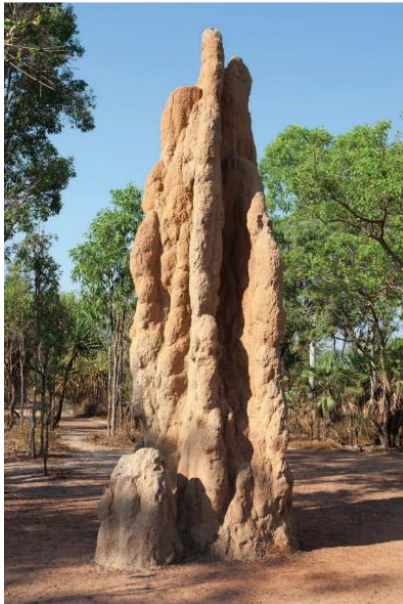


Avdelningen för Byggnadsfysik
Examensarbete TVBH—24/5133
Lund 2024

Nyttan av markförlagd ventilation i svenska byggnader

Litteraturstudie, fältmätningar och
intervjustudie



Moa Hellquist Lilja
Maja Sandström



LUNDS
UNIVERSITET

Nyttan av markförlagd ventilation i svenska byggnader

Litteraturstudie, fältmätningar och intervjustudie

Moa Hellquist Lilja
Maja Sandström

Examensarbete 22,5 hp

Avdelningen för Byggnadsfysik
Institutionen för Bygg- och miljöteknologi
Lunds Universitet
Box 118
221 00 Lund

© Moa Hellquist Lilja och Maja Sandström

ISRN LUTVDG/TVBH—24/5133—SE(111)

Institutionen för bygg- och miljöteknologi

Lunds tekniska högskola

Lunds universitet

Box 118

221 00 LUND

Sammanfattning

- Titel:** Nyttan av markförlagd ventilation i svenska byggnader - Litteraturstudie med fältmätningar
- Författare:** Moa Hellquist Lilja och Maja Sandström
- Handledare:** Akram Abdul Hamid, Institutionen för Bygg- och miljöteknologi, Avdelningen för Byggnadsfysik.
- Examinator:** Karin Farsäter, Institutionen för Bygg- och miljöteknologi, Avdelningen för Installations- och klimatiseringslära.
- Bakgrund:** För att nå samhällets satta klimatmål behöver energiförbrukningen sänkas. Målet genererar ett behov att utforska nya energieffektivare ventilationslösningar. Ett alternativ är att använda markförlagd ventilation som är en mer etablerad teknik i varmare klimat och nyttan med ett sådant system i svenskt klimat behöver därför undersökas. Systemets fördelar och problematik behöver utredas samt vilka konfigurationer som finns idag på marknaden. För att systemet ska kunna implementeras i Sverige krävs enkla och användarvänliga beräkningsmodeller och modelleringstekniker.
- Syfte:** Syftet med arbetet är att utreda nyttan av markförlagd ventilation i svenska byggnader med avseende på energibesparingsmöjligheter.
- Metoder:** För att landa i en relevant slutsats utreds frågeställningen med en litteraturstudie i kombination med en fältundersökning och kompletterande semistrukturerad intervjustudie. Litteraturstudien syftar till att samla resultat från publicerade internationella undersökningar för att få en inblick och överblick i markventilationens potentialer och begränsningar. Fältundersökningen syftar till att undersöka hur ett markförlagt ventilationssystem presterar i en svensk byggnad för att samla faktabaserad dokumentation och data. Intervjustudien syftar till att intervjua kompetenta personer inom branschen som har erfarenhet av att arbeta med markförlagd ventilation i svenska byggnader för att ge en inblick i hur dagens system utformas.
- Resultat:** Resultatet från fältundersökningen visar att markförlagda ventilationsrör har en utjämnande effekt på temperaturen och effekten är starkt beroende av utetemperaturen. Den maximala

temperaturökningen som uppmättes under mätperioden var 5 °C och den maximala temperatursänkningen var 12 °C. Litteraturstudien med komplimenterande intervjustudie visar att energibesparingar kan göras om installationen är korrekt och platsspecifik. Dock saknas fullständiga och enkla beräkningsmetoder och modelleringstekniker. Validiteten på de undersökningar som gjorts kan ifrågasättas eftersom indata inte presenteras och vissa resonemang saknar grund.

Slutsatser: Markförlagd ventilation går att bruka i svenskt klimat och kan medföra energibesparingar. Omfattningen av dessa besparingar är oklar då det saknas beräkningsmetoder och modelleringstekniker som ger ett tillförlitligt resultat. Detta på grund av de varierande parametrarna som påverkar systemet. Ytterligare forskning krävs inom området i form av bland annat mätningar under långa perioder för att generera data om systemets prestanda.

Nyckelord: Markförlagd ventilation, Termitventilation, Biomimik, EAHE-system

Keywords: Earth tube ventilation, Termite ventilation, Biomimicry, EAHE-systems

Abstract

Our society needs to lower emissions and energy consumption to reach the global climate goals. One way to regulate the energy consumption in buildings is by improving HVAC installations, which makes it relevant to find new ventilation solutions with a low climate footprint. A solution frequently used in hotter climates but relatively new in Sweden is EAHE-systems (Earth-Air Heat exchangers). This thesis investigates if EAHE-systems are suitable for installation in the Swedish climate and if the system contributes to significant savings in energy consumption. Since most investigations on EAHE-systems are oriented in hotter climates the potential benefits of integrating EAHE-systems in colder climates need to be investigated.

This thesis consists of a literature review to gather results and conclusions from international studies combined with field research investigating the benefits of an EAHE-system erected in the Swedish climate. The thesis also contains a complementary semi-structured interview study to gather information from experienced people working with EAHE-systems in Sweden. The thesis aims to investigate the utility of EAHE-systems in Swedish climate and how reliable energy-saving predictions can be available to Swedish consultants in terms of simulations and calculations modelling techniques of EAHE-systems.

The literature study showed that savings in energy consumption can be made if the EAHE-system is correctly installed and customized based on the surrounding environment. It is concluded that a deeply buried, long pipes with a relatively low air velocity and small diameter results in a more efficient heat exchange with the ground. However, these results are based on studies performed in hot climates and documentation and validation methods are not presented in most publications making it difficult to determine the actual benefits of this type of system, especially in a colder climate with strongly season-based temperature fluctuations.

Previous studies have shown that the systems' performance is strongly connected to surrounding temperature and climate which questions the suitability of EAHE-systems in strongly varying climates. To reduce the risk of supplying pollutants to the indoor environment and increase potential for the energy savings, an option is to use a hybrid system, such as a ground-duct pipe in combination with an ASHP (Air-Source Heat Pump) or HRU (Heat Recovery Unit). The EAHE-system can contribute to energy savings by naturally preheating/precooling the outside air, relieving the workload on the hybrid component. It is complicated to predict the extent of the potential energy savings since accurate calculation models and simulation techniques are missing, and further research is required.

The field study showed that the EAHE-system dampened the temperature variations in the supplied outdoor air. The system's impact on the indoor climate is challenging to evaluate since the EAHE-system used in the field study does not utilize any mechanical air flow or other hybrid components, resulting in various air flows inside the pipe. To properly determine the possible benefits of the system, measurement should be conducted over a more extended period, preferably at least a year, to capture the impact of seasonal changes.

Förord

Vi vill inleda med att säga stort tack till vår handledare Akram Abdul Hamid som under hela arbetets gång besvarat våra frågor och väglett oss i examensarbetet. Han har varit till stor hjälp under fältundersökningen och försett oss med all den information vi behövt för att genomföra olika moment. Vi vill även rikta ett stort tack till Paulien Strandberg-de Bruijn som tagit sig an rollen som biträdande handledare och möjliggjort fältundersökningen genom kontakt med Lars Färnevik. Även Karin Farsäter som tagit sig an rollen som examinator ska ha ett stort tack.

Tack till Lars Färnevik som gett oss möjligheten att utföra mätningar i hans villa. Vi är väldigt tacksamma för hans entusiasm och intresse kring arbetet som har underlättat genomförandet av undersökningen. Vi vill även tacka Johan Claesson som ställt upp på ett möte för att diskutera hans beräkningsmodell och hur den skulle kunna användas i arbetet. Vi vill även uttrycka vår tacksamhet till samtliga författare vars illustrationer, bilder och tabeller som vi har fått tillåtelse att använda i rapporten.

Avslutningsvis vill vi tacka intervjupersonerna Daniel Wenersand, Malin Johansson och Charlotta Berggren som ställt upp på intervjuer och besvarat våra frågor och funderingar. Våra möten har gett oss en bra och värdefull inblick i hur svenska byggföretag använder och resonerar kring markförlagd ventilation.

Lund i maj 2024

Moa Hellquist Lilja och Maja Sandström

Begreppsförklaringar

Begrepp/ Förkortning	Förklaring	Svensk motsvarighet
ASHP	Air-Source Heat Pump	Luftvärmepump
Deduktiva metoder	Utgår från hypotetiska samband mellan premiss och slutsats. Ex om A, så B.	-
Deterministisk modell	Förutsäger framtida händelser med endast en uppsättning kända parametrar.	-
a) EAHE b) ETAHE c) GAHE d) EATHE	När luft är den aktiva fluiden kan ett markförlagt rörsystem kallas: a) Earth-Air Heat Exchanger b) Earth-To-Air Heat Exchanger, c) Ground-Air Heat Exchanger d) Earth-Air-Tunnel Heat Exchanger.	Termitventilationssystem/ markförlagt ventilationssystem
Ejektorverkan	Till följd av att luft/vätska färdas i ett utrymme med viss hastighet skapas ett vacuum nedtill som drar med luft upp ur utrymmet.	-
GSHP	Ground-Source Heat Pump. Markförlagda rörsystem där andra fluider än luft är vanliga, exempelvis glykol. Slutna system.	-
HRU	Heat Recovery Unit	Värmeväxlare
HTR	Heattransfer rate. Beskriver ett ventilationssystemets förmåga att överföra värme till omgivande jord. En indikator på att ett system är effektivt är ett högt HTR.	Värmeöverföringsförmåga
HVAC-system	Heating Ventilation Air Conditioning systems	Värmesystem, ventilationssystem och luftkonditioneringsystem
Induktiva metoder	Använder en stor mängd data för att göra generaliseringar.	-
Intelligent modell	En modell som kan identifiera mönster och dra egna slutsatser utifrån en uppsättning data.	-
Induktiva metoder	Använder en stor mängd data för att göra generaliseringar.	-
Intelligent modell	En modell som kan identifiera mönster och dra egna slutsatser utifrån en uppsättning data.	-
SAH	Solar Air Heater	Solfångare
SAHD	Solar Air Heating Duct	Solvärmekanaler
SGHE	Shallow Ground Heat Exchangers.	Rör placerade på ett grunt djup.
Soil Thermal Saturation	När jorden absorberat värme från intilliggande rör och därav inte kan utbyta värme med röret lika effektivt. Jorden är "mättad" på värme.	-
Stack effect	Stackeffect bygger på att luft rör sig uppåt och ut i byggnader genom oförseglade öppningar	-

	(som exempelvis skorstenar) till följd av tryck- och temperaturskillnader invändigt.	
Termosifonflöde	En passiv metod för värmeväxling som bygger på naturlig konvektion där inga yttre mekaniska komponenter krävs för att cirkulera en vätska eller gas.	-

Innehållsförteckning

Sammanfattning.....	i
Abstract	iii
Förord	v
1 Inledning.....	1
1.1 Bakgrund.....	1
1.2 Syfte och Mål	2
1.3 Avgränsningar	2
1.4 Problemformulering.....	3
1.5 Övergripande metod.....	3
2 Teori	5
2.1 Biomimik	5
2.2 Svenska krav på ventilation	6
2.3 Markförlagd ventilation	6
2.3.1 Termitstackens funktion och uppbyggnad.....	6
2.3.2 Historik markförlagd ventilation	9
2.3.3 Termitinspirerad ventilation i befintliga byggnader	9
2.3.4 Avgörande parametrar vid utformning av markförlagda rör	13
2.3.5 Klassificering av olika EAHE-system	16
2.3.6 Problematik kring markförlagda ventilationssystem	27
2.4 Existerande beräkningsmetoder	29
2.4.1 Beräkning i tvärsnitt	29
2.4.2 Beräkning baserat på massflödeshastighet.....	33
2.4.3 Beräkning av uppvärmningskapacitet och värmeutbyteseffektivitet	33
2.4.4 Beräkning av markrörets effekt	35
2.5 Modellering.....	36
2.5.1 Datautvinningsalgoritm	37
2.5.2 Oskarp logikmodell	38
2.5.3 Fallbaserade resonemang.....	38
2.5.4 Statistisk modellering	39
2.5.5 Stokastisk modellering.....	39
2.5.6 Problematik kring modellering	40
3 Metod.....	41
3.1 Fältundersökning.....	41
3.1.1 Mätningar av temperatur och relativ luftfuktighet.....	44
3.1.2 Mätning av luftflöde och lufthastighet.....	46
3.1.3 Beräkning av luftflöde	50
3.2 Insamling av klimatdata	50
3.3 Intervjustudie	51
3.4 Litteraturstudie	51
4 Mät- och intervjuresultat med diskussion.....	53
4.1 Luftflödesmätningar.....	53
4.2 RF- och temperaturmätningar med tillhörande klimatdata	55
4.2.1 Felkällor.....	69
4.3 Sammanställning av intervjustudie	70
5 Diskussion om applicerbarhet på svenska marknaden	73

5.1	Anpassningsmöjligheter av EAHE-system för svenskt klimat	73
5.1.1	Potential med avseende på kyl- och värmeffekt	73
5.1.2	Val av hybridsystem	74
5.1.3	Val av rörkonfiguration	76
5.1.4	Val av driftläge	77
5.1.5	Val av luftcirkulationsläge.....	78
5.1.6	Dimensionering av luftflöde, längd, grundläggningsdjup och diameter..	78
5.2	Potentiella svårigheter kring systemet med förslag på förbättringsåtgärder	80
5.3	Applicerbarhet av beräkning och modellering på den svenska marknaden	81
5.3.1	Beräkning.....	81
5.3.2	Modellering.....	83
6	Slutsats.....	85
6.1	Är markförlagd ventilation gynnsam i svenska byggnader?	85
6.2	Problematik och förslag på åtgärder.....	85
6.3	Fältundersökning.....	86
7	Framtida forskning	87
	Referenser.....	89
	Bilagor	95
	Intervjustudier.....	95
	Bilaga A: Intervju med Uponor	95
	Bilaga B: Intervju med ByDemand	95
	Bilaga C: Intervju med Totalinstallation AB.....	96
	Bilaga D: Samtal med Lars Färnevik	97

1 Inledning

I detta kapitel introduceras ämnet och begreppet "markförlagd ventilation" samt varför det är relevant att undersöka och mäta potentiell nytta av systemet. Det beskrivs även varför det är intressant att lägga resurser på att fördjupa förståelsen kring ämnet med infallsvinkeln nyttan i svenskt klimat. Arbetets syfte och mål adresseras och problemformuleringar tas upp som behandlas i efterföljande kapitel. Arbetets avgränsningar samt en övergripande metod presenteras.

1.1 Bakgrund

Standarden på svenska byggnader utvecklas ständigt och det blir därför avgörande att hitta ekonomiskt fördelaktiga- och energieffektiva lösningar vid byggnation. Samhällets utsläpp av växthusgaser behöver minskas för att uppnå klimatmålet att begränsa den globala temperaturökningen långsiktigt till maximalt 2 °C men helst till 1,5 °C (Europeiska rådet 2024). I allmänhet medför en ökning av utomhustemperaturen en ökning av inomhustemperaturen vilket potentiellt kan leda till ett ökat behov av kylsystem i framtidens bostäder. Ett av Sveriges energimål är att år 2030 ha en energianvändning som är 50% effektivare än år 2005 (Regeringskansliet u.å.). Idag står byggbranschen för cirka 36% av den globala energianvändningen och för 39% av energirelaterade koldioxidemissioner där HVAC-system (Heating Ventilation Air Conditioning) har en avgörande roll för energikonsumtionen i driftskedet (Soares m.fl. 2021). Till följd av de klimatmål som finns i kombination med komfortkrav från regeringen, finns ett stort behov att utforska nya ventilationslösningar som kan agera med likvärdig effekt men med sänkt energiåtgång. Några av kraven som ska uppnås i svenska byggnader är bland annat från BBR som kräver att ett rum ska upprätthålla termisk komfort utifrån rummets funktion (Boverket 2024b) samt från Arbetsmiljöverket som ställer krav gällande uteluftsflöde (Arbetsmiljöverket 2023). För att möta klimatmålen och kraven på inomhusmiljön behöver nya tekniker och metoder för energihushållning tas fram.

I husen som byggdes före 1975 var ett aktivt ventilationssystem inte nödvändigt utan de flesta husen nyttjade endast självdrag på grund av de nästan obefintliga kraven på inomhusmiljö. Självdrag var således den vanligaste ventilationstypen fram till 1975 och därefter började mekaniska ventilationssystem ta en allt större plats i Sverige. Idag är de vanligaste ventilationstyperna mekaniska ventilationssystem som kräver energi antingen i form av el eller tillsatt värme/kyla för att fungera (Boverket 2010).

Ett av idag många tillgängliga ventilationssystem är markförlagd ventilation, även kallat termitventilation eller EAHE-system (Earth-Air Heat Exchanger) men som idag är relativt nytt och utforskat i svenskt klimat. Termitventilation är inspirerat av termiter och artens förmåga att hålla ett behagligt och välventilerat invändigt klimat i stacken trots den omgivande varierande temperaturen (Landin & Mashreghi 2020). Termiter är vanligt förekommande i varma klimat som Australien, Afrika och Sydamerika (Korb 2003) och de komplexa myrstacksliknande högarna har inspirerat arkitekter att integrera

mekaniken bakom termitstackarnas ventilationssystem i byggnader där nedkylning av luft står för en stor del av energiåtgången (Pawlyn 2016). Den till synes mest omtalade byggnaden med ett termitinspirerat ventilationssystem finns i Zimbabwe och heter Eastgate Center, en byggnad i flera våningar med både kontor och shoppingcenter som med ett termitinspirerat ventilationssystem gjort stora energibesparingar (Pawlyn 2016). En intressant frågeställning är om denna typ av system kan generera samma goda resultat i svenska byggnader i svenskt klimat?

I takt med ökad bebyggelse har flera lösningar på ventilationssystem tagits fram där majoriteten av de som används i Sverige idag är aktiva system som är beroende av någon form av yttre energikälla (Boverket 2010). Då markförlagd ventilation bygger på naturlig nedkylning av luft genom att nyttja markens värmekapacitet finns stor potential till ett lågt klimatavtryck och stora energibesparingar (Soares m.fl. 2021). Idag finns ett fåtal byggnader med termitventilation i Sverige men det finns utrymme för förbättring i dokumentationen av mätvärden och fältundersökningar som ger konkreta data på nyttan med denna typ av system. Genom fältundersökningar och dokumentation kring ämnet kan förhoppningsvis frågan besvaras om termitventilation är en lämplig lösning för byggnader uppförda i svenskt klimat.

1.2 Syfte och Mål

Syftet med examensarbetet är att undersöka nyttan av markförlagd ventilation i byggnader uppförda i Sverige med avseende på energibesparingsmöjligheter samt hur nyttjandet av denna typ av system påverkar inomhusklimatet.

Målet med undersökningen är att bedöma om termitventilation är ett gynnsamt system för svenska byggnader samt att undersöka hur det kan modelleras/simuleras på ett enkelt och korrekt sätt för att göra tekniken applicerbar för den svenska byggindustrin. Undersökningen kommer att utreda hur systemet kan konstrueras och utformas för att optimera prestandan samt vilka parametrar som avgör hur effektivt systemet är. Underlaget för att besvara frågeställningen baseras på fältundersökningar på en existerande byggnad med markförlagd ventilation i kombination med underlag i form av studier och undersökningar samt intervjuer med erfarna inom området. Undersökningen behandlar frågeställningen om termitventilation medför energibesparingar och hur inomhusklimatet påverkas. I bedömningen beaktas även eventuella problem som kan uppstå för att avgöra om termitventilation kan medföra nytta i svenska byggnader.

1.3 Avgränsningar

Arbetet beaktar endast energibesparingspotential och inverkan på inomhusklimat ur komfortaspekt samt eventuella tillkommande observerade problem. Bedömningen av resultatet appliceras på svenskt klimat med svensk byggteknik. Litteraturstudien är inte en uttömmande litteraturstudie. Vid fältundersökning kommer temperatur, relativ fuktighet och luftflöde mätas i rören. Mätningarna genomförs endast i en byggnad under en period på två veckor i mars.

1.4 Problemformulering

- 1) Är markförlagd ventilation lämpligt att använda i svenskt klimat? Vilka är fördelarna med markförlagd ventilation? Hur skulle det gynna byggnadens funktion?
- 2) Vilka potentiella problem kan uppstå med markförlagd ventilation, hur kan dessa åtgärdas eller minimeras?
- 3) Hur kan markförlagd ventilation modelleras för att vara användbart för svenska byggkonsulter?
- 4) Vilka olika rörutformningar och konfigurationer används i dagsläget?
- 5) Vad visar fältundersökningen med avseende på energibesparing och inomhusklimat?

1.5 Övergripande metod

Rapportens frågeställningar besvaras genom tre metoder; en fältundersökning, intervjustudie och litteraturstudie. Intervjustudien besvarar frågeställning 1), 2) och 3) och genomförs för att få en inblick i hur svenska företag arbetar med markförlagd ventilation. Fältundersökningen besvarar frågeställning 5) och genomförs för att samla data och dokumentation kring hur markförlagd ventilation presterar i svenskt klimat. Litteraturstudien besvarar frågeställningarna 1), 2), 3) och 4) med syfte att samla information kring systemet i form av resultat från nationella och internationella fältstudier och litteraturstudier. Metoden för fältundersökningen och intervjustudien beskrivs i kapitel 3.

2 Teori

I detta kapitel beskrivs teorin bakom markförlagd ventilation för att förse läsaren med en djupare förståelse kring systemets funktion och problematik samt introduktion av tillhörande relevanta begrepp som bland annat "biomimik". Termitstackarnas mekanismer och funktion introduceras för att ge förståelse kring vilka delar, funktioner och processer som eftersträvas att imiteras vid bebyggelse. Olika konfigurationer och förslag på klassificering av olika termitventilationssystem presenteras och vad som bör beaktas vid utformning av rörsystemet samt för- och nackdelar med dessa. Kapitlet avslutas med introduktion till existerande beräkningsmodeller och modelleringstekniker. Teorikapitlet präglas genomgående av resultat från både nationella och internationella fältstudier och litteraturstudier för att komplettera fakta kring ämnet.

2.1 Biomimik

Biomimik är en teknik där naturliga system och funktioner imiteras för att skapa industriella produkter. Tekniken utgår från vad som kan läras av naturen snarare än vad som kan utvinnas av den (Elghawaby 2010). Biomimik eller *biomimicry* som det heter på engelska, fokuserar på funktionella lösningar och inte nödvändigtvis på estetiska aspekter. Metoden handlar inte om att skapa en identisk avbildning av naturen utan om att hitta tekniska lösningar genom tolkningar av naturen (Landin & Mashreghi 2020).

Beroende på inom vilket användningsområde naturinspirerade lösningar appliceras används olika terminologi. Begreppet biomimik började användas i vetenskaplig litteratur 1962 och på 1980-talet ökade användningen främst bland materialforskare. En synonym till begreppet biomimik är *biomimetics* som används mer inom militärteknik. Inom medicin och biomedicin är begreppet *biodesign* ofta förekommande (Pawlyn 2016) medan inom elektronik och teknologi används begreppet *bionik* i större utsträckning. Det finns flera exempel på tekniker där bionik använts och ett par av dessa är ultraljud och sonarljud (Landin & Mashreghi 2020).

Biomimik går tillbaka till 500-talet f.v.t. då grekiska filosofer betraktade naturliga organismer som modeller för en harmonisk balans och synonymt med ett klassiskt ideal av skönhet. Ett välkänt historiskt exempel på när biomimik använts är när Leonardo Da Vinci uppfann en flygmaskin 1482 inspirerat från fåglars flygteknik. Da Vincis flygmaskin blev senare inspiration till de första flygfarkosterna som byggdes (Radwan & Osama 2016). Flygindustrin är idag en central aktör i de pågående klimatförändringarna och stod för cirka en fjärdedel av världens totala utsläpp av koldioxid 2019. Därav kan det konstateras att biomimik inte nödvändigtvis innebär en fördel för naturen eller klimatet utan används i vissa fall för ekonomisk vinning (Landin & Mashreghi 2020). Det finns flera exempel på när biomimik använts inom arkitekturen, ett är Eiffeltornet vars konstruktion och form är inspirerad av lårbenets uppbyggnad. Lårbenet klarar mycket tryck samtidigt som det är en lätt konstruktion (Radwan & Osama 2016).

2.2 Svenska krav på ventilation

För nybyggda bostäder ska det finnas ett uteluftsflöde på minst 0,35 l/s m² golvarea enligt Boverkets föreskrifter BBR. För en rumshöjd på 2,5 m motsvarar detta ett krav på cirka 0,5 luftomsättningar per timme (Warfvinge & Dahlblom 2010). Boverket (2009) genomförde en studie på uppdrag från regeringen där svenska byggnaders tekniska utformning undersöktes. Resultatet från de mätningar som gjordes visade att den genomsnittliga luftomsättningen i småhus var 0,40 oms per timme. En tätare byggnad kan minska drag men det kan också leda till att luftomsättningen i byggnaden minskar (Boverket 2009).

Tidigare råd från Boverket som idag används som praxis på lägsta frånluftsflöde anger att bad- eller duschrum med öppningsbart fönster bör ha ett frånluftsflöde på 10 l/s. Om golvarean är större än 5 m² bör frånluftsflödet ökas med 1 l/s för varje ytterligare kvadratmeter (Warfvinge & Dahlblom 2010).

2.3 Markförlagd ventilation

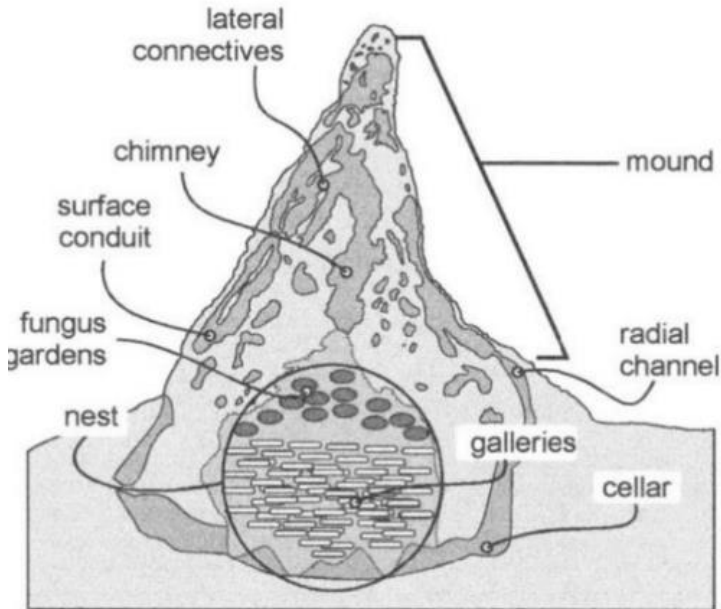
I detta avsnitt beskrivs begreppet och historiken bakom markförlagd ventilation samt vilka delar och mekanismer i termitstacken som eftersträvas att efterliknas vid byggnation. Befintliga byggnader med markförlagd ventilation presenteras samt avgörande parametrar som tas hänsyn till vid utformning. Förslag på klassificering av markförlagd ventilation presenteras och bryts ned. Kapitlet avslutas med potentiella observerade problem som kan tillkomma med markförlagd ventilation.

2.3.1 Termitstackens funktion och uppbyggnad

Termitbon har en förmåga att hålla en jämn och behaglig invändig temperatur trots att de förekommer i kraftigt varierande utvändigt klimat och temperatur. Vetenskapen bakom termitstackens utformning har idag inspirerat arkitekter till hur byggnader i varma klimat kan kylas ner genom ventilation för att på ett naturligt sätt uppnå ett behagligt inneklimat (Pawlyn 2016).

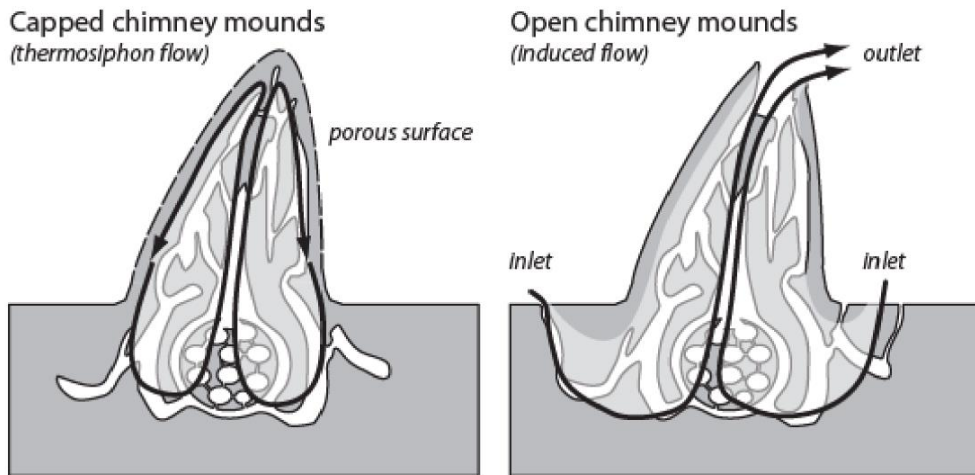
Karakteriseringen bakom de välventilerade termitstackarna är en kombination av boets exteriöra utformning, som är anpassad till omgivningen, samt de inre ventilerande mekanismerna. Väggarna består av en blandning av jord och termitsaliv vilket skapar en hård struktur som kan liknas vid cement (Landin & Mashregghi 2020). Utåt sett ser termitboet ut som en hård fast hög, men den synliga stacken är endast en liten del av ett större system som är integrerat under jorden. Hela systemet kan liknas vid funktionen av en lunga som förser hela boet med frisk luft genom en kombination av påtvingad- och naturlig konvektion genom termitboets rörliknande gångar (Turner & Soar 2008). Miljöforskarna Soar och Turner har genom att studera termitbon konstaterat att ventilationssystemet drivs av frekvenskillnader och små skillnader i vindtryck snarare än ett oriktat luftflöde. Hela systemet är alltså mer komplext än vad tidigare antaganden har indikerat (Pawlyn 2016).

Utvändigt finns stora variationer i utseendet av stacken och de kan grupperas efter öppna- och slutna bon vilket har en avgörande roll för hur luftflödet drivs. Något som dock kännetecknar alla termitstackar är att de består av komponenterna *näste* som är belägen en bit ner under jorden och *skorsten* som sticker upp ovanför jordens yta, se figur 2.1 (Landin & Mashreghi 2020).



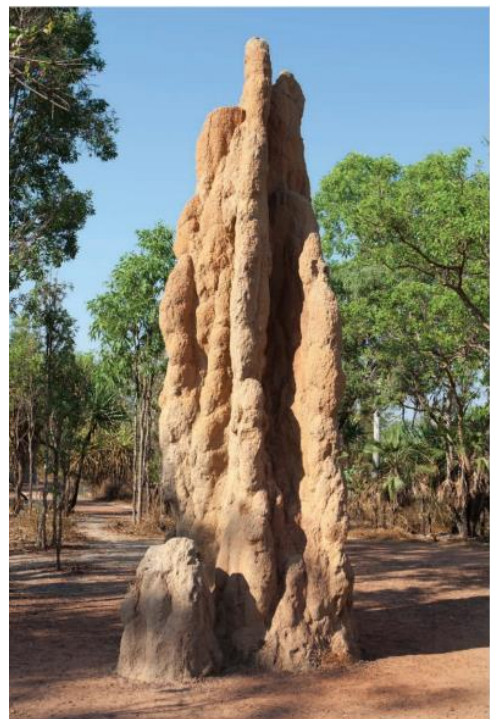
Figur 2.1 - Illustration av termitstackens olika delar (Landin & Mashreghi 2020).

Det slutna systemet bygger, till skillnad från det öppna, på termosifonflöde där luften rör sig i en sluten krets genom temperatur- och densitetsskillnader. Det öppna systemet bygger på en mekanism som kallas *stack effect* och innebär att luft drivs in genom öppningar nära marknivå och drivs upp ut genom skorstenen. Den uppvärmda luften drivs uppåt till följd av att de högre vindhastigheterna upptill skapar ett sug (Turner 2000). När den varma luften från nästet stiger skapas ett undertryck nedtill i stacken och tvingar därför ner kall luft som läcker in genom öppningarna i skorstenen. Resultatet blir att termiterna kan leva i ett behagligt klimat utan extern energitillförsel (Landin & Mashreghi 2020). Se figur 2.2 för illustration av öppna- och stängda system. Insidan är till stor del åtskild från uteklimatet och endast små öppningar i form av ventiler och porer sammankopplar ute och inne. Således fungerar hela termitboet som ett slutet ekosystem där det inte är ovanligt att matförråd finns nere i nästet, ett exempel är arten *Macrotermitinae* som nyttjar det välventilerade nästet för att bygga komplexa svampodlingar (Noirot & Darlington 2000).



Figur 2.2 – Visar skillnaden i luftflödets bana genom öppna- respektive stängda system. Vänster bild visar termosifonflödesprincipen, höger bild visar stack effect principen (Turner 2000).

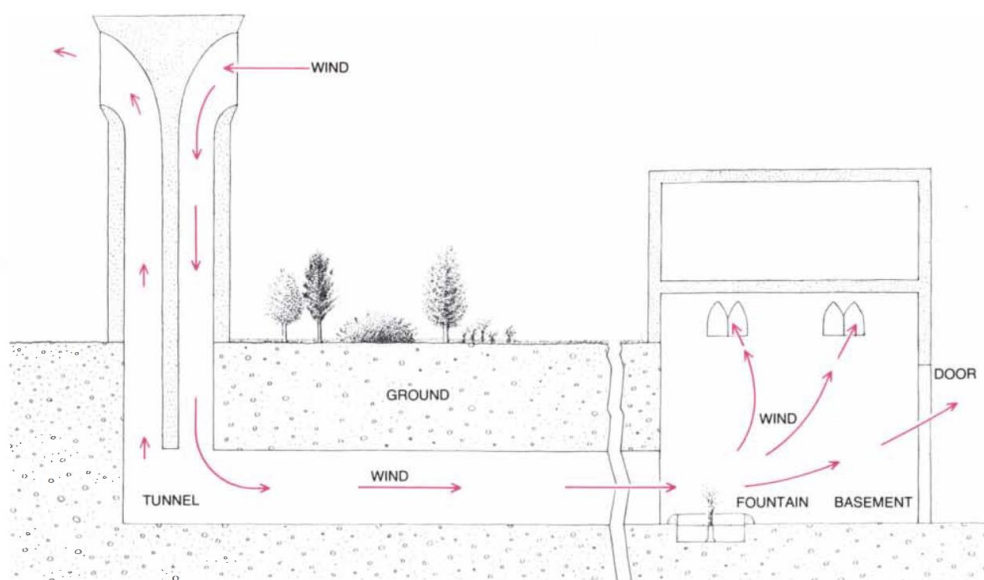
I västra Australien har arten *kompassstermiter*, även kallade *Amitermet Meridionalis* studerats. Kompassstermiter bygger höga mandelformade bon som är utformade för att följa solens rörelsemönster för att minimera risken för överhettning under dagen respektive nedkylning under natten. Figur 2.3 visar den plattare delen av det mandelformade boet som har en absorberande funktion och är lokaliserad för att fånga morgonsolen. Syftet med att snabbt utnyttja morgonsolens värmeenergi är att dämpa påfrestningen på boet från nattens kalla klimat. Den spetsigare delen av boet har en undvikande funktion med intention att möta solen när den står som högst för att absorbera så lite värme som möjligt dagtid. I Australien är det inte ovanligt att temperaturen kan variera upp till 39 °C mellan dag och natt vilket gör det vitalt för termiterna att nyttja naturens omgivande mekanismer (Pawlyn 2016).



Figur 2.3 – Bild av termitkompassernas mandelformade bon i västra Australien (Pawlyn 2016).

2.3.2 Historik markförlagd ventilation

På senare tid har markförlagd ventilation uppmärksamats och flera undersökningar har genomförts på systemet. Tekniken har dock sedan långt tillbaka i historien nyttjats för att upprätthålla ett behagligt inomhusklimat. Ett exempel är den traditionella arkitekturen i Iran där flera delar av byggnaderna designades för att nyttja dygnets temperaturvariationer där dagstemperaturen under sommaren är hög och nätterna svala. I vissa byggnader cirkulerades kall luft genom byggnaden för att hålla vatten kallt och is från vintern frusen. Under 900-talet började vindtornssystem användas som nyttjar att luften har olika densitet i olika temperaturer. Den kalla luften sjunker i vindtornet till följd av den högre densiteten medan den varma stiger, se figur 2.4. Vindtornet fungerar på olika sätt beroende på tid på dagen och vindhastigheten. När de varma väggarna värmer nattluften absorberar väggarna kyla från den kalla nattluften som under dagen kan användas för att kyla den varma luften. Vindhastigheten påverkar systemets effektivitet genom att en högre hastighet ger mer effektivt kylande då flödet blir större (Bahadori 1978).



Figur 2.4 – Illustration över ett vindtornssystem (Bahadori 1978).

2.3.3 Termitinspirerad ventilation i befintliga byggnader

2.3.3.1 Eastgate Centre, Zimbabwe

En mycket omtalad termitinspirerad byggnad är Eastgate Centre i Zimbabwe, se figur 2.5. Byggnaden färdigställdes 1996 av arkitekten Mick Pearce tillsammans med miljöforskarna Soar och Turner som studerat fysiologin bakom olika organismers skapta strukturer (Landin & Mashreghi 2020). Eastgate Centre är en flervåningsbyggnad med både kontor och shoppingcenter. Byggnaden förbrukar endast en tiondel av den energi som krävs för att upprätthålla samma standard på inomhusklimat som i en traditionellt

uppförd byggnad. Genom att använda markförlagd ventilation lyckas byggnaden även hålla en jämn inomhustemperatur mellan 21–25 °C trots att skillnaden i utetemperaturen kan fluktuera upp till 33 °C under ett dygn (Pawlyn 2016).



Figur 2.5 – Fotografi av Eastgate Centre Zimbabwe (Williams 2020).

Idén bakom Eastgate-projektet var att partiellt hämta designinspiration från den lokala naturen och dels att efterlikna funktionella naturliga processer (Turner 2000). Mer specifikt inspirerades Pearce av termitstacksstrukturen hos arterna *Macrotermes Michaeleni* och *Macrotermes Subhyalinus* i södra Afrika. Arternas förmåga att utnyttja jordens stabila marktemperatur för att kyla och ventilerat boet blev grunden till utformningen av ventilationssystemet i Eastgate Centre. Den höga byggnaden kan liknas vid de meterhöga termitstackarna där målsättningen med strukturen är att förse den enorma byggnaden med frisk luft på ett okonventionellt sätt (Pawlyn 2016). Efter senare studier har det framgått att termitbon har en mer komplex uppbyggnad än vad som var kartlagt vid tidpunkten då Eastgate Centre konstruerades. Trots den förenklade strukturen fungerar ventilationssystemet i Eastgate Centre utan problem och med positiva resultat på energiförbrukningen (Turner 2000).

Som tidigare nämnt är termitstackar komplexa och välventilerade bon bestående av flera olika sammanflätade system och mekanismer som samverkar i ett slags ekosystem. Eastgate Centre har endast imiterat stack effect som bygger på att uppvärmd luft drivs upp genom konvektion (Turner 2000). När utetemperaturen sjunker under natten suges den kalla utomhusluften in genom fläktar mellan första och andra våningen. Luften cirkuleras sedan genom stora tomrum där den kommer i kontakt med betongelement.

Den stora exponerade ytan maximerar värmeöverföringen och håller luften kyld. När dagen sedan kommer fördelas den kylda luften ut i byggnadens lokaler via ett mekaniskt flödessystem för att kyla och ventilera byggnaden (Pawlyn 2016). Principen fungerar bra i höga byggnader då luften tvingas uppåt när den värms upp av mänsklig aktivitet och varma maskiner. Luften stiger och passerar olika utrymmen vilket skapar ett naturligt luftflöde genom lokalerna. Till följd av att den uppvärmda luften stiger skapas ett undertryck nedtill i byggnaden och kall frisk luft drivs in på nytt som ett resultat av tryckskillnaden inomhus (Turner 2000).

2.3.3.2 Laggarbergs skola, Timrå

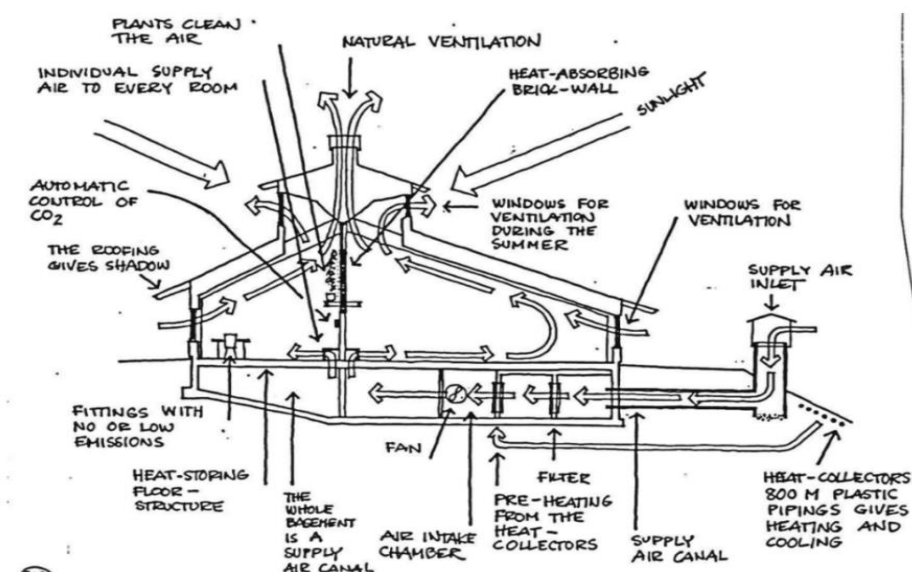
På den svenska marknaden är markförlagd ventilation inte i närheten lika uppmärksammat som det har blivit internationellt. Ett exempel där markförlagd ventilation används i svenska byggnader är Laggarbergs skola i Timrå, se figur 2.6, där den svenska arkitekten Anders Nyquist integrerade systemet i samband med en renovering av skolan (Landin & Mashreghi 2020). Skolan byggdes 1932 och en del renoverades 1995 där Nyquist var med och skapade en av världens mest kretsloppsanpassade skolor genom att hämta inspiration från naturen i form av solfångare, komposter och växthus. Vid byggnationen användes miljöanpassat och återvinningsbart material samt installationstekniska lösningar i form av en kombination av markförlagd ventilation och självdraagsventilation (Brännström m.fl. 1998).



Figur 2.6 – Laggarbergs skola i Timrå kommun (Timrå Kommun 2024).

Ventilationssystemet i Laggbergs skola fungerar genom att tilluft tas in via huvar som är placerade i anslutning till byggnaden och sugs ner i tilluftskanaler av betong som leder in under skolbyggnaden. I och med att temperaturen varierar kraftigt mellan årstiderna agerar marken antingen som kylande eller värmande beroende på om det är sommar- eller vinterhalvår. Marken håller en jämn temperatur på cirka 7–8 °C vilket värmer tilluften vintertid. I Timrå kan temperaturen sjunka till –20 °C men efter att luften passerat de markförlagda rören kan tilluften uppnå en temperatur på cirka 2°C. Under sommarhalvåret när temperaturen är cirka +20 °C agerar marken i stället kylande. För att reglera temperaturen i betongrören finns 800 meter långa plaströr kopplade till tilluftskanalen vars syfte är att absorbera markens temperatur och därefter värma upp tilluften, se figur 2.7 för illustration. För att luften ska vara behaglig och anpassad efter standarden för inomhusklimat värms luften ytterligare via radiatorer innan den släpps in i byggnaden. Genom att luften först har passerat de markförlagda rören och antingen förkylts eller förvärmats görs en energibesparing på cirka 55% i jämförelse med om luften skulle tas in direkt utifrån. Detta baseras på att de underjordiska betongkanalerna kan värma uteluften från –20 °C till cirka 2 °C vilket i förhållande till den önskade inneluftstemperaturen på 20 °C resulterar i en energibesparing (Landin & Mashreghi 2020).

Väl inne i skolan använder Nyquist självdragsprincipen där tilluften fördelas i byggnadens lokaler genom fläktar. Luftens egenkonvektion orsakar en stigning och luften passerar ut genom skolans lanterniner vars syfte är att avlufta byggnaden. Precis som i ett termitbo som bygger på stack effect kan de underjordiska kanalerna i Laggbergs skola liknas vid termiternas näste och lanterninerna vid skorstenen. För att ytterligare driva på avluftningsprocessen nyttjas även takkonstruktionen. Den 20 cm breda luftspalten i taket värms upp av solen dagtid vilket med ejaktorverkan skapar ett vakuum uppe i byggnaden. Vakuumet (undertrycket) driver ytterligare på luften från markkanalerna uppåt med högre hastighet (Landin & Mashreghi 2020).

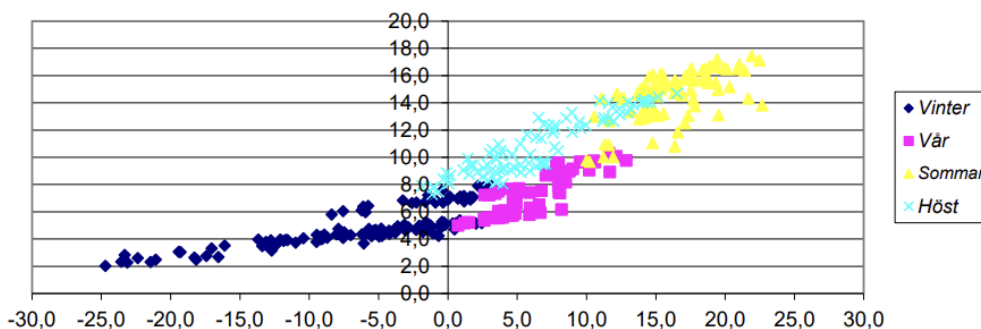


Figur 2.7 - Tvärsnitt av ventilationssystemet i Laggbergs skola (Landin & Mashreghi 2020).

2.3.3.3 Villa Falk

I en fältstudie av Östin, Eklund och Johansson (2012) undersöks riskerna med att bygga energieffektiva byggnader i kallt klimat. Två av villorna som undersöktes använde markförlagda rör och enligt mätningar visas inga tecken på risk för mögel- och rötangrepp. I en villa benämnd Villa Falk belägen mellan Umeå och Skellefteå har mätningar gjorts i ventilationssystemet under en period på cirka 1 år. Ventilationssystemet är ett hybridsystem med markförlagda rör och en värmeväxlare. Först förvärms alternativt förkyls luften i de markförlagda rören varefter värmeväxlaren nyttjar värmen i frånluften för att värma tilluften. Om luften behöver värmas ytterligare för att nå önskad temperatur finns en elektrisk resistansvärmare. Under mätperioden krävdes ingen ytterligare uppvärmning (Östin, Eklund & Johansson, 2012).

Det markförlagda röret har en längd på 36 meter där 24 meter har en diameter på 0,2 meter och de resterande 12 meterna har en diameter på 0,16 meter. Röret ligger på ett djup om 1,5 meter. Enligt provtryckning visar mätningen att byggnaden har ett luftläckage på $q_{50}=0,34$ l/s, omslutande area vilket idag klassas som en lufttät byggnad. En slutsats som drogs i rapporten är att markförförvärmning är ett enkelt och effektivt sätt att förvärma uteluft. Då uteluften var -25 °C uppnådde utloppstemperaturen cirka 2 °C efter att den passerat markröret, se figur 2.8. Rörens temperaturstabiliserande effekt bidrar till att utloppstemperaturen endast varierar mellan 2 – 7 °C oavsett utetemperatur vintertid och överstiger aldrig 18 °C sommartid (Östin, Eklund & Johansson, 2012).



Figur 2.8 – Uteluftens temperatur efter att ha passerat genom det markförlagda röret. X-axeln är uteluftstemperaturen och y-axeln är lufttemperaturen efter det markförlagda röret (Östin, Eklund & Johansson, 2012).

2.3.4 Avgörande parametrar vid utformning av markförlagda rör

För att nyttja den maximala potentialen i markförlagd ventilation finns olika parametrar att ta hänsyn till. Rörens temperaturverkningsgrad samt förmåga att värma och kyla tilluften beror starkt av omgivande klimat, temperatur och jordkvalitet vilket är relevanta aspekter att ta hänsyn till vid anpassning till det svenska klimatet. Flera fältstudier har gjorts där rörens olika utformning i varierande klimat har dokumenterats för att bedöma vilka faktorer som är avgörande för prestationen. De flesta undersökningar har skett i varma områden där behovet av nedkylning varit stort vilket resulterat i att slutsatserna

som dragits fokuserar i stor utsträckning på nedkylning snarare än uppvärmning på grund av att uppvärmning inte är lika relevant i dessa länder.

En undersökning som har utförts av Ho Lee och Strand (2007) i USA utredde vilka parametrar som är avgörande för prestationen hos markförlagda rör. Studien undersökte skillnader i prestandan hos markförlagd ventilation genom att jämföra rördiameter, djup, längd och luftflöde i fyra olika system i olika klimat. Simuleringar av installationerna genomfördes med programmet EnergyPlus. Resultaten visade att ett djupt placerat, långt rör med låg lufthastighet och liten diameter resulterade i en lägre utloppstemperatur. Resultaten visade också att klimatet har en avgörande roll i hur effektivt systemet kan bli. Studien visar att en anpassad design av termitventilation kan spara mer än 50% av den totala kylbelastningen men att det beror på jordens tillstånd och vädret. Trots att markförlagd ventilation fungerar både för nedkylning och uppvärmning av tilluft visar mätningarna att systemet har större potential med avseende på nedkylningskapacitet. Slutsatsen baseras på mätningar som genomförts på likande byggnader men i olika klimat där systemet bidragit till en lägre energiförbrukning i det varmare klimatet. Enligt Ho Lee och Strand (2007) är det osannolikt att markförlagd ventilation kan ersätta ett vanligt ventilationssystem men att det kan vara till stor nytta att komplettera en byggnad med detta system för att spara energi.

En annan studie som genomfördes i Algeriet av Belloufi m.fl. (2022) kartlade potentialen hos markförlagd ventilation under varma perioder. Belloufi m.fl (2022) kommer fram till att luftflödet är starkt kopplat till systemets effektivitet där ett lägre luftflöde möjliggör bättre nedkylning av tilluften. Enligt mätningarna sker 91% av temperatursänkningen i de första 33 meterna av rören. Med denna vetskap blir det därför onödigt att konstruera längre rör än 33 meter förutsatt att övrig placering och utformning är anpassad efter platsens unika förutsättningar. Vad som även framgick av mätningarna var att det är mycket mer framgångsrikt att nyttja de underjordiska rören för nedkylning snarare än för uppvärmning. Vid ett luftflöde på 3,5 m/s var den högsta temperaturökning 0,85 °C och den maximala temperatursänkningen 19 °C. Anledningen till att det är mycket lättare att kyla luften beror på den naturliga nedkylning av uteluft som sker under natten. Den kalla luften tillför jorden stabil nattkyla som håller rören i marken kalla (Belloufi m.fl. 2022).

Utformningen av markförlagda rör varierar beroende på typ av konstruktion, klimat samt vilka resultat som ska uppnås med systemet. Idag nyttjas markförlagd ventilation i olika typer av byggnader såsom skolor, universitet, kontor, passiva hus och nära noll byggnader vilket ställer varierande krav på teknologins prestation. Oavsett om systemet ska förse en större eller mindre byggnad med frisk luft består alla markförlagda ventilationskonstruktioner av ett eller flera jordkopplade vertikala och/eller horisontella rör. Syftet är att ge utrymme för en vätska eller gas att cirkulera och därigenom utbyta värme med omgivande jord (Soares m.fl. 2021).

Principen att utnyttja markens naturliga värmekapacitet kan konstrueras på olika sätt, både i form av materialval och utformning. Vanliga material som används är PVC-plast, stål eller koppar. En översiktsstudie visar att olika material inte avsevärt påverkar systemets prestanda (Singh m.fl. 2017), se tabell 2.1. Anledningen till att olika material används beror snarare på andra faktorer som kostnad, livslängd och korrosionsbeständighet (Bexell & Bjureus 2010).

Tabell 2.1 – Skillnaden i värmeeffekt och kylningseffekt i markförlagda rör av plast, stål respektive koppar (Badescu 2006).

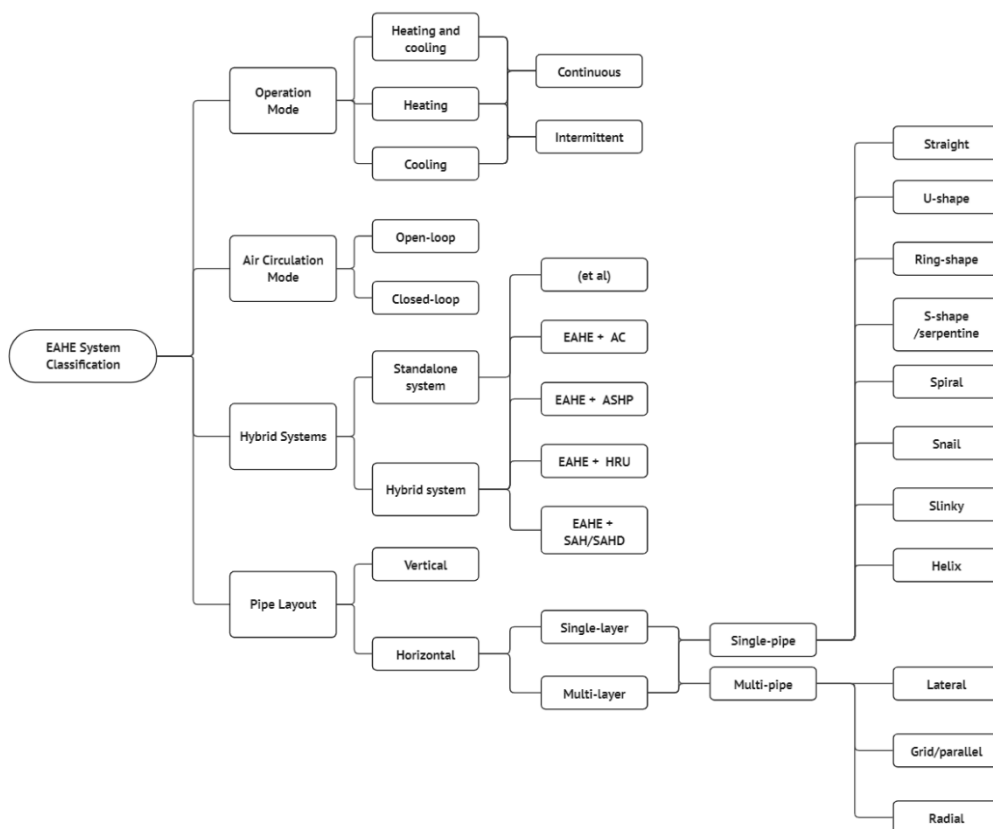
Table 5. Effect of the pipe materials on cooling and heating potentials of the EATHE system [53].

Material of pipe	Conductivity of pipe's material ($Wm^{-1}K^{-1}$)	Cooling potencial (kWh/year)	Heating potencial (kWh/year)
Plastic	0.24	933.96	388.81
Steel	57	939.89	391.25
Copper	395	939.92	391.27

Värmeöverföring är en avgörande parameter och har stor inverkan på utformningen. Det är främst tre olika moment med avseende på termisk transport som bör beaktas för att uppnå ett välfungerande system; konvektion respektive värmeöverföring mellan vätskan/gasen och insidan av röret, värmeledningsförmågan mellan insida och utsida rörvägg och slutligen värmeledningsförmågan samt värmeöverföringen mellan rörets utsida och omgivande jord/återfyllningsmaterial (Soares m.fl. 2021).

2.3.5 Klassificering av olika EAHE-system

I rapporter gällande klassificering benämns ofta markförlagda ventilationssystem som EAHE-system (Earth-Air Heat Exchanger). För att separera olika typer av EAHE-system kan dessa klassificeras utifrån fyra olika kategorier; rörutformning och arrangemang, driftläge, luftcirkulationsläge och hybridssystem, se figur 2.9 för illustration.



Figur 2.9 – Schematiskt förslag på indelning och klassificering av olika EAHE-system. Förslaget har utformats baserat på insamlad information från litteraturstudier.

2.3.5.1 Rörutformning och arrangemang

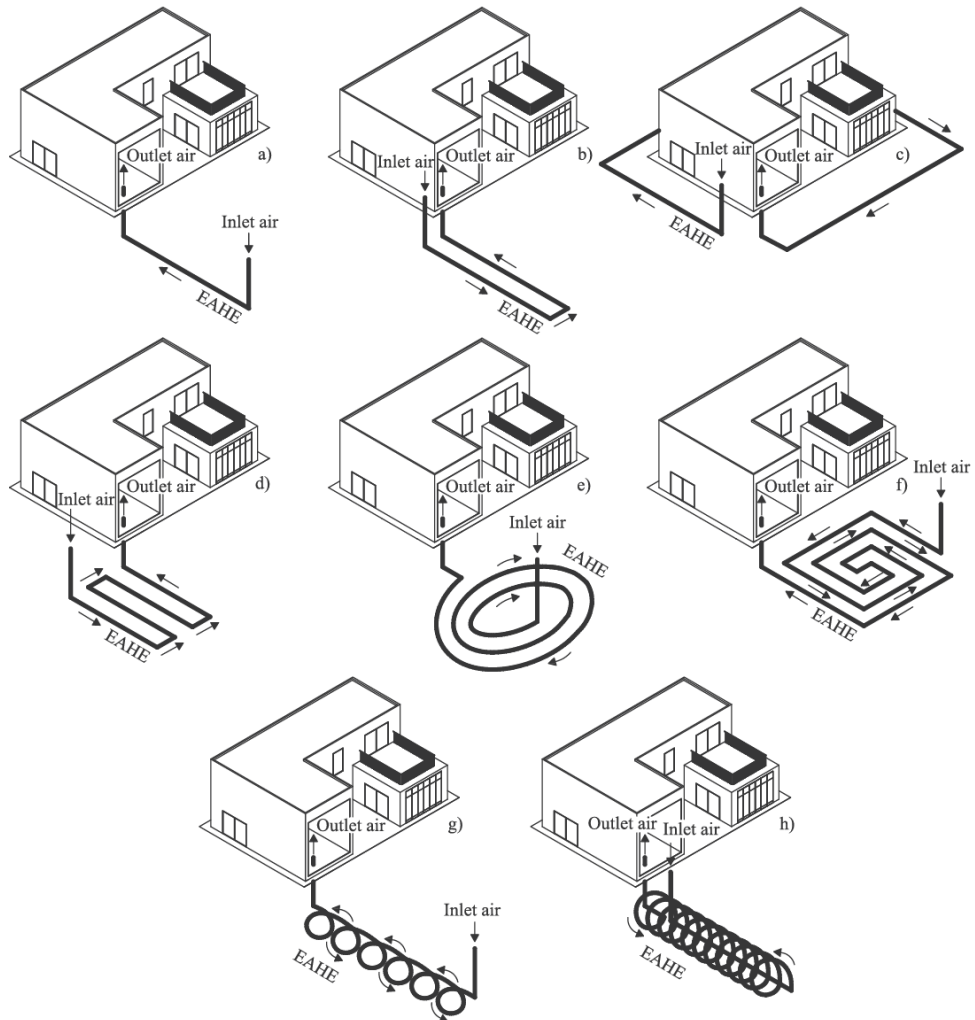
Beroende på omgivningens förutsättningar kan rörläggningen se väldigt olika ut och det skiljs på horisontella- respektive vertikala arrangemang, single- respektive multi-layered pipes samt single-pipe- respektive multi-pipe-system.

Av den markförlagda ventilationen som finns idag är det vanligast att använda horisontella rör eftersom det inte kräver en lika omfattande urgrävning som ett vertikalt rörsystem. Vertikalt lagda rör kan vara fördelaktigt i områden med tät bebyggelse och i

brist på markyta. I vissa fall har vertikala rörsystem lättare att generera den eftersökta utloppstemperaturen eftersom djupet erhåller en mer stabil marktemperatur. Vertikala arrangemang är vanligare för GSHP-system (Ground-Source Heat Pump) där vätska är den aktiva fluiden och medför ofta dyrare installationskostnader än ett horisontellt arrangemang till följd av den mer komplicerade installationen (Soares m.fl. 2021). Ett vertikalt arrangerat system ställer högre krav på materialen som används då trycket på materialet ökar med djupet. Det ökade trycket kan bli en stor påfrestning på PVC-rör och bör därför noga dimensioneras, speciellt om terrängen består av mycket stenar som kan riskera att krossa rören (Liu m.fl. 2019).

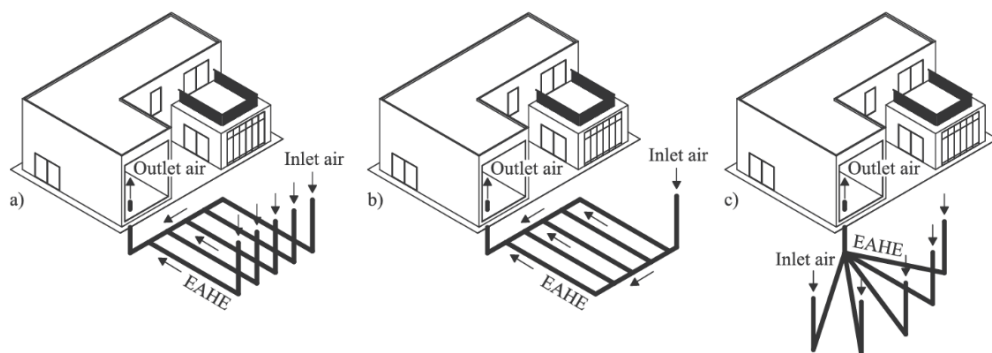
Horisontellt lagda rör kan även delas upp i single-pipe och multi-pipe arrangemang där single-pipe arrangemang är vanligare vid mindre EAHE-system. I figur 2.10 visas vanligt förekommande single-pipe arrangemang: straight-pipe- (a), U-shape- (b), ringshape- (c), S-shape/serpentine- (d), spiral- (e), snail- (f), slinky- (g) och helixkonfigurationer (h) (Soares m.fl. 2021). Av dessa konfigurationer är ring-pipe arrangemang den mest kostnadseffektiva lösningen och speciellt passande för små EAHE-system enligt undersökningar. Den lägre kostnaden beror på att utformningen av rörsystemet utnyttjar byggnadens naturliga utrymme för grundkonstruktionen vilket minimerar grävkostnader. Straight-pipe är i dagsläget det vanligaste rörarrangemanget eftersom den enkla installationen inte kräver ett särskilt stort nedgrävningsdjup, dock kräver denna typ av arrangemang stor markyta. En lösning vid begränsad markyta är att använda en U-shape konfiguration alternativt S-shape för att uppnå likvärdig effekt som vid installation av straight-pipe (Agrawal m.fl. 2019).

Undersökningar som gjorts av Aydin m.fl. (2015) i Turkiet fastställer för- och nackdelar mellan SGHE-systemen (Shallow Ground Heat Exchanger); snail-, slinky-, och helix-pipes. Studien visar att snail-designen presterar bäst med avseende på värmeöverföringsprestandan per längdenhet (HTR/längdenhet). Ur kostnadssynpunkt är slinky-pipes att föredra baserat på omgivande förutsättningar i Turkiet men det kan variera vid andra geografiska platser eller regioner. Om areabesparing är huvudfokus vid utformningen är helix den optimala konfigurationen då denna ger bäst HTR per använd areaenhet. Tas dock andra lösningar i beaktning som inte ingår under begreppet SGHE-system som exempelvis ett vertikalt U-shape pipe arrangemang, presterar denna lösning bättre med avseende på HTR. Den ökade prestationen beror på att de vertikalt lagda rören alternativt djupt placerade rör inte påverkas av fluktuerande säsongsbaserade utetemperaturer, dock medför denna typ av konfiguration generellt sett högre kostnader än ett SGHE-system (Aydin m.fl. 2015).



Figur 2.10 – Schematisk illustration av single-pipe arrangemang med följande namn: a) straight-pipe, b) U-shaped pipe, c) ring-pipe, d) S-shape/serpentine, e) spiral-pipe, f) snail-pipe, g) slinky-pipe, h) helix-pipe. (Soares m.fl. 2021)

Multi-pipe-system bygger på att använda flera rör i samma plan och dessa system delas upp i tre kategorier; lateral pipe-layout, grid/parallel-layout och radial pipe-layout (Soares m.fl. 2021) och visas i figur 2.11. Grid-layout är ur prestandasynpunkt mest fördelaktigt i stora EAHE-system (Agrawal m.fl 2019).

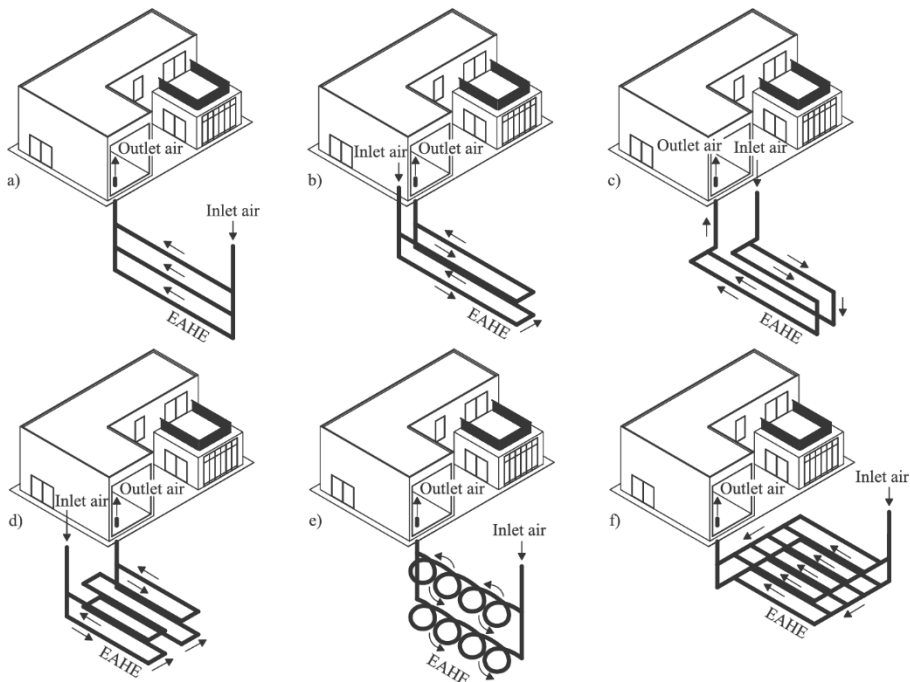


Figur 2.11 – Schematisk illustration av olika multi-pipe arrangemang med namnen: a) lateral pipe-layout, b) grid/parallel pipe-layout, c) radial pipe-layout. (Soares m.fl. 2021)

Horisontella rör kan även delas upp i single-layered pipes och multi-layered pipes och beskriver om rören finns placerade i ett eller flera plan, se figur 2.12 för exempel på multi-layered pipe konfigurationer. Single-layered pipes är vanligast i dagsläget eftersom multi-layered pipes kräver en mer exakt dimensionering och placering. Risken med att använda multi-layered pipes är att rören skadas eller att jorden mätts av den ackumulerade värmen från rören, s.k. *soil thermal saturation*. Begreppet förklaras närmre i avsnitt 2.3.6.3. Om omgivande jord erhåller en högre temperatur, minskas effektiviteten av systemet. Generellt sett är single-pipes en enklare installation och medför därav lägre kostnader (Soares m.fl. 2021).

En studie genomförd i Portugal av Jesus m.fl. (2012) jämförde belastningen hos värmeväxlare med single-layered pipes respektive multi-layered pipes. Studien visar att samma mängd rör men fördelat över flera lager resulterar i ett aningen effektivare EAHE-system med en belastningsminskning på 3–6% hos värmeväxlaren. Nyttjandet av multi-pipe arrangemang medför även en markant minskning i markyta där två lager ger en 50% minskning och tre lager motsvarar 67% minskning i markarea. Genom analys av resultaten visar studien även att det optimala avståndet mellan lagren är cirka 1,5 meter, men att även 2-meter är acceptabelt för en gynnsam effekt. En gynnsam ökning av värmeväxlarens effekt sker fram till tre meters markdjup hos rören, därefter ger djupare rörläggning likvärdig avlastning för värmeväxlaren (Jesus m.fl. 2012).

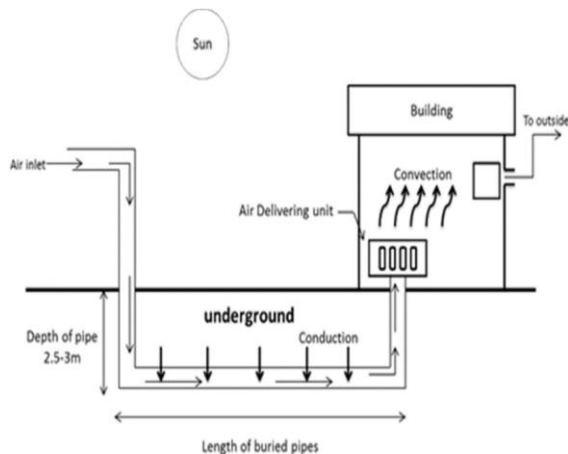
En numerisk undersökning gjord i Brasilien visade att en ökning av antalet rör genom multi-layered pipes, över samma markyta, gav en ökning i kylningseffekt på 73% och 115% i värmeeffekt på systemet (Rodrigues m.fl. 2015).



Figur 2.12 – Schematisk illustration över exempel på multi-layered pipe arrangemang med namnen: a) multi-layered straight-pipe layout, b) piled double-layered U-shape pipe layout, c) side by side double-layered U-shape pipe layout, d) double-layered S-shape/serpentine pipe-layout, e) double-layered slinky pipe layout, f) double-layered grid/parallel pipe layout. (Soares m.fl. 2021).

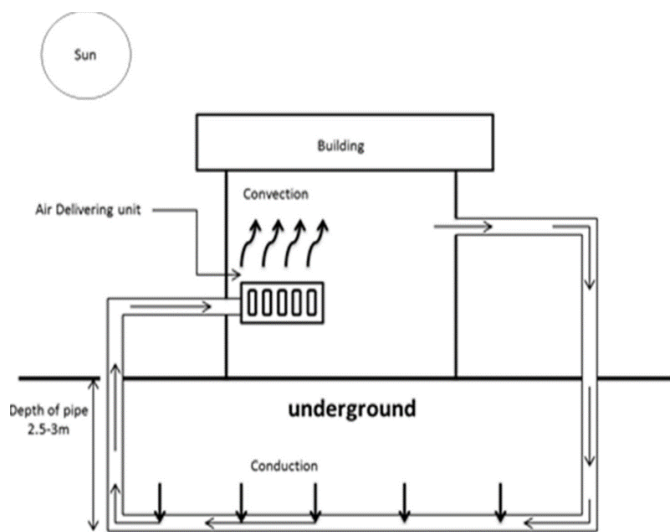
2.3.5.2 Luftcirkulationsläge

Baserat på luftcirkulationsflödet kan EAHE-system grupperas efter öppna- eller stängda slingor. I den öppna slingan tas luft in utifrån genom en huv och förvärms eller förkyls i de nedgrävda rören. Slutligen tas luften ut ur byggnaden genom ventilationen, se figur 2.13 (Soares m.fl. 2021).



Figur 2.13 – Schematisk illustration över ett öppet EAHE-system (Bordoloi m.fl. 2018).

Skillnaden mellan öppna- och slutna slingor är att i det stängda systemet leds frånluften tillbaka ner i de markförlagda rören i stället för att ledas ut och blandas med uteluften, se figur 2.14. Luften förkyls, alternativt förvärms på nytt genom markrören innan den tas in i byggnaden igen och då med en temperatur som är nära marktemperaturen. Fördelen med en stängd slinga är att den kan minska fuktproblematik, däremot kan stängda slingor prestera sämre ur ett effektiviseringsperspektiv. Då en stängd slinga återcirkulerar luften överförs inte lika mycket värme till eller från marken vilket kan resultera i att byggnaden inte förses med tillräcklig kyla eller värme. Det finns forskare som menar att en stängd slinga inte är att föredra eftersom den inte tillför ny luft till byggnaden (Soares m.fl. 2021).



Figur 2.14 – Schematisk illustration över ett stängt EAHE-system (Bordoloi m.fl. 2018).

2.3.5.3 Driftläge

EAHE-systemet kan klassificeras utifrån vilket driftläge som eftersträvas, eller *operation mode* som det benämns i figur 2.9. Vanligt är att systemet är utformat för att antingen ha en kylande eller värmande effekt men det finns även fall där båda driftlägen används. Att använda endast ett driftläge har förefallit mer fördelaktigt då målet ofta är att komplettera och optimera funktionen av ett aktivt ventilationssystem. Det är vanligt att systemet konstrueras utifrån att ha antingen en maximal nedkylande effekt eller maximal värmande effekt. Vid en kombination av båda driftlägena måste avvägning göras om vilket driftläge som ska vara dominerande då nedkylning och uppvärmning är motstridiga mål (Soares m.fl. 2021).

Ett driftlägesbaserat system arbetar antingen kontinuerligt (*continuously*) eller periodiskt (*intermittent*). En undersökning i Indien av Mathur m.fl. (2014) visar att den kylande effekten har större potential i ett periodiskt baserat system. De inaktiva perioderna ger jorden utrymme för återhämtning vilket ökar nedkylningspotentialen. I rapporten av Mathur m.fl. (2014) testades tre olika driftfall där ett 12h kontinuerligt aktivt system

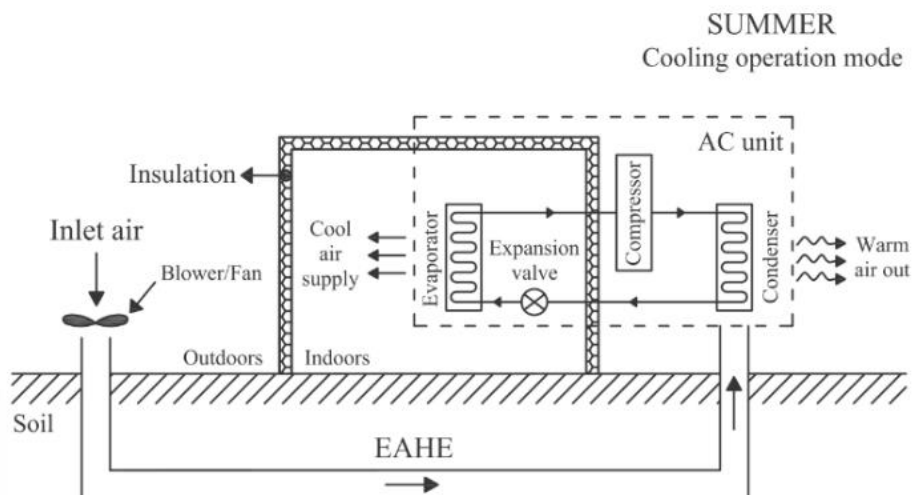
jämfördes med två periodbaserade system i cykler om 60 min aktivt/20 minuter passivt respektive 60 minuter aktivt/40 minuter passivt driftförhållande. Resultatet visade att det kontinuerligt aktiva programmet genererade en succesivt lägre skillnad mellan inlopps- och utloppstemperatur i rören. Driftläget med den längre passiva perioden visade störst återhämtning i jorden och därmed även ökande prestanda i de markförlagda rören. Värmen som jorden absorberat i anslutning till rören avlägsnas och ett större värmeutbyte kan ske vid nästa aktiva period. Att nyttja ett periodvis passivt driftläge kan vara fördelaktigt för att optimera effekten av rörläggningen speciellt i mark med låg värmekonduktivitet (Mathur m.fl. 2014).

2.3.5.4 Hybridsystem

Ett EAHE-system kan vara fristående eller kopplat till andra passiva eller aktiva installationer som luftkonditionering, luftvärmepump, värmeåtervinningsenhet, solfångare, med flera (Soares m.fl. 2021). I detta avsnitt presenteras några vanliga hybridsystem.

EAHE med luftkonditionering

En konventionell luftkonditionering (AC) bygger på ångkompressionskyllning med syfte att kyla ned tilluft. Det kan vara fördelaktigt att koppla ett EAHE-system till kondensorn i en konventionell luftkonditionering för att förbättra hybridssystemets kylförmåga under varma väderförhållanden, se figur 2.15. Eftersom luften förkyls i marken underlättar det nedkylningsprocessen i AC-enheten vilket resulterar i en reducerad energiförbrukning (Soares m.fl. 2021).



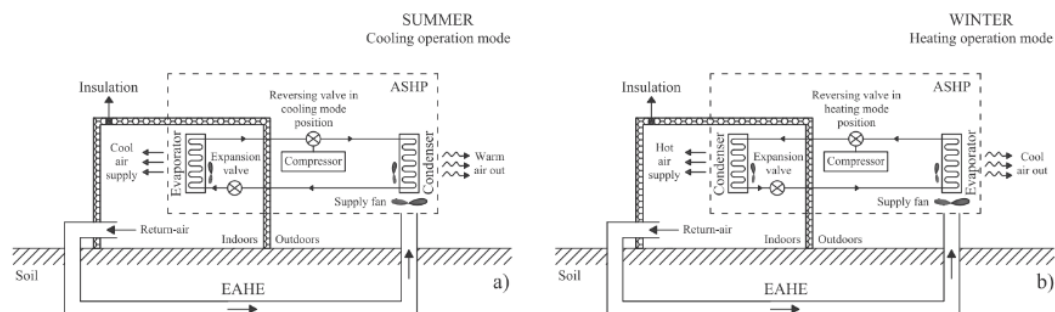
Figur 2.15 – Schematisk illustration över ett hybrid-system med EAHE och luftkonditionering (Soares m.fl. 2021).

En experimentell studie genomfördes av Misra m.fl. (2019) under sommaren i Ajmer, Indien för att bedöma kylningsprestandan av ett hybridssystem med EAHE och luftkonditionering. Systemet bestod av en konventionell luftkonditionering, EAHE samt en fläkt och testades i fyra olika driftlägen. I det första driftläget vilket var basfallet arbetade endast luftkonditioneringen utan stöttning från EAHE-systemet. I det andra driftläget arbetade EAHE-systemet och luftkonditioneringen parallellt där luften från de markförlagda rören tillsattes rummet separat och luftkonditioneringen konditionerade den befintliga luften i rummet. I det tredje driftläget kopplades EAHE:n till luftkonditioneringen och markluften kylde ner kondensorn. I det fjärde driftfallet användes 50% av den förkylda luften från EAHE-systemet för att kyla kondensorn medan resterande 50% gick direkt in i rummet. Resultatet från studien visade att luftkonditioneringens energianvändning minskade med cirka 18% för driftläge tre. Resultatet visade även att det fjärde driftläget ökade energianvändningen med 16% (Misra m.fl. 2012).

EAHE med luftvärmepump

En luftvärmepump nyttjar precis som en AC-enhet ångkompressionskylning, men luftvärmepumpen använder det både för uppvärmning och nedkylning. Hybridssystemet EAHE med luftvärmepump bygger på att markrören förkyler eller förvärmer luften, beroende på årstid, innan luften når luftvärmepumpens kondensator (Soares m.fl. 2021), se figur 2.16.

I en undersökning genomförd av Baglivo och Congedo i Torino och Brindisi, Italien jämfördes ett hybridssystem med EAHE och luftvärmepump mot ett fristående EAHE-system. Studien visade att genom att sammankoppla luftvärmepump med EAHE kan luftvärmepumpar nyttjas i kalla klimat som vanligtvis inte är kompatibla med denna typ av teknologi. Förutom en breddad applicerbarhet kan hybridssystemet medföra förbättrad effekt i luftvärmepumpen. Även sommartid bidrar hybridssystemet med ökad effektivitet då de markförlagda rören kan minska påfrestningen från de höga utomhustemperaturerna på luftvärmepumpen (Soares m.fl. 2021).

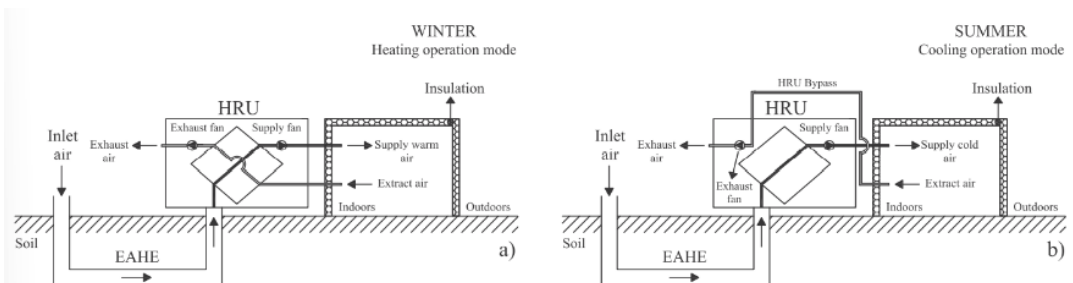


Figur 2.16 – Schematisk illustration över ett hybrid-system med EAHE och luftvärmepump. a) visar kylningsläge b) visar värmningsläge (Soares m.fl. 2021).

En studie genomförd i Houston och Dallas i USA av Guo m.fl. (2021) visar att användningen av ett EAHE-system med luftvärmepump kan generera årliga energibesparingar på 9,6% respektive 13,8%. En annan studie genomförd i medelhavsklimat jämförde energiförbrukningen mellan en fristående värmepump och en värmepump kopplad till ett EAHE-system. Resultatet visade att hybridssystemet hade en överlägset lägre energiförbrukning. Av de undersökningar som gjorts visar resultaten att hybridssystemet över lag har goda möjligheter till minskad energiförbrukning (Guo m.fl. 2021).

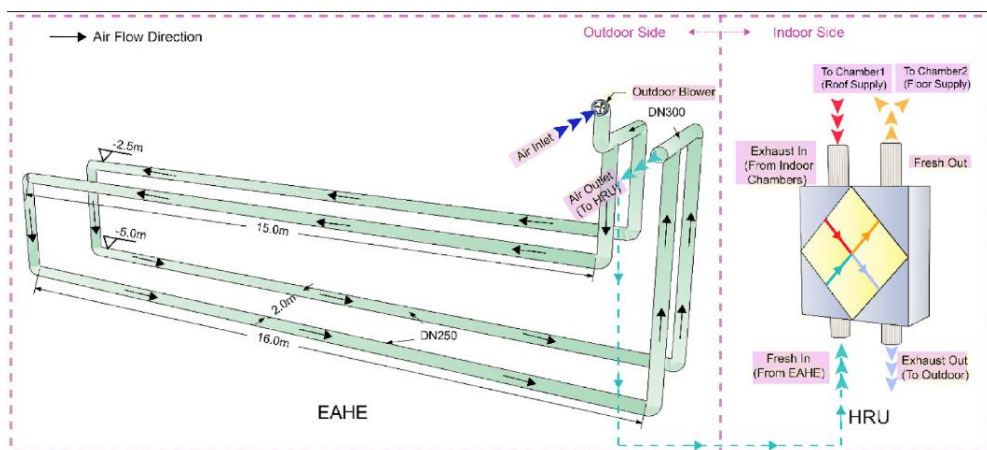
EAHE med värmeväxlare

Ventilationssystem med EAHE och värmeväxlare kan förbättra den termiska komforten och luftkvaliteten inomhus. Värmeväxlaren återvinner värme från frånluften innan den lämnar byggnaden för att värma upp tilluften. I denna typ av hybridssystem är de markförlagda rören kopplade till värmeväxlaren för att underlätta värmeåtervinningen, se figur 2.17. Under vintern värms kall utomhusluft upp i de markförlagda rören för att därefter värmas och eventuellt fuktas ytterligare i värmeväxlaren innan luften tas in i byggnaden. Under sommaren kan värmeväxlaren i stället användas för att kyla och avfukta luften (Soares m.fl. 2021).



Figur 2.17 – Schematisk illustration över hybrid-system med EAHE och värmeåtervinningsenhet. a) visar uppvärmningsläge b) visar nedkylningsläge (Soares m.fl. 2021).

I en studie som genomfördes i Harbin, Kina av Li m.fl. (2019) undersökte prestandan i ett hybridssystem bestående av ett EAHE-system och värmeväxlare i kallt klimat. I Harbin är den genomsnittliga temperaturen under ett år 4,2 °C och temperaturen kan gå ner till cirka -37 °C. Systemet bestod av två parallella horisontella U-formade rör i stål med en innerdiameter på 260 mm. Avståndet mellan de parallella rören var 2,0 meter och det vertikala avståndet var 2,5 meter. De övre rören hade en längd på 15 meter med ett nedgrävningsdjup på 2,5 meter och de undre rören hade en längd på 16 meter med ett nedgrävningsdjup på 5 meter. Totalt var de markförlagda rören 36 meter långa (Li m.fl. 2019), se figur 2.18.

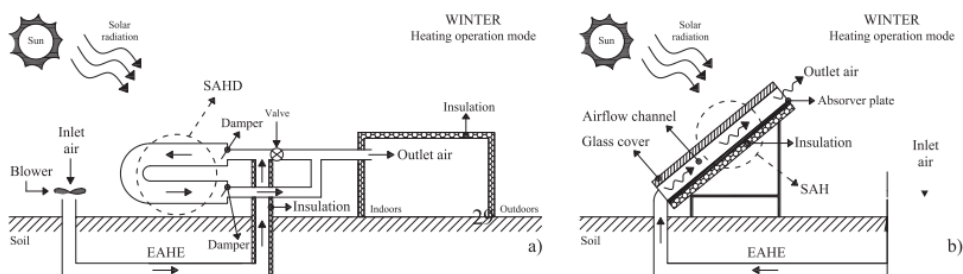


Figur 2.18 – Schematisk illustration över systemet i studien, visar EAHE-systemet med värmeåtervinningsenhet (Li m.fl.2019).

Under mätperioden varierade inloppstemperaturen mellan $-24,4$ och $-0,4$ °C medan utloppstemperaturen varierade mellan $-2,9$ och $2,0$ °C. I studien observerades att under de första 23 meterna av röret skedde 88,5% av den totala temperaturökningen. Resultatet visar att utloppstemperaturen varierade mycket mindre än utomhustemperaturen, vilket betyder att ett EAHE-system effektivt kan minska temperaturvariationer. Genom att kombinera EAHE-systemet med en värmeväxlare kan behaglig inomhustemperatur uppnås. Undersökningen visade dock att luften som passerat värmeväxlaren hade en låg relativ fuktighet och komplettering av luftfuktare kan behövas för ett behagligt inomhusklimat. EAHE-systemet gav en genomsnittlig temperaturhöjning på 14 °C under mätperioden där den maximala temperaturhöjningen var $21,8$ °C. Under hela mättiden var värmeöverföringseffektiviteten stabil och var i genomsnitt 74,4%. EAHE:n tillförde 42,6% av den totala värmeförseln, värmeåtervinningsenheten stod för 39,5% och resterande genererades från anslutningsrör (Li m.fl. 2019).

EAHE med solfångare eller solvärmekanaler

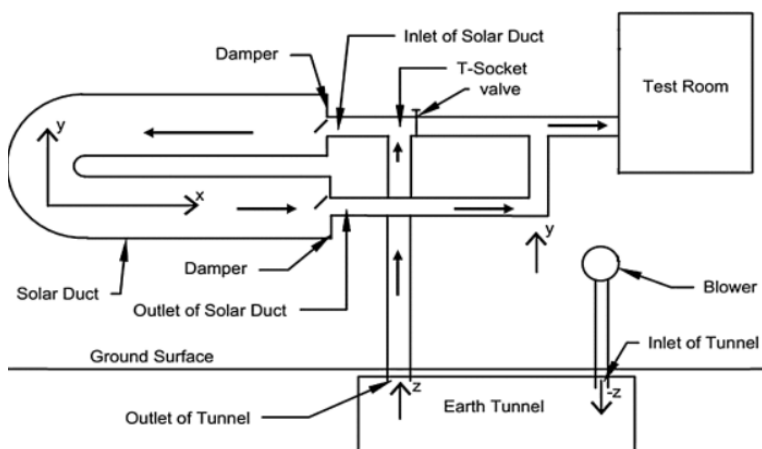
Genom att koppla de nedgrävda rören till solfångare eller solvärmekanaler kan uppvärmningskapaciteten av luften förbättras. Systemet fungerar genom att luften förvärms i markrören för att sedan passera genom en solfångare eller solvärmekanaler för ytterligare uppvärmning innan luften tas in i byggnaden (Soares m.fl. 2021), se figur 2.19.



Figur 2.19 – Schematisk illustration över ett hybrid-system med a) solvärmekanaler och EAHE och b) solfångare och EAHE (Soares m.fl. 2021).

En studie genomfördes under vintern i Ajmer, Indien av Jakhar m.fl. (2014) som utvärderade ett hybrid-system med EAHE och solvärmekanaler. Under vintern har Ajmer en medeltemperatur på mellan 15–18 °C och under sommaren ligger medeltemperaturen på mellan 30–32 °C. EAHE-systemet bestod av ett 60 meter långt PVC-rör med en diameter på 100 mm och nedgrävningsdjup 3,7 meter. PVC-röret var kopplat till en 12,2 meter lång U-formad solvärmekanal i svart färg för att maximera absorptionen av solvärme, se figur 2.20. För att cirkulera luften användes en fläkt och regleringen av flödet skedde genom spjäll vid inlopp och utlopp i solvärmekanalerna samt vid utloppet av EAHE-systemet (Jakhar m.fl. 2014).

I studien testades tre olika driftfall där det första fallet inte använde varken solvärmekanaler eller EAHE-system och användes som basfall. I det andra driftfallet användes endast den förvärmade luften från EAHE-systemet och i det tredje fallet användes både EAHE:n och solvärmekanalerna. Systemet var periodiskt baserat med aktiva intervall på 8h/dag. Resultatet visade att EAHE-systemets uppvärmningskapacitet ökade med cirka 1200 kWh för driftfall tre och att temperaturen i rummet ökade mellan 1,1–3,5 °C. Under de första 34 meterna av EAHE-röret skedde 82–85% av luftens temperaturökning (Jakhar m.fl. 2014).



Figur 2.20 – Schematisk illustration över systemets utformning (Jakhar m.fl. 2014)

2.3.6 Problematik kring markförlagda ventilationssystem

2.3.6.1 Radonhalt

Plan- och bygglagen (PBL) kräver att fastighetsägare gör kontroller av befintliga ventilationssystem. En sådan kontroll kallas *obligatorisk ventilationskontroll* (OVK) och görs av en certifierad kontrollant. OVK genomförs innan byggnaden tas i drift och därefter med antingen 3 eller 6 års mellanrum beroende på byggnadstyp. Detta gäller bland annat förskolor, skolor, flerbostadshus, kontorsbyggnader eller liknande. För en- och tvåbostadshus krävs endast OVK efter installationstillfället innan byggnaden tas i bruk utan krav på återkommande besiktning. En av de punkter som ska kontrolleras är att det inte finns föroreningar i ventilationssystemet som kan spridas i byggnaden (Boverket 2024a). Radon är en luktfri och osynlig gas som kan vara skadlig för hälsan och vanligast är att radonet tar sig in i en byggnad via marken huset står på (Boverket 2023).

Den senaste OVK:n i Laggårbergs skola visade förhöjda radonhalter i byggnaden vilket motverkades med att öka mottrycket i byggnaden. Hur åtgärden genomförs framgår inte närmre i rapporten. Enligt Lena Granlöf från Timrå kommuns Avfall och Återvinning/kultur- och teknikförvaltning var ventilationssystemet en bidragande faktor till de förhöjda radonhalterna (Landin & Mashreghi 2020).

En åtgärd som används i ett lägenhetskomplex i Linköping på Stångastaden vid installationen av markförlagda rör för att minimera risken för radonproblematik är montering av gummigenomföringar runt anslutningen mellan vägg och rör. Gummigenomföringarna minimerar risken att radon tränger in genom eventuella ojämnheter och för att ytterligare minimera risken för radon användes speciella radontäta rör i marken (Bexell & Bjureus 2010).

2.3.6.2 Risk för mikrobiell påväxt/fukt

En problematik som kan uppstå vid brukandet av markförlagd ventilation är kondensation och tillväxt av mikroorganismer i de nedgrävda rören. När det är varmare ute finns det risk för fuktbildning i markrören där temperatur, luftfuktighet och flödes hastigheten övervägande styr kondensationens omfattning (Soares m.fl. 2021). Fukten kan vara svår att avlägsna från röret och kan leda till en påväxt av bakterier, svampar och mögel, men även dålig lukt inomhus (Bexell & Bjureus 2010). Mögeltillväxt kan generellt ske i temperaturer mellan 0,1–40°C och med en RF över 75% (Karlsson 2019). För att undvika att fuktens medförda risker påverkar inomhusklimatet bör de nedgrävda rören ha en lutning bort från byggnaden. Lutningen orsakar uppsamling av de kondenserade ångpartiklarna i rörets lågpunkt vilket underlättar dränering och avlägsning av fukten (Soares m.fl. 2021).

För att avlägsna och förebygga problematisk fuktansamling i röret finns ytterligare åtgärder som kan vidtas. Fukten kan bland annat avlägsnas med en mekanisk avfuktare

alternativt dräneras bort (Bexell & Bjureus 2010). Det kondenserade vattnet kan även pumpas ut mekaniskt med en dränkbar pump. Torkmedel kan även användas för att avfukta luften innan den passerar genom EAHE-systemet. Det finns ventilationsenheter som kan kopplas till EAHE-systemet för att förbättra luftkvaliteten genom att filtrera och rena utloppsluften. Till ventilationsenheterna kan en extra avfuktningssystem kopplas för att ytterligare kontrollera och reglera luftfuktigheten innan luften passerar in i byggnaden. För att förebygga mikrobiell påväxt på insidan av rören rekommenderas en beläggning som är antimikrobiell (Soares m.fl. 2021). En lösning som har testats är en beläggning gjord av silver partiklar för att förebygga mikrobiellpåväxt (Darkwa m.fl. 2010).

2.3.6.3 Soil Thermal Saturation

En problematik som påverkar effektiviteten hos ett markförlagt ventilationssystem är *soil thermal saturation*. Fenomenet uppstår när ett värmeutbyte mellan rör och intilliggande jord har skett under en längre period och jorden har uppnått en temperatur nära inloppstemperaturen i rörsystemet. Då jorden succesivt ackumulerat värme från rörsystemet sker inte längre ett lika stort värmeutbyte och EAHE-systemets effektivitet minskar. Det är vanligare i jordar som har sämre värmekonduktivitet och få variationer i fukthalt att rören påverkas negativt av soil thermal saturation. Vid högre värmekonduktivitet påverkas rörsystemets prestanda på kort sikt inte lika mycket men på längre sikt är det svårt att undvika soil thermal saturation om EAHE-systemet är konstant aktivt (Soares m.fl. 2021).

Ett sätt att undvika att soil thermal saturation har en negativ inverkan på EAHE-systemets prestanda är att använda ett periodiskt aktivt system eftersom jordens temperatur ges utrymme för återhämtning i de passiva perioderna. Längre rörsystem kan balansera ut effekten av jordens ackumulerade värme men till följd av begränsad markyta och ekonomiska förutsättningar är inte alltid denna lösning optimal (Mathur m.fl. 2014). Vid jämförelser av jordens värmeåterhämtning vid olika djup har undersökningar visat att återhämtningstiden blir kortare med djupet (Liu m.fl. 2019). Vid användning av multi-layered pipes är det även viktigt att hålla ett tillräckligt vertikalt avstånd mellan rören för att minimera risken för soil thermal saturation (Soares m.fl. 2021).

En undersökning genomförd i Kina av Liu m.fl. (2019) undersökte jordens återhämtningstid på tre olika djup under vinter och sommartid. Jordtemperaturen jämfördes på 3,0 m, 7,5 m och 13,5 meters djup. Återhämtningstiden för respektive djup sommartid var: 0,0209 °C/h, 0,0238 °C/h och 0,0243 °C/h, vilket visar på att djupare förlagda rör inte påverkas i samma utsträckning av soil thermal saturation till skillnad från grunt förlagda rör. Studien gav likvärdiga värden för vinterklimat och visade också på att temperaturen i djupt placerad jord når en plåtå där ingen ytterligare temperaturökning sker (Liu m.fl. 2019).

2.3.6.4 Årliga variationer i klimatet

Ett problem som försvårar optimeringen av markförlagd ventilation i Sverige är det varierande klimatet som kräver olika resultat av systemet olika tider på året. Att använda endast ett driftläge är enligt undersökningar mer fördelaktigt än att kombinera både kylande och värmande driftlägen. Det kombinerade driftläget har dock använts i flera undersökningar och gett goda resultat (Soares m.fl. 2021). Ett alternativ för att förbättra både värmeeffekt och kyleffekt i EAHE-systemet är att isolera rören. En numerisk studie i México visade att genom att addera värmeisolering kring rören ökade värmeeffekten upp till 2 °C vintertid och 1,3 °C sommartid (Xamán m.fl. 2014).

En lösning som kan minimera problematiken kring varierande klimat är att utnyttja markens djup. Till skillnad från djupt belägen jord fluktuerar temperaturen i jordens ytliga lager i större utsträckning till följd av yttre faktorer. På ett djup mellan 0–0,5 meter påverkas jordens temperatur markant av omgivande klimatförhållanden, solstrålning och varierande utetemperaturer (Liu m.fl. 2019). En lösning för att undvika de nackdelar som årliga variationer i klimatet kan medföra är att utnyttja den djupa jordens stabila värmeöverföringsförmåga.

2.4 Existerande beräkningsmetoder

För att avgöra prestandan i ett EAHE-system finns en del existerande beräkningsmetoder som tar hänsyn till olika parametrar, exempelvis rördiameter, årsmedeltemperatur och luftflöde. I detta avsnitt presenteras några beräkningsmodeller som använts i tidigare fall och undersökningar för att avgöra nyttan i systemet.

2.4.1 Beräkning i tvärsnitt

I boken ”Matematisk analys” skriven av Claesson & Dunand (1983) presenteras en beräkningsmetod för att ta fram luftens temperatur i ett markrör efter att värmeåtervinning skett med omgivande mark vid en viss tidpunkt. För att beräkna temperaturen i ett markförlagt rör kan ekvation 2.1 användas. Ekvationen är endast applicerbar för beräkning i ett tvärsnitt av röret och tar inte hänsyn till lufthastighet, luftflöde eller rörets längd (Claesson & Dunand 1983).

$$T_R(t) = -\frac{q_0}{2\pi\lambda} \ln\left(\frac{2D}{R}\right) + T_0 + T_1 e^{-D/d_0} \cdot e^{i(2\pi t/t_0 + \varphi_0 - D/d_0)} - \frac{q_1}{2\pi\lambda} \left\{ A(R') e^{i(2\pi t/t_0 - B(R'))} - N_0(D') e^{i(2\pi t/t_0 + \Phi_0(D'))} \right\} \quad (\text{ekv 2.1})$$

Ekvation 2.1 omskrivs för att exkludera de imaginära delarna genom att integrera sinusfunktioner på följande sätt:

$$T_R(t) = -\frac{q_0}{2\pi\lambda} \ln\left(\frac{2D}{R}\right) + T_0 + T_1 e^{-D/d_0} \cdot \sin\left(2\pi t/t_0 + \varphi_0 - D/d_0\right) - \frac{q_1}{2\pi\lambda} \left\{ A(R') \sin\left(2\pi t/t_0 - B(R')\right) - N_0(D') \sin\left(2\pi t/t_0 + \Phi_0(D')\right) \right\} \text{ (ekv 2.2)}$$

Där:

$T_R(t)$ = Luftens temperatur i markröret med radien R efter värmeåtervinning skett med omgivande mark vid tiden t (°C)

q_0 = Medeleffekten per meter under en period. Beräknas med ekvation 2.3. (W/m)

q_1 = Medelvärde och amplitud av effekten per meter rör periodisk värmeutvinning. Beräknas med ekvation 2.4. (W/m)

λ = Markens värmekonduktivitet. Baseras på jordarten som röret är placerat i. (W/mK)

D = Nedgrävningsdjup av markrör (m)

R = Markrörets radie (m)

T_0 = Medeltemperaturen i ett visst område tas fram genom klimatdata (°C)

T_1 = Amplituden av den periodiska lufttemperaturen. Representerar skillnaden mellan medeltemperaturen och den lägsta medeltemperaturen för en viss period. (°C)

d_0 = Inträngningsdjup för yttemperatur (m)

t = Tid (s)

t_0 = Periodtiden (s)

$e^{i\varphi_0}$ = Fasen för lufttemperaturen. Anger en tidpunkt i perioden och värdet är mellan 1 och -1. -1 sammanfaller med tidpunkten då medeltemperaturen är som lägst. (-)

$A(R')$ = Temperaturens amplitud i röret för en sjunkande värmeperiod. Bestäms genom att beräkna R' enligt ekvation 2.6 för att sedan läsa av $A(R')$ i tabell 2.2. (-)

$B(R')$ = Fördröjningsfas i temperaturen i röret i en sjunkande värmeperiod. Bestäms genom att beräkna R' enligt ekvation 2.6 för att sedan läsa av $A(R')$ och $B(R')$ i tabell 2.2. (-)

$N_0(D')$, $\Phi_0(D')$ = Bestäms genom att beräkna D' enligt ekvation 2.7 för att sedan läsa av $N_0(D')$ och $\Phi_0(D')$ i tabell 2.2 (-)

q_0 och q_1 beräknas enligt följande ekvationer:

$$q_0 = \alpha(T_2 - T_0) \quad (\text{ekv 2.3})$$

$$q_1 = -\alpha T_1 \cdot e^{i\varphi_0} \quad (\text{ekv 2.4})$$

Där:

α = Proportionerlig värmeöverskoefficient (W/mK)

T_2 = Rumstemperatur (°C)

d_0 beräknas enligt följande ekvation:

$$d_0 = \sqrt{\frac{at_0}{\pi}} \quad (\text{ekv 2.5})$$

Där:

a = Jordens termiska diffusivitet som röret är förlagt i (m^2/s)

R' beräknas enligt följande ekvation:

$$R' = \frac{R\sqrt{2}}{d_0} \quad (\text{ekv 2.6})$$

D' beräknas enligt följande ekvation:

$$D' = \frac{\sqrt{2} \cdot 2D}{d_0} \quad (\text{ekv 2.7})$$

Nyttan av markförlagd ventilation i svenska byggnader

Tabell 2.2 – Amplitud- och fas-funktioner för periodisk värmeutvinning (Claesson & Dunand 1983).

$r'; R'$	$N_0(r')$	$-\phi_0(r')$	$F(R')$	$G(R')$	$A(R')$	$B(R')$	$1/A(R')$
0.001	7.067	0.111	1	0	7.067	0.111	0.142
0.002	6.379	0.123	1	0	6.379	0.123	0.157
0.003	5.977	0.132	1	0	5.977	0.132	0.167
0.004	5.692	0.138	1	0	5.692	0.138	0.176
0.005	5.471	0.144	1	0	5.471	0.144	0.183
0.006	5.291	0.149	1	0	5.291	0.149	0.189
0.007	5.138	0.153	1	0	5.138	0.153	0.195
0.008	5.006	0.158	1	0	5.006	0.158	0.200
0.009	4.890	0.161	1	0	4.890	0.161	0.204
0.01	4.786	0.165	1	0.000	4.786	0.165	0.209
0.02	4.104	0.193	1	0.001	4.104	0.192	0.244
0.03	3.707	0.214	1.000	0.002	3.707	0.212	0.270
0.04	3.426	0.231	0.999	0.003	3.429	0.228	0.292
0.05	3.209	0.247	0.999	0.005	3.212	0.242	0.311
0.06	3.033	0.261	0.999	0.006	3.036	0.255	0.329
0.07	2.884	0.276	0.998	0.008	2.890	0.268	0.346
0.08	2.756	0.289	0.998	0.010	2.762	0.279	0.362
0.09	2.643	0.302	0.997	0.012	2.651	0.290	0.377
0.1	2.542	0.311	0.996	0.015	2.552	0.296	0.392
0.2	1.892	0.412	0.986	0.045	1.919	0.367	0.521
0.3	1.525	0.501	0.971	0.086	1.571	0.415	0.637
0.4	1.275	0.585	0.949	0.131	1.344	0.454	0.744
0.5	1.088	0.665	0.925	0.181	1.176	0.484	0.850
0.6	0.942	0.744	0.899	0.235	1.048	0.509	0.954
0.7	0.823	0.820	0.870	0.291	0.946	0.529	1.057
0.8	0.725	0.896	0.840	0.349	0.863	0.547	1.16
0.9	0.643	0.971	0.810	0.408	0.794	0.563	1.26
1	0.572	1.046	0.779	0.469	0.734	0.577	1.36
2	0.207	1.774	0.489	1.119			
3	0.084	2.490	0.284	1.800			
4	0.036	3.202	0.158	2.492			
5	0.0161	3.913	0.086	3.189			

2.4.2 Beräkning baserat på massflödes hastighet

I en studie av Jakhar m.fl (2014) gjordes mätningar på ett hybridsystem bestående av EAHE med solvärmekanaler med tillhörande fläkt som genererade ett konstant luftflöde. I undersökningen beräknades systemets värmekapacitet (kWh) med ekvation 2.8. Ekvationen är ett komplement till de mätningar som gjorts där solstrålning, luftens temperatur och relativa luftfuktighet mättes varje timme.

$$Q_h = m \cdot C_a \cdot \Delta T \quad (\text{ekv 2.8})$$

Q_h = Värmekapacitet (kWh)

m = Massflödes hastigheten (kg/s)

C_a = Specifika värmekapaciteten för luft (kJ/(kgK))

ΔT = Temperaturskillnaden mellan inloppstemperaturen och utloppstemperaturen (-)

2.4.3 Beräkning av uppvärmningskapacitet och värmeutbyteseffektivitet

Undersökningen som genomfördes i Harbin, Kina av Li m.fl. (2019) av ett hybridsystem med EAHE med värmeväxlare beräknade effektiviteten hos den markförlagda ventilationen. I röret placerades 10 olika sensorer som mätte temperatur och luftfuktighet vid olika positioner var 5:e minut under en period på cirka en månad i februari/mars.

Beräkningen utfördes med följande ekvationer:

$$\dot{m} = \rho_a \bar{v} A \quad (\text{ekv 2.9})$$

\dot{m} = Luftens massflödes hastighet (kg/s)

ρ_a = Luftens densitet ($\rho_a = 1.29 \text{ kg/m}^3$)

\bar{v} = Medellufthastigheten i ett tvärsnitt (m/s)

A = Area i ett tvärsnitt (m^2)

För att beräkna medellufthastigheten (v) i röret används följande ekvation:

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^n v_i \quad (\text{ekv 2.10})$$

n = Mättillfälle (-)

v_i = Lufthastigheten för den specifika mätpunktens position (m/s)

För att beräkna fuktkvoten i luften vid olika gränssnitt användes följande ekvation:

$$d = 662\varphi \frac{P_s}{(B - \varphi P_s)} \quad (\text{ekv 2.11})$$

d = Fuktkvot (g/kg)

φ = Relativ fuktighet (%)

P_s = Partialtrycket av mättad ånga (Pa) Beräknas genom Goff – Gratch ekvation.

B = Lokala atmosfärstrycket ($B = 99\,725.13$ Pa)

I en studie beräknar Guo m.fl. (2021) partialtrycket av mättad ånga, P_s , enligt Goff-Gratch ekvation.

$$\begin{aligned} \lg P_s = & C_1 \left(\frac{373.15}{T} - 1 \right) + C_2 \lg \left(\frac{373.15}{T} \right) + C_3 \left(10^{11.344 \left(1 - \frac{T}{373.15} \right)} - 1 \right) + \\ & C_4 \left(10^{-3.49149 \left(\frac{T}{373.15} - 1 \right)} - 1 \right) + \lg B \end{aligned} \quad (\text{ekv 2.12})$$

$$C_1 = -7,90298$$

$$C_2 = 5,02808$$

$$C_3 = -1,3816 \cdot 10^{-7}$$

$$C_4 = 8,1328 \cdot 10^{-3}$$

B = Lokalt atmosfärstryck (Pa)

T = Lufttemperatur ($^{\circ}\text{C}$)

EAHE-systemets uppvärmningskapacitet beräknas genom följande ekvation från studien skriven av Li m.fl. (2019):

$$Q_e = \dot{m} c_p (t_0 - t_i) \quad (\text{ekv 2.13})$$

Q_e = Systemets uppvärmningskapacitet (W)

\dot{m} = Luftens massflödes hastighet (kg/s)

c_p = Luftens specifika värmekapacitet ($c_p = 1000$ J/(kg $\cdot^{\circ}\text{C}$))

t_0 = Utloppstemperatur ($^{\circ}\text{C}$)

t_i = Inloppstemperatur ($^{\circ}\text{C}$)

Värmeutbyteseffektiviteten (%) för systemet beräknas genom följande ekvation:

$$\eta_e = \frac{t_0 - t_i}{t_s - t_i} \times 100\% \quad (\text{ekv 2.14})$$

η_e = EAHE-systemets effektiva värmekapacitet (%)

t_0 = Utloppstemperatur ($^{\circ}\text{C}$)

t_i = Inloppstemperatur ($^{\circ}\text{C}$)

t_s = Jordens temperatur i form av medeltemperaturen hos den orörda jorden vid nedgrävningsdjupet ($^{\circ}\text{C}$). Denna temperatur är ett antagande som görs i studien.

2.4.4 Beräkning av markrörets effekt

Bexell och Bjureus (2010) beräknar markrörens effekt enligt följande ekvation:

$$P = q \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{inne} - T_{ute}) \cdot (1 - n) \quad (\text{ekv 2.15})$$

P = Effekt (W)

q = Kontrollerat luftflöde

ρ = Luftens densitet (1,2 kg/m³)

c_p = Luftens specifika värmekapacitet ($c_p = 1000 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$)

T_{inne} = Innetemperatur ($^\circ\text{C}$)

T_{ute} = Utetemperatur ($^\circ\text{C}$)

n = Temperaturverkningsgrad (%)

Vid beräkning av den tillförda effekten av rören har en temperaturverkningsgrad antagits på 80%. Resultatet har sedan beräknats i programmet PH-luft för att jämföra energiprestandan för olika rörtutformningar. Författarna poängterar att vid beräkning har endast ett rör inkluderats i ekvationen och beräkningen har skett med ett halverat flöde. Det framgår att nyttan av de förlagda rören är oklar eftersom systemet inte från början var utformat för optimalt energiutbyte utan snarare som en alternativ lösning. Vid beräkning har bland annat följande faktorer justerats; värmeöverföringskoefficienten för rören har exkluderats, jordtypen i beräkningsprogram stämmer inte överens med verkligheten, i stället för två rör som används i verkligheten har ett rör använts i beräkningen, temperaturen är angiven i tretimmarsintervall från Linköpings klimatdata och har sedan interpolerats för att appliceras i programmet PH-luft (Bexell & Bjureus 2010).

För att beräkna den optimala radien för ett EAHE-system i förhållande till luftflöde hastighet används följande ekvation:

$$v = \frac{q}{a} \quad (\text{ekv 2.16})$$

v = Luftens hastighet (m/s)

q = Luftflöde (l/s)

a = Area (m²)

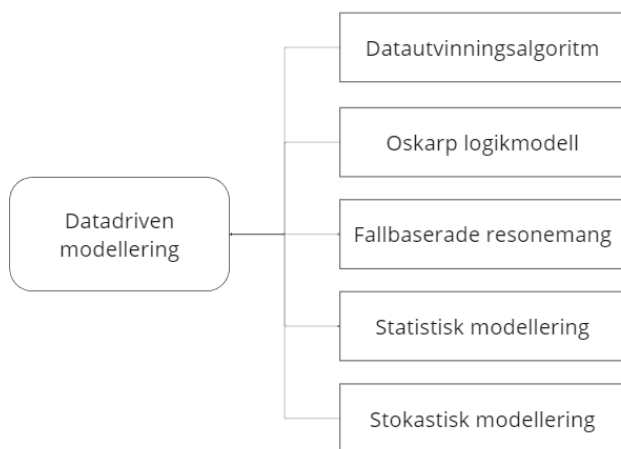
2.5 Modellering

För att ge en bild av EAHE-systemets långsiktiga energiprestanda är modellering ett bra alternativ för att identifiera potentiella brister och potentialer i systemet. Modellering av EAHE-system används idag för att optimera och effektivisera systemet. Genom att modellera EAHE-system har energiförbrukningen i byggnader förbättrats men vad som däremot är problematiskt är att välja rätt modelleringsteknik. Modellerna som finns i dagsläget är passande för aktiviteter och processer i realtid som ett resultat av den enkla modellstrukturen, men är svåra att applicera på generella och globala data till följd av verklighetens komplexa och unika förhållanden. Vad som idag begränsar ytterligare utveckling av modelleringen av EAHE-system är kritiska parametrar och definierade komplexa driftlägen i utformningen av EAHE-systemen. Dock visar flera studier att modelleringen kan generera bra resultat med hög tillförlitlighet om det finns tillräckligt med indata tillgängligt (Ahmed m.fl. 2021).

Modelleringen kan ske utifrån tre olika tillvägagångssätt; datadrivna modeller, fysikaliska modeller eller hybridmodeller. Modellerna kan vara bland annat statistiska eller dynamiska, linjära eller icke-linjära, induktiva eller deduktiva, med flera. Datadrivna modeller är ofta induktiva (d.v.s. ej hypotesdrivna) medan de som är fysik-baserade ofta är deduktiva (d.v.s. hypotesdrivna). Både datadrivna och fysikaliska modeller kan vara statistiska eller dynamiska, linjära eller icke-linjära (Ahmed m.fl. 2021).

Detta avsnitt kommer fokusera på olika typer av datadrivna modeller som grundläggande handlar om att utveckla samband mellan indata och svarsvariabler utan att erhålla komplett information om det specifika systemets fysiska mekanism. Sambandet mellan dessa variabler kan fastställas genom olika matematiska tekniker såsom artificiella neurala nätverk, konvolutionella neurala nätverk, regressionsanalys, med flera. För att datadriven modellering ska vara användbart måste det finnas tillräckligt med tillgängliga indata. Vilken typ av information som krävs för att modellera ett EAHE-system beror starkt av EAHE-systemets dimension och informationen är generellt sett avvikande i jämförelse med andra värme- och kylsystem. Det som skiljer informationen är variablernas proportioner, vilken typ av indata som krävs samt mängden indata (Ahmed m.fl. 2021).

I en sammanställande litteraturstudie av Ahmed m.fl. (2021) granskas olika typer av datadrivna modelleringsmetoder med avseende på förutsägbarhet, generaliseringsförmåga, krav på indata och komplexitetsnivå för att identifiera styrkor och svagheter i metoderna. Studien avser att granska prestationen och progressionen vid motgångar och problem för att åstadkomma användbara riktlinjer vid valet av den mest passande datadrivna modelleringstekniken. Nedan presenteras de olika typer av datadriven modellering som nyttjas i dagsläget se figur 2.21.



Figur 2.21 – Schematisk illustration av olika typer av datadriven modellering. Figuren baseras på tillhandahållen litteratur kring datadriven modellering.

2.5.1 Datautvinningsalgoritm

Metoden datautvinningsalgoritm syftar till att hitta repetitioner och mönster i större mängder data. En typ av datautvinningsalgoritm är *artificiella neurala nätverk* som har använts för att bestämma den termiska prestationen i EAHE-system. De tillämpningar som finns är bland annat beräkningar av värme- och kylbehov, inomhustemperatur, relativ luftfuktighet och energianvändning. Jämfört med specificerade tekniska modeller är artificiella neurala nätverksmodeller både noggrannare och snabbare. Artificiella neurala nätverk kan appliceras mer konsekvent än traditionella modelleringstekniker, som bland annat regression, för att förutse energiförbrukning (Ahmed m.fl. 2021).

I en studie av Kumar, Kaushik & Garg (2006) har artificiella neurala nätverk använts för att förutse värme- och kylprestandan i ett EAHE-system. Två modeller av artificiella neurala nätverk användes för att bestämma den termiska prestandan, en som var deterministisk och en som var intelligent. I studien användes 6 olika variabler för att bestämma utloppstemperaturen; rörlängd, luftfuktighet, yttjordstemperatur, markttemperatur, inloppstemperatur och mediumet luft. Resultatet från studien visade att den intelligenta modellen hade en noggrannhet på $\pm 2,6\%$ medan den deterministiska hade en noggrannhet på $\pm 5,3\%$ (Kumar, Kaushik & Garg 2006).

Stödvektormaskin, på engelska kallat *support-vector-machine*, är en typ av datautvinningsalgoritm som kan nyttjas vid modellering och bestämning av ett EAHE-systems termiska prestanda. Algoritmen är användbar för att bestämma regressionsproblem, klassificering samt för att hitta mönster och har presterat bättre än enkla artificiella neurala nätverk med avseende på modellering (Ahmed m.fl. 2021).

2.5.2 Oskarp logikmodell

Modellen som på engelska benämns *fuzzy logic model* kan på svenska exempelvis benämnas som *suddig logikmodell* eller *oskarp logikmodell*. Modellen hanterar beräkningsmetoder baserat på "graden av sanning", där graden går från 0 till 1. Modeller baserade på oskarp logik är ofta användbara för de som inte är experter inom modellering. Modeller med oskarp logik har flera applikationer inom kontrollteori, exempelvis kontroll av inomhusklimat och temperatur, förutse hastigheten av en fläktmotor och mäta ett EAHE-systems prestanda. Eftersom kontroller med oskarp logik baseras på icke-linjära kontroller kan det lösa problem på ett liknande sätt som artificiella neurala nätverk (Ahmed m.fl. 2021).

I en studie användes kontroll med oskarp logik för att optimera energiförbrukningen hos ett EAHE-system. Resultatet visade att kontroll med oskarp logik kan minska energiförbrukningen och således öka effektiviteten av systemet (Diaz, Sierra & Herrera 2013). I en annan studie av Shahsavari, Bagherzadeh & Afrand (2021) användes en modell med oskarp logik för att förutse energibesparingar för en byggnad med ett hybrid-system bestående av EAHE och solceller. Modelleringstekniken jämfördes med två andra tekniker i form av artificiella neurala nätverk och stödvektormaskin för att undersöka vilken teknik som är mest effektiv. Utdatan representerade den årliga energiproduktionen och baserades på följande indata: luftflöde, rörlängd och rördiameter av EAHE-systemet samt solcellernas djup, bredd och höjd. Resultatet visade att alla metoder var effektiva men att stödvektormaskinen genererade mer korrekta förutsägelser kring den årliga energiproduktionen (Shahsavari, Bagherzadeh & Afrand 2021). Två andra studier visade modellering med oskarp logik var bättre på att förutse ett EAHE-systems prestanda än artificiella neurala nätverk. Den mängd data och kunskap som behövs för att utveckla modeller med oskarp logik är ofta svårtillgänglig vad gäller EAHE-system och det försvårar modellering av systemet (Ahmed m.fl. 2021).

2.5.3 Fallbaserade resonemang

Metoden kan på engelska benämnas *case based reasoning* och använder principer med artificiell intelligens. Metoden är användbar för system som är odefinierade och icke-linjära och har tidigare använts inom flera områden som exempelvis för att förutse oljud, livslängd och för att upptäcka brister i system. Fallbaserade resonemang använder specifik information från tidigare fall vilket säkerställer pålitligheten i antaganden kring systemets prestanda vilket kan vara användbart för att förutsäga underhållskostnaderna i ett EAHE-system (Ahmed m.fl. 2021).

Det finns flertalet utmaningar vid appliceringen av en fallbaserad resonemangsmo-
dell. Det är komplicerat att bedöma prestandan i ett EAHE-system eftersom majoriteten av datan inte är systematiskt sammankopplad. För att uppnå precisa resultat med metoden krävs en databank av tidigare fall med trovärdiga och fullständiga indata. Fallbaserade resonemang är inte en populär metod då det sällan finns tillräckligt med data (Ahmed m.fl. 2021).

2.5.4 Statistisk modellering

En statistisk modell är en matematisk modell som baseras på provdatauppsättningar som samlats från en större datauppsättning genom att koppla data till en specifik trend (Okochi & Yao 2016). Exempel på typiska statistiska modeller är: *Box-Jenkins* och *polynomial regression* (Ahmed m.fl. 2021). I statistiska modeller uppskattas parametrarna genom att de väljs utifrån vad som passar den specifika datauppsättningen (Gross 2023). Trovärdigheten hos en statistisk modell beror starkt av antalet tester som genomförs där fler tester genererar större trovärdighet (Bezerra m.fl. 2008).

I flera studier har olika statistiska modeller testats för att avgöra hur väl de kan uppskatta olika parametrar som exempelvis fukt i byggnader. Bland annat har EAHE-systems uppvärmningsprestanda modellerats med *polynomial regression* där luftflöde, rördiameter och rörlängd betraktats som kritiska parametrar. Resultatet kan ha påverkats av att många antaganden gjordes vid framtagandet av data (Ahmed m.fl. 2021).

Vad som kan göra användandet av statistiska modeller komplicerat i samband med modellering av EAHE-system är att EAHE-systemets operativa förhållanden ständigt ändras. Exempel på data som fluktuerar är värme- och kylbehov, dygnstemperatur och årstidsklimat vilket gör att EAHE-systemet måste betraktas som icke-linjärt och därav bör även en icke-linjär modell användas vid beräkning. I och med att systemet måste betraktas som icke-linjärt blir det därför en risk för ökade felmarginaler, speciellt vid mätning över långa tidsperioder. För de studier som gjorts har ofta otillräckliga data använts vid konstruktionen av de statistiska modellerna. Användande av otillräckliga data har lett till att de flesta statistiska modellerna inte kan appliceras på olika system utan är snarare väldigt systemspecifika och genererar mest trovärdiga data i linjära fall (Ahmed m.fl. 2021).

2.5.5 Stokastisk modellering

Stokastisk modellering är en teknik för att uppskatta sannolikhetsfördelningar av olika utfall genom att ge utrymme för slumpmässiga avvikelser i indata (Talari m.fl. 2018). Avvikelsena baseras på tidigare identifierade fluktueringar i indata för en utsedd period som bygger på standardiserade tidsserie-metoder. Spridningen av möjliga utfall hämtas från mängder av simuleringar som kollektivt visar de slumpmässiga avvikelserna i indata. Det som gör stokastiska modeller användbara är flexibiliteten i modellernas användningsområde och applicerbarhet. Om den stokastiska modellen antar slumpmässiga variabler kan det appliceras vid modellering av EAHE-system. Värmeöverföringen i ett EAHE-system kan uppskattas genom att använda en tredimensionell stokastisk modell och slumpmässigt betrakta jordens egenskaper och materialens värmekonduktivitet som okända variabler (Ahmed m.fl. 2021).

I de fall där en stokastisk modell har använts för modellering har osäkerheter i temperaturens värmeutbyte i EAHE-systemet, värmeutbyte med atmosfären, aktivitetsgrad och tidsscheman för byggnadens brukare inkluderats (Ahmed m.fl. 2021). En av studierna som gjorts är av Prasad och Bharadwaj (2002) som tog fram en stokastisk modell för att utreda värmeutvinningsprestandan i ett EAHE-system samt förutspå

osäkerheter i fluidtemperaturen. Resultatet visade att osäkerheten i inloppstemperaturen är en avgörande faktor för precisionen av den stokastiska modellens resultat. Simuleringen visade att osäkerheter i modellens värmeöverföringskoefficienter hade liten påverkan på resultatet, vilket är en parameter som ofta är svår att mäta. Med den vetskapen kan förutsägbarheten förbättras avsevärt genom att göra noggranna mätningar av fluidens inloppstemperatur snarare än mätningar av värmeöverföringskoefficienter (Prasad & Bharadwaj 2002).

2.5.6 Problematik kring modellering

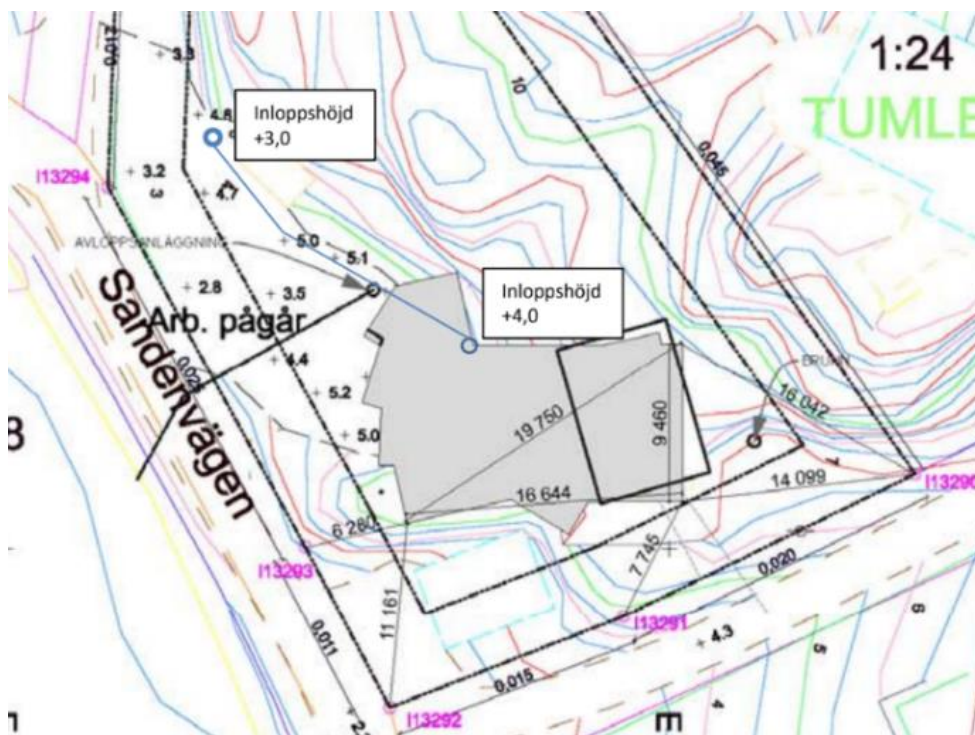
Ett EAHE-systems termiska effektivitet beror av flera faktorer så som rörlängd, diameter, djup och rörkonfiguration, utomhustemperatur med flera. På grund av systemets komplexitet finns det störningar, begränsningar och inkonsekvenser vilket innebär att valet av en passande modelleringsmetodik blir viktig för att kunna reducera antalet problem. Modellerna har en låg förmåga att generalisera på grund av modellstrukturens simplicitet. Data-drivna modeller är inte pålitliga i att förutse relativ luftfuktighet och temperatur när det inte finns lämpliga och tillräckliga data att tillgå. En fördel med data-drivna modeller av EAHE-system har konstaterats vara att de har visat på precisa avbrott och osäkerheter i systemet (Ahmed m.fl. 2021).

3 Metod

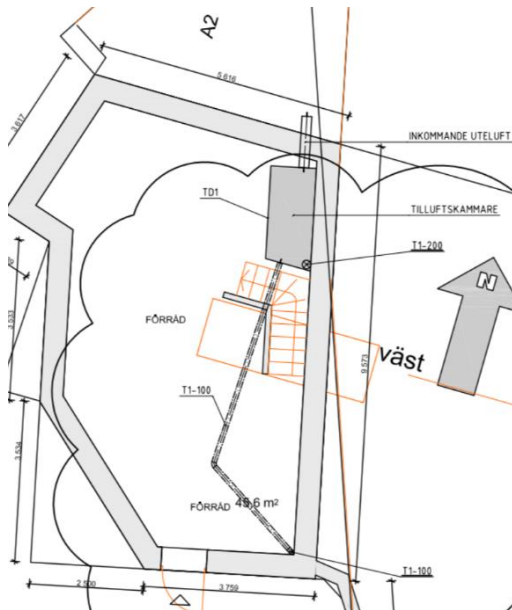
I detta kapitel beskrivs de metoder som använts i rapporten. Arbetet omfattas av en fältundersökning där temperatur och luftfuktighet mäts i en byggnads markförlagda rör under två veckor. Momentant mäts även luftflödet i byggnaden. Installation av sensorer och mätutrustning samt använda beräkningsmetoder beskrivs. Framtagandet av aktuella klimatdata under mätperioden presenteras. Även metoden för en semistrukturerad intervjustudie presenteras samt metoden för genomförd litteraturstudie. Beskrivningen av metoden tillämpas för att ge läsaren en förståelse kring arbetets genomföranden och vad undersökningen syftar till vid analys och diskussion av mätdata.

3.1 Fältundersökning

Fältundersökningen sker på en redan existerande trevåningsvilla i Torslanda som nyttjar markförlagd ventilation av typen straight-pipe konfiguration förlagt 1–2,2 meter ner i marken. Systemet består av en vertikal brunn med huv och dimensionen 350 mm. 2 meter ner ansluts brunnsröret till ett 200 mm horisontellt markrör som löper hela vägen in i luftintagskammaren i villans källare. Markröret är totalt cirka 22 meter långt, se figur 3.1 för position av röret på tomten. Inne i byggnaden fördelas luften ut i huset från luftkammaren, se figur 3.2, genom självdrag med assistans av frånluftsfläktar i badrummen och köket. Byggnadens luftkammare består av ett don som är anslutet till husets ventilationssystem samt invändig anslutning av det markförlagda röret (se figur 3.3–3.5 och 3.12).



Figur 3.1 - Urklipp av husets situationsplan. Det markförlagda rörets position är markerad med blått där inloppshöjd är markerat i rörets båda ändar. Ritningen visar att röret har en svag lutning bort från byggnaden. Illustration av rör framställd av ByDemand.



Figur 3.2 – Urklipp från planritning över källarplanets tilluftskammare. Anslutande markrör benämns “inkommande uteluft” i figuren. Figuren visar även anslutning mellan tilluftskammare och tillhörande ventilationssystem. Ritning framställd av ByDemand

Figur 3.3 - Bild av kammarens ingång. Ovanför dörren visas anslutande rör T1-100. Foto: Hellquist Lilja & Sandström.



Figur 3.4 – Bild av tilluftsdonet TD1 i luftkammaren. Donet är anslutet till husets ventilationssystem, placerat över dörröppning i luftintagskammaren. Foto: Hellquist Lilja & Sandström.



Figur 3.5 – Bild inifrån kammaren. Visar avskiljande vägg mellan inloppsröret och tilluftsdonet TD1. Foto: Hellquist Lilja & Sandström.

Mätningen av inlopps- och utloppstemperaturer genomförs med 4 sensorer, två med förlängningssladd och två utan (se figur 3.6 och 3.7) av typ och märke: *HOBO Temp/RH Data Logger*. De sensorer som saknar förlängningssladd har modellnr: MX2301A (mätosäkerhet $\pm 0,2$ °C, $\pm 2,5\%$ RF) (Hobo u.å.b) och sensorerna med förlängningssladd har modellnr: MX2302A (mätosäkerhet $\pm 0,2$ °C, $\pm 2,5\%$ RF), (Hobo u.å.a). Förlängningssladden som är kopplad till två av sensorerna ger möjlighet att genomföra mätningar en bit in i rörsystemet. Runt de båda sensorerna med förlängningssladd snurras ståltråd för att underlätta installationen, se figur 3.6.



Figur 3.6 – Bild av sensor med förlängningssladd invirad i ståltråd för bättre stadga vid installation. Dessa benämns "B" och "C" i undersökningen. Foto: Hellquist Lilja & Sandström.



Figur 3.7 – Bild av sensor utan förlängningssladd. Dessa benämns "A" och "D" i undersökningen. Foto: Hellquist Lilja & Sandström.

Sensorerna registrerade temperaturen i fyra olika delar av röret under 2 veckors tid kontinuerligt var 10:e minut, se figur 3.8. Innan undersökningen sker på plats aktiveras sensorerna utanför rörsystemet för att säkerställa att de ger likvärdiga mätvärden i samma klimat. När 2 veckor passerat samlades mätvärdena in genom att avinstallera sensorerna och ladda ned data via appen "HOBObconnect". Data presenteras i kapitel 4.



Figur 3.8 – Schematisk ritning över rörsystemets utformning med sensorernas placering. Punkterna A, B, C och D representerar de fyra olika sensorernas placering. Bilden är ej skalendig eller likvärdig verklig rördragning utan har i syfte att ge en bra överblick över fältundersökningens uppsättning.

3.1.1 Mätningar av temperatur och relativ luftfuktighet

På tomten finns en utomhushuv med filter placerad, se figur 3.9. Huven lyfts av för att komma åt det vertikala utvändiga röret som leder ner till det horisontella markröret cirka 2 meter ner, se figur 3.10 och 3.11.

I den utvändiga röröppningen fästs två sensorer, en utan förlängningssladd och en med förlängningssladd med benämningen A respektive B, se figur 3.11. Sensorerna fästs genom att hängas på en befintlig krok några centimeter ner i det vertikala röret. Förlängningssladden på sensorn B viras ned genom det vertikala röret och böjs in till vänster i det horisontella röret.



Figur 3.9 - Bild av utvändig huv med tillhörande filteranordning som är placerad över det vertikala röret som visas i figur 3.9. Foto: Hellquist Lilja & Sandström.



Figur 3.10 – Bild på utvändig vertikal rörmynning av husets EAHE-system. Se figur 3.1 för placering på tomt. Foto: Hellquist Lilja & Sandström.



Figur 3.11 - Bild ner i det vertikala utvändiga markröret som leder ner till det horisontella markröret. Visar installation av sensorerna "A" respektive "B". Foto: Hellquist Lilja & Sandström.

Invändig installation sker i källarens luftkammare där sensorerna C och D placeras. Sensorn D placeras i mynningen på röret och sensorn C viras in så långt förlängningssladden räcker. Båda sensorerna placeras i öppningsmynningen till röret, se figur 3.12 och 3.13.



Figur 3.12 - Invändig röröppning i kammaren. Foto: Hellquist Lilja & Sandström.



Figur 3.13 - Installation av sensorerna "C" och "D" som placeras i rörmynningen. Foto: Hellquist Lilja & Sandström.

3.1.2 Mätning av luftflöde och lufthastighet

Vid installations- och avinstallationstillfället av sensorerna mäts lufthastigheten och luftflödet momentant i rören. Lufthastigheten mäts med en varmtrådsanemometer av modellen SwemaAir 300 (mätosäkerhet $\pm 0,05$ m/s vid 0,1–1,33 m/s, $\pm 5\%$ avläst värde vid 1,33–30 m/s (Swema¹ u.å.)) se figur 3.14 och 3.15. Luftflödet mäts med en flödesstos av modellen SwemaFlow 126 och mäter flöden mellan 1,5 och 125 l/s (mätosäkerhet min $\pm 0,5$ l/s (Swema² u.å.)) se figur 3.16 och 3.17. Vid mätning med varmtrådsanemometern beräknas arean av rörmynningen med ekvation 3.2 för att senare beräkna luftflödet med ekvation 3.1.



Figur 3.14 – Varmtrådsanemometer, modell SwemaAir 300. Foto: Hellquist Lilja & Sandström.



Figur 3.15 – Munstycke av varmtrådsanemometer där mätning av lufthastighet sker. Foto: Hellquist Lilja & Sandström.



Figur 3.16 – Flödesstos, modell SwemaFlow 126. Foto: Hellquist Lilja & Sandström.



Figur 3.17 – Insidan av flödesstosen, modell SwemaFlow 126, med varmtrådar samt strypring. Foto: Hellquist Lilja & Sandström.

3.1.2.1 Mätning vid rörmyning i luftkammare

Totalt sker en mätning av lufthastigheten vid rörmyningen i luftkammaren vid avinstallationstillfället. Vid samtliga mätningar var villans frånluftsfläktar i inaktivt läge. Varmtrådsanemometern placeras vinkelrätt mot flödesriktningen i rörets öppning och mätningen sker med dörren till luftkammaren stängd.

Vid installation och avinstallation görs även mätningar av luftflödet. Flödesstosen placeras över rörmyningen och mätningen görs enligt anvisning, en med strypningen mellan flödet och varmrådarna och en utan strypningen, vartefter flödet fås.

3.1.2.2 Mätning vid badrumsfläktar och köksfläkt

Vid avinstallationstillfället mäts lufthastigheten med en varmrådsanemometer i de fläktar som förstärker självdragssystemet. Fläktarna som det genomförs mätningar på är belägna i WC:n på övre planet, i badrummet på övre planet (se figur 3.18) samt köket (se figur 3.19 och 3.20). Fläkten på WC:n aktiveras vid belysning och är då aktiv i cirka 5 minuter medan badrumsfläkten aktiveras vid ökad luftfuktighet. Fläktarna kan även regleras manuellt i en tillhörande app. I villans andra badrum använder inte fläkten självdrag utan aktiveras endast sensoriskt vid ökad luftfuktighet, därav utförs inga mätningar på den fläkten. Totalt mäts lufthastigheten över vardera badrumsfläkt och WC-fläkt två gånger, en när fläkten är i aktivt läge och en när fläkten är i inaktivt läge (självdraft). Lufthastigheten över köksfläkten mäts en gång då denna inte regleras sensoriskt eller genom appen utan alltid nyttjar självdrag.

Vid mätning i det inaktiva läget i badrumsfläktarna förs munstycket till varmrådsanemometer in bakom rotorbladen och vinklas vinkelrätt mot flödesriktningen. Vid mätning av det aktiva läget placeras munstycket av varmrådsanemometern vinkelrätt precis utanför bladen. Mätningen av lufthastigheten vid köksfläkten sker i anslutning till fläktgallrena som visas i figur 3.20. Munstycket till varmrådsanemometern placeras vinkelrätt mot fläktgallret.

Flödesstosen användes endast vid mätning på WC:n då den inte fick plats över fläkten i badrummet. I köket var arean av köksfläkten för stor för en korrekt mätning med flödesstosen.



Figur 3.18 – Bild av badrumsfläkt. Foto: Hellquist Lilja & Sandström.



Figur 3.19 – Bild av köksfläkt. Foto: Hellquist Lilja & Sandström.



Figur 3.20 - Närbild på köksfläktens galler där lufthastigheten mäts med varmtrådsanemometern. Foto: Hellquist Lilja & Sandström.

3.1.3 Beräkning av luftflöde

Ekvationerna som används för beräkning av luftflödet där lufthastigheter mäts över husets fläktar och don är:

$$Q = v \times A_{tvärsnitt} \quad (\text{ekv 3.1})$$

$$A_{tvärsnitt} = \frac{\pi \times d_{kanal}^2}{4} \quad (\text{ekv 3.2})$$

Där

- Q = Luftflöde (m^3/s)
- v = Lufthastighet (m/s)
- $A_{tvärsnitt}$ = Kanalernas tvärsnittsarea (m^2)
- d_{kanal} = Kanaldiameter (m)

Ekvationerna är tagna från Dahlblom & Warfvinge (2010).

3.2 Insamling av klimatdata

Mätvärdena från fältundersökningen i avsnitt 3.1 ställs upp mot aktuella klimatdata under mätperioden 29 februari t.o.m. 14 mars.

Klimatdata över temperaturvariationer som används hämtas från SMHI:s tjänst Metobs från Göteborgs väderstation: Göteborg A 71420. Inhämtad data visar variationer i utomhustemperatur för varje timme för perioden 2023-11-27 t.o.m. 2024-04-05. Resultatet sammanställs i diagram 4.2.

För variationer i vindhastighet används SMHI:s klimatdata från väderstationen Vinga: Vinga A 71380. Hämtad data visar variationer i vindhastighet för varje timme för perioden 2023-11-27 t.o.m. 2024-04-05. Resultatet sammanställs i diagram 4.9.

3.3 Intervjustudie

En del av studien innefattade tre semistrukturerade intervjuer som gjorts med tre olika företag som arbetar med markförlagd ventilation i Sverige; Uponor, ByDemand och Totalinstallation AB. Intervjuerna har skett över Teams respektive telefon och har haft i syfte att utreda hur de olika företagen resonerar kring utformning och modellering samt svårigheter och möjligheter kopplat till systemet. Samtliga företag har fått följande frågor:

- Vad är det huvudsakliga syftet med denna typ av installation?
- Har det gjorts beräkningar och/ eller modellering av systemet med avseende på energibesparingsmöjligheter? Om så är fallet, vilket typ av program har använts och vilka parametrar beaktas i indata?
- Hur har ni bedömt att installationen är gynnsam för byggnaden?
- Anser ni att fukt är en problematik? Hur kan det åtgärdas och/ eller minimeras?

Resultatet från intervjustudien analyseras genom att jämföra svaren från respektive intervjuperson för att identifiera likheter och skillnader i företagens inställning till installationen.

3.4 Litteraturstudie

En av de metoder som används för att besvara frågeställningarna är en litteraturstudie där information samlas kring ämnet. Övriga tillämpade metoder presenteras i kapitel 3. Litteraturstudien bygger på vetenskapliga artiklar och examensarbeten från olika delar av världen. Rapporterna har samlats in genom sökmotorer som "Google scholar" samt material från handledare. För att navigera i rapporterna används sökord som: *termitventilation*, *earth tube ventilation*, *EAHE*, *markförlagd ventilation*, *termiter*, *biomimic*, osv. För att hitta ytterligare material har metoden *pearl growing* använts genom att referensers referenser nyttjats. Även litteratur om bland annat naturinspirerade lösningar i samhällsuppbyggnad och biomimik har använts för att samla information kring existerande lösningar. Vissa rapporter består av fältstudier och kvantitativa utredningar medan andra är utformade som sammanställande litteraturstudier. Dessa förbinds genom att applicera teorin bakom systemet på relevanta resultat från undersökningar och rapporter.

4 Mät- och intervjuresultat med diskussion

I följande kapitel presenteras beräkningar och indata från luftflödesmätningarna i tabellform. Resultatet från sensorernas temperaturmätningar presenteras i diagram, både individuellt, mot varandra och mot klimatdata från undersökningsperioden. Även relativ luftfuktighet i rören och skillnaden mellan inlopps- och utloppstemperatur presenteras i separata diagram. En sammanfattning av genomförd intervjustudie med de tre företagen presenteras i form av diskussion kring fördelar och nackdelar med EAHE-system.

4.1 Luftflödesmätningar

Nedan presenteras resultatet av lufthastighetsmätningar och luftflödesberäkningar som genomfördes vid fältundersökningen. Tabell 4.1 visar indata för beräkning av luftflöde för de lufthastighetsmätningar som gjorts med varmtrådsanemometern. I beräkningarna av tvärsnittsarea och luftflöde i tabell 4.1 används ekvation 3.1 och 3.2. Tabell 4.2 visar uppmätta värden på de platser där mätningar gjorts med flödesstosen.

Tabell 4.1 - Sammanställning över mätvärden med varmtrådsanemometer och mått vid beräkning av luftflöde.

Rum	Diameter (mm)	Area (m ²)	Lufthastighet aktivt läge (m/s)	Lufthastighet inaktivt läge (m/s)	Luftflöde (l/s)
Badrum	100	0,008	1,6–1,9	0,2–0,5	1,6–4,0
WC	100	0,008	1,0	0,2–0,8	1,6–6,4
Köksfläkt	240x115 +320x195	0,122	-	0,07–0,13	9,0–16,0
Luftkammare	200	0,031	-	0,15–0,5	5,0–16,0

Tabell 4.2 – Sammanställning av mätdata med flödesstosen över uppmätt luftflöde vid installationstillfället och avinstallationstillfället.

Rum	Uppmätt luftflöde (l/s) - installationstillfället	Uppmätt luftflöde (l/s) - avinstallationstillfället
Luftkammare	5.2	0.0
WC aktivt läge	-	20.9
WC inaktivt läge	-	9.6

Observationer tabell 4.1 och 4.2

Luftflödesmätningarna i luftkammaren från tabell 4.1 och 4.2 visar på att luften stundtals står stilla alternativt håller en väldigt låg hastighet. Vid första mättillfället uppmättes flödet med flödesstosen i den inre rörmynningen till 5,2 l/s respektive 0,0 l/s vid det andra mättillfället. Med varmtrådsanemometern beräknades flödet i luftkammaren enligt tabell 4.1 till 5,0–16,0 l/s vilket är lågt i jämförelse med standarden för vad svenska byggnader bör ha på 0,35 l/s m² golvarea enligt Boverkets föreskrifter.

Mätningar över WC-fläkten med flödesstosen visade i aktivt läge 20,9 l/s och i inaktivt läge 9,6 l/s. Vid beräkningar baserat på uppmätt lufthastighet med varmtrådsanemometern visades ett lägre värde än vad flödesstosen genererade på 1,6–6,4 l/s. Vid mätningar över badrumsfläkten beräknades ett flöde på 1,6–4,0 l/s. Standarden för flöden i WC och badrum enligt BBR är 10 l/s för utrymmen under 5 m² vilket enligt mätningar med varmtrådsanemometern visar att ett relativt lågt luftflöde genereras från fläktarna. Mätningar över köksfläkten visade ett beräknat luftflöde på 9,0–16,0 l/s.

Diskussion tabell 4.1 och 4.2

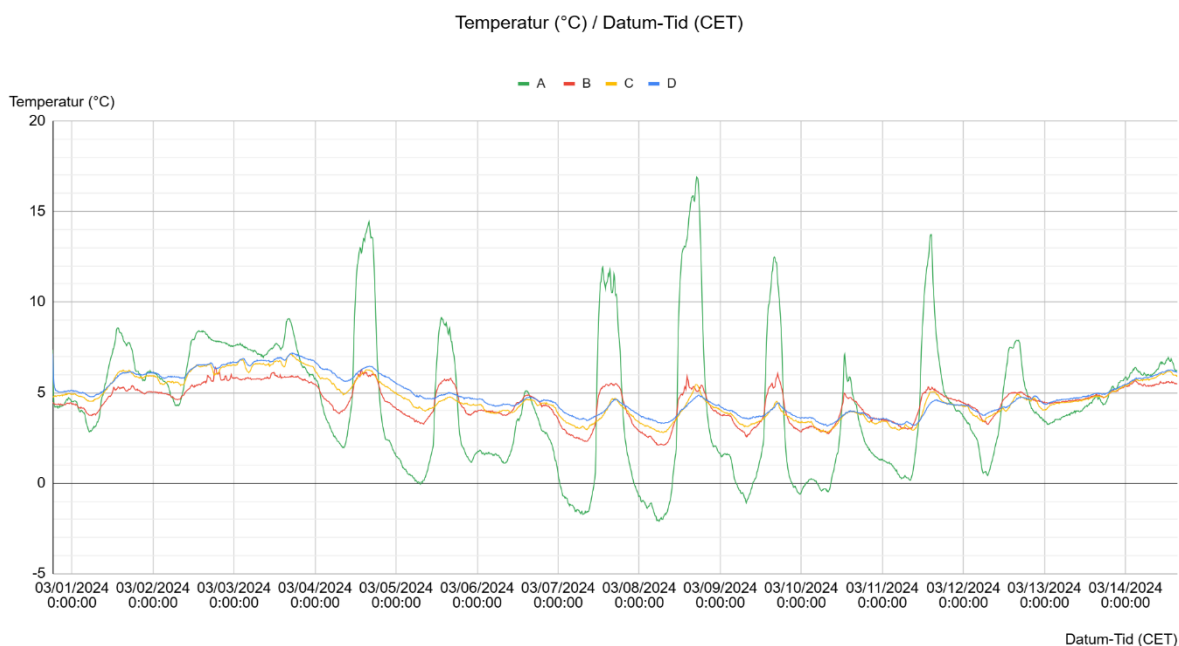
Mätningarna visar att luftflödet momentant varierar kraftigt i markröret vilket kan förklaras genom självdragsprincipen som villan nyttjar. Det låga beräknade luftflödet på 5–16 l/s i luftkammaren tyder på att tilluften tar sig in genom otätheter i klimatskalet alternativt att byggnaden är undermåligt ventilerad. Tidigare studier har visat att rörlängd, diameter, rörläggingsdjup och luftflöde är fyra avgörande parametrar som bestämmer prestandan hos systemet. Därav kan det ifrågasättas hur effektivt ett självdragssystem med EAHE är då luftflödet i ett självdragssystem varierar med uteklimatet. Belloufi m.fl. (2022) visar att luftflödet är starkt kopplat till systemets effektivitet där ett lägre luftflöde möjliggör bättre nedkylning av tilluften. Ett självdragssystem genererar ett varierande luftflöde vilket mätningarna bekräftar.

Att luften stundtals verkar stå stilla i röret kan bero på otätheter i byggnaden. Brukare av villan har uttryckt att vid blåsiga dagar upplevs ett större drag inomhus, se bilaga D för fullständig intervju. Detta tyder på otätheter i byggnadens klimatskal vilket kan orsaka luft att tränga in i byggnaden. Luften tar alltid den lättaste vägen och eftersom otätheter underlättar luftens passage in i byggnaden transporteras mindre luft genom markrören som är en markant krångligare väg för luften. Därav finns en risk att markrörets luft stundvis blir stillastående eller antar väldigt låg flödes hastighet som orsakar ett minimalt utnyttjande av värmeutbyte i röret. Mätningen med flödesstosen som visar 0,0 l/s kan vara missvisande eftersom det lägsta mätintervall ligger på 1,5 l/s vilket innebär att flöden under detta visas som 0,0 l/s i flödesstosen. Detta kan betyda att flödet inte stod helt stilla vid mättillfället vilket även mätningar med varmtrådsanemometern visar. Dock är det inte omöjligt att luften kan stå helt stilla i röret eftersom systemet saknar en mekanisk fläkt som genererar ett fast flöde. De låga uppmätta flödena visar att markröret ensamt inte är tillräckligt ur tilluftsynpunkt för svenska standarder. Då kravet på minsta uteluftsflöde är 0,35 l/s m² golvarea skulle ett luftflöde på 16 l/s uppfylla kraven för cirka 45 m². Eftersom det troligtvis finns otätheter i byggnaden betyder detta nödvändigtvis inte att byggnaden är undermåligt ventilerad utan kraven för inomhusklimat kan vara uppfyllda ändå. För att avgöra huruvida byggnaden är underventilerad eller inte bör avtagandet av koldioxidhalt undersökas som ger en bättre indikator på om luftomsättningen är tillräcklig för byggnadens behov.

Något som kan påverka luftflödet i röret är filteranordningen i huven. Filter orsakar ett tryckfall över inloppet vilket resulterar i ett lägre luftflöde i röret. Detta är ytterligare en anledning till att det är relevant att införa ett mekaniskt luftflöde i form av exempelvis en fläkt till systemet i stället för självdrag.

Vid beräkning av luftflödet genom husets fläktar kan det diskuteras hur relevant de inaktiva mätningarna är för inomhusklimatet eftersom fläktarna är behovsstyrda. I inaktivt läge där fläktarna endast nyttjar självdrag visar mätningarna på ett relativt lågt luftflöde men vid aktivering genereras ett mycket högre luftflöde som uppfyller kraven för svenska rekommendationer från Boverket. Då fläktarna aktiveras vid för hög luftfuktighet i luften och vid aktivering av ljus förses dessa rum troligtvis med tillräcklig ventilation då rummen brukas. I aktivt läge uppmättes luftflödet till 20,9 l/s vilket enligt Boverkets rekommendationer är tillräckligt då luftflödet bör vara minst 10 l/s för utrymmen under 5 m².

4.2 RF- och temperaturmätningar med tillhörande klimatdata



Figur 4.1 – Sammanställande diagram över temperaturvariationerna i de fyra mätpunkterna i röret över mätperioden 01/03–2024 t.o.m. 14/03–2024. De olika färgerna representerar de fyra sensorerna som placerats i markröret.

Observationer figur 4.1

Data från sensorerna sammanställs i figur 4.1 som visar skillnaden i temperaturvariationer mellan de fyra sensorerna under en period på två veckor mellan 1:a mars t.o.m. 14:e mars 2024. Diagrammet visar att den största temperaturvariationen per dygn sker genomgående över mätpunkt A där temperaturen varierar som mest mellan cirka -2 och 17 °C under ett dygn den 8:e mars. Under de första tre dyggen skiljer sig variationsmönstret över dygnet i jämförelse med resten av mätperioden. För dyggen 4:e mars t.o.m. 12:e mars verkar temperaturvariationerna variera övervägande jämt och periodiskt med tydliga toppar och dalar med stigande och sjunkande temperaturer. För de tre första dyggen samt det sista dygnet avviker det periodiska variationsmönstret och det är svårt att identifiera tydliga toppar och dalar. Dock kan någorlunda svängningar identifieras och generellt sett antar mätpunkt A de högsta respektive lägsta uppmätta temperaturerna oavsett dygn över mätperioden. Det som dock varierar är skillnaden mellan mätpunkt A och övriga mätpunkter B, C och D där skillnaden över dyggen 4:e mars t.o.m. 12:e mars är markant större än skillnaden över dyggen 1:a mars t.o.m. 3:e mars samt 13:e mars. Mätpunkt B, C och D är relativt lika med avseende på temperaturvariationer per dygn och följer tydligt mönstret från mätpunkt A men med svagare svängningar. Dagtid antar mätpunkt A de högsta temperaturerna medan nattetid antar mätpunkt D de högsta temperaturerna. Mätpunkt B och C antar ofta ett mellanvärde mellan mätpunkt A och D men analyseras exempelvis dyggen 2:a och 3:e mars antar mätpunkt B den lägsta temperaturen för att sedan öka i mätpunkt C och D vid samma tid. Detta gäller även dagtid för dygnet 4:e mars.

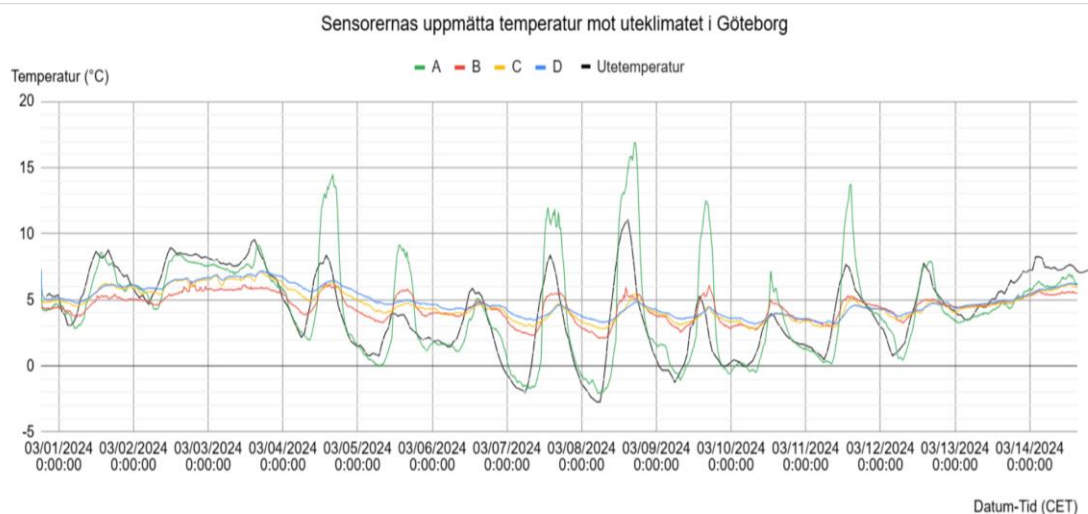
Diskussion figur 4.1

De stora skillnaderna mellan mätpunkt A och övriga mätpunkter B, C och D kan bero på markens värmekapacitet som medför en stabil temperatur som påverkar luften som flödar genom röret. Detta tyder på att marken har en effekt på luftens temperatur men att uteklimatet sätter standarden för hur stor effekt som kan överföras. För de första tre dyggen är utetemperaturen mycket jämnare och lägre än nästkommande dygn vilket resulterar i att skillnaden mellan inlopps- och utloppstemperatur blir mycket mindre. Uteluften antar en temperatur som troligtvis ligger närmre marktemperaturen dessa dygn vilket innebär att ett lägre värmeutbyte sker. Oavsett vilken temperatur mätpunkt A antar över dygnet håller mätpunkterna B, C och D relativt stabila värden mellan cirka 2–7 °C vilket tyder på att markens värmekapacitet har en utjämnande effekt på uteluften som passerar.

Att temperaturskillnaden är som störst mellan mätpunkt A och B tyder på att röret genererar ett relativt lågt värmeutbyte med luften efter de första två meterna i röret. Enligt mätdata sker den största temperatursänkningen 0–2 meter in i röret och temperaturen är efter det relativt konstant resterande rörsträcka med endast någon grads sänkning. Detta skiljer sig från vad bland annat Belloufi m.fl. (2022) kommer fram till som visar att 91% av temperatursänkningen sker de första 33 meterna av röret. Även Li m.fl. (2019) visar att under de första 23 meterna av röret skedde 88,5% av den totala temperaturökningen vilket tyder på att rörets längd bör ha en koppling till EAHE-systemets prestanda. I dessa studier har det visat att en längre rörkonfiguration bidrar till en mer effektiv värmeöverföring vilket inte är fallet i denna fältstudie.

Den stora temperaturskillnaden mellan mätpunkt A och B kan bero på luftflödet i röret. Vid jämförelse mellan mätpunkt B, C och D är temperaturskillnaden markant mindre än mellan mätpunkt A och B och skiljer endast några °C över dygncyklarna vilket är genomgående genom hela mätperioden. Detta kan orsakas av att systemet till skillnad från de studier som gjorts internationellt inte nyttjar ett bestämt luftflöde utan att luften endast drivs av självdrag. Eftersom det inte finns ett mekaniskt konstant flöde som driver på luften kan det resultera i stillastående luft i röret vilket är en potentiell förklaring till varför nästan inget värmeutbyte sker med omgivande jord efter de två första meterna. Som studien av Ho Lee och Strand (2007) visar bör ett lägre flöde finnas för att ge luften optimal möjlighet att utbyta värmeenergi med jorden. Dock krävs anpassade dimensioner i form av rörlängd, diameter och rörlägningsdjup för att det låga flödet ska ge effekt för värmeutbytet i marken. Då flödet konstant varierar i markröret bör även effekten av röret variera då övriga parametrar i form av längd, diameter och rörlägningsdjup är konstanta.

Ett lågt flöde innebär att uteluften inte ges möjlighet till att påverka markens temperatur. Vid stora flöden kommer ett större värmeutbyte ske och markens temperatur kommer till slut anta luftens temperatur. Vid högre flöden bör därmed mätpunkt B anta en temperatur närmre uteluftens temperatur medan mätpunkt C bör anta en temperatur närmre markens temperatur alternativt husets temperatur om plattan är dåligt isolerad. Då mätpunkt B inte antar en temperatur nära mätpunkt A tyder det på att det aldrig uppstår höga flöden i rörsystemet under mätperioden.



Figur 4.2 - Sammanställande diagram som visar sensorernas uppmätta temperatur mot klimatdata från väderstationen Göteborg A under mätperioden 01/03–2024 t.o.m. 14/03–2024. Klimatdata avser utetemperatur och presenteras som den svarta grafen i diagrammet.

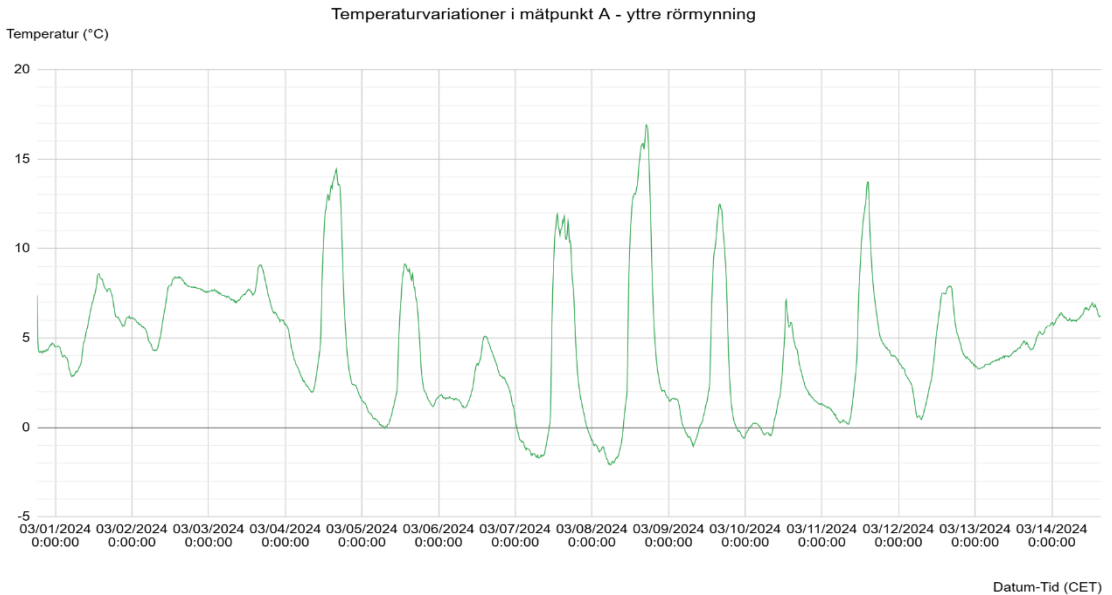
Observationer figur 4.2

Figur 4.2 visar sammanställning av figur 4.1 mot utetemperaturen i Göteborg över mätperioden. Diagrammet visar att uppmätta rörtemperaturer i samtliga punkter tydligt följer uteluftstemperaturen med en viss fördröjning. Uppmätt temperatur i mätpunkt A antar aningen högre temperatur dagtid över dygnet 4:e, 5:e samt 7:e t.o.m. 11:e mars än utetemperaturen. Skillnaden varierar mellan cirka 2–6 grader mellan utetemperaturen och mätpunkt A dessa dygn. Natttid är skillnaden mellan utetemperaturen och mätpunkt A inte lika stor och majoriteten av dygnet antar mätpunkt A aningen högre eller samma temperatur som utetemperaturen. För de tre första dygnet, 6:e mars samt de två sista dygnet antar utetemperaturen ett högre värde och stundtals likvärdig temperatur som i mätpunkt A oberoende tid på dygnet.

Diskussion figur 4.2

Orsaken till de kraftigare temperaturvariationerna i mätpunkt A mot mätpunkterna B, C och D kan förklaras genom jämförelse mot klimatdata från väderstationen Göteborg A under samma period då ett tydligt samband kan identifieras då utetemperaturen fluktuerar i liknande mönster. Detta tyder på att inloppstemperaturen i markröret är starkt beroende av utomhustemperaturen. Baserat på tidigare fältstudier av bland annat Ho Lee och Strand (2007) visar undersökningar att klimatet har en avgörande roll i hur effektivt ett EAHE-system kan bli och att ett djupt placerat, långt rör med låg luftfluthastighet och liten radie resulterar i lägre utloppstemperatur. Att rörtemperaturen är starkt beroende av uteklimatet förklarar även skillnaden mellan de mer periodiska temperaturvariationerna och de mer avvikande temperaturvariationerna i början och slutet av mätperioden då utetemperaturen följer samma mönster. Oavsett hur utetemperaturen fluktuerar följer rören uteluftens temperaturcykler någorlunda exakt.

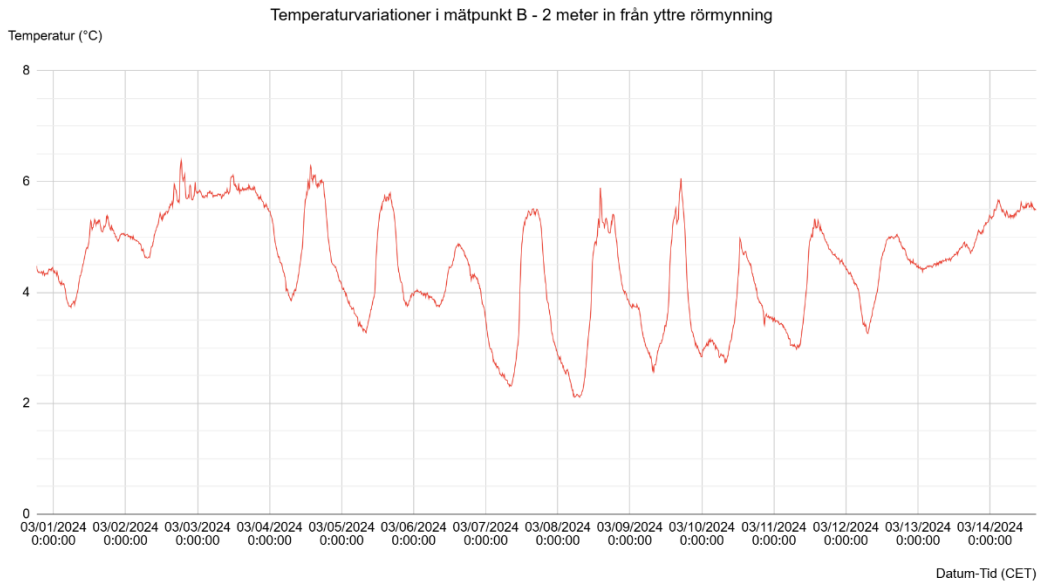
En anledning till att temperaturen i mätpunkt A vissa dygn är likvärdig med utetemperaturen kan bero på att utetemperaturen de dygnet saknar tydliga toppar. De dygn där utetemperaturen har tydliga toppar antar mätpunkt A som högst temperatur vilket kan bero på att huven som visas i figur 3.9 ackumulerar värme vilket i sin tur höjer temperaturen i mätpunkt A. De dygn där utetemperaturen inte har dessa toppar ackumulerar huven inte lika mycket värme och därav skiljer inte inloppstemperaturen avsevärt mycket från utetemperaturen. Detta förklarar även mönstret natttid där mätpunkt A tydligt följer utetemperaturen med svaga temperaturskillnader.



Figur 4.3 – Diagram över mätdata från sensorn "A" med avseende på temperatur under aktuell mätperiod.

Observationer figur 4.3

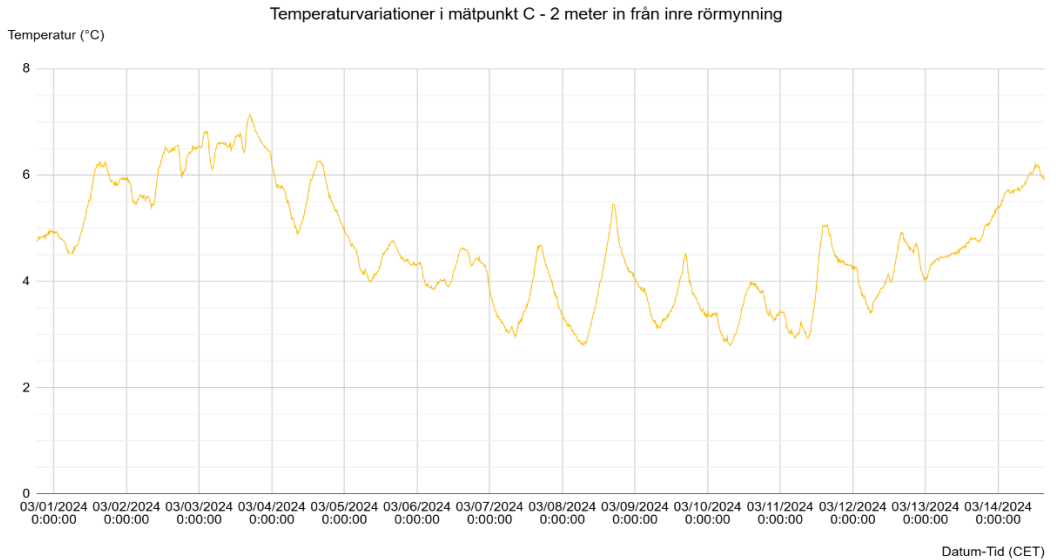
Figur 4.3 visar temperaturvariationerna i mätpunkt A i den yttre rörmynningen. Diagrammet visar relativt stora dygnsberoende fluktuationer med tydliga toppar och dalar mellan 4:e t.o.m. 12:e mars. Övriga dygn ses inte lika tydliga svängningar utan temperaturen varierar relativt jämnt mellan cirka 3–8 °C. Som max antar mätpunkt A en temperatur på cirka 17 °C och som lägst cirka -2 °C den 8:e mars. För de dygn där mätpunkt A antagit negativa värden eller temperaturer nära 0 °C syns tydliga efterföljande toppar. De lägre temperaturerna identifieras nattetid/tidig morgon strax efter kl 00:00 medan de högre temperaturerna kan ses dagtid strax efter 12:00.



Figur 4.4 - Diagram över mätdata från sensorn "B" med avseende på temperatur under aktuell mätperiod.

Observationer figur 4.4

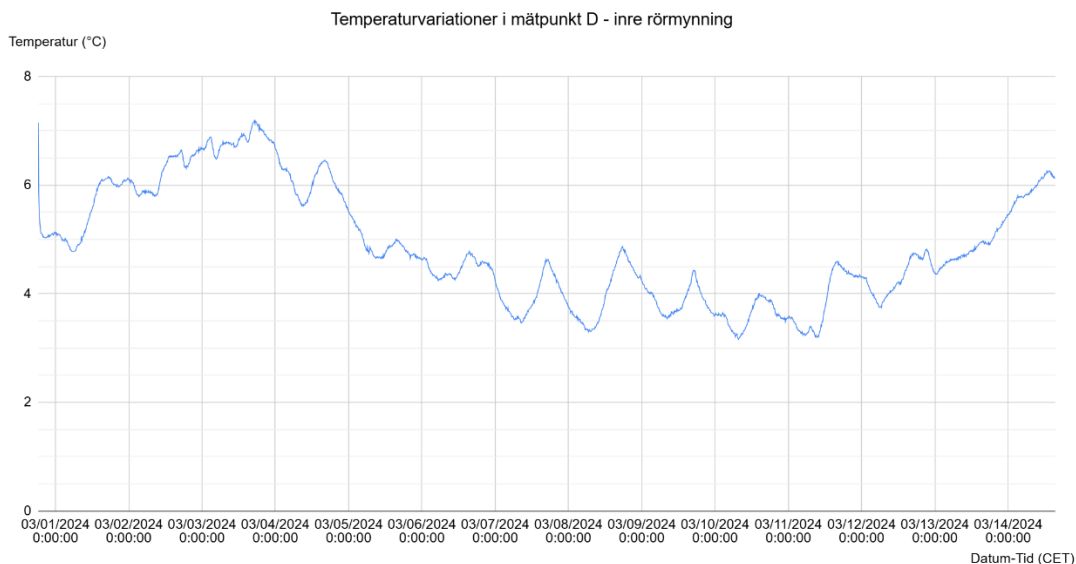
Figur 4.4 visar temperaturvariationerna 2 meter in från den yttre rörmynningen i mätpunkt B. Diagrammet visar relativt tydliga svängningar i temperaturen över dygnet 4:e mars t.o.m. 12:e mars. För övriga dygn kan inte en lika tydlig dygnsvariation identifieras. Svängningsmönstret påminner om vad som visas i figur 4.3 fast med mindre amplitud. För mätpunkt B fluktuerar temperaturen relativt jämt mellan cirka 2,5–6 °C över mätperioden med enstaka toppar dygnet 3:e och 4:e mars strax över 6 °C. Lägst temperatur antar mätpunkt B den 8:e mars på cirka 2 °C. Dalarna infaller strax efter kl. 00:00 tidiga morgnar medan topparna infaller mitt på dagen strax efter 12:00.



Figur 4.5 - Diagram över mätdata från sensorn "C" med avseende på temperatur under aktuell mätperiod.

Observationer figur 4.5

Figur 4.5 visar temperaturvariationerna 2 meter in från den inre rörmyningen i mätpunkt C. Diagrammet visar relativt små svängningar i jämförelse med figur 4.3 med mindre tydliga dygnsvariationer. Över dygnet 1: a mars t.o.m. 4:e mars samt 13:e mars antar luften högre temperatur än för dygnet 5:e t.o.m. 12:e mars och varierar mellan cirka 4–7 °C. Mellan 5:e t.o.m. 12:e mars varierar temperaturen mellan cirka 3–5 °C. Under denna period finns liksom i figur 4.3 och 4.4 tydligast toppar och dalar medan övriga dygn är avvikande med avseende på de tydliga periodiska svängningarna.



Figur 4.6 - Diagram över mätdata från sensorn "D" med avseende på temperatur under aktuell mätperiod.

Observationer figur 4.6

Figur 4.6 visar temperaturvariationerna i anslutning till den inre rörmyningen i mätpunkt D. Svängningar och temperaturvariationer påminner om figur 4.5 där dygnen 1:a t.o.m. 4:e mars samt 13:e mars antar aningen högre mätvärden än över dygnen 5:e t.o.m. 12:e mars och fluktuerar mellan 5–7 °C. För perioden 5:e t.o.m. 12:e mars varierar temperaturen mellan 3,5–4,5 °C. Den lägsta temperaturen uppnås den 10:e mars på strax över 3 °C. Den största skillnaden mellan dal och topp hittas den 8:e mars där temperaturen stiger från cirka 3,3 till 4,8 °C. Genomgående för hela mätperioden oavsett dygn antar mätpunkt D aningen lägre temperaturer i jämförelse med mätpunkt C med en skillnad på 0–0,5 °C vid jämförelse av figur 4.5 och 4.6. Precis som i figur 4.3–4.5 syns de lägsta dalarna i de tydliga svängningarna strax efter kl. 00:00 och topparna ses tydligast strax efter 12:00 för perioden 5:e t.o.m. 12:e mars.

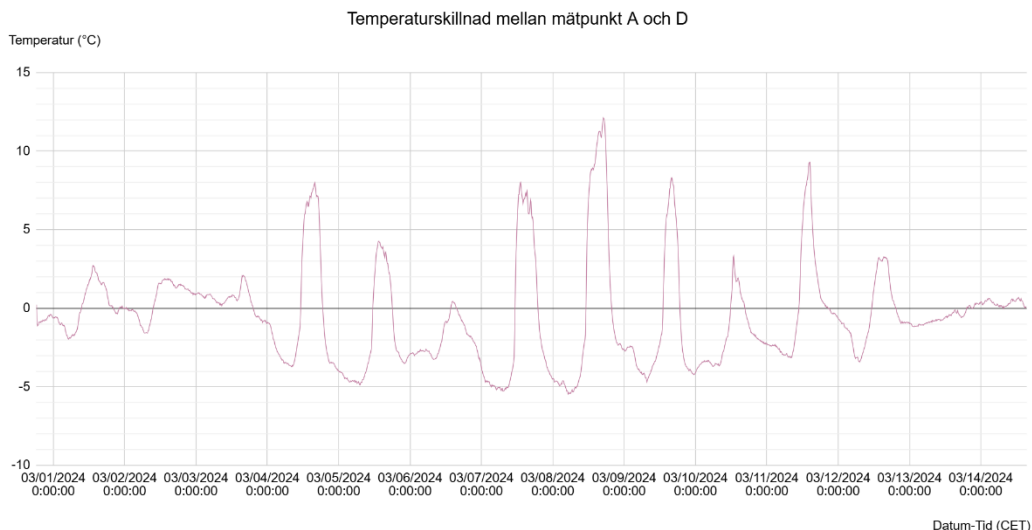
Diskussion figur 4.3–4.6

Genom att studera varje sensors mätdata individuellt från figur 4.3–4.6 kan temperaturvariationerna mellan varje mätpunkt jämföras. Vid granskning av graferna identifieras en avtagande svängning i temperaturvariationerna med rörets längd vilket tyder på att röret har en utjämnande effekt på luftens temperatur genom röret. Li m.fl. (2019) kom fram till att utloppstemperaturen varierade mycket mindre än utomhustemperaturen vilket visar att ett EAHE-system effektivt kan minska temperaturvariationer i luften. Även fallet med Eastgate Centre visar på en utjämnande effekt på temperaturen där byggnaden håller en jämn inomhustemperatur mellan 21–25 °C trots att skillnaden i utetemperatur kan fluktuera upp till 33 °C under ett dygn. Ju längre luften transporteras in i röret, desto jämnare blir luftens temperatur med mindre kraftiga variationer.

Svängningsmönstrena är väldigt lika mellan mätpunkt A och B respektive C och D men temperaturspannet är mer likt för mätpunkt B, C och D. Den jämnaste fluktuationen ses i mätpunkt B där dygnen har tydligast svängningar genomgående över mätperioden. Detta kan bero på att mätpunkt B är närmst mätpunkt A som påverkas avsevärt av utomhusklimatet vilket även färgar svängningsmönstret i mätpunkt B. Skillnaden mellan mätpunkt A och B är att mätpunkt B är placerad under marknivå vilket innebär att markens värmekapacitet kan påverka temperaturen i denna punkt. Till följd av placeringen under mark antar mätpunkt B inte lika fluktuerande temperaturer utan pendlar mellan 2,5–6 °C. Längre in i röret vid mätpunkt C och D identifieras liknande svängningsmönster där de tydliga topparna och dalarna har avtagit markant. Jämförs svängningsmönstret för sensorerna B, C och D antar luften en högre temperatur längre in i röret de dagar då utetemperaturen är högre men med minskad amplitud längre in i röret. Detta tyder på att utetemperaturen avgör hur mycket temperaturen potentiellt kan variera inne i röret men att svängningarna avtar med transportsträckan in i röret.

Den 7:e mars visar sensorerna från mätpunkt A till D: 12 °C, 5,5 °C, 4,7 °C till 4,6 °C vilket visar att temperaturen under denna tidpunkt succesivt sjunker med rörets längd. Detta tyder på att röret har en kylande effekt där längre transportsträcka genererar en större kyleffekt. Plockas dock mätdata ut från exempelvis den 2:a mars går temperaturen från mätpunkt A till D: 8,5 °C, 5,5 °C, 6,4 °C till 6,5 °C. Här sänks först temperaturen för att sedan höjas någon grad längre in i röret. Att mätpunkt B ibland antar en lägre temperatur än mätpunkt C och D kan vara till följd av att luften står still. Om luften står still i mätpunkt B, alternativt antar en väldigt låg hastighet, kommer luften hinna utbyta mycket värme med marken och därav anta i princip samma temperatur som marken. Troligt är därför att många av de uppmätta värdena representerar markens temperatur snarare än hur luftens temperatur ändras vid ett konstant högre flöde. Om luftflödet är högt under en längre tid bör mätpunkt B anta en högre temperatur än mätpunkt C och D förutsatt att uteluften antar en högre temperatur relativt markens temperatur. Därefter bör lufttemperaturen succesivt anta värden närmre markens temperatur vid längre transport inne i röret vilket inte är fallet under denna mätperiod. Detta tyder på att luften antar låga hastigheter i röret och att begränsat värmeutbyte sker i röret. En annan förklaring kan vara att marken i mätpunkt B är kallare än i mätpunkt C och D som kan påverkas av husets avgivna värme. Marktemperaturen kan vara högre närmre huset vilket kan orsaka temperaturen i röret att stiga aningen i slutet av röret. Dock tyder detta på att marken antar olika temperatur olika dagar då temperaturen i mätpunkt D varierar mellan 3,5–7 °C. En förklaring kan därför vara att orsaken till de varierande förhållandena mellan mätpunkterna är en kombination av markens olika temperatur i förhållande till villans placering i kombination med varierande luftflöde och utetemperatur.

Det är rimligt att mönstret i mät punkt C och D är mer lika än för A och B eftersom de ligger förhållandevis nära i röret. Vad som dock är svårt att förklara är att temperaturskillnaden mellan mät punkt A och B är hög och sedan inte skiljer avsevärt mycket längre in i röret. Resultatet med avseende på de små temperaturskillnaderna mellan mät punkt B och mät punkt D ifrågasätter funktionen av markröret och om självdrag är optimalt vid denna typ av system. Då nästan ingen ytterligare temperaturändring sker tyder det på att luftflödet är för lågt för rörets dimension vilket även bekräftas av mätningarna från tabell 4.1 och 4.2. Som intervjupersonen från Totalinstallation AB nämner i bilaga C kan självdragssystem inte garantera ett konstant luftflöde vilket är en förutsättning för att ett gynnsamt värmeutbyte ska kunna ske med marken. Detta linjerar med slutsatsen från Ho Lee och Strand (2007) att det är osannolikt att markförlagd ventilation kan ersätta ett vanligt ventilationssystem men att det kan vara till stor nytta att komplettera en byggnad med detta system för att spara energi. Dock finns fall som exempelvis Lagggarbergs skola som nyttjar självdragsprincipen. I Lagggarbergs skola regleras temperaturen med 800 meter långa plaströr kopplade till tilluftskanalen och värms ytterligare via radiatorer för att luften ska vara behaglig och anpassad efter standarden för inomhusklimat innan luften släpps in i byggnaden. I denna fallstudie fungerar självdragsprincipen men lösningen skiljer sig från fältstudien då det inte finns 800 meter långa plaströr utan luften tas direkt in i villans ventilationssystem i stället för att värmas ytterligare med radiatorer. Dock kan längden på plaströren i Lagggarbergs skola ifrågasättas med avseende på resultatet från Ho Lee och Strand (2007) och Li m.fl (2019) där rören inte behöver vara längre än 33m respektive 23 m för effektiv värmeöverföring. I studien av Jakhar m.fl. (2014) som diskuterar nytta med solvärmekanaler visar mätningarna att 83–85% av luftens temperaturökning sker de första 34 meterna vilket ifrågasätter om rören behöver vara längre än så för ett effektivt värmeutbyte. Vad som är värt att nämna är att alla fall som studerats använt olika rördimensioner, luftflöden och är placerade i olika klimat vilket kan ha en avgörande roll för systemets prestanda och kan därför komplicera jämförelsen mellan dessa fall. Oavsett finns ingen studie som uppvisat liknande resultat som denna fältstudie där majoriteten av värmeutbyte sker de första 0–2 meterna in i röret.



Figur 4.7 - Diagram över temperaturskillnaden mellan sensorerna "A" och "D". Negativa värden visar att en temperaturökning har skett och när grafen antar positiva värden har en temperaturminskning skett genom röret.

Observationer figur 4.7

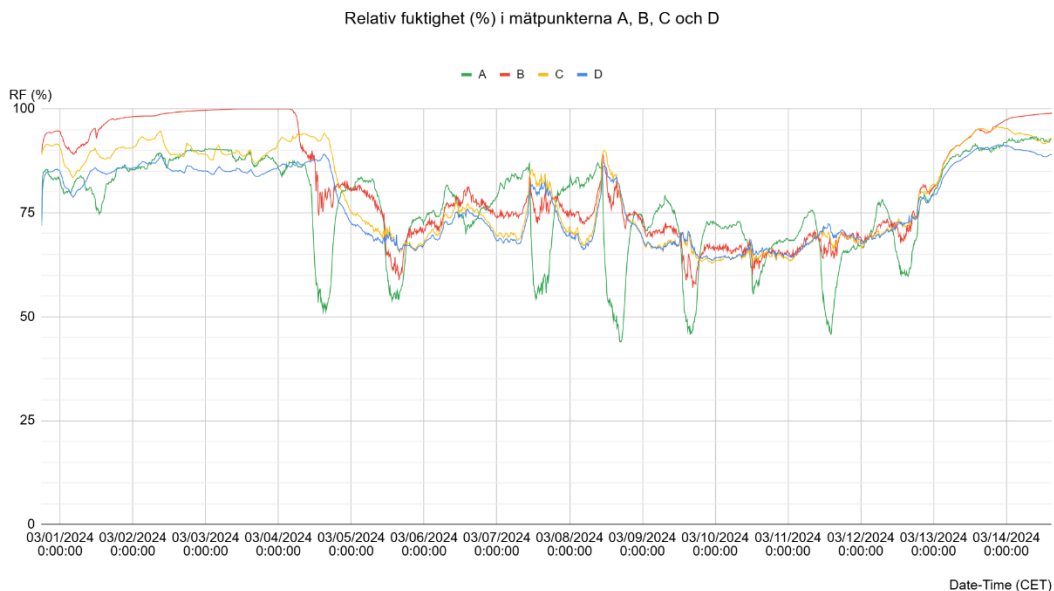
Som figur 4.7 visar finns skillnader i inlopps- och utloppstemperatur vid mätpunkt A och D över hela mätperioden. Som högst är temperaturskillnaden cirka 12 °C den 8:e mars mellan inlopps och utloppstemperatur där det skett en temperatursänkning, luften har alltså förkylts från 17 °C till 5 °C. För de delar av grafen som antar positiva värden sker en temperatursänkning relativt mätdata från mätpunkt A. De delar av grafen som antar negativa värden representerar de mätpunkter där en temperaturökning har skett. Vid jämförelse av temperaturökning respektive temperatursänkning visar diagram 4.7 att nedkylningspotentialen är större i systemet under just denna mätperiod. Den maximala temperaturökningen sker den 8:e mars där utloppstemperaturen i punkt D är cirka 5 °C varmare än inloppstemperaturen i punkt A. För dygnet 1: a mars t.o.m. 3:e mars samt 13:e mars är skillnaden mellan mätpunkt A och D nära noll.

Diskussion figur 4.7

Att det finns en temperaturskillnad mellan punkt A och D tyder på att röret har en effekt på passerande utomhusluft. Beroende på utomhusklimatet och tid på dygnet agerar marken antingen kylande eller värmande där temperaturökningen sker under kallare perioder utomhus samt under nätterna då en tydlig sänkning i svängningen kan identifieras i diagrammet vid dessa tidpunkter. De första tre dyggen antar grafen värden nära noll vilket tyder på att väldigt lite värmeutbyte sker i röret under denna period. Detta kan bero på att utetemperaturen är relativt likvärdig marktemperaturen dessa dygn vilket resulterar i att luftens temperatur i röret inte ändras markant. Figur 4.6 visar att de avvikande första tre dyggen erhåller en högre utloppstemperatur i jämförelse med resterande dygn. Trots den lägre utetemperaturen som presenteras i figur 4.2 under denna period tyder den högre utloppstemperaturen på ett mindre effektivt värmeutbyte i jämförelse med de dagarna där utetemperaturen varierar mer. Högre utloppstemperatur

betyder därför nödvändigtvis inte att ett mer effektivt värmeutbyte sker. En förklaring till detta kan antingen vara att markens temperatur varierar i perioder och därav kan olika mycket värmeutbyte ske. Under denna period kan soil thermal saturation ha uppstått i jorden som ett resultat av tidigare värmeutbyte vilket försämrar värmeutbytet. Detta är dock svårt att bekräfta eftersom mätdata från tidigare period än 1: a mars ej erhålls. Dessutom utförs mätningarna inte direkt i marken. En annan förklaring till den svaga temperaturdifferensen dessa dygn kan bero på ett lågt luftflöde.

En temperatursänkning i röret sker när grafen antar positiva värden vilket i detta fall är övervägande under dagtid. I en undersökning av Belloufi m.fl. (2022) framgick av mätningarna att det är mycket mer framgångsrikt att nyttja markrör för nedkylning snarare än för uppvärmning vilket även mätdata från fältundersökningen bekräftar. Anledningen till att det är mycket lättare att kyla luften beror på den naturliga nedkylning av uteluft som sker under natten enligt Belloufi m.fl. (2022). Även Ho Lee och Strand (2007) kommer fram till att systemet har större potential med avseende på nedkylningskapacitet. Då majoriteten av mätdata från fältundersökningen antar positiva värden visar detta att systemet presterar bättre med avseende på nedkylning snarare än uppvärmning. Enligt mätdata verkar effekten av röret vara som störst dagtid när utetemperaturen är som högst eftersom temperaturdifferenstopparna linjerar med topparna i mätpunkt A enligt figur 4.3. Skillnaden i uppvärmnings- och nedkylningskapacitet i fältstudien kan dock vara missvisande eftersom uteluften under majoriteten av mätperioden antar en varmare temperatur än marken vilket medför att markrören agerar nedkylande snarare än uppvärmmande. För att säkert fastställa systemets nedkylningskapacitet och uppvärmningskapacitet krävs mätningar över längre perioder, helst årliga mätningar för att undersöka hur systemet agerar i kallare klimat. Det kan vara relevant att beräkna hur stor andel av tiden röret har en värmande effekt respektive kylande effekt under ett år för att få en tydlig bild av hur systemet presterar. De mer omfattande mätningarna skulle kunna användas för att göra beräkningar av hur mycket energibesparing systemet kan göra.



Figur 4.8 - Sammanställande diagram över variationer i fukthalt i de fyra mätpunkterna i röret över mätperioden 01/03–2024 t.o.m. 14/03–2024. De olika färgerna representerar de fyra sensorerna som satts upp vid mättillfället.

Observationer figur 4.8

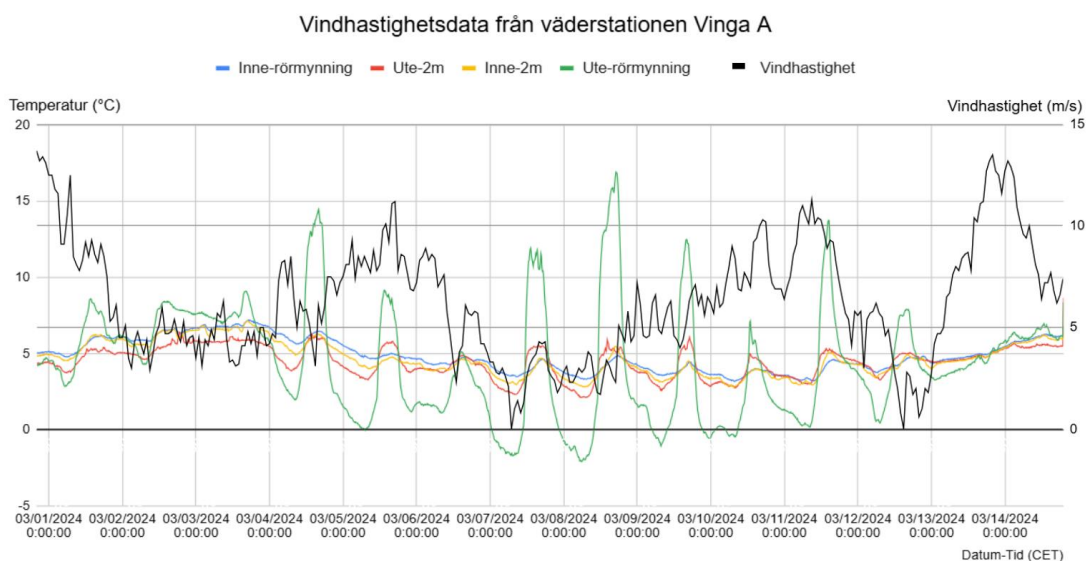
Den relativa fukten mättes i alla fyra mätpunkter under mätperioden och redovisas i figur 4.8. Övergripande är den relativa fuktigheten hög över hela mätperioden och varierar mellan cirka 50–100%. Mätningen visar att under de första fyra dyggen är den relativa fuktigheten mycket hög i röret, speciellt vid mätpunkt B där kondens uppstår över en period då RF är 100%. Generellt sett är den relativa fuktigheten hög i röret och ofta högre än vid mätpunkt A dagtid, den relativa fuktigheten ökar alltså inne i röret. Tydligast dalar kan identifieras vid den yttre rörmynningen som genomgående över dyggen 3:e mars t.o.m. 13:e mars antar ett lägre värde. Vad som sedan sker på vägen genom röret varierar över dyggen. Bortsett från det sista dygnet stiger RF markant två meter in i röret vid mätpunkt B för att sedan beroende på dygnet ytterligare höjas eller alternativt sänkas. För perioden mellan 3:e mars t.o.m. 13:e mars identifieras ett mönster där RF sjunker majoriteten av tiden efter att den passerat mätpunkt B. Den relativa fuktigheten stabiliseras alltså aningen under denna period i förhållande till uteklimatet men erhåller fortfarande en relativt hög RF. För de fyra första dyggen samt det sista dygnet antar mätpunkt D en lägre RF än vad mätpunkt A gör. Detta kan även identifieras nattetid då RF utomhus ökar och RF i röret sjunker.

Diskussion figur 4.8

Vad som kan konstateras är att det periodiska mönstret hos den relativa fuktigheten avviker på liknande sätt som temperaturmätningarna i röret visar i figur 4.1 vilket tyder på att fukthalten i rören är starkt beroende av uteklimatet. Skillnaden i vad som sker genom röret under olika dygn kan bero på det varierande uteklimatet i kombination med varierande luftflöde i röret.

Då den relativa fuktigheten genomgående är hög genom hela mätperioden i alla fyra mätpunkter och i perioder är högre än 75% finns potentiell risk för mikrobiell påväxt i röret. Detta beror på att temperaturen antar gynnsamma värden för mögeltillväxt (0,1-40 °C) samtidigt som det förekommer hög relativ fuktighet i röret. Påväxten kan orsakas av att pollen, smuts eller organiska material tränger in i röret och kan i sin tur orsaka att sporer och toxiner förs in i byggnaden med tilluften. Skulle emissioner från mikrobiell påväxt tränga in i byggnaden kan det medföra besvär för brukarna och utgöra en hälsorisk. Sannolikheten att detta sker är dock låg eftersom systemet är väl utformat med tillgång till dräneringsmöjligheter och en skyddande huv med filter för att undvika att smuts och pollen tränger in i rören. Vid korrekt och regelbunden rengöring bör denna problematik kunna elimineras.

Mätdata från figur 4.8 visar på att luften vid den inre rörmynningen har en hög relativ fuktighet men vad som bör understrykas är att dessa mätningar inte säger särskilt mycket om inneklimatet i villan. Detta beror på att flödena som uppmättes momentant på plats är låga vilket visas i tabell 4.1 och 4.2. Samtliga mätpunkter har liknande variationsmönster i den relativa fuktigheten och ett mönster kan identifieras där mätpunkterna B, C och D följer variationerna i mätpunkt A. Detta kan vara en indikator på att det finns ett flöde i röret och att luften inte är stillastående som en del av temperaturmätningarna indikerar.



Figur 4.9 - Sammanställande diagram som visar sensorernas uppmätta temperatur mot klimatdata från väderstationen Vinga A under mätperioden 01/03–2024 t.o.m. 14/03–2024. Klimatdata avser vindhastighet och presenteras som den svarta grafen i diagrammet.

Observationer figur 4.9

Som figur 4.9 visar är klimatet i Torslanda blåsigt och varierande vilket kan orsaka varierande flöde hastighet i röret. Dock ses inga tydliga samband mellan vindhastighet och rörtemperatur. I de partier vindhastigheten är hög finns både fall där temperaturen i mät punkt A antar höga och låga värden.

Diskussion figur 4.9

Att det finns partier där vindhastigheten är hög men att temperaturen i mät punkt A varierar tyder på att det inte finns en tydlig koppling mellan inloppstemperatur och vindhastighet i detta system under mätperioden. Det vaga sambandet är rimligt eftersom det kan blåsa både under varma och kalla dagar och att inloppstemperaturen verkar vara mer beroende av utetemperatur än vindhastighet. Vad som dock är intressant är att kolla på hur temperaturen ändras i röret beroende på om det blåser mycket eller lite. Då systemet bygger på självdrag varierar luftflödet och det skulle potentiellt kunna finnas en koppling mellan vindhastighet och luftflöde i röret. Eftersom endast momentana mätningar har genomförts av luftflödet är det svårt att fastslå om dessa har en koppling. Då luftflödet är en avgörande parameter för systemets prestanda bör värmeutbytet vara som störst de dagar då vinden orsakar mest gynnsam lufthastighet för rörets dimension. Den dag då störst temperaturändring skett i röret är den 8:e mars enligt figur 4.7 vilket även är den dagen som högst utetemperatur har uppnåtts. I diagram 4.9 är vindhastigheten relativt låg den 8:e mars i jämförelse med andra dagar där temperaturskillnaden är lägre. Detta tyder på att utetemperaturen har ett dominerande inflytande på vad som sker i röret snarare än vinden. Att det är otydliga samband mellan vad som sker i markröret och vindhastigheten kan även vara till följd av otätheter i byggnaden. Det finns en potentiell möjlighet till att vindhastigheten påverkar flödet i röret men att det är svårt att identifiera om en stor andel luft tas in via otätheter. Detta kan ge en missvisande bild av huruvida rörets prestanda påverkas av vinden.

4.2.1 Felkällor

Felkällor som kan ha påverkat resultatet är mätosäkerheter i mätutrustningen. Sensorerna har en mätosäkerhet på $\pm 0,2$ °C, $\pm 2,5\%$ RF vilket är relativt små marginaler. Då temperaturvariationerna i röret är små under vissa delar av mätperioden kan mätosäkerheten ge osäkra värden som lett till felaktiga antaganden. Dock är mätosäkerheten relativt liten i förhållande till temperaturvariationerna och bör inte påverka resultatet i stort. Mätosäkerhet i flödesstosen är även en potentiell felkälla som påverkat resultatet vid mätning av luftflödet. Då stosen inte registrerar flöden under 1,5 l/s finns en risk att värden nära det registrerats som 0. Dessutom kan resultaten variera $\pm 0,5$ l/s.

Vid luftflödesmätningar med varmtrådsanemometern finns en risk att ostadig mätriktning påverkat resultatet. Vid fläktarna var det begränsad åtkomst vilket kan ha resulterat i att flödesmätningen inte skett helt vinkelrätt mot fläktarna eller att flödesstosen inte placerats helt korrekt över mätpunkterna. För att inte ge missvisande exakta mätvärden presenteras därför lufthastighetsmätningarna i de intervall som uppmätts under mättillfället i stället för ett enda värde.

Sensor B och C som fördes in 2 meter i röret kan ha gett missvisande mätdata eftersom det finns en risk att sensorn varit i direktkontakt med rörets vägg. Detta är svårt att bekräfta då det inte är möjligt att se sensorns exakta position 2 meter in i röret. Detta skulle bland annat kunnat påverka resultatet på den uppmätta relativa fuktigheten eftersom det kan ha ansamlats vätska i sensorns mätpunkt som i sin tur har visat på kondens i röret. Temperaturen kan även ha blivit missvisande i dessa punkter om rörets vägg antagit en annan temperatur än luften. Detta kan ha resulterat i att temperaturen visat lägre värden i punkterna B och C och därmed gett missvisande temperaturförändringar i röret.

Sladden till sensorerna B och C virades in i ståltråd för att ge stadga vid införandet i röret. Då stål har en hög värmeledningsförmåga skulle detta potentiellt påverkat resultatet i dessa punkter. Dock är inte ståltråden i kontakt med själva mätpunkten på sensorn och bedöms därför inte ha påverkat resultatet avsevärt.

Begränsningar i mättid begränsar validiteten i resultatet. För att bekräfta de mönster som identifierats ger en längre mätperiod ett bredare underlag och minskar risken för korta avvikande periodspecifika mönster. Optimalt hade varit att genomföra mätningar över ett år eller längre för att se variationsmönstret över året och inte endast över en period på två veckor i mars. De slutsatser som dras från resultatet kan endast säkert hänvisas till denna mätperiod och inte till system generellt i svenskt klimat.

4.3 Sammanställning av intervjustudie

Nedan presenteras en sammanfattning av intervjupersonernas svar på frågorna som ställts i intervjuerna. För mer omfattande sammanfattningar av varje intervju se bilaga A, B och C.

Vad är det huvudsakliga syftet med denna typ av installation?

Genom intervjustudien framkommer att professionella i branschen kan ha olika fokus på vad målet med installationen av markförlagda rör är. Intervjupersonen från Uponor anger att installationens huvudsakliga syfte är att spara utrymme i byggnaden medan intervjupersonen från ByDemand anger att installationens huvudsakliga syfte är att göra energibesparingar. Intervjupersonen från Totalinstallation AB anger att en kombination av energibesparing och platsbesparing är det huvudsakliga syftet med installationen för att kombinera fördelarna.

Har det gjorts beräkningar och/ eller modelleringar av systemet med avseende på energibesparingsmöjligheter? Om så är fallet, vilket typ av program har använts och vilka parametrar beaktas i indata?

Vid simulering och modellering av energiförbrukning använder företagen olika program såsom IDA ICE, Revit, AutoCAD, egna program/indatafiler i Excel, VVSWIN och MagiCad för AutoCad i samverkan med rörtillverkarens dimensioneringstabeller och isoleringsprogrammet Paroc calculus i samverkan med energiberäkningsverktyget VIP Energy.

Intervjupersonerna på ByDemand och Uponor har inte delat med sig av fullständiga beräkningar och simuleringar eller formler och räknesätt. I de fall där beräkningar gjorts kan det vara värt att ifrågasätta tillförlitligheten på använda värden och antaganden eftersom inga specifika värden eller formler har tillhandahållits vid presentation av energibesparingar. Vad som även ifrågasätter huruvida den potentiella energibesparingen är gynnsam för byggnaden är att intervjupersonen från Uponor betraktar energibesparing som ett plus. Intervjupersonen från Totalinstallation AB visade och förklarade de energiberäkningsprogram som används på företagets arbetsplats samt vilka parametrar som avgör dimensionering och energibesparing i systemet. Enligt intervjupersonen från Totalinstallation AB baseras dimensioneringen utifrån ett beräknat värde på byggnadens tilluftsbehov. De program som används är *VVSWIN* och *MagiCad* för AutoCad i samverkan med tillverkarens dimensioneringstabeller och *Paroc calculus* tillsammans med energiberäkningsverktyget *VIP Energy* som genererar förslag på passande dimensionering och utformning beroende på omgivningens förutsättningar och systemets syfte. Energibesparingen uppskattas genom att jämföra skillnaden i tilluftstemperaturen efter förvärmning respektive förkylning av luften innan den passerar tillhörande hybridkomponent. Beroende på hur mycket luften värmts eller kylts behöver inte hybridkomponenten arbeta lika hårt och därmed görs en energibesparing. Dock har inga uppföljningar gjorts av systemets prestanda efter montering. Indata som påverkar utfallet är bland annat rörlängd, jordtemperatur och luftflöde.

Hur har ni bedömt att installationen är gynnsam för byggnaden?

För att avgöra huruvida systemet är gynnsamt för byggnaden anger intervjupersonerna att systemets prestanda baseras på egna beräkningar och simuleringar. Intervjupersonen från ByDemand anger att möjlighet till energibesparingar värderas högre medan intervjupersonen från Uponor anger att möjlighet till utrymmesbesparingar värderas högre. Baserat på resultatet av intervjustudien verkar olika företag ha olika syfte med installationen och bedömningen i hur gynnsamt ett system är och vilka för- och nackdelar det egentligen medför är i vissa fall oklart.

Anser ni att fukt är en problematik? Hur kan det åtgärdas och/ eller minimeras?

Utifrån intervjupersonernas svar verkar inte fukt vara en risk i denna typ av system så länge rören rengörs regelbundet och utformas med fall från byggnaden med dräneringsmöjligheter och filteranordning.

5 Diskussion om applicerbarhet på svenska marknaden

I detta kapitel diskuteras resultatet från litteraturstudien utifrån hur EAHE-system kan anpassas för att vara gynnsamt i svenskt klimat. Problematik kring systemet behandlas och lösningar presenteras och diskuteras. I kapitlet diskuteras hur systemet kan appliceras i den svenska byggbranschen med hänsyn till beräknings- och modelleringsmöjligheter.

5.1 Anpassningsmöjligheter av EAHE-system för svenskt klimat

För att ett EAHE-system ska passa byggnader i ett svenskt klimat kan vissa val och justeringar behöva genomföras. Vad som är speciellt med det svenska klimatet är att det finns stora variationer i utetemperaturen både över landet och över året. För att systemet ska vara gynnsamt för svenska byggnader bör därför platsspecifika anpassningar göras vid installation. För att optimera funktionen av systemet kan några parametrar justeras som bland annat rörkonfiguration, driftläge, längd, utformning, med flera. Ho Lee och Strand (2007) visar att en anpassad design av termitventilation kan spara mer än 50% av den totala kylbelastningen men att det beror på jordens tillstånd och vädret. Även Lagggarbergs skola gör en energibesparing på cirka 55% genom att luften först har passerat de markförlagda rören. Dock kan trovärdigheten i dessa siffror ifrågasättas eftersom det saknas dokumentation och uppföljning av specifika indata och resultat.

Utöver energibesparingsmöjligheter visar resultatet från intervjustudien att platsbesparing inomhus är en möjlighet med markförlagda rör. Eftersom stora delar av rörsystemet läggs under marken krävs inte lika stora schaktytor inne vilket ger möjlighet till fler brukbara kvadratmeter. Markförlagd ventilation kan även vara en potentiell lösning för K-märkta hus där installation av schakt inte är möjlig.

5.1.1 Potential med avseende på kyl- och värmeeffekt

Det är vanligt att EAHE-system utformas efter att antingen ha maximal kylande eller värmande effekt. Eftersom svenskt klimat kräver båda delarna kan det potentiellt påverka prestandan i systemet. Att använda endast ett driftläge har förefallit mer fördelaktigt då målet ofta är att komplettera och optimera funktionen av ett aktivt ventilationssystem. Dock finns fall där båda driftlägen är aktiva som har visat positiva resultat vilket visar på att systemet är passande för det svenska varierande klimatet.

Som studien genomförd av Ho Lee & Strand (2007) visar är det mer gynnsamt att nyttja EAHE-system för nedkylning snarare än uppvärmning. Även Belloufi m.fl. (2022) visar på detta. Med avseende på resultatet från fältstudien visar EAHE-systemet på en högre nedkylningskapacitet än uppvärmningskapacitet. Vad som dock är värt att poängtera är att de flesta studier och undersökningar som gjorts har utforskat denna teknologi i varma klimat vilket kan ge en missvisande bild av systemets nedkylningskapacitet. Fältstudien genomfördes i mars vilket är en relativt kall månad. Under mätperioden uppmättes varma temperaturer i större utsträckning än kalla temperaturer. Därför kan resultaten från fältstudien visa på en bättre nedkylningsförmåga trots att marken potentiellt kan generera

en likvärdig uppvärmningskapacitet. Detta kan även vara fallet i de internationella studier som gjorts då många av dessa länder är varma och målet med undersökningen ofta är att utreda huruvida systemet kan förkyla varm luft som ska in i byggnaden. Detta tyder på att det krävs mer forskning kring ämnet och att mätningar behöver göras över årliga perioder i kalla klimat. Dock finns studier där tester har gjorts i kalla klimat bland annat av Li m.fl. (2019) som visar på att de markförlagda rören tillförde 42,6% av den totala värmetillförseln. Något som även påvisar energibesparingsmöjligheter med att förvärma luften är genom simulering i isoleringsprogrammet Paroc calculus i samverkan med energiberäkningsverktyget VIP Energy som intervjupersonen från Totalinstallation AB visade. Dock krävs mer dokumentation och uppföljning för att helt säkert kunna avgöra nyttan med denna typ av system i kalla klimat. Mycket tyder på att störst värmeöverföring kan ske när utetemperaturen skiljer sig från marktemperaturen vilket kan innebära att EAHE-system kan prestera sämre i klimat med en utetemperatur nära marktemperatur. Detta visar även fältundersökningen där lägst skillnad mellan inlopps- och utloppstemperatur sker när utetemperaturen erhåller en relativt jämn temperatur runt 3–7 °C. Dock sker mätningen endast under två veckor och för att säkert kunna dra slutsatser kring detta krävs längre och mer omfattande mätundersökningar.

5.1.2 Val av hybridsystem

Baserat på studier av Belloufi m.fl (2022) och Ho Lee och Strand (2007) har det konstaterats att ett konstant och relativt lågt flöde är avgörande för prestationen i EAHE-systemet vilket även styrks av fältstudien. Detta visar på att oavsett vilket klimat ett EAHE-system konstrueras i bör det finnas ett fast konstant flöde. Genom att koppla ett EAHE-system till någon typ av hybridkomponent med ett mekaniskt flöde kan riskerna med självdragsprincipen minskas som kan medföra underventilerade byggnader. Detta kan bli problematiskt speciellt i större byggnader som skolor och sjukhus där kraven på ventilation är höga.

Som Ho Lee och Strand (2007) även nämner är det osannolikt att ett EAHE-system helt och hållet kan ersätta ett vanligt ventilationssystem och därför kan det vara nödvändigt att nyttja något typ av hybridsystem. De vanligaste hybridsystemen som används i dagsläget och eventuellt är applicerbara på svenska byggnader är EAHE med luftkonditionering, luftvärmepump, värmeväxlare och solfångare/solvärmekanaler.

EAHE med luftkonditionering förbättrar kylkapaciteten då luftkonditioneringens syfte är att förkyla luft. Då Sverige redan är ett relativt kallt land där nedkylning endast är relevant några få månader om året kan det ifrågasättas hur nödvändigt det är att använda denna typ av hybridsystem. Detta kan vara en lösning sommartid men markrören bör kompletteras med en annan hybridkomponent övriga delar av året för att uppnå bra effekt. Genom att kombinera AC och EAHE visade Misra m.fl. (2012) att en energibesparing på 18% kan uppnås om luften först förkyls i markrören innan den passerar luftkonditioneringen vilket kan vara gynnsamt för svenskt sommarklimat. Hybridsystemet kan vara relevant i byggnader som är i behov av nedkylning även under vintertid som exempelvis köpcentrum, kontor och vissa fabriker.

Hybridsystemet EAHE med luftvärmepump bygger på att markröerna förkyler eller förvärmar luften, beroende på årstid, innan luften når luftvärmepumpens kondensator. Till skillnad från luftkonditioneringsenheten kan en luftvärmepump ta vara på både förvärmad- och förkyld luft vilket genererar en energibesparing oavsett årstid vilket hade varit passande för det svenska varierande klimatet. Även sommartid bidrar hybridsystemet med ökad effektivitet då de markförlagda rören kan minska påfrestningen från de höga utomhustemperaturerna på luftvärmepumpen. En undersökning i Italien visade även på att genom att sammankoppla luftvärmepump med EAHE kan luftvärmepumpar nyttjas i kalla klimat som vanligtvis inte är kompatibla med denna typ av teknologi. Detta tyder på att denna lösning är applicerbar på många olika platser vilket är en potentiell kandidat för den svenska marknaden. Vid jämförelse mellan en fristående värmepump och ett hybridsystem visar mätningar på att hybridsystemet genererar en överlägset lägre energiförbrukning. Tidigare nämnda studier uppförda i USA har visat att hybridsystem kan generera årliga energibesparingar på mellan 9,6–13,8 %. Genom att använda en luftvärmepump i kombination med markrör finns god potential till energibesparingar. Då hybridsystemet ger en breddad applicerbarhet i olika miljöer ökar det även möjligheterna för att uppnå effekt av markröerna oavsett placering. Däremot är det fortfarande avgörande att konstruera ett väl anpassat EAHE-system för platsens specifika förutsättningar för att inte gå miste om potentiell energi.

Precis som luftvärmepumpen kan även EAHE med värmeväxlare generera energibesparingar på liknande sätt. Under vintern värms kall utomhusluft upp i de markförlagda rören för att därefter värmas och eventuellt fuktas ytterligare i värmeåtervinningsenheten innan luften tas in i byggnaden. Under sommaren kan värmeväxlaren i stället användas för att kyla och avfukta luften. I en undersökning i Kina av Li m.fl. (2019) gav denna typ av hybridsystem en genomsnittlig temperaturhöjning på 14 °C med en genomsnittlig värmeöverföringseffektivitet på 74 % då utomhustemperaturen var lägre än 0 °C. Detta visar på att ett EAHE-system med värmeväxlare skulle kunna vara passande för ett kallare svenskt klimat. Det som dock framgår är att tilluften eventuellt kan vara för torr när den släpps in i byggnaden och kan behöva fuktas upp vilket inte nämns i de studier som gjorts med luftvärmepumpar. Detta kan vara värt att ta hänsyn till vid valet av hybridsystem.

EAHE-system med solfångare eller solvärmekanaler kan bidra med en förbättrad uppvärmningskapacitet. I studien genomförd av Jakhar m.fl. (2014) visade resultatet att genom solvärmekanaler ökade uppvärmningskapaciteten 1200 kWh i EAHE-systemet. Dock var denna studie utförd i Indien där klimatet är mycket varmare och har fler soltimmar vilket kan påverka resultatet om solvärmekanaler skulle användas på liknande sätt i Sverige. Då solvärmekanaler bygger på att absorbera värme från solen kommer hybridsystemet troligtvis endast kunna nyttjas effektivt dagtid under sommaren i Sverige. Frågan är hur stort behov av ytterligare uppvärmd luft som finns under sommarhalvåret i Sverige och i kombination med att det kalla och mörka klimatet under vintern troligtvis inte ger någon effekt på solvärmekanalerna är det en opassande lösning för svenskt klimat. Dessutom krävs det en utanpåliggande installation av rör som tar upp plats på tomten. EAHE-system med solfångare hade kunnat vara ett potentiellt fungerande hybridsystem för Sverige i jämförelse med solvärmekanaler då en del byggnader redan nyttjar solfångare. Ett alternativ hade varit att komplettera dessa

byggnader med markförlagd ventilation för energibesparingsmöjligheter. Dock kvarstår problematiken med få soltimmar i Sverige majoriteten av året och kan ifrågasätta användbarheten med detta hybridsystem.

5.1.3 Val av rörkonfiguration

Svenska byggnader uppförs i olika omgivningar med olika förutsättningar vilket kan medföra att olika rörkonfigurationer medför störst effekt på olika platser. Den vanligaste rörtypen som används idag internationellt är horisontella raka rör där singel-pipe arrangemang är vanligare för små byggnader och multi-pipe är vanligare för större byggnader. Om ett stort EAHE-system ska konstrueras har Agrawal m.fl. (2015) bevisat att ett multi-pipe-system av typen grid-layout är mest fördelaktigt ur prestandasynpunkt. Raka rörkonfigurationer är vanligast eftersom installationen är lätt men kan vara svår att applicera om begränsad markyta finns i exempelvis tät bebyggelse. Ur energisynpunkt är skillnaden mellan U-shape, S-shape och straight-pipe minimal. Valet av konfiguration beror snarare på tillgänglig markyta. Den mest kostnadseffektiva lösningen är ring-pipe som läggs längs husets form vilket sparar urgrävningskostnader och kan också vara ett alternativ för svenska byggnader. Ring-pipe har även visat sig vara mer passande för små EAHE-system än för stora.

I en studie av Aydin m.fl. (2015) som jämförde snail-, slinky- och helix-pipes presterar snail-designen bäst med avseende på värmeöverföringsförmåga per längdenhet men helix presterar bäst med avseende på värmeöverföringsförmåga per areaenhet. Denna studie är dock utförd i Turkiet vilket kan påverka utfallet om detta skulle appliceras i svenskt klimat. Vad studien även visar är att ett vertikalt U-shape pipe arrangemang presterar bättre än både snail- och helix-konfigurationer med avseende på HTR. Den ökade prestationen beror på att vertikalt lagda rör, alternativt djupt placerade rör, inte påverkas av fluktuerande säsongsbaserade utetemperaturer. Då Sverige har ett fluktuerande säsongsbaserat uteklimat skulle därför vertikala rör kunna vara en lösning för optimal prestanda i rören, alternativt ett djupt förlagt rör där marken håller en stabilare temperatur och inte påverkas lika mycket av uteklimatet. Vid utformning av djupt förlagda rör ökar dock risken för att PVC-rör krossas av omgivande stenar och ökat tryck vilket kan innebära att andra rörmaterial som stål eller koppar bör användas i dessa typer av konfigurationer. Materialvalet har dock ingen större påverkan på värmeöverföringen mellan jord och rör som bland annat Singh m.fl. (2017) visat i sin studie.

Single-layered pipes är i dagsläget vanligare än multi-layered pipes. Vid användning av multi-layered pipes ökar risken för att soil thermal saturation uppstår vilket minskar effektiviteten av EAHE-systemet. Dock visar studien av Jesus m.fl. (2012) att samma mängd rör men fördelat över flera lager resulterar i ett aningen effektivare EAHE-system med en belastningsminskning på 3–6% om systemet är kopplad till en värmväxlare. Genom en multi-pipe konfiguration kan alltså prestandan förbättras samtidigt som det sparar markyta vilket kan vara fördelaktigt om markförlagda rör ska användas i tät bebyggelse. Dock är det viktigt att tillräckligt vertikalt avstånd hålls mellan rören för att undvika soil thermal saturation, där Jesus m.fl. (2012) visar att 1,5 meter är det optimala vertikala avståndet för multi-layered pipes med värmväxlare. En numerisk

undersökning gjord i Brasilien visade att en ökning av antalet rör genom multi-layerd pipes, över samma markyta, gav en ökning i kylningseffekt på 73% och 115% i värmeeffekt på systemet (Rodrigues m.fl. 2015). Då en ökad värmeeffekt kan vara efterfrågat i svenskt klimat skulle multi-pipe konfigurationer kunna vara en lösning för att maximera värmeeffekten i rören. Frågan är dock om det är just att det är en multi-pipe konfiguration eller endast en ökning i antalet rör som medför ökningen i värmeeffekt. För att kunna besvara den frågan krävs en undersökning som jämför dessa fallen. De undersökningar som genomförts har gjorts i varma klimat vilket kan påverka utfallet om detta appliceras på svenskt klimat. Dock visar studien av Jesus m.fl. (2012) på en ökad värmeeffekt som är större än den ökade nedkylningseffekten trots det varma klimatet i Brasilien. Detta kan tyda på att denna lösning hade fungerat ännu bättre i Sverige eftersom svenskt klimat sällan uppnår samma temperaturer som i Brasilien.

5.1.4 Val av driftläge

I Sverige kan en potentiell problematik vara de årliga variationerna i klimatet vilket kan påverka valet av driftläge. I de flesta fall används både ett kylande- och ett värmande driftläge för att kunna hålla ett behagligt inomhusklimat året runt. Studier har visat att det är mer fördelaktigt att enbart använda ett driftläge men att ett kombinerat driftläge fungerar och gett goda resultat.

Vid valet av kontinuerligt eller periodiskt aktiva driftlägen har Mathur m.fl. (2014) visat att den kylande effekten har större potential i ett periodiskt baserat system i Indien. Den ökade potentialen beror på att jordens temperatur och kylande effekt ges utrymme för återhämtning under de perioder där EAHE-systemet är inaktivt. Oavsett klimat kan därför ett periodiskt system vara fördelaktigt eftersom det maximerar värmeöverföringen i de aktiva perioderna och minskar risken för soil thermal saturation. I fältundersökningen där systemet nyttjar självdrag kan det förekomma naturliga pauser när luftflödet stundtals är lägre, vilket ger jorden tid för återhämtning. Däremot kan det ej säkerställas att tillräcklig återhämtning ges eftersom periodernas längd inte regleras. Studien av Mathur m.fl. (2014) visade att en längre passiv period med cykler om 60 minuter aktivt/40 minuter passivt medförde större återhämtning i jorden i jämförelse med ett 60 minuter aktivt/20 minuter passivt system. Genom längre passiva perioder ökade alltså prestandan i de markförlagda rören. Vad som dock inte anges är i vilken grad effektiviteten ökade vilket kan ifrågasätta vilken skillnad ett periodiskt aktivt system egentligen medför.

Det kan vara av intresse att konstruera ett system där det finns möjlighet att både ta luft från markröret och direkt utifrån beroende på vilken luft som har mest gynnsam temperatur. Ett sådant system skulle således kunna använda den kallaste luften om byggnaden har ett kylbehov och vice versa. Detta skulle kunna vara en lösning för att maximera effekten av EAHE-system i svenskt klimat som varierar kraftigt över året. I fältstudien skulle denna lösning innebära att under de timmarna på dygnet, då utetemperaturen är högst, tas luft in direkt utifrån. Under nattetid då luften i markröret är varmast tas tilluften in från markröret i stället. Att kunna välja vilken luft som tas in baserat på dess temperatur kräver avancerad styrning men skulle kunna maximera

effekten av systemet. Huruvida detta är möjligt är oklart och skulle potentiellt kräva ett mer omfattande system med fler tillhörande komponenter.

5.1.5 Val av luftcirkulationsläge

Vid jämförelse av öppen och stängd slinga har undersökningar visat att den öppna slingan är bättre ur effektiviseringssynpunkt medan den stängda är bättre ur fuktsynpunkt. På vilket sätt fuktproblematik kan minskas framgår inte i rapporten om öppna och slutna slingor. En potentiell orsak till att stängda slingor anses bättre ur fuktsynpunkt är eftersom den återcirkulerande luften avger mindre kondens än uteluften. Eftersom fuktproblematiken kan förebyggas med korrekt utformade rör och skötsel bör inte nödvändigtvis en öppen slinga medföra en problematisk risk för fukt, vilket också nämns i intervjuerna. Det finns forskare som menar att en öppen slingan är att föredra då den bidrar med frisk luft till skillnad från en slutna slinga där luften cirkulerar. En risk med att nyttja stängda slingor är att brukarna öppnar fönster till följd av ett upplevt försämrat inneklimat. Då luft kommer in genom fönstren utan att förvärmas eller förkylas i den stängda slingan resulterar det i en högre energiförbrukning. Den stängda slingan får därför inte önskad effekt och den öppna slingan är att föredra då den bidrar med frisk luft och en högre effektivitet.

5.1.6 Dimensionering av luftflöde, längd, grundläggningsdjup och diameter

Olika studier kommer fram till att olika rörlängd är optimalt för olika EAHE-system. Belloufi m.fl. (2022) kommer fram till att 91% av temperatursänkningen sker under de första 33 meterna av rören. Jakhar m.fl. (2014) kommer fram till att 82–85% av luftens temperaturökning sker under de första 34 meterna i ett EAHE-system med efterföljande solvärmekanaler. Li m.fl. (2019) visar att under de första 23 meterna av röret skedde 88,5% av den totala temperaturökningen. I alla tre fall ser röruppsättningen olika ut med olika dimension och utformning vilket kan vara orsaken till att olika studier visar på att olika längd är mer eller mindre optimalt. I fallen med Belloufi m.fl. (2022) och Jakhar m.fl. (2014) sker undersökningarna i varmt klimat där båda studierna visar att majoriteten av värmeöverföringen sker de första 30 meterna. I studien som Li m.fl. (2019) genomförde var klimatet kallt och skiljer sig från övriga två studier eftersom det visar att en kortare rörlängd kan fungera då resultatet visade effektiv värmeöverföring de första 20 metrarna istället. Detta skulle kunna tyda på att lika långa rör inte är nödvändigt i kallt klimat för att dra nytta av jordens kapacitet. Som fältstudien visar sker den största värmeöverföringen inom 2 meter vilket dock kan vara missvisande på grund av undermåligt luftflöde i röret. För att säkert kunna fastslå om ett kallare klimat har en inverkan på behovet av rörets längd behöver en fältstudie som jämför detta sättas upp. Med avseende på svenskt klimat, som varierar över året, är frågan om ett längre eller kortare rör är mest fördelaktigt. Ho Lee och Strand (2007) visar i sin studie att ett djupt placerat, långt rör med låg luftfluthastighet och liten radie resulterar i lägre inloppstemperatur. Detta visar på att ett längre rör kan ge en bättre värmeöverföring men att det behöver fungera med övriga parametrar.

Då utformningen av EAHE-system är väldigt platsspecifikt är det viktigt att veta vilka krav som ställs på byggnaden och utefter det avgöra hur markrören ska utformas för att bemöta de kraven. Ett sätt att avgöra vilka dimensioner ett rör bör ha för att uppnå en viss skillnad i inlopps- och utloppstemperatur kan simuleringar göras i isoleringsprogrammet Paroc calculus i samverkan med energiberäkningsverktyget VIP Energy samt VVSWIN och MagiCAD för AutoCAD tillsammans med tillverkarens dimensioneringstabeller. Genom att ange indata kring platsen i form av exempelvis marktemperatur och medelårstemperatur i kombination med olika längd, djup och diameter kan en uppskattning ges av hur omgivning och utformning påverkar energibesparingen. Dock är nämnda program begränsade och tillåter inte andra rörkonfigurationer än straight-pipe vilket gör att en potentiellt bättre prestanda med exempelvis multi-layered pipes inte kan jämföras i programmet. Dessutom har inga uppföljningar gjorts efter installation i de fall där programmet använts som fullständigt validerar uppskattningen av simuleringen. I dagsläget är detta dock en bra lösning för att uppskatta effekten av markförlagd ventilation eftersom den vanligaste rörkonfigurationen är straight-pipe samt eftersom övriga modeller kan vara bristande eller komplicerade att applicera på den svenska marknaden då stor mängd indata krävs.

Med avseende på grundläggningsdjup bör röret vara så pass djupt placerat att det inte påverkas av uteluftens temperaturfluktuationer då markens uppgift är att er hålla en stabil temperatur. Som tidigare studier visat påverkas jordens temperatur markant av omgivande klimatförhållanden, solstrålning och utetemperatur 0–0,5 meter ner. Ett grundläggningsdjup större än det bör därför minimera påfrestningen på jorden. Då svenskt klimat varierar förhållandevis mycket över året kan ett djupare rörläggingsdjup vara fördelaktigt för att anpassa utformningen till svenska byggnader. På så sätt kan fluktuationerna i marken minskas och marken kan er hålla en jämnare temperatur. Dock finns även årliga variationer i marken vid djupare grundläggning än 0–0,5 meter och kan inte undvikas helt om en urgrävning ska genomföras som inte sträcker sig flera meter ner in i marken. Vad som också bör beaktas vid grundläggningsdjup är frostdjupet. Det kan vara fördelaktigt att placera röret djupare än frostdjupet för att minska risk för att markfrost påverkar systemets effektivitet. Dessutom kan ett för djupt placerat rör ställa högre krav på beständigheten i materialet då trycket kan bli stort på större djup och rören kan riskera att skadas av omgivande stenar. Detta gäller speciellt för PVC-rör men en lösning på detta kan vara noggrann dimensionering alternativt att använda metallrör i stället. Dock visar bristande dokumentation på svårigheter kring en exakt dimensionering. Att ta hänsyn till både prestanda och beständighet mot tryck kan försvåra installationen och användbarheten av röret. En potentiell lösning för att undvika den fluktuerande marktemperaturen nära markytan kan vara att isolera rören. En numerisk studie i México visade att genom att addera värmeisolering kring rören ökade värmeeffekten upp till 2 °C vintertid och 1,3 °C sommartid och kan därför vara ett alternativ till en förbättrad värme- och kyleffekt.

En ytterligare potentiell optimeringsåtgärd för anpassning till det svenska klimatet är införandet av flänsar och lameller i rörsystemet för att effektivisera värmeutbytet. Precis som Soares m.fl. (2021) nämner finns tre viktiga moment med avseende på termisk transport som bör beaktas vid utformningen av ett EAHE-system; konvektion respektive värmeöverföring mellan vätskan/gasen och insidan av röret, värmeledningsförmågan mellan insida och utsida rörvägg och slutligen värmeledningsförmågan samt värmeöverföringen mellan rörets utsida och omgivande jord/återfyllningsmaterial. Genom att införa flänsar utanför röret agerar dessa som värmespridare som maximerar värmeutbytet mellan rör och mark. För att ytterligare optimera värmeöverföringen i röret kan lameller integreras inne i röret för att maximera ytan som luften i röret kommer i kontakt med. På så sätt ökar värmeöverföringen eftersom luften som färdas i mitten av röret annars kan gå miste om kontakt med rörväggen där en stor del av värmeutbytet sker. Denna typ av effektiviseringsåtgärd har inte hittats i tidigare litteraturstudier eller undersökningar men kan potentiellt förbättra systemets prestanda. Dock krävs undersökningar som bekräftar detta.

5.2 Potentiella svårigheter kring systemet med förslag på förbättringsåtgärder

Radon i byggnader är ett problem som är aktuellt att diskutera när det kommer till markförlagda rör då radon finns naturligt i marken och är en gas som kan medföra hälsorisker. Problem skulle potentiellt kunna uppstå om rören är placerade i mark med högre radonhalt och om rören inte är radontäta. Då det finns radontäta rör att tillgå vid installation av markförlagda ventilationsrör och om OVK genomförs regelbundet bedöms inte radon vara ett problem men det är en viktig aspekt att ta hänsyn till för att inte få ett dåligt inomhusklimat.

Ett problem som är aktuellt och komplext är risken för mikrobiell påväxt/ fukt. För att inte fukt ska ansamlas i röret är det vanligt att röret placeras lutande bort från huset och med en brunn i lågpunkten för att dränera bort fukten. Det som potentiellt skulle kunna leda till problem är om smuts eller dylikt finns i röret samtidigt som temperatur och RF är gynnsamma för mikrobiell påväxt. Då RF är 100% sker kondensation i röret och fukt kan ansamlas. Om fukten fastnar i smuts kan det potentiellt leda till mikrobiell påväxt men detta förutsätter att organiskt material finns i röret samtidigt som det är en gynnsam temperatur en period. För att förhindra mikrobiell påväxt har beläggning med silverpartiklar använts. Vad som kan bli problematiskt med kemiska beläggningar är om silverpartiklarna släpper och förs in i byggnaden via luften. I de intervjuer som genomförts var det ingen av intervjupersonerna som uttryckte att fukt skulle vara problematiskt då detta togs upp. I intervjun med intervjupersonen på ByDemand togs det upp att filter kan användas för att förhindra att pollen tar sig in i röret och att rören årligen bör rengöras genom spolning. Det som framkommer i intervjuerna är att om systemet är rätt utformat och har en lutning med dränering i lågpunkten så anses fukt inte vara ett problem.

Normalt placeras luftintagskanalerna till en byggnad högt för att undvika luftföroreningar. Vid användning av markförlagda rör placeras intagshuven oftast i marknivå vilket ökar risken för förekomst av luftföroreningar i rörsystemet. Är röret placerat i närheten av en trafikerad väg blir det en aspekt att ta hänsyn till eftersom det kan ha en negativ inverkan på inneklimatet. För att undvika de potentiella medförda riskerna kan huven placeras högre alternativt att luften inte tas in direkt i byggnaden utan i stället ansluts i hybridsystem.

Soil thermal saturation är en potentiell problematik som finns kopplat till systemets effektivitet. Om systemet är konstant aktivt kan värmeutbytet mellan luften i röret och marken bli mindre effektivt då jorden ackumulerar värme från rörsystemet. Problemet kan undvikas eller begränsas genom att ha ett periodiskt aktivt system som ger jorden möjlighet till återhämtning. Det kan konstateras att ett längre rörsystem kan balansera ut effekten av soil thermal saturation men att det kräver en större markyta och kan därför vara svårare att applicera på alla byggnader. Djupare lagda rör kan medföra en kortare återhämtningstid i jorden och det blir därav viktigt att ha tillräckliga avstånd vid användning av multi-layered pipes. Liu m.fl. (2019) undersökte jordens återhämtningstid i olika djup. Djupen 3,0 m, 7,5 m och 13,5 m visade alla på en liknande återhämtningstid men tiden minskade med djupet. Då återhämtningstiden var liknande kan det tänkas att de djup som användes i studien nödvändigtvis inte har en avgörande inverkan på effekten av markröret utan rör på 3,0 meter har en liknande återhämtningstid som 13,5 meter.

Soil thermal saturation har i tidigare studier benämnts som en problematik i varmare klimat då jorden kan bli mättad på värme, från luften som passerar i rören, och det ger en minskad kyleffekt av systemet. I Sverige är det enbart ett fåtal månader under sommaren som når varmare temperaturer och där ett eventuellt kylbehov kan finnas. Därmed går det att ifrågasätta huruvida soil thermal saturation kan bli en problematik i svenskt klimat då det enbart borde vara under de varma månaderna som systemets prestanda påverkas negativt. Resterande tid av året borde inte jorden mättas på värme och vara i behov av återhämtning i samma grad. Viss mättnad kan fortfarande vara möjlig men den negativa inverkan som kan uppstå av soil thermal saturation borde inte vara lika utbredd i svenskt klimat som i varmare klimat där nedkylning är systemets primära funktion.

5.3 Applicerbarhet av beräkning och modellering på den svenska marknaden

5.3.1 Beräkning

De beräkningsmodeller som observerats och beskrivits i avsnitt 2.4 kräver mätdata från flera olika parametrar så som exempelvis temperatur och lufthastighet. De mätningar som gjorts i fältundersökningen anses inte tillräckliga i fråga om lufthastighet och luftflöde för att beräkningar med korrekt resultat ska kunna genomföras. Problematiken med att beräkna enligt beräkningsmodellen framtagen av Claesson och Dunand (1983) är att resultatet avser ett tvärsnitt av ett markförlagt rör. Det innebär att aspekter så som lufthastighet, luftflöde och längden av röret inte tagits hänsyn till. Då lufthastighet och

rörlängd visat sig vara faktorer som har stor inverkan på resultatet kan denna resultat från denna beräkningsmodell inte anses vara applicerbart. Problematiken med ekvation 2.8 av Jakhar m.fl. (2014) är att lufthastigheten är konstant på grund av en fläkt vilket medför att massflödes hastigheten är konstant. Vad som framkommer av mätningarna i systemet i Torslanda och enligt intervjupersonen på ByDemand som projekterat systemet finns inget konstant flöde och därav går denna modell ej att applicera på fältstudien för att få ett korrekt resultat. Liknande problematik finns för beräkningsmodellen framtagen av Li m.fl. (2019), för att få ett korrekt resultat behöver lufthastigheten mätas i flera punkter och massflödes hastigheten beräknas. Även ekvation 2.15 kräver ett konstant luftflöde och går därför heller inte att applicera på fältstudien. Ingen av de beräkningsmodeller som tagits fram i avsnitt 2.4 är applicerbar på de mätningar som gjorts då mätningarna enbart mätt temperatur och RF under 14 dagar och endast momentana mätningar av lufthastighet och luftflöde har genomförts.

Beräkningar på ett EAHE-system går att göra på olika sätt och med olika metoder. Enligt intervjupersonen på Uponor genomförs beräkningar av VVS-ingenjörer där EAHE-systemet betraktas som ett ventilationssystem placerat inomhus med syfte att spara plats. Således kan det antas att beräkningarna i första hand inte har med energi att göra eller eventuella energibesparingar kopplade till de markförlagda rören. Intervjupersonen på ByDemand berättar att de använder IDA ICE samt egna simuleringsprogram för att genomföra beräkningar där marken betraktas som en värmeväxlare. Hur detta genomförs och vilka formler som används vid beräkning är oklart. Syftet med systemet är enligt intervjupersonen på ByDemand att göra energibesparingar och således borde en beräkningsmetod användas som kan påvisa det. Då ingen insyn givits i hur dessa beräkningar genomförs är det inte möjligt att hävda att det finns en fungerande metod men inte heller att det inte finns. Om antaganden görs vid beräkningar blir osäkerheten i resultatet större och det har inte i någon studie som lästs eller i någon annan intervju presenterats en metod som visar på korrekta resultat gällande energibesparingar.

Enligt intervjupersonen på Totalinstallation AB genomförs beräkningar i samband med dimensionering och projektering av systemet. De använder program så som VVSWIN och MagiCAD för AutoCAD i samverkan med tillverkarens dimensioneringstabeller där beräkningar främst görs med bestämda luftflöden och lufthastighet och således kan de få fram lämplig dimension av rören. Med ytterligare indata så som rörmaterial, mediets temperatur och omgivande temperatur kan de således beräkna en grov uppskattning av sparad energi, detta görs i program så som isoleringsprogrammet Paroc calculus och VIP Energy. Det går att ifrågasätta hur pålitliga och korrekta beräkningar blir med denna metod med hänsyn till de många antaganden som görs. Ju fler antaganden som görs vid beräkningar desto mer generaliserat blir resultatet. Dessutom är metoden inte validerad. Görs antaganden kring faktorer som visat sig ha större betydelse för resultatet, så som rörlängd och utomhustemperatur, bör det ge ett mindre pålitligt resultat än om en metod används där antaganden inte görs. Mängden antaganden kan säkerligen variera från fall till fall och vara beroende av tidigare beräkningar som genomförts på EAHE-system placerade i liknande klimat.

Om programmen inte gör antaganden bör simuleringar i program likt IDA ICE i snitt ge en högre noggrannhet än generaliserande simuleringar. Modellering och beräkning går

till viss del in i varandra då mer korrekta beräkningsmodeller bör generera en mer korrekt modellering. För att en beräkningsmodell ska vara mer exakt behöver utomhustemperaturens förändringar över året tas i beaktning. För att beräkningar ska generera ett korrekt resultat och förutse hur mycket energi EAHE-systemet potentiellt kan spara behöver systemet använda specifika data samt ha kapaciteten att hantera dessa. Potentiellt skulle långtidsmätningar av ett EAHE-system kunna generera tillräcklig mängd data för att förutse systemets prestanda i det klimat det är placerat. Om mätningarna genomförs i södra Sverige skulle dessa troligtvis inte kunna förutse systemets prestanda i norra Sverige och vilken energibesparing som vore möjlig där. Det kan vara en lösning att utföra mätningar i system på olika platser i Sverige och kartlägga hur systemet presterar i olika klimat för att skapa en standardiserad metod för att genomföra beräkningar.

5.3.2 Modellering

Det finns flertalet svårigheter med att modellera och förutse resultatet av ett markförlagt ventilationssystem. Om systemet enbart ska modelleras för att få fram generella data och att syftet med systemet är luftkvalitet kan program likt IDA ICE användas, i enlighet med det som framkom under intervjuerna med intervjupersonerna på ByDemand och Uponor. Enligt intervjupersonen på Totalinstallation AB kan simuleringar göras i program likt IDA ICE och VIP Energy men detta kräver då en större mängd indata och anses komplicerat.

Det finns olika fördelar och nackdelar med de datadrivna modelleringsteknikerna presenterade i avsnitt 2.5. Artificiella neurala nätverk är en typ av datautvinningsalgoritm och fördelen med denna är att modellen kan appliceras för att förutse energikonsumtion och har använts för att förutse kyl- och värmeprestanda hos EAHE-system. Nackdelen med denna modell är likt många andra att indata består av många variabler. Det kan konstateras att en annan typ av datautvinningsalgoritm, stödvektormaskin, har presterat bättre än artificiella neurala nätverk. Oskarp logikmodell är ytterligare en typ av modell och är vanligare inom kontrollteori där modellen kunnat minska energikonsumtionen hos ett EAHE-system. Modellen kräver inte expertiskaper inom modellering för att kunna brukas och kan därför vara en tillgänglig lösning på den svenska marknaden. I en undersökning av Shamsavar, Bagherzadeh & Afrand (2021) jämfördes oskarp logikmodell med stödvektormaskin och artificiella neurala nätverk och resultatet visade att stödvektormaskinen gav mest korrekta resultat för att förutse årlig energiproduktion. Oskarp logiks modellering kan bli mer aktuell vid vidare modellering av EAHE-system. Nackdelen med denna typ av modell är att den kräver en stor mängd indata. Ytterligare typ av modell är fallbaserade resonemang. Nackdelen med denna typ av modell är att den behöver indata i form av tidigare liknande fall för att kunna visa på korrekta resultat. Modellen har använts för att förutsäga underhållskostnader hos ett EAHE-system men anses på grund av behovet av data från tidigare fall inte vara lika aktuell som oskarp logikmodell. Statistisk modellering har använts för att modellera ett EAHE-systems uppvärmningsprestanda. Nackdelen med den statistiska modellen är att resultatet är mer trovärdigt i linjära fall. Då EAHE-system har bland annat fluktuerande dygnstemperatur samt värme- och kylbehov kan denna typ av system anses vara icke-linjära och det gör att statistiska

modeller blir svåra att tillämpa på EAHE-system. Stokastisk modellering kan appliceras på EAHE-system då modellen kan anta slumpmässiga variabler. Genom att noggrant mäta inloppstemperaturen förbättras modellens förutsägbarhet jämfört med noggranna mätningar av värmeöverföringskoefficienten. Stokastisk modellering kan således vara aktuell för vidare modellering av EAHE-system.

Om modellen syftar till att ta fram specifika data krävs det att det finns tillgängliga mätdata från en längre period. Då många faktorer påverkar EAHE-systemets prestanda krävs stora mängder indata för att modellen ska bli så korrekt som möjligt. Om en eller flera faktorer bortses från blir resultatet mindre tillförlitligt. Modelleringar av markförlagda ventilationssystem genomförs idag i Sverige men av intervjuerna framkom ingen generell eller implementerad metod. I alla intervjuer nämns program likt IDA ICE kunna användas för modellering av markförlagd ventilation men det har inte presenterats ett enkelt sätt att genomföra det på. Avsaknaden av en standardiserad beräkningsmetod gör att det kan tänkas svårare att modellera systemet eftersom resultatet från beräkningsmodellen hade kunnat användas vid modellering av EAHE-system.

En slutsats som kan dras för samtliga datadrivna modelleringstekniker är att de inte är passande vid generalisering utan passar bättre för att modellera specifika system. Oavsett vilken typ av modell som används har alla datadrivna modeller mer eller mindre tydliga begränsningar som skapas utifrån osäkerheter i indata, yttre störningar och betydande antaganden i dynamiska systembeteenden (Ahmed m.fl. 2021).

6 Slutsats

Följande kapitel sammanställer slutsatser från rapportens resultat och diskussion. Kapitlet besvarar rapportens frågeställningar baserat på fältundersökningens mätdata, intervjustudie och litteraturstudie för att ge läsaren en tydlig bild av vilka slutsatser som kan dras av studien i helhet. Nedan beskrivs vilka möjligheter och svårigheter som finns hos systemet samt vad som är mer eller mindre optimalt för den svenska marknaden.

6.1 Är markförlagd ventilation gynnsam i svenska byggnader?

För att sammanfatta finns många parametrar att ta hänsyn till för att avgöra nyttan med markförlagd ventilation i svenska byggnader. Det är osannolikt att en byggnad som endast tillämpar termitinspirerade lösningar uppnår svenska standarder för inomhusklimat. Termitbon är komplexa konstruktioner med en mängd olika sammanflätade mekanismer vilket kan liknas vid en byggnad som kräver flera olika system som samarbetar för att leverera ett hälsosamt inomhusklimat. Det kan däremot vara gynnsamt att efterlikna vissa termitkonstruerade principer, som bland annat nyttjandet av markens värmekapacitet, och kombinera det med moderna tekniker.

För att få ut maximal effekt av markförlagd ventilation i byggnader i svenskt klimat bör systemet ha unika platsspecifika anpassningar i form av längd, dimension, lutning och konfiguration samt att det bör utformas som ett hybridsystem. Av de hybridsystem som presenterats i rapporten är EAHE med luftvärmepump eller värmeväxlare mest passande för svenskt klimat. Detta beror på att dessa hybridsystem kan ta vara på markens förmåga att både förkyla och förvärma luft under varma och kalla säsonger. Genom att tilluften förkyls och förvärms avlastas installationskomponenten och en energibesparing kan göras. Vad som kan konstateras är att ett EAHE-system med endast självdragsprincip kan vara otillräckligt för svensk standard. För att garantera en effektiv värmeöverföring med marken krävs ett konstant flöde vilket kan åstadkommas med fläktar.

Omgivande klimat har en avgörande roll för systemets prestanda och platsundersökningar, beräkningar och simuleringar bör genomföras för att åstadkomma optimal utformning. Den mest optimala systemutformningen för svenska byggnader med avseende på energibesparing är ett periodiskt aktivt, djupt placerat, multi-layered konfiguration med en öppen slinga. Detta baseras på tidigare litteraturstudier och undersökningar samt analys av vilka potentiella problem som kan påverka prestandan i svenskt varierande klimat.

6.2 Problematik och förslag på åtgärder

Fuktproblematik kan vara en potentiell risk vid nyttjandet av markförlagda rör då klimatet i de markförlagda rören kan bli varmt och fuktigt vilket ökar risken för mikrobiell påväxt. Om sporer och toxiner förs in i byggnaden via tilluften kan detta medföra en hälsorisk inomhus. Med regelbunden rengöring, tillgång till

filteranordningar, dräneringsmöjligheter och lutning från byggnaden bör fuktproblematiken vara minimal.

Sannolikheten att soil thermal saturation utgör en problematik i Sverige är liten eftersom utomhusluften är förhållandevis kall över året. Fenomenet kan däremot uppstå varma sommandagar vilket kan påverka effektiviteten av systemet. För att minimera risken för negativ påfrestning kan ett periodiskt aktivt driftläge användas som ger marken tid för återhämtning samt att vid användning av multi-layered pipes ha ett vertikalt avstånd på cirka 1,5 m.

Det varierande svenska uteklimatet kan försvåra optimeringen av systemet och en noggrann platspecifik rörutformning bör genomföras för att minimera klimatets inflytande på prestandan. För att minska risken för att omgivande klimat påverkar jordens temperatur kan ett större nedgrävningsdjup nyttjas för att erhålla en stabilare marktemperatur.

I dagsläget finns inga beräkningsmodeller som lätt går att applicera på systemet för att bedöma nyttan i ett markförlagt ventilationssystem. Detta beror på systemets komplexitet och dess många varierande parametrar. Dagens etablerade beräkningsmetoder genererar grova uppskattningar och vidare forskning krävs för att ta fram noggranna och precisa beräkningsmodeller som tar hänsyn till fler involverade parametrar. Med avseende på modellering finns förenklade modelleringsmetoder i program som IDA ICE, VIP Energy och Paroc calculus. Mer avancerade modeller kan tillhandahållas genom att ta fram precisare beräkningsmetoder alternativt nyttja insamlade data från liknande fall. Då den data som finns att tillhandahålla är bristande krävs fler mätundersökningar för att denna lösning ska kunna appliceras. Ahmed m.fl. (2021) drar slutsatsen att ingen datadriven modelleringsteknik är passande vid generalisering utan de är bättre för att modellera specifika system.

6.3 Fältundersökning

Mätningarna visar att markröret har en utjämnande effekt på uteluftens temperaturvariationer och att det sker en temperatursänkning i röret mellan inlopp och utlopp. Vad som däremot blir osäkert är huruvida denna temperatursänkning gynnar byggnaden eftersom uppmätta flöden i markröret varierar och därmed även effekten av rörens värmeöverföringsförmåga. Om luftflödet varierar och övriga platspecifika anpassningar och dimensioneringar är konstanta kan inte ett maximalt värmeutbyte garanteras.

Med avseende på det varierande luftflödet i kombination med den begränsade mättiden är det svårt att avgöra nyttan i det markförlagda systemet endast baserat på data från fältundersökningen.

7 Framtida forskning

Följande kapitel redovisar rekommendationer för framtida forskning och undersökningar. Kapitlet belyser de delar som behöver utvecklas vidare för att kunna påvisa nyttan av markförlagd ventilation i svenskt klimat.

Vid val av mest passande rörkonfiguration i svenskt klimat krävs ytterligare forskning som jämför samtliga konfigurationer. Detta för att undersöka hur dessa påverkar nyttan av systemet samt om det är mer lämpligt att använda en viss konfiguration.

För att tillgängliggöra beräkningsmetoder och modelleringstekniker som genererar pålitliga resultat för svenska byggkonsulter krävs ytterligare forskning samt implementering och validering av markförlagda system i redan befintliga simuleringsprogram.

För att kunna besvara frågorna hur sambandet ser ut mellan luftflöde och temperaturvariationer samt hur prestandan i ett system med självdrag beror av luftflödet behöver mätningar göras över längre tid. Vid en mer omfattande undersökning som mäter både temperatur, relativ fuktighet och luftflöde i röret över året ges en bättre inblick i hur säsongsbaserade variationer i klimatet påverkar systemets prestanda.

Resultatet från intervjustudien indikerar på att intervjupersonerna är oense om vad som bör prioriteras vid installation av markförlagd ventilation. För att systemet ska vara fullständigt applicerbart i den svenska byggbranschen med ett tydligt syfte krävs mer forskning och dokumentation kring nyttan av markförlagd ventilation.

Referenser

Agrawal, K., Misra, R., Agrawal, G., Bhardwaj, M. & Jamuwa, D. (2019). *Effect of different design aspects of pipe for earth air tunnel heat exchanger system: A state of art*. Översiktsartikel. Mechanical Engineering Departments, government Engineering Collage, Ajmer, Indien. <https://doi.org/10.1080/15435075.2019.1601096>

Ahmed, S. F., Saha, S., Debnath, J. C., Liu, G., Mofijur, M., Baniyounes A., Chowdhury S. M. E. K. & Vo, D. N. (2021). *Data-driven modelling techniques for earth-air heat exchangers to reduce energy consumption in buildings: a review*. Science and Math Program, Asian University for Women, Chattogram 4000, Bangladesh. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01288-7>.

Arbetsmiljöverket. (2023). *Allmänventilation*. <https://www.av.se/inomhusmiljo/luft-och-ventilation/allmanventilation/> Hämtad 2023-03-06

Aydin, M., Sisman, A., Gültekin, A. & Dehghan B. (2015). *An Experimental Performance Comparison between Different Shallow Ground Heat Exchangers*. Istanbul Technical University, Energy Institute. Turkiet. [PDF\) An Experimental Performance Comparison between Different Shallow Ground Heat Exchangers \(researchgate.net\)](https://www.researchgate.net/publication/275111111)

Badescu, V. (2006). *Simple and accurate model for the ground heat exchanger of a passive house*. Candida Oancea Institute of Solar Energy, Faculty of Mechanical Engineering, Polytechnic University of Bucharest, Bucharest 79590, Romania. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.03.004>

Bahadori, M. (1978). Passive Cooling Systems in Iranian Architecture. *Scientific American*, 238(2), s. 144-155. <https://www.jstor.org/stable/24955643> Hämtad 2024-05-07.

Belloufi, Y., Zerouali, S., Rouag, A., Aissaoui, F., Atmani, R., Brima, A. & Moumami, N. (2022). *Transient assessment of an earth heat exchanger in warm climatic conditions*. Université Kasdi Merbah Ouargla, Faculté des Hydrocarbures, des Energies Renouvelables, des Sciences de la Terre et de l'Univers, Département de Forage et Mécanique des Chantiers Pétroliers, BP 511 Ouargla 30000, Algeriet. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102442>

Berggren, C., VD på ByDemand (2024). Intervju 8 april.

Berggren, C. (2024). *Tumeled 1 :14 Göteborgs kommun* [Nybyggnadskarta/situationsplan]. Upprättad 2015-05-09.

Berggren, C. (2024). *Villa Färnevik, Tumeled 1 :14*. Plan 2 trappor ner. Ventilation. [Planritning]. Upprättad 2017-02-06.

Bexell, J. & Bjureus, E. (2010). *En studie om energiutbytet i marklagda ventilationsrör*. Examensarbete. Institutionen för teknik och naturvetenskap. Linköpings universitet.

Bezerra, M.A., Santelli, R.E., Oliveira, E.P., Villar, L.S. & Escalera, L.A. (2008). *Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry*. Departamento de Geoquímica, Universidade Federal Fluminense, Outeiro São João Batista s/n, Centro, Niterói/RJ, 24020-150, Brazil. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.05.019>

Bordoloi, N., Sharma, A., Nautiyal, H. & Goel, V. (2018). *An intense review on the latest advancements of Earth Air Heat Exchangers*. School of Mechanical Engineering, Lovely Professional University, Punjab 144411, India. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.056>

Boverket. (2009). *Så mår våra hus*. Sverige. https://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2009/sa_mar_vara_hus.pdf

Boverket. (2010). *Teknisk status i den svenska bebyggelsen – resultat från projektet BETSI*. Sverige. <https://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2011/betst-teknisk-status.pdf>

Boverket. (2023). *Koll på radonhalt?*. <https://www.boverket.se/sv/byggande/halsa-och-inomhusmiljo/radon/> Hämtad 2023-03-04.

Boverket. (2024a). *OVK -obligatorisk ventilationskontroll*. <https://www.boverket.se/sv/byggande/halsa-och-inomhusmiljo/ventilation/ovk/> Hämtad 2023-02-27.

Boverket. (2024b). *Termiskt klimat*. <https://www.boverket.se/sv/PBL-kunskapsbanken/regler-om-byggande/boverkets-byggregler/termiskt-klimat/> Hämtad 2023-03-06.

Brännström, H., Eriksson, G., Hanaeus, J., Lundborg, G. & Nordell, B. (1998). *Systemutredning - Flöden och miljöeffekter*. Teknisk rapport. Institutionen för samhällsbyggnadsteknik, Avdelningen för Trafikteknik. Luleå Tekniska Universitet. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:997790/FULLTEXT01.pdf>

Claesson, J. & Dunand, A. (1983). *Heat extraction from the ground by horizontal pipes. A mathematical analysis*. Department of Mathematical Physics, Lunds University, Sverige. ISBN: 91-540-3851-0 (s. 101-11, 180-191) [43562934.pdf \(core.ac.uk\)](https://core.ac.uk/doi/10.1016/0168-2726(83)90001-0).

Dahlblom, M. & Warfvinge, C. (2010). *Projektering av VVS-installationer*. 9 uppl. Studentlitteratur AB. Lund

Darkwa, J., Kokogiannakis, G., Magadzire, C.L. & Yuan, K. (2010). *Theoretical and practical evaluation of an earth-tube (E-tube) ventilation system*. Centre for Sustainable

Energy Technologies (CSET), The University of Nottingham Ningbo, Kina.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.11.018>

Diaz, S.E., Sierra, J.M.T. & Herrera, J.A. (2013). *The use of earth-air heat exchanger and fuzzy logic control can reduce energy consumption and environmental concerns even more.* Universidad Autonoma del Carmen, Mexico.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.06.028>

Elghawaby, M. (2010). *Biomimicry: A New Approach to Enhance the Efficiency of Natural Ventilation Systems in Hot Climate.* PhD Research. International Seminar Architectonics Network, Architecture and Research, Barcelona, Spanien. ([PDF](#))
[Biomimicry : A New Approach to Enhance the Efficiency of Natural Ventilation Systems in Hot Climate | Elghawaby Mahmoud - Academia.edu](#)

Europeiska rådet, Europeiska unionens råd. (2024). *Parisavtalet om klimatförändringar.*
<https://www.consilium.europa.eu/sv/policies/climate-change/paris-agreement/> Hämtad 2024-03-08.

Färnevik, L., boende i villan för fältundersökningen (2024). Intervju 23 februari.

Gross, L.J. (2013). *Use of computer systems and models.* *Encyclopedia of Biodiversity.* 2nd Ed, SA Levin, ed 2:213–220. ISBN: 9780123847201

Guo, X., Wei, H., He, X., Du, J. & Yang, D. (2021). *Experimental evaluation of an earth-to-air heat exchanger and air source heat pump hybrid indoor air conditioning system.* School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, Kina.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111752>

Ho Lee, K. & Strand, K.R. (2007). *Cooling and heating potential of an earth tube system in buildings.* University of Illinois at Urbana-Champaign, Champaign, IL, USA
<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.04.003>

Hobo (u.å.a). *HOBO External Temperature/RH Sensor Data Logger.*
<https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/mx2302a> Hämtad 2024-05-10

Hobo (u.å.b). *HOBO Temperature/RH Data Logger.*
<https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/mx2301a> Hämtad 2024-05-10

Jakhar, S., Misra, R., Bansal, V. & Soni, M.S. (2014) *Thermal performance investigation of earth air tunnel heat exchanger coupled with a solar air heating duct for northwestern India.* Center for Renewable Energy and Environment Development, BITS – Pilani, Rajasthan, Indien. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.070>

Jesus, A., Coelho Alexandre, J.L., Bruno Silva, V., Dinis Couto, N. & Rouboa, A. (2012). *Compact buried pipes system analysis for indoor air conditioning.* Mechanical

Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Porto. Portugal.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.09.045>

Johansson, M., expert på markförlagd ventilation på Uponor (2024). Intervju 8 april.

Karlsson, R. (2019). *Klimatanalys av två kulturhus*. Examensarbete. Linnéuniversitetet.
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1357027/FULLTEXT01.pdf>

Korb, J. (2003). *Thermoregulation and ventilation of termite mounds*. Biologie I, University of Regensburg, 93040 Regensburg, Tyskland.
<https://doi.org/10.1007/s00114-002-0401-4>

Kumar, R., Kaushik, S.C. & Garg, S.N. (2006). *Heating and cooling potential of an earth-to-air heat exchanger using artificial neural network*. Indian Institute of Technology Delhi, Indien. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.06.007>

Landin, H. & Mashreghi, B. (2020) *Biomimetiskt ventilationssystem*. Examensarbete. Lunds Tekniska Högskola Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg, Sverige.

Li, H., Ni, L., Liu, G., Zhao, Z. & Yao, Y. (2019). *Feasibility study on applications of an Earth air Heat Exchanger (EAHE) for preheating fresh air in severe cold regions*. School of architecture, Harbin Institute of technology, Kina.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.012>

Liu, Z., Yu, Z., Yang, T., Li, S., Mankibi, M., Roccamena, L., Qin, d. & Zhang, G. (2019). *Experimental investigation of a vertical earth-to-air heat exchanger system*. College of Civil Engineering, National Center for International Research Collaboration in Building Safety and Environment, Hunan University, Kina.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.100>

Mathur, A., Srivastava, A., Agrawal, G.D., Mathur, S. & Mathur, J. (2014). *CFD analysis of EATHE system under transient conditions of intermittent operation*. Centre for Energy and Environment, Malaviya National Institute of Technology, Jaipur, Indien.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.022>

Misra, R., Bansal, V., Agarwal, G., Mathur, J. & Aseri, T. (2012). *Thermal performance investigation of hybrid earth air tunnel heat exchanger*. Mechanical Engineering Department, Malaviya National Institute of Technology, Jaipur, Indien.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.049>

Nian, Y-L., Wang, X-Y., Xie, K. & Cheng, W-L. (2020). *Estimation of ground thermal properties for coaxial BHE through distributed thermal response test*. Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui, 230027, China. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.006>

Noirot, C., Darlington, J.P.E.C. (2000). *Termite Nests: Architecture, Regulation and Defence*. Chapter 6. Laboratoire de Zoologie, Faculté des Sciences, Université de Bourgogne, Frankrike. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3223-9_6

Okochi, G.S., Yao, Y. (2016). *A review of recent developments and technological advancements of variable-air-volume (VAV) air-conditioning systems*. Institute of Refrigeration and Cryogenics, School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University. Shanghai, Kina. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.328>

Pawlyn, M. (2016). *Biomimicry in Architecture*. Second edition. RIBA Publishing. St Nicholas Street, Newcastle upon Tyne. ISBN: 978 1 85946 738 1 (pdf). s 2, 96-101.

Prasad, R. & Bharadwaj, K. (2002). *Stochastic modeling of heat exchanger response to data uncertainties*. Department of Engineering, University of New Brunswick, Saint John, NB, Canada E2L 4L5. [https://doi.org/10.1016/S0307904X\(01\)00082-8](https://doi.org/10.1016/S0307904X(01)00082-8)

Radwan, G. & Osama, N. (2016). *Biomimicry, an Approach, for Energy Efficient Building Skin Design*. British Unoversity in Egypt, Sherouk city, Egypten. [Biomimicry, an Approach, for Energy Effecient Building Skin Design - ScienceDirect](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.03.001). s 176-186

Regeringskansliet. (u.å.). *Mål för energipolitiken*. <https://www.regeringen.se/regeringens-politik/energi/mal-och-visioner-for-energi/>
Hämtad 2023-03-08

Rodrigues, M., Brum, R., Vaz, J., Rocha, L., Santos, E. & Isoldi, L. (2015). *Numerical investigation about the improvement of the thermal potential of an Earth-Air heat exchanger (EAHE) employing the Constructal Design method*. Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional (PPGMC), Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande do Sul, Brasilien. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.041>

Shahsavari, A., Bagherzadeh, S. & Afrand, M. (2021). *Application of Artificial Intelligence Techniques in Prediction of Energetic Performance of a Hybrid System Consisting of an Earth-Air Heat Exchanger and a Building-Integrated Photovoltaic/Thermal System*. Kermanshah University of Technology, Iran. <https://doi.org/10.1115/1.4049867>

Singh, R., Sawhney, R., Lazarus, I. & Kishore, V. (2017). *Recent advancements in earth air tunnel heat exchanger (EATHE) system for indoor thermal comfort application: A review*. Department of Physics, Durban University of Technology, South Africa. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.058>

SMHI:s tjänst Metobs. SMHI:s stationsnät. Väderstation Göteborg A. Lufttemperatur (h). [Ladda ner meteorologiska observationer | SMHI](https://www.smhi.se/observatorier/lufttemperatur-goteborg) Hämtad 2024-04-05.

SMHI:s tjänst Metobs. SMHI:s stationsnät. Väderstation Vinga A. Vindriktning och vindhastighet (h). [Ladda ner meteorologiska observationer | SMHI](https://www.smhi.se/observatorier/vindriktning-och-vindhastighet-vinga) Hämtad 2024-04-05.

Soares, N., Rosa, N., Monteiro, H. & Costa, J. (2021). *Advances in standalone and hybrid earth-air heat exchanger (EAHE) systems for buildings: A review*. University of Coimbra, ADAI, Department of Mechanical Engineering, Portugal <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111532>

Sveriges Geologiska Undersökning, SGU. (2023). *Kartvisaren Jordarter 1:25 000-1:100 000*. <https://www.sgu.se/produkter-och-tjanster/kartor/kartvisaren/jordkartvisare/jordarter-125-000-1100-000/> Hämtad 2024-03-22

Swema¹ (u.å.). *SwemaAir 5*. <https://swema.se/produkt/swemaair-5/> Hämtad 2024-05-10

Swema² (u.å.). *SwemaFlow 126*. <https://swema.se/produkt/swemaflow-126/> Hämtad 2024-05-10

Talari, S., Shafe-Khah, M., Osório, G.J., Aghaei, J. & Catalão J.P. (2018). *Stochastic modelling of renewable energy sources from operators' point-of-view: A survey*. C-MAST, University of Beira Interior, R. Fonte do Lameiro, Covilhã 6201-001, Portugal. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.006>

Timrå Kommun (2024). [Fotografi]. [Laggarbergs skola - Timrå kommun \(timra.se\)](https://www.timra.se) Hämtad 2024-02-27

Turner, S. (2000). *The Extended Organism: The Physiology of Animal-Built Structures*. 1 uppl. Boston: Library of Congress Cataloging in Publication Data.

Turner, S. & Soar, R. (2008). *Beyond biomimicry: What termites can tell us about realizing the living building*. Loughborough University, England. [PDF\) Beyond biomimicry: What termites can tell us about realizing the living building \(researchgate.net\)](https://www.researchgate.net/publication/312511111)

Warfvinge, C. & Dahlblom, M. (2010). *Projektering av VVS-installationer*. Upplaga 1:4. Studentlitteratur AB, Lund.

Wennergand, D., VVS-konsult och delägare på Totalinstallation AB (2024). Intervju 24 april.

Williams, J. (2020). *The Earthbound report*. [Fotografi]. [Building of the week: Eastgate, Zimbabwe – The Earthbound Report](https://www.researchgate.net/publication/358111111) Hämtad 2024-02-27.

Xamán, J., Hernandez-Perez, I., Arce, J., Alvarez, G., Ramirez-Davila, L. & Noh-Pat, F. (2014). *Numerical study of earth-to-air heat exchanger: The effect of thermal insulation*. Numerisk studie. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Mexico. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.064>

Östin, R., Eklund, E. & Johansson, C. (2012). *Energieffektivt byggande i kallt klimat*. Umeå Universitet, Sverige. <https://umu.diva-portal.org/smash/get/diva2:617812/FULLTEXT01.pdf>

Bilagor

Nedan presenteras godkända sammanställningar från de intervjuer som genomförts med respektive intervjuperson.

Intervjustudier

Bilaga A: Intervju med Uponor

Uponor är plaströrstillverkare som är verksamma i norra Europa och tillverkar bland annat markförlagda rör. I en intervju med Malin Johansson, expert inom markförlagd ventilation, diskuterades hur Uponor jobbar med markförlagda rör. Enligt Johansson är det huvudsakliga syftet med installationen att frigöra utrymme inne i byggnaden och energibesparingsmöjligheterna i form av förvärmning och förkylning av luften betraktas som ett plus. Plastmaterial har lågt värmekonduktivitetstal vilket gör att nytta kan dras av marktemperaturen, för att förvärma på vintern och förkyla på sommaren. Vid utformningen av systemen används samma resonemang som vid installation av ventilationssystem inne i byggnaden med avseende på dimensionering och flöden. Generellt sätt används relativt fasta flöden och de flesta markförlagda rörsystem som Uponor har uppfört är till större typer av fastigheter, som exempelvis skolor, sjukhus och lägenhetsbyggnation. Modellerung och simulering av systemen görs av VVS-ingenjörer i program som Revit och AutoCAD där Johansson är med och stämmer av samt föreslår projektpassade lösningar, men beräkningar sker uteslutande från VVS-ingenjörerna och är inget Johansson är speciellt involverad i.

Vid diskussion kring eventuell problematik kopplat till installationen tar Johansson upp att kommunikationsbrist kan vara orsaken till bekymmer i systemet. Vanligtvis är standard-produktlösningen fullt fungerande vid normala markförhållanden. När det gäller projekt där det exempelvis finns utmaningar kring högt grundvatten eller risk för sättningar i marken är det viktigt att detta framgår i ett tidigt skede. Möjlighet finns då att i samarbete med konsulten anpassa lösningen utefter detta och säkerställa täthet och funktion. Med avseende på potentiell fuktproblematik anger Johansson att det inte är ett problem hos Uponor utan att risken för fukt i rören elimineras genom att ha ett lätt fall från byggnaden med dräneringsmöjligheter i lågpunkten.

Bilaga B: Intervju med ByDemand

ByDemand är företaget som har projekterat rörutformningen för villan i Torslanda. I en intervju med VD:n Charlotta Berggren diskuterades utformningen av de markförlagda rören. Enligt Berggren är markrörens huvudsakliga syfte att göra energibesparingar samt att förse byggnaden med frisk förvärmad/förkyld luft. Utformningen av rörsystemet har baserats på beräkningar på rören med hjälp av simuleringsprogram som IDA ICE eller egna simuleringsprogram som baseras på indata som exempelvis rördiameter, tjocklek och material. Vid beräkning betraktas marken som en värmeväxlare som tillsammans med markens årsmedeltemperatur kan ange hur mycket värmeöverföring som sker genom kanalväggen. Enligt Berggren kan en rätt dimensionerad och anpassad utformning av rörsystemet generera en motsvarande återvinningsgrad på 50%, dock är det viktigt att lufthastigheten i röret är låg med låga tryckfall. Lufthastigheten bör ligga

under 1,5 m/s för att ge den passerande luften utrymme att utbyta energi med omgivningen för att möjliggöra en större energibesparing. Anledningen till valet av rak rörkonfiguration är för att underlätta rengöring av rören.

Vid diskussion kring eventuell fuktproblematik och mögelpåväxt i rören beskriver Berggren att mögel sällan är ett problem i denna typ av rörsystem eftersom de ofta är välutformade med lätt lutning och dräneringsmöjligheter. Vad som dock är viktigt är att årligen rengöra rören genom att spola dessa med vatten i stället för filterbyten. Vanligtvis används raka rörtutformningar av just denna anledning även i större projekt. För villan i Torslanda möjliggör luftkammaren i källaren goda rengöringsmöjligheter, men det kan även lösas på andra sätt genom att exempelvis ha lättåtkomliga don i byggnader där rören ligger i innerväggar hela vägen till don eller liknande. Vid bra underhåll kan markförlagda rörsystem bidra till svalare luft än vad som ges från annan ventilation. För känsliga brukare finns även möjlighet att installera flimmerfilter för att hindra pollen från att tränga in i rören. Om filter inte installeras fungerar markrörken som ett sedimentationsfilter där pollen ansamlas på botten i röret och avlägsnas genom avspolning. Om filter används behöver inte rören spolas rent lika ofta.

Bilaga C: Intervju med Totalinstallation AB

I en intervju med Daniel Wennersand VVS-konsult och delägare på Totalinstallation AB i Mölndal diskuterades utformning och dimensionering vid användandet av markförlagd ventilation. Företaget arbetar med både större projekt som skolor och flerbostadshus men även med mindre projekt som villor där markförlagd ventilation är en av lösningarna som Totalinstallation AB erbjuder.

Markförlagda installationer som projekteras av Totalinstallation AB är hybridsystem där värmeväxlare, FTX och elbatterier är vanliga komplement till systemet. Enligt Wennersand vill företaget undvika markförlagda system med endast självdrag eftersom mängden luft som tillförs byggnaden aldrig kan säkerställas. För exempelvis skolor där ett visst luftflöde måste garanteras blir därför ett markförlagt system med självdrag osäkert.

Wennersand berättar att nyttjandet av markförlagd ventilation har flera syften där en stor del handlar om att spara schaktytor inomhus för att tillgängliggöra fler brukbara kvadratmeter. Det är även ett bra komplement för K-märkta byggnader där installation av schakt inte är möjlig. Förutom att frigöra utrymme inomhus är markförlagd ventilation bra för att kunna göra energibesparingar. I dagsläget har svenska byggnader relativt tjocka klimatskal och Wennersand menar på att justering och optimering av byggnadens installationer och system är ett alternativt sätt att energieffektivisera byggnader på. Eftersom markens naturliga stabila temperatur förvärmer alternativt förkylar luften innan den tas in i byggnaden sänks effektbehovet på tillhörande hybridkomponent och därav minskar energianvändningen. Med avseende på fukt berättar Wennersand att det inte är ett problem i denna typ av system.

Vid utformning av systemet berättar Wennersand att Totalinstallation AB alltid dimensionerar för det värsta fallet och att ett relativt lågt luftflöde bör användas för att

garantera värmeutbyte med marken. Vid dimensionering av rören används programmet *VVSWIN* och *MagiCAD* för AutoCAD i samverkan med tillverkarens dimensioneringstabeller, som genom att ange ett beräknat värde på byggnadens tilluftsbehov genererar förslag på passande rördimension och luftflöde för byggnaden. Företaget använder även isoleringsprogrammet *Paroc calculus* i samverkan med energiberäkningsverktyget *VIP Energy* för att beräkna uppvärmnings- och nedkylningskapaciteten i systemet där indata som bland annat rörlängd, markttemperatur, rörmaterial och rördiameter anges. Genom att jämföra skillnaden i utloppstemperatur med markrör respektive utan markrör kan en uppskattning göras på hur mycket mindre hybridkomponenten måste arbeta för att uppnå likvärdigt inneklimat och därav kan även en energibesparing uppskattas. Wenersand nämner också att simuleringar kan göras i exempelvis *IDA ICE* eller *VIP Energy* men att det är komplicerat och kräver en stor mängd indata. Dock görs inte uppföljningar för att kontrollera systemets prestanda utan företaget tar endast fram lösningsförslag i projekteringsskedet.

Bilaga D: Samtal med Lars Färnevik

Nedan presenteras en sammanställning av information som framförts från samtal med Lars Färnevik, boende i villan där fältundersökningen genomförts. Samtalen har skett både över telefon och via fysiska träffar. Villan är byggd 2017 och har enligt Färnevik en låg energiförbrukning. Den huvudsakliga värmekällan är golvvärme där varmvattnet värms av en luft-vatten-värmepump. Villan har även en braskamin samt solpaneler. Färnevik berättar att boende upplever större drag inomhus när det är blåsig ut. Inomhusklimatet håller en jämn temperatur runt cirka 20 °C.