



Univerza v Mariboru

Fakulteta za energetiko

Matija Matičič

**Izraba plitve geotermalne energije za
ogrevanje in hlajenje v sklopu
Zdravstvenega doma Domžale**

Diplomsko delo

Krško, oktober 2023

Izraba plitve geotermalne energije za ogrevanje in hlajenje v sklopu Zdravstvenega doma Domžale

Diplomsko delo

Študent: Matija Matičič
Študijski program: visokošolski strokovni študijski program 1. stopnje Energetika
Mentor: red. prof. dr. Jurij Avsec
Lektorica: Ana Marija Skelo Peršolja, profesorica slovenščine



ZAHVALA

*Najlepše se zahvaljujem mentorju, red. prof. dr. Juriju Avscu,
za strokovno podporo in usmerjanje pri pripravi diplomskega dela.
Posebna in velika zahvala gre partnerici Maji, ki me je vseskozi spodbujala
in mi stala ob strani tako v času študija kot pri pripravi dela.*

IZRABA PLITVE GEOTERMALNE ENERGIJE ZA OGREVANJE IN HLAJENJE V SKLOPU ZDRAVSTVENEGA DOMA DOMŽALE

Ključne besede: plitva geotermalna energija, toplotna črpalka, zdravstveni dom, energetska oskrba, obnovljivi viri energije

UDK: [697+621.577.2]:725.1(043.2)

Povzetek

V diplomskem delu obravnavamo različne možnosti izrabe plitve geotermalne energije za ogrevanje in hlajenje stavbe ter pripravo STV na primeru zdravstvenega doma. Za zagotovitev potrebne energetske oskrbe smo določili predvideno rabo energije za obstoječo stavbo ter za predvideno širitev. Predstavili smo tehnične rešitve za izkoriščanje podzemne vode, izkoriščanje toplote v sklopu gradbenih konstrukcij podzemne garaže in izkoriščanje z geosondami. Ugotovili smo, da bi lahko energetske potrebe pokrili s toplotnimi črpalkami, za rezervo in pokrivanje v času nižjih temperatur pa bi uporabili obstoječi kotel. S tem bi pomembno vplivali na povečanje deleža OVE in zmanjšanje emisij TGP v lokalnem okolju.

HEATING AND COOLING OF THE COMMUNITY HEALTH CENTER DOMŽALE WITH USE OF SHALLOW GEOTHERMAL ENERGY

Key words: shallow geothermal energy, heat pump, health centre, energy needs, renewable energy sources

UDC: [697+621.577.2]:725.1(043.2)

Abstract

The thesis includes various possibilities of using shallow geothermal energy for heating and cooling of a building and the preparation of SHW in the case of a health centre. We determined the energy consumption for the existing building and for the planned expansion. We presented technical solutions for the use of underground water, heat exchangers in thermoactive geostuctures and vertical boreholes. We found that the energy needs could be covered with heat pumps, while the existing boiler would be used for reserve and coverage during lower temperatures. This would have a significant impact on increasing the use of RES and energy self-sufficiency.

IZJAVA O AVTORSTVU



Fakulteta za energetiko
(ime članice UM)

IZJAVA O AVTORSTVU ZAKLJUČNEGA DELA

Ime in priimek študenta/-ke: Matija Matičič

Študijski program: ENERGETIKA

Naslov zaključnega dela: Izraba plitve geotermalne energije za ogrevanje in hlajenje v sklopu
zdravstvenega doma domžale

Mentor/-ica: Jurij Avsec


Somentor/-ica: _____

Podpisani/-a študent/-ka Matija Matičič

- izjavljam, da je zaključno delo rezultat mojega samostojnega dela, ki sem ga izdelal/-a ob pomoči mentorja/-ice oz. somentorja/-ice;
- izjavljam, da sem pridobil/-a vsa potrebna soglasja za uporabo podatkov in avtorskih del v zaključnem delu in jih v zaključnem delu jasno in ustrezno označil/-a;
- na Univerzo v Mariboru neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico ponuditi zaključno delo javnosti na svetovnem spletu preko DKUM; sem seznanjen/-a, da bodo dela, deponirana/objavljena v DKUM, dostopna široki javnosti pod pogoji licence Creative Commons BY-NC-ND, kar vključuje tudi avtomatizirano indeksiranje preko spleta in obdelavo besedil za potrebe tekstovnega in podatkovnega rudarjenja in ekstrakcije znanja iz vsebin; uporabnikom se dovoli reproduciranje brez predelave avtorskega dela, distribuiranje, dajanje v najem in priobčitev javnosti samega izvirnega avtorskega dela, in sicer pod pogojem, da navedejo avtorja in da ne gre za komercialno uporabo;
- dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v zaključnem delu in tej izjavi, skupaj z objavo zaključnega dela.

Uveljavljam permisivnejšo obliko licence Creative Commons: _____
(navedite obliko)

Kraj in datum:
Krško, 25.09.2023

Podpis študenta/-ke:


IZJAVA O ISTOVETNOSTI TISKANE IN ELEKTRONSKE OBLIKE ZAKLJUČNEGA DELA



Fakulteta za energetiko
(ime članice UM)

IZJAVA O ISTOVETNOSTI TISKANE IN ELEKTRONSKE OBLIKE ZAKLJUČNEGA DELA

Ime in priimek študenta/-ke: Matija Matičič

Študijski program: ENERGETIKA


Naslov zaključnega dela: Izraba plitve geotermalne energije za ogrevanje in hlajenje v sklopu
zdravstvenega doma domžale

Mentor/-ica: Junij Avsec

Somentor/-ica: _____

Podpisani/-a študent/-ka Matija Matičič
izjavljam, da je tiskana oblika zaključnega dela istovetna elektronski obliki zaključnega dela, ki sem jo
oddal/-a za objavo v DKUM.

Kraj in datum:
Krško, 25.09.2023

Podpis študenta/-ke:


KAZALO VSEBINE

ZAHVALA	III
IZRABA PLITVE GEOTERMALNE ENERGIJE ZA OGREVANJE IN HLAJENJE V SKLOPU ZDRAVSTVENEGA DOMA DOMŽALE	IV
HEATING AND COOLING OF THE COMMUNITY HEALTH CENTER DOMŽALE WITH USE OF SHALLOW GEOTHERMAL ENERGY	V
IZJAVA O AVTORSTVU	VI
IZJAVA O ISTOVETNOSTI TISKANE IN ELEKTRONSKE OBLIKE ZAKLJUČNEGA DELA	VII
KAZALO VSEBINE	VIII
KAZALO SLIK	XI
KAZALO GRAFOV	XII
KAZALO TABEL	XIII
UPORABLJENI SIMBOLI	XIV
UPORABLJENE KRATICE	XV
1 UVOD	1
2 GEOTERMALNA ENERGIJA	3
2.1 VRSTE GEOTERMALNE ENERGIJE	3
2.2 TERMODINAMIČNE OSNOVE IN PRENOS TOPLOTE	4
2.3 ENERGIJSKA BILANCA ZEMLJE IN ATMOSFERE	6
2.4 IZKORIŠČANJE PLITVE GEOTERMALNE ENERGIJE	10
2.4.1 Osnove in načini izkoriščanja	11
2.4.2 Ocena potenciala za geosonde in vodnjake	13
2.4.3 Odločitvena shema za izbiro vrste zajetja	16
2.4.4 Omejitve in dejavniki v okolju za izvedbo zajetij	17

3	ENERGETSKE NAPRAVE ZA IZKORIŠANJE PLITVE GEOTERMALNE ENERGIJE	19
3.1	SISTEMI ZA IZRABO TOPLOTE OKOLJA.....	19
3.2	TOPLOTNA ČRPALKA.....	19
3.3	HRANILNIKI TOPLOTE	23
3.4	BIVALENTNI OBRATOVALNI REŽIM.....	24
3.5	ZUNANJI IZMENJEVALNIKI TOPLOTE	25
3.6	OGREVALNI/HLADILNI SISTEM STAVBE	25
4	NAČRTOVANJE ENERGETSKEGA SISTEMA	27
4.1	METEOROLOŠKI PODATKI ZA LOKACIJO	28
4.2	DIMENZIONIRANJE SISTEMA TOPLOTNIH ČRPALK	29
4.2.1	<i>Določitev potrebne moči za ogrevanje stavbe</i>	<i>30</i>
4.2.2	<i>Določitev potrebne moči za pripravo STV</i>	<i>34</i>
4.2.3	<i>Določitev potrebne moči za hlajenje</i>	<i>37</i>
4.3	PRIKAZ POVPREČNIH MESEČNIH POTREB PO TOPLOTI	38
5	POTENCIAL PLITVE GEOTERMALNE ENERGIJE	40
5.1	ODLOČITVENA SHEMA ZA NAČIN ZAJETJA	41
5.2	OCENA POTENCIALA IN IZVEDBA ZA VRTINO – VODNJAK	42
5.3	OCENA POTENCIALA ZA IZMENJEVALNIKE TOPLOTE OB GRADBENIH KONSTRUKCIJAH.....	44
5.4	OCENA POTENCIALA ZA GEOSONDO	45
6	IZVEDBA SISTEMA IZRABE PLITVE GEOTERMALNE ENERGIJE	47
6.1	KARAKTERISTIKE SISTEMA TOPLOTNIH ČRPALK	47
6.2	NAČINI IZKORIŠČANJA PLITVE GEOTERMALNE ENERGIJE.....	48
6.2.1	<i>Sistem za izkoriščanje podzemne vode TČ1.....</i>	<i>49</i>
6.2.2	<i>Sistem za izkoriščanje v sklopu gradbenih konstrukcij TČ2</i>	<i>50</i>
6.2.3	<i>Sistem za izkoriščanje z geosondami TČ3.....</i>	<i>51</i>
6.2.4	<i>Skupni sistem za ogrevanje, hlajenje in pripravo STV</i>	<i>52</i>
6.3	POVPREČNA MESEČNA DINAMIKA ZAGOTAVLJANJA TOPLOTE	52
6.4	OCENA RABE ELEKTRIČNE ENERGIJE ZA DELOVANJE.....	54

6.5 VPLIV NA ZMANJŠANJE EMISIJ CO ₂	55
7 ZAKLJUČEK	56
VIRI IN LITERATURA.....	58

KAZALO SLIK

Slika 2.1: Vrste geotermalne energije in načini izkoriščanja [1]	4
Slika 2.2: Prikaz energijske bilance na površju zemlje [1].....	8
Slika 2.3: Geotermični gradient v odvisnosti od globine [5].....	9
Slika 2.4: Shematski prikaz primerov izkoriščanja plitve geotermalne energije z geosondo, vodoravnim kolektorjem in vodnjakom [5]	12
Slika 2.5: Prikaz primerov izkoriščanja plitve geotermalne energije v sklopu gradbenih konstrukcij [9]	12
Slika 2.6: Prikaz možnosti uporabe sistemov toplotnih črpalk na območju Slovenije [10]	13
Slika 3.1: Shematski prikaz delovanja toplotne črpalke [11]	20
Slika 3.2: Shematski prikaz primera delovanja priključenih treh zalogovnikov [11]	24
Slika 4.1: Prikaz širitve zdravstvenega doma v navezavi z obstoječim delom [14]	27
Slika 5.1: Geološka karta zahodnega dela Ljubljanske udorine [19]	40
Slika 6.1: Shematski prikaz sistema s toplotno črpalko voda-voda (TČ1) [11]	49
Slika 6.2: Shematski prikaz sistema s toplotno črpalko zemlja-voda (TČ2) [11].....	50
Slika 6.3: Shematski prikaz sistema s toplotno črpalko zemlja-voda (TČ2) [11].....	51
Slika 6.4: Shematski prikaz skupnega sistema za ogrevanje, hlajenje in pripravo STV ..	52

KAZALO GRAFOV

Graf 4.1: Mesečni temperaturni primanjkljaj za obdobje 2018–2020 [16].....	29
Graf 4.2: Povprečna raba hladu za hlajenje predvidene širitve ZD	38
Graf 4.3: Povprečna mesečna potreba po toploti iz sistema toplotnih črpalk.....	39
Graf 6.1: Rezultat ocene dinamike zagotavljanja toplote za ogrevanje in pripravo STV 53	

KAZALO TABEL

Tabela 2.1: Specifična toplotna zmogljivost podtalja za geosonde do 30 kW [4]	14
Tabela 2.2: Specifična toplotna zmogljivost podtalja za vodoravne sisteme do 30 kW [4]	15
Tabela 2.3: Odločitvena shema za izbiro načina zajetja plitve geotermalne energije [4]	17
Tabela 4.1: Izračunane moči za ogrevanje obstoječe stavbe ZD	31
Tabela 4.2: Izračunane moči za ogrevanje energetske sanirane stavbe ZD	32
Tabela 4.3: Izračunane potrebne moči za ogrevanje STV glede na čas razpoložljivosti TČ	36
Tabela 5.1: Vhodni podatki in rezultati izračuna za oceno potenciala vodnjaka	43
Tabela 5.2: Vhodni podatki in rezultati izračuna za oceno potenciala za geosondo.....	46
Tabela 6.1: Podatki o toplotnih črpalkah za koriščenje plitve geotermalne energije	48
Tabela 6.2: Prijavljen koeficient učinkovitosti COP _d [12].....	54

UPORABLJENI SIMBOLI

J^{net}	-	neto energija sevanja, ki pride do zemlje
Q	-	toplota
Q'	-	specifična toplota na m ² na leto
T	-	temperatura
T_0	-	temperatura tal na površju
λ	-	toplotna prevodnost
Q_m	-	pretok črpane vode
Φ_e	-	moč uparjalnika oziroma moč pridobljena iz vode
dT	-	temperaturna razlika prenosnika toplote na vstopni in izstopni strani
c, ρ_c	-	specifična toplotna zmogljivost prenosnika toplote
W	-	vloženo električno delo za delovanje
\dot{Q}	-	toplotna moč
f	-	faktor načrtovanja
f_{CO_2}	-	emisijski faktor
θ	-	temperatura vode
V	-	prostornina

UPORABLJENE KRATICE

COP	-	Coefficient of Performance
CSTP	-	Characteristic Subsurface Temperature Profile
EGS	-	Enhanced Geothermal Systems
EU	-	Evropska unija
GTČ	-	Geotermalne toplotne črpalke
HDPE	-	High-density Polyethylene
HVAC	-	Heating, Ventilation, and Air Conditioning
NT	-	Nizkotemperaturni
OVE	-	Obnovljivi viri energije
SCOP	-	Seasonal Coefficient of Performance
SEER	-	Seasonal Energy Efficiency Ratio
ST	-	Srednje temperaturni
STV	-	Sanitarna topla voda
URE	-	Učinkovita raba energije
VVO	-	Vodovarstveno območje
TČ	-	Toplotna črpalka
TGP	-	Toplogredni plini
ZD	-	Zdravstveni dom
ZP	-	Zemeljski plin

1 UVOD

Živimo v času, ko so posledice podnebnih sprememb že neizbežna realnost, s katero se vedno pogosteje tudi soočamo. Pred več kot 20-imi leti pa je bilo kristalno jasno, da je potrebno aktivno pristopiti k zmanjševanju emisij toplogrednih plinov in k večji energetske samooskrbi. Zgorevanje fosilnih goriv za pretvorbo v končno energijo poleg emisij prinaša tudi energetske odvisnost od uvoza, le-to pa prinaša večjo občutljivost na geopolitične razmere ter vpliva na ceno energentov. Že veliko let prej so posamezne evropske države aktivno vlagale v izrabo OVE, medtem ko so druge nekoliko manj. V skupino slednjih se žal uvršča tudi Slovenija. Danes je izraba OVE tako v Evropi kot tudi v Sloveniji predpisana z zakonodajo. Vsled navedenemu se danes za ogrevanje, hlajenje in pripravo STV vedno pogosteje uporablja toplotne črpalke, preko katerih se s pomočjo električne energije na učinkovit način izrablja toploto okolja. Gre za zelo učinkovite sisteme, katerih izvedba je mogoča praktično na katerikoli lokaciji. Tehnološki razvoj sistemov in nova znanja nam omogočajo številne možnosti izkoriščanja za gospodinske, storitvene in industrijske objekte. Današnji sistemi omogočajo učinkovito izrabo plitve geotermalne energije za ogrevanje, hlajenje in pripravo STV. V kombinaciji s sončno elektrarno na strehi stavbe se lahko tovrstni sistemi približajo energetske nevtralnosti. Ogrevanje in hlajenje predstavlja skoraj 40-odstotni delež izrabe končne energije v Sloveniji, zato ima pomembno vlogo pri doseganju ciljev za konkurenčno, varno, trajnostno in zeleno Evropo.

V diplomskem delu so preučene različne možnosti izrabe plitve geotermalne energije za ogrevanje in hlajenje stave ter pripravo STV na primeru ZD Domžale. Zdravstveni domovi predstavljajo večjega porabnika energije in vode javnega sektorja v lokalnih okoljih. Priložnost za zamenjavo vira ogrevanja oziroma energetskega sistema predmetne stavbe se je pokazala s predvideno širitvijo ZD Domžale, in sicer je s projektom predvidena izgradnja povezanega objekta, uporabne površine 4.477 m². V sklopu

novega objekta pa je predvidena tudi gradnja podzemne garaže v dveh etažah. Pri raziskavah zaradi gradnje se je izkazalo, da se na lokaciji pojavi podzemna voda že na globini 8 m. Cilj diplomskega dela je tako podati rešitev za izrabo plitve geotermalne energije za ogrevanje, hlajenje in pripravo STV v sklopu Zdravstvenega doma Domžale. Rešitev se prikaže tako za obstoječi del kot za predvideno širitev. Predviden energetski sistem je mogoče načrtovati na način, da bo prispeval k povečanju izrabe OVE in zmanjšanju emisije TGP na območju občine Domžale. Po drugi strani bo omogočena samooskrba kritičnega objekta za pet občin, katerim je zdravstveni dom namenjen. Rezultat diplomskega dela so podane osnovne karakteristike komponent sistema in osnovna ocena potenciala plitve geotermalne energije na lokaciji.

V diplomskem delu so najprej na podlagi znanstvenih knjig, člankov in zadnjih dostopnih raziskav na tem področju predstavljene osnove geotermalne energije: od hidrogeoloških lastnosti, termodinamičnih osnov ter do osnovne energijske bilance. Nadalje so podane osnove in načini izkoriščanja, omejitve in dejavniki v okolju za izvedbo zajetij. Iz smernic oziroma standarda pa so podane tudi enačbe za osnovno oceno potenciala ter odločitvena shema. Navedene teoretične osnove nam v nadaljevanju služijo pri določitvi potenciala na sami lokaciji. Za izkoriščanje geotermalne energije pa so potrebne ustrezne energetske naprave, katerih osnovni elementi in načini delovanja so na kratko predstavljeni. Pred samo oceno potenciala je potrebno načrtovanje energetskega sistema za zadostitev potreb po ogrevanju, hlajenju in pripravi STV. Na podlagi energetskih analiz in predpisanih postopkov so določene potrebne zahteve glede moči in dinamike porabe. Glede na rezultate analiz energetskih potreb ter potenciala pa je podana možna izvedba sistema z izkoriščanjem plitve geotermalne energije na različne načine.

2 GEOTERMALNA ENERGIJA

Generalno in termodinamično gledano predstavlja geotermalna energija notranjo energijo geoloških struktur oz. materialov, ki se nahajajo pod površjem vse do zemeljskega jedra. Skladno s termodinamičnimi zakoni se geotermalna energija v obliki toplote prenaša iz delov z višjo notranjo energijo proti delom z nižjo notranjo energijo, pri čemer se lahko del energije pretvori v drugo vrsto energije. Geotermalna energija tako predstavlja potencialno sposobnost geološkega sistema, da se termalna energija prenese v obliki toplote ali opravi delo. [1]

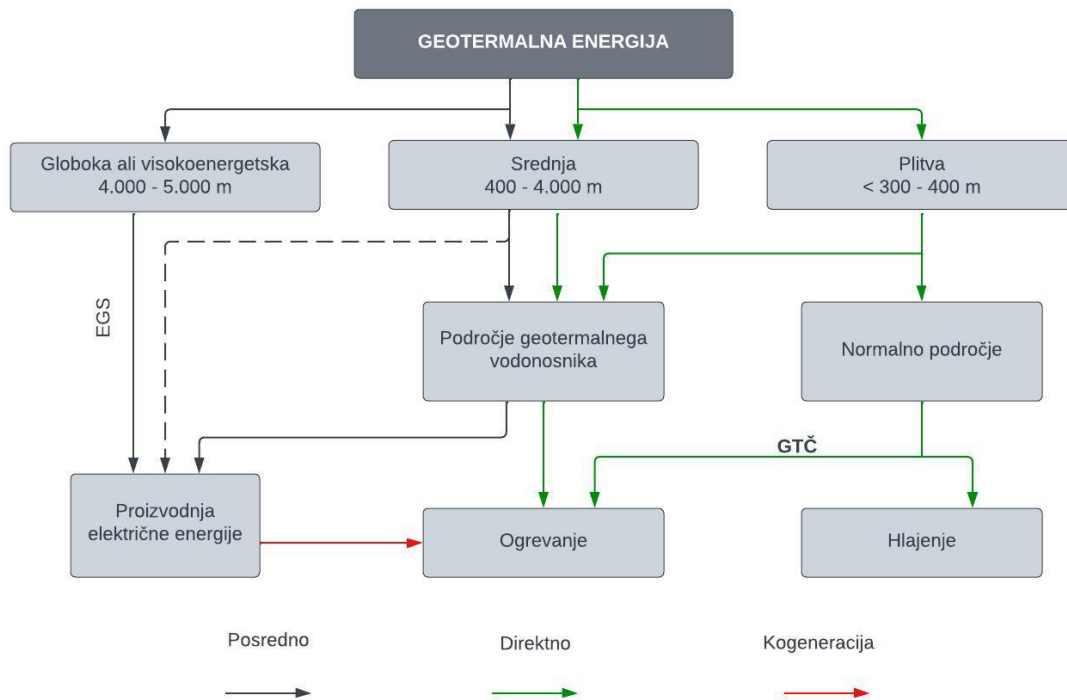
Geotermalni potencial je torej del toplote, ki je shranjena pod zemeljskim površjem in ga je mogoče izkoristiti s pomočjo ustreznih tehničnih naprav. Preučevanje prenosa notranje energije med sistemi je osnovni cilj termodinamike. Disciplina, ki se ukvarja s preučevanjem geotermalne energije, je kombinacija termodinamičnega in geološkega znanja. Na ta način je mogoče razumeti in izračunati prenos toplote na površje in možnosti za izkoriščanje te toplote. [1]

V splošnem je geotermalna energija neizčrpen in vsestranski vir energije, ki lahko bistveno pripomore k reševanju energetskih potreb današnje družbe in pomembno vpliva na zmanjšanje rabe fosilnih goriv tako za ogrevanje in hlajenje kot tudi za proizvodnjo električne energije. [1]

2.1 VRSTE GEOTERMALNE ENERGIJE

V geološkem okolju je velika raznolikost termodinamičnih sistemov pri različnih temperaturah. V jedru zemlje je temperatura najvišja in je okoli 6.000 °C. Notranja energija zemlje preko množice plasti prehaja proti površju, kjer je temperatura več 100-

krat nižja. Geotermalna energija v večjih globinah lahko doseže 175 °C, kolikor je potrebno za proizvodnjo električne energije. Takšna temperatura je na dosegljivih globinah prisotna samo na redkih območjih. [1] Glede na globino delimo geotermalno energijo na globoko, srednjo in plitvo, kot je razvidno iz Slika 2.1, kjer so prikazani tudi različni načini izkoriščanja.



Slika 2.1: Vrste geotermalne energije in načini izkoriščanja [1]

V manjših globinah se geotermalna energija izrablja neposredno za namen ogrevanja in hlajenja z uporabo geotermalnih toplotnih črpalk.

2.2 TERMODINAMIČNE OSNOVE IN PRENOS TOPLOTE

Termodinamika raziskuje pojave, kjer so udeležene energije. Le-te predstavljajo tako imenovane prapojave in se ne dajo definirati in dokazati z aksiomi. Pri preučevanju tako lahko govorimo le o značilnih lastnosti energije. V splošnem delimo energije v dve skupini, in sicer energije, ki so nakopičene ali shranjene v preučevanem telesu ali

prostoru. Druga vrsta so prehodne energije, ki so posledica menjave oblike nakopičenih energij. V prvo vrsto sodijo potenciala, kinetična in notranja energija. V drugo vrsto pa delo in toplota. [2]

Energija je torej lastnost telesa, da opravi delo. Izračun absolutne velikosti energije sistema je težko izvedljiv, medtem ko je računanje sprememb energije relativno enostavno. Z molekulskimi strukturami snovi v sistemu so določene mikroskopske oblike energije, njihova vsota je notranja energija sistema. Ta je definirana s sestavo, strukturo (agregatno stanje) in zunanjimi spremenljivkami (temperatura, tlak, magnetno polje, itn.). Mikroskopsko gledano dejansko obstajata dve obliki notranje energije, notranja kinetična energija in notranja potenciala energija, ki sta določeni s kinetično in potencialno energijo atomov in molekul. Med različnimi termodinamičnimi sistemi se energija lahko prenaša kot toplota, delo ali masni tok. [1]

Za analize in izračune, povezane z izkoriščanjem plitve geotermalne energije, je ključno poznavanje pretvorbe dela v toploto in obratno. Glede na to da je temperatura v plitvih globinah relativno nizka ($< 30^{\circ}\text{C}$), moramo za izkoriščanje/ponor toplote dovesti mehansko delo. Za razumevanje sistemov za izkoriščanje plitve geotermalne energije je zato potrebno razumevanje pretvorbe dela v toploto. V primeru izkoriščanja globoke geotermalne energije je proces obraten, saj se delo proizvede iz toplote. V teh sistemih se izkorišča primarna energija v geoloških strukturah za pridobivanje mehanskega dela, ki se nadalje pretvori v električno energijo. [1]

Za razumevanje pojavov definiramo termodinamični sistem, ki predstavlja prostor ali pa količino snovi, omejeno s stenami oziroma mejami, bodisi dejanskimi ali namišljenimi. Vse, kar se nahaja izven teh mej, imenujemo okolica. Na ta način so definirane tri vrste termodinamičnih sistemov: odprti, energijsko odprti in zaprti sistemi. Pri slednjih preko meja ne prehaja niti snov niti energija, pri odprtih pa ravno obratno. V energijsko odprtih pa je možen prehod samo energije, ne pa tudi snovi. [3]

Med sistemom in okolico je mogoč prenos toplote, in sicer kot prevod toplote, konvekcija in sevanje. Pri prevodu toplote je prenos snovnega izvora in temelji na izmenjavi impulza med sosednjimi delci snovi, ki istočasno tudi nihajo okrog svojih ravnotežnih leg. V primeru konvekcije pa se toplota prenaša po prostoru skupaj s snovjo, torej je transport makroskopski in je kot tak mogoč samo pri tekočinah. Sevanje pa predstavlja povsem drugačen način, saj je vezano na osnovne delce snovi in se v prostoru širi kot elektromagnetno valovanje. [3] Pri preučevanju prenosa toplote v plitvem podzemlju nastopajo vsi trije načini prenosa toplote.

Eden pomembnejših fizikalnih parametrov za preučevanje plitve geotermalne energije je toplotna prevodnost, ki izraža lastnost snovi za prenos toplote skozi notranjo strukturo te snovi. V splošnem je toplotna prevodnost funkcija temperature, vendar se lahko v določenem območju obravnava kot konstanta oziroma neodvisna od temperature. Toplotna prevodnost kamnin se giblje v območju med 0,5 in 6,5 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Še nekoliko nižjo toplotno prevodnost imajo sedimenti, in sicer od 0,1 do 2,75 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Najmanjšo toplotno prevodnost imajo plini. [1]

Matematično je opis prenosa toplote pod površjem izredno kompleksen in je za natančno načrtovanje sistemov izrabe plitve geotermalne energije potrebno uporabiti orodja za modeliranje. V kolikor preučujemo prenos toplote skozi kamnine, je uporaba orodij za modeliranje različna kot v primeru preučevanja izkoriščanja toplote podzemne vode. [4]

2.3 ENERGIJSKA BILANCA ZEMLJE IN ATMOSFERE

Osnova za razumevanje možnosti izkoriščanja plitve geotermalne energije je poznavanje izvora in velikosti prenosa toplote pod površjem zemlje. Sonce, atmosfera in zemljino jedro so glavni viri toplote v naravi, atmosfera in zemljino površje pa tudi glavni ponor toplote. Na zemlji je vzpostavljeno energetska ravnovesje med atmosfero in zemljo, ki ga tvori stalni prenos toplote v vseh treh oblikah: sevanje, prevod in konvekcija. [1]

Na energijsko bilanco na površju zemlje tako na eni strani vpliva sevanje sonca, na drugi strani pa prevod ter konvekcija toplote iz zemlje. Prevod toplote med zemljo in atmosfero je praktično zanemarljiv, konvektivni prestop toplote pa je izrednega pomena. Konvekcija toplote v in iz atmosfere se nanaša na latentno toploto Q_E ali senzibilno toploto Q_H . Prva se nanaša na termalno energijo, ki prehaja iz zemlje v atmosfero preko izhlapevanja in transpiracije. Na ta način več kot polovica vpadle toplote iz sevanja preide nazaj v atmosfero. [1]

Senzibilna toplota se zaradi temperaturne razlike nanaša na prenos med površjem in zrakom v atmosferi. Na ta način prehaja senzibilna toplota iz zemlje na zunanji zrak in obratno, odvisno od temperaturne razlike. Poleg navedenega je prisoten še prevod toplote iz zgornjih plasti zemlje v nižje plasti. Prevod toplote Q_G iz spodnjih v zgornje plasti zemlje poteka v zimskem času, poleti pa obratno. [1] Energijska bilanca je prikazana na Slika 2.2.

Opisana energijska bilanca se lahko izrazi s spodnjo enačbo [1]:

$$J^{net} = Q_H + Q_E + Q_G, \quad (2.1)$$

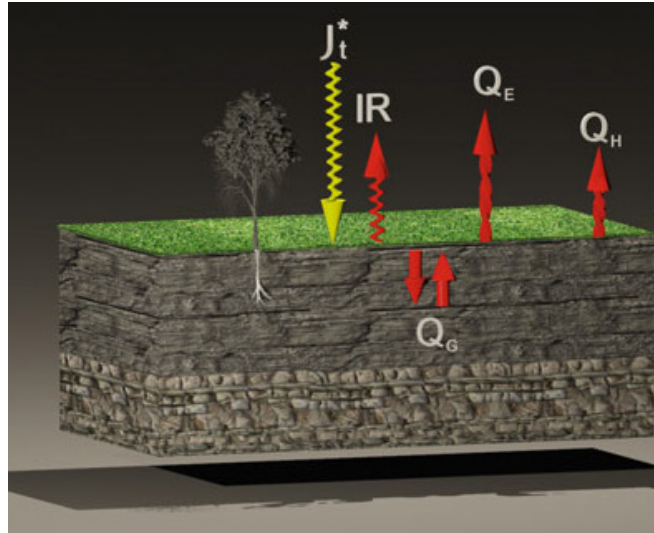
kjer je:

J^{net} – neto energija sevanja, ki pride do zemlje,

Q_H – senzibilna toplota,

Q_E – latentna toplota in

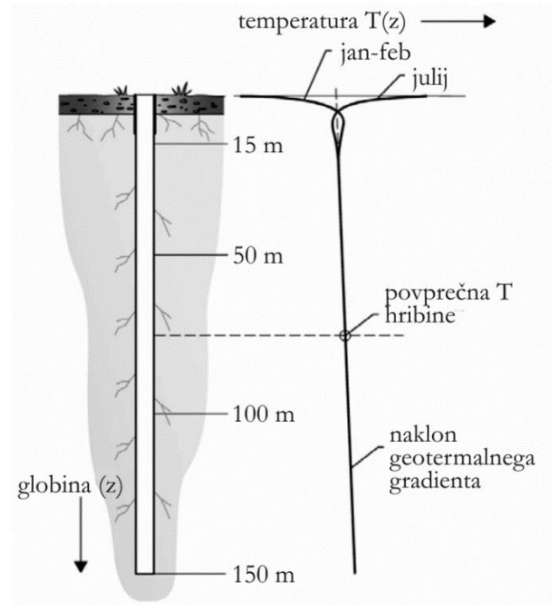
Q_G – prevod toplote iz ali v zemljo pod površjem.



Slika 2.2: Prikaz energijske bilance na površju zemlje [1]

Toplotni tok je prisoten tudi v obratni smeri zaradi zelo visoke temperature v jedru zemlje. Glede na ocene znaša toplotni tok iz jedra zemlje proti površju od $0,04$ do $0,11 \text{ W/m}^2$ v celinskem delu, pri čemer so lahko na posameznih delih povsem drugačne razmere (npr. vulkani, izviri podzemne vode). Toplotni tok iz jedra proti površju je v letnem povprečju praktično enak toplotnemu toku iz površja proti jedru. Prevod toplote Q_G je tako v letnem povprečju približno enak nič. [1]

Navedene osnove vplivajo na temperaturni profil pod površjem zemlje. Temperatura atmosfere je pretežno odvisna od sončnega sevanja in konvekcijskih procesov, ki tvorijo kompleksno atmosfersko dinamiko. Vpliv interakcije med geotermalnim gradientom in atmosfersko dinamiko opisujemo s karakterističnim geotermičnim gradientom – CSTP (Characteristic Subsurface Temperature Profile). Vpliv prenosa toplote iz atmosfere in vpliv sončnega sevanja preneha biti zaznaven na globini med 10 in 20 m. Na tej globini se kaže, da nastopijo stacionarne termalne in hidravlične razmere glede na zunanjo temperaturo oz. razmere. Temperaturni profil na teh globinah tako ni več odvisen od sezonskih atmosferskih vplivov, kot tudi v času ekstremnih vremenskih razmer. [1] Vpliv zunanjih temperatur in procesov je razviden iz Slika 2.3, kjer je prikazan tudi temperaturni profil do globine 150 m.



Slika 2.3: Geotermični gradient v odvisnosti od globine [5]

Glede na temperaturni profil lahko razlikujemo tri temperaturne cone [6]:

- od 0,5 do 1 m – površinska (solarna) cona, kjer je temperatura tal občutljiva na dnevne spremembe atmosfere;
- do približno 10 m – plitvo območje, kjer so tla občutljiva na sezonske vremenske spremembe;
- globlje od približno 10 m – globoka cona, kjer je temperatura v plitvem podzemlju skoraj stalna skozi celo leto.

Globoko cono nekateri znanstveniki postavljajo tudi nekoliko nižje, pri 14 do 15 m, odvisno od toplotne difuznosti plitvega podzemlja. Na vrhu te cone se amplituda letne temperatura zniža za samo 0,1 °C. Za načrtovanje geosond sta najpomembnejša parametra toplotna prevodnost kamnin in zemljin v globinskem dosegu geosonde ter temperatura tal na lokaciji izvedbe. [6]

Srednja letna temperatura tal je linearno odvisna od nadmorske višine, v splošnem pa je za 1 do 4 °C višja od temperature zraka na 2 m višine nad tlemi. Temperatura tal v praksi pomeni temperaturo v globini 2 cm in je seveda odvisna tudi od izpostavljenosti površja sončnemu sevanju. Posledično je tudi temperatura tal tako odvisna od naklona

in usmerjenosti tal. Za severno poloblo je značilno, da so proti severu usmerjena pobočja za nekaj stopinj hladnejša od usmerjenih proti jugu. Na temperaturo tal pomembno vplivata tudi vegetacija in stanje površinskih kamnin. [6]

Na spremembo referenčnega podzemnega profila vplivajo različni naravni in atmosferski procesi v okolju, kot tudi geološki procesi pod površjem. Regionalni tok podzemne vode pomembno vpliva na temperaturni profil pod površjem in ga regionalno gledano povsem spremeni. Vpliv je zaznaven do velikih globin. V območjih infiltracije je temperatura podzemne vode, ki ponika, za 1 do 2 °C nižja od CSTP. Na območjih izvirov podzemne vode je situacija obratna. Med tokom podzemne vode in kamninami je tako prisoten stalni prenos toplote, katerega opis pa je izredno kompleksen. [1]

Za določitev prenosa toplote med tekočino in kamninami je potrebno upoštevati stalen pretok podzemne vode skozi porozno snov. Raziskave so pokazale, da raztopljene kemijske snovi ne potujejo samo v smeri toka podzemne vode, temveč tudi pravokotno na njegovo smer. Širjenje raztopljenih snovi v porozni kamnini opisuje hidrodinamična disperzija, ki predstavlja širjenje raztopine v toku skozi porozno snov, povzročeno z molekularno difuzijo in raznolikostjo mikroskopskih hitrosti. Za preučevanje fizikalnih količin prenosa je tako potreben kompleksen tridimenzionalen model. [1]

2.4 IZKORIŠČANJE PLITVE GEOTERMALNE ENERGIJE

Izkoriščanje plitve geotermalne energije je možno z uporabo toplotne črpalke. V zadnjem času je razvoj tehnologije toplotnih črpalk zelo napredoval in so sodobne TČ lahko zelo učinkovite. Z razvojem toplotnih črpalk je tudi cena teh vedno bolj dosegljiva. Energetska učinkovitost geotermalnih toplotnih črpalk je za 50 do 70 % višja kot pri konvencionalnih ogrevalnih sistemih in za 20 do 40 % višja kot pri toplotnih črpalkah, ki zajemajo zunanji zrak. Uporaba toplotnih črpalk pomembno vpliva tudi k zmanjševanju emisij toplogrednih plinov, kot tudi prispeva k večji energetski neodvisnosti. V posameznih državah EU so sistemi geotermalnih toplotnih črpalk že zelo razširjeni in se uporabljajo tudi za oskrbe večjih objektov. [1]

2.4.1 Osnove in načini izkoriščanja

Naravne danosti posameznega območja določajo geotermalni potencial, ki je ocenjen na podlagi geoloških, hidroloških in geotermičnih lastnosti. Glede na tehnologijo rabe v praksi ločimo med plitvo in globoko geotermalno energijo. Plitvo geotermalno energijo je z različnimi uporabljenimi tehnologijami možno izkoriščati praktično povsod. [1]

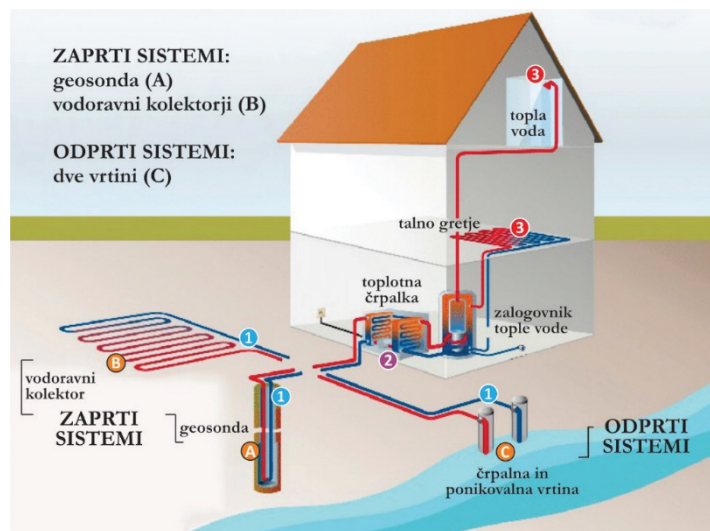
Za izkoriščanje plitve geotermalne energije so potrebne geotermalne toplotne črpalke, ki se uporabljajo za ogrevanje in hlajenje stavb. Geotermalno energijo je mogoče izkoriščati z odprtimi in zaprtimi sistemi. Toplotna izmenjava za »Zaprta sistem« poteka s pomočjo tekočine, ki kroži v zaprti cevni napeljavi pod površjem tal. Posledično pri teh sistemih ne pride do stika z naravnim okoljem. Po drugi strani je za »Odprti sistem« toplotna izmenjava neposredna s tekočino, ki je lahko površinska ali podzemna voda. Tovrstni sistemi so torej v neposrednem stiku z naravnim okoljem. [7]

Za izkoriščanje plitve geotermalne energije potrebujemo ustrezna zajetja oziroma toplotne izmenjevalnike, ki so v stiku s plitvim podzemljem. V primeru vodoravnih kolektorjev so ti lahko že na globini od 1,2 do 2 m. V primeru navpičnih geosond se vrtine izvedejo običajno od 100 do 150 m globoko. Možna je tudi izvedba z energetskimi piloti v globini od 5 do 45 m ter z energetskimi košarami v globini od 2 do 5 m. Obstaja pa tudi možnost za namestitvev toplotnih izmenjevalnikov v sklopu gradbenih konstrukcij pod zemljo. Izvedba odprtih sistemov je vezana na globino podzemne vode in se izvede z vodnjaki v globinah od 4 do 50 m in tudi več. Odprti sistemi se uporabljajo tudi za zajetja površinskih voda, kot so reke in jezera. [7]

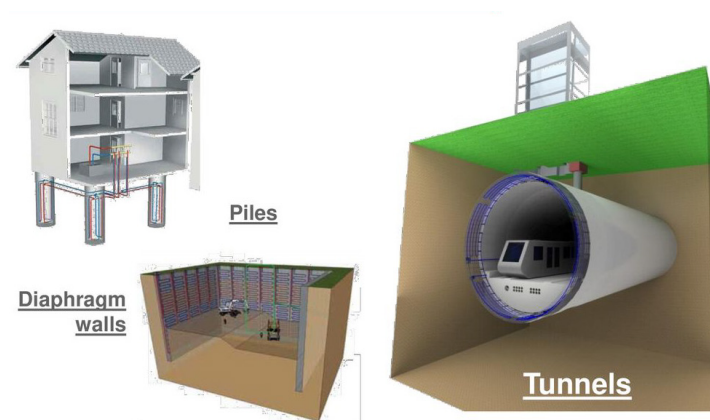
V primeru novogradenj večjih objektov, za katere je predvideno podzemno temeljenje in celo gradnja podzemnih etaž, je možna izraba plitve geotermalne energije v sklopu gradbenih konstrukcij. Vgradnja se izvede v času betoniranja z uporabo plastičnih cevi (običajno HDPE) kot toplotnih izmenjevalnikov. Primarni krog, skozi katerega teče

določena tekočina, tako vsebuje zaprt sistem cevi v gradbenih konstrukcijah, ki so v stiku s podzemljem. Običajno se uporabljajo mešanice vode z glicerolom ali slanice. [8]

Primer izvedbe izkoriščanja toplote v sklopu gradbenih konstrukcij je prikazan na Slika 2.5, primer izvedbe z geosondo, vodoravnim kolektorjem in odprtim sistemom za izrabo podzemne vode pa na Slika 2.4.



Slika 2.4: Shematski prikaz primerov izkoriščanja plitve geotermalne energije z geosondo, vodoravnim kolektorjem in vodnjakom [5]

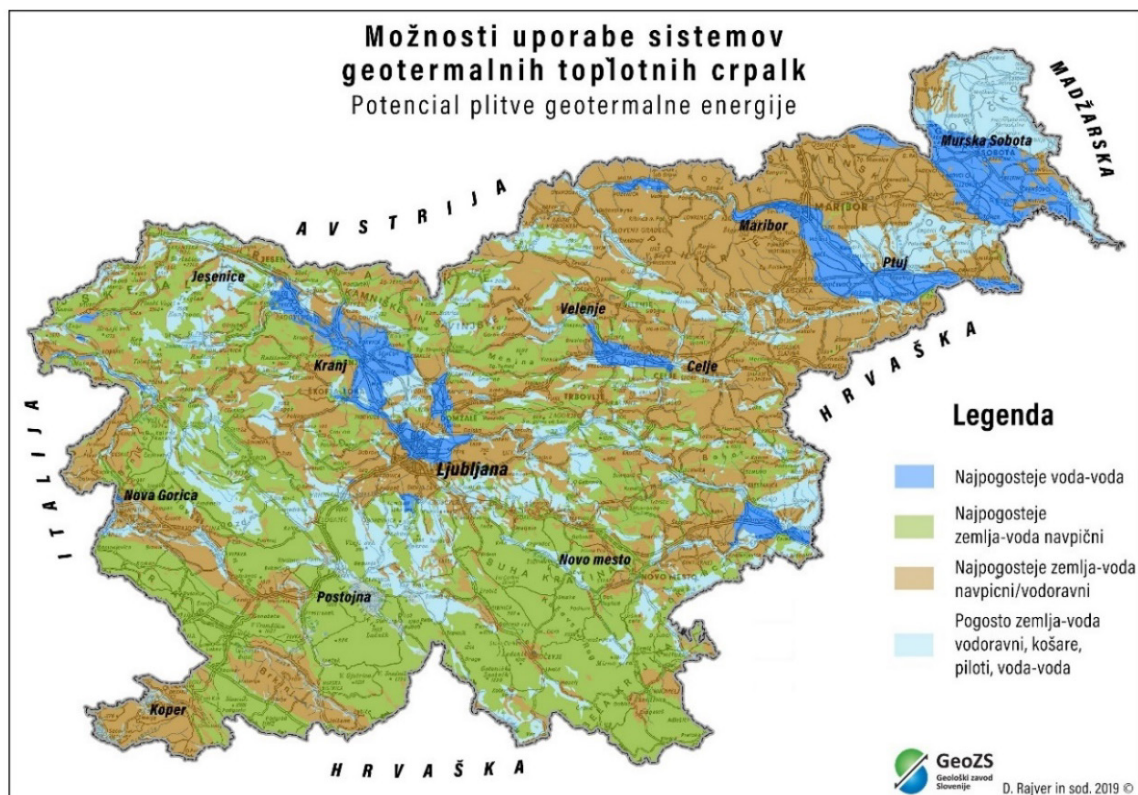


Slika 2.5: Prikaz primerov izkoriščanja plitve geotermalne energije v sklopu gradbenih konstrukcij [9]

Temperature plitve geotermalne energije so za neposredno uporabo v ogrevalnih sistemih prenizke in jih je potrebno dvigniti na višji temperaturni nivo. V plitvem podzemlju pa je zelo odvisna od lokalnih razmer, tako na nivoju solarne cone kot tudi nižje na nivoju zemeljske cone. V primeru pojava podzemne vode se razmere dodatno spremenijo, saj se pojavijo dodatni toplotni tokovi. [5]

2.4.2 Ocena potenciala za geosonde in vodnjake

Potencial za izkoriščanje plitve geotermalne energije je glede na raziskave in podatke v Sloveniji velik, posebno za uporabo nizekotemperaturnega ogrevanja in hlajenja stavb. Za območje Slovenije so najprimernejši oziroma izvedljivi zaprti sistemi, razen na delih, kjer se nahajajo izdatni vodonosniki. [5] Možnosti uporabe sistemov geotermalnih toplotnih črpalk glede na potencial plitve geotermalne energije so bile za območje Slovenije določene s strani Geološkega zavoda Slovenije in so prikazane na Slika 2.6



Slika 2.6: Prikaz možnosti uporabe sistemov toplotnih črpalk na območju Slovenije [10]

Pred izvedbo samega načrtovanja rabe plitve geotermalne energije je potrebno poznavanje osnovnih geoloških in hidroloških podatkov za oceno potenciala. Tako je potrebno v primeru geosonde poznavanje debeline preperine, osnovnih tipov kamnin in sedimentov, strukture kamnin v navpični in vodoravni smeri, osnovnih mehanskih lastnosti kamnin in sedimentov, toplotne prevodnost, hidrogeoloških lastnosti. V primeru izrabe podzemne vode pa je potrebno poznavanje geometrije in debeline vodonosnika, prisotnost različnih gladin podzemne vode, strukture in prepustnosti geoloških plasti, piezometrične gladine podzemne vode, hidravličnega gradienta, smeri in hitrosti toka vode, podzemnih dotokov, temperature in kemijske kakovosti podzemne vode. [4]

Za določitev potenciala plitve geotermalne energije za geosondo sta najpomembnejša toplotna prevodnost geoloških plasti λ in temperatura tal T_0 . Določitev specifične izkoristljive toplotne moči z navpično geosondo se orientacijsko lahko oceni iz preglednic v standardu SIST EN 15459:2007 za manjše naprave do 30 kW. Za večje naprave pa se priporoča analitične in modelne izračune ali druge podrobnejše analitične pripomočke in preglednice ter tudi meritev termične odzivnosti podtalja. Splošne orientacijske vrednosti za prvo oceno so podane v Tabela 2.1. [4]

Tabela 2.1: Specifična toplotna zmogljivost podtalja za geosonde do 30 kW [4]

Vrsta geološke plasti	Specifična toplotna moč – dolžinska [W/m]	
	Delovanje s polno zmogljivostjo 1.800 ur	Delovanje s polno zmogljivostjo 2.400 ur
Splošna orientacijska vrednost		
Suh prod in pesek	< 25	< 20
Prod in pesek zasičen z vodo	65–80	55–65
Prod in pesek in močen tok podzemne vode	80–100	80–100

»se nadaljuje«

»nadaljevanje«

Vrsta geološke plasti	Specifična toplotna moč – dolžinska [W/m]	
	Delovanje s polno zmogljivostjo 1.800 ur	Delovanje s polno zmogljivostjo 2.400 ur
Vlažna glina	35–50	30–40
Masiven apnenec	55–70	45–60
Peščenjak	65–80	55–65
Silikatna magmatska kamnina (npr. granit)	65–85	55–70
Bazična magmatska kamnina (npr. bazalt)	40–65	35–55
Diorit	70–85	60–70

Za vodoravne sisteme do 30 kW se specifična toplotna zmogljivost podtalja lahko oceni po vrednostih iz Tabela 2.2. Enako kot za navpične je za večje sisteme potrebno z modelnimi izračuni natančneje določiti potencial tehnično izkoristljive toplote.

Tabela 2.2: Specifična toplotna zmogljivost podtalja za vodoravne sisteme do 30 kW [4]

Vrsta geološke plasti	Specifična toplotna moč – površinska [W/m ²]	
	Delovanje s polno zmogljivostjo 1.800 ur	Delovanje s polno zmogljivostjo 2.400 ur
Suha nekohezivna zemljina	10	8
Vlažna kohezivna zemljina	20–30	16–14
Prod in pesek zasičen z vodo	40	32

Za izrabo podzemne vode za namen ogrevanja ali hlajenja je potrebno zagotoviti oz. določiti stalno črpanje nazivnega pretoka priključene toplotne črpalke, zato mora biti

zagotovljena ustrezna zmogljivost vodnjaka in izdatnost vodonosnika. Slednja je odvisna od lokalnih hidrogeoloških razmer, sama zmogljivost pa tudi od zgradbe vodnjaka. Preveritev zmogljivosti vodnjaka in izdatnosti vodonosnika se izvede s črpalnim poizkusom. Približna vrednost za pretok je 0,25 m³/h na kW moči uparjalnika, pri čemer morata biti zmogljivost vodnjaka in izdatnost vodonosnika tolikšni, da zagotavljata stalno črpanje nazivnega pretoka. Potrebna izdatnost vodonosnika se določi z naslednjo enačbo [4]:

$$Q_m = \frac{\Phi_e}{dT \times c, \rho_c} = \frac{\Phi_{ogrev} - \Phi_{elekt}}{dT \times c, \rho_c}, \quad (2.2)$$

kjer je:

Q_m – pretok črpane vode [kg/s],

Φ_e – moč uparjalnika oziroma moč, pridobljena iz vode [W],

dT – temperaturna razlika [K] prenosnika toplote na vstopni in izstopni strani,

c, ρ_c – specifična toplotna zmogljivost prenosnika toplote [J/(kg·K), J(m³·K)].

2.4.3 Odločitvena shema za izbiro vrste zajetja

Kot izhaja že iz predhodno opredeljenega, je izbira vrste zajetja odvisna predvsem od naravnih in drugih danosti, ki so na voljo na lokaciji posega. Z GTČ je mogoče izkoriščati plitvo geotermalno energijo tudi za sisteme ogrevanja z višjimi temperaturami vse do 70 °C ali za sisteme hlajenja s temperaturo nižjo od 12 °C. [4]

Zajem toplote iz zemlje je mogoč na več načinov, ki se jih razvršča glede na vir odvzema in glede na stik prenosnika toplote z okoljem. V Tabela 2.3 je opredeljena osnovna shema odločanja za način zajetja plitve geotermalne energije. [4]

Tabela 2.3: Odločitvena shema za izbiro načina zajetja plitve geotermalne energije [4]

Prednostno Od 1 do 5	Način zajetja	Odpri sistem	Zaprti sistem
1	Hidrotermalni sistem: Zajetje za izkoriščanje površinske vode	Ali je v bližini potok/ribnik/jezero/ morje?	X
2	Vrtina, vodnjak za izkoriščanje podzemne vode	Ali je na lokaciji vodonosnik, ki omogoča črpanje zelene količine vode?	X
3	Izkop na globini od 1,2 do 2 m	X	Ali je na lokaciji dovolj velika površina za izkop?
4	Košare globine 5–8 m, piloti globine > 8 m	X	Ali so predvideni večji izkopi za gradbene konstrukcije?
5	Vrtine (globine običajno > 50 m) za geosondo	X	Ali je na lokaciji prostor in dostop za vrtanje vrtine?

Pri izvedbi izkoriščanja plitve geotermalne energije je pomembno, da imajo tla visoko sposobnost prevajanja toplote. Na ta način se potrebna toplota hitreje prenese do toplotnih izmenjevalnikov v tleh oziroma v primeru hlajenja stran od njih. V primeru skladiščenja toplote v tleh pa to pomeni večje izgube. [4]

Smernice za vrtanje v plitvi geotermiji poleg povzetega v tem poglavju služijo kot osnovne usmeritve tako za izvajalce kot načrtovalce vrtin.

2.4.4 Omejitve in dejavniki v okolju za izvedbo zajetij

Pred načrtovanjem izrabe plitve geotermalne energije in izbiro posameznega načina zajetja je potrebno preveriti dejavnike in omejitve izkoriščanja, ki vplivajo na gradnjo teh sistemov. Glavni izključitveni dejavnik so ožja vodovarstvena območja (prvi in drugi varstveni režimi: VVO I in VVO II), opozorilni dejavniki pa so plazovi, območja anhidrita, močnejše zakraselosti, bližina zajetij vodnih virov. Opozorilni dejavniki vplivajo na

omejitev možnosti izvedbe, niso pa izključitveni, saj je mogoče s skrbnim in načrtovanim vrтанjem znatno zmanjšati tveganje za poškodbe naprav ali okolja. V teh primerih je tip zajetja in izvedbo potrebno prilagoditi razmeram na lokaciji. [7]

V postopku omejitev lokacije je tako potrebno iz javno dostopnih podatkov preveriti zgoraj navedene izključitvene in opozorilne dejavnike. Za slednje se v sklopu načrtovanja glede na ugotovitve predpiše ustrezne ukrepe, kot so omejitve globine vrтанja, ustrezno tesnjenje, brez reinjekcije, le določene izvedbe. V kolikor z izvedenimi ukrepi ni mogoče zagotoviti zmanjšane tveganja, pa izvedba ni dovoljena, kot recimo v primeru nestabilnih tal z visoko verjetnostjo plazov, umetnih jam, vdorov slane vode. [7]

Izvedba vrtin za raziskovanje in izkoriščanje je pravno urejena z dvema krovnama zakonoma, in sicer za tla z Zakonom o rudarstvu in za vode z Zakonom o vodah. Nadalje se področje ureja tudi s številnimi podzakonskimi akti. Glede na globino vrtine in predvideno lokacijo je skladno z zakonom v določenih primerih potrebno pridobiti ustrezno dovoljenje. Za vse vrtine na varovanih in ogroženih območjih je potrebno pridobiti dovoljenje za raziskavo podzemnih voda. [4]

3 ENERGETSKE NAPRAVE ZA IZKORIŠANJE PLITVE GEOTERMALNE ENERGIJE

3.1 SISTEMI ZA IZRABO TOPLOTE OKOLJA

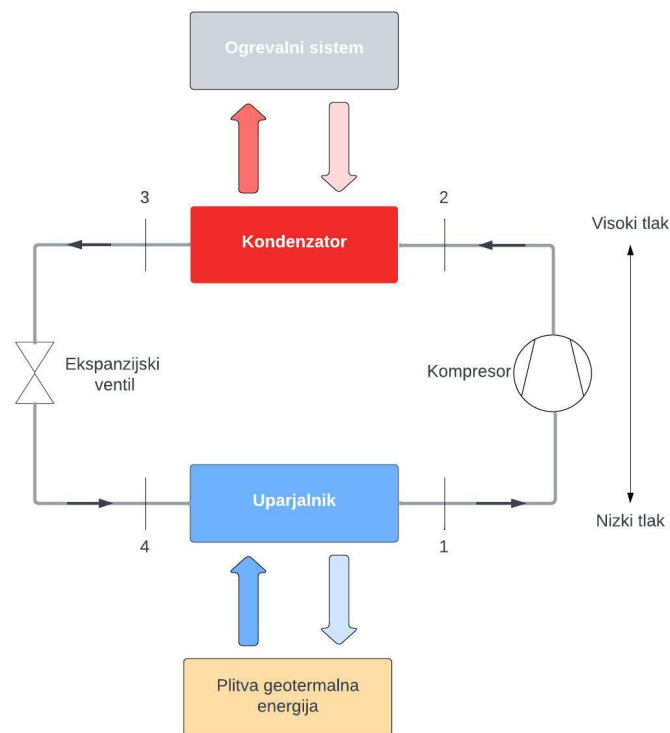
Sistem za izrabo toplote okolja lahko definiramo kot skupek naprav in instrumentov, ki so potrebni za proizvodnjo, distribucijo, shranjevanje in izmenjavo toplote. Namen sistemov je zadovoljitev energetskih potreb stavbe ali infrastrukturnih objektov na splošno. V nadaljevanju so predstavljeni glavni elementi tovrstnih tehničnih sistemov. [1]

3.2 TOPLOTNA ČRPALKA

Toplotna črpalka je energetska naprava, ki s pomočjo dodatnega dela iz okolice odvzame toploto na nižjem temperaturnem nivoju in jo prenese v termodinamični sistem na višjem temperaturnem nivoju. Osnovna oblika delovanja je enaka kot pri hladilniku, pri čemer se seveda razlikuje oblika energije, ki je namenjena končnemu uporabniku. Prvotni namen toplotne črpalke je ogrevanje, pri čemer je v posameznih primerih možno tako ogrevanje kot hlajenje. Skladno z zakoni termodinamike je prenos toplote možen samo iz sistema z višjo temperaturo na sistem z nižjo temperaturo. Obratno ni mogoče, razen če v sistem dovedemo dodatno delo. Takšen sistem je toplotna črpalka ali hladilnik oz. hladilne naprave. [11]

Toplotna črpalka ima štiri glavne sestavne dele, ki so shematsko prikazani na Slika 3.1. Kompresor služi za stiskanje delovne snovi (hladivo) iz nizkega tlaka na visoki tlak. Posledično se hladilnemu plinu poviša tudi temperatura. Pri visokem tlaku se s

kondenzacijo plina v kondenzatorju odvzame toplota, ki spremeni stanje iz pregrete pare v nasičeno paro, iz te v nasičeno tekočino in naprej v podhlajeno tekočino. Delovna snov potuje pod visokim tlakom skozi ekspanzijski ventil, kjer se hitro razširi zaradi nizkega tlaka na drugi strani. Zaradi hitrega padca tlaka hitro pade tudi temperatura. Delovna snov z nizkim tlakom in temperaturo v uparjalniku odvzema toploto okolice (zemlje, vode, zraka). Zaradi dovedene toplote se delovni snovi spremeni stanje z nizko vsebnostjo pare v nasičeno paro in naprej v pregreto paro, ki jo kompresor stisne na visoki tlak. [11]



Slika 3.1: Shematski prikaz delovanja toplotne črpalke [11]

Zgornji krožni proces lahko termodinamično opišemo v idealnem primeru s Carnotovim krožnim procesom. V tem primeru so kot opisano štiri spremembe stanja, in sicer [11]:

- 1-2 adiabatna in izentropna sprememba stanja z dovajanjem dela, v primeru kompresijskih toplotnih črpalk je dovedeno delo električna energija za delovanje kompresorja;

- 2-3 izobarna in isotermna kondenzacija, prenos toplote za ogrevanje in toplo vodo;
- 3-4 adibatna in izentropna ekspanzija skozi ekspanzijski ventil, ki se običajno uravnava glede na temperaturo v uparjalniku in zagotavlja pregreto paro za uparjalnik;
- 4-1 izobarna in izotermna evaporacija, odvzem toplote iz okolja s pomočjo uparjalnika.

Za približek realnemu stanju se lahko zgornje spremembe stanj nadgradijo z dodatnimi termodinamičnimi opisi. V realnosti delo ekspanzije ne obstaja in posledično se zaradi ekspanzijskega ventila specifična toplota zmanjša. V kolikor hladivo ni v stanju pregrete pare, se kompresor lahko resno pokvari. Zato mora hladivo v ventil vstopiti v stanju suhe pare, kar se doseže tako, da se za uparjalnik namesti ločevalnik kapljevine. To vpliva na zmanjšanje specifične toplote in posledično mora kompresor opraviti dodatno delo. V realnem krožnem procesu vedno nastopi podhladitev zgoščenega hladiva, saj je zelo težko doseči popolnoma nasičeno kapljevinsko stanje hladiva. Podobno kot v primeru podhlajanja prihaja tudi do pregrevanja hladiva v stanju nasičene pare, saj je težko doseči popolnoma nasičeno paro po izstopu iz uparjalnika. Pregrevanje se lahko doseže na več načinov. Povečanje grelnega števila COP se lahko doseže z notranjo regeneracijo toplote z namestitvijo prenosnika toplote med kondenzator in ekspanzijski ventil. Seveda je v postopku kompresije potrebno upoštevati učinke zaradi nepovračljivosti, kar vpliva na zmanjšanje učinkovitosti. [11]

Učinkovitost delovanja toplotne črpalke ponazarja grelno število ali koeficient učinkovitosti COP, ki je določen kot (za primer kompresijskih toplotnih črpalk) [11]:

$$COP_H = \frac{|Q_{ogr}|}{W}, \quad (3.1)$$

kjer je:

COP_H – koeficient učinkovitosti TČ za gretje,

Q_{ogr} – razpoložljiva toplota za ogrevanje [kWh],

W – vloženo električno delo za delovanje [kWh].

$$COP_C = \frac{Q_{hl}}{W}, \quad (3.2)$$

kjer je:

COP_C – koeficient učinkovitosti TČ za hlajenje,

Q_{hl} – proizveden hlad za hlajenje [kWh],

W – vloženo električno delo za delovanje [kWh].

Zgornje enačbe lahko zapišemo tudi za moči, pri čemer sta v števcu grelna oz. hladilna zmogljivost, v števcu pa dovedena električna moč. Pri tem moramo pri realnem krožnem procesu upoštevati še dodatno porabo električne moči, ki jo potrebujemo zaradi izgub. Na koeficient učinkovitosti pa močno vpliva tako temperatura vira toplote (geotermalna energija) kot tudi temperatura ponora toplote (temperatura medija ogrevalnega sistema). [11]

Proizvajalci toplotnih črpalk so skladno s standardi dolžni podati koeficient učinkovitosti COP ali razmerje primarne energije za delno obremenitev pri notranji temperaturi 20 °C in določeni zunanji temperaturi T_j , saj je le-ta odvisen od temperaturne razlike. Tako so v tehničnem listu podane različne vrednosti COP za določen model toplotne črpalke. [12]

Učinkovitost Carnotovega krožnega procesa je glede na termodinamične osnove stiskanja pare močno odvisna tako od temperature sistema, v katerega dovajamo toploto, kot od temperature vira plitve geotermalne energije, ki ga izkoriščamo. Za razliko od toplote zrake je kot predstavljeno v poglavju 2, temperatura plitvega podzemlja bistveno bolj konstantna. Tako na učinkovitost vpliva predvsem temperatura v ogrevalnem/hladilnem sistemu. Glede na to, da je COP odvisen od navedene toplotne razlike, se za določitev energetske učinkovitosti skozi celotno leto uporablja sezonska energijska učinkovitost pri ogrevanju prostorov SCOP. Ta je definirana kot razmerje med toploto, ki jo za ogrevalni sistem skozi leto generira TČ, in mehanskim delom

kompresorja za prenos te toplote v preučevanem obdobju. Za primer hlajenja je definirana sezonska energetska učinkovitost hlajenja SEER kot razmerje med generirano toploto TČ v hladilnem načinu delovanja. Navedena kazalnika sta certificirana in predpisana z evropsko zakonodajo in standardi. [1]

Glede na način delovanja v osnovi ločimo monovalentno in bivalentno obratovanje. Pri slednjem je možnih več obratovalnih režimov. V monovalentnem načinu obratuje toplotna črpalka samostojno, pri bivalentnem pa je dodan alternativni vir, ki je lahko kurilna naprava na fosilno gorivo, sončni kolektorji ali hranilnik toplote. [11] Za zagotavljanje potreb po toploti se lahko tako predvidi bivalentno obratovanje s kotlom na zemeljski plin, pri čemer so za večjo učinkovitost toplotne črpalke dodatni tudi hranilniki oziroma zalogovniki toplote in hladu.

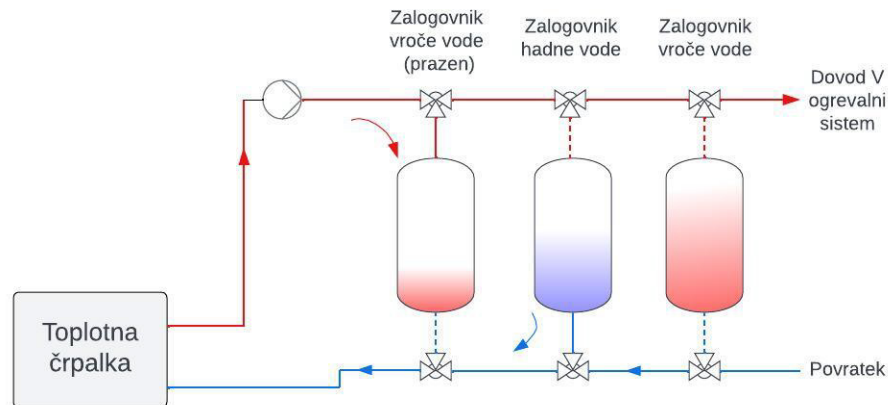
3.3 HRANILNIKI TOPLOTE

Hranilniki toplote predstavljajo tehnologije oziroma sisteme, ki omogočajo za določeni časovni interval shranjevanje energije za ogrevanje in hlajenje. Definirani so glede na čas hranjenja kot kratkoročni (urni, dnevni), srednjeročni (tedenski) in dolgoročni (glede na letne čase). S hranilniki toplote dosežemo številne prednosti za izvedbo ogrevanja in hlajenja s toplotno črpalko. Z vgradnjo hranilnika v sistem za ogrevanje ali hlajenje se učinkoviteje izrabi OVE, omogoči pokrivanje vršnih potreb, poveča se izkoristek hlajenja in ogrevanja, kot tudi poveča zanesljivost delovanja. [11]

V primeru ohlajanja je smiselno hranilnik napolniti v nočnem času, ko je notranja temperatura najnižja in je posledično največji izkoristek COP toplotne črpalke. Obratno pa je smiselno pri ogrevanju, saj je podnevi temperatura najvišja. Navedeno je še posebej izrazito pri toplotnih črpalkah zrak – voda. [11]

Obratovanje toplotnih črpalk je lahko prilagojeno tudi glede na ceno električne energije ali na proizvodnjo sončnih elektrarn na strehi stavbe. S hranilniki toplote tako lahko

toploto proizvajamo, ko je elektrika najcenejša ali jo imamo veliko (v primeru proizvodnje sončne elektrarne) ter jo shranimo za čas, ko je elektrika dražja (za nočni čas ali oblačne dni v primeru sončne elektrarne). Primer vezave različnih zalogovnikov je prikazan na Slika 3.2.



Slika 3.2: Shematski prikaz primera delovanja priključenih treh zalogovnikov [11]

Možne so različne konfiguracije delovanja hranilnika toplote v kombinaciji z delovanjem toplotne črpalke tako za ogrevanje kot za hlajenje. Za sanitarno toplo vodo se predvidi ločeni hranilnik, ki ima tudi možnost dogrevanja, da se lahko predvidi pregrevanje STV. Večji vodni hranilniki toplote so energetske učinkovitejši in jih lahko izvedemo tudi v večjem številu. Seveda se s tem poveča potreba po prostoru za postavitev in vgradnjo. Na Slika 3.2 je prikazan sistem s tremi zalogovniki, kjer ima prvi vlogo vročega rezervoarja, drugi hladnega in tretji zopet vlogo vročega rezervoarja. Prvi rezervoar se trenutno polni, drugi »hladni« pa se prazni. Možne pa so tudi druge kombinacije glede na potrebe. [11]

3.4 BIVALENTNI OBRATOVALNI REŽIM

Ogrevanje s toplotno črpalko na bivalentni obratovalni režim pomeni, da je poleg toplotne črpalke tudi dodatna kurilna naprava. Slednja je lahko kotel na zemeljski plin ali kotel na drugi vir energije. Dodatni vir lahko služi za pokrivanje koničnih potreb po

toplota v času nižjih zunanjih temperatur oziroma povečanih potreb po STV. Obratovanje z dodatnim virom je možno na več načinov. Glede na to, da je v primeru izrabe plitve geotermalne energije temperatura vira razmeroma stalna, je toplotna črpalka učinkovita tudi v dneh z nizko zunanjo temperaturo. Posledično ni potrebno, da dodatni vir v celoti pokriva potrebe po toploti v zimskih mesecih. Ob upoštevanju bivalentnega obratovalnega režima lahko optimalno načrtujemo obratovanje toplotnih črpalk. [11]

3.5 ZUNANJI IZMENJEVALNIKI TOPLOTE

Izmenjevalniki toplote so konstruirani za doseg največjega prenosa toplote med toplotno črpalko in plitvo geotermalno energijo. V primeru izrabe podzemne vode imamo opravka večinoma z odprtimi sistemi, ki s črpalko prenašajo podzemno vodo na uparjalnik v toplotni črpalki. Pred uparjalnikom je potreben filter za čiščenje nečistoč (pesek itn.), ki bi lahko poškodovale uparjalnik. Za izrabo toplote iz tal pa se uporabljajo zaprti sistemi, kjer je v ceveh specifična tekočina in se toplota prenaša na njo preko tankih kovinskih sten. [1] Podrobno je izmenjava toplote med plitvim podzemljem in energetska naprava opisana v poglavju 2.

3.6 OGREVALNI/HLADILNI SISTEM STAVBE

Notranje ugodje v stavbi je osnovni namen ogrevalnega ali hladilnega sistema. Notranje udobje stavbe je povezano s toplotnim ugodjem, osvetljenostjo, kakovostjo zraka itn. Človek doseže toplotno ugodje, ko je v toplotnem ravnotežju z okolico, v kateri se nahaja. Navedeno je zelo pomembno za dobro počutje in zdravje uporabnikov stavbe. Stanje toplotnega ugodja je povezano z več parametri, in sicer s temperaturo zraka v prostoru, temperaturo obodnih površin, relativno vlažnostjo, hitrostjo zraka. Na stanje toplotnega ugodja pa vplivajo tudi človekovi parametri, kot so spol, starost, zdravstveno stanje, obleka, vrsta dejavnosti in aktivnosti. Toplotno ugodje je tako odvisno od parametrov, na katere lahko posameznik vpliva in od mikroklimatskih pogojev, ki so odvisni od strukture stavbe in delovanja energetskih sistemov (ogrevanje,

prezračevanje, klimatizacija). Za stavbe, kjer se izvaja zdravstvena dejavnost, je za dosego notranjega udobja nujno potrebno centralno prezračevanje z možnostjo hlajenja. Mikroklimatske razmere v zdravstvenih domovih so določene z zakonodajo in se morajo v tovrstnih stavbah preverjati tudi z meritvami mikroklimatskih razmer.

V obstoječem zdravstvenem domu se za ogrevanje uporabljajo radiatorji. So osnovni in že dolgo znani tip ogrevalnega sistema in so danes večinoma panelnega tipa. Najučinkovitejši so aluminijasti radiatorji, ki imajo gladko prednjo ploskev in vgrajena pokončna rebra, med katerimi se dodatno dviguje zrak. V vseh primerih radiatorjev je možen srednji temperaturni režim ogrevanja. [13]

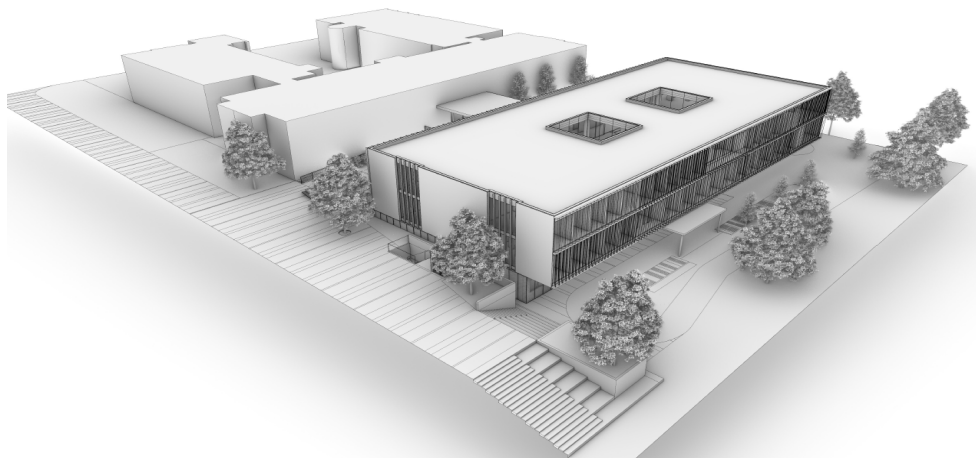
Za predvideno širitev se ogrevalno hladilni sistem načrtuje v sklopu strojnih inštalacij, ki so sestavni del projektne dokumentacije. Za novo stavbo je predvideno talno ogrevanje v kombinaciji vršnega toplozračnega dogrevanja iz prezračevalnega sistema. V novogradnjah se danes večinoma uporablja talno ogrevanje, ki predstavlja vrsto ploskovnega ogrevanja. Toploto se v prostore oddaja s sevanjem preko ploskev, ki pokrivajo velike površine. Tovrstni ogrevalni sistem je primeren za nizkoenergijske stavbe. Gre sicer za dražjo izvedbo, vendar je s ploskovnim ogrevanjem možen nizkotemperaturni režim ogrevanja, kar v primeru toplotnih črpalk pomembno vpliva na večjo energetske učinkovitost le-teh. [13]

V zdravstvenem domu je še posebej pomembno ustrezno načrtovano prezračevanje in klimatizacija, v sklopu česar je možna tudi izvedba konvektorskega ogrevanja. Za izvedbo prezračevanja in klimatizacije je potrebno v stavbi vgraditi razvodne kanale, skozi katere potuje zrak. S tem se v prvi vrsti vzdržuje ustrezna kakovost zraka v prostorih, ki mora biti za tovrstne ustanove s 100-odstotnim svežim zrakom. V prezračevalnem sistemu pa se lahko predvidi tudi ogrevanje/hlajenje zraka s toplotno črpalko. Tako za dosego ustreznega zraka v prostorih kot tudi za dosego najboljše učinkovitosti je zelo pomembno ustrezno načrtovanje postavitve prezračevalnih jaškov in konvektorjev. [13]

4 NAČRTOVANJE ENERGETSKEGA SISTEMA

Za načrtovanje energetskega sistema je v prvem koraku potrebno čim natančneje poznati meteorološke podatke za izbrano lokacijo. Glede na klimatske podatke se za dosego ustreznega bivalnega ugodja z izračunom gradbene fizike določi zahtevane karakteristike predvidenega energetskega sistema za ogrevanje/hlajenje. Sestavni del energetskega sistema so tudi energetske naprave za pretvorbo energije v toploto vključno s sistemom za izrabo primarnega vira. V predmetnem poglavju so obdelane samo potrebe glede na izbrani način ogrevanja/hlajenja, v poglavju 5 pa je glede na načrtovani sistem preverjen potencial plitve geotermalne energije na lokaciji.

V nadaljevanju je bila potrebna energija za ogrevanje, hlajenje in pripravo STV za novi del zdravstvenega doma, povzeta po izdelani gradbeni fiziki, ki je sestavni del projektne dokumentacije. Predvidena širitev predstavlja arhitekturno in tehnično zahteven objekt, pod katerim je predvidena tudi gradnja dveh nivojev podzemnih garaž. Natečajna rešitve za širitev in navezava na obstoječi zdravstveni dom je prikazana na Slika 4.1.



Slika 4.1: Prikaz širitve zdravstvenega doma v navezavi z obstoječim delom [14]

Za obstoječo stavbo zdravstvenega doma so bile potrebe po ogrevanju in pripravi STV določene na podlagi merjene porabe zemeljskega plina na števcu, torej pred pretvorbo v toploto. S temi podatki je znana raba končne energije.

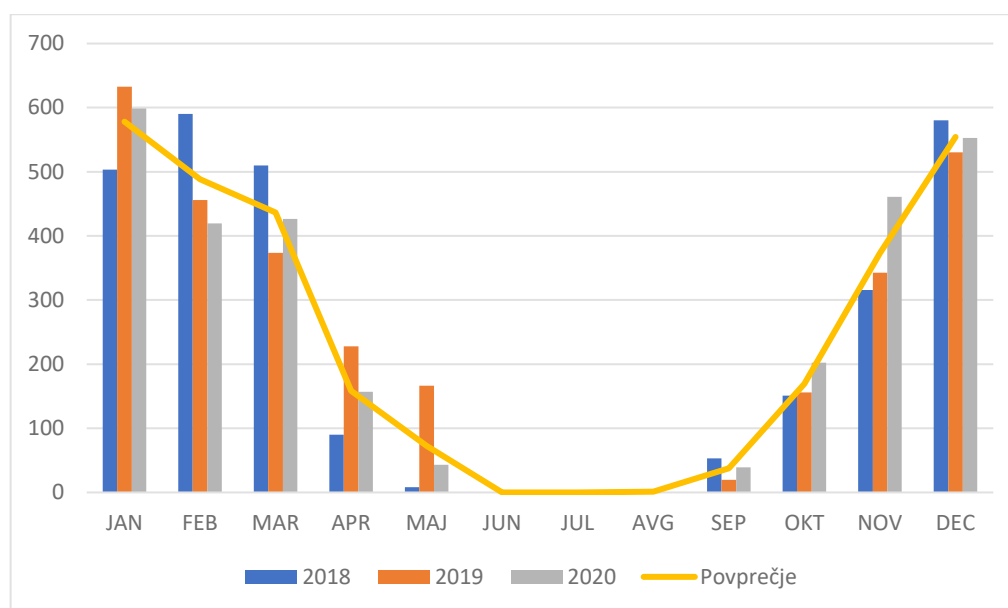
Načrtovanje energetskega sistema za zdravstveno dejavnost mora biti še posebej natančno, saj je potrebno zadostiti predpisanim mikroklimatskim razmeram. Skladno s predpisi in tehničnimi normativi se mora predvideti prisilno prezračevanje prostorov, kot so ambulante, čakalnice, hodniki, pomožni prostori, sanitarije itn. Za prostore z okvarjenim zrakom je potrebno zagotavljanje ustreznega podtlaka, kar preprečuje širjenje smradu. V času ogrevanja je za zagotavljanje ustrezne vlažnosti potrebno tudi tlačno pršno vlaženje. Glede na to, da morajo biti za različne prostore zagotovljene različne mikroklimatske razmere, je potrebno predvideti ločene prezračevalno klimatske sisteme. [15]

Za obstoječo stavbo so znane letne porabe energije za pretvorbo v toploto, ki so bile uporabljene kot osnova za določitev potrebnih moči za zamenjavo vira ogrevanja. Ocena rabe energije za pretvorbo v toploto za STV je bila določena na podlagi porabe pitne vode in metod za izračun zmogljivosti, predpisanih s standardom, opredeljenim v viru [11]. Poraba končne energije za pretvorbo v toploto za pripravo STV je bila odšteta od skupne porabe končne energije. V obstoječi stavbi se priprava STV vrši s pomočjo kotla na zemeljski plin.

4.1 METEOROLOŠKI PODATKI ZA LOKACIJO

Letni temperaturni primanjkljaj poda osnovni podatek za oceno potrebne energije, ki se potrebuje za ogrevanje stavbe. Temperaturni primanjkljaj je vsota dnevni razlik temperature med 20 °C in zunanjo dnevno povprečno temperaturo zraka za dni od 1. januarja do 31. decembra, ko je dnevna povprečna temperatura nižja ali enaka 12 °C. Dnevna povprečna temperatura je za prag 12 °C izračunana iz treh izmerkov: ob 7.00, 14.00 in 21.00 po srednje evropskem času.

Klimatske značilnosti na območju naselja Domžale se je določilo kot povprečje med klimatsko postajo Ljubljana Bežigrad in postajo Letališče Jožeta Pučnika. Na ta način se je klimatske podatke za Ljubljano nekoliko korigiralo, saj so v mestnem središču temperature vsaj za kakšno °C višje. Po zračni razdalji je postaja na letališču oddaljena ca. 12,1 km, postaja na Bežigradu pa ca. 10,3 km. Mesečni temperaturni primanjkljaj pri pragu 12 °C za obdobje 2018 – 2020 je prikazan na spodnjem grafu .



Graf 4.1: Mesečni temperaturni primanjkljaj za obdobje 2018–2020 [16]

4.2 DIMENZIONIRANJE SISTEMA TOPLOTNIH ČRPALK

Vzpostavljen sistem mora zadovoljiti energetske potrebe po ogrevanju, hlajenju in pripravi sanitarne tople vode. Po standardu EN 13612 je toplotni tok oziroma moč oskrbe sistema določena kot vsota potrebne moči za ogrevanje, moči za pripravo STV in moči dodatnega sistema z naslednjo enačbo [11]:

$$\dot{Q}_{hp,su} = f_{hl} * \dot{Q}_{hp,hl} + f_{shw} * \dot{Q}_{hp,shw} + f_{as} * \dot{Q}_{hp,as}, \quad (4.1)$$

kjer je:

$\dot{Q}_{hp,su}$ – skupna moč sistema za proizvodnjo toplote (kW),

$\dot{Q}_{hp,hl}$ – potrebna moč za proizvodnjo toplote za ogrevanje stavbe (kW),

f_{hl} – faktor načrtovanja toplotne črpalke za proizvodnjo toplote,

$\dot{Q}_{hp,shw}$ – moč za proizvodnjo STV (kW),

f_{shw} – faktor načrtovanja toplotne črpalke za STV,

$\dot{Q}_{hp,as}$ – potrebna moč za dodatni sistem (kW),

f_{as} – faktor načrtovanja toplotne črpalke za dodatni sistem.

Potrebna moč za proizvodnjo toplote za ogrevanje stavbe se določi v sklopu izračuna gradbene fizike. Za obstoječi zdravstveni dom je potrebna moč določena na podlagi podatkov o obstoječi porabi energije za pretvorbo v toploto. Za novo stavbo je bila potrebna moč določena v sklopu projektne dokumentacije oziroma izračuna gradbene fizike. Dodatnega sistema, ki bi se oskrboval iz TČ v obravnavanem primeru, ni, torej je zadnji člen enak 0. Ločeno pa je za predviden sistem določena potrebna moč za proizvodnjo STV.

V izračunih v nadaljevanju je uporabljen faktor za načrtovanje maksimalne toplotne moči TČ, in sicer 0,95 za ogrevanje in 1 za pripravo STV. [11]

4.2.1 Določitev potrebne moči za ogrevanje stavbe

Maksimalna toplotna moč za ogrevanje stavbe se izračuna kot vsota transmisijskih in ventilacijskih toplotnih izgub ter prispevek dodatnega vira ogrevanja po naslednji enačbi [11]:

$$\dot{Q}_{hp,hl} = \dot{Q}_t + \dot{Q}_v - \dot{Q}_{hu}, \quad (4.2)$$

kjer je:

\dot{Q}_t – toplotna moč za pokrivanje transmisijskih izgub (kW),

\dot{Q}_v – toplotna moč za pokrivanje ventilacijskih izgub (kW),

\dot{Q}_{hu} – razpoložljiva toplotna moč dodatnega sistema (kW).

Za določitev potreb obstoječega zdravstvenega doma je bila izdelana analiza rabe energije za obdobje 2018–2020. Določena je bila povprečna raba energije po mesecih, ki je uporabljena za nadaljnje izračune. Pri določitvi povprečne vrednosti se je pridobljene podatke primerjalo s temperaturnim primanjkljajem in se jih dodatno korigiralo. Podatki o porabah so namreč povzeti po obračunih ZP in ne na podlagi dejanskih meritev za posamezen mesec. Obračun dobavitelj opravi glede na sporočeno stanje ali po vnaprej določenem ključu. Z upoštevanjem temperaturnega primanjkljaja se tovrstna napaka zmanjša oziroma odpravi.

Določena je bila povprečna dnevna raba energije za pretvorbo v toploto za ogrevanje. Na podlagi te pa je bila določena moč sistema ob različnih predpostavkah glede na število ur obratovanja toplotne črpalke oziroma časovne razpoložljivosti t_r .

V analizo so vključeni podatki o porabi zemeljskega plina na števcu, kar vključuje porabo tako za ogrevanje stavbe kot za pripravo sanitarne tople vode. Raba energije za ogrevanje STV je bila v izračunu odšteta od porabe na števcu, torej vse dovedene energije. Ocenjena mesečna raba energije za ogrevanje STV je določena po postopku, opisanem v naslednjem poglavju, kjer je podan tudi izračun. Rezultati izračuna moči TČ za ogrevanje stavbe ob različnih dolžinah razpoložljivega časa obratovanja TČ so po mesecih podani v Tabela 4.1. V poletnem času od junija do konca avgusta ni potrebe po ogrevanju prostorov. Pri določitvi povprečnih dnevni porab so odšteti vikendi, ko stavba ni v uporabi in se le temperira.

Tabela 4.1: Izračunane moči za ogrevanje obstoječe stavbe ZD

Mesec	$Q_{h,f}$ (kWh)	$Q_{h,f,d}$ (kW)	$\dot{Q}_t + \dot{Q}_v$			
			$t_r = 12h$ (kW)	$t_r = 16h$ (kW)	$t_r = 6,6h$ (kW)	$t_r = 8h^*$ (kW)
januar	94.718	4.118	343	257	686	515
februar	71.695	3.585	299	224	597	448
marec	57.587	2.504	209	156	417	313
april	25.824	1.174	98	73	196	147
maj	14.464	629	52	39	105	79

»se nadaljuje«

»nadaljevanje«

Mesec	$Q_{h,f}$ (kWh)	$Q_{h,f,d}$ (kW)	$\dot{Q}_t + \dot{Q}_v$			
			$t_r = 12h$ (kW)	$t_r = 16h$ (kW)	$t_r = 6,6h$ (kW)	$t_r = 8h^*$ (kW)
junij	0	0	0	0	0	0
julij	0	0	0	0	0	0
avgust	0	0	0	0	0	0
september	1.617	74	6	5	12	9
oktober	24.922	1.084	90	68	181	135
november	58.886	2.677	223	167	446	335
december	79.045	3.437	286	215	573	430

Kot je razvidno iz Tabela 4.1, je za pokrivanje obstoječih potreb po ogrevanju potrebna maksimalna moč TČ ca. 685 kW v primeru obratovanja 6,6 h/dan. V kolikor bi TČ obratovala več časa, se potrebna maksimalna moč zmanjšuje, v primeru obratovanja 12 h/dan znaša potrebna maksimalna moč ogrevanja ca. 345 kW. Izračun je bil narejen za obstoječo stavbo, ki je potrebna celovite energetske sanacije. Posamezni ukrepi URE so sicer bili izvedeni, vendar je na stavbi še dodatni potencial. Glede na povprečno porabo v obdobju 2018–2020 znaša specifična letna potrebna dovedena toplota za ogrevanje 82,8 kWh/m²/a.

Za določitev maksimalne moči toplotne črpalke za primer celovite energetske sanacije je bila ocenjena povprečna mesečna potrebna dovedena toplota za ogrevanje Q_{NH} na podlagi specifične Q'_{NH} in povprečnega temperaturnega primanjkljaja v obravnavnem obdobju. S celovitimi ukrepi URE bi bilo mogoče doseči specifično letno potrebno dovedeno toplota za ogrevanja vsaj 65 kWh/m²/a. V Tabela 4.2 je podan izračun povprečne mesečne dovedene toplote za ogrevanje in ocena največje potrebne moči, v kolikor se izvede celovita energetska sanacija stavbe.

Tabela 4.2: Izračunane moči za ogrevanje energetske sanirane stavbe ZD

Mesec	$Q_{h,f}$ (kWh)	$Q_{h,f,d}$ (kW)	$\dot{Q}_t + \dot{Q}_v$			
			$t_r = 12h$ (kW)	$t_r = 16h$ (kW)	$t_r = 6,6h$ (kW)	$t_r = 8h^*$ (kW)
januar	66.616	2.896	241	181	439	362

»se nadaljuje«

»nadaljevanje

Mesec	$Q_{h,f}$ (kWh)	$Q_{h,f,d}$ (kW)	$\dot{Q}_t + \dot{Q}_v$			
			$t_r = 12h$ (kW)	$t_r = 16h$ (kW)	$t_r = 6,6h$ (kW)	$t_r = 8h^*$ (kW)
februar	56.289	2.814	235	176	426	352
marec	50.306	2.187	182	137	331	273
april	18.235	829	69	52	126	104
maj	8.367	364	30	23	55	45
junij	0	0	0	0	0	0
julij	0	0	0	0	0	0
avgust	164	7	1	0	1	1
september	4.315	196	16	12	30	25
oktober	19.550	850	71	53	129	106
november	42.999	1.955	163	122	296	244
december	63.879	2.777	231	174	421	347

Tudi po izvedeni celoviti energetske sanaciji bi potrebna moč TČ za ogrevanje morala znašati ca. 440 kW. Glede na to, da je v obstoječi kotlovnici kotel na zemeljski plin moči 586 kW, ga je smiselno uporabiti za pokrivanje vršnih potreb v obdobju nižjih temperatur. S tem se za obstoječi del smiselno predvideti TČ nekoliko manjše moči oz. se upošteva tudi razpoložljivo moč dodatnega sistema. Že v mesecu marcu je namreč potrebna maksimalna moč TČ ca 330 kW, kar zadošča tudi za november.

Za predvideno širitev je bil v sklopu izdelave projektne dokumentacije izdelan izračun gradbene fizike in projekt strojnih inštalacij (vir [17]). Potrebna toplota za ogrevanje stavbe se določi skladno s standardom SIST EN ISO 13790 in je izračun vključen tudi v Tehnični smernici za graditev. Izračun v sklopu priprave projektne dokumentacije je izdelan skladno z navedeno tehnično smernico oziroma standardom.

V projektu strojnih inštalacij so bile izdelane samo rešitve iz sekundarne strani toplotnega sistema, torej brez načrtovanja sistema toplotnih črpalk in izrabe plitve geotermalne energije. Podatki o potrebnih močeh so podani v strojnih inštalacijah. Potrebna moč za ogrevanje znaša 261 kW: predstavlja transmisijsko moč 90 kW (talno ogrevanje) in potrebno moč za ogrevanje preko prezračevanja 176 kW (HVAC sistem). Potrebna moč za hlajenje znaša 427 kW in predstavlja 190 kW za pokrivanje toplotnih

dobitkov (obsežne steklene površine) in 237 kW hladilno moč prezračevalnih naprav. [17]

V novem delu ZD je predvidena strojnica, ki bo locirana v kletni etaži ob obstoječi plinski kotlovnici. V novi strojnici se predvidi tudi možnost navezave na obstoječo plinsko kotlovnico. Na ta način je po eni strani omogočena rezerva za primer okvar in začasnih zaustavitev, po drugi strani pa lahko obstoječi kotel na ZP pokriva tudi vršne potrebe po ogrevanju. V izračunu navedeni kotel upoštevamo kot razpoložljivo toplotno moč dodatnega sistema. Na ta način imamo rezervo za pokrivanje vršnih potreb, če določen razpoložljiv potencial plitve geotermalne energije ne zadošča.

Za predvideno širitev tako ni potrebno računsko določiti najvišje potrebne moči za ogrevanje prostorov, saj je ta znana iz podatkov projektne dokumentacije. V nasprotnem primeru bi bilo potrebno s pomočjo ustrezne programske opreme izračunati gradbeno fiziko stavbe predvidene širitve ZD. Kot že navedeno, je v sklopu zdravstvene dejavnosti potrebno upoštevati tudi HVAC sistem, ki je nujen za zagotavljanje ustreznih mikroklimatskih pogojev. Poleg potrebnih moči je bila v sklopu izračunov gradbene fizike določena tudi potrebna toplota za ogrevanje [17]:

- Q'_{NH} – potrebna toplota za ogrevanje na m^2 kondicionirane površine znaša 25 kWh/m²/a;
- Q'_{NC} – specifični letni hlad za hlajenje znaša 35 kWh/m²/a.

Kondicionirana površina je enaka uporabni površini predvidene širitve in znaša 4.477 m². Ob upoštevanju navedenega in povprečnega temperaturnega primanjkljaja je bila določena potrebna toplota za ogrevanje Q_{NH} po mesecih, ki služi za nadaljnjo analizo.

4.2.2 Določitev potrebne moči za pripravo STV

Pri dimenzioniranju toplotne črpalke za sanitarno vodo je potrebno poznati dnevne potrebe po STV v odvisnosti od posameznega obdobja. Sočasno se dimenzionira tudi hranilnik sanitarne vode, ki omogoča predpripravo v nočnem času oziroma v času nižje

tarife. Izračun zmogljivosti ogrevanja STV se določi glede na značilne potrebo po STV v ustanovi. Dnevno potrebna toplota za pripravo STV se izračuna kot [11]:

$$Q_{shw,d,60} = 0,00116 * N * \dot{m}_d * (\theta_{hw} - \theta_{cw}), \quad (4.3)$$

kjer je:

$Q_{shw,d,60}$ – dnevna potrebna toplota za zagotavljanje STV (kWh),

N – število uporabnikov,

\dot{m}_d – dnevna potreba po topli vodi na uporabnika (l/(osebo*dan)),

θ_{hw} – temperatura tople vode na izstopu (°C),

θ_{cw} – temperatura hladne vode iz vodovoda (°C).

Nadalje se potrebna moč toplotne črpalke za zagotavljanje želene temperature na izstopu izračuna po naslednji enačbi:

$$\dot{Q}_{shw,d,60} = \frac{Q_{shw,d,60}}{\tau_{hp,el}}, \quad (4.4)$$

kjer je:

$Q_{shw,d,60}$ – dnevna potrebna toplota za zagotavljanje STV (kWh),

$\tau_{hp,el}$ – dnevni čas, ko je na voljo toplota iz TČ (h) oziroma čas razpoložljivosti.

Letna raba toplote za ogrevanje STV je določena za obstoječi zdravstveni dom in za predvideno širitev. Za obdobje 2018–2020 so bili pridobljeni podatki o mesečnih porabah pitne vode na vodomeru. Ti podatki predstavljajo osnovo za določitev povprečne mesečne porabe tople vode v obstoječem stanju. Mesečna poraba je nadalje določena glede na število delovnih dni v mesecu. Po viru [11] je za bolnišnice povprečna dnevna poraba od 2 do 4 l/m², kar predstavlja dnevno potrebo po topli vodi od ca. 10 do 20 m³/dan. Izračun potrebne moči toplotne črpalke za ogrevanje STV je po mesecih za različne čase razpoložljivosti podan v Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Izračunane potrebne moči za ogrevanje STV glede na čas razpoložljivosti TČ

	DNEVNO POVPREČJE				\dot{Q}_{shw} (kW)		
	\dot{V}_d m ³ /dan	N	m_d (l/dan)	$Q_{shv,d}$ (kWh)	$t_r=12h$ (kW)	$t_r=8h$ (kW)	$t_r=6,6h$ (kW)
januar	29,43	1.500	14.834	825,9	69	103	125
februar	33,85	1.355	17.061	950,0	79	119	144
marec	27,61	1.500	13.916	774,9	65	97	117
april	30,76	1.452	15.504	863,3	72	108	131
maj	26,37	1.500	13.291	740,1	62	93	112
junij	33,08	1.452	16.673	928,4	77	116	141
julij	25,71	1.500	12.959	721,5	60	90	109
avgust	25,93	1.500	13.070	727,7	61	91	110
september	31,18	1.452	15.716	875,1	73	109	133
oktober	31,14	1.500	15.696	873,9	73	109	132
november	29,62	1.452	14.929	831,3	69	104	126
december	32,38	1.500	16.321	908,7	76	114	138

Iz izračuna je razvidno, da je najvišja potrebna moč ca. 150 kW v primeru časa razpoložljivosti 6,6 h. Glede na to, da so v zdravstvenih domovih velike potrebe po STV in je potrebno dodatno pregrevanje, je glede na potencial plitve geotermalne energije potrebno predvideti čim večji čas razpoložljivosti ali samostojno toplotno črpalko za ogrevanje STV.

Velikost predvidenega hranilnika tople sanitarne vode bo 2 m³, kar omogoča hranjenje določene količine toplote proizvedene s TČ. Izračun hranjene količine STV je mogoče po naslednji enačbi [11]:

$$Q_{shw,set,sel} = 0,00116 * (\theta_{set} - \theta_{cw}) * V_{shw,set,sel} \quad (4.5)$$

kjer je:

$Q_{shw,set,sel}$ – potrebna toplota za ogrevanje shranjene količine STV (kWh),

θ_{set} – nastavljena temperatura tople vode v hranilniku (°C),

θ_{cw} – temperatura hladne vode iz vodovoda (°C),

$V_{shw,set,sel}$ – prostornina hranilnika za STV (litrov).

Izračun po zgornji enačbi določa, da je za 2 m³ velik hranilnik potrebna toplota za ogrevanje na 60 °C ca. 110 kWh. Za doseg te energije mora TČ moči 150 kW delovati 44 min, TČ moči 80 kW pa 1,34 h.

Za novo stavbo ZD je bila v sklopu projektne dokumentacije določena tudi potrebna moč za pripravo STV, ki znaša 80 kW. Predvidena poraba STV se oceni po viru [11] in znaša za novi del ZD od 9 do 18 m³/dan.

4.2.3 Določitev potrebne moči za hlajenje

V obstoječem ZD se hlajenje izvaja pretežno s split klimatskimi enotami. Raba električne energije za klimatske enote se ne spremlja ločeno, zato ni natančnih podatkov, ki bi predstavljali osnovo za izračune.

V diplomskem delu tako izhajamo samo iz podatkov, pridobljenih za predvideno širitev zdravstvenega doma, saj je v tem delu predvidena klimatizacija preko centralnega prezračevalnega sistema s posameznimi ločenimi vejami.

Glede na podatke iz projektne dokumentacije so podatkih projekta strojnih inštalacij o potrebnih močeh za hlajenje naslednji [12]:

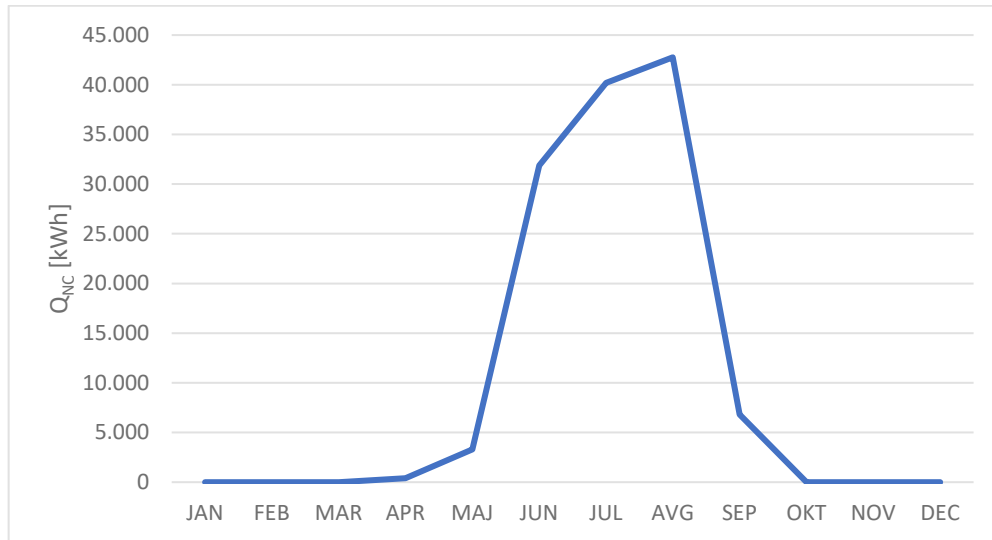
- potrebna moč za hlajenje zaradi toplotnih dobitkov $\dot{Q}_{c,t} = 190$ kW,
- hladilna moč prezračevalnih naprav $\dot{Q}_{c,v} = 237$ kW.

Skupno je potrebna moč hlajenja 427 kW.

Poleg potrebnih moči je bil v sklopu izračunov gradbene fizike določen tudi potrebni specifični letni hlad, ki znaša 35 kWh/m²/a. [17]

Kondicionirana površina je enaka uporabni površini predvidene širitve in znaša 4.477 m². Ob upoštevanju navedenega in povprečnega temperaturnega presežka je bila določena potrebna energija oz. hlad za hlajenje Q_{NC} po mesecih, ki služi za nadaljnjo analizo. Prikaz

predvidene rabe energije za hlajenje nove stavbe ZD je po mesecih z upoštevanjem temperaturnega presežka prikazan na spodnjem grafu.

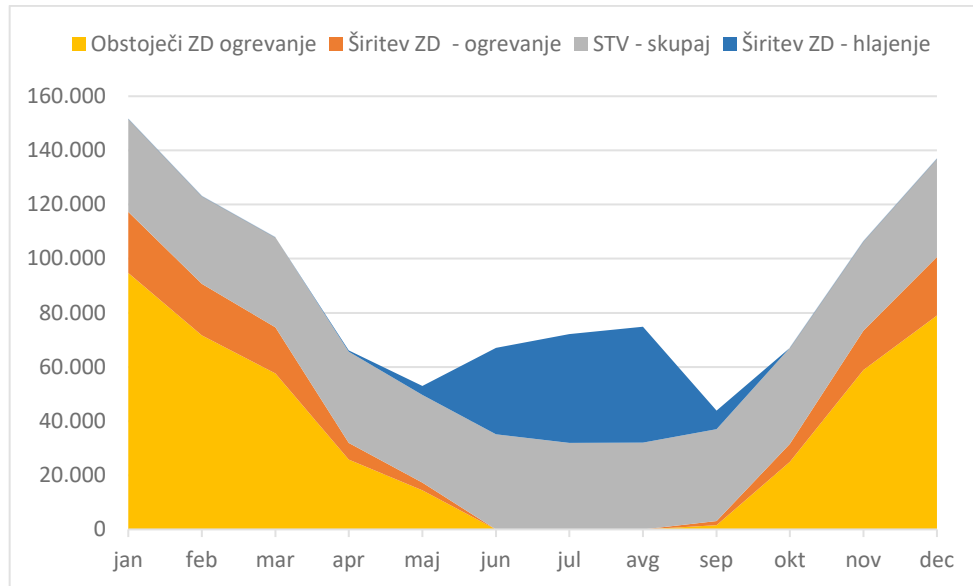


Graf 4.2: Povprečna raba hladu za hlajenje predvidene širitve ZD

Kot je razvidno iz zgornjega grafa, je manjša potreba po hlajenju že v aprilu in maju, glavni del pa nastopi v poletnih mesecih.

4.3 PRIKAZ POVPREČNIH MESEČNIH POTREB PO TOPLOTI

V predhodnih poglavjih je prikazan postopek določitve potrebne toplote za zadovoljitev potreb po ogrevanju prostorov, priprave STV ter hladu za hlajenje. Sistem izrabe plitve geotermalne energije se načrtuje glede na potrebe. Na spodnjem grafu je prikazana povprečna mesečna potreba po toploti za ogrevanje, pripravi STV in hladu za hlajenje. Povprečna mesečna potreba po toploti je določena na podlagi rabe končne energije, torej z upoštevanjem tako toplotnih pribitkov kot toplotnih izgub. Povprečna mesečna potreba po toploti je prikazana na spodnjem grafu.



Graf 4.3: Povprečna mesečna potreba po toploti iz sistema toplotnih črpalk

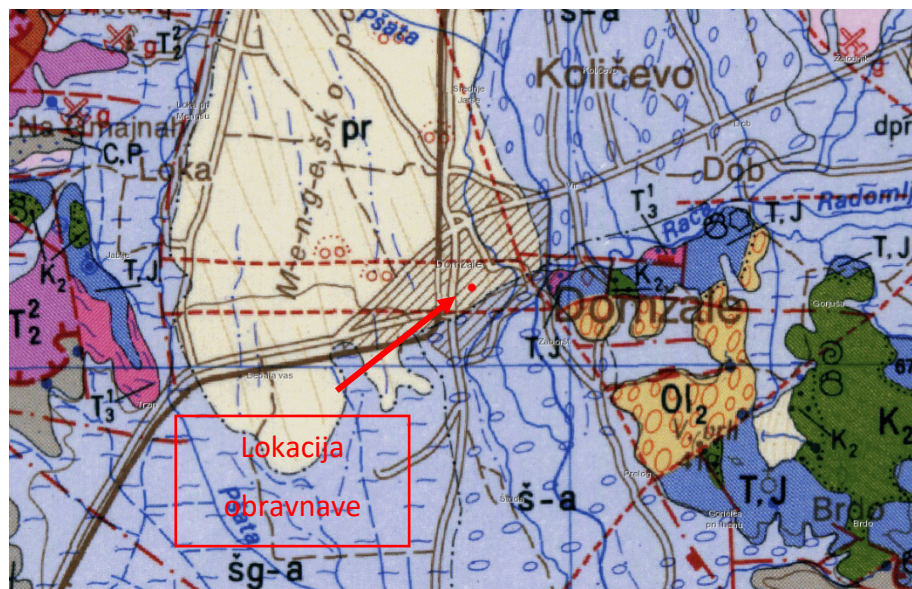
Kot je razvidno iz grafa oziroma pričakovano, je največja potreba v zimskih mesecih, ko je potrebno ogrevati stavbe in zagotoviti toploto za pripravo STV. Ocena potrebne končne energije za obstoječi zdravstveni dom je prikazana brez upoštevanja izvedbe celovite energetske sanacije stavbe. Pri načrtovanju je tako potrebno upoštevati, da se viški potreb za obstoječo stavbo pokrivajo z uporabo kotla na zemeljski plin.

V nadaljevanju je podana ocena potenciala plitve geotermalne energije na lokaciji obravnave. Iz te ocene je razvidno, kakšne so možne moči sistema toplotnih črpalk in ali bo s sistemom možno pokrivati v tem poglavju določene potrebne moči.

5 POTENCIAL PLITVE GEOTERMALNE ENERGIJE

Glede na predhodno določene potrebe za oskrbo objekta s toploto in hladom je potrebno analizirati potencial plitve geotermalne energije na lokaciji. V sklopu projekta širitve Zdravstvenega doma Domžale so bile izvedene hidrogeološke preiskave kot tudi črpalni in ponikalni preizkus. Podatki, potrebni za določitev potenciala izkoriščanja podzemne vode na lokaciji, so povzeti po navedenih raziskavah. V sklopu navedenih raziskav je popisana tudi struktura tal do globine 30 m.

Hidrogeološko gledano se lokacija nahaja na širšem območju Mengeškega polja, ki se nahaja znotraj vodonosnika Ljubljanskega polja. Glede na geološko karto je območje nasuto z do 100 m debelimi kvartarnimi sedimenti. Lokacija se nahaja na mestu meandriranja stare struge reke Kamniške Bistrice. Površinski tok reke se nahaja na zračni razdalji 580 m vzhodno. [18] Geološka karta širšega območja okoli obravnavane lokacije je prikazana na Slika 5.1.



Slika 5.1: Geološka karta zahodnega dela Ljubljanske udorine [19]

5.1 ODLOČITVENA SHEMA ZA NAČIN ZAJETJA

Za pravo odločitev glede zajetja plitve geotermalne energije je potrebno dobro poznavanje lastnosti lokacije. Pred izvedbo zajetja je priporočljiva izvedba raziskovalne vrtine. Brez dobrega poznavanja razmer v različnih globinah je lahko izbira načina zajetja povsem napačna ali pa je posledica neustrezno dimenzioniranja energetskega sistema. V sklopu priprave projektne dokumentacije za širitev ZD Domžale je bilo zaradi nizke globine podzemne vode potrebno za namen gradnje garaže natančno proučiti hidrogeološke lastnosti lokacije. Podzemna voda je bila v sklopu preizkusa zaznana v globini 7 do 8 m. Za namen določitve izdatnosti vodonosnika je bil izveden stopenjski črpalni poizkus. Že na podlagi osnovnih ugotovitev iz črpalnega poizkusa lahko podamo odločitveno shemo za način zajetja. Odločitvena shema je glede na vir [4] in prednostni vrstni red naslednja.

1. Hidrotermalni sistem – odprti: V neposredni bližini ni površinske vode in sistema ni mogoče izvesti.
2. Vrtina, vodnjak – odprti sistem: Glede na preiskave na lokaciji je prisoten obširni in visoko izdatni vodonosnik. Podzemna voda se pojavi že na globini 8 m.
3. Izkop na globini od 1,2 do 2 m – zaprti sistem: Izvedba zaradi lokacije ni možna. V bližini so pozidane površine. Gre za večjega porabnika, zato bi bilo posledično potrebno imeti večjo površino.
4. Košare globine 5–8 m, piloti globine > 8 m – zaprti sistem: V sklopu širitve zdravstvenega doma je predvidena tudi gradnja dvoetažne podzemne garaže. Predviden izkop je do globine ca. 10 m. Izvedba tovrstnega sistema je možna tudi v kombinaciji z gradbenimi konstrukcijami gradnje garaž in temeljev. Izvedba je potrebna sočasno z gradnjo.
5. Vrtine (globine običajno > 50 m) za geosondo – zaprti sistem: Izvedba je možna na lokaciji predvidene širitve. Gre za obsežno površino, kje je mogoče vrtanje tudi vrtin večjih globin. Vrtine je potrebno izvesti pred začetkom gradnje oz. v začetnih fazah.

Iz odločitvene sheme je razvidno, da je prva možna izvedba vrtine – vodnjak in nadalje energetskih košar oz. izmenjevalnikov v sklopu gradbenih konstrukcij podzemne garaže. Pred izvedbo vrtine za vodnjak je potrebna v splošnem raziskovalna vrtina z izvedenim črpalno razlivnim poizkusom. V sklopu priprave projekta širitve zdravstvenega doma je bil ta tudi izveden. V nadaljevanju je skladno z odločitveno shemo najprej ocenjen potencial za vrtino – vodnjak, potem pa še za izmenjevalnike ob gradbenih konstrukcijah in na koncu še za geosonde. Glede na določene moči za zagotovitev potreb je pričakovati, da bo potrebna izvedba vsaj dveh sistemov.

Za načrtovanje zajetja plitve geotermalne energije je potrebno poznati podatke o potrebni moči, potrebni letni energiji in bilanci med odvzeto ter vračano energijo, ki se izmenjuje s podtaljem v primeru ogrevanja in hlajenja stavbe. Skladno s tem mora biti načrtovanje zajetja plitve geotermalne energije čim natančnejše, da ne pride do predimenzioniranja in posledične nepotrebne podražitve investicije. Večje naprave in polja geosond se v praksi načrtuje z uporabo analitičnih in numeričnih modelov z vključenimi terenskimi meritvami termične odzivnosti podtalja. Manjše naprave pa se lahko načrtuje po opisanih postopkih. V nadaljevanju se je za prvo oceno uporabil opisani postopek, ki sicer ni zadosten za načrtovanje večje naprave. Služi pa lahko kot prva ocena za načrtovanje sistema. [4]

5.2 OCENA POTENCIALA IN IZVEDBA ZA VRTINO – VODNJAK

Ocena potenciala za vodnjak je izdelana na podlagi opisanega postopka v poglavju 2.4.2 in ob različnih potrebnih moči toplotnih črpalk določenih v poglavju 4. Ocena potrebnih količin črpanja je narejena po enačbi (2.2) in ob predpostavki, da je približna vrednost za pretok $0,25 \text{ m}^3/\text{h}$ na kW moči uparjalnika. Pri tem je priključna električna moč zanemarjena, saj želimo določiti zgornje vrednosti. Vhodni podatki in rezultati izračuna so za različne potrebne moči toplotnih črpalk podani v Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Vhodni podatki in rezultati izračuna za oceno potenciala vodnjaka

Naziv	Količina v1	Količina v2	Enota
Čas obratovanja s polno zmogljivostjo	2400		h/leto
Moč za ogrevanje obstoječega dela ZD	439		kW
Moč za ogrevanje predvidene širitve ZD	266		kW
Moč za pripravo STV	224		kW
Moč za hlajenje predvidene širitve ZD	427		kW
Temperatura črpane podzemne vode	12		°C
Temperaturna razlika (vstopna – izstopna)	5		°C
Specifična toplotna zmogljivost vode	4184		J/kgK
Gostota vode	997		kg/m ³
Količina črpanja – ogrevanje obstoječi ZD	21,0	30,8	kg/s
Količina črpanja – ogrevanje širitev ZD	12,7	18,7	kg/s
Količina črpanja – ogrevanje STV	10,7	15,7	kg/s
Količina črpanja – hlajenje	20,4	30,0	kg/s
Količina črpanja – ogrevanje obstoječi ZD	20,9	30,7	l/s
Količina črpanja – ogrevanje širitev ZD	12,7	18,6	l/s
Količina črpanja – ogrevanje STV	10,7	15,7	l/s
Količina črpanja – hlajenje	20,3	29,9	l/s
Količina črpanja – ogrevanje in STV	44,3	65,0	l/s
Količina črpanja – hlajenje in STV	31,0	45,6	l/s
Količina črpanja – ogrevanje širitev in STV	23,4	34,3	l/s

Kot izhaja iz izračuna, bi skupno za ogrevanje in STV morali zagotoviti količino črpanja med 44,3 in 65 l/s, kar pa bi zadoščalo tudi za porivanje hlajenja predvidene širitve ZD. V primeru ogrevanja samo nove stavbe in priprave STV v celoti, pa bi bilo potrebo zagotoviti količino črpanja med 23,4 in 34,3 l/s. V poletnem času navedena količina ne bi v celoti zadoščala za pokrivanje potreb po hlajenju.

Na lokaciji obravnave je bil izveden črpalni poizkus, ki je trajal 4 dni z visokotlačno potopno črpalko Stuwa premera 98 mm. Meritve pretoka so se izvajale z neposredno metodo v merilno posodo v odvisnosti od časa in s pomočjo pretokomera ON 80. Konstantni črpani pretok med izvajanjem črpalnega testa na piezometru ZZD-RV-1/21 je znašal 4,47 l/s. Med preizkusom so v testirani vrtini dosegli 0,25 m znižanja gladine

podzemne vode. V raziskavah ugotovljena hidravlična prepustnost (k) vodonosnika je znašala 0,00433 m/s. Na podlagi analize podatkov je bilo zaključeno, da leži obravnavana lokacija na dobro prepustnem in izdatnem vodonosniku. Skladno z zakonodajo pa je potrebno vso načrpano vodo vračati nazaj v isti vodonosnik. Glede na navedeno je po prvih ocenah na lokaciji možna količina črpanja vsaj 17,0 l/s. Za načrtovanje je potrebno izdelati simulacije črpanja in ponikanja, s katerimi se določi oddaljenost med črpalnim in ponikalnim poljem glede na režim črpanja. [17]

Za izvedbo sistema izrabe podzemne vode je potrebna izvedba vsaj dveh vrtin, črpalne in ponikalne. Lahko je tudi več črpalnih vrtin. Vedno mora biti črpalna vrtina pred ponikalno glede na tok podzemne vode. Potrebna je tudi ustrezna oddaljenost med njima. Premer vrine je odvisen od količine črpanja in je običajno vsaj 220 mm. Temperaturna razlika v uparjalniku med vstopno in izstopno vodo ne sme biti večja od 6 K, kar pomeni, da temperatura podzemne vode ne sme biti nižja od 7 °C. [11]

5.3 OCENA POTENCIALA ZA IZMENJEVALNIKE TOPLOTE OB GRADBENIH KONSTRUKCIJAH

Na podlagi litološkega popisa in podanih osnov za izračun v poglavju 2.4.2 je določen postopek za izračuna potenciala za sisteme do 30 kW, ki lahko služi tudi kot prva groba ocena za večje sisteme. Glede na to, da bo v sklopu predvidene širitve izvedena podzemna garaža do globine 9,85 m, je v nadaljevanju podana groba ocena potenciala za izrabo geotermalne energije v sklopu gradbenih konstrukcij. V spodnji etaži oz. 2. kleti je možno v času vgradnje talne plošče in sten vgraditi tudi ustrezne toplotne izmenjevalnike. Za oceno potenciala izvedbe toplotnih izmenjevalnikov v gradbenih konstrukcijah so uporabljene vrednosti iz Tabela 2.2.

Površina tal v 2. kleti znaša ca. 2850 m² in se nahaja že na globini, kjer je prod in pesek zasičen z vodo, torej znaša površinska specifična toplotna moč 32 W/m². Potencial z izrabo plitve geotermalne energije v sklopu gradbenih konstrukcij v 2. kleti tako znaša

do 91,2 kW. V kolikor se predvidijo cevi za namen toplotnih izmenjevalnikov še v stenah 2. kleti (med tlemi 2. in 1. kleti), znaša površinska toplotna moč dodatno še ca. 20 kW, torej skupno 111,2 kW.

5.4 OCENA POTENCIALA ZA GEOSONDO

Iz profila vrtine na lokaciji je razvidno, da kvartarni sedimenti segajo do globine 24,9 m. Na vrhu je 0,3 m debela plast umetnega nasipa in humusa. Zatem nastopijo melj, pesek in glina do globine 4,8 m. Nezvezni in slabo zrnati meljasti prod s peskom se nadaljuje do globine 7,5 m. Na tej globini preide v slabo zrnat prod s peskom, ki nadalje preide v dobro zrnat prod s peskom. Zatem sledijo do globine 15,5 m plasti z več drobne frakcije, kot so slabo zrnat prod z meljem in peskom, glinast melj ter pesek. Nadalje sledi meljast prod s peskom, ki na globini 16,3 m preide v dobro zrnat prod s peskom. Na globini 22,3 m do 22,8 m se nahaja visokoplastična mastna glina in nadalje še vložek meljastega proda s peskom od 22,7 m do 24,9 m. Na tej globini se prične nepropustna podlaga, ki jo sestavljata visokoplastična mastna glina z vložki ostrorobih kosov črnega apnenca triasne starosti, ki se kot predkvartna kamnina pojavi na 27,5 m. [18]

Za izračun oz. oceno potenciala za geosondo v nadaljevanju je predpostavljeno, da je nadalje do globine 250 m apnenec, ki se pojavi na 27,5 m.

Ocena potenciala za geosondo ob upoštevanju predhodno navedenega in vrednosti v Tabela 2.1 je za izvedbo ene geosonde, globine 278 m, podana v Tabela 5.2. V primeru izvedbe dveh ali več geosond se predpostavlja, da je toplotna moč vsake takšna kot podana v Tabela 5.2. Pred dejansko izvedbo bi bilo potrebno izdelati modelne simulacije z ustrezno programsko opremo. Za prvo grobo oceno potenciala pa je uporabljen spodnji izračun.

Tabela 5.2: Vhodni podatki in rezultati izračuna za oceno potenciala za geosondo

VRSTA PLASTI/KAMNINE	Debelina/ globina (m)	Toplotna moč – 1800 h/a		Toplotna moč – 2400 h/a	
		Od (W)	Do (W)	Od (W)	Do (W)
zemlja, humus	0,3	7,5	7,5	6	6
slabo zrnat prod	0,4	10	10	8	8
melj s prodniki	0,5	12,5	12,5	10	10
rjav pesek s prodniki	1,8	45	45	36	36
rjav pesek s prodniki	1,8	45	45	36	36
meljast prod s peskom	0,8	20	20	16	16
meljast prod s peskom	1,9	47,5	47,5	38	38
siv dobro zrnat prod	1	65	80	55	65
siv dobro zrnat prod	3,4	221	272	187	221
siv dobro zrnat prod	1,5	97,5	120	82,5	97,5
meljast prod s peskom	1	65	80	55	65
glinast melj s prodniki	0,3	10,5	15	9	12
meljast prod s peskom	0,5	32,5	40	27,5	32,5
siv dobro zrnat prod	5,4	351	432	297	351
prod z meljem in peskom	1,7	110,5	136	93,5	110,5
visokoplastična mastna glina	0,4	14	20	12	16
meljast prod s peskom	2,2	55	55	44	44
visokoplastična mastna glina	2,7	94,5	135	81	108
mikritni apnenec z ostanki gline	0,4	22	28	18	24
nadalje masiven apnenec	250	13750	17500	11250	15000
SKUPAJ		15.076	19.100	12.361	16.297

Kot je razvidno iz ocene potenciala za geosondo (Tabela 5.2) je v najboljšem primeru toplotna moč ene geosonde ca. 19,1 kW. Torej bi glede na oceno z izvedbo polja štirih geosond bila toplotna moč do ca. 75 kW.

6 IZVEDBA SISTEMA IZRABE PLITVE GEOTERMALNE ENERGIJE

V predhodnem poglavju so podane ocene razpoložljivega potenciala plitve geotermalne energije za izkoriščanje s toplotnimi črpalkami. Kot izhaja iz ocene, je na lokaciji možna izraba plitve geotermalne energije z izvedbo vodnjaka (podzemna voda), z izvedbo izmenjevalnikov v sklopu gradbenih konstrukcij (gradnja 2. kleti na nivoju podzemne vode) in z izvedbo geosond. V poglavju 4 so podani rezultati ocene potreb za ogrevanje, hlajenje in pripravo STV za obstoječi del in predvideno širitev zdravstvenega doma. Glede na ocene potreb in razpoložljivi potencial je predvideno, da se izraba plitve geotermalne energije izvede s tremi toplotnimi črpalkami. Poleg pa se ohrani tudi obstoječi kotel na zemeljski plin, tako da se predvidi bivalentno delno vzporedno delovanje. Kotel na zemeljski plin služi za pokrivanje konic, torej za uporabo v času nižjih temperatur ter za pregrevanje sanitarne vode zaradi preprečevanja legioneloz.

6.1 KARAKTERISTIKE SISTEMA TOPLOTNIH ČRPALK

Za izvedbo kaskadnega sistema toplotnih črpalk z zalogovniki STV in zalogovniki ogrevalno/hladilne vode so predvidene izvedbe toplotnih črpalk, kot izhaja iz Tabela 6.1. Moči toplotnih črpalk so določene glede na teoretično izkoristljivi potencial na lokaciji obravnave, kot izhaja iz predhodnega poglavja.

V nadaljevanju so prikazani shematski prikazi delovanja za posamezno vrsto toplotne črpalke. Izkoriščanje plitve geotermalne energije je za vsak posamezni vir z ločeno toplotno črpalko. Za zagotovitev potreb pa se te toplotne črpalke v strojnici ustrezno

povežejo in vključijo v centralni nadzorni sistem. Karakteristični podatki o toplotnih črpalkah so podani v Tabela 2.1.

Tabela 6.1: Podatki o toplotnih črpalkah za koriščenje plitve geotermalne energije

	Vrsta	Opis	kW	kWh/dan
TČ 1	voda-voda	Podzemna voda (vodnjak)	300	1980
TČ 2	zemlja-voda	gradbene konstrukcije (2. klet)	90	594
TČ 3	zemlja-voda	Geosonda – 4x	75	495

Poleg je za bivalentno delno vzporedno delovanje predviden še obstoječi kotel na zemeljski plin moči 586 kW. V obstoječem stanju se z navedenim kotlom na ZP pokriva vse potrebe za ogrevanje in pripravo STV. V bivalentnem sistemu s kaskadno izvedbo toplotnih črpalk pa bo kotel služil za pokrivanje potreb ob nižjih zunanjih temperaturah ter večjih potrebah po STV. Dodatno se bo kotel uporabljal za pregrevanje sanitarne vode na vsaj 75 °C zaradi nevarnosti legionele. Skladno s tehničnimi smernicami za zdravstvene objekte [15] morajo imeti hranilniki ustrezno rešitev za pregrevanje.

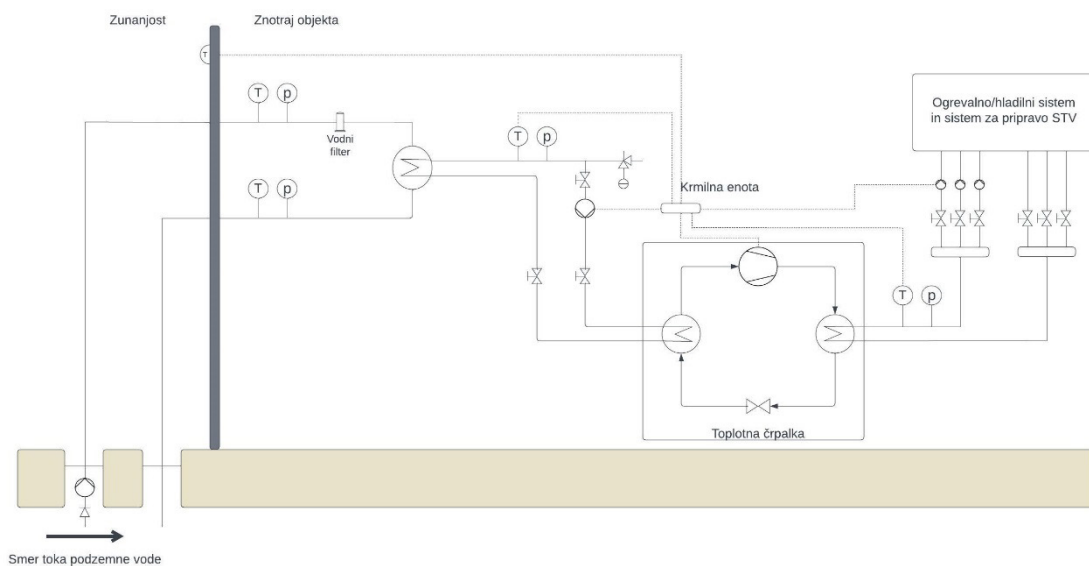
Za optimalno delovanje toplotnih črpalk se predvidi dodatni novi zalogovnik STV prostornine 2 m³ in vsaj tri večje hranilnike ogrevalne/hladilne vode. Na ta način je možno v večjem deležu pokrivati potrebe po toploti/hladu s toplotnimi črpalkami.

6.2 NAČINI IZKORIŠČANJA PLITVE GEOTERMALNE ENERGIJE

Kot izhaja iz karakteristik toplotnih črpalk, so predvideni trije ločeni sistemi za izkoriščanje plitve geotermalne energije. Vsak sistem ima svojo toplotno črpalko nazivne moči, podane v Tabela 6.1. V nadaljevanju predstavljeni načini so določeni glede na oceno potreb in se posledično s sistemom TČ2 in TČ3 pripravlja samo sanitarna topla voda. Sisteme bi bilo možno tudi povezati skupaj in ustrezno regulirati glede na potrebe.

6.2.1 Sistem za izkoriščanje podzemne vode TČ1

Kot izhaja iz Tabela 6.1, je predviden sistem s toplotno črpalko voda-voda nazivne moči 300 kW in ustrezna črpalna in ponikalna vrtina. V primeru, da z eno črpalno vrtino ni mogoče zagotoviti izdatnosti, potrebne za delovanje 300 kW močne toplotne črpalke, je možna tudi izvedba dveh črpalnih vrtin. Sistem za izkoriščanje toplote podzemne vode je prikazan na Slika 6.1.

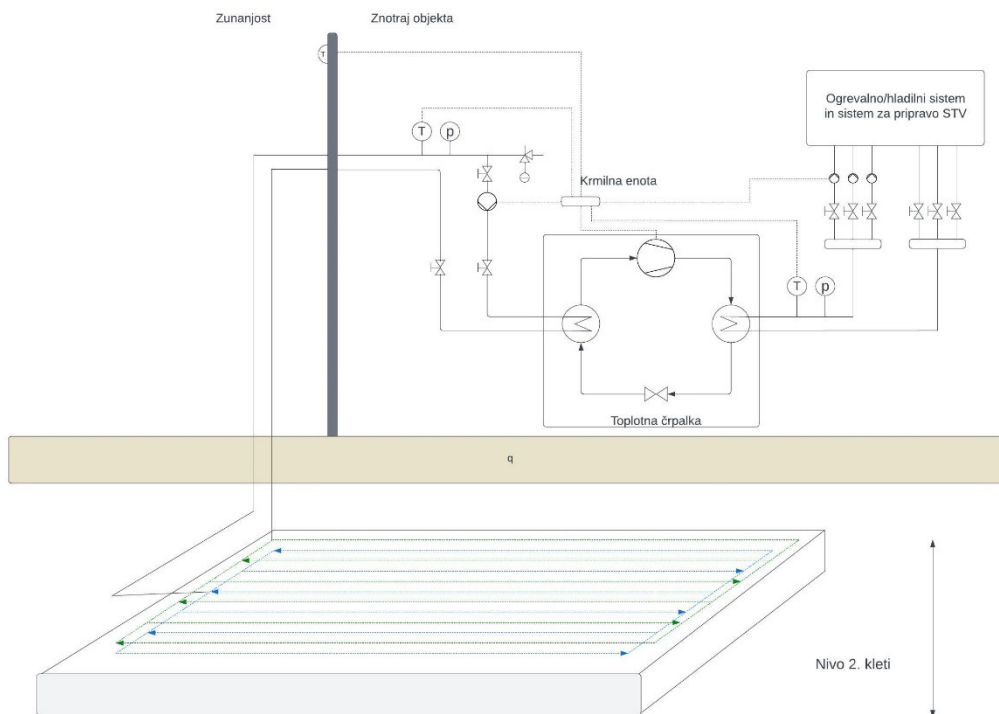


Slika 6.1: Shematski prikaz sistema s toplotno črpalko voda-voda (TČ1) [11]

S sistemom TČ 1 voda-voda se predvidi na izhodni strani možnost za ogrevanje in hlajenje. Vgrajena toplotna črpalka mora tako omogočati tudi reverzibilno delovanje v načinu hlajenja. Pri načrtovanju potreb se tako s sistemom TČ1 ne predvidi priprave tople sanitarne vode, saj mora biti v poletnih mesecih celotna moč TČ, razpoložljiva za hlajenje stavbe. Opcijsko bi bilo možno tudi za pripravo STV in izvedoa ustrezne regulacije.

6.2.2 Sistem za izkoriščanje v sklopu gradbenih konstrukcij TČ2

Kot izhaja iz Tabela 6.1, je predviden sistem s toplotno črpalko zemlja-voda nazivne moči 90 kW. Za toplotne izmenjevalnike je bila upoštevana izvedba koaksialnih kablov v sklopu 2. kletne etaže podzemne garaže. Ustrezne toplotne izmenjevalnike je mogoče vgraditi tako v temeljno ploščo kot tudi v stene (na dveh straneh, kjer ni predvidenih drugih komunikacijskih in tehničnih povezav). Shema za izkoriščanje toplote iz gradbenih konstrukcij je prikazana na Slika 6.2

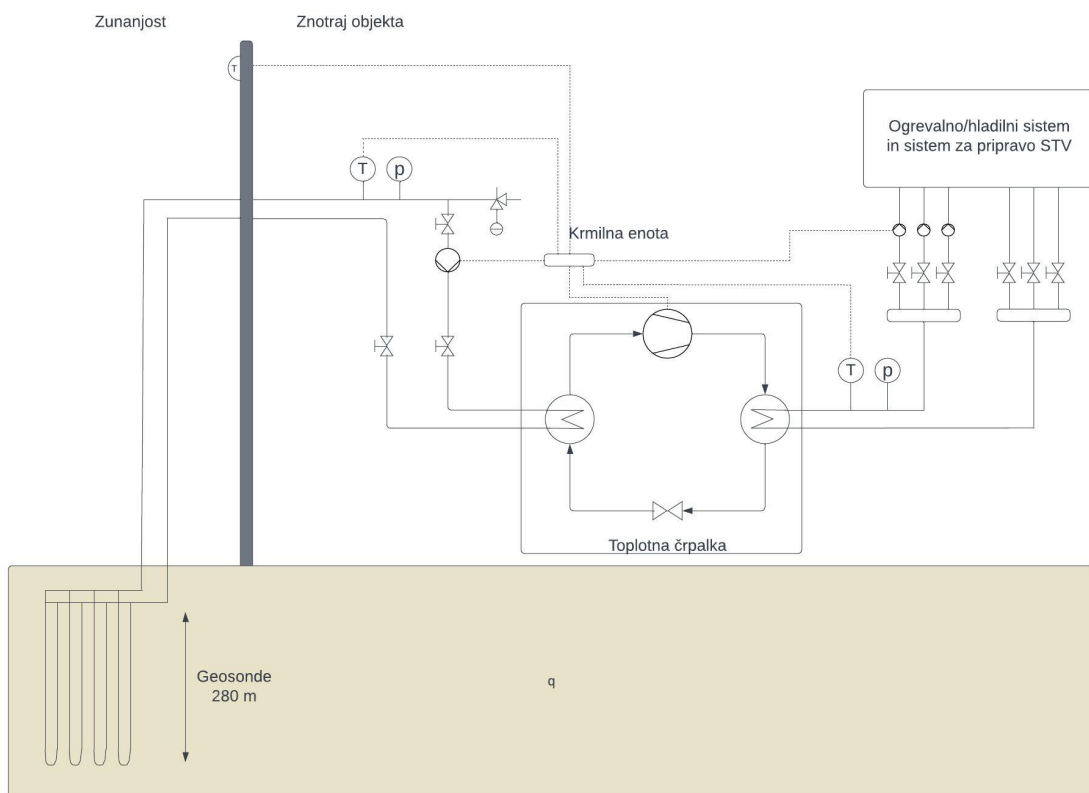


Slika 6.2: Shematski prikaz sistema s toplotno črpalko zemlja-voda (TČ2) [11]

S sistemom TČ2 zemlja-voda se predvidi na izhodni strani možnost priprave STV, saj je glede na izračun potrebno s TČ2 zagotavljati toploto za pripravo STV. Pri načrtovanju potreb se tako s sistemom TČ2 ne predvidi ogrevanja in hlajenja. Opcijsko bi bilo možno skupaj povezati vse sisteme in jih ustrezno regulirati glede na potrebe.

6.2.3 Sistem za izkoriščanje z geosondami TČ3

Kot izhaja iz Tabela 6.1, je predviden sistem s toplotno črpalko zemlja-voda nazivne moči 75 kW in ustrezna izvedba geosond. Glede na izračun, podan v Tabela 5.2, bi bilo za zagotovitev ustrezne moči potrebno izvesti 4 geosonde, globine do 300 m, kar predstavlja visoke stroške za izvedbo. Sistem za izkoriščanje toplote podzemne vode je prikazan na Slika 6.3.

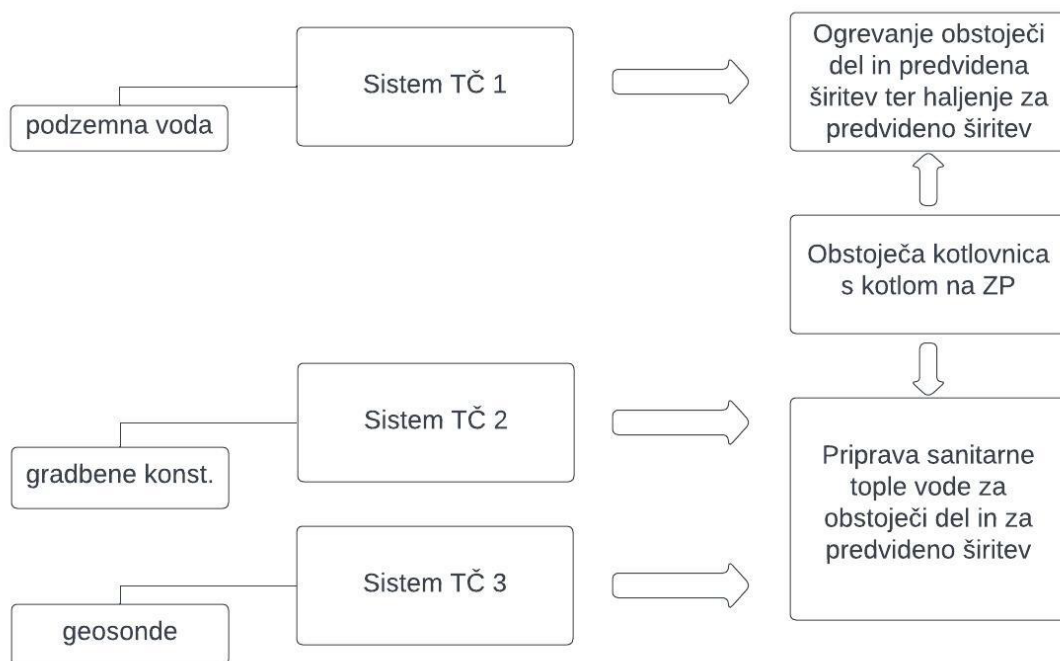


Slika 6.3: Shematski prikaz sistema s toplotno črpalko zemlja-voda (TČ2) [11]

S sistemom TČ3 zemlja-voda se predvidi na izhodni strani možnost priprave STV. Pri načrtovanju potreb se tako s sistemom TČ3 ne predvidi ogrevanja in hlajenja. Navedeni sistem glede na prve ocene ne prinaša zadostne toplotne moči glede na predvideno globino. Pri opredelitvi sistema se obravnava kot teoretična možnost brez upoštevanja ekonomskih dejavnikov. Glede na odločitveno shemo sta prioriteta predhodno predstavljena sistema.

6.2.4 Skupni sistem za ogrevanje, hlajenje in pripravo STV

Kot navedeno v predhodnih podpoglavjih, je predvideno zagotavljanje toplote za pripravo STV s sistemom TČ2 in TČ3, zagotavljanje toplote in hlada pa s sistemom TČ3. Predviden je bivalentni način obratovanja z obstoječim kotlom na zemeljski plin. Na Slika 6.4 je shematsko prikazan skupni sistem za ogrevanje, hlajenje in pripravo STV.

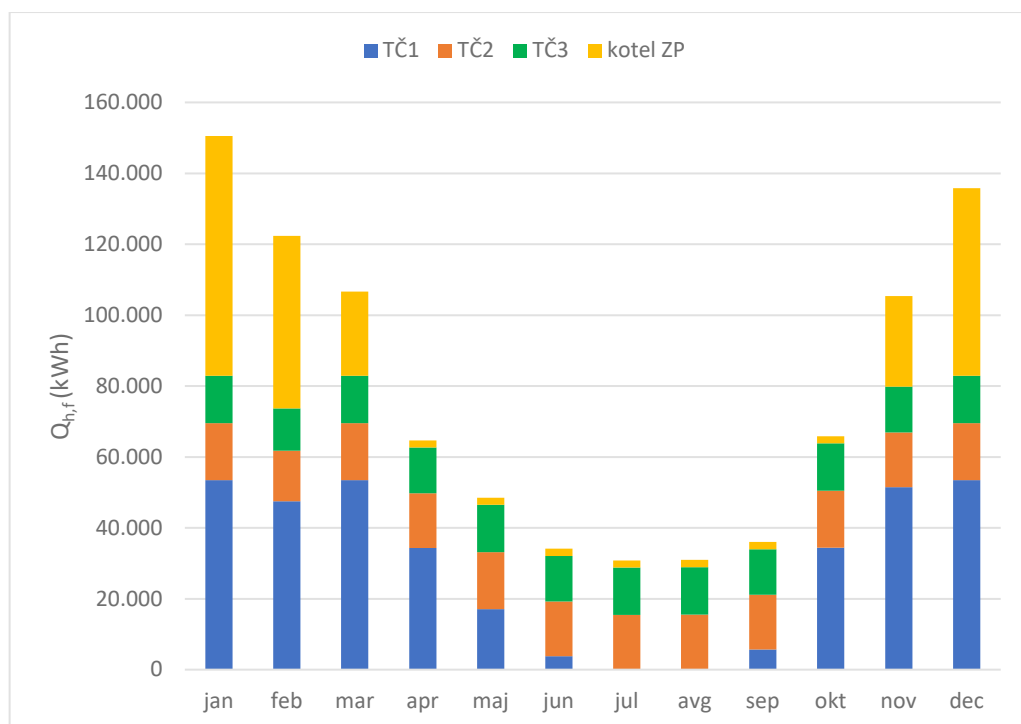


Slika 6.4: Shematski prikaz skupnega sistema za ogrevanje, hlajenje in pripravo STV

6.3 POVPREČNA MESEČNA DINAMIKA ZAGOTAVLJANJA TOPLOTE

Glede na zasnovani sistem toplotnih črpalk z ustreznimi zalogovniki ter kotlom na zemeljski plin je določena povprečna mesečna dinamika zagotavljanja toplote za ogrevanje in pripravo STV. Skladno z rezultati, podanimi v poglavju 4, in glede na razpoložljivi potencial plitve geotermalne energije je obravnavno, da se najprej predvidi zagotavljanje potrebne toplote s toplotnimi črpalkami.

Glede na povprečne mesečne potrebe po toploti za ogrevanje in pripravo STV je v oceni upoštevano, da lahko toplotne črpalke delujejo glede na podane moči v Tabela 6.1. Za vse toplotne črpalke je predvideno dnevno obratovanje 6,6 ure. Navedeni povprečni dnevni čas v obdobju leta predstavlja obratovanje 2400 ur/leto. V primeru, da bi TČ obratovale več ur dnevno, bi bilo mogoče zagotoviti večje količine toplote. Predstavljene sisteme v predhodnem poglavju bi bilo tako smiselno povezati in jih preko centralnega nadzornega sistema ustrezno regulirati, kar pa v preučevanem primeru ni upoštevano. Rezultat ocene dinamike zagotavljanja toplote za ogrevanje in pripravo STV je za povprečne mesečne količine prikazan na spodnjem grafu.



Graf 6.1: Rezultat ocene dinamike zagotavljanja toplote za ogrevanje in pripravo STV

Kot izhaja iz ocene, je s predvidenimi toplotnimi črpalkami možno v celoti pokrivati potrebe od aprila do oktobra. V teh mesecih se kotel na zemeljski plin uporablja samo za pregrevanje STV zaradi preprečevanja legioneloz. V zimskem obdobju pa obstoječi kotel na ZP luži predvsem za pokrivanje potreb po ogrevanju obstoječega zdravstvenega doma. Sistem TČ3 (voda – voda) služi za pokrivanje potreb po toploti od januarja do maja in nadalje od oktobra do decembra. V juniju in septembru se lahko tudi izjemoma pojavi

potreba po ogrevanju. V poletnih mesecih pa je sistem TČ3 v celoti namenjen hlajenju predvidene širitve zdravstvenega doma. V primeru celovite energetske sanacije obstoječe stavbe bi se potrebna toplota iz obstoječe kotlovnice dodatno zmanjšala.

6.4 OCENA RABE ELEKTRIČNE ENERGIJE ZA DELOVANJE

Raba električne energije za delovanje toplotnih črpalk je ocenjena na podlagi določene toplote, ki je proizvedena na posamezni TČ in karakterističnih lastnosti posamezne TČ. Za oceno rabe električne energije so upoštevani podatki iz tehničnega lista za ogrevalne toplotne črpalke proizvajalca Kronoterm, ki podaja prijavljen koeficient učinkovitosti za delno obremenitev pri notranji temperaturi 20 °C in zunanji temperaturi T_j . Ta je določena za -7 °C, +2 °C, +7 °C in +12 °C. Za ogrevanje predvidene širitve je predviden nizki temperaturni režim, za pripravo STV pa srednji temperaturni režim. Za dogrevanje STV je na razpolago obstoječi kotel na ZP, možna pa je tudi vgradnja ustreznih električnih grelcev v zalogovniku. Za predvidene toplotne črpalke je bil izdelan grobi izračun rabe električne energije, pri čemer so bili upoštevani tehnični podatki za primerljive toplotne črpalke. Proizvajalci namreč javno ne objavljajo tehničnih listov za večje sisteme. Izračun je izdelan po metodi, opisani v 3.2. Za zunanjo temperaturo so upoštevane povprečne mesečne temperature na lokaciji, povzete po [20]. Podatki o koeficientih učinkovitosti so podani v Tabela 6.2

Tabela 6.2: Prijavljen koeficient učinkovitosti COP_d [12]

	COPd razmerje primarne energije za delno obremenitev pri notranji $T = 20^{\circ}\text{C}$ in zunanji T_j		
	NT režim	ST režim	NT režim
T_j (°C)	WPG 110 HTT voda/voda	WPG 110 HTT slanica/voda	WPG 80 HTT slanica/voda
-7	5,94	2,82	4,61
-2	6,09	3,41	4,78
7	6,45	3,85	5,02
12	6,72	4,3	5,17

Po opisani grobi oceni bo povprečna letna raba električne energije za vgrajene toplotne črpalke znašala ca. 138.400 kWh v ogrevalnem režimu in 21.100 kWh za hlajenje. V tej oceni ni upoštevana raba električne energije za pogon črpalk, krmilne enote, dodatnih grelnikov in drugih elementov, ki sestavljajo sistem.

6.5 VPLIV NA ZMANJŠANJE EMISIJ CO₂

Plitva geotermalna energija predstavlja obnovljivi vir energije, ki ga je mogoče izkoriščati s pomočjo mehanskega dela, katerega opravi električna energija. Z dolgoletnim razvojem sistemov za izkoriščanje plitve geotermalne energije so ti postali zelo energijsko učinkoviti. Posledično je za delovanje sistema potrebne tudi manj električne energije. Dodatno je mogoče energetske nevturalnost povečati s postavitvijo sončne elektrarne na streho tako predvidenega kot tudi obstoječega objekta. Glede na to, da je visoka projektna moč za hlajenje predvidene širitve, bo visoka potreba po električni energiji tudi v času najvišjega sončnega obsevanja.

Že dolgo je znano, da izgorevanje fosilnih goriv povzroča toplogredne pline, zaradi katerih prihaja do globalnega segrevanja. Žal je raba fosilnih goriv še vedno velika in je več kot nujna izvedba tovrstnih sistemov. V posameznih državah Evropske unije je bistveno večje število večjih sistemov za izrabo plitve geotermalne energije.

Ocena zmanjšanja emisij CO₂ je bila določena za primer izvedbe predstavljenega sistema s kotlom na zemeljski plin in upoštevanju faktorja f_{CO_2} , ki znaša 0,20 kg/kWh za zemeljski plin in 0,53 kg/kWh za električno energijo. Zaradi izvedbe predstavljenega sistema bi se za potrebe ogrevanja in priprave STV na letni ravni zmanjšale emisije CO₂ za 66,4 tone/leto. V primeru zagotovitve električne energije iz sončne elektrarne pa bi zmanjšali emisije CO₂ zaradi ogrevanja in priprave STV za ca. 140 ton/leto.

7 ZAKLJUČEK

V zaključnem delu smo prikazali način za izvedbo sistema za ogrevanje, hlajenje in pripravo STV z izkoriščanjem plitve geotermalne energije na različne načine. Preko praktičnega primera smo pokazali, da so tovrstni sistemi primerni tudi za večje porabnike in prikazali, kako jih načrtovati. Lokacija obravnave se nahaja na izdatnem vodonosniku, kar je ugodno z vidika izkoriščanja plitve geotermalne energije. Kot izhaja iz diplomskega dela, so na voljo tudi druge možnosti izkoriščanja te energije. Osnova za načrtovanje je čim natančnejše poznavanje potreb po energiji, ki so bile določene tako za obstoječo stavbo kot za predvideno širitev.

Po odločitveni shemi glede načina izkoriščanja je glede na naravne danosti na lokaciji kot najbolj optimalna določena izvedba odprtega sistema z izrabo podzemne vode. Možna je tudi izraba energije s toplotnimi izmenjevalniki v gradbenih konstrukcijah, v tleh in stenah podzemnih garaž. Kot zadnja opcija je možna tudi izvedba geosond, ki je kot zanimivost tudi prikazana. Glede na prve osnovne ocene potencialov je vsekakor vprašljiva ekonomičnost izvedbe geosond, saj je kljub razmeroma globokim vrtinam sama toplotna moč razmeroma majhna. V diplomskem delu uporabljena metoda za določitev potencialov služi samo kot osnovna ocena. Za natančnejše načrtovanje je potrebno izdelati analitične in modelne izračune s pomočjo ustreznih programskih orodij, kar predstavlja možnost za nadaljnje delo. Na podlagi navedenih izračunov se nato projektira ustrezno črpalno in ponikalno vrtino oziroma toplotne izmenjevalnike v sklopu gradbenih konstrukcij. Tudi pri načrtovanju geosond je postopek podoben.

V diplomskem delu je na podlagi energetskih potreb in ocene potenciala podana izvedba sistema izrabe plitve geotermalne energije. Predvideli smo tri ločene sisteme, ki pa se v strojnici povežejo skupaj in ustrezno regulirajo glede na potrebe. Za pokrivanje vršnih

potreb, za rezervo in za pregrevanja je predvideno bivalentno obratovanje z obstoječim kotlom na zemeljski plin. Na ta način smo določili optimalen sistem za pokrivanje energetske potrebe.

S predvidenim sistemom je na območju občine možno povečati delež obnovljivih virov OVE in zmanjšanje emisij TGP. V diplomskem delu so opredeljeni osnovni parametri takšnega sistema in določena predvidena poraba električne energije ter ocena emisij CO₂ v primeru izvedbe samo s kotlom na zemeljski plin. Na ta način smo prikazali prihranek in zmanjšanje emisij. Z izvedbo takšnega sistema bi se delež OVE pri javnih stavbah na območju občine bistveno povečal, saj zdravstveni dom predstavlja velikega porabnika. Dodatno bi bilo mogoče sistem nadgraditi tudi z izkoriščanjem toplote okoliškega zraka, kar pa v delu ni obravnavano. Za delno pokrivanje porabe električne energije bi se sistem lahko nadgradil tudi s sončno elektrarno na strehi obstoječe in nove stavbe. Nadaljnje delo bi bilo lahko tako usmerjeno tudi v zagotovitev električne energije iz OVE za delovanje predvidenega sistema.

VIRI IN LITERATURA

- [1] A. García Gil, E. A. Garrido Schneider, M. Mejías Moreno, J. C. Santamarta Cerezal, *Shallow Geothermal Energy*, prva. izd., J. C. Santamarta Cerezal (ur.), Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2022.
- [2] Z. Rant, *Termodinamika: knjiga za uk in prakso*, Posodobljeni ponatis, Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, 2001.
- [3] M. Tuma, M. Sekavčnik, *Energetski stroji in naprave, osnove in uporaba*, 2. izpopolnjena in predelana izdaja, Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, 2005.
- [4] Ministrstvo za infrastrukturo, Smernice za vrtanje v plitvi geotermiji do globine 300 m, Ljubljana: Ministrstvo za infrastrukturo, 2021. Dosegljivo: <https://www.energetika-portal.si/podrocja/rudarstvo/plitva-geotermalna-energija/>. [datum dostopa: 29. april. 2023]
- [5] Ž. Vukelić, J. Šporin, B. Janc, »Dimenzioniranje geosonde (in toplotni vplivni radij) za postavitev toplotnega ogrevalnega sistema s toplotno črpalko – primer iz Škofje Loke«, *Gradbeni vestnik*, letnik 68, str. 186-194, avgust 2019.
- [6] D. Rajver, S. Pestotnik, J. Prestor, »Primeri ocene temperatur na površini trdnih tal pri projektiranju zajetij plitve geotermalne energije«, *Geologija*, let. 62/1, str. 103-122, maj 2019.
- [7] Geološki zavod Slovenije, Analize potenciala plitve geotermalne energije v Sloveniji do leta 2050, za projekt LIFE ClimatePath2050 (LIFE 16GIC/SI/000043), Ljubljana: Geološki zavod Slovenije, 2018. Dosegljivo: www.podnebnapot2050.si. [datum dostopa: 22. 07. 2023]
- [8] H. Brandl, »Energy Foundations and Other Thermo-Active Ground Structures«, *Géotechnique*, str. 81-122, januar 2006.

- [9] European Geothermal Energy Council, *Uploads (Spletno mesto: European Cooperation in Science and Technology, 24.7.2023)*, (2018). Pridobljeno s <https://www.egec.org/uploads>. [datum dostopa: julij. 2023]
- [10] J. Prestor, D. Rajver, S. Pestotnik, *Karta možnosti uporabe geotermalnih toplotnih črpalk*, (2015). Dosegljivo: <https://egeologija.si/geonetwork/srv/slv/catalog.search#/metadata/0b7c88fd-bcba-4107-a79c-e70195ca7e82>. [datum dostopa: julij. 2023].
- [11] A. Poredoš, A. Kitanovski, B. Vidrih, P. Poredoš, *Heat pumps for heating and cooling*, prva izd., Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, 2018.
- [12] Kronoterm d.o.o., Tehnični list - WPG komercialne, maj 2018. Dosegljivo: www.kronoterm.com. [datum dostopa: 10. 10. 2018]
- [13] Z. Praunseis, R. Strojko, *Energetska oskrba objektov*, 1. izdaja, Krško: Fakulteta za energetiko, 2014.
- [14] JHP projektne rešitve d.o.o., Investicijski program "Širitev Zdravstvenega doma Domžale in gradnja podzemne garaže", Domžale: Občina Domžale, 2021. Dosegljivo: <https://www.domzale.si/objava/497301>. [datum dostopa: maj. 2023]
- [15] RS Ministrstvo za zdravje, Nove prostorske tehnične smernice za zdravstvene objekte, osnutek, Ljubljana: Ministrstvo za zdravje, 2019. Dosegljivo: <https://www.gov.si/assets/ministrstva/MZ/DOKUMENTI/Javne-objave/Javne-razprave/>. [datum dostopa: julij. 2023]
- [16] MOPE, Agencija RS za okolje, *ARSO Meteo (Temperaturni primanjkljaj in kurilna sezona)*. (2023) Dosegljivo: https://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/table/sl/by_variable/cooling-heating-degree-days.txt. [datum dostopa: 9. julij 2023]
- [17] MM SOL, Matija Matičič, s.p., Investicijski program (IP) za investicijo "Raba geotermalne vode za ogrevanje in hlajenje prostorov ter sončna elektrarna", Kamnik: Občina Domžale, 2021.
- [18] IRGO Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje, Poročilo o hidrogeoloških preiskavah na lokaciji Zdravstveni dom Domžale za potrebe projektiranja

- črpalnega in ponikalnega polja za potrebe plitve geotermije, sistema voda-voda, Ljubljana: IRGO Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje, februar 2021. [datum dostopa: maj. 2023]
- [19] Geološki zavod Slovenije, *Interaktivna karta (Osnovna geološka karta)*, Dosegljivo: <https://ogk100.geo-zs.si/>. [datum dostopa: 27. 5. 2023]
- [20] MOPE, Agencija RS za okolje, *Mesečna povprečja temperature zraka*, (2010). Dosegljivo: <https://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/maps/monthly-mean-temperature-maps/>. [datum dostopa: julij 2023].
- [21] J. Peraire, S. Widnall, *Lecture L11 - Conservation Laws for Systems of Particles*, (2008). Pridobljeno s https://ocw.mit.edu/courses/aeronautics-and-astronautics/16-07-dynamics-fall-2009/lecture-notes/MIT16_07F09_Lec11.pdf. [datum dostopa: 23. 6. 2021]
- [22] M. Tuma, M. Sekavčnik, *Energetski sistemi : preskrba z električno energijo in toploto*, 3. izdaja, Ljubljana: UL, Fakulteta za strojništvo, 2004, str. 50-62.