



Tuomas Lamminpää

# Energiakaivon simulointimalli TRNSYS-ohjelmistolla

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

4.4.2022

## Tiivistelmä

Tekijä: Tuomas Lamminpää  
Otsikko: Energiakaivon simulointimalli TRNSYS-ohjelmistolla  
Sivumäärä: 28 sivua  
Aika: 4.4.2022

Tutkinto: Insinööri (AMK)  
Tutkinto-ohjelma: Energia- ja ympäristötekniikka  
Ammatillinen pääaine: Energiantuotantomenetelmät  
Ohjaajat: Suunnittelupäällikkö Jere Oksanen  
Lehtori Tomi Hämäläinen

---

Työn tarkoitus on esitellä maalämpöjärjestelmän rakennetta ja toimintaa sekä

tarkastella TRNSYS-ohjelmiston mahdollisuutta tukea nykyistä EED-simulointiohjelmalla suoritettavaa energiakaivosimulointia Rototec Oy:lle.

Työssä selitetään geoenergiajärjestelmän osat ja niiden toimintaperiaate sekä vaikutus koko järjestelmän toimintaan. Mitoituksen merkitystä ja tärkeyttä selitetään yleisellä tasolla. TRNSYS-ohjelmiston osalta tutkitaan simulointiohjelman toimintaperiaatetta, ominaisuuksia ja verrataan sen ominaisuuksia EED-ohjelmaan. Työssä tarkastellaan myös tutkimuksia, joissa on hyödynnetty olemassa oleviin kohteisiin TRNSYS-sovellusta sekä pyritty analysoimaan tulosten oikeellisuutta ja sovelluksen kykyä mallintaa kaivokentän kuormitusta ja lämmönsiirtokykyä.

Työn perusteella voidaan jatkaa lisätutkimuksia mahdollisesta TRNSYS-ohjelmiston käytöstä EED-ohjelman tueksi erityyppisissä geoenergiakohteissa.

Avainsanat: maalämpö, uusiutuva energia, lämpöpumppu, hajautettu energian tuotanto

## **Abstract**

Author: Tuomas Lamminpää  
Title: TRNSYS Simulating Model for Energy Boreholes  
Number of Pages: 28 pages  
Date: 4 April 2022

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Energy and Environmental Technoly

Professional Major: Energy Production Technologies  
Supervisors: Jere Oksanen, Consulting Manager  
Tomi Hämäläinen, Senior Lecturer

---

The purpose of the bachelor's thesis was to represent the basic principles and structures of a ground source heat pump system (GSHP) and view the possibilities of the TRNSYS software to supplement the EED geoenergy simulating method.

The thesis presents the components of GSHP-system and explains how these components work as part of the system and affect each other and operating system. The TRNSYS software was studied generally, and its features were compared to EED software. Previous studies were examined and analyzed to find how valid their results were and how the TRNSYS software was applied in them

This bachelor's thesis was done for geoenergy drilling company. Further research will be made on the TRNSYS software's capabilities and utilization in different GSHP projects.

Keywords: GSHP, heat pump, renewable energy, decentralized energy production

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johanto	1
2	Maalämpö ja energiakaivot	1
2.1	Kaivojen mitoittaminen	5
2.2	Energiakaivojärjestelmän rakenne	8
2.2.1	Kaivo	8
2.2.2	Porausturvallisuus	11
2.2.3	Kollektorit	11
2.2.4	Lämpöpumput	13
3	Maalämpökaivojen simulointi	15
4	TRNSYS-ohjelmisto	17
5	Simulointi TRNSYksellä	21
5.1	TRNSYS-ohjelmiston käyttöä aikaisemmissa julkaisuissa	21
5.2	Simulointimalli	22
6	Yhteenveto	26
	Lähteet	28

## Lyhenteet

COP	Coefficient of Power. Lämpöpumpun hyötysuhde, joka muodostuu kompressorin vaatimasta sähkötehosta ja tuotetusta lämpötehosta.
DTS	Distributed Temperature Sensing. Lämpötila-anturi lämpötilanja-kauman mittaamiseen
EED	Earth Energy Designer. Kaivojen simulointi käytettävä ohjelmisto.
GWP	Global Warming Potential. Kuvaa aineen ilmastoa lämmittävää vaikutusta suhteessa hiilidioksidiin.
IWEC	International Weather for Energy Calculations. Tuntikohtainen säädata energialaskentaa varten.
TMY	Typical Meteorological Year. Sijaintiin perustuva vuoden mittainen säädata, joiden pohjana käytetään historiallisia sää tietoja.
TRT	Thermal Response Test Terminen vastetestti, jolla voidaan tutkia kallioperän lämmönsiirtokykyä.
W/mK	Wattia/metri kelviniä. Yksikkö kuvastaa kallioperän lämmönjohtavuutta.

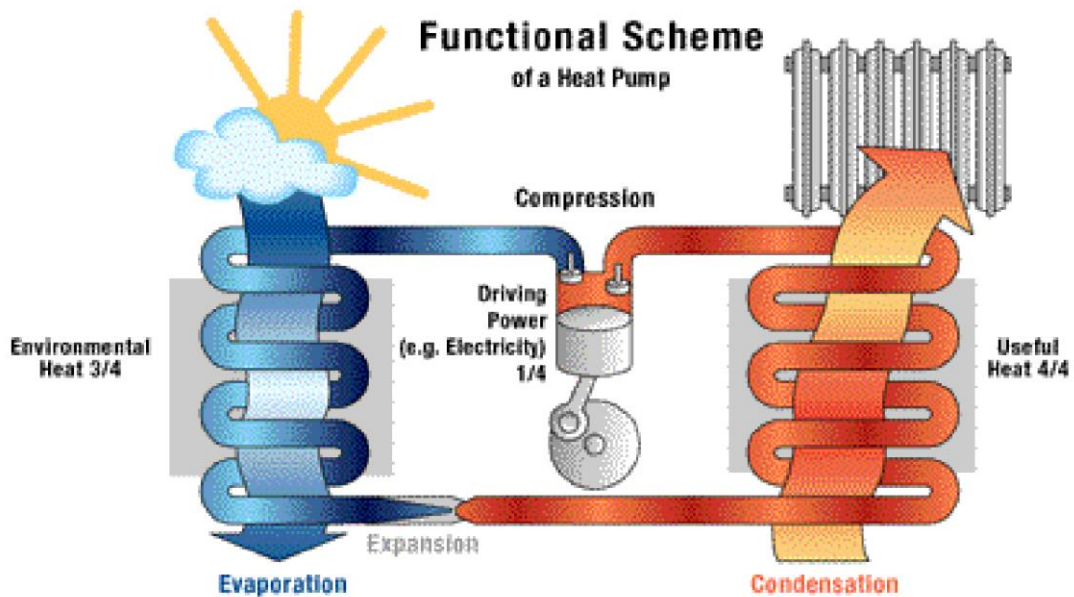
# 1 Johdanto

Tämän työn tarkoituksena on esitellä maalämpökaivojärjestelmän rakennetta ja TRNSYS-ohjelmiston sisältämiä ominaisuuksia, energiakaivoja hyödyntävän kohteen simuloinnissa. Työn tarkoituksena on tutkia TRNSYS-ohjelmiston kykyä täydentää nykyistä maalämpökaivojen simulointia ohjelmiston sisältämän modulaarisen mallinnuksen avulla niin, että simulointi antaisi kaivokentän lisäksi maalämpöjärjestelmästä tuloksia kokonaisuutena mukaan lukien lämpöpumput ja lämmitysverkostot. Nykyisin kaivokenttien simulointia toteutetaan maalämpökaivojen simulointiin erityisesti tarkoitettulla EED-ohjelmistolla. EED-ohjelmisto sisältää laajan parametrikirjaston kallioperän ominaisuuksista, joita tarvitaan kallioperän lämmönsiirtokyvyn selvittämiseen. Työn sisältö keskittyy yleisellä tasolla yksinkertaisen maalämpöjärjestelmän simulointimalliin ja simulointi komponenttien ominaisuuksiin. Työssä lähtökohtana on tutkia ohjelmiston kykyä lisätä perinteiseen kallioperäsimuointiin täydentäviä parametrejä, kuten esimerkiksi maalämpöpumpun dataa, näin mahdollisesti yhdessä simuloinnissa voitaisiin tarkastella koko maalämpöjärjestelmän toimintaa.

## 2 Maalämpö ja energiakaivot

Lämpöpumppuihin perustuvien järjestelmien hyödyntäminen lämmöntuotannossa on kasvussa ja ne toimivat osana energiatuotantomenetelmien irtikytkentää fossiilitaloudesta. Yleisesti lämpöpumppuja voidaan soveltaa suoraan kiinteistökohtaiseen lämmitykseen, jäähdytykseen, energianvarastointiin, usein lauhde- tai prosessien hukkalämpöjen avulla. Kaikkien lämpöpumppujen toiminta perustuu samanlaiseen työkiertoon. Kuvassa 1 havainnollistettu lämpöpumpun työkiertoa ja rakennetta. Lämpöpumput sisältävät höyrystimen, kompressorin, lauhduttimen ja paisuntaventtiilin. Höyrystin on lämmönkeruupuolen lämmönvaihdin, jonka tehtävä on sitoa lämmönlähteestä lämpöä lämpöpumpun sisällä kiertävään kylmäaineeseen, höyrystimeltä kylmäaine siirtyy kaasuna sähkötoimiselle kompressorille, joka puristaa kylmäaineen korkeapaineeseen. Korkeapaineinen kylmäaine siirtyy lauhduttimelle, mikä on lämpöpumpun toisiopuolen ja lauhdepiirin lämmönvaihdin. Lauhduttimessa korkea lämpötilainen ja paineinen

kylmäaine alkaa lauhtua höyrystä takaisin nesteeksi. Paisuntaventtiilin kautta kylmäaine palaa nesteenä höyrytimelle (1.)



Kuva 1. Lämpöpumpun kylmäaineprosessi (2)

Nykyään markkinoilla on ilma-, vesi-ilma-, maalämpöpumppuja. Pumppujen työkierto on kaikissa samanlainen, ainoa ero pumppujen välillä on lämmönlähde. Maalämmön hyödyntäminen lämpöpumpputeknisissä ratkaisuissa antaa mahdollisuuden käyttää pumppua myös sekä lämmitys- että jäähdytyskoneena, sillä maalämpökaivon avulla kallioperää voidaan käyttää sekä lämmityksessä että jäähdytyksessä. (3.)

Ympäristövaikutusten lisäksi erityisesti kiinteistökohtaisissa lämpöpumppuratkaisuissa ohjaavana tekijänä ovat myös taloudelliset hyödyt. Fossiilisten ja perinteisten energianlähteiden kustannukset kasvavat energiantuotannossa ja suorasähkö- ja öljylämmitteisten kiinteistöjen lämmityskustannukset kasvavat kiihtyvällä tahdilla lähivuosina. Sähkön ja öljyn kustannusten nousu johtuu uusien investointien, päästöhintojen, kiristyvän verotuksen ja globaalien hintakehityksen vaikutuksista. Energiayhtiöt joutuvat etsimään vaihtoehtoisia ratkaisuja vanhojen menetelmien tilalle. Vuonna 2021 päästökauppahinnoista ja käytettävien poltto-



aineiden verotuksen kiristymisestä johtuen esimerkiksi HELEN nostavansa kesäkauden kaukolämmön hintaa jopa 25 prosentilla (4). Hintakehityksen ollessa näin voimakasta myös kaukolämpö kohteiden osalta maalämpöön siirtyminen on houkuttelevaa ja lisää maalämmön kilpailukykyä perinteisten lämmitysmuotojen joukossa. Etenkin asunto-osake yhtiössä kaukolämmön hintakehitys alkaa lisätä mielenkiintoa kaukolämmön vaihtamisesta maalämpöjärjestelmiin, tällaisissa kohteissa usein hyödynnetään useampaa matalaa kaivoa, jotka ovat 200–400 m syviä.

Suomen tavoite hiilineutraaliutta kohti on lisännyt erilaisia tuki- ja avustusjärjestelmien kehitystä nopeuttamaan siirtymistä myös yksityisasuntojen osalta vähäpäästöisempiin energiantuotantomenetelmiin, viimeisimpänä ARAn energiaavustus. Lämpöpumppeihin pohjautuvat ratkaisut ovat avustuksen piiriin hyväksytyjä ratkaisuja esimerkiksi öljylämmitteisten kiinteistöjen muutostöissä. (5.)

Maalämmön hinta alkuinvestoinnissa on selkeästi ilma- tai ilma-vesilämpöpumpuja suurempi. Ilma- tai ilma-vesilämpöpumpuissa, lämmönlähde on usein saatavilla ilman erillistöitä. Maalämmössä lämmönlähde on hyödynnettävissä joko poraamalla energiakaivoja tai kaivamalla lämmönkeruupiiri. Tässä työssä käsitellään energiakaivoon perustuvaa järjestelmää. Kuvassa 2 Energiakaivon poraukseen tarvittavaa porauskalustoa kohteessa poraustöiden aikana. Maalämpökaivot ovat merkittävin osa nostamaan maalämmön alkuinvestoinnin kustannuksia suhteessa muihin lämpöpumppu ratkaisuihin. Alkuinvestoinnin jälkeen hyvin optimoiduissa ja tehokkaasti rakennetuissa kohteissa järjestelmän takaisinmaksuaika voidaan saada suhteellisen alas, karkeasti alimmillaan takaisinmaksuaika vaihtelee 5–10 vuoden välillä (6). Takaisinmaksuaika on kuitenkin aina tapauskohtainen ja nimenomaan lähitulevaisuudessa hintakehitykset lämmitysmuotojen välillä vaikuttavat maalämmön kannattavuuteen ja esimerkiksi aiemmin mainittujen kaukolämpökohteiden alueelliset erot kaukolämpöjen hinnoissa vaikuttavat kannattavuuteen maalämpöä vertailtaessa.



Kuva 2. Porauskalustoa poraamassa energiakaivoa. Kompressoriatosta siirretään paineilmaletkujen avulla poravaunulle poraamiseen vaadittavaa paineilmaa. (7.)

Energiakaivot kattavat nykyisellään arviolta noin 60 % osuuden kohteissa, joissa maalämpöä hyödynnetään (8). Energiakaivon hyödyt vesistö- ja lämmönkeruupiirikenttään verrattuna piilee sen moninaisessa käyttömahdollisuudessa. Kaivoja voidaan hyödyntää huomattavasti pienempi pinta-alaisissa tonteissa kuin lämmönkeruupiirikenttää. Lämpökaivot eivät tarvitse vesistöä kuten vesistöön asennettava keruujärjestelmä. Kaivojen syvyydet vaihtelevat aina kohteittain sekä vaadittujen kokonaismetrien että käytössä olevan tontti pinta-alan mukaan. Nykyisin kaivojen syvyydet vaihtelevat 200–400 m välillä. 200–400 m kaivot ovat matalia kaivoja, 600–1000 m keskisyviä kaivoja ja yli kilometrin kaivot ovat syviä kaivoja. Kasvavissa määrin isojen kaupunkien taajamissa toteutettavissa kohteissa tonttien koot suhteessa tarvittavaan lämmitysenergiaan tai -tehoon vaativat syvempiä kaivoja, jotta ahtaalle tontille saadaan mahdutettua tarvittavat kokonaismetrit. Energiakaivon poraus tapahtuu paineilmatoimisella porauskalustolla. Kaivometrit koostuvat tehollisesta eli aktiivisesta kaivosyvydestä mikä al-

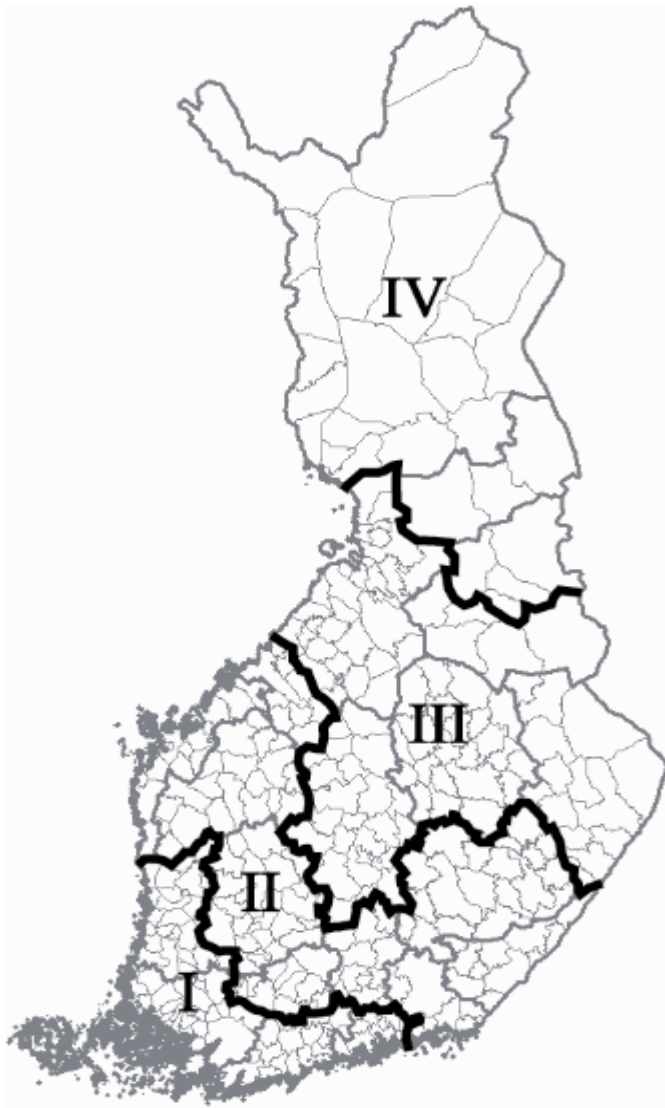
kaa, kun pora saavuttaa kallion, pohjaveden pinnan tai muun täyteaineen. Kallio-perä toimii lämmönlähteenä ja on lämmitysenergian kannalta tärkeä osa maalämpökaivoa, pohjavesi väliaineena ja pohjaveden virtaukset parantavat lämmönsiirtoa kalliossa keruupiiriin. Porauskustannuksia ajatellen on usein suositeltavaa tarkistaa mahdollisen maapeitteen paksuus, tämä on usein haastavaa etukäteen, mutta uudiskohteissa ja joissain tapauksissa myös saneerauskohteissa pohjatutkimuksilla saadaan selville kohteen maapeitteen paksuus. Mikäli pohjatutkimuksia ei olla suoritettu voidaan esimerkiksi GTK:n Maankamara palvelusta tarkastaa suuntaa antavasti alueen maapeitteen paksuus. (9.)

## 2.1 Kaivojen mitoittaminen

Maalämpöjärjestelmän mitoituksen ensimmäinen ja perustava vaihe on selvittää kohteen lämmityksentarve. Lämmitystarpeeseen vaikuttavat niin kohteen sijainti, lämmityksen talotekniset ominaisuudet ja ikä, minkä vaikutus usein näkyy eristyksen tasossa ja lämmitysverkostojen kunnossa sekä suunnitelluissa lämpötilatasoissa. Uudiskohteissa usein ominaiskulutus on huomattavasti pienempi pinta-alan nähden, kuin saneerauskohteissa. Talotekniikan kehityksestä johtuen kiinteistöjen energiatehokkuus on parantunut, mutta esimerkiksi käyttövedenkulutus vaikuttaa varsinkin uusissa ja isoissa asuinkiinteistöissä merkittävästi kokonaislämmitysenergian ja -tehon tarpeeseen.

Kohteen lämmitysenergian ja -tehon tarpeen selvityksen kautta kohteelle valitaan sopiva lämpöpumppu. Lämpöpumppujen tuotto mitoitetaan energia- tai tehopeusteisesti. Nykyään suurin osa kohteista mitoitetaan niin, että vuotuinen lämmitysenergia saadaan tuotettua lähes täysin lämpöpumpuilla. Lämmöntuotto vaatii kylmimpinä ja piikkitehon aikoina usein lisälämmitystä. Investoinnin ja kustannuksien kannalta on järkevää mitoittaa järjestelmä osatehoiseksi, sillä huipputehonteja ei usein tule vuoden aikana niin paljon, että olisi esimerkiksi järkevää mitoittaa lisää lämpöpumppuja tai porata kaivoja, jotta huipputehontarve saadaan katettua, joten järjestelmä on usein mitoitettu n. 60–85 % tehopeitolla, kiinteistön kokonaislämmitystehon tarpeeseen nähden. Vaaditussa lämmitystehontarpeessa hyödynnetään mitoittavaa ulkolämpötilaa. Mitoittava ulkolämpötila on ympäristöministeriön asetuksella määrätty lämpötila, mikä kertoo kohteen sijainnin

alimman lämpötilan, milloin kohteen lämmitystehontarve on huipussaan. Ku-  
vassa 3 esitetyssä säävyöhyke kartassa 1. vyöhykkeen mitoittava ulkolämpötila  
on  $-26^{\circ}\text{C}$ , 2. vyöhykkeen  $-29^{\circ}\text{C}$ , 3. vyöhykkeen  $-32^{\circ}\text{C}$  ja 4. vyöhykkeen  $-38^{\circ}\text{C}$ .  
Mitoittavan ulkolämpötilan mukaan lämmityksen huipputehon mitoitus eroaa siis  
huomattavasti sen välillä, sijaitseeko kohde Helsingissä vai Rovaniemellä.



Kuva 3. Ympäristöministeriön asetuksen mukaiset säävyöhykkeet (10.)

Mitoituksen kattavuus vaikuttaa järjestelmän kannattavuuteen sen toiminnan li-  
säksi. Yhä kasvavassa määrin mitoitusta ohjaa lämmitysenergiamarkkinoiden

hintakehitykset ja kustannusrakenteet. Lisälämmityksen tarvetta pyritään minimoimaan kannattavuuden näkökulmasta, sillä vaikka vuotuinen energiantarve saataisiinkin tuotettua lähes täysin lämpöpumpulla ja näin ollen lämmitysenergian näkökulmasta kaikki kustannukset lämmityksestä syntyisivät ainoastaan pumpun sähkönkulutuksesta. Suuri energianpeitto aste voi kylmimpinä aikoina kuitenkin vaatia lisälämmitystä mitoittavan huipputehon johdosta ja jos tulevaisuudessa lisälämmityksen kustannusrakenne suosisi yhä kasvavassa määrin tehoerusteista hinnoittelua, voi matala tehonpeitto vaikuttaa järjestelmän takaisinmaksu-aikaan. (9.)

Taulukossa 1 on esitetty kuvitteellinen tilanne kohteesta, missä vuotuinen kokonaislämmitysenergia on 520 MWh/a ja huipputehontarve 210 kW, huipunkäyttö ajaksi tulee 2476 h, mikä asettuu tyypilliseen huipunkäyttöaikaan kiinteistössä. Taulukossa on kuvattu eri suuruisilla lämpöpumpputehoilla järjestelmän energia- ja tehopeittoa kohteessa.

Taulukko 1. Esimerkki energiapeiton ja tehopeiton välisestä suhteesta mitoituksessa.

<b>Lämpöpumpputeho</b>	<b>Energiapeitto</b>	<b>Tehopeitto</b>
180 kW	99,3 %	87,5 %
150 kW	97,6 %	71,4 %
120 kW	94,2 %	57,1 %
80 kW	83 %	38,1 %

Lämpöpumpun koon perusteella mitoitetaan kaivokentän vaaditut aktiivimetrit. Usein pienemmissä järjestelmissä tehdään suoraan lämpöpumpun kautta vakioiduilla arvoilla mitoitus vaadituille metreille. Mikäli kuitenkin järjestelmä sisältää runsaasti metrejä ja kaivomäärä kasvaa suureksi, on erittäin suositeltavaa tutkia

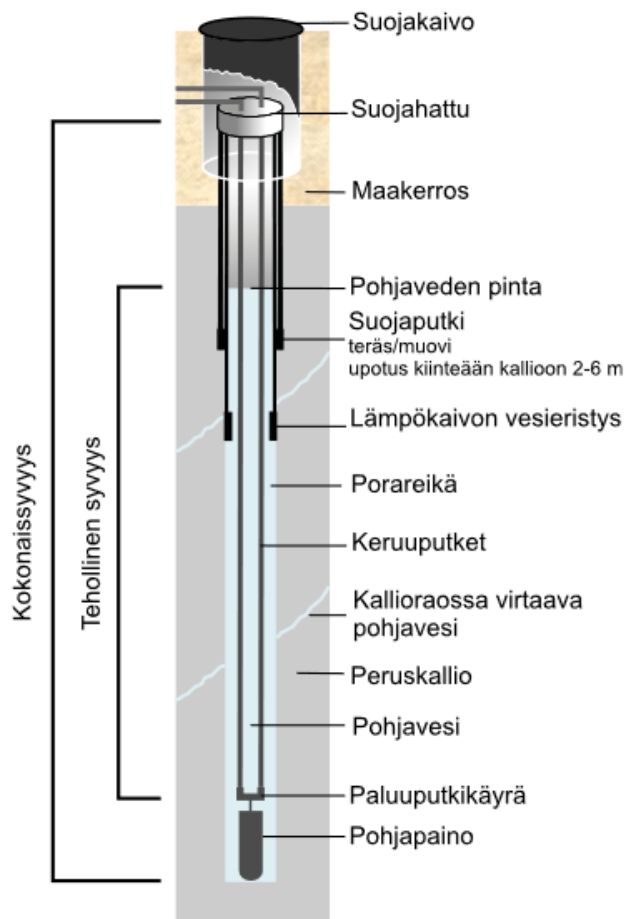
myös kohteen tontin kallioperän ominaisuuksia ennen metrimitoittamista. Tällaisissa järjestelmissä mitoitus voi olla alimitoitettu, mikäli kallioperän ominaisuudet eivät kykenee vastaamaan tarvittavaan lämmöntuottoon. Alimitoituksen johdosta joudutaan hyödyntämään kohteessa enemmän lisälämmönlähdettä, jotta lämmitystarve saadaan täytettyä. Näissä tapauksissa tilanne näkyy vuotuisessa kustannussäästöissä ja vaikuttaa näin ollen järjestelmän takaisinmaksuaikaan.

Moderneissa rakennuksissa on usein koneellinen ilmanvaihto. Jos kohteessa on hyödynnetty koneellista ilmanvaihtoa sekä tulo- että poistoilmassa, on usein LTO-järjestelmä toteutettu IV-koneen sisällä. Tällaisissa kohteissa voidaan hyödyntää jäteilma- tai poistoilmalämpöpumppua. Mikäli kohteessa on pelkästään poistoilma toteutettu koneellisesti, voidaan kohteessa hyödyntää lämmöntalteenottoa kytkemällä se osaksi maalämpöjärjestelmän keruupiiriä. Hyvin rakennetulla LTO-pumppujärjestelmällä voidaan vaikuttaa kaivon kuormitukseen, ja pienentää kaivosta otettavaa energiamäärää.

## 2.2 Energiakaivojärjestelmän rakenne

### 2.2.1 Kaivo

Energiakaivon mitoitukseen vaikuttavat kallioperän ominaisuudet ja kohteen toimintatapa sekä lämmitysenergian ja -tehon tarve. Kaivon syvyyttä mitoitetaan kWh/m- tai W/m-arvoilla. Nämä arvot määrittävät sen kuinka paljon yhdeltä aktiivimetriltä ollaan kaivosta ottamassa energiaa tai tehoa. Kallion ominaisuudet vaikuttavat näiden lukujen suuruuteen. Mikäli arvoissa käytetään liian suuria lukuja, on olemassa riski, että kaivojen kuorma kasvaa niin suureksi, että niiden tuotto-kyky heikkenee tai pahimmassa tapauksessa kaivoon palaava liuos kylmenee niin, että neste lämpöpumpun höyrystimellä tai kaivon lämpötilan laskiessa pohjavesi kaivon ympärillä jäätyy. Kuvassa 4 havainnollistetaan energiakaivojen rakennetta ja komponentteja.



Kuva 4. Energiakaivon osat ja tasot (11.)

Kaivon kykyyn tuottaa lämmitysenergiaa vaikuttaa kallioperän lämmönjohtavuus, mitä kuvataan yksiköllä  $W/mk$ . Kallioperän lämmönjohtavuus voidaan todentaa todellisessa tilanteessa Thermal Response Test -mittauksella (TRT), eli kallion termisellä vastetestillä. TRT-mittaus suoritetaan porattuun kaivoon ja testin tarkoituksena on tutkia sähkövastuksen avulla kallioperän lämpövastusta ja lämmönjohtavuutta. Usein isoimmista kohteista on myös vaatimuksena TRT-testin suorittaminen, jotta kaivojen mitoituksessa vältetään mahdollisilta kaivon toimintaan vaikuttavilta vakaviltakin virheiltä. TRT-testissä kallioperän häiriötön lämmönjohtavuus mitataan ennen sähkövastuksella toteutettavaa lämmitystä. Tällä menetelmällä saadaan ymmärrys siitä, miten hyvin kallioperä maalämpöjärjestelmän toiminnan aikana kykenee siirtämään lämpöä kaivoissa kollektorien sisällä kiertävään liuokseen.

Yleisesti porattaessa tehdään halkaisijaltaan 115 mm:ä kokoisia kaivoja, kun käytetään 40 ja 45 mm:ä halkaisijaltaan olevia kollektoreja. 50 mm:n kollektori mahtuu 115 mm:n kaivoon, mutta on suositeltavaa hyödyntää suurempaa kaivokokoja, jotta putki mahtuu asettumaan kaivoon eikä asennus vaiheessa tuota hankaluuksia. Kaivossa on myös huomioitava mahdollinen lämpösilta meno- ja paluuputkien välillä, joka tuottaa häiriötä lämmönkeruuprosessiin. Tässä ilmiössä kollektorit luovuttavat lämpöä ristiin, mikäli kollektorin asennusväli kaivossa on liian pieni. Paluukanavasta pääsee lämpöä menokanavaan, jolloin lämpöpumpulle nousevan liuoksen lämpötila voi laskea. Tätä ilmiötä ajatellen on myös hyvä, että kollektorit asennetaan tarpeeksi etäälle toisiinsa nähden.

Kun maalämpöjärjestelmää hyödynnetään lämmityskäytössä, kallioperän lämpötila laskee. Kallioperän jäähtymisen hallintaan vaikuttavat nimenomaan kaivojärjestelmän mitoitus. Usean kaivon kohteissa mitoituksen lisäksi on syytä huomioida kaivojen vaikutus toisiinsa. Tästä syystä on tärkeää sijoittaa kaivot kohteeseen niin, että niiden vaikutus toisiinsa lämmityskauden aikana olisi mahdollisimman vähäistä. Nykyisin etenkin suurissa kohteissa suositaan kaivojen hyödyntämistä myös jäähdytys ja erilaisten prosessilauhteiden tai hukkalämpöjen varastoinnissa. Siirtämällä kohteiden hukka- tai lauhdelämpöjä kaivoihin, voidaan tällä parantaa kaivojen käytettävyyttä, jolloin sidottava lämpö siirtyy kallioperään ja järjestelmän energiatase paranee. Kaivonkuormitukseen vaikuttaa myös onko kohteen tyyppi asuinrakennus, toimistotila, liikerakennus tai koulu. Esimerkiksi koulun jäähdytys on usein huomattavasti pienempi kuin asuinrakennuksen tai toimiston johtuen kesäajan alhaisesta käyttöasteesta. Julkisissa- tai liikerakennuksissa voi taas usein olla huomattavan paljonkin hyödynnettäviä hukkalämpöjä tai jäähdytystä. Yleisissä rakennuksissa on kuitenkin eroja käyttötavan mukaan, esimerkiksi toimistorakennuksissa sisäiset lämpökuormat kuten valaistus, elektroniikka lisäävät jäähdytyksen tarvetta. Päinvastaisesti esimerkiksi koulu tai päiväkotikohteissa usein jäähdytystarve on huomattavasti pienempi, koska käyttöaste jäähdytyskauden aikana on pientä.



## 2.2.2 Porausturvallisuus

Porauksessa käytetään erittäin korkeita paineita paineilmakompressoreissa ja näin ollen työturvallisuuteen on syytä kiinnittää huomiota sekä porauskaluston lähistöllä työskentelyn ja liikenteen näkökulmasta. Porareikien alkupäiden etäisyys toisistaan on syytä olla vähintään 5–10 m turvallisuussyistä. Tällä voidaan vähentää merkittävästi kaivojen yhdistymisen riskiä. Kaivojen yhdistyminen on sekä työturvallisuusriski että järjestelmän toiminnan kannalta erittäin huono tilanne. Kaivojen yhdistymistä voidaan välttää sijoittamalla kaivoja tontille aiemmin mainittuja etäisyyksiä noudattaen ja suunnittelemalla kenttä, niin että kallistettujen kaivojen päät kohtaisivat toisiaan liian lähellä. Suora työturvallisuusriski voisi syntyä siitä, että kaivojen yhdistymisen johdosta kaivoon tuotettu paine voi purkautua hallitsemattomasti yhdistyneen kaivon yläpäästä. Kaivokentän ja järjestelmän toiminnan kannalta lämmönsiirto kyky heikkenee, kun kaksi kaivoa kohtaavat toisensa ja mahdollisesti syövät toistensa lämmönsiirtokykyä kalliope-  
rässä.

## 2.2.3 Kollektorit

Kollektori on muovista valmistettu maalämpökaivoon asennettava putki, jonka tehtävä on ohjata maapiiriliuoksen virtausta kaivossa. Yleisin nykyään käytetty malli on U-putki. Kollektoreja on kolmea markkinoilla erikokoisia ja yleisesti käytetyt kollektorit ovat halkaisijaltaan 40,45 ja 50 mm SDR17 PN10. Kollektorikoolla on merkittävä rooli lämmönsiirrossa, koska sillä voidaan tuoda merkittäviä kustannussäästöjä sekä optimoida järjestelmän toimintaa. Kuvassa 5 tyypillinen pohjapainolla varustettu kollektori pakattuna.



Kuva 5. Muovitechin valmistama turbokollektori. (11.)

Virtauksella on suuri rooli järjestelmässä, virtaus muodostaa kaivokenttään painehäviötä ja vaikuttaa virtaustyyppiin. Oikean kokoisella kollektorilla voidaan vaikuttaa painehäviöön niin, että pumppauskustannukset eivät nouse liiallisen painehäviön takia. Toisaalta virtaustyyppi on hyödyllistä pitää laminaarisen rajan yläpuolella, jotta lämmönsiirto maapiiriliuokseen onnistuu optimaalisesti. Virtaustyyppiin vaikuttaa virtausnopeus ja väliaineen ominaisuudet sekä putken ominaisuudet, näiden arvojen pohjalta voidaan laskea Reynoldsin luku, mikä havainnoi virtaustyyppiä.

Reynoldsin luku

$$Re = \frac{Dv\rho}{\mu} \quad (1)$$

jossa  $D$  on putken halkaisija,  $v$  on väliaineen keskimääräinen virtausnopeus,  $\rho$  on fluidin tiheys,  $\mu$  on fluidin dynaaminen viskositeetti.

Virtaukselle on saatava Reynoldsin luku, mikä on yli 2300 jotta virtaus ei olisi laminaarista, mutta toisaalta virtausnopeudet pysyvät siirtymäalueella vielä tarpeeksi matalina järjestelmän kiertovesipumpuille. Laminaarisella virtauksella lämmönsiirto on heikompaa.

Kollektoreille on asetettu teoreettiset kollektorikohtaiset optimivirtaamat. 40 mm:n kollektorin virtaus on yleisesti sopiva alueella 0,43–0,55 l/s, 45 mm:n kollektorin virtaus on yleisesti sopiva alueella 0,45–0,65 l/s ja 50 mm:n kollektorille 0,6–0,8 l/s virtaus on optimaalinen. Näillä alueilla virtaus pysyy laminaarisenrajan yläpuolella, mutta toisaalta painehäviö ei nouse liian korkeaksi. Virtausarvoja täytyy kuitenkin aina tarkastella tapauskohtaisesti, mutta usein virtauslukemat asettuvat kuitenkin optimialueelle. Lämpöpumppujen valinnalla on myös merkitystä, sillä niiden sisäisten kiertovesipumppujen suorituskyvyissä on eroja.

Liuospiirin virtaamaan pystytään vaikuttamaan liuospuolen lämpötilaerolla. Markkinoilla olevissa pumpuissa liuospuolen lämpötila on usein asetettavissa, joko 3–4 K välillä, maksimissaan lämpötilaeroksi voidaan laittaa 5 K. Lämpötilaeron vaikutus virtaamaan voidaan johtaa suoraan lämmitystehon kaavasta.

$$Q = c\dot{m}dT \quad (2)$$

jossa  $Q$  on lämpöteho,  $c$  aineen ominaislämpökapasiteetti,  $\dot{m}$  virtaavan aineen ominaislämpökapasiteetti ja  $dT$  lämpötilaero.

Suurempi lämpötilaero on lämpöpumpun kannalta huonompi, sillä lämpötilatasot laskevat lämpöpumpun höyrystimelle, jolloin COP-arvo huononee. Kaivon osalta myös kollektoriputkien välinen lämpösilta kasvaa liian suurella lämpötilaerolla.

#### 2.2.4 Lämpöpumput

Kaivossa käytetään suljettua kiertoa, jossa lämmönsiirtoaineena toimiva usein etanolista valmistettu keruuneste kiertää lämpöpumpun ja kaivon läpi. Etanolia käytetään keruunesteessä jäätymisenestona, glykoli- tai metanoli pohjaiset liuok-

set ovat kiellettyjä myrkyllisyyden johdosta. Liuos sitoo kallioperän lämpöä ja kiertovesipumpun avulla nousee lämpöpumpun höyrystimelle, missä ensiöpuolella liuoksen kuljettama lämpöenergia maasta siirtyy toisiopuolella höyrystyvään kylmäaineeseen. Maalämpöpumppujen liuospumppujen nostokyky vaihtelee merkikohtaisesti ja tämän vuoksi virtaamat on usein mietittävä tapauskohtaisesti, tai lämpöpumpun eteen on asennettava liuospuolelle ulkoinen kiertovesipumppu. Ulkoinen kiertovesipumppu kasvattaa kuitenkin kustannuksia, joten useissa tilanteissa on arvioitava, onko kannattavampi kasvattaa kollektorikokoa lisäpumpun sijasta. Usein lämpöpumppujen sisäisiin kiertovesipumppuihin ei pystytä vaikuttamaan tuotantomalleissa. Kuvassa 6 on asennettuna omakotitalokohteen lämpöpumppu, pientalokohteissa lämpöpumppujen tehot ovat usein alle 20 kW.



Kuva 6. Maalämpöpumppu asennettuna pientalokohteeseen. (12.)

Moderneissa lämpöpumpuissa hyötysuhteet ovat parantuneet. Hyötysuhdetta kuvataan lämpöpumpun työkierron tehokkuutta kuvaavalla COP-arvolla, kompressorin tekemän työn ja lämmönlähteestä saatavan energian suhteena. Kiristyvien GWP arvomääräysten johdosta uusien kylmäaineiden ominaisuudet ovat heikentyneet, mutta uusia aineita tutkitaan ja pyritään löytämään väistyvien kylmäaineiden tilalle yhtä toimivia ja pienemmällä GWP arvolla varustettuja vaihtoehtoja. Yksinkertaistettuna COP arvo osoittaa sen kuinka paljon kW lämpötehoa saadaan tuotettua yhdellä kilowatilla kompressorin työtä. (13.)

COP-luku

$$COP = \frac{Q}{W} \quad (3)$$

jossa,  $Q$  on lämmönlähteestä ja sähköstä saatava kokonaislämpöenergia,  $W$  on vaadittu työ (sähköteho)

COP-arvoon vaikuttavat useat tekijät kuten lämmönlähteen lämpötila, kylmäaineen ominaisuudet sitoa itseensä energiaa, kompressorin energiatehokkuus ja talotekniset ratkaisut lämmitysjärjestelmässä. Taloteknisesti esimerkiksi lämmitysverkoston tyyppi, onko kohteessa lattia- vai patteriverkosto, lattiaverkoston lämpötilatasot ovat alhaisemmat kuin patteri- tai ilmanvaihtoverkoston, jolloin COP paranee, koska lämpöpumpun ei tarvitse tuottaa korkea lämpöistä lämmitysvettä verkostoon. Ulkoilmaa lämmönlähteenä käyttävien pumppujen COP muuttuu ulkoilman lämpötilan vaihdellessa, kun taas maalämmössä COP pysyy huomattavasti tasaisempana oikein mitoitetussa kohteessa.

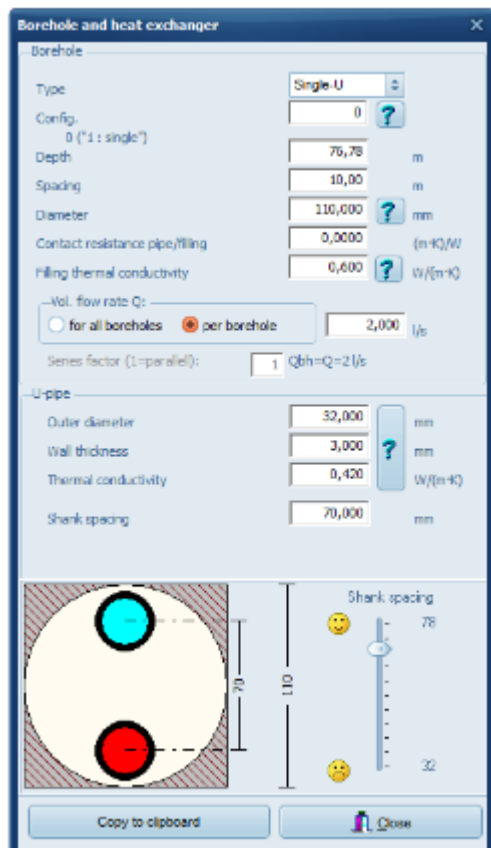
### 3 Maalämpökaivojen simulointi

Simuloinnin tarkoitus on kyetä mallintamaan maalämpökaivokenttien toimintaa vuositasolla. Simuloinnin parametrit, kuten kallioperän lämmönjohtavuudesta voidaan hankkia alueelle poratusta testikaivosta TRT-mittauksen avulla. Usein toteutus vaiheessa testikaivo hyödynnetään kytkemällä se lopulliseen kaivokenttään. Näiden parametrien avulla pystytään mallintamaan kaivokentän lämmöntuottokykyä pidemmällä aikavälillä. Usein tarkastelujaksoksi valitaan 25–50

vuotta, mutta simulointia voidaan toteuttaa esimerkiksi EED-ohjelmistolla pidemmällekin aikavälille, tarkastelujakson simuloinnista voidaan havaita, miten kallioperä jäähtyy vuosien aikana, kun siitä sidotaan lämpöä. Simuloinnin avulla voidaan tutkia kaivokentän jäähtymistä tarkastelujaksolla ja tämän perusteella voidaan optimoida kaivomäärä ja syvyydet oikeiksi. Useampien kaivojen järjestelmissä simuloinnin avulla voidaan myös kaivokentän muotoa eli matriisia optimoida, jolloin kaivojen vaikutusta toisiinsa voidaan hillitä. Liian tiheiksi tehdyissä kaivokentissä ongelmana on kaivojen vaikutus toisiinsa. Suurilla tehontarpeilla kaivokenttä voi jäähtyä voimakkaammin tiiviimmässä matriisissa, kun kaivot imevät toisistaan lämpöä.

Simulointi antaa tukea mitoitusprosessille niin, että kohteen kulutustietojen ja lämpöpumppujen ominaisuuksien lisäksi, maaperän kykyä tuottaa haluttua kulumäärää vastaavia tuottoja voidaan todentaa. Etenkin isoissa kohteissa TRT-mittaukset on poikkeuksetta suoritettava, jotta mitoitus vastaisi todellisia mahdollisuuksia tuottaa lämpöä. TRT-mittauksesta saadaan eniten hyötyä, kun parametrejä hyödynnetään simulointiin. Usein lämpöpumppujen mitoitusohjelmissakin löytyy lämmönjohtavuusparametrit, joissa käytetään lämmönjohtavuutta välillä 2,5–3 W/mK, mutta simuloinnin tasoista tarkkaa tietoa ne eivät kykene tuottamaan pelkän vakioidun lämmönjohtavuus arvon avulla. Todellinen kohteen kallioperän lämmönjohtavuus saadaan varmistettua ainoastaan TRT-mittauksen avulla, mutta yleisesti on olemassa suuntaa antavat arvot aiempien tutkimusten johdosta kallioperässä esiintyvien kivilajien lämmönjohtavuudelle.

EED-ohjelmiston simulointiominaisuudet ovat hyvin kattavat, sillä se on suunniteltu nimenomaan energiakaivojen simuloimiseen. Ohjelmistossa voidaan mallintaa todellista kaivoa huomioiden sen rakennetta ja kaivo-osien lämmönjohtavuuksia sekä lämpövastuksia. Kuva 7 EED-sovelluksen kaivomallinnusikkuna, missä syötetään simulointiin vaikuttavat kaivon arvot.



Kuva 7. EED-ohjelmiston kaivo- ja kollektorimallinnusikkuna

Kaivokenttäsimuloinnissa ohjelmiston avulla voidaan vaikuttaa esimerkiksi tehokkaaseen kaivojen sijoitteluun siten, että simulointi antaa suosituksen kaivokonfiguraatiolle eli kaivokentän tehokkaalle muodolle. Todellisuudessa konfiguraatiota on usein hieman sovellettava tontin tuomien rajoitusten takia, koska kentän muodonkaan avulla ei voida olla huomioimatta kaivojen keskinäisiä etäisyyksiä toisistaan. Vinoporausten avulla voidaan hyödyntää kallioperää tehokkaasti myös pienemmissä tonteissa, ja yleisesti vinoporausta kannattaa hyödyntää myös väljemmässä kentässä, näin saadaan edesautettua kentän tehokkuutta, koska kaivojen keskinäiset vaikutusalueet etääntyvät sen avulla.

#### 4 TRNSYS-ohjelmisto

TRNSYS-ohjelmisto on simulointiohjelmisto, joka on kehitetty järjestelmien aikataason simulointiin. Ohjelmisto pohjaa modulaarisiin komponentteihin, joita löytyy

ohjelmiston omasta kirjastosta. TRNSYS-ohjelmistoa käytetään yleisesti esimerkiksi aurinkolämpö sekä -paneeli, LVI-järjestelmien ja uusiutuvaa energiaa hyödyntävien järjestelmien simuloinnissa. TRNSYS-ohjelmiston toiminta perustuu toisiinsa yhdistettävien simulointikomponenttien käyttöön. Kirjastoista valittavissa komponenteissa on sisällään selitetyt arvot, joita muokkaamalla käyttäjä pysty vaikuttamaan siihen, mitä laitetta komponentti simuloi osana kokonaisuutta. Näiden komponenttien avulla käyttäjä kykenee räätälöimään järjestelmän, missä simuloidaan erilaisten laitteiden yhdistelmiä. Komponenttien yhdistämisessä on kuitenkin lainalaisuuksia, mihin TRNSYS-ohjelmiston simulointi perustuu. TRNSYS-ohjelmisto laskee iteroimalla halutulla aikavälillä syötettävien arvojen ja parametrien tuottamia tuloksia. Iteroinnille käyttäjä asettaa toleranssi alueet, mikä katkaisee simuloinnin arvojen konvergoituttua käyttäjän valitsemaalle aikavälille.

Iterointi on matemaattinen menetelmä, mikä perustuu saman laskutoimituksen tai funktion toistamiseen. Iteroinnin avulla voidaan löytää tarkempi tai haluttu arvo toiston kautta. Menetelmä käsittää myös matemaattisen toistamisen niin, että lopputuloksena on konvergoituminen. (14.)

Esimerkiksi yksinkertaisessa maalämpöjärjestelmässä voidaan hyödyntää säädata, lämpökaivo ja lämpöpumppu -komponentteja, joista muodostetaan tulostettavaksi arvoiksi energia- ja lämpötila muutoksia sisältävät kuvaajat.

#### Energiakaivo (Type577a)

Type577a on komponentti mikä mallintaa U-putkikollektoria hyödyntävää energiakaivoa. Komponentin laskennan yhtälöt ovat vuonna 1989 julkaistussa "The Duct Ground Heat Storage Model For TRNSYS Used For The Simulation Heat, Exchanger Piles" -julkaisussa. Komponentti mallintaa kokonaisuutena kaivoa, kollektoria ja maa- sekä kallioperää. Kaivon mallinnuksessa käyttäjä voi syöttää parametrit kaivon tilavuudelle, -syvyydelle, kaivojen määrälle ja säteen kaivon koolle. U-kollektorille voidaan syöttää parametrit putken ulko- ja sisähalkaisijalle sekä kollektoriputken paluu- ja menolinjojen etäisyydelle toisistaan. Kallioperän-, väliaineen ja kollektoriputken parametrit voidaan syöttää muodossa W/mK.



Kaivokomponentin parametrit TRNSYS-ohjelmistossa yhtenevät osin EED-ohjelmiston kanssa, mutta joillekin EED parametreille ei löydy vastinetta TRNSYS-ohjelmiston kaivokomponentista. Komponentissa voidaan mallintaa montaa kaivoa ja sarjaan kytkettäviä kaivoja. Kaivokenttien simuloinnissa ei pystytä kuitenkaan analysoimaan kaivokentän konfiguraatiota eli muotoa, niin kuin EED-ohjelmistossa. Kaivokentän konfiguraatio vaikutus kaivokentän käyttöikään on merkittävä tekijä varsinkin useita kaivoja sisältävissä projekteissa. Maapiiriliuoksen ominaisuuksissa, liuoksen tiheys ja ominaislämpökapasiteetti löytyvät parametriuettelosta. EED-sovelluksessa myös maapiiriliuoksen viskositeetti voidaan asettaa sekä jäätymispiste. Kuukausittaista huippukuormaa ei voi asettaa, kuten EED:ssä.

### Lämpöpumppu (Type927)

Type927 komponentti mallintaa maalämpöpumppua (vesi-vesi lämpöpumppu). Malli on yksitasoinen lämpöpumppu, missä ensiöpiirin nestekierto (etanoliliuos) voidaan laittaa kiertämään sekä jäädytys- että lämmitys suuntaan. TRNSYS tarjoaa automaatio mallinnuksen kytkinkomponentilla, millä käyttäjä pystyy valitsemaan lämpöpumpun toimintaa haluamallaan tavalla. Tiedostoon syötetään Load- ja Source arvot lämpötiloille. Load -arvolla kuvataan toisiopuolen lämpötiloja ja Source -arvolla lämpökaivoista saatavia lämpötiloja.

Type927 komponentti voi mallintaa myös useampaa sarjaan kytkettyä pumppua, verraten kaivokomponentin mallinnus mahdollisuus sarjaan kytketyille useammalle kaivoille. Tässä kuitenkin rajoituksena on se, että parametrien on oltava samat kaikissa pumpuissa. Komponenttiin voidaan myös tuoda todellisen pumpun tiedot.

### Säädata (Type99)

Type99 komponentin avulla käyttäjä voi hyödyntää omia säädatatiedostoja, mitkä tuodaan .TXT tiedostomuodossa komponenttiin. TRNSYS sisältää myös valmiita kansainvälisiä säädatoja hyödyntäviä säädatakomponentteja kuten TMY, -2 ja -3, IWEK ja EPW formaattien dataja.

## Rakennus (Type56)

Type56 komponentin on tarkoitus toimia rakennuksen mallintamiseen käytettävänä komponenttina. Komponentti pyrkii mallintamaan rakennuksen lämmönsiirtoa. Energiankulutuksen avulla komponentti voidaan asettaa tarkastelemaan rakennuksen lämmitys ja jäähdytystarvetta. Komponentille on tehty oma TRNSYKsen ohjelma millä voidaan asettaa parametrit rakennukselle.

TRNBuild -ohjelmalla kyetään mallintamaan rakennusta ja ohjelma tukee esimerkiksi 3d-mallia rakennuksesta. Yleiset parametrit käsittävät ilmanominaisuuksia ja rakennuksen sisäisiä rakenteellisia lämpövastuksia ja lämmönjohtavuuksia, kuten esimerkiksi lattian ja pintojen lämmönsiirtoa. Lattian rakenteet sekä ikkunat pystytään laskemaan osissa ja mikäli lähtötiedot sisältävät tietoja seinien eristysten, tasojen tai ikkunoiden ominaisuuksista voidaan ne ottaa huomioon rakennusmallia tehdessä.

## Datan lukija (Type 9)

TRNSYKsessä on myös komponentti, mikä tulkitsee pelkästään ulkoisista tiedostoista tuotua dataa. Tämä komponentti sisältä parametrit ainoastaan sille, miten data luetaan tiedostosta ja kuinka se syötetään linkitettyinä olevien komponenttien välillä. Komponentti kykenee tulkitsemaan tekstitiedostoja, missä esitetään muuttuvat arvot, tasaisin aikavälein. Komponentti on toiminnaltaan siis melko samankaltainen kuin Type99. Energiakaivojen simuloinnissa tämä komponentti voisi soveltua kulutustietojen lisäämisessä simulointiin.

Tuntikohtainen data voidaan siirtää tekstimuotoisen tiedoston avulla simulaatioon. Usein todellisista kohteista saadaan lähtötiedot mitattuina arvoina vuotuisesta energiankulutuksesta nimenomaan tunti- tai kuukausikohtaisena datana. Tämä koskee tietysti vain saneerauskohteita ja uudiskohteissa rakennuksen tarkka mallintaminen onkin ainoa keino saada arvot lämmityksen/jäähdytyksen tarpeesta. Uudiskohteissa suoritetaan mallinuksia LVI-suunnittelijoiden toimesta ja yleisesti lämmönteho ja energiatarpeet mitoitetaan esimerkiksi IDA-ICE ohjelmistolla, missä käytetään Type56 komponentissa käytettäviä arvoja. IDA-ICE on simulointiohjelmisto, mitä käytetään laajalti talotekniikan alalla. Ohjelmiston

avulla voidaan mallintaa rakennusten energiatehokkuuksia ja tarkastella muun muassa vuotuista lämmitysenergiankulutusta.

## 5 Simulointi TRNSYksellä

### 5.1 TRNSYS-ohjelmiston käyttöä aikaisemmissa julkaisuissa

TRNSYS-ohjelmiston käytöstä maalämpöpumppujärjestelmien simuloinnissa löytyy melko hajanaisesti julkaisuja, mutta maailmanlaajuisesti löytyy julkaisuja, missä yksittäisten, esimerkiksi julkisrakennusten maalämpöjärjestelmien simulointia on hyödynnetty. Esimerkiksi MDPI:ssä julkaistussa Numerical Simulation Modeling of a GSHP and WSHP system for an Office Building in the Hot Summer and Cold Winter Region of China: A Case Study in Suzhou -artikkelissa verrataan vesistölämpöpumpun ja maalämpöpumpun toimintaa ja edellytyksiä tuottaa lämpöä ja jäähdytystä toimistorakennukseen Suzhoun alueella Kiinassa. Simuloinnissa tutkittiin molempien järjestelmien COP-arvoja ja simulointiaika on asetettu 20 vuoteen, COP-arvon avulla voitiin myös tutkia lämpöpumppujen sähkönkulutuksia. Projektissa tutkittiin myös lämmönlähteiden lämpötilojen ja lämpökuorien muutoksia vuosien aikana, TRT-mittauksen tuottamien mittaustulosten avustuksella. (15.)

Kansainvälisen rakennussimulointi järjestön Englannin jaostossa on julkaistu artikkeli, TRNSYS-ohjelmiston käytöstä maalämpöjärjestelmän simuloinnissa yliopistorakennuksen lämmityksessä ja jäähdytyksessä. Tässä työssä pyrittiin vertaamaan rakennuksen todellisista kulutuksista mitattuja arvoja simulointien antamiin tuloksiin. Lopputulemana julkaisussa pidettiin TRNSYS-ohjelmiston simulointia yleisesti hyvänä simulaatio-ohjelmistona maalämpöjärjestelmän mallinuksessa. Kuitenkin ongelmana nähtiin se, että rakennuksen yksityiskohtainen mallintaminen pitäisi toteuttaa, jotta rakennuksen todelliset kulutustarpeet pystyttäisiin mallintamaan eri käyttöaikoina. (16.)

Ruotsissa on suoritettu projektikohtaisesti testimallinnuksia TRNSYksellä esimerkiksi diplomityössä ”Practical evaluation of borehole heat exchanger models in TRNSYS”. Tässä työssä pyrittiin selvittämään komponenttien välisiä eroja miten

esimerkiksi kaksi erilaista DTS kaivokomponenttia mallintavat poiketen toisistaan. Tässä työssä ei ole käytetty lämpöpumppukomponenttina Type927, vaan kuormia mitataan lämmönvaihdinkomponenteilla. (17.)

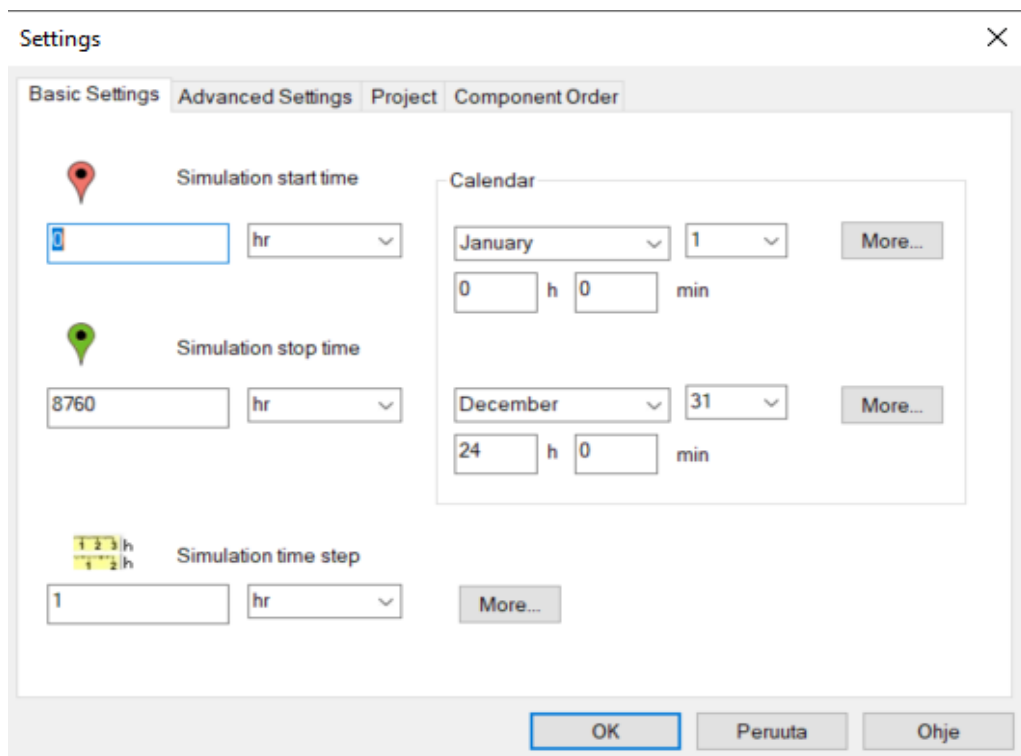
Upsalan Ikeaan tehdyn kaivokentän simulointi on kolmesta projektista pelkistetyimmmin tehty. Tässäkin kohteessa käytettiin myös lämmityksen lisäksi jäähdytyskuormia. Simulointeja tehtiin työssä monella eri kaivokomponentilla, Type557a ja b olivat käytössä yksinkertaisen u-putki rakenteen simuloinnissa, mutta Type246 (mitä ei löydy TRNSYS18 paketista) hyödynnettiin tupla U-putki rakenteissa. Type557a, b ja Type246 ovat TRNSYS-ohjelmiston nimiä komponenteille, jotka kuvaavat energiakaivoja. Työn perusteella voidaan myös huomata, että Type246 komponentissa on kattavammat parametrit, jolloin simuloinnin parametrit vastaavat EED-simulointi ohjelmassa käytettäviä parametrejä paremmin. Liuoksen viskositeetti, kollektorien välitys ja putken pinnankarheus on lisätty tähän komponenttiin. (17.)

Työn tuloksista voidaan todeta mikä kaivokomponentti pystyy parhaiten simuloimaan todellisia arvoja vastaavia tuloksia. Todellisten mittausten ollessa referenssinä työssä todetaan, että 557b on lähimpänä mitattuja arvoja, toiseksi lähimmäksi arvoissa pääsi komponentti 246 ja suurin ero todelliseen arvoon on 557a komponentilla. 557b kaivokomponentti sisältää kaivon lämpövastus parametrin, mitä 557a tai 246 komponentissa ei ole. Tämä parametri on hyödyllinen tilanteissa, missä kaivolle on suoritettu useampi TRT-mittaus, jolloin saadaan hyvät tiedot kaivon lämpövastuksesta useamman toteutuneen mittauksen avulla. Tämän parametrin johdosta 557b on myös lähempänä todellista arvoa kuin kaksi muuta, vaikkakin 246 sisältää enemmän kaivon rakennetta huomioon ottavia parametrejä. (17.)

## 5.2 Simulointimalli

Lämpökaivojärjestelmän rakentaminen aloitetaan TRNSYS-ohjelmistossa tyhjälle simulointi pohjalle, komponentit kannattaa tuoda yksi kerrallaan projektille ja jokaisen komponentin sisältöön kannattaa tutustua yksitellen. Komponentin sisäl-

löstä löytyy listaus sen parametreistä. Parametrien täytössä kannattaa olla huolellinen ja ennen kuin kaikki parametrit on täytetty kannattaa välissä ajaa simulaatiota ja tarkastella ilmeneekö joidenkin parametrien arvoissa ongelmia tai keskinäisiä ristiriitaisuuksia. TRNSYS avaa virhetilanteissa lokitiedoston, mikä kertoo vikaraportissa mahdollisen ei sallitun arvon ja iterointia ei suoriteta. Kuvassa 8. esitettynä simulointiasetustaulukko



The image shows a screenshot of the 'Settings' dialog box in TRNSYS, specifically the 'Basic Settings' tab. The dialog has a title bar with a close button (X) and four tabs: 'Basic Settings', 'Advanced Settings', 'Project', and 'Component Order'. The 'Basic Settings' tab is active and contains the following fields:

- Simulation start time:** A red location pin icon, a text input field containing '0', and a dropdown menu set to 'hr'.
- Simulation stop time:** A green location pin icon, a text input field containing '8760', and a dropdown menu set to 'hr'.
- Simulation time step:** A yellow icon with '1 2 3 h' and '1 2 h', a text input field containing '1', and a dropdown menu set to 'hr'. A 'More...' button is located to the right.
- Calendar:** A sub-dialog box with two rows. The first row shows 'January' (month dropdown), '1' (day dropdown), and a 'More...' button. Below it are input fields for '0' h and '0' min. The second row shows 'December' (month dropdown), '31' (day dropdown), and a 'More...' button. Below it are input fields for '24' h and '0' min.

At the bottom of the dialog are three buttons: 'OK', 'Peruuta', and 'Ohje'.

Kuva 8. Simulointiasetustaulukko, missä asetetaan simuloinnin kesto

Säätiedosto kannattaa ladata ensimmäisenä projektille, ja valita parhaiten sopiva säädatan lukija. Type99 komponenttiin voitiin sijoittaa käyttäjän oma säätiedosto. Ulkoisesti ladattava tiedosto täytyy olla .TXT muodossa kuten aiemmin mainittu. Tämän lisäksi sen pitää olla kirjoitettu oikeassa muodossa esitettynä tekstitiedostossa, jotta lukija kykenee ymmärtämään dataa. Kuvassa 9. tekstimuodossa sääkomponenttiin syötettävät parametrit

```

<userdefined>
<longitude> -24.6 ! East of greenwich: negative
<latitude> 60.1
<gmt> 2 !time shift from GMT, east: positive (hours)
<interval> 1 !Data file time interval between consecutive lines (hours)
<firsttime> 0 !Time corresponding to first data line (hours)
<var> TAMB <col> 1 <interp> 1 <add> 0 <mult> 1 <samp> 1 !...to get j°C
<var> RHUM <col> 2 <interp> 1 <add> 0 <mult> 1 <samp> 1 !...to get rel. hum. in %
<var> WDIR <col> 3 <interp> 1 <add> 0 <mult> 1 <samp> 1 !...to get wind dir. in degr.
<var> WSPEED <col> 4 <interp> 1 <add> 0 <mult> 1 <samp> 1 !...to get wind speed in m/s
<var> IBEAM_H <col> 5 <interp> 0 <add> 0 <mult> 1 <samp> 1 !...to get radiation in W/m2
<var> IDIFF_H <col> 6 <interp> 0 <add> 0 <mult> 1 <samp> 1 !...to get radiation in W/m2
<data>
-3.6 89 290 2 0.00 0
-4.1 89 290 3 0.00 0
-4.7 90 240 3 0.00 0
-5.4 90 240 3 0.00 0
-6.0 90 240 2 0.00 0
-6.5 91 240 2 0.00 0
-7.0 91 240 2 0.00 0
-7.4 92 240 3 0.00 0
-7.5 92 240 3 0.00 0
-7.8 92 240 2 0.00 0
-8.0 93 250 2 0.00 6.7
-8.3 93 250 1 0.00 16.1
-7.5 94 270 2 5.01 41.4
-6.8 94 280 2 12.42 50.8
-6.0 95 300 3 5.84 38.1

```

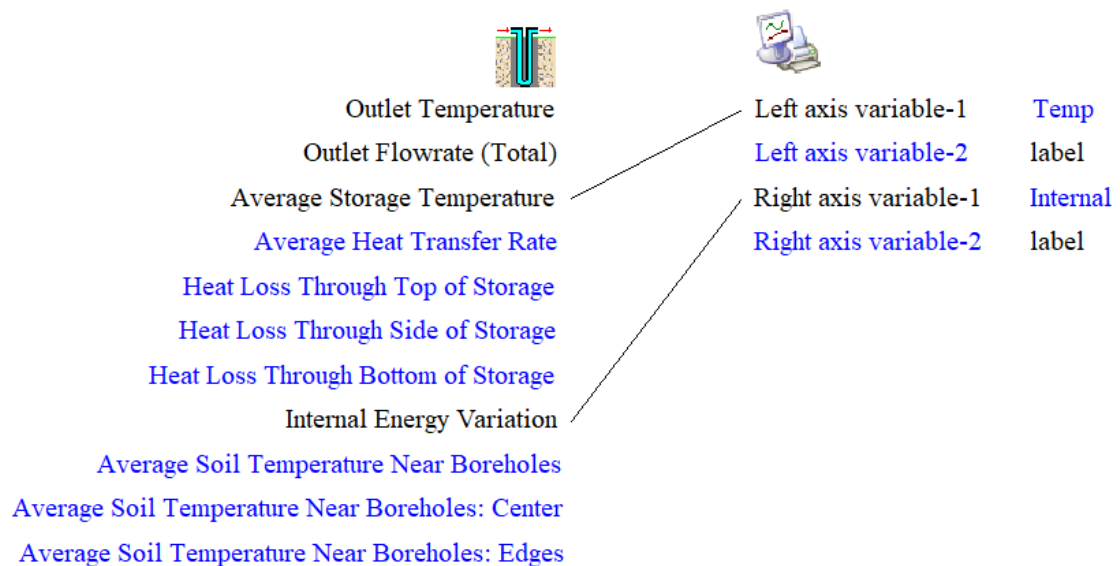
## Kuva 9. Säädata tekstimuotoisessa tiedostossa.

Lämpökaivojärjestelmän kannalta vasemmassa reunassa esitetyt lämpötilatiedot ovat merkittävät, sillä niiden vaikutus voidaan linkittää kaivokomponenttiin. Muu data sää tiedostossa on tarkoitettu aurinkokeräimien ja -paneelien simulointia varten.

Kaivokomponenttiin sijoitetaan ensimmäiset halutut parametrit. Mikäli halutaan simuloida TRT-kaivoa mistä TRT-testi on jo toteutettu, on hyödyllisempää käyttää Type557b kaivokomponenttia, kuten ”Practical evaluation of borehole heat exchanger models in TRNSYS” diplomityössä todetaan. Parametrien täyttämässä ja muuttamisessa on syytä huomioida, että monissa EED-ohjelmiston kanssa yhteisissä kaivoparametreissa on käytetty eri yksiköitä oletuksena ja esimerkiksi komponenttiin asetetaan kaivon- ja kollektoriputken koko säteen pituutena. Komponentti tarvitsee ulko- ja sisähalkaisijan kollektoriputkesta. Esimerkiksi 40mmx2,4 kollektoriputki asetetaan arvoina 20 mm ja 18,8 mm. Lämmönjohtavuudet ovat oletuksena eri yksiköillä kuin EED-ohjelmistossa, mutta yksikkövalikosta löytyy yleisesti käytetty W/mK. Eristyksen osalta, mikäli eristyksen vaikutuksista ei tiedetä arvoja, voidaan eristys jättää huomioimatta asettamalla kohtaan ”Insulation indicator” arvoksi 0. Ohjelmistossa voidaan ottaa myös huomioon termisen oikosulun vaikutus lämmönsiirtoon, mutta mikäli sen vaikutusta ei

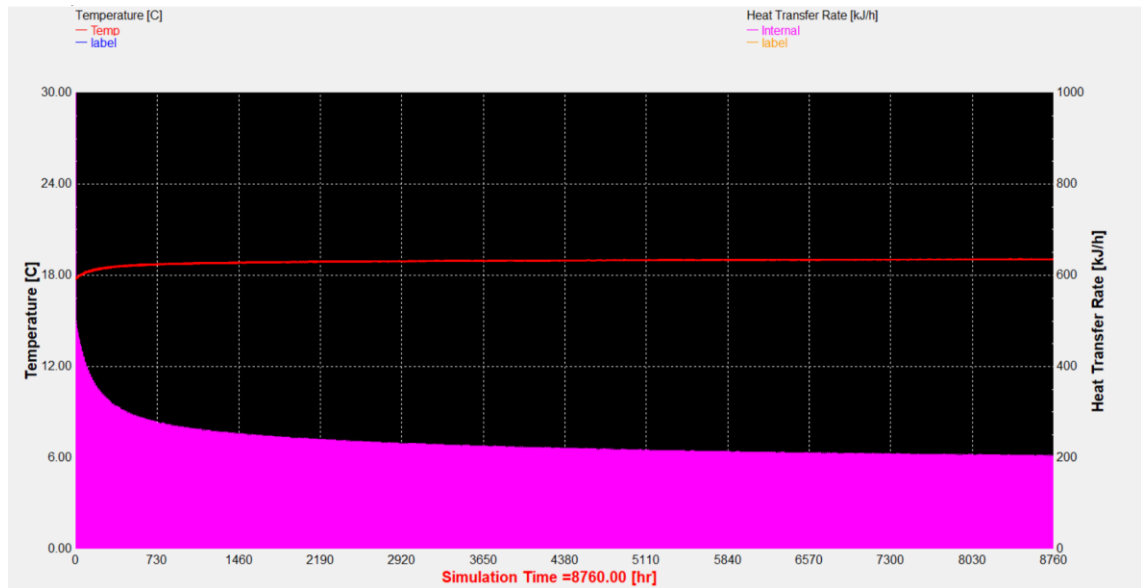
huomioida voidaan senkin kohdalle asettaa arvoksi 0. Esilämmitykselle voidaan myös asettaa arvoja, mikäli ympäröivälle maalle on tiedossa arvot, tämäkin voidaan jättää huomiotta arvolla 0. Viimeiseksi asetetaan maaperän arvot ennen kalliota. Huomiona myös maaperälle on asetettava lämmönjohtavuuden ja lämpökapasiteetin arvot, todellisissa kohteissa lämmönsiirto alkaa vasta kun pohjavedenpinta saavutetaan ja lämmitysenergian kannalta kallioperä on vasta aktiivista kaivosyvyyttä.

Seuraavaksi projektiin kannattaa lisätä komponentti Online plotter (Type65), tämä on työkalu simuloinnin graafista piirtoa varten. Plotteri yhdistetään projektissa samanlailla, kuin muutkin komponentit. Simuloinnin käynnistyessä plotteri piirtää halutun komponentin output -arvon kuvaajan.



Kuva 10. Kaivokomponentti yhdistettynä plotteriin, mikä piirtää kuvajan keskimääräisestä kaivon lämpötilasta ja sisäisestä energianvaihtelusta

Plotterin asetuksista voidaan määrittää haluttu maksimi- ja minimiarvo kummallekin akselille, minkä graafi kuvaa. Kuvassa 11. esitettynä plotterille piirtyvä kuvaaja. Plottereita voidaan asettaa yhdelle projektille useampi, joten kaikkien komponenttien graafit voidaan kuvata omilla plottereilla. Plotteria ei tarvitse poistaa projektilta vaan se voidaan sammuttaa "Shut off" parametrilla.



Kuva 11. Plotterin piirtämä graafi linkitetystä säädätystä ja kaivokentästä

TRNSYS ei tarkista ohjelmistona energiataseiden oikeellisuutta ja ilmoita niitä vi-  
karaportissa, joten energiataseiden täytyy olla kunnossa, kun parametrit on syö-  
tetty. Tämä ominaisuus lisää käyttäjä vastuuta sen suhteen ovatko tulokset oikein  
simuloinnissa. Lämpöpumpun parametreissa täytyy huolehtia parametrien yhte-  
neväisyydestä lämmitys- ja jäähdytystiedostojen kanssa, joissa on määritetty  
energia- ja tehoarvot pumpun tuotolle.

## 6 Yhteenveto

TRNSYS-ohjelmistoa on tutkittu ja testattu todellisissa kohteissa, jossa sen tulok-  
sia on verrattu mitattuihin arvoihin. Komponenttien tarkkuuden välillä on vaihtelua  
todellisiin mittauskohteisiin nähden, esimerkiksi kaivokomponenttien välillä on  
eroja. On otettava kuitenkin huomioon, että tarkempi Type557b komponentti on  
tarkoitettu tilanteisiin, missä kohteeseen on suoritettu TRT-mittaus. Kaivokompo-  
nenttien kykyä simuloida esimerkiksi syvempiä kaivoja on syytä tarkastella tule-  
vaisuudessa, ongelmaksi esimerkiksi Type557 kohdalla muodostuu kollektori-  
konfiguraatioiden rajallisuudessa, sillä Type557 ominaisuudet on alun perin



suunniteltu yksinkertaiselle U-putkelle ja parametrien osalta esimerkiksi koaksi-aali- tai kaksinkertaisen kollektoria ei Type557 kollektoria ole otettu huomioon. EED-ohjelmistossa nämä kollektorit on myös otettu listaukseen huomioon, joten isot ja monimutkaiset järjestelmät voidaan kaivojen osalta simuloida hyödyntäen EED-ohjelmistoa.

Lämpöpumppukomponentti Type927 sisältää kattavan parametri luettelon tyypillisestä lämpöpumpusta. Komponentissa oleva mahdollisuus automaatio ohjaukseen käyttäjän toimesta jäähdytyksen ja lämmityksen välillä antaa mahdollisuuden simuloida lämmitystä ja jäähdytystä hyödyntäviä kohteita.

Rakennuksien tarkkojen lämmönsiirto-ominaisuuksien hyödyntäminen esimerkiksi uudiskohteiden kohdalla voi olla potentiaalinen ja hyödyllinen lisä maalämpöjärjestelmän kannalta, joskin monet rakennukset mallinnetaankin vaihtoehtoisilla LVI-alan simulointi ohjelmistoilla ja teho- sekä energiakulutustiedot ovat jo nykyisin näissä tapauksissa hyvin tarkkoja.

Yleisesti kaikissa simulointiohjelmissa on vaarana näppäilyvirheiden aiheuttamat virheet simuloinnissa. Lisäksi TRNSYS-ohjelmiston käytössä on oltava tarkkana myös sen suhteen, ettei se huomauta esimerkiksi energiataseiden virheellisyydestä. Kun simuloidaan suurta kokonaisuutta, missä huomattavan paljon muuttuvia tekijöitä vaikuttaa tulokseen on tarkastettava manuaalisesti tulosten oikeellisuus ja osattava huomioida, mikäli tulos ei anna oikeita arvoja. Vaikka nykyisin EED-ohjelmiston avulla voidaan tuottaa kattavaa tietoa kallioperän ominaisuuksista ja potentiaalista kaivokenttä simuloinnissa ja se näyttää sisältävän kattavampia parametrejä ja ominaisuuksia kaivoista ja etenkin kaivokenttien osalta, näen että tulevaisuudessakin tämän tarkastelun perusteella TRNSYS-ohjelmiston simulointimahdollisuuksiin on syytä perehtyä lisää ja tutkia esimerkiksi todellisten kohteiden rinnakkaissimulointeja EED- ja TRNSYS-ohjelmiston avulla.

## Lähteet

- 1 Lämpöpumput. Verkkoaineisto. Motiva. <[https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/lampopumput](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/lampopumput)> Luettu 30.4.2021.
- 2 Kuva 1. Verkkoaineisto. Lämpöpumpun toimintakaavio. Sulpu <<https://www.sulpu.fi/lampopumput/>>

- 3 Lämpöä omasta maasta - Maalämpöpumput. 2021. Verkkoaineisto. Motiva. Luettu 30.4.2021. <[https://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/lammitysjarjestelmat/lampoa\\_omasta\\_maasta\\_maalampopumput.10752.shtml](https://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/lammitysjarjestelmat/lampoa_omasta_maasta_maalampopumput.10752.shtml)>
- 4 Kaukolämmön energiahintaa nostettu Helsingissä 25 prosenttia – muualla ei vastaavia korotuspaineita. 2021 Verkkoaineisto. Yle. <<https://yle.fi/uutiset/3-11917622>> Luettu 6.5.2021
- 5 Energia-avustus taloyhtiöille. Verkkoaineisto. ARA. <[https://www.ara.fi/fi-FI/Lainat\\_ja\\_avustukset/Energiaavustus/Taloyhtiot](https://www.ara.fi/fi-FI/Lainat_ja_avustukset/Energiaavustus/Taloyhtiot)> Luettu 6.5.2021
- 6 Maalämpö. Verkkoaineisto. Suomen Ekolämpö. <<https://ekolampo.fi/maalampo/>> Luettu 6.5.2021
- 7 Kuva 2. Verkkoaineisto. Rototec. <<https://rototec.fi/referenssit/kauppakeskus-skanssista-lahes-energiaomavarainen/>>
- 8 Maalämpöpumppu, MLP. Verkkoaineisto. Motiva. <[https://www.motiva.fi/koti\\_ja\\_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman\\_valinta/lammitysmuodot/maalampopumppu\\_mlp](https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/lammitysmuodot/maalampopumppu_mlp)> Luettu. 6.5.2021
- 9 Ympäristöopas 2013 Energiakaivo. 2013. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö. Luettu 13.5.2021 <[https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40953/YO\\_2013.pdf?sequence=4&isAllowed=y](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40953/YO_2013.pdf?sequence=4&isAllowed=y)>
- 10 Kuva 3. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta, 14.3.2016 s.14. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö <<https://ym.fi/rakennusten-energiatehokkuus>>
- 11 Kuva 5. Verkkoaineisto. Muovitech <<https://www.muovitech.com/FI/?page=products&id=3970>>

- 12 Kuva 6. Verkkoaineisto. Jäsipi <<https://jaspi.fi/maalampopumpput/>>
- 13 Kuva 7. Verkkoaineisto. Buildingphysics, EED Version 4 Update Manual s. 9. <<https://buildingphysics.com/manuals/EED4.pdf>>
- 14 Lämpöpumppujen energialaskentaopas. 2012. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö. <[https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Lampopumppujen-energiaskentaopas-3.10.2012-10A732A6\\_EA2F\\_45F9\\_869C\\_6F909138CB26-30757.pdf/1d053cd5-1865-e174-6424-841fac831c48/Lampopumppujen-energiaskentaopas-3.10.2012-10A732A6\\_EA2F\\_45F9\\_869C\\_6F909138CB26-30757.pdf?t=1603260214849](https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Lampopumppujen-energiaskentaopas-3.10.2012-10A732A6_EA2F_45F9_869C_6F909138CB26-30757.pdf/1d053cd5-1865-e174-6424-841fac831c48/Lampopumppujen-energiaskentaopas-3.10.2012-10A732A6_EA2F_45F9_869C_6F909138CB26-30757.pdf?t=1603260214849)> Luettu 13.5.2021
- 15 The Chaos Hypertextbook Mathematics in the age of computer. Glenn Elert. The Chaos Hypertextbook. 2016 Verkkoaineisto. <<https://hypertextbook.com/chaos/iteration/>> Luettu 12.12.2021
- 16 Numerical Simulation Modeling of a GSHP and WSHP System for an Office Building in the Hot Summer and Cold Winter Region of China: A Case Study in Suzhou, Wenting Ma, Moon Keun Kim, Jianli Hao. 2019. Verkkoaineisto. <<https://www.mdpi.com/2071-1050/11/12/3282>> Luettu 10.7.2021
- 17 Simulation of a Ground Source Heat Pump System for Simultaneous Heating and Cooling, Stephanie Loizide, Kathrin Menberg, Ruchi Choudhary. 2018. Verkkoaineisto. IBSPA. <<http://www.ibpsa.org/proceedings/BSO2018/4A-3.pdf>> Luettu 18.7.2021
- 18 Practical evaluation of borehole heat exchanger models in TRNSYS, Åsa Thoren. 2016. Verkkoaineisto. KTH Industrial Engineering and Management. <<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:914770/FULLTEXT>> Luettu 22.7.2021