

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Dimensioneringsverktyg och -riktlinjer för bergvärmepumpar i tätbebyggda områden	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Novel tool and guidelines for designing ground source heat pumps (GSHPs) in densely populated areas	
Universitet/högskola/företag KTH	Avdelning/institution Avd. Tillämpad termodynamik och kylteknik / Inst. Energiteknik
Adress Brinellvägen 68, 100 44 Stockholm	
Namn på projektledare Joachim Claesson	
Namn på ev övriga projektdeltagare KTH: Forskarstuderande Maria Letizia Fascí, Biträdande Handledare Alberto Lazzarotto, Biträdande Handledare Jose Acuna NOWAB: Jan-Erik Nowacki NIBE: Daniel Hagberg, Martin Forsén THERMIA: Sandra Alfredsson, Albrecht Wurtz, Erik Olsson TÄBY KOMMUN: Tomas Ragnell, Lars Lindqvist BENGT DAHLGREN: Maz Hässelbrandt NEO ENERGI: Göran Hellström BORRFÖRETAGEN: Pär Malmborg STOCKHOLM STAD: Amanda Salguero Engström SVENSKT GEOENERGICENTRUM: Signhild Gehlin	
Nyckelord: 5-7 st Hållbara Energisystem, Bergvärme, Modeller, Termisk interaktion i tätbebyggda områden, Åtgärder, Tillståndsgivning.	

Förord

Projektet genomförs och finansieras inom ramen för programmet Termo – värme och kyla för framtidens energisystem. Vidare har projektet finansierats av industripartner relevanta för projektets frågeställningar. Deltagande företag och organisationer har varit KTH, NIBE, Thermia, Bengt Dahlgren, Täby Kommun, Stockholm Stad, Neo Energi, Nowab, Borrföretagen och Svenskt Geoenergicentrum.

Innehållsförteckning

Förord.....	1
Innehållsförteckning	1
Sammanfattning	2
Summary	2
Inledning/Bakgrund	3
Genomförande	5
Resultat	6
Ökad aktiv borrhåslängd.....	6
Minskad energiuttag	7
Begränsa antal energibrunnar i ett område	8
Diskussion.....	11
Publikationslista.....	13
Modellbibliotek.....	13
Doktorsavhandling (försvarad och godkänd 2023-10-05).....	13
Artiklar som är inkluderade i doktorandens avhandling:.....	13
Artiklar eller rapporter som är också genomförda inom ramen för projektet (och projektet före detta).....	13
Studentarbeten inom ramen för projektet	14
Referenser, källor.....	14
Bilagor	15

Sammanfattning

Markvärmepumpar är ett vida använt värmesystem idag och förväntas öka. Projektörer för dessa system har saknat ett dimensioneringsverktyg för individuella borrhål i tätbebyggda bostadsområden med många existerande bergvärmepumpar. Eftersom inbördes påverkan pga. dess energuttag påverkar varandra försämras effektiviteten mot den förväntade för ett enskild energibrunn som befintliga dimensioneringsverktyg antar.

Det huvudsakliga målet har varit att tillhandahålla ett fritt tillgängligt beräkningsverktyg för bergvärmepumpar i tätbebyggda områden med många redan installerade bergvärmepumpar. Projektet har också identifierat en tänkbar rekommendation vid nya eller om-installationer av bergvärmepumpar baserat på systemets långsiktiga effektivitet kontra alternativt system i form av uteluftbaserad värmepump. Således kan detta leda till ökad energi- och effekteffektivitet för uppvärmningssystem och därmed ett mer hållbart energisystem.

Summary

Ground source heat pumps are a widely used heating system today and are expected to increase. Designers for these systems have lacked a sizing tool for

individual boreholes in densely populated residential areas with many existing ground source heat pumps. Because their mutual impact due to their energy extraction affects each other, efficiency deteriorates compared to what is expected for a single energy well, as existing sizing tools assume.

The main goal has been to provide a freely available calculation tool for ground source heat pumps in densely populated areas with many already installed ground source heat pumps. The project has also identified a potential recommendation for new installations or replacements of ground source heat pumps based on the system's long-term efficiency compared to an alternative system, such as an air-source heat pump. Thus, this can lead to increased energy and operational efficiency for heating systems and, therefore, a more sustainable energy system.

Inledning/Bakgrund

Nya verktyg och nya riktlinjer är nödvändiga för att garantera en bättre utformning av markvärmepumpar (GSHPs) i tätbefolkade områden och en mer effektiv energianvändning i dessa system. Målet med detta projekt är att tillhandahålla verktygen och erbjuda en vetenskaplig grund för riktlinjerna.

GSHPs är ett av de billigaste och mest effektiva sätten att tillhandahålla uppvärmning till svenska byggnader. Numera värms cirka 25% av svenska enbostadshus upp med GSHPs, och detta antal förväntas öka. Dock finns det för närvarande ingen noggrant och användarvänligt verktyg för att utforma en GSHP med hänsyn till påverkan av omgivande oberoende GSHPs. Bristen på ett sådant verktyg leder till att närvaron av granninstallationer förbises, vilket resulterar i underskattade system, vilket i sin tur leder till en lägre prestandafaktor (COP), ökad användning av hjälpsystem och i allmänhet en lägre effektivitet hos uppvärmningssystemen. Den relativa bristen på ett noggrant verktyg för oberoende GSHPs kan delvis ha berott på bristen på en lämplig metodik för att utvärdera den termiska påverkan mellan två eller fler oberoende närliggande borrhål. Emellertid har en sådan metodik utvecklats inom ramen för pågående doktorandprojekt. Därför är det nu möjligt att skapa ett komplett verktyg för att simulera en hel stadsdel med flera GSHP-installationer för att optimalt utforma de nya systemen och erbjuda optimal eftermontering.

Det finns även ett behov av att uppdatera reglerna för installation av GSHPs. För närvarande regleras installationen av en ny GSHP främst av rekommendationen om ett minimiavstånd (20 m) mellan borrhål som tillhör olika fastighetsägare. Denna regel har emellertid två nackdelar: den garanterar inte nödvändigtvis att grannsystem inte påverkar varandra avsevärt, och den kan förhindra installation av nya system även när sådana installationer inte skulle leda till negativa konsekvenser. Andra riktlinjer, t.ex. att fastställa en maximal temperatursänkning vid fastighetsgränserna, kan vara mer relevanta. Tack vare framstegen inom forskningen om GSHPs och kraftfulla datorer är det numera möjligt att simulera flera scenarier för att få en komplett bild av situationen och tillhandahålla en mer vetenskaplig grund för nya riktlinjer som möjliggör maximal användning av den geotermiska potentialen på ett hållbart sätt.

GSHP utvinner värme från underjorden för att leverera den till byggnader. Mycket värme som utvinns i samma område leder till mindre effektiva system. Detta är välkänt, varför omfattande forskning har genomförts för att studera den termiska påverkan mellan intilliggande borrhål som tillhör samma anläggning - det så kallade borrhålsfältet - och för att tillhandahålla lämpliga designverktyg som kan ta hänsyn till den termiska interaktionen mellan olika brunnar. Mindre uppmärksamhet har dock riktats mot hur intilliggande oberoende anläggningar påverkar varandra.

Uppmärksamheten kring ämnet ökar i takt med att antalet GSHP-installationer ökar: 25 % av de svenska enfamiljshusen värms nu upp av GSHP och denna siffra förväntas öka. Denna tillväxt är önskvärd med tanke på viljan att elektrifiera energisektorn, men det måste finnas lämpliga verktyg för att denna tillväxt ska kunna ske utan några nackdelar. Därför blir behovet av att utveckla ett verktyg för att utforma GSHP omgivna av angränsande oberoende installationer stort.

Denna brådska stöds av resultaten av den senaste vetenskapliga forskningen: till exempel har Choi et al.¹ och Miglani et al.² undersökt konsekvenserna av en hög penetration av GSHP. De drog slutsatsen att det är av yttersta vikt att ta hänsyn till förekomsten av närliggande anläggningar för att undvika att överskatta den geotermiska potentialen och underdimensionera systemen.

Faktum är att ett tidigare, mycket förenklat program för att begränsa de nämnda nackdelarna utvecklades redan för mer än ett decennium sedan av Stockholms Stad och SEV³. Det verktyget har dock i detta sammanhang viktiga begränsningar. Tack vare de senaste forskningsrönen kan dessa begränsningar övervinnas och bättre verktyg kan nu utvecklas.

En viktig milstolpe i utvecklingen av ett sådant verktyg hade uppnåtts inom vårt doktorandprojekt, med utvecklingen av en modell⁴ som kan uppskatta den termiska påverkan mellan oberoende borrhål. Inom samma projekt har vi också skapat ett mycket grundläggande verktyg för att uppskatta prestandan hos GSHPs i tätbefolkade områden och har använt det för att utvärdera en fallstudie med en hög täthet av GSHP. Slutsatsen var att även om man respekterar det minimiavstånd som för närvarande gäller för två angränsande system i Sverige, skulle systemens effektivitet minska med 10 % efter 25 år jämfört med uppskattningar som inte tar hänsyn till förekomsten av närliggande anläggningar⁵.

¹ Choi, W., Ooka, R., Nam, Y., 2018. Impact of long-term operation of ground-source heat pump on subsurface thermal state in urban areas. *Sustainable Cities and Society*.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.12.036>

² Miglani, S., Orehounig, K., Carmeliet, J., 2018. A methodology to calculate long-term shallow geothermal energy potential for an urban neighbourhood. *Energy and Buildings* 159, 462–473.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.100>

³ Stockholms stad. 2005. Beräkningsprogram för dimensionering av energibrunnar i tätbebyggda villaområden.

⁴ Fasci, M. L., & Lazzarotto, A. (2019). A novel model for the estimation of thermal influence of neighbouring borehole heat exchangers. In *European Geothermal Congress 2019*.

⁵ Fasci M.L, Lazzarotto A., Coronardo M., Claesson J.: Performance of Ground Source Heat Pumps in Densely Populated Areas. *World Geothermal Congress*, 2020.

Dessa resultat ligger i linje med de tidigare nämnda internationella rönen och stöder det nya verktygets brådsående karaktär.

Dessutom kommer detta verktyg också att göra det möjligt att ge vetenskaplig bakgrund för uppdateringar av riktlinjer för installation av GSHP-system. Faktum är att i flera länder, däribland Sverige, består riktlinjerna i att endast rekommendera ett minimiavstånd mellan närliggande anläggningar. Som påpekats av en Haehnlein m.fl.⁶ stöds dock inte sådana riktlinjer av uttömmande vetenskapliga studier. Om de rätta verktygen för att undersöka problemet fanns tillgängliga skulle nya, mer relevanta riktlinjer kunna antas.

Genomförande

Projektet har genomförts via ett antal arbetspaket. Samtidigt är det viktigt att påminnas om att projektet är en fortsättning, och slutfas, för ett vid projektstarten pågående doktorandprojekt.

Projektet har följt följande steg

Den nya delen av projektet kommer att artikuleras i följande faser:

1. Litteraturgenomgång av de delmodeller som finns tillgängliga för att skapa det önskade verktyget.
 - a. Identifiering och genomförande av de lämpligaste delmodellerna som granskades i steg 1.
 - b. Koppling av delmodellerna, implementering av det kompletta verktyget och skrivande av dokumentationen.
2. Verifiera att utvecklat verktyg är tillräckligt användarvänlig och tillgänglig för våra projektpartners. Diskutera möjligheten att integrera den i en kommersiell programvara för långsiktig hjälp.
3. Identifiering av relevanta scenarier som ska simuleras för att sätta bakgrunden till nya riktlinjer.
 - a. Simulering av de scenarier som identifierades och utvärdering av resultaten.
 - b. Med tanke på de resultat som erhöles i ovan, skissering av möjliga riktlinjer.
4. Rapportering av resultat, huvudsakligen via projektmöten, denna slutrapport och doktorandens disputation och avhandling.

⁶ Haehnlein, S., P. Bayer, and P. Blum. 2010. International legal status of the use of shallow geothermal energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14:2611–25.

Parallellt med detta har följande aktiviteter delvis bedrivits för insamling och behandling av mätdata:

1. Identifiering av de anläggningar som ska övervakas.
2. Identifiering av tillgänglig mätutrustning.
3. Datainsamling från uppkopplade värmepumpar
4. Analys av mätdata

Resultat

De huvudsakliga resultaten som kommer redovisas här baseras på utvecklad modell och scenarier baserat på användande av modellerna. Tre huvudspår har undersökts för hur påverkan av omgivande energibrunnar kan hanteras. Dessa är

1. Öka aktiv borrhålslängd
2. Minska energiuttaget
3. Begränsa antal energibrunnar i området.

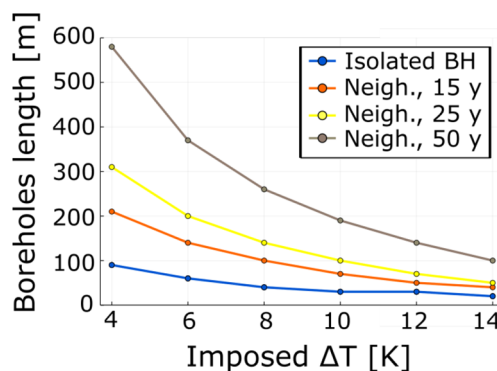
Ökad aktiv borrhålslängd

Även om mängden geotermisk värme i princip är oändlig, är mängden som vi praktiskt kan utvinna begränsad och proportionell mot längden på de borrhålsvärmeväxlare som används för uttaget. Genom att använda längre borrhål, kan större värmemängd tas från en större volym av underjorden, vilket minskar dess temperaturförändring och förbättrar värmepumpssystemets prestanda.

Nedan tillämpas den föreslagna strategin på några scenarier som består av oändligt stora kvarter med identiska borrhål arrangerade i en rektangulär konfiguration med ett avstånd på 20 m mellan på varandra följande borrhål.

Markens egenskaper som används för simuleringen är: markens värmeledningsförmåga $k = 3.1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ och markens termiska diffusivitet $\alpha = 1.55 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Här redovisas endast ett energiuttag (10 MWh/år), som alla borrhål i området använder. Dessutom utforskas även tidshorisontens inverkan på resultaten, med hänsyn tagen till 15, 25 och 50 års drift för alla borrhål.

Diagrammet indikerar vilka borrhålsdjup som krävs för att inte sänka marktemperaturen invid borrhålen mer än en viss nivå (x-axeln).



Figur 1: Nödvändig borrhålslängd för att inte sänka marktemperaturen mer än vad x-axeln anger för enskilt hål (isolated) eller i ett oändligt område med rektangulärt konfigurerade borrhål med 20 meters avstånd.

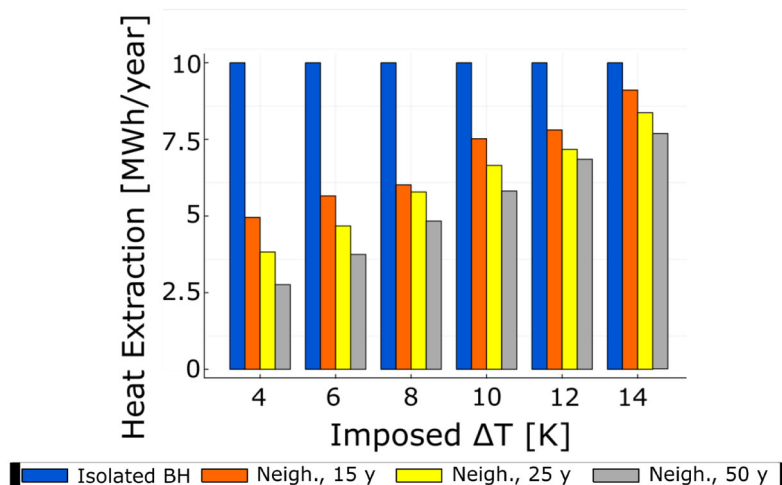
Med verktyget utvecklat kan motsvarande resultat beräknas för godtyckliga energiuttag för de olika ingående borrhålen och vid vilket positionen inom området, t.ex. vid tomtgräns. Dessutom behöver inte borrhålen vara regelbundet placerade, utan varje borrhål kan placeras där de faktiskt befinner sig. Det är inte möjligt med den upplösning som diagrammet har särskilja ett ensamt borrhål, dvs ett som inte har några grannar, olika utfall för 15, 25 eller 50 år eftersom dessa olika tidsrymder har typiskt samma temperaturfall. Ett ensamt hål når ganska snart ett nära "stationärt" tillstånd, där inflödet av termisk energi är lika med uttaget sett över ett helt år. Man kan möjligen notera att i detta specifika fall behöver borrhålen vara 2, 3 eller 6 gånger så långa för att ha motsvarande effektivitet som ett ensamt borrhål.

Minskad energiuttag

En annan strategi för att begränsa marktemperaturförändringen i områden med hög koncentrationen av bergvärmepumpar är att minska nettovärmeuttaget från borrhålen jämfört med det uttag de skulle haft om de var enskilda hål. Detta kan uppnås på två sätt:

1. Minska byggnadernas uppvärmningsbehov, vilket minskar det faktiska värmeuttaget under vintern.
2. Återladda borrhålen med överskottsvärme från källor som solpaneler eller fjärrvärme under sommaren.

Förutsättningar är liknande som i förra undersökningen.



Figur 2: Reducerat nettouttag för bibehållen temperatursänkning för olika drifttider.

Tabell 1 indikerar att en ensam energibrunn kan ha 90 meter aktivt djup och endast påverka dess temperatur med 4 K. Men, som Figur 1 visar, sett ur 15 års driftsperspektiv, endast 5 MWh kan tas ut årligen om borrhålstemperaturen fortfarande skall vara endast 4 K. Om samma uppvärmning av byggnaden ska göras med värmepumpen måste i detta fall alltså borrhålet återladdas med 5 MWh årligen.

Tabell 1: Nödvändig borrhålslängd för ett enskilt borrhål för att inte överstiga en viss temperatursänkning.

Q [MWh/year]	Imposed ΔT [K]						H [m]
	4	6	8	10	12	14	
10	90	60	40	30	30	20	H [m]
20	190	130	90	70	60	50	
30	300	190	140	110	90	80	

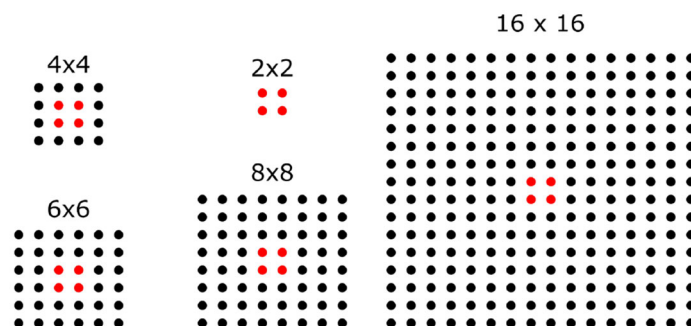
Begränsa antal energibrunnar i ett område

Ett alternativt tillvägagångssätt för att uppfylla miljökrav eller upprätthålla godtagbara prestanda är att begränsa antalet system inom ett visst område, snarare än att ändra deras konstruktion eller funktion jämfört med motsvarande enskilt borrhål. I det här avsnittet bortses från eventuella miljökrav och i stället fokuseras på att begränsa antalet system i ett visst område för att förhindra en försämring av deras prestanda.

En definition av innebörden av "försämrade systemprestanda" behöver göras. Eftersom GSHP ofta jämförs med ASHP kan vi använda prestandan hos en typisk ASHP som riktmärke för att fastställa om en GSHP har acceptabel eller oacceptabel prestanda. En riktlinje som föreslår installation av en GSHP endast om den presterar bättre än en ASHP måste också definiera om en GSHP bör presteras bättre än en ASHP i genomsnitt under sin livstid eller även under det sista driftsåret (då GSHP förväntas ha dess sämsta prestanda). Båda dessa synsätt används här och refereras som "Riktlinje A" där en GSHP överträffar en referens-ASHP i genomsnitt under sin livstid, och till "Riktlinje B" för en GSHP

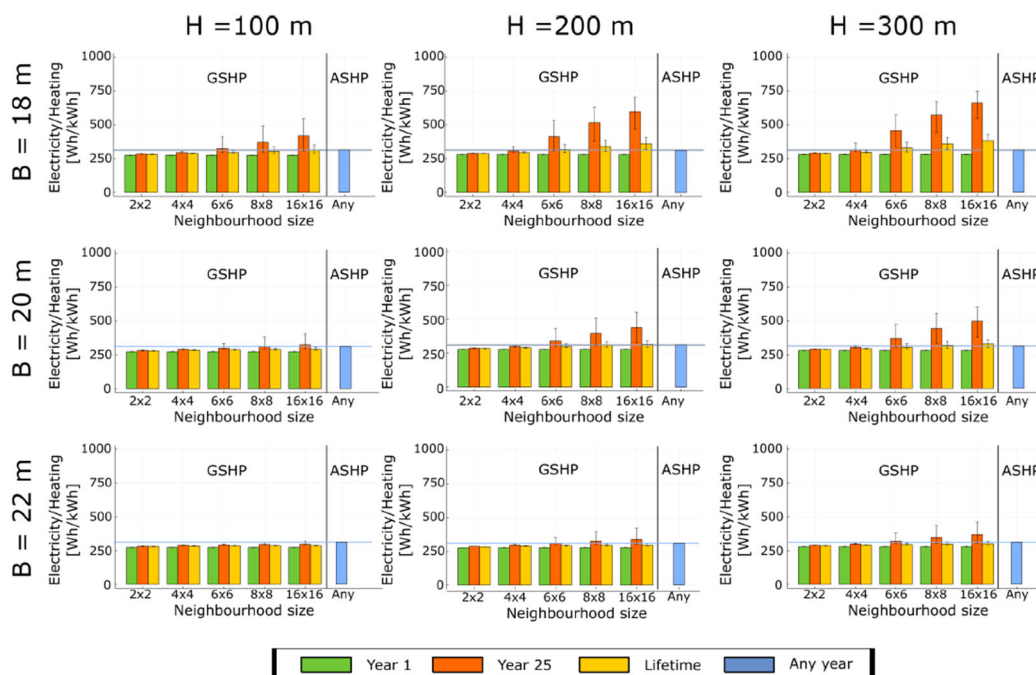
överträffar en referens-ASHP även under det sista driftåret (år 25). Det kan vidare anses att i Sverige har hög prestanda under värmesäsongen högre värde för husägaren och samhället än en hög prestanda under resten av året. Därför kan det också tänkas att olika riktlinjer skulle kunna kräva att en GSHP endast ska behöva överträffa en ASHP under perioder med hög efterfrågan på el, vilket inte undersökts i detta projekt.

Markens termiska egenskaper är desamma som tidigare, men olika avstånd mellan de rektangulärt arrangerade borrhålen på 18, 20 eller 22 meter, samt olika aktiva borrhålsdjup på 100, 200 och 300 meter. Energiuttaget för borrhålen antas vara proportionellt mot djupet, här valt det relativt höga energiuttaget motsvarande 200 kWh/m. Det antas att installerade värmepumpar kan leverera 99% av husets årliga uppvärmningsbehov under första året i drift. Värmepumpens prestanda uppskattas från Simon et al.⁷. De olika stora områden som simulerats visas i Figur 3.



Figur 3: Simulerade områden. Röda installationer är de med sämsta förutsättningarna.

⁷ F. Simon, J. Ordoñez, T. A. Reddy, A. Girard, and T. Muneer, "Developing multiple regression models from the manufacturer's ground-source heat pump catalogue data," Renewable energy, vol. 95, pp. 413–421, 2016.



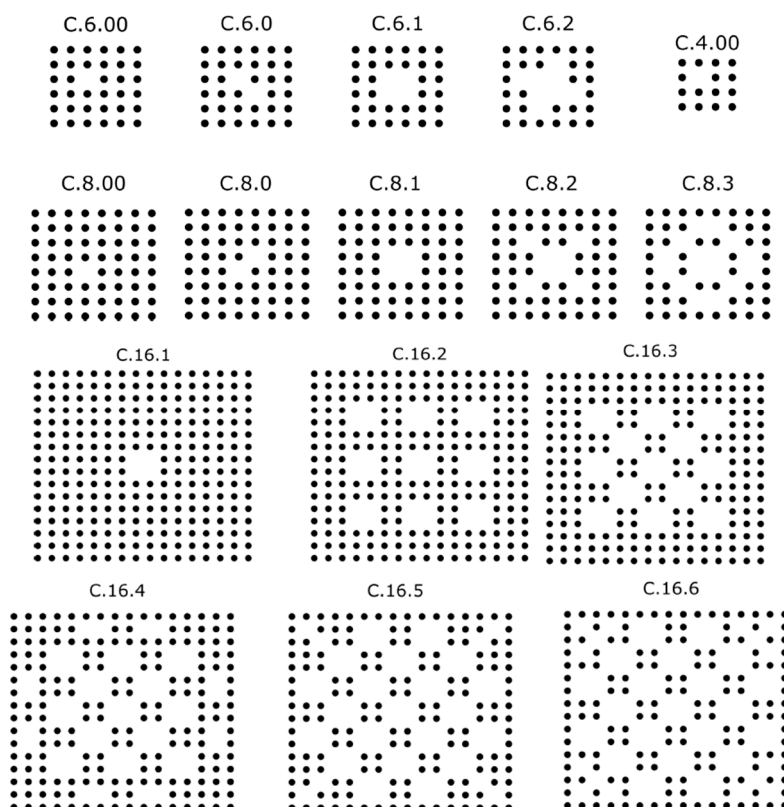
Figur 4: Kompressorel i förhållande till levererad värme för de mest påverkade systemen. SCOP = 4 motsvaras av 250 Wh/kWh och SCOP = 2 av 500 Wh/kWh.

Figur 4 visar de mest påverkade borrhålen i området, de mest centrala systemen, för olika storlekar på både område och byggnadernas energiuttag. "Lifetime" avser medelvärdet för kompressorel användning under hela värmepumpens livstid (25 år).

	2x2	4x4	6x6	8x8	16x16
B = 18 m, H = 100 m	Grönt	Grönt	Gult	Rött	Rött
B = 18 m, H = 200 m	Grönt	Grönt	Rött	Rött	Rött
B = 18 m, H = 300 m	Grönt	Gult	Rött	Rött	Rött
B = 20 m, H = 100 m	Grönt	Grönt	Grönt	Grönt	Gult
B = 20 m, H = 200 m	Grönt	Grönt	Gult	Gult	Rött
B = 20 m, H = 300 m	Grönt	Grönt	Gult	Rött	Rött
B = 22 m, H = 100 m	Grönt	Grönt	Grönt	Grönt	Grönt
B = 22 m, H = 200 m	Grönt	Grönt	Grönt	Gult	Gult
B = 22 m, H = 300 m	Grönt	Grönt	Gult	Gult	Gult

Figur 5: Jämförelse mellan bergvärme och uteluftvärmepump för de olika konfigurationerna. Grönt indikerar att bergvärme är bättre, gult att bergvärme är bättre i genomsnitt under dess livslängd, medans rött indikerar att luftvärmepump är bättre sett ur hela livstiden.

Det kan nu vara intressant att se, om vissa av energibrunnarna tas bort, hur prestandan förändras. Här har specifika system plockats bort, i en skarp installation kan man i stället kika på den specifika installationen. De konfigurationer som simulerats ses i Figur 6.



Figur 6: Simulerade konfigurationer där vissa borrhål tagits bort.

Tabell 2 visar hur stor andel av de borrhål som finns som uppfyller kriterier för att vara i medel bättre än luftvärmepump. De celler som inte har text i sig indikerar att alla borrhål kan utnyttja borrhålet fullt ut utan begränsningar, medan de med siffror indikerar att begränsningar i energiuttaget, samt vilken konfiguration som har den högsta (t.ex. för Riktlinje A, för 8x8 borrhålskonfiguration, kan 93% av kapaciteten utnyttjas i C.8.1).

Tabell 2: Resultat för de mindre områden för Riktlinje A (vänster) och Riktlinje B (höger).

	4x4	6x6	8x8	16x16		4x4	6x6	8x8	16x16
B = 18 m, H = 100 m					B = 18 m, H = 100 m		94%, C.6.0	93 %, C.8.1	79%, C.16.3
B = 18 m, H = 200 m		97%, C. 6.00	93%, C.8.1	85%, C.16.2	B = 18 m, H = 200 m		88%, C.6.1	75 % C.8.3	64%, C.16.5
B = 18 m, H = 300 m		94 %, C.6.0	87%, C.8.2	73%, C.16.4	B = 18 m, H = 300 m	93%, C.4.00	77%, C.6.2	75 % C.8.3	60 %, C.16.6
B = 20 m, H = 100 m					B = 20 m, H = 100 m				85 %, C.16.2
B = 20 m, H = 200 m				98 %, C.16.1	B = 20 m, H = 200 m		94%, C.6.0	80%, C.8.2	73 %, C.16.4
B = 20 m, H = 300 m			98%, C.8.00	85%, C16.2	B = 20 m, H = 300 m		88%, C.6.1	75 %, C. 8.3	73 %, C.16.4
B = 22 m, H = 100 m					B = 22 m, H = 100 m				
B = 22 m, H = 200 m					B = 22 m, H = 200 m			96 %, C. 8.0	85%, C.16.2
B = 22 m, H = 300 m					B = 22 m, H = 300 m		97%, C.6.00	93%, C.8.1	79%, C.16.3

Diskussion

De nya modellerna är mycket flexibla och kan ta hänsyn till ett stort antal borrhål⁸, slumpmässigt placerade, med olika geometriska egenskaper, som börjar extrahera energi vid olika år och har olika årliga energiuttag. Två olika modeller har i huvudsak utvecklats och de skiljer sig åt genom att en modell förutsätter att

⁸ Begränsningen är i datorns minneshantering och hur snabbt simuleringen ska vara klar.

energiuttaget från borrhålen är den enda faktorn som påverkar den marktemperaturen, medan den andra också kan ta hänsyn till effekten av förändringar i markytans temperatur, till exempel på grund av byggnadernas värmeförluster mot marken. Jämförelsen mellan de nya modellerna och tidigare tillgängliga litteraturmodeller – som inte är skräddarsydda för oberoende GSHP – påvisade att skillnaden mellan de nya och tidigare modellerna kan vara betydande, särskilt i större områden. Det tyder på vikten av att använda skräddarsydda modeller för tätbefolkade områden. Modellerna som föreslås i denna publicerad avhandling och i detta projekt är skräddarsydda för Sverige, främst kännetecknade av korta borrhål och en berggrund med låg porositet; Därför kan det anses att värmeledning är den dominerande värmeöverföringsmekanismen i underjorden.

Framtida forskning kan möjligen utvidga modellerna till att även ta hänsyn till eventuellt grundvattenflöde. Grundvattenflöde kan vara relevant inom andra områden. Ytterligare utveckling av modellerna kan också adressera den latent värme som är förknippad med eventuell frysning och upptining som sker i grundvattenfyllda borrhål, som de föreslagna modellerna försummar.

Framtida forskning kan också fokusera på att samla in data för att jämföra resultaten av simuleringarna med mätningarna från verkliga scenarier. Detta har delvis redan inletts inom ramen för detta projekt, men det finns för närvarande begränsad tillgänglighet/tillgänglighet till data från små värmepumpinstallationer.

En ytterligare utveckling kan också bestå i en modellering av den termiska interferensen mellan angränsande oberoende borrhålsfält, som kan bli relevant i mycket urbaniserade områden.

Tillämpningen av modellerna på både syntetiska och verkliga områden visade att i tätbefolkade områden kan termisk interferens mellan intilliggande borrhål vara betydande. Den senare delen av detta projekt har syftat till att undersöka strategier för att begränsa denna termiska interferens. Tre strategier är föreslagna, fler kan vara lämpliga: att öka längden på borrhålen, återlagra eller begränsa antalet borrhål i ett område. Resultaten antyder på att implementering av de två första strategierna kan kräva betydligt ökad borrhålslängd eller minskad borrhålsbelastning. Det kan leda till högre kostnader installationskostnader, medan den tredje strategin fortfarande kan tillåta en relativt hög (högre än 60 % i alla de scenarier som övervägs) utnyttjandegrad av GSHP utan extra kostnader. Det bör dock noteras att de två första strategierna hade ett annat mål jämfört med den tredje strategin: de två första strategierna syftade till att begränsa den underjordiska temperaturförändringen, medan den tredje strategin syftade till att förhindra en allvarlig nedgång i systemets prestanda. Ytterligare forskning skulle kunna utveckla en ram för att möjliggöra planering av GSHP i tätbefolkade områden med en kombination av dessa strategier.

Publikationslista

Modellbibliotek

I detta projekt har programmet Julia använts, som finns tillgängligt för alla att använda enligt "MIT License". Biblioteket finns på

<https://gitlab.com/mlfasci/GSHPsDesigner>

Doktorsavhandling (försvarad och godkänd 2023-10-05)

Thermal Interference Between Neighbouring Ground-Source Heat Pumps: Tools to Calculate it and Solutions to Limit it, M.L. Fasci, KTH, Skolan för industriell teknik och management (ITM), Energiteknik, Tillämpad termodynamik och kylteknik, TRITA-ITM-AVL ; 2023:19, ISBN: 978-91-8040-626-0, URN: <urn:nbn:se:kth:diva-335883>, DiVA, id: [diva2:1795520](https://diva2.org/1795520).

Artiklar som är inkluderade i doktorandens avhandling:

Fasci, M.L., Lazzarotto, A., Acuna, J. and Claesson, J., 2019. Analysis of the thermal interference between ground source heat pump systems in dense neighborhoods. Science and Technology for the Built Environment, 25(8), pp.1069-1080. <https://doi.org/10.1080/23744731.2019.16481301>

Fasci, M.L., Lazzarotto, A., Acuna, J. and Claesson, J., 2021. Simulation of thermal influence between independent geothermal boreholes in densely populated areas. Applied Thermal Engineering, 196, p.117241. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117241>

Fasci, M.L., Mazzotti Pallard, W., Lazzarotto, A. and Claesson, J., 2023. Temperature of energy boreholes accounting for climate change and the built environment – A new model for its estimation. Renewable Energy, 202, pp.1479-1496. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.12.023>

Artiklar eller rapporter som är också genomförda inom ramen för projektet (och projektet före detta)

Thermal influence of neighbouring GSHP installations: Relevance of heat load temporal resolution. Fasci, M.L., Lazzarotto, A., Acuña, J., Claesson, J. IGSHPA Research Track (2018)

Shallow Geothermal Heat Pumps: a study of the resource potential at a neighbourhood scale. Fasci, M.L., Lazzarotto, A., Acuña, J., Claesson, J. ICNTSE (2018)

A novel model for the estimation of thermal influence of neighbouring borehole heat exchangers Fasci, M.L., Lazzarotto, A. European Geothermal Congress (2019)

Performance of Ground Source Heat Pumps in Densely Populated Areas, Fasci, M.L., Lazzarotto, A., Coronado M., Claesson, J. Proceedings World Geothermal Congress (2020+1)

Air-, ground- and dual-source heat pumps: a comparison between energy-efficient systems for a Swedish dwelling, Fasci, M.L. E3S Web of Conferences. Vol. 362. (2022)

GSHPsDesigner: an open access tool for ground-source heat pumps designers and decision makers. Fasci, M.L., Lazzarotto A., Claesson, J. European Geothermal Congress (2022)

Novel tool and guidelines for ground source heat pumps in densely populated areas: a Swedish project. Fasci, M.L., Eriksson, L. IGSHPA Research Track (2022)

Influence of buildings on geothermal boreholes – a comparison between two models Fasci, M.L., IGSHPA Research Track (2022).

Studentarbeten inom ramen för projektet

Modelling the performance of heat pump systems for single-family house applications, Coronado Pons, Mar, KTH, School of Industrial Engineering and Management (ITM), 2019 (English)Independent thesis Advanced level (degree of Master (Two Years)), 20 credits / 30 HE credits, URN: [urn:nbn:se:kth:diva-261601](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:se:kth:diva-261601)

Performance of ground source heat pumps in densely populated areas, Eriksson, Linus, KTH, School of Industrial Engineering and Management (ITM), 2019 (English), Independent thesis Basic level (degree of Bachelor), 10 credits / 15 HE credits, URN: [urn:nbn:se:kth:diva-317251](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:se:kth:diva-317251)

Seasonal Thermal Energy Storage for Solar Energy - Lessons learned, Götling, Axel, Björkqvist, Dag, KTH, School of Industrial Engineering and Management (ITM), 2022 (English)Independent thesis Basic level (degree of Bachelor), 10 credits / 15 HE credits, URN: [urn:nbn:se:kth:diva-317261](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:se:kth:diva-317261)

Data center cooling solutions: A techno-economical case study of a data center in Sweden, Sjökvist, Joel, Magnusson, Fredrik, KTH, School of Industrial Engineering and Management (ITM), 2022 (English)Independent thesis Advanced level (degree of Master (Two Years)), 20 credits / 30 HE credits, URN: [urn:nbn:se:kth:diva-318580](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:se:kth:diva-318580)

Referenser, källor

F. Simon, J. Ordoñez, T. A. Reddy, A. Girard, and T. Muneer, “Developing multiple regression models from the manufacturer’s ground-source heat pump catalogue data,” Renewable energy, vol. 95, pp. 413–421, 2016.

Stockholms stad. 2005. Beräkningsprogram för dimensionering av energibrunnar i tätbebyggda villaområden.

Haehnlein, S., P. Bayer, and P. Blum. 2010. International legal status of the use of shallow geothermal energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14:2611–25.

Miglani, S., Orehounig, K., Carmeliet, J., 2018. A methodology to calculate long-term shallow geothermal energy potential for an urban neighbourhood. *Energy and Buildings* 159, 462–473. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.100>

Choi, W., Ooka, R., Nam, Y., 2018. Impact of long-term operation of ground-source heat pump on subsurface thermal state in urban areas. *Sustainable Cities and Society*. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.12.036>

Bilagor

Bilaga #1 – Administrativ Bilaga