissa: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Acf4bcee3-b775-4676-b683-0e38fabb70ee>

Energiateollisuus n.d. Geoterminen energia. Viitattu 20.4.2023. Saatavissa: https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/geoterminen_voima

Fleuchaus, P.; Schüpfer, S.; Godschalk, B.; Bakema, G. & Blum, P. 2019. Performance analysis of Aquifer Thermal Energy Storage (ATES). Viitattu 21.3.2023. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096014811931050X>

Fleuchaus, P.; Schüpfer, S.; Bloemendal, M.; Guglielmetti, L.; Opel, O. & Blum, P. 2020. Risk analysis of High-Temperature Aquifer Thermal Energy Storage (HT-ATES). Viitattu 6.4.2023. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032120304445>

Fleuchaus, P.; Godschalk, B.; Stober, I. & Blum, P. 2018. Worldwide application of aquifer thermal energy storage – A review. Viitattu 9.3.2023. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032118304933>

Gehlin, S. 2016. Borehole thermal energy storage. Viitattu 16.3.2023. Saatavissa (PDF): https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1205189/mod_folder/content/0/%28gehl%20in%202016%29%20Borehole%20thermal%20energy%20storage.pdf?forcedownload=1

Seismologian instituutti n.d. Geotermisen energian eri muodot. Viitattu 20.4.2023. Saatavissa: <https://www.helsinki.fi/fi/seismologian-instituutti/maanjaristykset/geoterminen-energia-ja-ihmisen-aiheuttamat-maanjaristykset/geotermisen-energian-muodot#section-72432>

Haehnlein, S.; Bayer, P. & Blum, P. 2010. International legal status of shallow geothermal energy. Viitattu 6.4.2023. Saatavissa:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110002492>

Hyvinkään Lämpövoima Oy. Hyvinkään Lämpövoima alkaa varastoida ensimmäisenä Suomessa lämpöenergiaa mittavasti suureen hiekkakuoppaan – säästöt energian hinnassa vuodessa miljoonaluokkaa. Viitattu 16.3.2023.

Saatavissa: <https://hlv.fi/ajankohtaista/lampovoima-alkaa-varastoida-lampoenergiaa-suureen-hiekkakuoppaan/>

IRENA, OECD/IEA & REN21. 2020. Renewable Energy Policies in a Time of Transition. Viitattu 23.4.2023. Saatavissa: <https://www.ren21.net/heating-and-cooling-2020/>

Khatod, KJ.; Katekar, VP. & Deshmukh, SS. 2022. An evaluation for the optimal sensible heat storage material for maximizing solar still productivity: A state-of-the-art review. Viitattu 16.3.2023. Saatavissa:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X22006387>

Lu, H.; Tian, P. & He, L. 2019. Evaluating the global potential of aquifer thermal energy storage and determining the potential worldwide hotspots driven by socio-economic, geo-hydrologic and climatic conditions. Viitattu 23.4.2023.

Saatavissa:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211930406X>

National Ground Water Association. Viitattu 6.4.2023. Saatavissa:

<https://www.ngwa.org/what-is-groundwater/About-groundwater/confined-or-artesian-groundwater>

Nordell, B. 2000. Large-scale Thermal Energy Storage. Viitattu 16.3.2023.

Saatavissa: [http://www.diva-](http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1001440/FULLTEXT01.pdf)

[portal.org/smash/get/diva2:1001440/FULLTEXT01.pdf](http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1001440/FULLTEXT01.pdf)

Nordell, B. 2012. Underground Thermal Energy Storage (UTES). Innostock 2012. Viitattu: 14.1.2023. Saatavissa: [\(PDF\) Underground thermal energy storage \(UTES\) \(researchgate.net\)](#)

Novo, AV.; Bayon, JR.; Castro-Fresno, D. & Rodriguez-Hernandez, J. 2009. Review of seasonal heat storage in large basins: Water tanks and gravel-water pits. Viitattu 13.3.2023. Saatavissa:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261909002694>

Possemiers, M.; Huysmans, M. & Batelaan, O. 2014. Influence of Aquifer Thermal Energy Storage on groundwater quality: A review illustrated by seven case studies from Belgium. Viitattu 26.4.2023. Saatavissa:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581814000214>

Ramos-Escudero, A. & Bloemendal, M. 2022. Assasment of potential for Aquifer Thermal Energy Storage Systems for Spain. Viitattu 9.3.2023. Saatavissa:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670722001767>

Rosen, MA. & Koochi-Fayegh, S. 2017. Geothermal Energy: Sustainable Heating and Cooling Using the Ground. Viitattu 13.2.2023. Saatavissa: ProQuest Ebook Central

Sarbu, I. & Sebarchievici, C. 2018. A Comprehensive Review Of Thermal Energy Storage. Viitattu 15.3.2023. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/1/191>

Schmidt, T.; Pauschinger, T.; Sørensen, PA.; Snijders, A.; Djebbar, R.; Boulter, R. & Thornton, J. 2018. Design Aspects for Large-scale Pit and Aquifer Thermal Energy Storage for District Heating and Cooling. Viitattu 14.1.2023. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610218305198>

Sommer, W.; Doornenbal; P.; Drijver, B.; van Gaans, P.; Leusbrock, I.; Grotenhuis, J. & Rijnaarts, H. 2014. Thermal performance and heat transport in aquifer thermal energy stor tage. Viitattu 18.4.2023. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/258900372_Thermal_performance_and_heat_transport_in_aquifer_thermal_energy_storage

Sommer, W.; Valstar, J.; van Gaans, P.; Grotenhuis, T. & Rijnaarts, H. 2013. The impact of aquifer heterogeneity on the performance of aquifer thermal energy storage. Viitattu 18.3.2023. Saatavissa: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2013WR013677>

Sommer, W.; Valstar, J.; Leusbrock, I.; Grotenhuis, T. & Rijnaarts, H. 2015. Optimization and spatial pattern of large-scale aquifer thermal energy storage. Viitattu 18.3.2023. Saatavissa:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261914010605>

Stemmler, R.; Blum, P.; Schüppler, S.; Fleuchaus, P.; Limoges, M.; Bayer, P. & Menberg, K. 2021. Environmental impacts of aquifer thermal energy storage (ATES). Viitattu 10.4.2023. Saatavissa:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121008388>

Suomen Vesiyhdistys. Pohjavesitutkimusopas. 2005. Viitattu 6.4.2023.

Saatavissa: <https://www.vesiyhdistys.fi/pdf/Pohjavesiopas.pdf>

Swedavia. Akvifären. Viitattu 9.4.2023. Saatavissa:

https://www.swedavia.se/arlanda/miljo/akvifaren/?_ga=2.140341616.271685809.1681044059-1357553942.1681044059

The Azimuth Project. Viitattu 14.1.2023. Saatavissa:

<https://www.azimuthproject.org/azimuth/show/Thermal+energy+storage>

Wigstrand, I. n.d. The ATES project – a sustainable solution for Stockholm-Arlanda airport. Viitattu 9.4.2023. Saatavissa: <https://docplayer.net/22379893-The-ates-project-a-sustainable-solution-for-stockholm-arlanda-airport.html>

Xiang, Y.; Xie, Z.; Furbo, S.; Wang, D.; Gao, M & Fan, J. 2022. A comprehensive review on pit thermal energy storage: Technical elements, numerical approaches and recent applications. Viitattu 16.3.2023. Saatavissa:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X22017042>

Ympäristönsuojelulaki 27.6.2014/527, 2:17