

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Svenska långtidsmätningar av prestanda hos större geoenergisystem	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Swedish long-term performance monitoring of larger GSHP systems	
Universitet/högskola/företag Svenskt Geoenergicentrum	Avdelning/institution [Klicka här och skriv]
Adress Box 1127, 221 04 Lund	
Namn på projektledare Signhild Gehlin	
Namn på ev övriga projektdeltagare Olof Andersson, Jonas Ekestubbe, Iuliia Svyrydonova, Tommy Walfridson, José Acuña, Saqib Javed (<i>endast de ansvariga för delprojekten är angivna här</i>)	
Nyckelord: 5-7 st Geoenergi, långtidsmätning, prestanda, SPF, IEA HPT Annex 52, värmepump, energilagring	

Förord

Projektet “Svenska långtidsmätningar av prestanda hos större geoenergisystem” utgör den svenska insatsen inom det internationella samarbetsprojektet “*Long-term performance monitoring of GSHP systems for commercial, institutional and multi-family buildings*” inom det fyraåriga IEA HPT Annex 52. Den internationella projektperioden har löpt från 1:a januari 2018 till 31 december 2021. Det svenska projektet med projektnummer 45979-1 har löpt från den 1 maj 2018 till den 31 december 2021, och är ett av de projekt som fått finansiering genom Energimyndighetens TERMO-program.

Det svenska projektet har koordinerats av Svenskt Geoenergicentrum, som även varit Operating Agent för det internationella Annex 52-projektet. Utöver Energimyndighetens finansiering har följande företag och organisationer medfinansierat projektet; Svenskt Geoenergicentrum, Geostrata, Xylem, EON, SWECO, IKEA, ClimaCheck, Castellum, EFVAB, EnergyMachines, Skanska, Akademiska Hus, Vasakronan, Einar Mattson.

Den svenska arbetsgruppen har letts av Signhild Gehlin (Svenskt Geoenergicentrum) och har bestått av Olof Andersson (Geostrata), Leif Rydell (Xylem), Jonas Ekestubbe (EON), Iuliia Svyrydonova (SWECO), Tommy Walfridson (RISE), Saqib Javed (Chalmers/LTH), José Acuña (KTH Energiteknik), Willem Mazzotti Pallard (KTH Energiteknik), Alberto Lazzarotto (KTH Energiteknik, Mohammad Abuasbeh (KTH Energiteknik), Klas Berglöf (ClimaCheck), Caroline Warnicke (Akademiska Hus), Lasse Thomsen (EnergyMachines), Rouzbeh Löfberg (IKEA) och Johan Ahlgren (EFVAB). Ytterligare ett trettio totalt personer från ovanstående verksamheter samt ytterligare svenska verksamheter utanför medfinansieringsgruppen har deltagit i möten och diskussioner i varierande grad under projektperioden och har bidragit med värdefulla erfarenheter och kunskapsspridning på ett mycket fruktbart sätt. Genom att det svenska TERMO-projektet ingått som del i det internationella samverkansprojektet IEA HPT Annex 52 har även ovärderlig kunskap och erfarenhet erhållits från de internationella annex-deltagarna. Bland dem ska särskilt nämnas professor Jeffrey D Spitler (Oklahoma State University) som var en av initiativtagarna till Annex 52 och som förtjänar ett speciellt tack för sin genomgripande och ovärderliga insats inom projektet. Insatserna från Professor Mathew J. Davis (University of New Hampshire) har varit av avgörande betydelse för framtagandet och färdigställandet av riktlinjedokumentet för instrumentering och datainsamling.

Stort tack till Energimyndigheten och till alla företag, organisationer och enskilda personer som på olika sätt och i olika grad har bidragit med finansiering, tid, kunskap och erfarenhet, och på så sätt möjliggjort genomförandet av detta fyraåriga projekt. Som projektledare vill jag uttrycka min stora tacksamhet för allas insatser, som i många fall sträckt sig långt utöver de ursprungliga åtagandena. Det har varit oerhört givande att få leda och vara med i detta omfattande projekt, ta del av all expertkunskap och bidra till alla dessa nya kontaktytor mellan personer och verksamheter i och utanför Sverige. Tack för dessa fyra år!

Innehållsförteckning

Sammanfattning	4
Summary	5
Inledning/Bakgrund	5
Genomförande	8
Resultat	11
Diskussion.....	21
Publikationslista.....	23
Referenser, källor.....	28
Bilagor	29

Sammanfattning

TERMO-projektet "Svenska långtidsmätningar av prestanda hos större geoenergisystem" utgör den svenska insatsen inom det internationella samarbetsprojektet IEA HPT Annex 52. I projektet har långtidsmätningar (>1 år) från drift av 14 svenska större geoenergianläggningar av varierande slag och spridda över landet utvärderats på ett systematiskt sätt för att kvantifiera deras energiprestanda. Erfarenheterna från de svenska anläggningarna har jämförts med resultat från ytterligare 18 internationella geoenergianläggningar i USA, Tyskland, Storbritannien, Norge, Finland och Holland.

Det har hittills saknats konsensus kring långtidsprestandauppföljning av större geoenergianläggningar. Detta har lett till bristande och inkonsekvent instrumentering, datainsamling och datakvalitet och olika tolkningar av hur olika prestandabegrepp ska användas. Resultaten från fallstudierna har använts för att sammanställa vägledande dokument för instrumentering, datainsamling, osäkerhetsanalys och redovisning av långtidsprestanda hos större geoenergianläggningar. De vägledande dokumenten finns tillgängliga på IEA HPT Annex 52 hemsida.

Totalt har 116 år av mätdata samlats in från de ingående studierna i Annex 52, varav ca 40 år från de svenska anläggningarna i TERMO-projektet. 88% av de uppmätta driftåren har en Seasonal Performance Factor för värme och kyla sammanlagt för systemgräns 1 (själva värmepumpen - SPFHC1) som är 3 eller högre, och 80% av de uppmätta driftåren har ett SPF för värme och kyla sammanlagt för systemgräns 2 (markkretsen och värmepumpen - SPFHC2) på 3 eller högre. Mätningarna visar tydligt att SPF sjunker betydligt på distributionssidan av värmepumpen, huvudsakligen på grund av energiåtgången för varmvattencirkulation, legionellskydd och el till fläktar och distributionspumpar.

Projektets resultat är användbara för att validera simuleringsmodeller, utveckla optimerade komponenter och driftstrategier och minimera distributionsförluster. Det vore önskvärt med ett framtida forskningsprojekt inom styr- och övervakningssystem, automatiserad driftoptimering och feldetektering. Ett sådant projekt bör ta avstamp i resultaten från TERMO-projektet och Annex 52. Ytterligare långtidsprestandamätningar för att optimera och energieffektivisera systemutformningar av större geoenergianläggningar, samt kvantifiera effekten av utförda driftsjusteringar är ett annat intressant område för fortsatta studier. Det är även intressant med jämförelser mellan centraliserade och distribuerade värmepumpsystem.

Summary

The TERMO-project “Svenska långtidsmätningar av prestanda hos större geoenergisystem” is the Swedish part of the international collaboration project IEA HPT Annex 52. Long-term (>1 year) performance monitoring data from 14 Swedish larger ground-source heat pump (GSHP) systems of various type and location was analyzed systematically and the individual performance factors were quantified. Experience from the Swedish GSHP systems were compared with experience from 18 international GSHP systems in the USA, Germany, UK, Norway, Finland and The Netherlands.

Until now there has been a lack of consensus in long-term performance analysis of larger GSHP systems. This has led to poor and inconsistent instrumentation, data collection and data quality, and to inconsistently used performance nomenclature. The results from the performance measurements within Annex 52 and the TERMO project have been used to compile guideline documents for instrumentation, data handling, uncertainty analysis and presentation of long-term performance in larger GSHP systems. These guidelines are published on the IEA HPT Annex 52 webpage.

In total some 116 year of measurement data has been collected from the Annex 52 monitoring projects. Some 40 years of these measurement data come from the Swedish case studies in the TERMO project. 88% of the measured years have Seasonal Performance Factor (SPF) for heating and cooling together for system boundary 1 (heat pump only - SPFHC1) that is 3 or higher, and 80% of the measured years have SPF for heating and cooling for system boundary 2 (ground circuit and heat pump, SPFHC2) of 3 or higher.

The measurements show that SPF decreases significantly for the system boundaries on the distribution side of the heat pump. This is mainly due to warm-water circulation, Legionella protection and electricity for fans and distribution pumps.

The results from the TERMO project and Annex 52 will be useful for validation of simulation models, development of optimized components and operation strategies and for minimizing distribution losses. Future R&D projects about controls, optimization and automatic fault detection, using the results from the TERMO project and Annex 52 would be welcome. Also continued long-term performance monitoring projects for system optimization and energy efficiency for larger GSHP systems, including comparison of centralized vs distributed GSHP systems, would be of interest.

Inledning/Bakgrund

Geoenergi är lokal och förnybar energi från mark, yt- och grundvatten och bidrar idag med betydande mängder förnybar värme och frikyla för bostäder och lokaler. Enligt den senaste sammanställningen av geoenergi i Sverige (Gehlin et al 2020) bidrog geoenergianläggningar med ca 17 TWh förnybar värme (driftel för värmepumpar ej inräknat) till Sveriges byggnadsuppvärmning. Det finns över en halv miljon geoenergianläggningar i Sverige, varav majoriteten för småhus. Större geoenergianläggningar för värme och kyla i flerbostadshus, kommersiella och institutionella fastigheter har ökat stadigt under det senaste decenniet. Kyla, främst frikyla, från geoenergianläggningarna i Sverige bidrar med drygt 1 TWh förnybar kyla per år (Gehlin et al 2019). Geoenergi är en väl beprövad energikälla sedan 1970-talet, men det saknas likväl enhetlig praxis för mätning, uppföljning och redovisning av prestanda, framför allt hos större geoenergisystem. Detta gäller både nationellt och internationellt. Det har länge funnits ett behov av tydliga riktlinjer för instrumentering, mätning, analys och redovisning av prestanda hos större geoenergisystem, för att skapa utveckling och förutsättningar för kvalitet, rättvisa jämförelser, drift- och systemoptimering.

Det är vanligt att byggnaders verkliga energianvändning för värme och kyla skiljer sig från den förväntade energianvändningen utifrån projekteringen. Avvikelsen mot projekterad energianvändning kallas ofta “building energy performance gap” (se t ex Spitler 2020) och kan vara både högre och lägre. Skillnaden beror till exempel på fel i design, projektering och installation, liksom på brister i driftoptimering och styrsystemens inställningar. Utan mätning och uppföljning kan dessa fel undgå upptäckt och kvarstå under mycket lång tid, så länge de inte ger upphov till komfortproblem för brukarna. Trots behovet av denna typ av mätningar finns det förvånansvärt få publicerade resultat från långtidsmätning av prestanda hos byggnaders energisystem, inte minst för värmepumpssystem. Gleeson and Lowe (2013) publicerade en meta-studie av fältmätningar från 600 värmepumpssystem i småhus i sex europeiska länder. Spitler och Gehlin (2019) har inom ramen för IEA HPT Annex 52 sammanställt en översikt över publicerade långtidsmätningar (minst 1 år) av SPF och COP för 55 större geoenergianläggningar i världen. Sådana system har en högre grad av variation och komplexiteten i utformningen jämfört med småhusvärmepumpar, och det är vanligt att de förser byggnaden med både värme och kyla och dessutom kombineras med spetsvärme och -kyla likväl som värmeåtervinning. De större geoenergisystemens varierade utformning och komplexitet innebär bland annat utmaningar i definitioner av systemgränser för rättvisande och jämförbara prestandaangivelser.

Svenskt Geoenergicentrum slutförde i början av 2018 ett arbete med svenska riktlinjer kring mätning och uppföljning av geoenergisystem (Svenskt Geoenergicentrum 2018). Arbetet behövde prövas brett och praktiskt av geoenergibranschen, och genom IEA HPT Annex 52 kunde arbetet växlas upp till internationell nivå, där fler aspekter och djupare analyser av mätdata och system

kunde göras. Fler systemtillämpningar, marknads- och klimatförutsättningar kunde också täckas in genom den internationella samverkan.

Arbetet inom IEA Annex 52 och TERMO-projekt 45979-1 hade som utgångspunkt EU-projektet SEPEMOs beräkningsgrunder och systemgränser för värmepumpande systems prestanda (Nordman 2012). SEPEMO-modellen togs huvudsakligen fram för små värmepumpsystem, och inom Annex52-projektet har metoden behövt vidareutvecklas för att kunna hantera den större komplexiteten i större geoenergianläggningar.

TERMO-projektet 45979-1 utgör ett samordnat svenskt initiativ där ett flertal engagerade aktörer från akademi och näringsliv har bidragit med detaljerade långtidsutvärderingar av prestanda hos mer än ett dussin svenska större geoenergianläggningar. Som svensk del i det fyraåriga internationella samverkansprojektet IEA HPT Annex 52 har de svenska anläggningarna och erfarenheterna bidragit till de internationella diskussionerna och slutsatserna kring instrumentering, datainsamling, analys och redovisning av långtidsmätningar. Samarbetet har lett fram till tre riktlinjedokument inom dessa områden. I förlängningen innebär detta en ökad andel förnybar energianvändning, likväl som exportmöjligheter av svenska produkter och expertis.

Det svenska TERMO-projektet har löpt parallellt med det internationella annexet. Energimyndigheten har stått för drygt hälften av finansieringen av projektet och ingående aktörer och medfinansiärer har stått för resterande finansieringsandel. Projektet initierades och har letts av Svenskt Geoenergicentrum i samarbete med professor Jeffrey D Spitler vid Oklahoma State University.

Genomförande

Sverige har varit Operating Agent för det internationella samverkansprojektet IEA HPT Annex 52 (IEA HPC 2019) genom Svenskt Geoenergicentrum. Det internationella projektet har löpt från 1 januari 2018 till 31 december 2021. Arbetet som Operating Agent har finansierats genom Operating Agent-avgifter från de sju deltagande länderna (Sverige, Finland, Norge, Tyskland, Holland, Storbritannien och USA), där den svenska OA-avgiften betalats direkt av Energimyndigheten. Legal Text för Annex 52 återfinns i Bilaga 2.

Den koordinerade svenska arbetsinsatsen inom Annex 52 har till största delen utgjorts av TERMO-projekt 45979-1 som löpt från maj 2018 då finansieringen beviljades, till och med december 2021.

Det internationella arbetet inom IEA HPT Annex 52 är indelat i tre arbetspaket;

- Subtask 1: Litteraturstudie och sammanställning av fallstudierapport för långtidsmätningar av prestanda hos geoenergisystem
- Subtask 2: Riktlinjer för instrumentering och mätning av långtidsprestanda
- Subtask 3: Riktlinjer för analys och rapportering av långtidsprestanda

Den svenska arbetsgruppen, bestående av ett konsortium med ett flertal aktörer från akademi, industri och förvaltning, har genom TERMO-projektet bidragit till alla tre arbetspaketen i omfattande grad. Svenskt Geoenergicentrum har lett och samordnat konsortiet och ansvarat för redovisning av ekonomi och projektresultat gentemot Energimyndigheten och IEA HPT Annex 52. TERMO-projektet har varit uppdelat i åtta delprojekt:

Delprojekt 0

Delprojektledning: Svenskt Geoenergicentrum

Ingående aktörer: Svenskt Geoenergicentrum

Medverkande personer: Signhild Gehlin

Uppgift: Projektledning och projektsamordning

Delprojekt 1

Delprojektledning: Svenskt Geoenergicentrum

Ingående aktörer: Svenskt Geoenergicentrum (SGC), Akademiska Hus (AH)

Medverkande personer: Signhild Gehlin (SGC), Anders Larsson (AH), Johan

Tjernström (AH), Caroline Warnicke (AH)

Mätobjekt: Studenthuset i Stockholm

Delprojekt 2

Delprojektledning: Geostrata

Ingående aktörer: Geostrata, Xylem

Medverkande personer: Olof Andersson (Geostrata), Leif Rydell (Xylem, från 2020

Reikab), Niklas Håkansson (Xylem)

Mätobjekt: Xylems högttemperaturlager i Emmaboda

Delprojekt 3

Delprojektledning: EON

Ingående aktörer: EON

Medverkande personer: Jonas Ekestubbe

Mätobjekt: Kv Traktorn i Lund, Kv Briljanten i lund

Delprojekt 4

Delprojektledning: SWECO

Ingående aktörer: SWECO

Medverkande personer: Iuliia Svyrydonova, Patricia Monzó, Joakim Hjulström

Uppgift: Bidra med erfarenheter och verktyg från mätprojekt

Delprojekt 5

Delprojektledning: RISE

Ingående aktörer: RISE, ClimaCheck, EnergyMachines, Energiförbättring i Väst (EFVAB), IKEA, Castellum, Göteborgs Energi

Medverkande personer: Tommy Walfridsson (RISE), Martin Larsson (RISE), Klas Berglöf (ClimaCheck), Rouzbeh Löfberg (IKEA), Mikael Torstensson (Castellum), Johan Ahlgren (EFVAB), Erik Myhrberg (EFVAB), Petter Hansson (Göteborg Energi), Lasse Thomsen (EnergyMachines)

Mätobjekt: IKEA i Uppsala, Domstolen i Jönköping, Brf Backadalen i Göteborg, Norrlands Universitetssjukhus i Umeå

Delprojekt 6

Delprojektledning: KTH Energiteknik

Ingående aktörer: KTH Energiteknik (KTH), Akademiska Hus (AH), Vasakronan, Einar Mattson (EM)

Medverkande personer: José Acuña (KTH), Alberto Lazzarotto (KTH), Willem Mazzotti-Pallard (KTH), Mohammad Abuasbeh (KTH)

Mätobjekt: NPQ-huset Frescati i Stockholm, Kv Forskningen i Stockholm, Rosenborg i Stockholm

Delprojekt 7

Delprojektledning: Chalmers

Ingående aktörer: Chalmers, Skanska

Medverkande personer: Saqib Javed (Chalmers/LTH), Hongyi Zhang (LTH), Hao Liu (LTH), Jonas Gräslund (Skanska)

Mätobjekt: Polishuset i Malmö, Entré Lindhagen i Stockholm, Klubbhus i Göteborg

Mätobjekten har analyserats detaljerat och rapporterats enhetligt i individuella fallstudierapporter och utifrån samma systemgränser och metodik, i enlighet med gemensamt framtagna direktiv inom IEA HPT Annex 52. Alla delprojekten har även bidragit till det gemensamma arbetet inom IEA HPT Annex 52 med riktlinjedokumentet och bibliografin. De svenska projektdeltagarna har publicerat resultat från mätstudierna i vetenskapliga artiklar och konferensartiklar.

Inom konsortiet har de ingående parterna bidragit och ansvarat för sina respektive delprojekt (arbetspaket) genom delprojektledare som i sin tur redovisar framsteg och ekonomi till huvudprojektledaren Svenskt Geoenergicentrum.

Åtta nationella arbetsgruppsmöten/workshops har hållits i Sverige under projektperioden. Under dessa möten har deltagarna redovisat och diskuterat delprojektresultat samt förberedelser och efterarbete relaterat till de totalt åtta internationella expertmötena under perioden. På grund av pandemin under halva

projektperioden (2020-2021) har tre av de nationella och tre av de internationella mötena behövt hållas digitalt istället för de fysiska möten som ursprungligen var planerade. Det första och sista internationella mötet hölls i Sverige under svenskt värdskap.

Utöver det trettiotal personer och 15 organisationer och företag som deltagit genom konsortiet har ytterligare ett trettiotal personer från 15 olika företag och organisationer deltagit i de svenska arbetsgruppsmötena i varierande omfattning och har bidragit till projektets resultat utanför TERMO-projektets finansiering. En lista över samtliga personer och verksamheter som deltagit i projektets nationella och internationella möten redovisas i Bilaga 6.

Resultat

Projektets huvudsyfte har varit att ta fram metodik och konsensus för att på ett konsekvent och tydligt sätt mäta, redovisa och bedöma långtidsprestanda hos större geoenergianläggningar. Fokus har varit på systemprestanda och alltså inte bara på värmepumpenhetens prestanda. Långtidsmätningar av prestanda är av intresse för ett antal olika målgrupper med olika frågeställningar. Gehlin och Spitler (2021) redovisar olika potentiella målgrupper och deras respektive intresse av långtidsmätningar, och som har definierats genom Annex 52 (Tabell 1). Inom den svenska och internationella arbetsgruppen har målet varit att identifiera de prestandaindikatorer som behövs för att kunna ge svar på så många som möjligt av dessa målgruppers olika frågeställningar och skapa förutsättningar för att dessa indikatorer kan bestämmas kostnadseffektivt och enhetligt.

Tabell 1: Frågor att besvara med långtidsmätning (Gehlin och Spitler 2021)

Målgrupper	Frågeställningar att besvara
Potentiella fastighetssägare	Är ett geoenergisystem värt investeringen?
Fastighetsägare	Sparar min anläggning pengar enligt förväntan? Hur jämför sig min anläggning i förhållande till andra närliggande anläggningar som betjänar liknande fastigheter? Hur väl möter min anläggning miljökriterier och byggnadscertifieringskrav?
Myndigheter	Hur kan vi ta informerade beslut för energipolicies, lagar, förordningar och regler?
VVS-konsulter	Fungerar anläggningen som jag designat som förväntat? Vad bör jag göra annorlunda nästa gång? Hur har andra geoenergianläggningar för liknande tillämpningar fungerat i närområdet?
Drifttekniker	Behöver min anläggning åtgärdas? Finns det några trasiga komponenter? Har prestandan ökat eller minskat sedan förra året? Finns det risk för driftstörningar under kommande år?
Energiansvariga	Finns det utrymme för ytterligare förbättringar i anläggningen, eller behöver vi göra något åt andra delar av byggnaden?
Styr- och reglertekniker	Hur kan vi optimera driftpunkter? Vilka är de optimala driftpunkterna?
Inspektörer	Hur fungerar anläggningen i förhållande till projekteringen? Är anläggningen konstruerad i enlighet med projekteringshandlingarna?
Tillverkare och leverantörer	Hur väl fungera mina produkter i fält? Vilka marknadsmöjligheter finns för nya produkter och nya funktioner inom befintliga projekt?
Miljöcertifierare	Hur kan certifieringsprogram belöna verkligt energieffektiva system och inte bara planerad effektivitet eller låg byggnadsenergianvändning, som kan bero på låg belägningsgrad?
Byggnadscertifierare	
Handboks författare	Vilken best-practice leder till högeffektiva anläggningar?
Forskare	Hur kan simuleringsmodeller valideras?

Bibliografi och litteraturstudie

I början av projektet genomfördes en omfattande litteraturstudie av tidigare publicerade långtidsmätstudier av prestanda från större geoenergianläggningar i världen. Publikationerna analyserades både utifrån kvalitet och generaliserbarhet. Ett åttiotal publikationer med någon form av mått på långtidsprestanda för ett stort antal större geoenergianläggningar i 15 länder finns sammanställda i en så kallad "annotated bibliography" där varje referens beskrivs utifrån vissa kriterier. Den annoterade bibliografin har varit tillgänglig för alla inom Annex 52-projektet och har fyllts på efter hand av deltagarna. Excelfilen återfinns i Bilaga 4.

Som ett första steg analyserades långtidsmätning av prestanda hos 55 större geoenergianläggningar som ingår i den annoterade bibliografin. Litteraturstudien och prestandaanalysen finns publicerad som del av en open-access-artikel av Spitler och Gehlin (2019) i den vetenskapliga tidskriften Energy. En utökad litteraturstudie med ytterligare identifierade anläggningars uppmätta prestanda som ingår i bibliografin sammanställs i skrivande stund för slutredovisningen av IEA HPT Annex 52 till HPT Exekutivkommitté i början av 2022. Rapporten kommer att göras tillgänglig för nedladdning via Annex 52's officiella hemsida.

De huvudsakliga slutsatserna från litteraturstudien är i korta drag dessa:

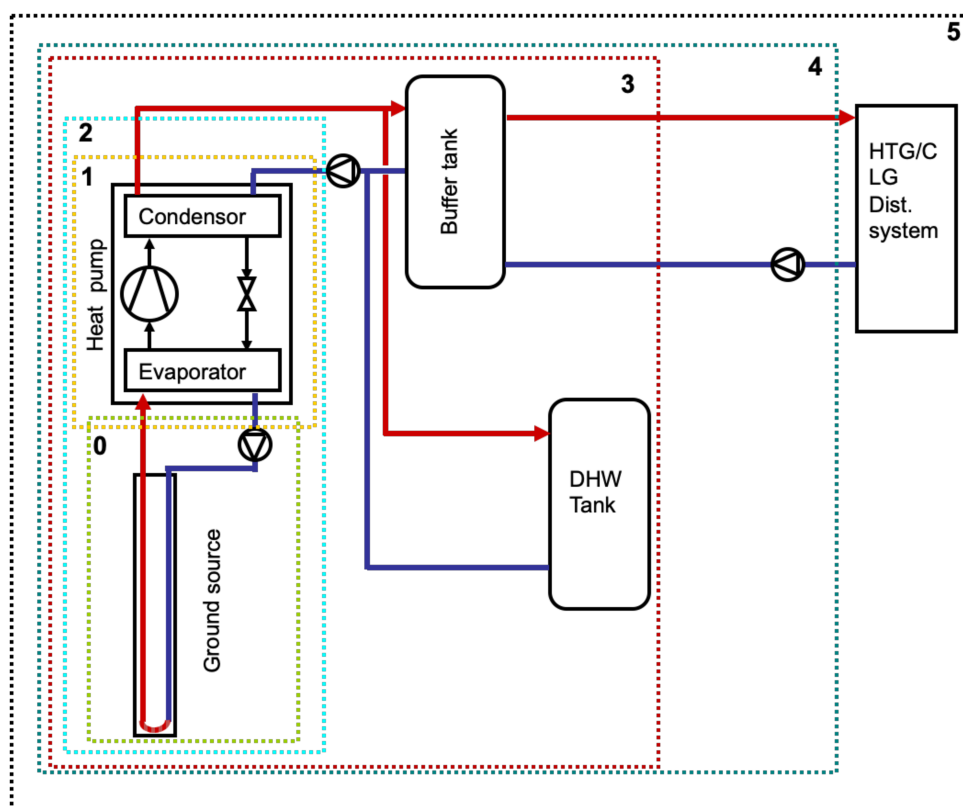
- Det finns förhållandevis få långtidsutvärderingar av prestanda hos större geoenergianläggningar. De långtidsutvärderingar av prestanda som finns publicerade är av varierande kvalitet.
- Det är tydligt att det har saknats konsensus kring hur långtidsprestanda hos större geoenergianläggningar ska mätas, analyseras och presenteras, och hur nomenklaturen ska användas.
- Systemgränser och tidsintervall för prestandautvärdering hos större geoenergianläggningar i allmänhet är otydligt eller obefintligt redovisade, vilket innebär att det inte går att dra säkra slutsatser om prestandan och inte heller att jämföra prestandan som redovisas i de olika publikationerna.
- Osäkerhetsanalyser av prestandatal hos geoenergianläggningar är extremt sällsynta och borde genomföras i större utsträckning.

Systemgränser

En förutsättning för att kunna utföra enhetliga prestandautvärderingar av de ingående geoenergianläggningarna i Annex52-projektet var att systemgränser och tidsintervall definieras och redovisas på samma sätt. Detta ställer krav på ett systemgränsschema som kan hantera större geoenergianläggningars komplexitet. Som utgångspunkt inom Annex 52 användes det systemgränsschema som togs fram genom EU-projektet SEPEMO (Nordman, 2012) och som även används inom EU. SEPEMOs systemgränsschema togs fram för att beskriva mindre värmepumpssystem som saknar de större geoenergianläggningarnas komplexitet. När detta schema tillämpades på geoenergianläggningarna i Annex52-studien blev det tydligt att SEPEMOs systemgränser är otillräckliga för att täcka in ta hänsyn till komplexiteten hos större geoenergianläggningar, där ofta både kyla och värme

nyttjas och där det även ofta förekommer värme- och kyltillskott från andra källor. En komplicerande faktor med SEPEMO-schemat är att systemgränserna inte är konsekventa för värmepumpar i värme- respektive kylsystem. Detta innebär bland annat att det inte går att utvärdera ett kombinerat prestandatal för värme- och kyl drift för alla systemgränser. Eftersom det är vanligt att större geoenergianläggningar levererar både värme och kyla, i många fall samtidigt, är detta en besvärande begränsning i SEPEMOs system.

Genom en litteraturstudie identifierades ytterligare fem publicerade systemgränsscheman utöver SEPEMOs schema, varav de flesta, liksom SEPEMO-schemat, huvudsakligen var framtagna för mindre och icke-komplexa värmepumpsystem. En översikt av dessa identifierade systemgränsscheman finns publicerade av Spitler och Gehlin (2019). Baserat på SEPEMOs grunder och med inspiration från de ytterligare fem systemgränsschemana utvecklades inom Annex 52-projektet ett nytt systemgränsschema för prestandautvärdering av större komplexa geoenergisystem (Gehlin och Spitler 2021). Resultatet blev ett systemgränsschema med sex nivåer som till vissa delar sammanfaller med SEPEMOs systemgränser, men som även innehåller en systemgräns för enbart markkretsen, och en systemgräns för att identifiera effekten av bufferttankar (Figur 1).



Figur. 1. Annex 52 systemgränsschema. Tillskottsvärme/-kyla kan förekomma på vilken systemnivå som helst, och markeras då med ett "+"-tecken för den och ovanstående systemnivåer.

Detta Annex52-schema implementerades i analyserna av samtliga geoenergianläggningar, och har fungerat väl för att beskriva komplexa geoenergisystem, olika geoenergikällor och systemkombinationer. Systemgränsschemat är testat och fungerar för både centraliserade och distribuerade värmepumpssystem. I centraliserade värmepumpssystem är värmepumpen/arna installerade centralt i ett maskinrum, medan värmepumparna i distribuerade värmepumpssystem sitter utspridda i lokalerna. I Sverige och stora delar av Europa är centraliserade värmepumpssystem det vanligaste, medan man i t ex USA huvudsakligen tillämpar distribuerade värmepumpssystem.

Viktiga kriterier för det framtagna systemgränsschemat har varit:

- Konsekventa systemgränser för värme respektive kyla, så att det är möjligt att utvärdera prestanda för SPF_{kyla} och $SPF_{värme}$ likväl som $SPF_{värme+kyla}$ för alla systemgränser
- En systemgräns för prestandautvärdering av själva markkretsen
- En systemgräns som gör det möjligt att utvärdera inverkan av en bufferttank på prestandan
- Flexibilitet att hantera flera värme- och kylkällor och att dessa energikällor kan placeras på olika ställen i systemet
- Flexibilitet att hantera olika typer av geoenergianläggningar, t ex högttemperaturborrhålslager (HT-BTES), systemkombinationer med fjärrvärme/kyla, frikyla m m.
- Viss överensstämmelse med SEPEMO-schemats systemgränser (specifikt systemgräns 1 och 2) eftersom dessa används inom EU
- Tillämpbart på både centraliserade och distribuerade värmepumpssystem

Det inom Annex 52 framtagna systemgränsschemat och hur det förhåller sig till SEPEMOs systemgränser och centraliserade respektive distribuerade värmepumpssystem finns beskrivet i Bilaga 3.

Resultat från långtidsmätningar

Långtidsmätningar (här definierat som minst en säsong) av 14 stycken svenska geoenergianläggningar har analyserats djupgående inom det svenska TERMO-projektet. Utöver detta har erfarenheter från fem svenska geoenergianläggningar utanför TERMO-projektet analyserats och diskuterats. Ytterligare 18 internationella geoenergianläggningar i USA, Storbritannien, Holland, Tyskland, Norge och Finland har studerats inom ramen för det internationella annexarbetet. Tabell 2 visar en översikt över de ingående anläggningarna. I Bilaga 5 finns de svenska och internationella geoenergianläggningarna markerade på kartor.

Geoenergianläggningarna har analyserats utifrån samtliga systemgränser i Annex 52-schemat (se ovan) där mätdata gått att få fram. Prestandatal har beräknats för både månatlig prestanda (Monthly Performance Factor, MPF) och årsprestanda (Seasonal Performance Factor, SPF) för kyla, värme respektive sammantaget för

värme och kyla. De framräknade prestandatalen har jämförts med projekterad prestanda. De flesta anläggningarna har även redovisat ytterligare prestandaindikatorer som bidragit till att identifiera och analysera egenskaper hos anläggningarna och eventuella avvikelser i driften.

Delrapporterna för samtliga svenska 14 anläggningar, samt de internationella anläggningarna har sammanställts och finns tillgängliga på IEA HPT Annex 52 hemsidan med individuella DOI-nummer:

<https://heatpumpingtechnologies.org/annex52/documents/>

Instrumentering

En slutsats från Annex52-arbetet är att datakvaliteten och upplösningen på data varierar betydligt och att det är vanligt med bristfällig datakvalitet och upplösning. Det förekommer ofta att data saknas för perioder pga driftsavbrott, underhåll eller mätarfel. Generellt saknas mätpunkter för att kunna följa upp samtliga önskvärda prestandaindikatorerna i anläggningarna. Vilka mätpunkter som finns och vilka som saknas varierar. Detta gäller även för anläggningar hos erfarna och engagerade fastighetsägare, med omfattande instrumentering och kunnig driftpersonal. En annan observation är att det är vanligt att data från flera mätpunkter klumpas ihop och redovisas som ett gemensamt värde, såsom att elanvändningen för till exempel flera värmepumpar eller alla fläktar och cirkulationspumpar på lastsidan läggs ihop i samma utdatavärde. Denna typ av klumpvärden försvårar utvärderingen av olika systemnivåer.

Eftersom det saknats riktlinjer för hur och vad som ska instrumenteras och mätas för att följa upp geoenergianläggningar är ovanstående observationer inte förvånande. Den guide för instrumentering och datainsamling som tagits fram genom Annex 52 har god möjlighet att harmonisera och förbättra situationen för befintliga och nya geoenergianläggningars instrumentering och datainsamling.

Tabell 2: Översikt över geoenergianläggningarna som ingått i Annex 52

#	Land	Placering	Byggnadsnamn	Byggnadstyp	Geoenergianläggning
1	Finland	Espoo	Aalto University	Universitet	Borrhål
2	Tyskland	Vechta	AOV	Kontor	Borrhål
3	Tyskland	Geisenkirchen	GEW	Kontor	Borrhål
4	Tyskland	Konstanz	KON	Flerbostadshus	Borrhål
5	Tyskland	Berlin	EFB	Kontor	Energipålar
6	Tyskland	Lüneburg	VGH	Kontor	Energipålar
7	Tyskland	Neumarkt	WGG	Skola	Energipålar
8	Holland	Utrecht	SKU OVT	Kontor /tågstation	Akvifer
9	Holland	Amsterdam	DeLaMar Theatre	Teater	Akvifer
10	Norge	Bergen	Scandic Flesland	Konferenshotell	Borrhål
11	Norge	Sarpsborg	Kalnes energy central	Sjukhuscampus	Borrhål + Fjärrvärme
12	Norge	Trondheim	KIWI Dalgård	Supermarket	Borrhål
13	Norge	Trondheim	Moholt 50/50	Bostad/Lokaler	Borrhål
14	Norge	Bergen	Sweco office building	Kontor	Borrhål
15	Sverige	Stockholm	Studenthuset	Kontor	Borrhål
16	Sverige	Emmaboda	Xylem	Industri	Högtemperatur-Borrhål
17	Sverige	Lund	Traktorn	Flerbostadshus	Borrhål + Fjärrvärme
18	Sverige	Lund	Briljanten	Flerbostadshus	Borrhål + Fjärrvärme
19	Sverige	Jönköping	Domstolen	Kontor	Akvifer
20	Sverige	Göteborg	Backadalen	Flerbostadshus	Borrhål + Fjärrvärme
21	Sverige	Uppsala	IKEA	Varuhus	Borrhål
22	Sverige	Umeå	NUS	Sjukhuscampus	Borrhål termiskt nät
23	Sverige	Stockholm	KTH Rocks	Flerbostadshus	Borrhål
24	Sverige	Stockholm	NPQ	Universitetscampus	Borrhål termiskt nät
25	Sverige	Stockholm	Rosenborg	Kontor	Akvifer
26	Sverige	Malmö	Polishuset	Kontor	DeepGreenCooling Borrhål
27	Sverige	Göteborg	Frölunda Club	Klubbhus	Borrhål
28	Sverige	Stockholm	Lindhagen	Kontor	DeepGreenCooling Borrhål
29	UK	Leicester	Hugh Aston Building	Universitet	Borrhål
30	UK	Cardiff	Grangetown	Förskola	Akvifer
31	UK	London	The Crystal	Kontor	Borrhål/Energipålar
32	USA	Atlanta	ASHRAE HQ	Kontor	Borrhål

Övergripande årsprestanda hos de analyserade anläggningarna

Totalt 116 år av mätdata har samlats in från de ingående studierna i Annex 52, varav ca 40 år är från svenska anläggningar. Tabell 3 summerar redovisade Seasonal Performance Factors (SPF) för olika systemgränser för de ingående anläggningarna. På grund av olikheter i systemuppbyggnad, instrumentering, datakvalitet och datatillgång har inte samtliga systemgränser kunnat utvärderas för alla geoenergianläggningar. Flest anläggningar har kunnat rapportera SPF för systemgränserna 1 (endast värmepumpsenheten), 2 (markkrets och värmepump) och 4 (markkrets, värmepump och bufferttank, men inte hela

distributionssystemet på lastsidan av värmepumpen) enligt Annex 52 systemgränsschema (se figur 1).

Generellt har de ingående anläggningarna höga SPF för värme och kyla för systemgränserna 1 och 2, dvs före distributionssystemet på lastsidan. 88% av de uppmätta driftåren har ett SPFHC1 på minst 3 och 23% av projektåren har SPCH1 som är 5 eller högre. 80% av de uppmätta driftåren har ett SPFHC2 på minst 3 och 34% av projektåren har SPCH2 som är 5 eller högre. För systemgränserna 3-5 på lastsidan minskar SPF betydligt, huvudsakligen på grund av energiåtgången för varmvattencirkulation, legionellskydd och el till fläktar och distributionspumpar.

Tabell 3: Sammanställning av rapporterade SPF för de ingående geoenergianläggningarna inom Annex 52 med systemgränser enligt Annex 52. (H = heating, C = cooling, HC = heating & cooling)

Systemgräns	Antal rapporterade projekt	Antal mätår	Intervall	Medelvärde	Median
SPFHC0	7	39	10.9-64.5	33	33.9
SPFHC1	15	66	1.54-7.2	4	3.8
SPFHC2	12	59	1.4-13	4.6	3.5
SPFHC3	3	26	0.8-12	5	5.5
SPFHC4	12	55	1.2-8.8	3.4	2.8
SPFHC5	4	21	1.1-3.7	1.9	2.8
SPFH0	11	54	3.1-171	43.1	33.4
SPFH1	17	65	1.7-7.2	4	3.7
SPFH2	14	61	1.5-6	3.7	3.6
SPFH3	7	35	0.4-5.5	3.3	4.4
SPFH4	11	48	1-4.4	2.7	2.8
SPFH5	6	27	1-38	8.1	2.4
SPFC0	10	50	13.5-231	69.4	51.7
SPFC1	10	41	1.1-28.5	7.2	4.4
SPFC2	13	57	1.6-128.1	23	6
SPFC3	2	12	0.6-4.3	2.9	3.1
SPFC4	5	25	0.5-5.8	2.5	2.4
SPFC5	5	26	0.5-18	5.6	2.3

Prestandapåverkande faktorer

Geoenergianläggningarna har analyserats för fler prestandaindikatorer är SPF, bland annat för månatliga Performance Factors (MPF), vilket finns redovisat i de enskilda rapporterna (<https://heatpumpingtechnologies.org/annex52/documents/>).

Prestandautvärderingarna för kortare tidsintervall än ett år (t ex MPF) visar att geoenergianläggningarnas prestanda är beroende av lasten, och att högre last resulterar i högre Performance Factor (PF). Anläggningarna presterar alltså bättre ju mer man belastar dem, vilket kan tyckas överraskande. Förklaringen är att ju lägre lastbehovet är under en tidsperiod, desto mer dominerande blir basanvändningen av el, såsom el till cirkulationspumpar, fläktar och andra internlast. När lasten ökar kommer dessa internlast att vara i stort sett lika stora, vilket innebär att deras betydelse för prestandan minskar. I vissa fall är förklaringen att värmepumparna och därmed hela geoenergisystemet är överdimensionerade i förhållande till lasten. Detta medför många korta drifttider vid låg last, vilket försämrar prestandan.

Långtidsmätningarna visar att energianvändningen för distributionen av värme och kyla i en fastighet har betydande negativ påverkan på geoenergianläggningarnas PF. Denna energianvändning för värme- och kyldistribution är inte specifik för just geoenergianläggningar, utan är i stort sett densamma för alla centrala värme- och kylsystem, inklusive fjärrvärme och fjärrkyla. Det finns goda skäl att vidare studera hur man kan minimera elanvändningen för värme- och kyldistributionen. Utveckling på detta område skulle komma alla typer av värme- och kylsystem till godo. Identifierade faktorer som sänker geoenergianläggningarnas prestanda är t ex el till legionellaskydd, varmvattencirkulation, lägsta flöde för cirkulationspumpar, el till intern styrning m m. Där finns potential för system- och komponentutveckling.

Referensdataset

Ett av de uttalade delmålen inom TERMO-projektet var att publicera ett komplett referensdataset med minst ett års omfattande mätdata från en av de svenska geoenergianläggningarna. Detta delmål uppfylldes 2019 genom tillgängliggörandet av ett referensdataset med mätdata från ett års mätningar för Studenthuset i Stockholm, med tillstånd från fastighetsägaren Akademiska Hus. Referensdatan finns tillgänglig som open-source-data tillsammans med en open-access-artikel om Studenthuset av Spitler och Gehlin (2019) i den vetenskapliga onlinetidskriften Energy. Ytterligare ett referensdataset med mätdata från Hugh Aston Building i London har tillgängliggjorts inom ramen för Annex 52 (Naicker and Rees 2018, Naicker and Rees 2020). De två referensdataseten kan laddas ner via nedanstående länkar:

Studenthuset: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/10/2020>

Hugh Aston Building: <http://archive.researchdata.leeds.ac.uk/272/>

Referensdatan är en värdefull resurs för framtida forskningsstudier, produktutveckling, validering av simuleringsmodeller och mätningar och är en viktig utkomst från projektet.

Osäkerhetsanalys

Litteraturstudien över långtidsmätningar av prestanda hos större geoenergianläggningar visade att det är mycket sällsynt med osäkerhetsanalyser av prestandatal för sådana anläggningar. För att hjälpa utförare att kvantifiera osäkerheten i prestandatal från långtidsmätningar har arbetsgruppen inom Annex 52 tagit fram en 54-sidig guide för beräkning av osäkerhet (Spitler et al. 2021). Den svenska arbetsgruppen har bidragit väsentligt till denna guide, som nu finns publicerad och nedladdningsbar från IEA HPT Annex 52 hemsida (<https://doi.org/10.23697/m2em-xq83>).

Instrumentering och datainsamling

En 64-sidig guide för instrumentering och datainsamling för långtidsmätning av prestanda hos geoenergianläggningar (Davis et al. 2021) har tagits fram inom det internationella arbetet, med väsentligt bidrag från den svenska arbetsgruppen. Dokumentet ger en översikt över den typ av instrumentering som vanligtvis krävs för att mäta långtidsprestanda hos större geoenergianläggningar och möjliggöra driftövervakning och prestandaförbättringar. Guiden innehåller också information om värmemätare och distribuerat temperaturmätning i geoenergi-studier, och tar upp utmaningar inom datahantering och metoder att möta dessa. Guiden finns publicerad och nedladdningsbar från IEA HPT Annex 52 hemsida (<https://heatpumpingtechnologies.org/annex52/wp-content/uploads/sites/60/2021/12/instrumentationguidelinefinal.pdf>).

Analys och redovisning av prestanda och prestandaindikatorer

Den övergripande prestandan hos geoenergianläggningar beror av prestandan hos markkretsen, värmepumpsenheten och distributionskretsens prestanda, inklusive eventuella tillskottskällor för värme och kyla. Inom TERMO-projektet och Annex 52 har vi identifierat och rekommenderar prestandaindikatorer som ger möjlighet att utvärdera prestandan för alla dessa tre systemnivåer utifrån om det stämmer med projekteringen av anläggningen, likväl som för feldetektion, systemoptimering och framtida system- och komponentutveckling. Tabell 2 visar en sammanställning av lämpliga prestandaindikatorer på olika systemnivåer uppdelade utifrån syftet med prestandauppföljningen.

En guide för analys och redovisning av prestanda och prestandaindikatorer hos större geoenergianläggningar har arbetats fram gemensamt inom Annex 52, med bidrag från både de svenska och internationella deltagarna. Dokumentet listar och definierar en rad olika prestandaindikatorer för både öppna (t ex akviferlager) och slutna (t ex borrhålslager) geoenergisystem, och inom de olika systemgränserna, och förklarar hur och varför de används.

I skrivande stund är rapporten inte helt färdigställd, men kommer att färdigställas för slutredovisning internationellt i början av 2022 och kommer sedan att

publiceras på IEA HPT Annex 52 hemsida tillsammans med övriga projektrapporter.

Tabell 2: Översikt av olika prestandaindikatorer på olika systemnivå och för olika syften.

	Stämmer med projektering? (Commissioning)	Funkar det bra? (Felsök)	Kan systemet förbättras? (Optimering)	Kan framtida system förbättras? (Utveckling)
Markkälla (Systemnivå 0)	Stämmer uppmätta kollektorlaster, flöden, temperaturer och tryckfall med projekterade värden?	Vilka är de uppmätta performance factors för markkretsen (nivå 0) över år, månad, dag? Temperaturer och tryckfall?	Kan markkretsens pumpar och flödesstyrningsstrategier justeras? Finns tillräcklig fördröjning i on-off mode? Är börvärdena (set-points) optimala?	Kan borrhålsmotståndet minskas? Kan bättre hydraulisk utformning och lägre tryckfall uppnås?
Värmepump (Systemnivå 1)	Stämmer uppmätta fluidtemperaturer och flöden till/från VP med projekterade värden?	Vilka är de uppmätta performance factors för värmepumpen (nivå 1) över år, månad, dag? System Efficiency Index (SEI)? Temperaturer och tryckfall?	Kan styrningen ändras (t ex med styrkurvor och börvärden)? Integrering av VP-styrning med VS-styrning? Värmepumpsbyte?	Kan bättre anpassning till verkliga laster erhållas i projekteringsskedet? Kan den interna styrningen förbättras?
System (Systemnivå 2-5)	Stämmer uppmätta temperaturer, flöden, energisignaturer, värme- och kyllaster och tilläggsvärme/kyla med projekterade värden?	Vilka är de uppmätta performance factors på systemnivå (nivå 2-5) över år, månad, dag? Temperaturer och tryckfall? Samtidig värme och kyla?	Är driftscheman och styrningens börvärden för tilläggsvärme/kyla optimala?	Kan bättre hydraulisk utformning och lägre tryckfall uppnås? Kan komponenter och styrfunktioner förbättras?

Diskussion

TERMO-projektet och Annex 52 har samlat in och analyserat en stor mängd data kring långtidsprestanda hos större geoenergianläggningar i Sverige och internationellt och har bidragit med nytt forskningsunderlag, nya generaliserbara insikter om geoenergianläggningars prestanda, och konkreta råd för hur geoenergianläggningars prestanda ska mätas och utvärderas. Resultaten har stor potential att underlätta för fastighetsägare och konsulter att dimensionera och instrumentera geoenergianläggningar på ett konsekvent, kvalitativt och kostnadseffektivt sätt, samt att använda SÖ-data för att verifiera och optimera driften hos anläggningarna.

Det utvecklade systemgränsschemat och de rekommendationer för bestämning och analys av relevanta prestandaindikatorer som tagits fram inom projektet hjälper fastighetsägare och drifttekniker att drifva geoenergianläggningarna effektivt och identifiera och åtgärda eventuella fel och onödiga energiförluster. Detta har varit efterfrågat både i Sverige och i andra länder.

Viktigt att notera är att geoenergianläggningarna som ingått i mätstudierna inom Annex 52 varierar stort i utformning och vilken typ av byggnad de betjänar (bostäder, kontor, sjukhus, industri m m). De har inte valts ut för att vara specifikt representativa geoenergianläggningar eller för att de fungerar särskilt bra eller dåligt. De anläggningar som ingått i studien har valts utifrån att det har varit möjligt att få ut längre mätserier från driften. Underlaget är även för diversifierat och begränsat för att fungera som statistiskt underlag för generella slutsatser om geoenergianläggningars prestanda i stort. En del anläggningar har haft drifts- och injusteringsproblem och några har visat sig ha andra driftsförutsättningar i verkligheten jämfört med vad de projekterats för. Vi har dock kunnat konstatera att de ingående anläggningarna i stort sett har fungerat tillfredsställande ur ett fastighetsägarperspektiv, men att det i samtliga studerade fall finns potential för ytterligare driftförbättring och optimering av anläggningarna.

Även om dataunderlaget är för litet och diversifierat för att göra statistiska generaliseringar om geoenergianläggningars prestanda, så utgör fallstudierapporterna från Annex 52-projekten ett värdefullt underlag med erfarenheter från större geoenergianläggningar för många olika driftsfall, vilka PF man kan förvänta sig för olika drifttyper och hur dessa varierar över månader och år beroende på lastvariationer.

Alla de svenska geoenergianläggningarna och alla utom en (den amerikanska) av de internationella geoenergianläggningarna inom Annex 52 har varit centraliserade värmepumpsystem, där värmepumpen är placerad i ett maskinrum som serverar hela byggnadens värme- och kyldistributionssystem. Detta är det vanligaste sättet att bygga värmepumpsanläggningar i Sverige och Europa. För oss som medvetet eller omedvetet förutsätter centraliserade värmepumpsystem är det lätt att tänka att distributionsförluster på lastsidan inte bör beaktas eftersom de är desamma oavsett vilken värme- eller kylteknik som betjänar byggnaden. Med detta resonemang skulle bara systemgränserna 0, 1 och 2 vara av intresse för prestandautvärdering. I t ex USA är det dock vanligast med distribuerade

värmepumpssystem, där flera värmepumpsenheter är utplacerade i byggnaden. Detta innebär att distributionsförluster huvudsakligen uppstår i kretsen före värmepumpsenheten, d v s inom systemgräns 2. Så vitt vi känner till finns ingen systematisk jämförelse av effektiviteten hos centraliserade och distribuerade värmepumpssystem, men för att göra en sådan jämförelse behöver både distributionen på källsidan och lastsidan beaktas. En jämförelse mellan den amerikanska byggnaden med distribuerat värmepumpssystem (Southard et al 2014) och den svenska byggnaden Studenthuset (Spitler och Gehlin 2019, Spitler och Gehlin 2021, Spitler och Gehlin 2022) visar betydligt större distributionsförluster i det centraliserade systemet än i det distribuerade. Detta är en anekdotisk jämförelse, så ytterligare jämförande studier skulle behövas för att belysa energianvändningen för värme- och kyldistributionen i värmepumpssystem. En sådan studie skulle ha potential att minska onödig energianvändning i byggnader på bred front.

Det vore även värdefullt med fler och fortsatta långtidsmätstudier av större geoenergianläggningar av olika typ för att verifiera resultat och arbeta fram optimerade driftstrategier och minimera distributionsförluster. Inom Annex 52 har fallstudierna pekat ut förekommande brister i de analyserade projekten. Dessa iakttagelser är angivna som "Findings" i fallstudierapporterna och innehåller i vissa fall förslag till åtgärder och potentiella optimeringar. Det vore värdefullt att följa upp vilka åtgärder som gjorts efter det att Annex 52 har avslutats och kartlägga och kvantifiera vad åtgärderna resulterat i avseende anläggningarnas prestanda.

Ett framtida IEA-annex kring styr- och övervakningssystem och automatiserad driftoptimering och feldetektering som tar avstamp i resultaten från Annex 52 vore önskvärt. I ett sådant framtida annex bör industripartners från leverantörer av komponenter och SÖ-system likväl som fastighetsägare vara involverade tillsammans med konsultbransch och akademi.

Publikationslista

Den svenska arbetsgruppen (konsortiet) har bidragit med följande publikationer under och genom projektet:

Fallstudierapporter inom IEA HPT Annex 52:

Andersson, O., Rydell, L., Håkansson, N. (2021). Case study report for the Xylem HT-BTES plant in Emmaboda, Sweden. Efficiency by using heat pumps for extraction of stored heat. IEA HPT Annex 52 – Long-term performance monitoring of GSHP systems serving commercial, institutional and multi-family buildings. <https://doi.org/10.23697/j2hk-4x61>

Gehlin, S., Spitler, J.D. (2021). Case study report for Studenthuset, Stockholm, Sweden. Long-term performance analysis of the GSHP system for a student union building. IEA HPT Annex 52 – Long-term performance monitoring of GSHP systems serving commercial, institutional and multi-family buildings. <https://doi.org/10.23697/pmr0-0778>

Javed, S., Zhang, H., Liu, H. (2021). Case study report for a small Clubhouse building in Gothenburg, Sweden. IEA HPT Annex 52 – Long-term performance monitoring of GSHP systems serving commercial, institutional and multi-family buildings. <https://doi.org/10.23697/8n0p-3n24>

Javed, S., Liu, H., Zhang, H. (2021). Case study report for Malmö Police House, Sweden. IEA HPT Annex 52 – Long-term performance monitoring of GSHP systems serving commercial, institutional and multi-family buildings.

Javed, S., Zhang, H., Liu, H., Gräslund, J. (2021). Case study report for Entré Lindhagen, Sweden. IEA HPT Annex 52 – Long-term performance monitoring of GSHP systems serving commercial, institutional and multi-family buildings.

Walfridson, T. (2021). Case study report for Domstolen, Sweden. IEA HPT Annex 52 – Long-term performance monitoring of GSHP systems serving commercial, institutional and multi-family buildings. <https://doi.org/10.23697/znp0-a619>

Walfridson, T. (2021). Case study report for IKEA Uppsala, Sweden. IEA HPT Annex 52 – Long-term performance monitoring of GSHP systems serving commercial, institutional and multi-family buildings. <https://doi.org/10.23697/vda5-8s77>

Walfridson, T. (2021). Case study report for Backadalen, Göteborg, Sweden. IEA HPT Annex 52 – Long-term performance monitoring of GSHP systems serving commercial, institutional and multi-family buildings.

Walfridson, T. (2021). Case study report for Norrlands Universitetssjukhus, Umeå, Sweden. IEA HPT Annex 52 – Long-term performance monitoring of GSHP systems serving commercial, institutional and multi-family buildings.

Mazzotti-Pallard, W. (2021). Case study report for Forskningen, Stockholm, Sweden. Three plus energy buildings (by design) with GSHPs, variable-length

boreholes, ventilation recovery and pre-heating, wastewater recovery & PV panels. IEA HPT Annex 52 – Long-term performance monitoring of GSHP systems serving commercial, institutional and multi-family buildings.

<https://doi.org/10.23697/dfs2-v474>

Lazzarotto, A. (2021). Case study report for Frescati NPQ, Sweden. IEA HPT Annex 52 – Long-term performance monitoring of GSHP systems serving commercial, institutional and multi-family buildings.

<https://doi.org/10.23697/emqr-m785>

Abuasbeh, M. (2021). Case study report for Rosenborg, Sweden. GSHP installation coupled with aquifer thermal energy storage ATES supplying heating and cooling for two commercial buildings. IEA HPT Annex 52 – Long-term performance monitoring of GSHP systems serving commercial, institutional and multi-family buildings. <https://doi.org/10.23697/6h7v-bt33>

Ekestubbe, J. (2021). Case study report for Brf Briljanten, Lund, Sweden. Long-term performance analysis of the GSHP system for a multi-family building. IEA HPT Annex 52 – Long-term performance monitoring of GSHP systems serving commercial, institutional and multi-family buildings.

<https://doi.org/10.23697/te3s-cb70>

Ekestubbe, J. (2021). Case study report for Kv Traktorn, Lund, Sweden. Long-term performance analysis of the GSHP system for an office building. IEA HPT Annex 52 – Long-term performance monitoring of GSHP systems serving commercial, institutional and multi-family buildings.

<https://doi.org/10.23697/92qm-rr10>

Övriga rapporter inom IEA HPT Annex 52 som den svenska arbetsgruppen har bidragit till:

Davis, M.J., Martinkauppi, I., Witte, H., Berglöf, K., Vallin, S. (2021). Guideline for Instrumentation and Data – Final Document. IEA HPT Annex 52 – Long-term performance monitoring of GSHP systems serving commercial, institutional and multi-family buildings. <https://doi.org/10.23697/tgr4-qn89>

Spitler, J.D., Berglöf, K., Mazzotti-Pallard, W., Witte, H. (2021). Guideline for Calculation of Uncertainties – Final Document. IEA HPT Annex 52 – Long-term performance monitoring of GSHP systems serving commercial, institutional and multi-family buildings. <https://doi.org/10.23697/m2em-xq83>

Gehlin, S., Spitler, J.D., Witte, H., Andersson, O., Berglöf, K., Davis, M.J., Bockelmann, F., Javed, S., Walfridson, T. (2022). Guide for analysis and reporting of GSHP system performance – Final Document. IEA HPT Annex 52 – Long-term performance monitoring of GSHP systems serving commercial, institutional and multi-family buildings. (*Ännu ej publicerad*)

Gehlin, S., Spitler, J.D., (2022). GSHP Long-term performance - literature review – Final Document. IEA HPT Annex 52 – Long-term performance monitoring of

GSHP systems serving commercial, institutional and multi-family buildings.
(*Ännu ej publicerad*)

Vetenskapliga artiklar:

Spitler, J.D., and Gehlin, S. 2019: Measured performance of a mixed-use commercial-building ground source heat pump system in Sweden. *Energies*, 2019. 12 (10). <https://doi.org/10.3390/en12102020> . Open access paper and data.

Liu, H., H. Zhang, and S. Javed. (2020). Long-Term Performance Measurement and Analysis of a Small-Scale Ground Source Heat Pump System. *Energies* 2020, 13 (17), 4527; <https://doi.org/10.3390/en13174527> Open access paper.

Abuasbeh, M., Acuña, J., Lazzarotto, A., & Palm, B. (2021). Long term performance monitoring and KPIs' evaluation of Aquifer Thermal Energy Storage system in Esker formation: Case study in Stockholm. *Geothermics*, 96, 102166. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102166> Open access paper.

Ramstad, K.R., Justo-Alonso, M., Acuna, J., Andersson, O., Sokuca, M., Håkansson, N., Midttømme, K., Rydell, L. (2021). The borehole thermal energy storage at Xylem, Sweden- First distributed temperature measurements. *Submitted to Bull. Engineering Geology and Environment*

Vetenskapligt granskade konferensartiklar:

Spitler, J.D., and Gehlin, S. (2022). Performance of a mixed-use ground source heat pump system in Stockholm. *Submitted to REHVA 14th HVAC World Congress Clima 2022, April 22nd -26th May 2022, Rotterdam, The Netherlands.*

Gehlin, S., and Spitler, J.D. (2021). Half-term Results from IEA HPT Annex 52 – Long-term Performance Monitoring of Large GSHP Systems. *Proceedings of the 13th IEA Heat Pump Conference. April 26-29, 2021 Jeju, Korea.*

Spitler, J.D., And Gehlin, S. (2021). Three Years' Performance Monitoring of a Mixed-Use Ground Source Heat Pump System in Stockholm. *Proceedings of the 13th IEA Heat Pump Conference. April 26-29, 2021 Jeju, Korea.*

Walfridsson, T., Larsson, M., Benson, J., Räftegård, O., Gustafsson, O., Haglund-Stignor, C., Axelsson, L. and Tiljander, P. (2021). Long-term evaluation of an office building with large-scale heat pump and aquifer system in southern Sweden. *Proceedings of the 13th IEA Heat Pump Conference. April 26-29, 2021 Jeju, Korea.*

Lazzarotto A, Mazzotti Pallard W, Abuasbeh M, Acuña J. (2020). Performance evaluation of borehole thermal energy storage through energy and exergy analysis. *Proceedings World Geothermal Congress 2020. Reykjavik, Iceland, April 26 – May 2, 2020.*

Gehlin, S. and J.D. Spitler. (2019). IEA HPT Annex 52 – Measuring GSHP system long-term performance. European Geothermal Congress 2019 in Den Haag, the Netherlands. June 11-14 2019.

https://hvac.okstate.edu/sites/default/files/pubs/papers/2019/Gehlin_and_Spitler_2019_EGC_A52.pdf

Abuasbeh, M., Acuña, J. (2018). ATES System Monitoring Project, First Measurement and Performance Evaluation: case study in Sweden. IGSHPA Research Track 2018, Stockholm, Sweden, September 18th 2018.

<https://shareok.org/handle/11244/301547>

Andersson, O., Rydell, L. (2018). The HT-BTES in Emmaboda, Sweden – Lessons learned and Further Actions. Enerstock 2018, Adana, Turkey, April 2018

Gehlin, S., Spitler, J.D., Larsson, A., Annsberg. (2018). Measured Performance of the University of Stockholm Studenthuset Ground Source Heat Pump System. Enerstock 2018, Adana, Turkey, April 2018.

https://hvac.okstate.edu/sites/default/files/Gehlin_et_al_2018_Enerstock.pdf

Artiklar och texter i branschtidskrifter:

Gehlin, S., and Spitler, J. D.: Monitoring of more than 30 GSHP systems in Europe and the USA. HPT Magazine 2/2018, p. 17.

Gehlin, S., and Spitler, J. D.: Bibliography points at the difficulty in GSHP system performance comparison. HPT Magazine 1/2019, p. 16.

Gehlin, S.: Prestanda i större anläggningar mäts i sju länder. Svensk Geoenergi #1/2019, p. 27.

Gehlin, S., and Spitler, J. D.: Annex 52 progress report (Two sets of open access data available for large commercial GSHP systems). HPT Magazine 3/2019, p. 18-19.

Gehlin, S. 2019. Internationella forskningssamarbeten om geoenergianläggningarskvalitet och prestanda. KYLA&VÄRME, 8/2019.

Gehlin, S., and Spitler, J. D.: Annex 52 progress report (GSHP system boundary schema developed). HPT Magazine 1/2020.

Gehlin, S., and Spitler, J. D.: Annex 52 progress report (Uncertainty and instrumentation guidelines). HPT Magazine 3/2020.

Gehlin, S., and Spitler, J. D.: Annex 52 progress report. HPT Magazine 1/2021.

Andersson, O., Håkansson, N., Rydell, L. (2021) Värmepumpar räddade Xylems värmelager. Energi & Miljö nr 5, 2021

Andersson, O., Rydell, L., Håkansson, N. (2021) Heat pump system improved the efficiency of the HT- BTES system at Xylem in Emmaboda, Sweden. HPT Magazine, no 2. 2021

Andersson, O., Rydell, L., Håkansson, N. (2021) Heat pumps rescued Xylem's heat storage facility in Emmaboda, Sweden. The REHVA European HVAC Journal. Vol. 58, Issue 4, Aug. 2021

Gehlin, S., and Spitler, J. D.: Annex 52 progress report. HPT Magazine 3/2021.

Övriga publikationer relaterade till TERMO-projektet och där konsortiedeltagare har bidragit med material och input:

Maura Ross and Johar Mahdjouba, Oct. 18, 2018. Benefits of Adding a Heat Pump to an Existing High Temperature Borehole System for Industrial Waste Heat Use. Course G7013 Naturvärme, Luleå Technical University (Course work), 13 pages 2018.

Rao Sagar, 2019. On the performance of waste heat capture and heat pumps for a large-scale industrial HT-BTES. A case study of Xylem.Inc, Emmaboda. Linköping University, Energy Systems Department ISRN: LIU-IEI-TEK-A--19/03580—SE.

Mazzotti W, Abuasbeh M. (2019) Literature study: Exergy analys i geoenergilager: ett nytt KPI i geoenergisystem. Internal report.

Liu, H., H. Zhang (2020). Performance Evaluation of Ground Heating and Cooling Systems - Long-term performance measurements of two case buildings. MSc Thesis, university of Lund, Lund, Sweden, 2020.

Nilsson, J. (2020). Potentiella miljörisker med geoenergisystems temperaturpåverkan i mark och grundvatten. MVEC 02 Examensarbete för kandidatexamen 15 poäng. Miljövetenskap, Lunds Universitet.

Nilsson, E., (2020). Borehole Thermal Energy Storage Systems for Storage of Industrial Excess Heat - Performance Evaluation and Modelling. Linköping Studies in Science and Technology, Linköping University. Licentiate Thesis No. 1882. ISBN: 978-91-79-902-6, ISSN: 0280-7971

Marcus Norman, M., and Monthan, F. (2020). Heat Pump Data Performance Analysis of Large Scale Ground Source Heat Pump Systems. Kandidatexamensarbete. KTH.

Börjesson, M. (2020). Performance evaluation of ground source heat pump heating systems in Stockholm. Examensarbete Civ Ing. KTH, Skolan för industriell teknik och management (ITM).

Referenser, källor

Davis, M.J., Martinkauppi, I., Witte, H., Berglöf, K., Vallin, S. (2021). Guideline for Instrumentation and Data – Final Document. IEA HPT Annex 52 – Long-term performance monitoring of GSHP systems serving commercial, institutional and multi-family buildings. <https://doi.org/10.23697/tgr4-qn89>

Gehlin, S., O. Andersson. (2019). Geothermal Energy Use, Country Update for Sweden. Proceedings of the European Geothermal Congress 2019. De Hague, the Netherlands, June 11-14 2019.

Gehlin, S., O. Andersson, J-E. Rosberg. (2020). Country Update for Sweden 2020. Proceedings World Geothermal Congress 2020.

Gehlin, S., and Spitler, J.D. (2021). Half-term Results from IEA HPT Annex 52 – Long-term Performance Monitoring of Large GSHP Systems. Proceedings of the 13th IEA Heat Pump Conference. April 26-29, 2021 Jeju, Korea.

Gleeson CP, Lowe R. (2013). Meta-analysis of European heat pump field trial efficiencies. Energy Build. 2013;66(0):637-47.

IEA HPC.: Annex 52 - Long term performance measurement of GSHP Systems serving commercial, institutional and multi-family buildings. 2019
<https://heatpumpingtechnologies.org/annex52/>

Naicker, S. S. and S. J. Rees. (2018). Performance Analysis of a Large Geothermal Heating and Cooling System. Renewable Energy 122:429–442. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.099> (*Measurement data available as open access at <http://archive.researchdata.leeds.ac.uk/272/>*).

Naicker, S. S. and S. J. Rees. (2020). Long-term high frequency monitoring of a large borehole heat exchanger array. Renewable Energy 145 (2020) 1528–1542. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.008> (*Measurement data available as open access at <http://archive.researchdata.leeds.ac.uk/272/>*).

Nordman, R. (2012). Seasonal performance factor and monitoring for heat pump systems in the building sector, SEPOMO-Build, Final Report. Intelligent Energy Europe 2012.

Southard, LE., X. Liu and J. D. Spitler. 2014. Performance of HVAC Systems at ASHRAE HQ – Part 2. ASHRAE Journal 56(12): 12-23.

Spitler JD. (2020). Addressing the building energy performance gap with measurements. Science and Technology for the Built Environment. 2020;26(3):283-4.

Spitler, J.D., and Gehlin, S. 2019: Measured performance of a mixed-use commercial-building ground source heat pump system in Sweden. Energies, 2019. 12 (10). <https://doi.org/10.3390/en12102020> . Open access paper and data.

Spitler, J.D., And Gehlin, S. (2021). Three Years' Performance Monitoring of a Mixed-Use Ground Source Heat Pump System in Stockholm. Proceedings of the 13th IEA Heat Pump Conference. April 26-29, 2021 Jeju, Korea.

Spitler, J.D., and Gehlin, S. (2022). Performance of a mixed-use ground source heat pump system in Stockholm. *Submitted to REHVA 14th HVAC World Congress Clima 2022, April 22nd -26th May 2022, Rotterdam, The Netherlands.*

Spitler, J.D., Berglöf, K., Mazzotti-Pallard, W., Witte, H. (2021). Guideline for Calculation of Uncertainties – Final Document. IEA HPT Annex 52 – Long-term performance monitoring of GSHP systems serving commercial, institutional and multi-family buildings. <https://doi.org/10.23697/m2em-xq83>

Svenskt Geoenergicentrum. (2018). Riktlinjer för Mätning och Uppföljning av Geoenergisystem. Tillgänglig via <https://geoenergicentrum.se/publikationer-2/riktlinjer-och-rad/>

Bilagor

1. Administrativ bilaga
2. Annex 52 Legal Text
3. Annex 52 Systemgränsschema
4. Annotated Bibliography – Long-term performance of GSHP systems
5. Karta med de svenska och internationella geoenergianläggningar som analyserats inom Annex 52
6. Möten och mötesdeltagare 2018-21