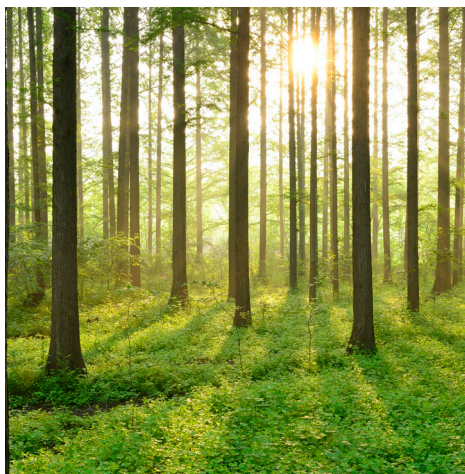


FJÄRRKYLA – FRAMTIDA DESIGN OCH STANDARD

RAPPORT 2016:288



Fjärrkyla - Framtida design och standard

JAN HENRIK SÄLLSTRÖM

ISBN 978-91-7673-288-5 | © 2016 ENERGIFORSK

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Projektet har tittat på hur marktemperatur påverkar fjärrkyletemperaturen och även hur isolerade respektive oisolerade fjärrkyleledningar påverkar mediets temperatur.

Bland annat har skillnader i energiförluster mellan oisolerade och isolerade ledningar vid olika dimensioner studerats. Att isolerade ledningar minskar kylförlusten från ledningarna kan anses självklart, men att ha oisolerade ledningar kan vara fördelaktigt då de kan kylas av marken under vissa delar av året. Distributionssystem har modellerats för att testa olika varianter med oisolerade och isolerade ledningar på fram- respektive returledningen.

En metod för att göra en ekonomisk bedömning huruvida det är rätt att isolera fram-, retur- eller bägge -ledningarna har tagits fram. Metoden baseras på framtida besparingar i form av minskade energiförluster. Projektet har tagit fram rekommendationer kring förläggningssätt av fjärrkyleledningar.

Projektkoordinator har varit SP och övriga projektpartners har varit Göteborg Energi, Vitec och Telge Nät. Förutom författaren har Marcus Kempe (SP), Simon Hulander (Göteborg Energi AB), Gustav Edlund och Jerker Vallbo (Vitec), Elisabeth Flygt (SP) samt Rolf Siwertz (Telge Nät) deltagit i projektet. Referensgruppen har bestått av Joakim Marklund (Fortum Värme samägt med Stockholm stad) som även var referensgruppens ordförande, Majid Mohammed (Vattenfall Heat Nordic AB), Anders Fransson (Göteborg Energi AB), Niclas De Lorenzi (Fortum Värme samägt med Stockholm stad), Mats Svarc (Mälarenergi AB), Anders Pedersen (FVB AB), Jan-Åke Åström (Öresundskraft AB)

Projektet ingår i forskningsprogrammet Fjärrsyn som finansieras av Svensk Fjärrvärme och Energimyndigheten. Forskningen inom Fjärrsyn ska stärka fjärrvärme och fjärrkyla, uppmuntra konkurrenskraftig och affärs- och teknikutveckling och skapa resurseffektiva lösningar för framtidens hållbara energisystem till nytta för fjärrvärmebranschen, kunderna, miljön och samhället i stort.

Jan Berglund, Ordförande för Svensk Fjärrvärmes tekniskråd

Rapporten redovisar projektets resultat och slutsatser. Publicering innebär inte att Fjärrsyns styrelse eller Svensk Fjärrvärme har tagit ställning till innehållet.

Sammanfattning

Dagens kunskapsläge gällande distributionssystem för fjärrkyla har kartlagts. Effekten av isolering och positionering av fjärrkylaledningar på temperaturfälten har analyserats genom mätningar av temperaturer i mark kring olika ledningar och beräkningar av temperaturfält och förluster. Temperaturer i mark har uppmätts på två platser i Sverige på olika djup och under olika marktypskikt i form av asfalt, plattor eller gräs. På en solbelyst plats kan det i medel under en sommarvecka bli över 20 °C i marken på djup mellan 0,6-0,9 m.

Används väl isolerade fjärrkylaledningar spelar läggning under solbelysta ytor eller närheten av fjärrvärmeledningar mindre roll. Om man använder oisolerade ledningar kan det vara fördelaktigt att lägga fjärrkylaledningar på gatans skuggsida och då de skall läggas parallellt med fjärrvärmeledningar kan returledningarna läggas närmast varandra.

Skillnaden i energiförluster mellan oisolerade och isolerade ledningar för transport av kyla har studerats. Energiförluster från både fram- och returledning och även enbart framledning har studerats och relaterats till transporterad energi. Om man ser till de totala förlusterna är det under varma sommar dagar fördelaktigt att ha båda ledningarna isolerade, men under höst, vår och vinter är det fördelaktigt att ha en oisolerad returledning som kan kylas av marken. För en ledning av dimension Ø180 mm är det under en varm svensk sommarvecka mer än fem gånger bättre att ha isolerade ledningarna med polyuretan isolering och polyeten mantel Ø250 mm än ingen isolering alls. Vidare är det mer än dubbelt så bra än att enbart ha isolerad framledningen.

De relativa förlusterna är större för ledningar med mindre dimensioner än för större. De relativa totala förlusterna under en varm svensk sommarvecka för isolerade ledningar med Ø180/250 mm är i samma nivå som för oisolerade ledningar av dimension Ø450 mm.

Kopplade termer för värmetransport till mark och mellan fram- och returledning har applicerats i ett simuleringsprogram som modellerar distributionssystem för fjärrkyla. Energiförluster och framledningstemperaturer har beräknats för ett existerande distributionssystem för fjärrkyla. Två representativa perioder under sommar och höst har analyserats. Vidare har även förluster beräknats för om både fram- och returledning eller enbart framledningen vore isolerade. Kopplingen och värmeutbytet mellan fram- och returledning blir väsentligt mindre om enbart framledningen isoleras och ytterligare en storleksordning mindre om båda ledningarna isoleras jämfört med oisolerade ledningar.

En metod för att bedöma om det är ekonomiskt rätt att förlägga oisolerade ledningar, både isolerade fram- och returledningar eller enbart isolerad framledning har presenterats. Den baseras på nuvärde av framtida besparingar i form av minskade energiförluster. En extra investeringskostnad för isolering av distributionssystemet har uppskattat och en kostnad för att producera kyla jämte en kalkylränta har antagits.

Eftersom kylfunktionen ute hos kunderna måste fungera tillfredställande, bör alternativen att ha isolerad eller oisolerad framledning ställas mot varandra. De mest attraktiva materialvalen torde vara polyetenrör eller traditionella prefabricerade fjärrvärmerör med stålmedierör och polyuretan isolering med mantel av polyeten. Polyetenrören kan förses med isolering av antingen polyuretan med mantel eller EPS-isolering, eller kan vara utan isolering.

Summary

A survey of the state of the art regarding distribution systems for district cooling has been done. The effect of insulation and positioning of the cooling pipes on temperature distributions have been analysed by measuring temperatures in the ground along pipelines and calculations of temperature fields and losses. Temperatures in the ground have been measured at two locations in Sweden at different depths and under different type of surfaces in the form of asphalt, paving or grass. On a sunlit place during a summer week, it can be over 20 °C in the soil at a depth of 0.6-0.9 m.

The positioning of well-insulated district cooling pipes under sunlit surfaces or near district heating pipes does not significantly affect losses. For uninsulated lines, it is advantageous to lay the cooling pipes at the street's dark side, and when they must be parallel with district heating pipes the return lines can be laid closest to each other.

The difference in energy losses between uninsulated and insulated pipelines for the transport of cooling has been studied. Energy losses from both the flow and return line and also only the flow line have been studied and related to the transported energy. If one takes the total losses into account it is beneficial to have both lines insulated during warm summer days, but during the autumn, spring and winter, it is beneficial to have an uninsulated return line which can be cooled down by the ground. For a warm Swedish summer week and a pipeline of dimension Ø180 mm, it is more than five times better to have insulated pipes with polyurethane insulation and polyethylene casing Ø250 mm than no insulation at all. It is also more than twice as good as to have only an insulated flow line.

The relative losses are greater for narrower pipelines than for pipes with larger diameters. The relative total losses under a warm Swedish summer week for insulated pipelines with Ø180/250 mm are on the same level as uninsulated pipelines of the dimension Ø450 mm.

Coupled terms for heat transport to the soil and between the flow and return line have been applied in a simulation program modelling the cooling distribution system. Energy losses and flow temperatures have been calculated for an existing cooling distribution system. Two representative periods during the summer and fall have been analysed. Furthermore, losses have been calculated assuming that both the flow and return lines or only the flow line has been insulated. The coupling and the heat exchange between the flow and return lines will be significantly less if only the flow line is insulated and further an order of magnitude less if both lines are insulated as compared to uninsulated pipes.

A method has been presented to determine if it is financially beneficial to lay uninsulated pipelines, both insulated flow and return pipes or only insulated flow pipes. It is based on the present value of future savings in terms of reduced energy losses. Extra investment costs for the insulation of the distribution system have been estimated and the costs to produce cooling together with a discount rate have been assumed.

Since the cooling must be functioning properly at the customers, the alternatives of using insulated or uninsulated flow lines should be set against each other. The most attractive choices of materials have been preliminary identified as polyethylene pipes or traditional prefabricated insulated pipelines with service pipes of steel and polyurethane insulation protected by a casing of polyethylene. Polyethylene pipes can be insulated by either polyurethane with casing of polyethylene or EPS insulation, or may be without insulation.

Innehållsförteckning

1	Introduktion	9
1.1	Syfte och mål	9
1.2	Avgränsningar	10
1.3	Beteckningar	10
2	Litteraturstudier	11
2.1	Riktlinjer och rekommendationer	11
2.2	Forskning om fjärrkyla	11
2.3	Studier av värmetransport	12
2.4	Relevanta studier om fjärrvärme	13
2.5	Isolering	13
2.6	Korrosion	13
2.7	Slutsatser av litteraturstudier	13
3	Fältmätplatser	14
3.1	Almedal	14
3.2	Kista	18
4	Mätsystem	20
5	Värmetransport	21
6	Mätresultat	23
6.1	Almedal	23
6.2	Kista	31
6.3	Karakteristiska temperaturer	32
6.4	Andra mätningar	32
7	Analys av mätresultat	33
8	Simuleringar av fjärrkylanät	43
9	Analys av simuleringsresultat	47
10	Erfarenheter	49
11	Slutsatser och rekommendationer	51
	Referenser	53
	Bilaga 1: Mätsystemet på mätplatserna	55
	Sensorbuss	57
	Mjukvara	57
	Bilaga 2: Beskrivning av fjärrkyla nätet i Malmö	59

1 Introduktion

Fjärrkyla kan användas som komfortkyla i byggnader och för industriell kylning s. k. processkyla. Fjärrkyla är på stark frammarsch både internationellt och i Sverige. Fjärrkylans marknadsandel för kylning av lokaler är redan idag omkring 50 % i Stockholm, och omkring 25 % sett över hela Sverige (DHC+, 2012). Genom att fjärrkyla kan ersätta eldriven kylning, kan primärenergiåtgången minskas. Detta gäller speciellt när frikyla från sjöar och hav kan utnyttjas, men även när absorptionskylmaskiner producerar kyla centralt med fjärrvärme eller industriell spillvärme. Fjärrkylan främjar samhällets mål med mindre resursåtgång och mindre utsläpp av växthusgaser.

För att ytterligare stärka fjärrkylans konkurrenskraft och minska primärenergiåtgången, krävs teknik för att bygga distributionssystem med mindre förluster kopplade till temperaturen på framledningen och ett bättre utnyttjande av fjärrkylan i byggnaderna, så att differensen mellan fram- och returledning ökar. I detta projekt fokuseras på det förstnämnda. Genom att minska förlusterna från framledningen i distributionssystemet, kan samma kylenergi levereras med mindre åtgång av pumpenergi. Minskade förluster från framledningen i distributionssystemet är speciellt viktiga vid toppbelastning när det är som varmast.

Temperaturskillnaden i framledningen från produktionsställe till kund bör vara liten, eftersom temperaturdifferensen i kundens fjärrkylacentral endast är omkring 10 °C. Varje grads eller del av grads uppvärmning är ett problem för leverans av kyla vilket gör att energiförluster är viktiga att förstå och beakta.

1.1 SYFTE OCH MÅL

Syftet med projektet är, dels att kartlägga dagens kunskapsläge gällande distributionssystem för fjärrkyla för att få en samlad bild, dels att ta fram ny kunskap gällande isolering ochläggning av fjärrkylaledningar. Temperaturer i mark studeras och relateras till lägningsförhållandena, såsom djup, markyttskikt i form av asfalt, plattor eller gräs. Schablonvärden som används idag för marktemperaturer i energiförlustberäkningar befaras vara felaktigt låga vid vissa lägningsförhållanden t ex under soluppvärmda ytor eller närliggande fjärrvärmerör.

Skillnaden i energiförluster mellan oisolerade och isolerade rör för olika markförhållanden vid transport av kyla studeras. En metod för beräkning av energiförluster och framledningstemperaturer i distributionssystem för fjärrkyla tas fram.

En modell för simulering av ett realistiskt distributionssystem för fjärrkyla tas fram och verifieras. Med modellen kan man beräkna energiförluster och kostnader för energiförluster när produktionskostnaden är känd. Indata till modellen är bl a temperatur vid produktionsstället, önskad effektdistribution och kostnad för fjärrkylaproduktion. Utdata är energiförlust och framledningstemperaturer hos kunderna och kostnader för energiförluster. Fjärrkylasystem med isolerade samt oisolerade rör som finns på marknaden och som läggs med olika omgivande marktemperatur simuleras och analyseras.

Ett mål med projektet är att få en klar bild av nyttan med att använda isolerade rör-system vid vissa lägningsförhållanden. Oisolerade rör är självfallet fördelaktigt i

investeringshänseende, men energiförlusterna kan bli betydande genom uppvärmning av köldbärare från den omgivande marken om ledningen inte läggs tillräckligt djupt. Tidigare mätningar (Nilsson m fl, 2006) har exempelvis visat att temperaturen i en vanlig rörgrav för fjärrvärme på ca 0,6 m djup sommartid kan ligga på mellan 15 och 20 °C, vilket är betydligt över årsmedeltemperaturen som brukar användas.

Resultaten och metoderna kan utgöra en grund för framtida praxis för design och standardiseringsarbete inom distribution av fjärrkyla.

1.2 AVGRÄNSNINGAR

Arbetet som rapporteras här fokuserar på själva fjärrkylaledningarna lagda i mark. Inga detaljer om installation av olika ledningstyper tas upp. Aspekter och val av ventiler behandlas ej.

Vid användning av fjärrkylaledningar som är väsentligt mindre isolerade än värmeledningar får kringfyllnadsmaterialets termiska egenskaper en relativt sett större betydelse för energiförlusterna. Det kan finnas anledning att se över läggningstekniken från ett värmeisoleringsperspektiv och exempelvis välja fyllningsmaterial, dräneringslösningar, etc., som minimerar kylförlusterna. Detta tas dock inte upp vidare i denna rapport.

När ett fjärrkylasystem betraktas läggs en systemgräns så att produktion, distribution och konsumtion av fjärrkyla ingår. Eventuell utnyttjande av värme i fjärrkylans returledning ingår ej.

1.3 BETECKNINGAR

För prefabricerade fjärrkyla- och fjärrvärmeledningar med stålmedierör, isolering av polyuretan och mantel av polyeten anges storleken på medieröret med DN och nominell diameter. För polyetenledningar anges ytterdiametern i millimeter med beteckningen Ø framför.

2 Litteraturstudier

En litteratursökning har genomförts med databasen Scopus. Dessutom har allmänna och riktade sökningar gjorts på internet. Det har varit av intresse att söka efter fjärrkyla, distribution, värmeledning från ledningar i mark och även allmänt om värmeledning i mark. Riktlinjer, rekommendationer, rapporter och vetenskapliga artiklar av intresse har hittats.

2.1 RIKTLINJER OCH REKOMMENDATIONER

Svensk Fjärrvärme har gett ut anvisningar förläggning av fjärrvärme- och fjärrkylaledningar, se SvF (2015). Det som är speciellt för fjärrkyla är att viss rundgång i systemet kan krävas så att inte vattnet i medierören fryser vid låg eller obefintlig förbrukning vintertid.

Svensk Fjärrvärme och Euroheat & Power (EHP, 2008) har gett ut rekommendationer för fjärrkylarör. I rekommendationerna räknas olika rörtyper, som kan användas upp. De är i huvudsak belagda stålrör, prefabricerade fjärrvärmerör och vattenledningar i polyeten. Andra rörtyper är tvärbundet polyeten, kopparrör, rostfria stålrör och stålrör försedda med mantel av stålrör. Samma hänsyn behöver inte tas till värmeexpansion som för fjärrvärmeledningar, eftersom temperaturnivåerna inte varierar på samma sätt. Normalt behövs inga expansionsupptagande anordningar. I gamla bestämmelser D:215 (SvF, 2005) stod även att man bör lägga fjärrkylaledningar och speciellt oisolerade på gatans skuggsida. Vidare bör man inte lägga fjärrkylaledningarna parallellt och i närheten av fjärrvärmeledningar.

IDEA (2008) har gett ut riktlinjer för fjärrkyla. Ledningar och material som rekommenderats är fjärrvärmerör, polyeten, segjärn och glasfiberförstärkt plast. Segjärnsrören är belagda med invändigt korrosionsskydd. Vid läggning i extremt varma områden bör värmespanningar beaktas. Isolering kan vara nödvändig för att begränsa värmeupptagningen, vilket är extra viktigt för små dimensioner. I ett exempel betraktas rör med diametrar mindre än 450 mm som små.

2.2 FORSKNING OM FJÄRRKYLA

Problematiken med att få fjärrkylan att räcka till de varmaste dagarna tas upp av Werner & Jonsson (2012). De pekar på åtgärder i husen för att sänka byggnaders maximala behov av fjärrkyla genom åtgärder i byggnader såsom solavskärmning. De tar även upp behovet av ökad differens mellan fram- och returledning. Källman m fl (2004) fokuserar på installationslösningar i byggnader för att öka differensen mellan fram- och returledning för att få en effektivare distribution av fjärrkyla.

McCabe m fl (1995) har skrivit att stora förluster uppstår i ett mindre fjärrkylasystem på ett universitet i norra USA med oisolerade ledningar. De har mätt temperaturer i mark under en gräsyta och en vägbeläggning på nivåer med inbördes avståndet 300 mm ned till 3 m vid latitud 42°. Utomhustemperaturen var maximalt 27°C under mätperioden. På nivån 300 mm ned uppmättes i vägen maximalt 23°C och dygnsmedelvärdet 19°C och under gräsytan maximalt 20°C och dygnsmedelvärdet 17°C. Från handböcker fick de fram uppskattningar som var avsevärt lägre, nämligen maxi-

malt värde på 15°C och dygnsmedelvärde 12°C. Vid mätningarna förhindrades luftströmmar i skyddsror genom att skumisolering sprutades in i ändarna. Jordsammansättning och fuktighet påverkar ledningsförmågan mycket. De gjorde ekonomiska bedömningar och kom fram till att det lönar sig att isolera rör med diametern 610 mm eller mindre. Dessa bedömningar beror på marginalkostnad för kyla, kalkylränta, energiprisökningar och kostnader för isolerade rör.

Eriksson & Sundén (1997) har behandlat teoretiska modeller för värme och masstransport i mantelrör och isolering hos ledningar för fjärrvärme och fjärrkyla. När polyuretanisolerade rör åldras diffunderar blåsmedel ut och luft in i isoleringen. Vid fjärrkylanvändning kan vattenånga diffundera in i isoleringen och kondensera. Diffusionen leder till förändrad termisk konduktivitet och vatten kan även leda till korrosion av medierör. De hävdar att pentan och cyclopentan blåsta skum är olämpliga för fjärrkyla eftersom blåsgasen har hög kokpunkt på 36°C respektive 49°C. Fram- och returledning har temperaturer kring 6°C respektive 15°C. Eriksson & Sundén hävdar med stöd av avhandlingen av Svanström (1997) att vid kondensering av blås-gaser kan skummet förlora sin formbeständighet. Eriksson & Sundén (1997) har studerat ledningar med koldioxidblåsta polyuretanskum. Den termiska konduktiviteten uppskattas öka från 23 till 31 mW/mK på 30 år. Mängden kondenserad vattenånga blir mycket liten 8-35 g/m på 30 år, vilket knappast påverkar konduktivitet eller system för fukt-larm.

Oppelt m fl (2013) har studerat transient värmefflöde för fjärrkylaledningar i mark där årliga variationer av markytan beaktas. Marken anses vara homogen och värme transporterats enbart via ledning. Värmekapaciteten hos ingående rörmaterial försummas likväl som värmemotståndet i medie- och mantelrör.

Babus'Haq m fl (1986) har studerat fjärrkylanät bestående av oisolerade rör i rektangulära betongkultvertar. De kom fram till att returröret skall placeras rakt ovanför framledningen, för att uppnå minimal värmeupptagning av framledningen.

2.3 STUDIER AV VÄRMETRANSPORT

Sundberg (1991) har diskuterat värmetransport i jord och berg. Värmetransport sker där via ledning, strålning, konvektion och ångdiffusion. Det finns ledning i partiklar, ledning i luft, strålning mellan partiklar, ångdiffusion samt konvektion i porluft. Värmeledning är ofta dominerande och den beror på vattenhalt och densitet. Den termiska konduktiviteten ligger mellan 0,8 och 2,6 W/mK för jordarterna lera, silt, sand och morän, som är icke-frusen och under grundvattennivån. För sand minskar spannet till mellan 1,5 och 2,6 W/mK. För torr sand är spannet mellan 0,4 och 1,3 W/mK. Vattenhalt och porositet spelar stor roll för värmetransporten i jord.

Thunholm (1988), har mätt temperatur i mark på sex platser i södra Sverige och uppskattat den termiska konduktiviteten. Den högsta värmeledningsförmågan ligger kring 2,0 W/mK för platser med mycket sand och för de andra ligger den på 1,5 W/mK.

Prepar m fl (2012) har tagit fram metoder för att bestämma termisk konduktivitet i jord genom beräkningar och mätningar. Värmeförluster har studerats genom mätningar och beräkningar av fjärrvärmerör i drift. Mätningar har gjorts av temperaturer, termisk konduktivitet, värmefflöde och fuktighet.

Analytiska lösningar för uppskattning av värmeförluster presenterades av Persson och Claesson (2005a, 2005b, 2008). Ett fall med ett antal isolerade rör i marken studeras.

Temperaturfälten i rörens isolering och i marken ges av summor där komplexa poler ingår.

2.4 RELEVANTA STUDIER OM FJÄRRVÄRME

Bøhm (2000) har studerat transienta värmeförluster från nedgrävda fjärrvärmeledningar. En ostörd marktemperatur beräknas som sedan kan användas för att beräkna värmeförluster från fjärrvärmeledningarna. Det transienta förloppet utgör varierande temperaturer på markytan och medietemperaturen i fjärrvärmeledningarna antas vara konstant. Beräkningar och experiment utfördes. Bra överensstämmelse erhöles med termisk konduktivitet på 1,6 W/mK i mark. Bøhm (2001) har presenterat en experimentell metod för att bestämma värmeförluster hos fjärrvärmeledningar i normal drift. Mät- och beräkningsresultat jämfördes.

Dalla Rosa m fl (2011) har studerat lågenergifjärrvärme och värmeförluster. I beräkningarna används en termisk konduktivitet som beror linjärt av temperaturen och för jorden används en medelkonduktivitet på 1,6 W/mK istället för yterligheterna 0,5 W/mK för torr sand och 2,5 W/mK för våt lerjord.

2.5 ISOLERING

Christiansen (2009) redovisar uppmätt termisk konduktivitet som funktion av temperatur för polyuretan. För temperaturen 20°C och för en typ av polyuretanskum blir konduktiviteten 20 mW/m K. Elgocell (2015) anger konduktiviteten 34 mW/m K för cellplasten (EPS) i sina kulvertar.

2.6 KORROSION

Vinka m fl (2005) studerade korrosion i fjärrkylasystem och uppskattade syretransport genom godsväggen i polyetenrör. De utförde även experiment med olika provkroppar av kolstål och rostfritt stål i ett fjärrkylasystem för att påvisa korrosion. Författarna anser att problem med bimetallkorrosion på kolstål i systemen undviks, om invändiga arean kolstål är minst 5% av arean polyeten hos jordförlagt system. Syre som läckt in och kommit in vid påfyllning skall konsumeras relativt fort av kolstålet.

2.7 SLUTSATSER AV LITTERATURSTUDIER

Vad gäller konstruktion och läggning lämnas stor frihet i olika anvisningar och rekommendationer. Det finns tips om att man skall undvika att lägga fjärrkylarör längs med fjärrvärmerör, men även undvika att lägga fjärrkylaledningen på solsida längs med en gata. Isoleringens betydelse för förlusterna relaterade till levererad effekt ökar med minskande dimension hos ledningen.

Vid temperaturmätningar i fält bör värmetransport mellan markytan via kabelskydds-rör förhindras. För sand ligger den termiska konduktiviteten mellan 1,5 och 2,6 W/mK då den har stort vatteninnehåll. För torr sand är spannet mellan 0,4 och 1,3 W/mK. Det finns analytiska lösningar för temperaturfältet i marken och beräkningar av värmeförluster då förhållanden är stationära, dvs konstanta temperaturer hos köldbärare och markytan.

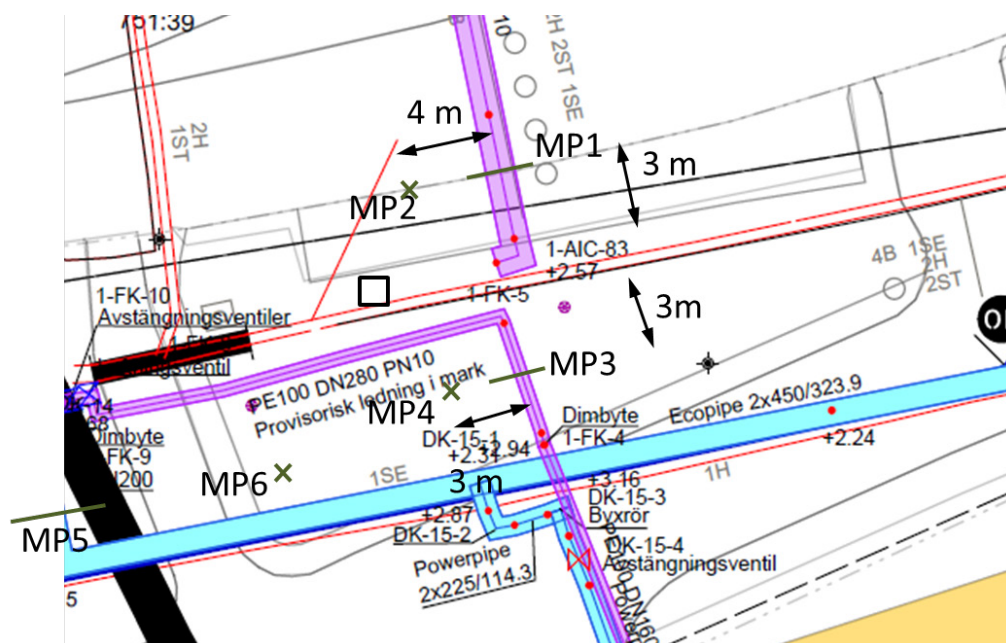
3 Fältmätplatser

Två fältmätplatser har installerats varav den ena ligger i Almedal i Göteborg Energis nät och den andra i Kista i Fortum Värmes nät i Stockholm. Huvudsyftet är att mäta marktemperaturer på solbelysta platser med olika markbeläggning. Givarna har placerats långt från ledningar och i närheten av fjärrkyla- och fjärrvärmeledningar. Vidare har fuktighet i mark, lufttemperaturer och luftfuktighet mätts med enstaka givare. Medietemperaturer har både mätts med nyinstallerade givare och med givare i närliggande fjärrkylacentraler.

3.1 ALMEDAL

I Figur 1 är sex mätpositioner markerade vid mätplatsen i Almedal. Mätpositionerna 1-2 ligger i anslutning till en parkeringsyta, men utanför markerade parkeringsrutor. Mätposition 6 ligger under en stensatt yta. De övriga ligger under en grönyta.

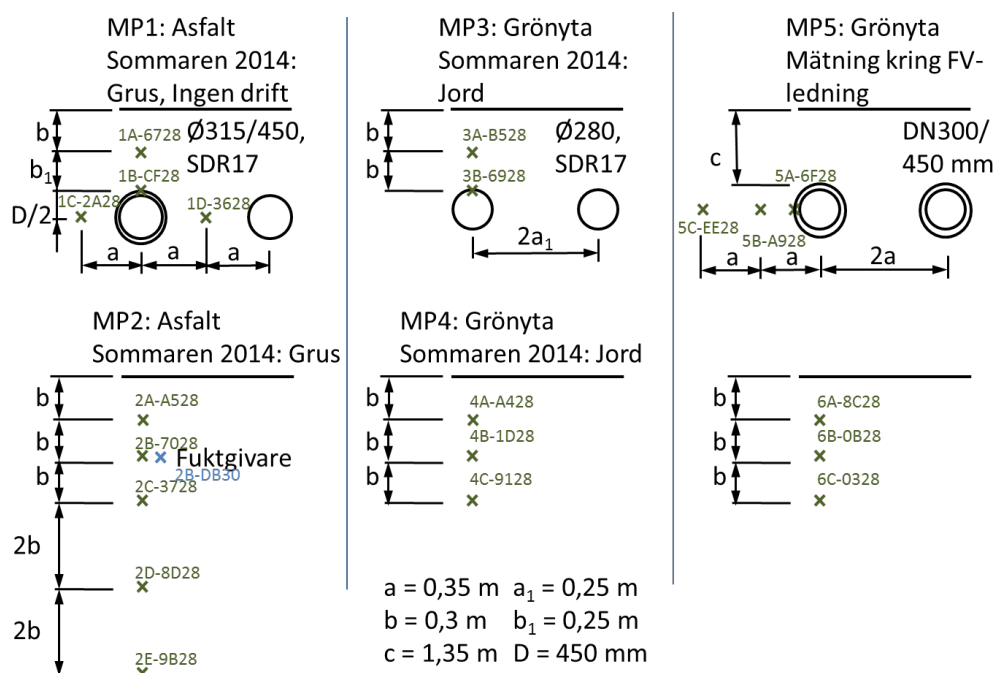
Givarna vid MP1-4 togs i drift 7 juli 2014 och MP5-6 togs i drift 2 april 2015. Ledningen vid MP1 driftsattes i 27 september 2014 och asfaltering skedde 7 oktober 2014. Plattläggning vid MP6 skedde 9 april 2015.



Figur 1: Skiss av mätplats i Almedal (Almedalsvägen) med sex mätpositioner. Fjärrkyla-ledningar är ritade med lila färg. I skissen är den nya ledning inte ännu ansluten till servisledning, som matas från en tillfällig kylmaskin. Fjärrvärmeledningarna är ritade med ljusblå färg.

Sketch of measurement site in Almedal (Almedalsvägen) with six measuring positions. District cooling pipes are drawn with purple. In sketch, new pipe is not yet connected to service pipe fed from temporary cooling unit. District heating pipes are drawn with blue colour.

I Figur 2 ges givarplaceringar vid de olika mätpositionerna i Almedal. Under soliga dagar befinner sig mätplatsen tidvis i skugga på grund av en närbelägen kontorsbyggnad under del av förmiddag och ett träd under sen eftermiddag. Det senare skymmer endast MP1-2. Norr om mätplatsen finns en bro, som eventuellt kan skugga kvällssol.



Figur 2: Mätpositioner 1-6 i Almedal: MP1-2 ligger under asfaltsyta med tjocklek 80 mm som tillkom långt efter mätningarna startade. Installation av MP1-4 och MP5-6 genomfördes 2014-07-02 respektive 2015-04-02. Driftsättning av ledning vid MP1 skedde 2014-09-27 och asfaltering 2014-10-07. Plattsättning vid MP6 genomfördes 2015-04-09. Temperaturgivare är placerade i närheten av ledningar i MP1 och mer än 3 m från ledningar i MP2. Vid MP2 finns även en givare som mäter markens fuktighet. MP3-4 ligger under en grönyta som under både 2014 och 2015 varit jordig då grästillväxten varit klen. Temperaturgivare är placerade i närheten av ledningar i MP3 och mer än 3 m från ledningar i MP4. Vid MP1 är endast framledningen isolerad och vid MP3 är servisledningarna oisolerade. Temperaturgivare är placerade i närheten av fjärrvärmeledningar i MP5. Vid MP6 mäts temperaturer under en stensatt yta. Betongplattor av tjocklek 50 mm användes.

Measurement positions 1-6 in Almedal: MP1-2 below asphalt surface with thickness 80 mm which was added long time after measurements began. Installation of MP1-4 and MP5-6 occurred July 2, 2014 and April 2, 2015, respectively. Line at MP1 was taken in use September 27, 2014 and asphalt was laid October 7, 2014. Paving at MP6 was done April 9, 2015. Temperature sensors are located in vicinity of pipes at MP1 and more than 3 m from pipes at MP2. At MP2 there is also sensor measuring soil moisture. MP3-4 located below green area which during both 2014 and 2015 was earthy when grass growth has been weak. Temperature sensors are located in vicinity of pipes at MP3 and more than 3 m from pipes at MP4. At MP1 only supply is insulated and at MP3 service lines are uninsulated. Temperature sensors are placed near the heating pipes at MP5. At MP6 temperatures are measured below paved surface. Concrete stones of thickness 50 mm were used.

I Figur 3 visas bilder från installationen i Almedal i juli 2014. Givare har fixerats på rör och på reglar i schakten. Skyddsrör för kablar har isolerats i ändarna med fogskum för att förhindra värmetransport via dessa. Mätdata samlas in av en dator belägen i ett elskåp på mätplatsen. Mätdata skickas via en GSM-uppkoppling till en databas på SP. Vid mätposition 5 låg fjärrvärmerören djupare än förväntat. En gammal asfaltsyta var täckt med grus och jord i det gamla industriområdet. Ursprungligen var täckningen 0,6 m, men efter ytterligare påfyllning blev täckning 1,35 m.



Figur 3: Installation vid mätplatsen i Almedal av MP1-4. Kablar till givare ligger i stenmjöl 0-8 mm nära givarna och för övrigt i rör till elskåp. Vid MP2 & 4 är temperaturgivare intryckta i befintlig schaktvägg. Vid MP2 sitter de tre översta givarna i befintligt grus och de två nedre i lera. Markfuktgivaren ligger i stenmjöl. Vid MP4 sitter givarna i befintligt grus. (Foto: Marcus Kempe (nere vänster) resp. Olle Persson (övriga))

Installation at measuring site in Almedal of MP1-4. Cables to sensors are surrounded by stone dust of 0-8 mm close to sensors and remaining parts are placed in pipes going to electricity cabinet. At MP2 & 4, the temperature sensors are put into existing shaft wall. At MP2 top three sensors are sitting in existing gravel and bottom two in existing clay. Soil moisture sensor is set in stone dust. At MP4, temperature sensors are sitting in existing gravel.

Fjärrkylarören är polyetenrör som kan användas som vattenledningar. Vid MP1 är ytterdiametern hos rören Ø315 mm och vid MP3 Ø280 mm. Framledningen är isolerad vid MP1 och mantel av polyeten har ytterdiametern 450 mm. Returledningen vid MP1 och båda ledningarna vid MP3 är oisolerade. Fjärrvärmerören är traditionella fjärrvärmerör med medierör av stål, isolering av polyuretan och mantel av polyeten. De är isolerade med dimensionerna DN300/450 mm (ytterdiameter hos medierör är Ø323,9 mm och mantel Ø450 mm).

I Figur 4 visas bilder från mätplatsen i Almedal tagna ett drygt år efter installationen av de första givarna. Grästillväxten har varit dålig under ett drygt år efter installationen av givarna. På bilderna skuggas mätplatsen av den närbelägna kontorsfastigheten. Även trädet som skuggar asfaltsytan senare på eftermiddagen vid MP1-2 syns delvis i bild.

Lufttemperaturen mättes utan värmesköld med en sensor på nordsidan av elskåpet. Det visade sig inte vara en bra metod då elskåpet värmdes upp betydligt av solinstrålningen även på nordsidan. Temperaturmätningen dagtid i luften blev alltså felaktig vid soligt väder. När solen gått ner samt vid sämre väder fungerade lufttemperaturmätningen bättre.



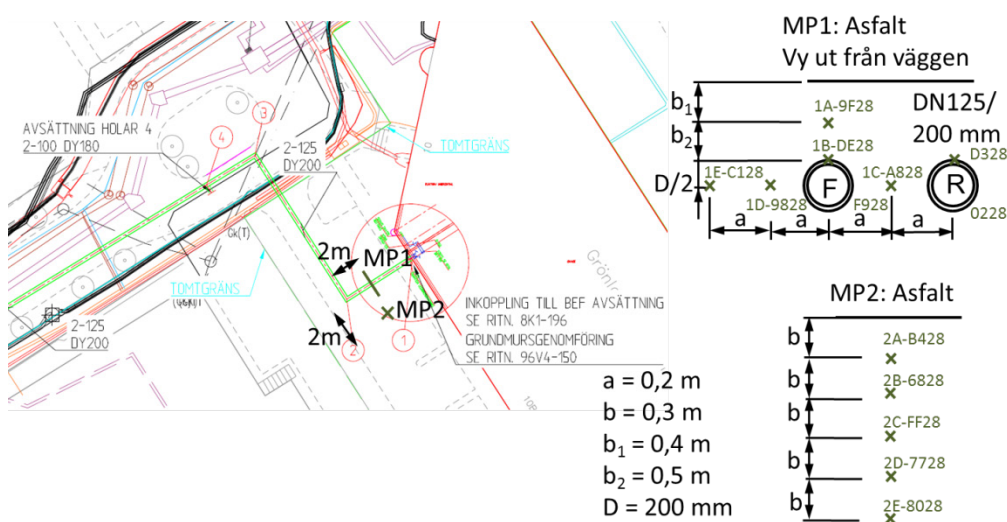
Figur 4: Bilder vid mätplatsen i Almedal tagna kl 11 den 8 september 2015 med blicken i sydlig respektive östlig riktning. Mätplatsen skuggas delvis. Datainsamlingsutrustningen sitter i elskåpet närmast kameran i båda bilderna. Resultatet av en klen grästillväxt kan skönjas i bilderna. (Foto: JH Sällström)

Pictures taken at test site in Almedal at 11 o'clock September 8, 2015 looking in south and east directions, respectively. Test site is partly shaded. Data collection equipment sits in electricity cabinet closest to camera in both pictures. Result of poor grass growth can barely be seen in pictures.

3.2 KISTA

I Figur 5 är två mätpositioner markerade vid mätplatsen i Kista, som ligger under en parkeringsyta utanför markerade rutor. Vid klart väder är ytan solbelyst under dagtid. Mätplatsen installerades 25 februari 2015 och asfaltering skedde 9 april 2015. Till fjärrkylaledningar används här traditionella fjärrvärmerör med medierör av stål, isolering av polyuretan och mantel av polyeten. De är isolerade med dimensionerna DN125/200 mm (ytterdiameter hos medierör är $\varnothing 139,7$ mm och mantel $\varnothing 200$ mm). Denna isoleringsklass marknadsförs för att användas till fjärrkyla.

Lufttemperaturen mäts 3 m ovan mark med en sensor monterad i en värmesköld. Temperaturen hos fram- och returledning mäts med temperaturgivare monterade i dykrör i fjärrkylarören. Temperaturer mäts omkring fjärrkylarör i marken och långt ifrån rören.



Figur 5: Mätpositioner 1-2 i Kista (Skalholtsgatan) ligger under asfaltsyta som är solbelyst vid klart väder. Temperaturgivare är placerade i närheten av fjärrkylaledningar vid MP1 och mer än 2 m från ledningar vid MP2. Avståndet till närliggande fastighet är ca 8 m. Datainsamlingsutrustningen sitter i ett elskåp inomhus i en närbelägen byggnad. Medietemperaturer mäts med givare i dykrör i båda rören. Utomhustemperatur och luftfuktighet mäts med givare som skyddas av skärm.

Measurement positions 1-2 in Kista (Skalholtsgatan) are below asphalt surface that is sunlit in clear weather. Temperature sensors are located in the vicinity of district cooling pipes at MP1 and more than 2 m from pipes at MP2. Distance to neighbouring building is about 8 m. Data collection equipment is in electricity cabinet indoors in nearby building. Carrier temperatures are measured by sensors in dive tubes in both pipes. Outdoor temperature and humidity are measured with shielded sensors.

I Figur 6 visa bilder före och under installationen i Kista i februari 2015. Även här fixeras givare på rör och reglar i schakten och skyddsrör för kablar isoleras i ändarna med fogskum. Mätdata samlas in av en dator belägen i ett elskåp inomhus. Mätdata samlas in skickas via en GSM-uppkoppling till en databas på SP.



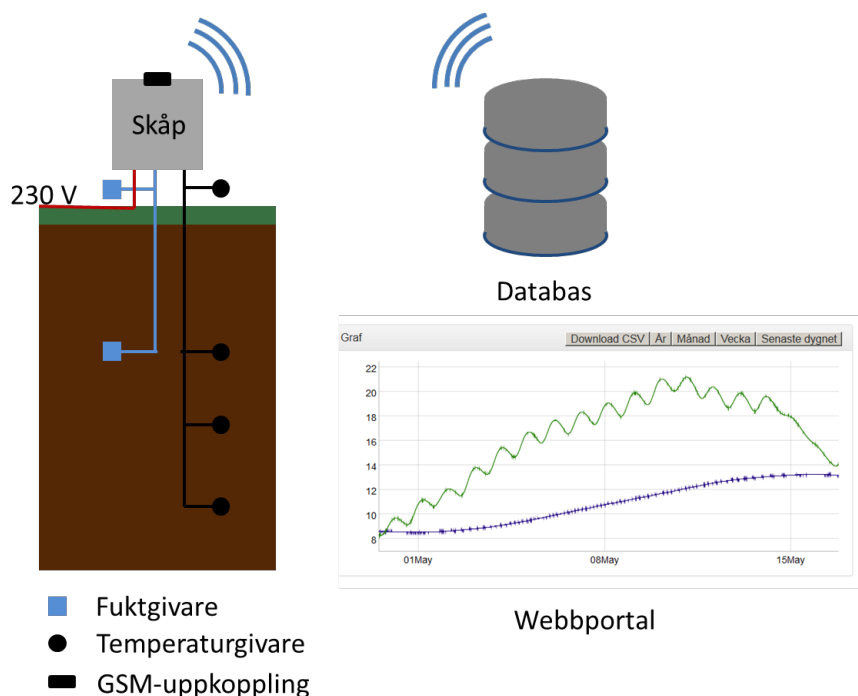
Figur 6: Parkering före installation vid mätplatsen i Kista överst vänster. Installation av MP1-2 i schakt. Kablar till givare ligger i stenmjöl 0-8 mm nära givarna och för övrigt i rör till elskåp. Nederst till höger syns elskåp i närliggande byggnad (som ägs av Fastighets AB Balder). Dykrör för temperaturgivare är monterade i rör före passage genom yttervägg. (Foto: Sune Borgström (överst till vänster) respektive Marcus Kempe (övriga))

Parking at measurement site in Kista before installation at top right. Installation of temperature sensors at MP1-2 in shafts is shown. Cables to sensors located in the stone dust of 0-8 mm close to the sensors and remaining parts are placed in pipes going to electricity cabinet in nearby building (owned by Fastighets AB Balder). Temperature sensors are mounted in dive tubes in pipes before passing through outer wall.

4 Mätssystem

På mätplatserna har ett system installerats med en dator för mätdatainsamling. Givarna är uppkopplade längs en databuss. Dator och övrig elektronik har monterats i ett elskåp. Mätdata samlas in och lagras lokalt för att sedan synkroniseras med en databas på SP. Mätdatasystemets uppbyggnad beskrivs i Bilaga 1.

Temperaturgivare har verifierats så att de ligger inom angiven specifikation $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Eftersom specifikationen är uppfylld och noggrannheten bedöms tillräcklig, har inga kompensationer tillämpats för att korrigera mätdata.



Figur 7: Skiss av mätsystem med givare, trådlösuppkoppling, lagring i databas på SP och webbportal.

Sketch of measurement system with gauges, wireless communication, storage in database at SP and web portal.

5 Värmetransport

Fjärrkyla anläggs i vissa fall utan isolering och då sker värmeutbyte, både med omgivningen och till relativ stor del mellan fram- och returledning. Här presenteras kopplade ekvationer för värmetransport från fram- och returledning vilka används i denna rapport.

De stationära värmeförlusterna hos ett par rör avsedda för fjärrkyla eller fjärrvärme, se Figur 8, kan tecknas

$$\begin{Bmatrix} q_a \\ q_b \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} \\ U_{12} & U_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_a - T_0 \\ T_b - T_0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Här betecknar q_a och q_b värmeeffekt per längdenhet [W/m] som går från ledningarna med temperaturerna T_a och T_b till markytan med temperaturen T_0 . Ett komplext koordinatsystem har införts. Centrum av ledningarna ligger i punkterna

$$z_a = x_a + i y_a \quad (2a)$$

$$z_b = x_b + i y_b \quad (2b)$$

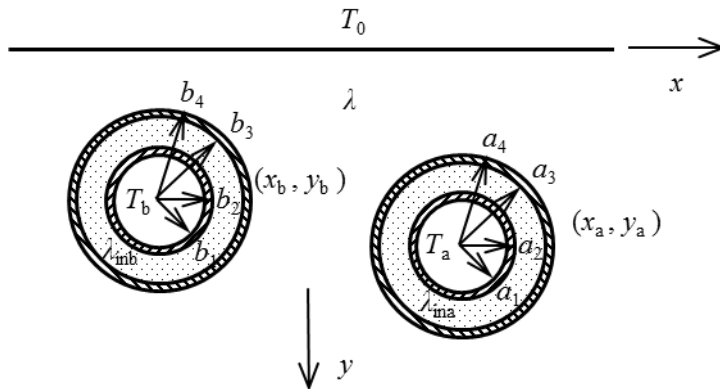
Värmeövergångsmatrisen U [W/mK] ges som inversen av värmemotståndsmatrisen R :

$$U = R^{-1} \quad (3)$$

Här används den multipla komplexa pollösningen av ordning noll, se Rapporten av Persson och Claesson (2005a).

Värmemotståndsmatrisen ges av ledningarnas geometri, isolering och läge i marken samt markens termiska konduktivitet λ [W/m K]

$$R = \frac{1}{2\pi\lambda} \begin{bmatrix} \frac{\lambda}{\lambda_{ina}} \left(\ln \left(\frac{a_3}{a_2} \right) + \beta_a \right) + \ln \left(\frac{2y_a}{a_4} \right) & \ln \left(\frac{|z_a - \bar{z}_b|}{|z_a - z_b|} \right) \\ \ln \left(\frac{|z_a - \bar{z}_b|}{|z_a - z_b|} \right) & \frac{\lambda}{\lambda_{inb}} \left(\ln \left(\frac{b_3}{b_2} \right) + \beta_b \right) + \ln \left(\frac{2y_b}{b_4} \right) \end{bmatrix} \quad (4)$$



Figur 8: Par av isolerade rör med centrum i (x_a, y_a) respektive (x_b, y_b) förlagad i mark. Termisk konduktivitet λ , λ_{sa} , λ_{ina} , och λ_{ca} i mark, medierör, isolering respektive mantel.

Pair of insulated pipes with centres at (x_a, y_a) and (x_b, y_b) , respectively, buried in soil. Thermal conductivity λ , λ_{sa} , λ_{ina} , and λ_{ca} in soil, service pipe, insulation and casing, respectively.

där

$$\beta_a = \frac{\lambda_{ina}}{a_1 \alpha_a} + \frac{\lambda_{ina}}{\lambda_{sa}} \ln \left(\frac{a_2}{a_1} \right) + \frac{\lambda_{ina}}{\lambda_{ca}} \ln \left(\frac{a_4}{a_3} \right) \quad (5a)$$

$$\beta_b = \frac{\lambda_{inb}}{a_1 \alpha_b} + \frac{\lambda_{inb}}{\lambda_{sb}} \ln \left(\frac{b_2}{b_1} \right) + \frac{\lambda_{inb}}{\lambda_{cb}} \ln \left(\frac{b_4}{b_3} \right) \quad (5b)$$

Här är

λ_{ina} [W/m K] termisk konduktivitet i isoleringen hos ledning "a"

λ_{sa} [W/m K] termisk konduktivitet i medieröret hos ledning "a"

λ_{ca} [W/m K] termisk konduktivitet i manteln hos ledning "a"

α_a [W/m² K] värmeövergångstal mellan fluid i ledning "a" och medierör.

Motsvarande storheter för ledning "b" betecknas λ_{inb} , λ_{sb} , λ_{cb} och α_b .

Värmeövergångstalet α_g (ytmotståndet $1/\alpha_g$) mellan luft och mark kan tas med genom att förläggningsdjupet ökas med λ/α_g . Ett vanligt värde är $\alpha_g = 14,6$ W/m² K, se Kvisgaard & Hadvik (1980).

6 Mätresultat

Mätresultat från mätplatserna i Almedal (Göteborg) och Kista (Stockholm) redovisas i Figur 9 - Figur 20 respektive Figur 21-Figur 22. Fjärrkylaledningarna påverkas av temperaturen i marken, men de snabba temperaturvariationerna som sker i luften och i det översta marklagret kommer inte att nå en ledning som är förlagd på ett normalt djup med en täckning på 0,6 m.

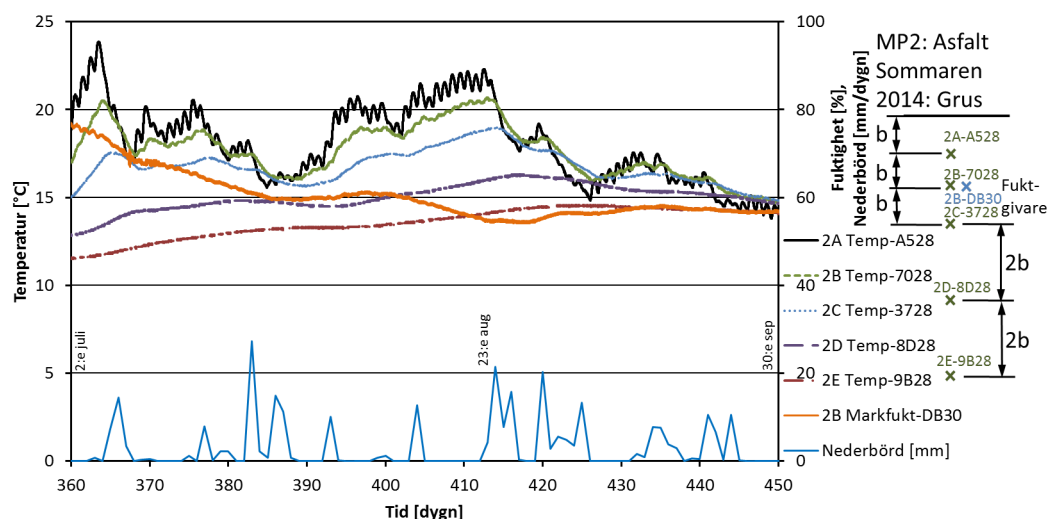
Marken kommer att fungera som ett lågpasfilter där ju längre ned i marken man mäter desto mer av de snabba förloppen försvinner. Mätdata har registrerats var femte eller tionde minut. Det blir en fördröjning av temperaturvariationerna när värme transporteras ned.

6.1 ALMEDAL

Då ofiltrerade mätdata från MP2 i Almedal från 2015-07-05 (dygn 363) studeras, kan man identifiera ett lokalt temperaturmaximum vid djupet 0,3 m och återfinna detta vid djupet 0,6 m ca 10 timmar senare, se Figur 9. På djupet 0,9 m går det att identifiera ett flackare maximum ytterligare ca 1,3 dygn senare.

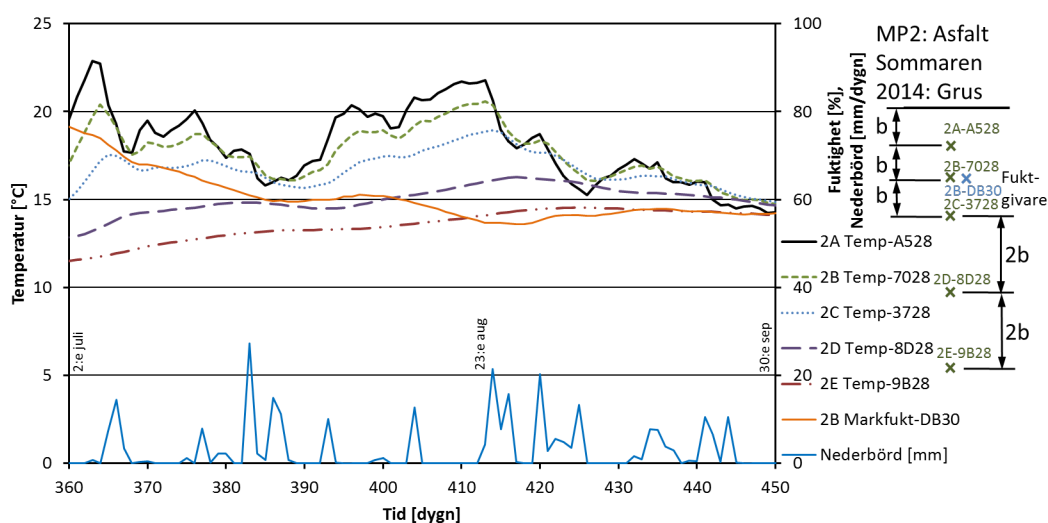
För ofiltrerade mätdata från MP2 i Almedal från 2015-08-23 (dygn 412) kan man identifiera ett lokalt temperaturmaximum vid djupet 0,3 m och återfinna detta vid djupet 0,6 m ca 10 timmar senare. På djupet 0,9 m går det att identifiera ett flackare maximum ytterligare 1 dygn senare, som återfinns på djupet 1,5 m ytterligare 3 dygn senare.

För att få mätdata hanterlig och mer representativ för hur ledningen påverkas, har dygnsmedelvärden beräknats, se Figur 10. Det är dock inte vettigt att dimensionera ett fjärrkylasystem efter det mest extrema dygnet vad gäller marktemperatur, utan det kan vara av intresse att ha en medeltemperatur över en något längre tid.



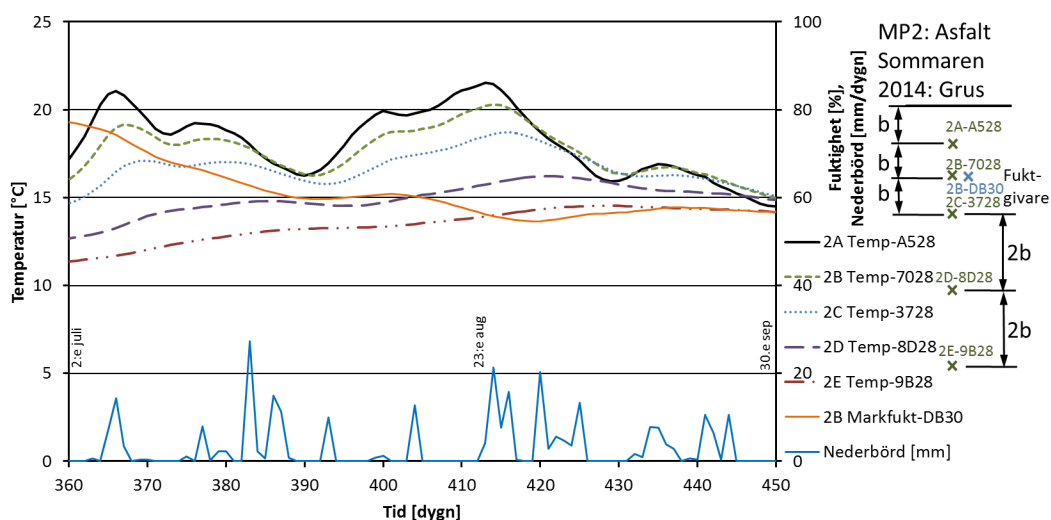
Figur 9: Temperaturmätningar vid MP2 i Almedal från juli 2015 till september 2015. Temperatur i mark och markfuktigheten visas med registrerade värden var femte minut. Nederbörd från SMHI ges som dygnsvärden. Temperature measurements at MP2 in Almedal from July 2015 to September 2015. Temperatures in soil and soil moisture are shown by use of sampled values every fifth minute. Daily values of precipitation from SMHI are also displayed.

Här har vi valt att studera veckomedelvärden, eftersom det tar tid för värme att nå förlagda ledningarna och vi söker temperaturer som kan användas i en kvasistationär beräkningsmodell. Utgående ifrån dygnsmedelvärdena beräknas ett flytande veckomedelvärde. Alltså för dygn 407 anges veckomedelvärdet under dygn 401 till 407. På djupen 1,5 m och 2,1 m sammanfaller nästan kurvorna för dygnsmedelvärden och veckomedelvärden, se Figur 10 och Figur 11. För djupet 0,9 m har topparna förskjutits när veckomedelvärden bildas utgående ifrån dygnsmedelvärden. För djupet 0,3 m och 0,6 m förskjuts och kapas dessutom toppar.



Figur 10: Temperaturmätningar vid MP2 i Almedal från juli 2015 till september 2015. Temperatur i mark och markfuktigheten visas som dygnsmedelvärden. Nederbörd från SMHI ges som dygnsvärden.

Temperature measurements at MP2 in Almedal from July 2015 to September 2015. Temperatures in soil and soil moisture are shown as daily averages. Daily values of precipitation from SMHI are also displayed.



Figur 11: Temperaturmätningar vid MP2 i Almedal från juli 2015 till september 2015. Temperatur i mark och markfuktigheten visas som flytande veckomedelvärden. Nederbörd från SMHI ges som dygnsvärden.

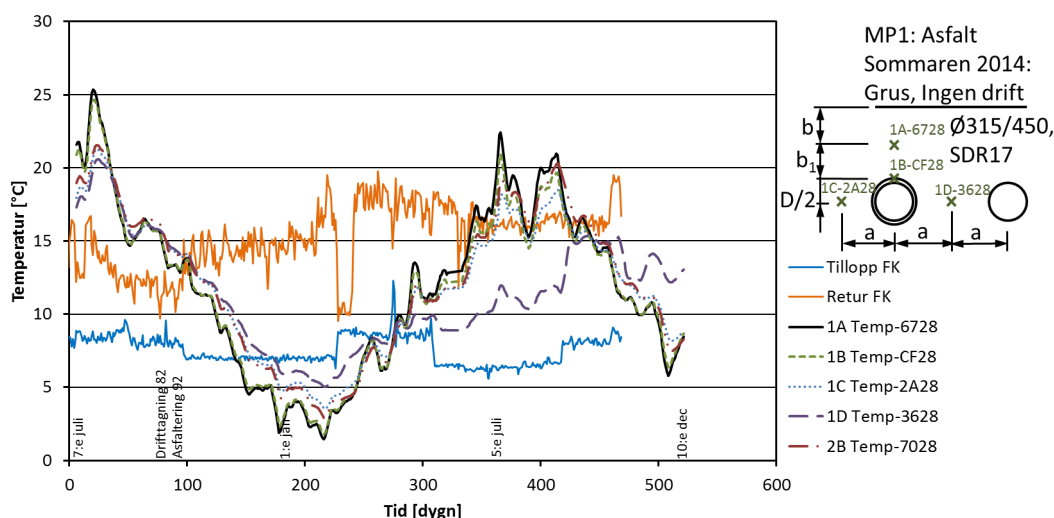
Temperature measurements at MP2 in Almedal from July 2015 to September 2015. Temperatures in soil and soil moisture are shown as floating weekly averages. Daily values of precipitation from SMHI are also displayed.

I Figur 12 visas temperaturen kring rören vid MP1 i Almedal under en tidvis solbelyst asfaltsyta. Temperatur hos fram och retur ges som dygnsmedelvärden vid närliggande fjärrkylacentral. Temperaturgivaren 1D mellan fram- och returledning visar en avsevärt lägre temperatur än givaren 1C på samma djup men på andra sidan av framledningen. Marken kyles av den oisolerade returledningen, men knappast så mycket som framgår av mätresultaten för temperaturgivaren 1D. Vid stationära förhållanden borde temperaturen för givare 1D ligga mellan medietemperatur i retur och temperaturen vid markytan. Givaren har eventuellt skadats, förflyttats vid återfyllning eller påverkats av strömmande vatten i marken.

Temperatur från givare 2B från MP2 på liknande djup visas också som jämförelse. Säsongsvariationerna hos marktemperaturerna är tydliga. De stationärförhållanden som ligger till grund för vår beräkning av förluster i den lokala modellen eller i modellen av fjärrkylanätet infinner sig inte.

I Figur 13 visas marktemperaturer långt från inverkan av ledningar. Även här mäts temperaturerna under en tidvis solbelyst asfaltsyta. Den översta givaren sitter på djupet 0,3 m och den djupaste på 2,1 m. Säsongsvariationerna är påtagliga. Det kan bli höga temperaturer under varma perioder på sommaren, och veckomedelstemperaturen kan överskrida 20 °C på normala läggningsdjup. På sommaren är det varmast i de översta lagren. I början på oktober växlar detta, så att det är kallast överst och blir varmare med ökande djup. I början på mars slår det om igen och blir varmest överst.

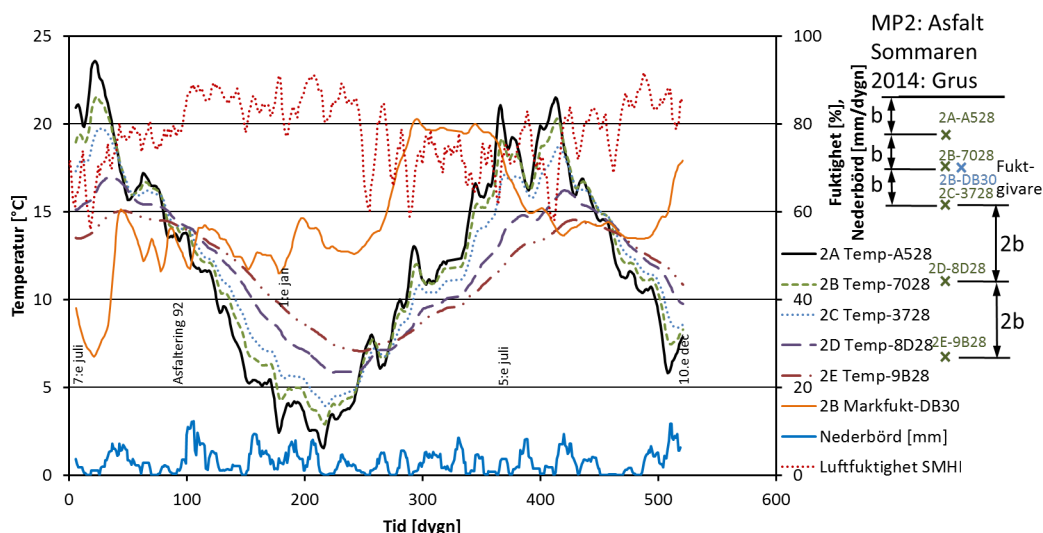
Fuktigheten har också mätts. Luftfuktighet och nederbörd från SMHI visas också. Under våren 2015 ökar fuktigheten i marken och även under slutet av hösten. Det är inga dramatiska förändringar som sker, och det är svårt att se något direkt samband mellan markfukt och nederbörden eller luftfuktighet.



Figur 12: Temperaturmätningar vid MP1 i Almedal från juli 2014 till december 2015. Temperatur hos fram- och returledningen ges som dygnsmedelvärden vid närliggande fjärrkylacentral. Temperatur i mark visas dygnsvis som flytande veckomedelvärde baserat på dygnsmedelvärden.

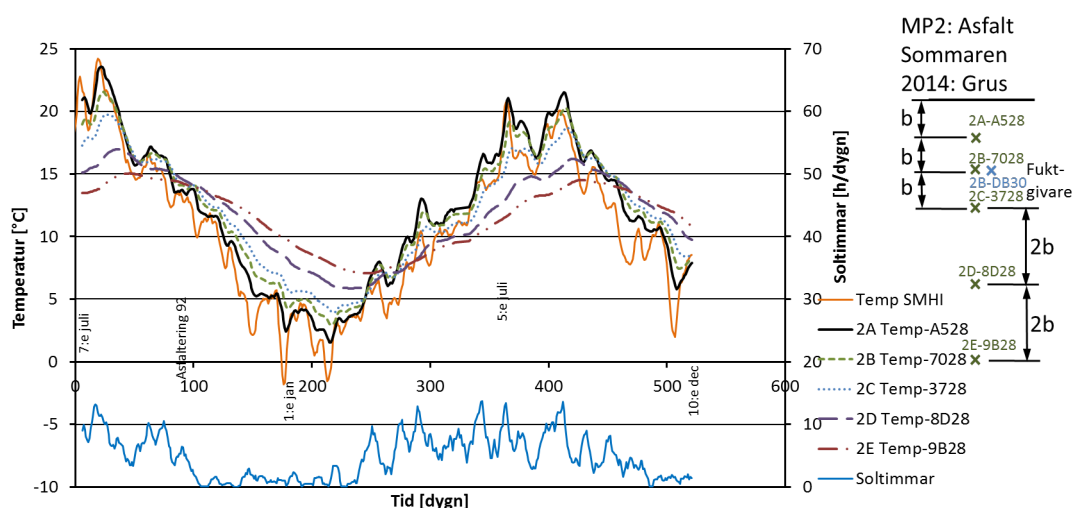
Temperature measurements at MP1 in Almedal from July 2014 to December 2015. Temperature of supply and return are given as daily averages from nearby substation. Temperatures in soil are shown daily as floating weekly average based on daily averages.

I Figur 14 visas marktemperaturerna tillsammans med lufttemperaturen och antal soltimmar per dag. Generellt så ligger dygnsmedelvärdet av lufttemperaturen lägre än marktemperaturen under asfaltsytan. När man sedan bildar veckomedelsvärden, som i Figur 14 blir det ännu tydligare. Föga förvånade så efterföljs soliga perioder av höga marktemperaturer. Fördrojningen av maximum när man följer givare placerade med ökande djup framgår i diagrammet. Det finns ingen tydlig koppling mellan markfukt och nederbörd.



Figur 13: Mätningar vid MP2 i Almedal från juli 2014 till december 2015. Temperatur i mark visas dygnsvis som flyttande veckomedelvärde baserat på dygnsmedelvärden. Mätt markfuktigheten och data från SMHI för nederbörd [mm/dygn] och luftfuktighet anges på liknande sätt.

Measurements at MP2 in Almedal from July 2014 to December 2015. Temperatures in soil are shown daily as floating weekly average based on daily averages. Measured soil moisture, and also daily precipitation and atmospheric humidity from SMHI are given equivalently.



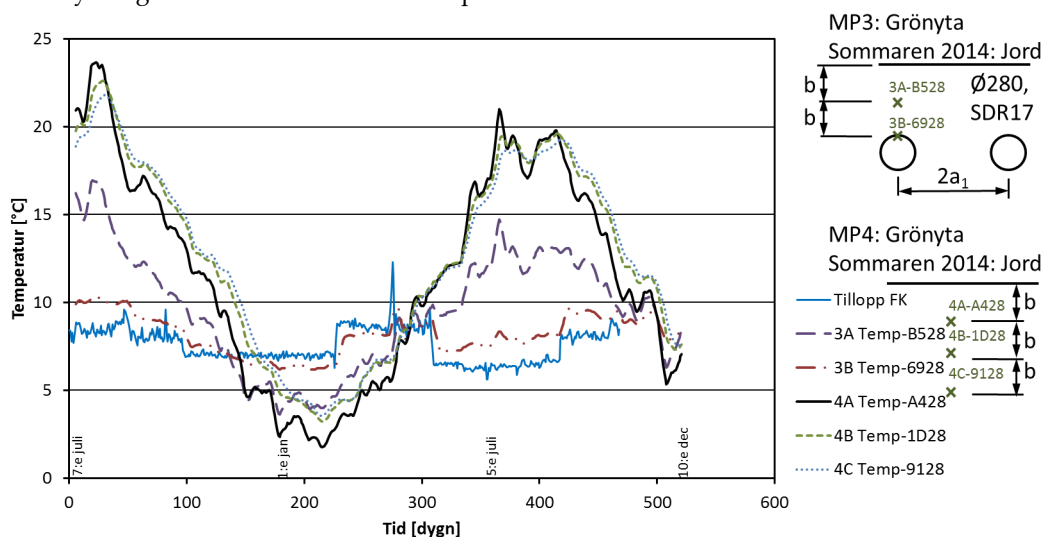
Figur 14: Mätningar vid MP2 i Almedal från juli 2014 till december 2015. Uppmätta temperaturer i mark och lufttemperatur från SMHI visas dygnsvis som flyttande veckomedelvärde baserat på dygnsmedelvärden. Antal soltimmar per dag från SMHI ges också som flyttande veckomedelvärde. Dygnsvärden av solskenstid från SMHI visas.

Measurements at MP2 in Almedal from July 2014 to December 2015. Measured temperatures in soil and temperature from SMHI are shown daily as floating weekly average based on daily averages. Daily hours of sunshine from SMHI are also displayed as floating weekly average.

I Figur 15 visas marktemperaturer under en gräsyta. Temperaturgivare vid MP3 på djupet 0,3 m placerad ovan fjärrkylaledningen visar avsevärt lägre temperatur än motsvarande givare vid MP4. Vid MP3 är både fram- och returledning oisolerade. En jämförelse mellan marktemperaturer vid MP2 och MP4 ger en skillnad på 1-1,5 °C i spannet från 400-415 dygn i augusti 2015. Gräsytan har en viss avkylande effekt, men denna kan vara något högre eftersom MP2 skuggas tidvis av ett träd på eftermiddagarna.

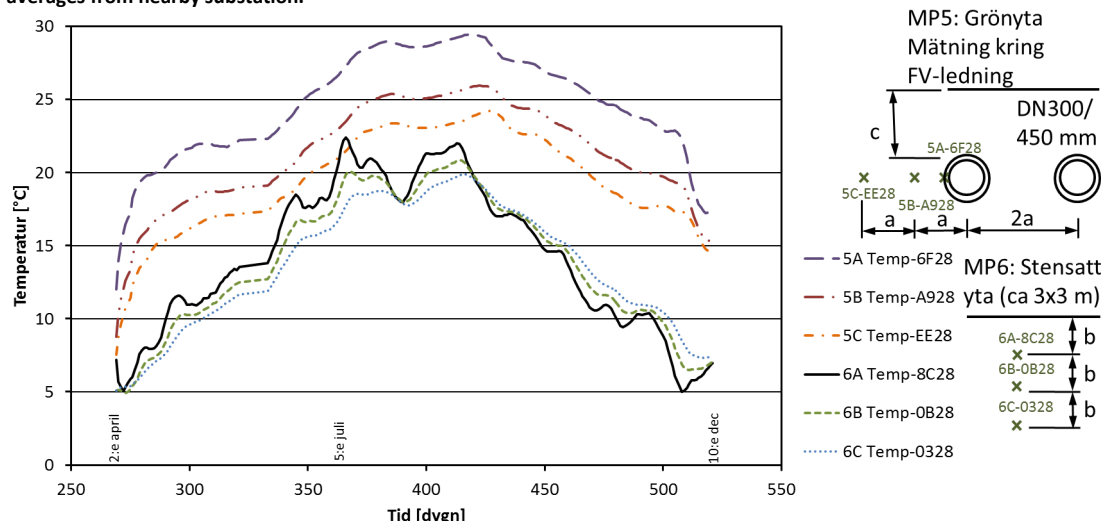
Mätningar har också gjorts under en stensatt yta vid MP6, se Figur 16. En jämförelse av samma period ger en skillnad på ca 2 °C, mellan den stensatta ytan och gräsytan.

Solbelysningen är mer lika för dessa mätpositioner.



Figur 15: Temperaturmätningar vid MP3 och 4 i Almedal från juli 2014 till december 2015. Uppmätta temperaturer i mark visas dygnsvis som flytande veckomedelvärde baserat på dygnsmedelvärden. Temperatur hos framledning ges som dygnsmedelvärde vid närliggande fjärrkylacentral.

Measurements at MP3 and 4 in Almedal from July 2014 to December 2015. Measured temperatures in soil are shown daily as floating weekly average based on daily averages. Temperature of supply is given as daily averages from nearby substation.



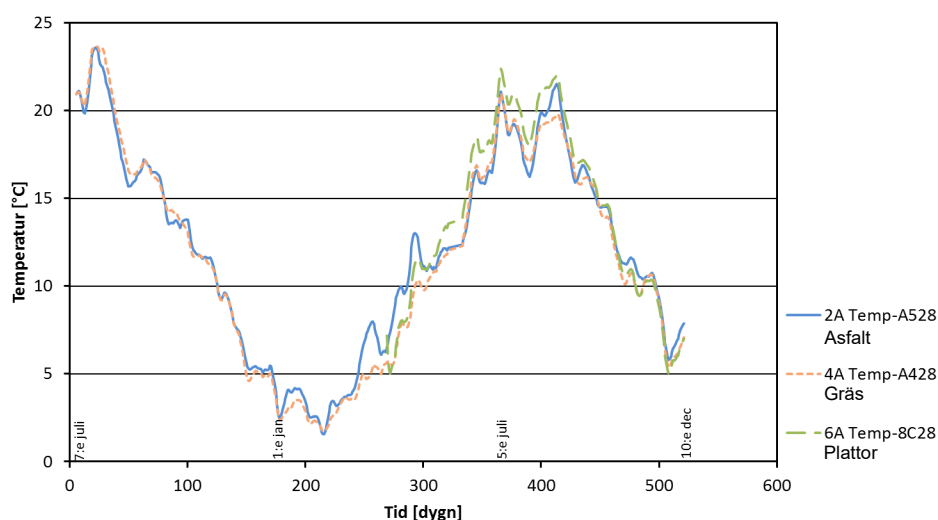
Figur 16: Temperaturmätningar vid MP5 och 6 i Almedal från april 2015 till december 2015. Uppmätta temperaturer i mark visas dygnsvis som flytande veckomedelvärde baserat på dygnsmedelvärden. Temperatur hos fjärrvärmens framledning ligger omkring 80 °C och mäts vid närliggande fjärrvärmecentral.

Temperature measurements at MP2 in Almedal from April 2015 to December 2015. Measured temperatures in soil are shown daily as floating weekly average based on daily averages. Temperature of supply of district heating pipe is about 80 °C measured at nearby substation.

I Figur 16 visas också mätningar kring en fjärrvärmeledning som har en täckning på 1,35 m. En jämförelse av mätningarna vid MP2 med MP5, ger uppskattningsvis en temperaturhöjning på 8 °C på ett avstånd på 0,7 m från fjärrvärmeledningens centrum. Detta baseras på mätningarna i augusti 2015 i spannet från 400-415 dygn.

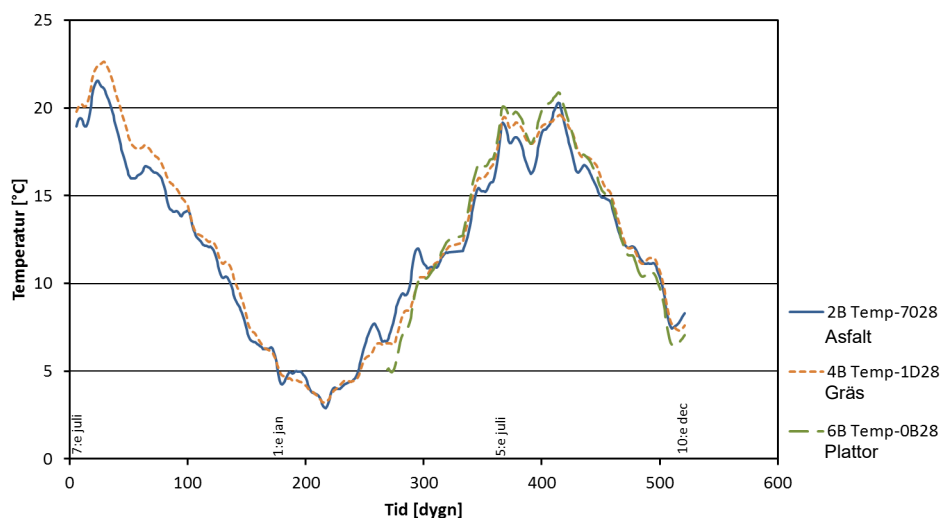
I Almedal finns givare på samma djup med olika ytbeläggning: asfalt, gräs och plattor. Asfaltsytan skuggas på sena eftermiddagarna av ett träd, men samtliga platser skuggas av ett kontorshus under del av förmiddagen. Skuggan försvinner först från ytan med plattor och ungefär samtidigt från asfaltsytan och gräsytan. Gräsytan var jordig efter klen grästillväxt.

I Figur 17, Figur 18 och Figur 19 visas veckomedelstemperaturer på djupen 0,3 m, 0,6 m respektive 0,9 m. På samtliga nivåer har högst temperatur mätts upp under den stensatta ytan. Under 2015 har ett maximum mätts upp 8 juli vid 366 dygn och ett annat 24 augusti vid 413 dygn 0,3 m under den stensatta ytan. På nästa djup 0,6 m kommer maximumen 1-2 dygn senare. På djupet 0,9 m ligger maximumen ytterligare 2-3 dygn senare. För toppen vid dygn 413 verkar gräset ha en viss avkylande effekt. Detta kan bero på att gräset har växt till sig något, men det finns ingen saftig gräsmatta på platsen.



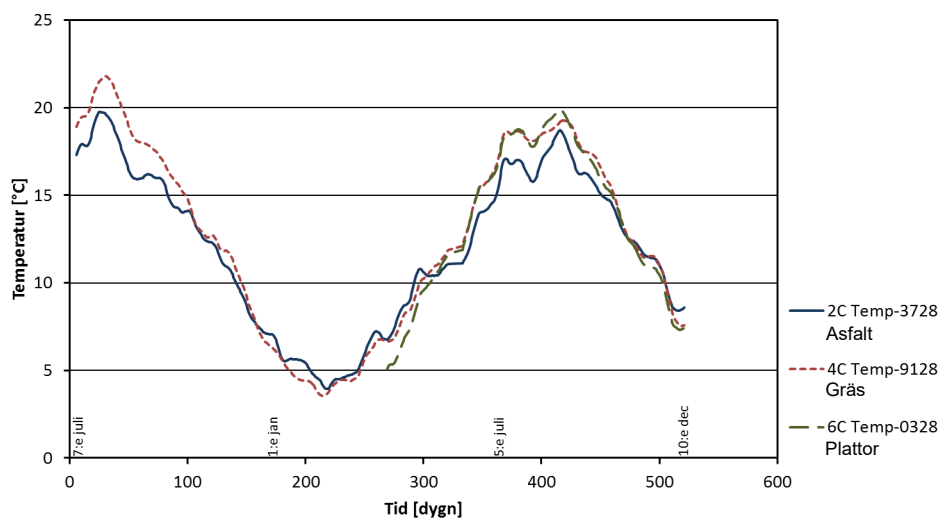
Figur 17: Temperaturmätningar vid MP2, 4 och 6 på djupet 0,3 m i Almedal under asfalt, gräs respektive plattor från april 2015 till december 2015. Uppmätta temperaturer i mark visas dygnsvis som flytande veckomedelvärde baserat på dygnsmedelvärden.

Temperature measurements at MP2, 4 and 6 at depth 0.3 m in Almedal below asphalt, grass, and paving from April 2015 to December 2015. Measured temperatures in soil are shown daily as floating weekly average based on daily averages.



Figur 18: Temperaturmätningar vid MP2, 4 och 6 på djupet 0,6 m i Almedal under asfalt, gräs respektive plattor från april 2015 till december 2015. Uppmätta temperaturer i mark visas dygnsvis som flytande veckomedelvärde baserat på dygnsmedelvärden.

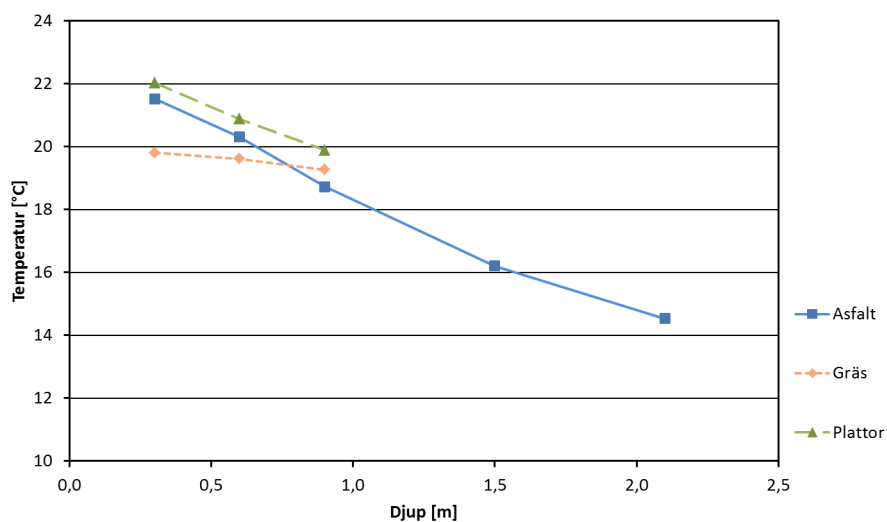
Temperature measurements at MP2, 4 and 6 at depth 0.6 m in Almedal below asphalt, grass, and paving from April 2015 to December 2015. Measured temperatures in soil are shown daily as floating weekly average based on daily averages.



Figur 19: Temperaturmätningar vid MP2, 4 och 6 på djupet 0,9 m i Almedal under asfalt, gräs respektive plattor från april 2015 till december 2015. Uppmätta temperaturer i mark visas dygnsvis som flytande veckomedelvärde baserat på dygnsmedelvärden.

Temperature measurements at MP2, 4 and 6 at depth 0.9 m in Almedal below asphalt, grass, and paving from April 2015 to December 2015. Measured temperatures in soil are shown daily as floating weekly average based on daily averages.

Maximala veckomedelstemperaturer som inträffade under 2015 i Almedal efter 24 augusti visas i Figur 20. För de ytligaste givarna under gräs och plattor inträffar maximala värdet tidigare under säsongen, men för de övriga givare är dessa de maximala. Tidsmässigt hör de redovisade värdena ihop och det är inga stora skillnader mot de maximala under säsongen.

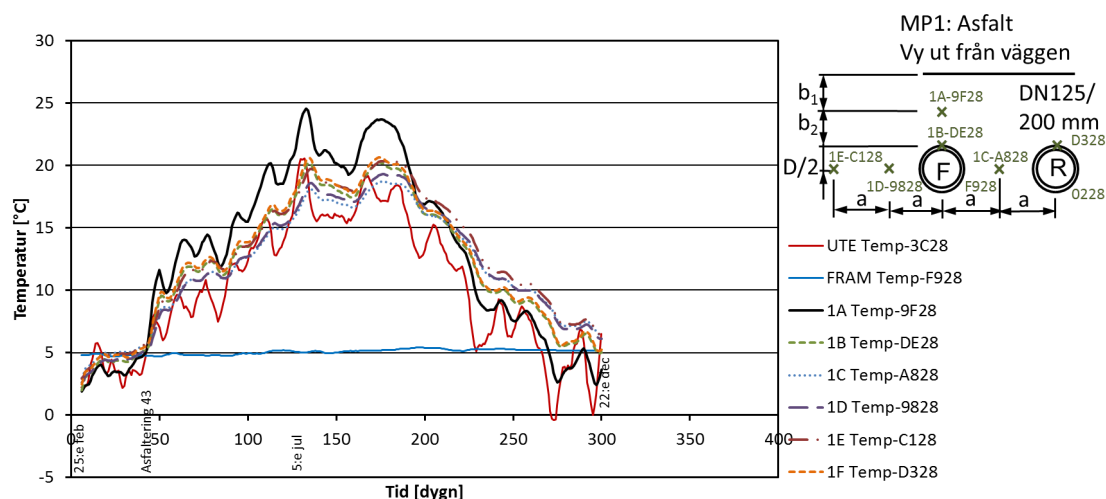


Figur 20: Maximala temperaturer från MP2, 4 och 6 i Almedal under sommaren 2015 uppmätta efter 24 augusti 2015 på olika djup. Maximumet på djupet 2,1 m inträffar 15 dagar senare än vid djupet 0,3 m. Ytbeläggningen är asfalt, gräs respektive plattor. Maxima baseras på veckomedelvärde.

Maximum temperatures from MP2, 4 and 6 in Almedal in summer of 2015 measured after August 24, 2015 at various depths. Maximum temperature at depth 2.1 m occurs 15 days later than at depth of 0.3 m. Soil surface is asphalt, grass and paving. Maximum is based on weekly averages.

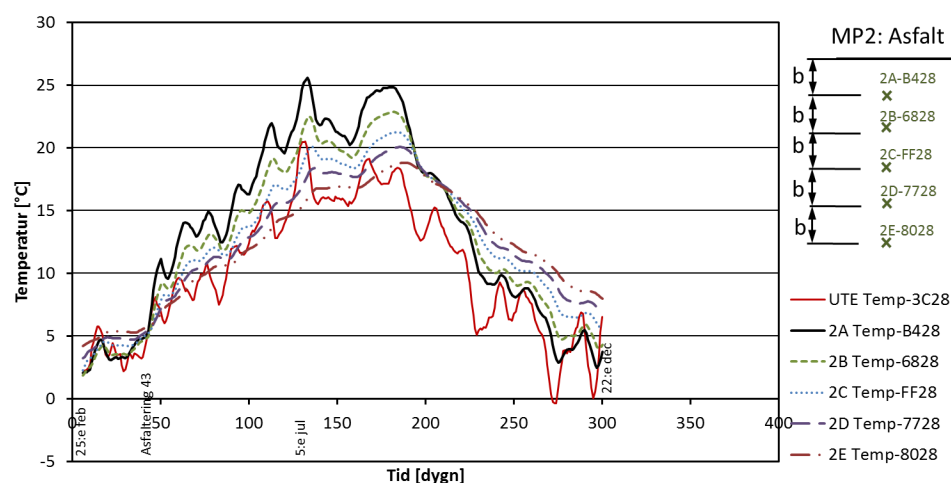
6.2 KISTA

I Figur 21 och Figur 22 visas resultat från mätningarna i Kista. Fjärrkylaledningarna är isolerade med ett tunt lager polyuretan avsett för fjärrkyla. En jämförelse ger att fjärrkylaledningarna har en viss avkylande effekt. Det skiljer drygt 1 °C i augusti 2015 vid 182 dygn, mellan givare på manteln och givare på samma djup vid MP2. Skillnaderna mellan givare 1C och 1D i samma nivå på båda sidor röret och temperaturen för en punkt mellan givare 2C och 2D blir vid samma tidpunkt ca 1,5 °C.



Figur 21: Temperaturmätningar vid MP1 i Kista från februari till december 2015. Uppmätta temperaturer i mark, luft och framledning visas dygnsvis som flytande veckomedelvärde baserat på dygnsmedelvärden.

Measurements at MP1 in Kista from February to December 2015. Measured temperatures in soil, air and supply are shown daily as floating weekly average based on daily averages.



Figur 22: Temperaturmätningar vid MP2 i Kista från februari till december 2015. Uppmätta temperaturer i mark och luft visas dygnsvis som flytande veckomedelvärde baserat på dygnsmedelvärden.

Measurements at MP2 in Kista from February to December 2015. Measured temperatures in soil and air are shown daily as floating weekly average based on daily averages.

Tabell 1: Sammanfattning av uppmätta extrema veckomedelstemperaturer under vinter och sommar under delar av 2014-15 på två mätplatser i Göteborg och Stockholm. Mätplatserna är tidvis solbelysta. Vidare har temperaturer angivits under en tidpunkt på våren och en på hösten. Temperaturen har mätts på olika djup.

Årstid	Djup [m]/Luft	Temperatur [°C]
Sommar ¹	Luft	22±2
	0,3	23±2,5
	0,6-0,9	21±2
	1,5-2,1	17±2
Höst ² 15/10	Luft	9±3
	0,3	11±2,5
	0,6-0,9	13±2
	1,5-2,1	14
Vinter ³	Luft	-2
	0,3	1,5
	0,6-0,9	3,5±0,5
	1,5-2,1	6,5±0,5
Vår ⁴ 15/4	Luft	7
	0,3	9,5±1,5
	0,6-0,9	8±1,5
	1,5-2,1	7±0,5

¹ Mätdata från Göteborg somrarna 2014-15, Stockholm sommaren 2015

² Mätdata från Göteborg höstarna 2014-15, Stockholm hösten 2015

³ Mätdata från Göteborg vintern 2014/15

⁴ Mätdata från Göteborg våren 2015, Stockholm våren 2015

6.3 KARAKTERISTISKA TEMPERATURER

I Tabell 1 finns en sammanställning av temperaturer i luft och mark vid fyra tillfällen per år. För sommar och vinter har de extrema veckomedelstemperaturerna redovisats under mätperioden. Under vår och höst ändras marktemperaturerna kontinuerligt och två tidpunkter mitt i dessa perioder har valts ut. På en solbelyst plats kan det i medel under en vecka bli över 20 °C i marken på djup mellan 0,6-0,9 m. Resultaten baseras på mätningar i Göteborg (Almedal) från juli 2014 till december 2015 och även i Stockholm (Kista) från februari 2015 till december 2015.

6.4 ANDRA MÄTNINGAR

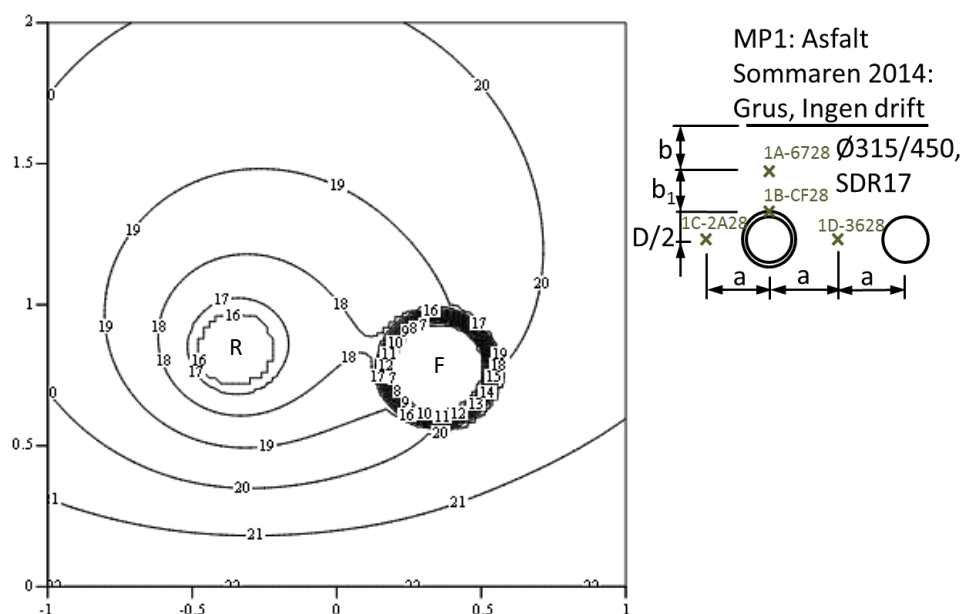
De mätningar som har gjorts i projektet ger framförallt underlag för temperaturnivåer i mark som är relevanta vid förläggning av fjärrkylaledningar i grävda schakt. För att komplettera bilden för att bedöma temperaturer relevanta för styrd borrning, är vi hänvisade till litteraturen.

Thunholm (2015) har berättat att Sveriges Geologiska Undersökning (SGU) har pågående och avslutade temperaturmätningar av grundvatten på ett antal platser i Sverige. Temperaturen har mätts på vatten från olika djup. Utgående ifrån dessa mätningar bedöms att på djup mellan 6-20 m ligger vattentemperaturerna i södra Sverige i spannet mellan 6-8 °C, mellersta Sverige mellan 3-7 °C, och norra Sverige 1-6 °C.

7 Analys av mätresultat

För att kunna dimensionera och räkna ut energiförluster och nödvändiga flöden i ett fjärrkyla nät är det nödvändigt att göra förenklingar. Det är egentligen många faktorer som varierar vid drift: omgivningens temperatur, medietemperaturer i fram- och returledning, flödena i ledningarna och efterfrågan hos kunderna. I de simuleringarna av ett fjärrkylanät som görs här antar vi här att omgivningens temperatur är konstant under den period som studeras och även köldbäraren i fram- och returledning. För fjärrkylanätet ges det dimensionerande fallet konsumtionen av en varm sommarvecka. Som ett led i att hitta de dimensionerande fallen, studeras de stationära temperaturerna kring ledningarna som liknar de uppmätta under den varmaste perioden under 2015. Här används lösningar givna i Rapporten av Persson och Claesson (2005a) och förenklingarna i Kapitel 5.

Låt oss studera ett stationärt fall med liknande förutsättningar som MP1 i Almedal vid tidpunkten 410 dygn i augusti 2015. Vid MP1 är ytterdiametern hos medierören $\varnothing 315$ mm. Framledningen är isolerad med polyuretan och mantel av polyeten har ytterdiametern 450 mm. Returledningen är oisolerad.



Figur 23: Temperaturen i marken vid stationära förhållanden vid MP1 i Almedal, då medietemperaturerna 6,5 °C respektive 16 °C, ytttemperaturen 22 °C och termisk konduktivitet 1,5 W/m K i mark har antagits. Termisk konduktivitet i polyuretan och polyeten har antagit till 0,020 W/m K respektive 0,4 W/m K. I diagrammet går djupet uppåt, vilket gör att tänkt vridning av diagrammet på 180° ger överensstämmelse med skiss till höger. Parametrar: $b=0,3$ m, $b_1=0,25$ m, $D=0,45$ m och $a=0,35$ m.

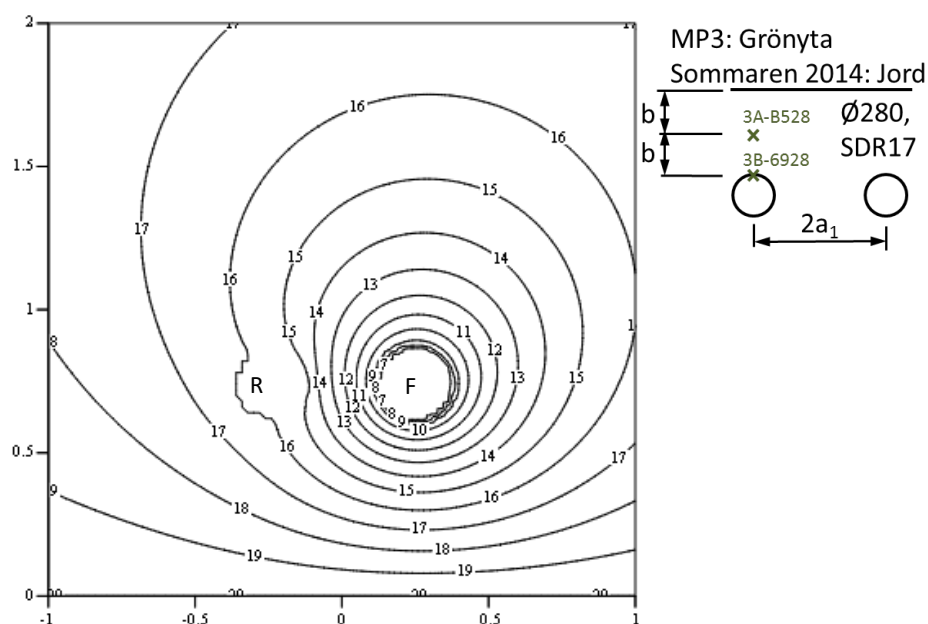
Temperature of ground at stationary conditions at MP1 in Almedal when carrier temperatures are 6.5 °C and 16 °C, respectively. Ground surface temperature 22 °C and thermal conductivity 1.5 W/m K in soil have been assumed. Thermal conductivity of polyurethane and polyethylene are assumed to 0.020 W/m K and 0.4 W/m K, respectively. In diagram depth is upwards making supposed rotation of chart of 180° conformity with sketch to the right. Parameters: $b=0.3$ m, $b_1=0.25$ m, $D=0.45$ m and $a=0.35$ m.

Markens ytemperatur antas vara 22 °C och medietemperaturerna i fram- och returledning antas vara 6,5 °C respektive 16 °C, se Figur 23. Simuleringen ger att temperaturen i området mellan ledningarna ligger i huvudsak mellan 17 °C och 18 °C. Den uppmätta temperaturen mellan ledningarna av givare 1D har en ökande trend men är förvånansvärt låg ca 12 °C vid dygn 410, se Figur 12.

Den oisolerade returledningen kan ha en avkylande effekt, men när stationärtillstånd är nått bör den uppmätta temperaturen överskrida medietemperaturen i returledningen när ytmarktemperaturen är högre. Som tidigare nämnts, kan orsaken till låga temperaturer uppmätta med givare 1D bero på att givaren är skadad, har flyttat på sig vid återfyllningen eller är påverkad av strömmande vatten.

Ett stationärt fall med liknande förutsättningar vid MP3 i Almedal vid tidpunkten 410 dygn i augusti 2015 ligger till grund för resultaten i Figur 24. Vid MP3 är ytterdiametern hos medierören Ø280 mm. Fram- och returledningen är oisolerade.

Markens ytemperatur antas vara 20 °C och medietemperaturerna i fram- och returledning antas vara 6,5 °C respektive 16 °C. Speciellt framledningen kylvärmer marken kring ledningarna. Den uppmätta temperaturen mellan ledningarna av givare 3A ligger på 13 °C vid dygn 410 och i beräkningen blir det 16 °C, se Figur 15.

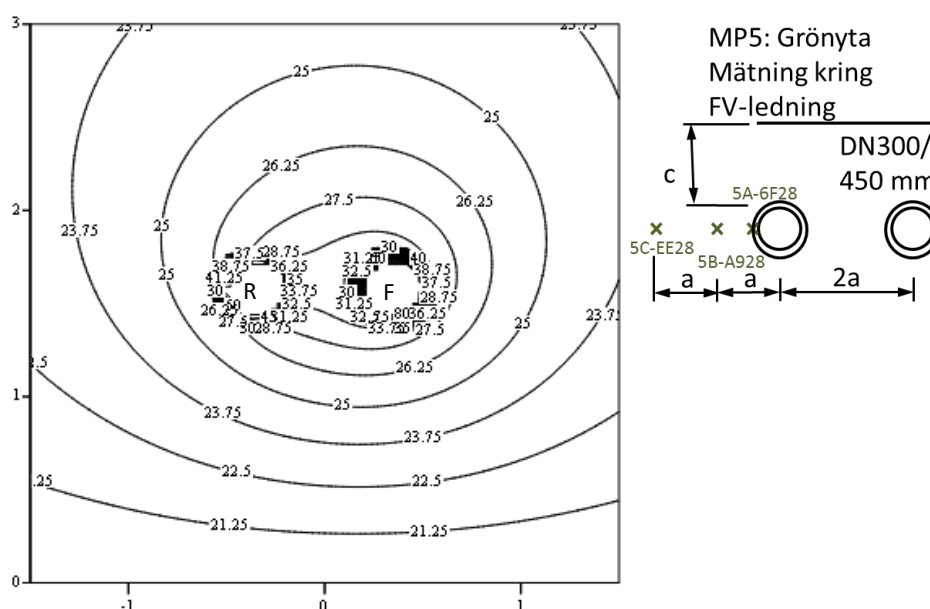


Figur 24: Temperaturen i marken vid stationära förhållanden vid MP3 i Almedal, då medietemperaturerna 6,5 °C respektive 16 °C, ytemperaturen 20 °C och termisk konduktivitet 1,5 W/m K i mark har antagits. Termisk konduktivitet i polyeten har antagits till 0,4 W/m K. I diagrammet går djupet uppåt, vilket gör att tänkt vridning av diagrammet på 180° ger överensstämmelse med skiss till höger. Parametrar $b=0,3$ m och $a_1=0,25$ m.

Temperature of ground at stationary conditions at MP3 in Almedal when carrier temperatures are 6.5 °C and 16 °C, respectively. Ground surface temperature 20 °C and thermal conductivity 1.5 W/m K in soil have been assumed. Thermal conductivity of polyethylene assumed to 0.4 W/m K. In diagram depth is upwards making supposed rotation of chart of 180° conformity with sketch to the right. Parameters $b=0.3$ m och $a_1=0.25$ m.

I Figur 25 studeras ett stationärt temperaturfält kring fjärrvärmeledningarna vid MP5 som baseras på förutsättningarna vid dygn 410. Fjärrvärmeledningarna är prefabricerade och isolerade med dimensionerna DN300/450 mm.

Markens ytttemperatur antas vara 20 °C och medietemperaturerna i fram- och returledning antas vara 83 °C respektive 50 °C. I beräkningen blir temperaturen på manteln 29 °C. På 0,35 m och 0,7 m från centrum på framledningen blir temperaturen i beräkningarna 28 °C respektive 25 °C. Motsvarande uppmätta temperaturer är 29 °C, 26 °C respektive 24 °C, se Figur 16. Här har jordens termiska konduktivitet justerats till 1,8 W/m K för att anpassa beräkningsresultat bättre till uppmätta data. På avståndet 1,0 m från manteln på framledningen blir temperaturen 24 °C, vilket kan jämföras med uppmätt temperatur på 16 °C vid MP2 på samma djup. På avståndet 3,0 m beräknas den stationära temperaturen bli 21 °C, dvs en grad högre än markyttemperaturen.



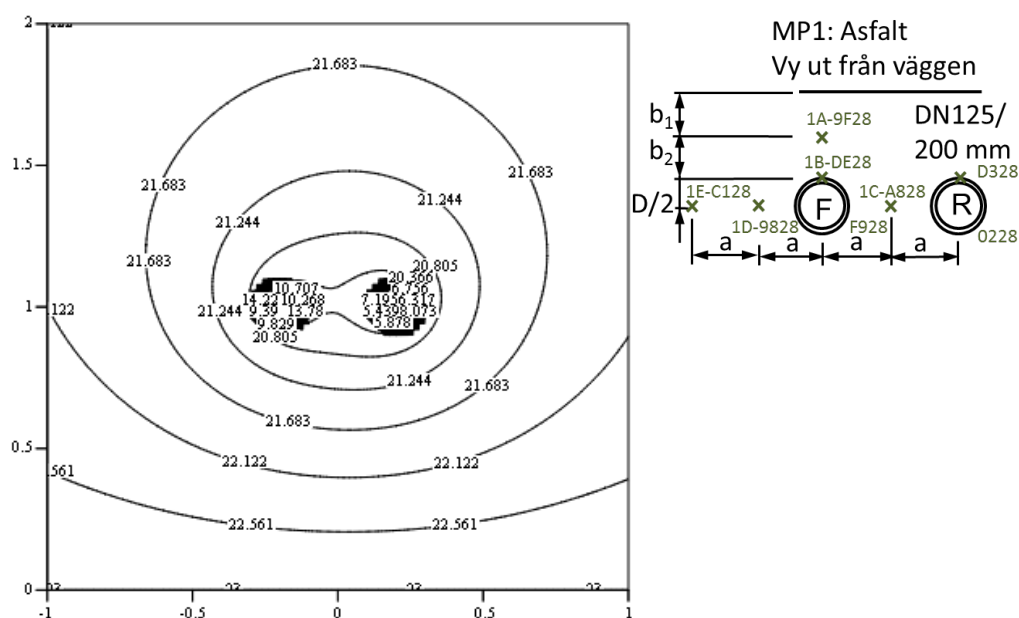
Figur 25: Temperaturen i marken vid stationära förhållanden vid MP5 i Almedal, då medietemperaturerna 83 °C respektive 50 °C, ytttemperaturen 20 °C och termisk konduktivitet 1,8 W/m K i mark har antagits. Termisk konduktivitet i polyuretan, polyeten och stål har antagit till 0,029, 0,4 respektive 55 W/m K. I diagrammet går djupet uppåt, vilket gör att tänkt vridning av diagrammet på 180° ger överensstämmelse med skiss i till höger. Avstånd $c = 1,35$ m och $a = 0,35$ m.

Temperature of ground at stationary conditions at MP5 in Almedal when carrier temperatures are 83 °C and 50 °C, respectively. Ground surface temperature 20 °C and thermal conductivity 1.8 W/m K in soil have been assumed. Thermal conductivity of polyurethane, polyethylene and steel assumed to 0.029, 0.4 and 55 W/m K, respectively. In diagram depth is upwards making supposed rotation of chart of 180° conformity with the right. Distances $c = 1.35$ m and $a = 0.35$ m.

Fallet från Kista studeras i Figur 26 vid förhållande representativa för dygn 180. Här används prefabricerade fjärrvärmeledningar, som är isolerade med dimensionerna DN125/200 mm. Yttemperaturen 23 °C och medietemperaturerna 5 °C respektive 9 °C har antagits. Ovan på manteln och mitt i mellan rören blir temperaturen 20 °C i simuleringen. På samma nivå som centrum hos rören men på avståndet 0,2 m och 0,4 m från manteln blir temperaturerna i det stationära fallet i beräkningarna 21 °C respektive 22 °C. Mätningarna visar att det var något kallare vid tidpunkten 180 dygn i marken, se Figur 21.

Som nämns i inledningen av detta kapitel, krävs förenklingar för att kunna räkna ut förluster i ett fjärrkylanät. En sådan är att räkna med en stationär (konstant) omgivningstemperatur representativ för årstiden. En jämförelse med stationära beräknade temperaturer i mark med uppmätta temperaturer ger ingen perfekt överensstämmelse för sommarlastfallen. En orsak är ständigt förändrade temperaturer som varierar med årstiderna. Förlustberäkningar på fjärrkylanät kan ändå vara relevanta och behöver grundas på indata från en lokal modell.

I Tabell 2 görs en jämförelse av förluster mellan olika medierör, som antingen är oisolerade, isolerade med polyuretan på båda fram- och returledning eller enbart framledning. Förlusten relateras till levererad effekt och då antas samma hastighet råda i medierören oberoende av storlek. Fallet med polyuretan isolerade medierör av polyeten med diameter Ø180 mm normeras till 1,0. Resultaten skall endast jämföras kolumnvis. Stationära förhållanden antas råda, dvs markyttemperaturen, fram- och returledningstemperaturerna är konstanta. Förlusterna beräknas med metoden i Kapitel 5. Beräkningarna gör för olika markyttemperaturer: 22, 13, 9 och 3 °C.



Figur 26: Temperaturen i marken vid stationära förhållanden vid MP1 i Kista, då medietemperaturerna 5 °C respektive 9 °C, yttemperaturen 23 °C och termisk konduktivitet 1,5 W/m K i mark har antagits. Termisk konduktivitet i polyuretan 0,020 W/m K. I diagrammet går djupet uppåt, vilket gör att tänkt vridning av diagrammet på 180° ger överensstämmelse med skisstill höger. Parametrar: $b_1=0,4$ m, $b_2=0,5$ m, $D=0,2$ m och $a=0,2$ m.

Temperature of ground at stationary conditions at MP1 in Kista when carrier temperatures are 5 °C and 9 °C, respectively. Ground surface temperature 23 °C and thermal conductivity 1.5 W/m K in soil have been assumed. Thermal conductivity of polyurethane assumed to 0.020 W/m K. In diagram depth is upwards making supposed rotation of chart of 180° conformity with sketch to the right. Parameters: $b_1=0,4$ m, $b_2=0,5$ m, $D=0,2$ m and $a=0,2$ m.

Tabell 2: Jämförelse av förluster hos olika ledningar: Medierör av polyeten med diameter Ø180 mm, prefabricerat fjärrkylarör med stålmedierör dimension DN150 och medierör av polyeten med diameter Ø450 mm. Temperaturen i fram- och returledning har antagits till 6 °C respektive 16 °C. Polyuretan isolering har konduktiviteten 0,020 W/m K, polyeten 0,4 W/m K och stål 55 W/m K. Den termiska konduktiviteten för marken är 1,5 W/m K. Mediet antas färdas med samma hastighet [m/s] i samtliga rör. Förlusten hos de isolerade polyetenrören i relation till leverans normeras till 1,0. Endast jämförelse inom respektive kolumn är meningsfull. För den största manteldimensionen är avståndet mellan rören 180 mm vilket ger läget för medierören för just den dimensionen, då medierörens placering är fixerad för respektive dimension. I kolumnen för varje markyttemperatur beaktas den totala förlusten från både fram- och returledning i relation till leverans av effekt. En negativ förlust är en vinst, dvs tillskott av kyla. De gynnsammaste fallen är feta.

Tempera- tur hos				22 °C	13 °C	9 °C	3 °C
markyta	Isole- ring	Täck- ning [m]	Isole- ring [mm]	Norme- rad total förlust/ leve- rans	Norme- rad total förlust/ leve- rans	Norme- rad total förlust/ leve- rans	Norme- rad total förlust/ leve- rans
Rör							
Ø180	Ingen	0,6	0	5,6	5,6	-5,6	-5,6
Ø180/250	F&R	0,6	35	1,0 b)	1,0	-1,0	-1,0
Ø180/250	F	0,6	35	2,5 a)	-4,6	-12,8	-6,3
Ø180	Ingen	0,9	0	5,0	5,0	-5,0	-5,0
DN150	Ingen	0,6	0	6,0	6,0	-6,0	-6,0
DN150/250	F&R	0,6	40,9	0,8 b)	0,8	-0,8	-0,8
DN150/250	F	0,6	40,9	2,7	-5,5	-14,5	-7,0
DN150/225	F&R	0,6	28,4	1,1	1,1	-1,1	-1,1
Ø450	Ingen	0,6	0	1,2	1,2	-1,2	-1,2
Ø450/560	F&R	0,6	55	0,2	0,2	-0,2	-0,2
Ø450/560	F	0,6	55	0,5	-0,9	-2,6	-1,3
Ø450/500	F&R	0,6	25	0,4	0,4	-0,4	-0,4

Låt oss till en början bara betrakta sommarfallet med markyttemperaturen 22 °C och den totala förlusten från fram- och returledning. Av Tabell 2 framgår det att det är fördelaktigt att isolera både fram- och returledning, se ruta a). Det blir 5,6 gånger mer förluster från ett par oisolerade än från ett par isolerade av storlek Ø180 mm med given isolering. En jämförelse av polyetenrör med Ø180 mm och stålrör DN150 ger en fördel för stålröret eftersom stålröret är tunnare och ger mer utrymme för isolering och kan även leverera något mer effekt med något större innerdiameter, se rutorna b). Alltså förlusterna relaterat till levererad effekt blir alltså 0,8 gånger så stor för DN150 som för Ø180 mm med given isolering av båda ledningarna. En jämförelse av dimensionen Ø180 mm och Ø450 mm visar att isoleringen har mer betydelse för den mindre dimensionen, då hastigheten [m/s] i rören är densamma oberoende av storlek. Förlusterna relativt levererad effekt minskar när dimensionen ökar.

För markyttemperaturen 13 °C och 9 °C, dvs då markyttemperaturen ligger mellan temperaturen hos fram- och returledningen, är det mest fördelaktiga fallet att isolera enbart framledning. Detta beror på att marken kylvärmer en oisolerad returledning. Vid markyttemperaturen 9 °C och även vid 3 °C är förlusterna negativa vilket betyder att ledningarna kyls av den omgivande marken. Vid markyttemperaturen 3 °C är det också mest fördelaktigt att isolera enbart framledningen, men helt oisolerade ledningar är ur förlustsynpunkt också gynnsamt.

Tabell 3: Jämförelse av totala förluster, dvs tillförd värmeeffekt, hos samma ledningar som i Tabell 2. En negativ förlust är en vinst, dvs tillskott av kyla. De fall som tidigare bedömdes mest gynnsamma är fortfarande feta.

Tempera- tur hos				22 °C	13 °C	9 °C	3 °C
markyta	Isole- ring	Täck- ning [m]	Isole- ring [mm]	Tillförd värme- effekt [W/m]	Tillförd värme- effekt [W/m]	Tillförd värme- effekt [W/m]	Tillförd värme- effekt [W/m]
Rör							
Ø180	Ingen	0,6	0	43,5	7,9	-7,9	-31,6
Ø180/250	F&R	0,6	35	7,7	1,4	-1,4	-5,6
Ø180/250	F	0,6	35	19,5	-6,4	-17,9	-35,2
Ø180	Ingen	0,9	0	38,6	7,0	-7,0	-28,1
DN150	Ingen	0,6	0	47,5	8,6	-8,6	-34,6
DN150/250	F&R	0,6	40,9	6,6	1,2	-1,2	-4,8
DN150/250	F	0,6	40,9	20,9	-7,9	-20,7	-39,9
DN150/225	F&R	0,6	28,4	8,8	1,6	-1,6	-6,4
Ø450	Ingen	0,6	0	56,3	10,2	-10,2	-40,9
Ø450/560	F&R	0,6	55	11,4	2,1	-2,1	-8,3
Ø450/560	F	0,6	55	25,6	-7,7	-22,5	-44,7
Ø450/500	F&R	0,6	25	21,4	3,9	-3,9	-15,6

I Tabell 3 ges de totala förlusterna för samma ledningar som i Tabell 2 utan normering för att öka förståelsen.

Tabell 4: Jämförelse av förluster hos olika ledningar: Medierör av polyeten med diameter Ø180 mm, prefabricerat fjärrkylarör med stålmedierör dimension DN150 och medierör av polyeten med diameter Ø450 mm. Temperaturen i fram och returledning har antagits till 6 °C respektive 16 °C. Polyuretan isolering har konduktiviteten 0,020 W/m K, polyeten 0,4 W/m K och stål 55 W/m K. Den termiska konduktiviteten för marken är 1,5 W/m K. Mediet antas färdas med samma hastighet [m/s] i samtliga rör. Förlusten hos de isolerade polyetenrören i relation till leverans normeras till 1,0. Endast jämförelse inom respektive kolumn är meningsfull. För den största manteldimensionen är avståndet mellan rören 180 mm vilket ger läget för medierören för just den dimensionen, då medierörens placering är fixerad för respektive dimension. I kolumnen för varje markyttemperatur beaktas förlusten från framledning i relation till leverans av effekt. En negativ förlust är en vinst, dvs tillskott av kyla. De gynnsammaste fallen är feta.

Tempera- tur hos				22 °C	13 °C	9 °C	3 °C
markyta	Isole- ring	Täck- ning [m]	Isole- ring [mm]	Norme- rad förlust fram/ leve- rans	Norme- rad förlust fram/ leve- rans	Norme- rad förlust fram/ leve- rans	Norme- rad förlust fram/ leve- rans
Rör							
Ø180	Ingen	0,6	0	7,8	10,4	15,6	9,0
Ø180/250	F&R	0,6	35	1,0	1,0	1,0	-1,0
Ø180/250	F	0,6	35	0,9	1,2	1,8	1,0
Ø180	Ingen	0,9	0	7,3	10,1	15,8	10,9
DN150	Ingen	0,6	0	9,0	12,5	19,7	14,0
DN150/250	F&R	0,6	40,9	0,8	0,8	0,8	-0,9
DN150/250	F	0,6	40,9	0,7	1,0	1,6	1,1
DN150/225	F&R	0,6	28,4	1,1	1,1	1,1	-1,1
Ø450	Ingen	0,6	0	1,6	2,1	3,1	1,7
Ø450/560	F&R	0,6	55	0,2	0,2	0,2	-0,2
Ø450/560	F	0,6	55	0,2	0,3	0,4	0,2
Ø450/500	F&R	0,6	25	0,5	0,5	0,5	-0,3

I Tabell 4 betraktas istället förlusten från enbart framledningen. För markyttemperaturen 22 °C, när marken är varmare än returledningen, så ger en oisolerad returledning en positiv effekt. Denna beror på att marken kring framledningen kyls något av en oisolerad returledning. Detta fall kan vara av intresse om det är billigt att producera fjärrkylan.

För markyttemperaturen 13 °C och 9 °C, när en oisolerad returledning kyls av kommer den även att värma marken kring framledningen. Detta betyder om man vill minimera förlusterna från framledningen skall man isolera både fram- och returledning, se Tabell 4.

I de fall där markyttemperaturen ligger under temperaturen hos både fram- och returledningen kommer marken att kyla av oisolerade ledningar. Returledningen kommer även då att värma marken kring framledningen. Se Tabell 4 och kolumnen med markyttemperaturen 3 °C. Skall man minimera förlusterna på framledningen skall man isolera båda ledningarna.

Tabell 5: Jämförelse av förluster hos framledningen, dvs tillförd värmeeffekt, hos samma ledningar som i Tabell 4. En negativ förlust är en vinst, dvs tillskott av kyla. De fall som tidigare bedömdes mest gynnsamma är fortfarande feta.

Tempera- tur hos				22 °C	13 °C	9 °C	3 °C
markyta	Isole- ring	Täck- ning [m]	Isole- ring [mm]	Tillförd värme- effekt fram [W/m]	Tillförd värme- effekt fram [W/m]	Tillförd värme- effekt fram [W/m]s	Tillförd värme- effekt fram [W/m]
Rör							
Ø180	Ingen	0,6	0	45,2	27,4	19,5	7,7
Ø180/250	F&R	0,6	35	5,8	2,7	1,3	-0,9
Ø180/250	F	0,6	35	5,1	3,1	2,2	0,9
Ø180	Ingen	0,9	0	42,6	26,8	19,8	9,3
DN150	Ingen	0,6	0	53,2	33,8	25,1	12,2
DN150/250	F&R	0,6	40,9	4,9	2,2	1,0	-0,8
DN150/250	F	0,6	40,9	4,2	2,7	2,0	1,0
DN150/225	F&R	0,6	28,4	6,7	3,1	1,5	-0,9
Ø450	Ingen	0,6	0	57,6	34,6	24,4	9,0
Ø450/560	F&R	0,6	55	8,6	3,9	1,9	-1,2
Ø450/560	F	0,6	55	7,6	4,6	3,2	1,2
Ø450/500	F&R	0,6	25	16,9	8,1	4,3	-1,6

I Tabell 5 ges förlusterna hos framledningen för samma ledningar som i Tabell 4 utan normering för att öka förståelsen.

Tabell 6: Jämförelse av förluster hos olika ledningar förlagda på olika djup. Det första fallet skall simulera en förläggning i en rörgrav med täckning ca 0,6 m, det andra en förläggning med styrdd borrhning med stort avstånd mellan fram- och returledning och i det tredje fallet är det styrdd borrhning med litet avstånd mellan rören. Medierör av polyeten med diameter Ø180 mm med och utan isolering och mantel. Temperaturen i fram och returledning har antagits till 6 °C respektive 16 °C. Polyuretan isolering har konduktiviteten 0,020 W/m K och polyeten 0,4 W/m K. Den termiska konduktiviteten för marken är 1,5 W/m K. Förlusten hos isolerade polyetenrör i relation till leverans normeras till 1,0 för förläggning i rörgrav. För fallet med rörgrav är avståndet mellan två isolerade rör 180 mm, och samma lägen tillämpas vid de olika isoleringsalternativen. I den näst sista kolumnen beaktas den totala förlusten och i den sista endast förlusten från framledningen. För den styrda borrhningen antas en temperatur på 8 °C. Först antas avståndet mellan rören antas vara ca 8 m, temperaturen antas vara opåverkad på avståndet 4 m från röret. Sedan antas rören ligga nära varandra. Täckningen antas vara 4 m och markyttemperaturen 8 °C. En negativ förlust är en vinst, dvs tillskott av kyla. De gynnsammaste fallen är feta.

Rör	Isole- ring	Förlägg- ning	Täck- ning [m]	Mellan- rum [mm]	Isole- ring [mm]	Mark- tempe- ratur [°C]	Norme- rad förlust	Norme- rad förlust fram
Ø180	Ingen	Rörgrav	0,6	250	0	22	5,7	7,8
Ø180/250	F&R	Rörgrav	0,6	180	35	22	1,0	1,0
Ø180/250	F	Rörgrav	0,6	215	35	22	2,5	0,9
Ø180	Ingen	Styrdd borrning	4	8000	0	8	-1,6	0,8
Ø180/250	F&R	Styrdd borrning	4	8000	35	8	-0,3	0,1
Ø180/250	F	Styrdd borrning	4	8000	35	8	-2,1	0,1
Ø180	Ingen	Styrdd borrning	4	0	0	8	-0,8	6,4
Ø180/250	F&R	Styrdd borrning	4	0	35	8	-0,2	0,2
Ø180/250	F	Styrdd borrning	4	0	35	8	-1,8	0,5

Låt oss jämföra förläggning av fjärrkylarör i rörgrav med täckning 0,6 m och rör förlagda med styrdd borrhning. Sommarfallet beaktas med 22 °C vid marken och marktemperaturen på ett djup av 6 m antas vara 8 °C se Kapitel 6 med referens Thunholm (2015). Stationära förhållanden antas gälla.

Två fall med styrdd borrhning betraktas: fram- och returledning ligger långt från varandra och i det andra fallet nära varandra. För den styrda borrhningen i första fallet antas avståndet mellan rören vara 8 m, temperaturen antas vara opåverkad på avståndet 4 m från röret. I det andra fallet finns inget mellanrum i något isoleringsalternativ. En täckning på 4 m antas och en markyttemperatur på 8 °C.

Betraktas de totala förlusterna så är det mycket mer gynnsamt att förlägga med styrdd borrhning än i rörgraven. Istället för kylförluster erhålls vinster. Allra mest gynnsamt är det att ha en isolerad framledning, men helt oisolerade ledningar är också ett bra alternativ. När totala förluster från både fram- och returledning beaktas i dessa fall spelar avståndet mellan ledningarna liten roll.

Beaktas förlusterna från enbart framledningen, så är oisolerade ledningar förlagda med styrd borrhning och ett stort avstånd mellan fram- och returledning energimässigt något bättre än isolerade ledningar förlagda i en rörgrav.

När ledningarna är förlagda med styrd borrhning och ligger nära varandra, kommer returledningen att värma framledningen. När förluster beaktas från enbart framledningen, är isolerade ledningar förlagda i rörgrav enligt dessa uppskattningar sex gånger mer gynnsamt än oisolerade ledningar förlagda nära varandra med styrd borrhning.

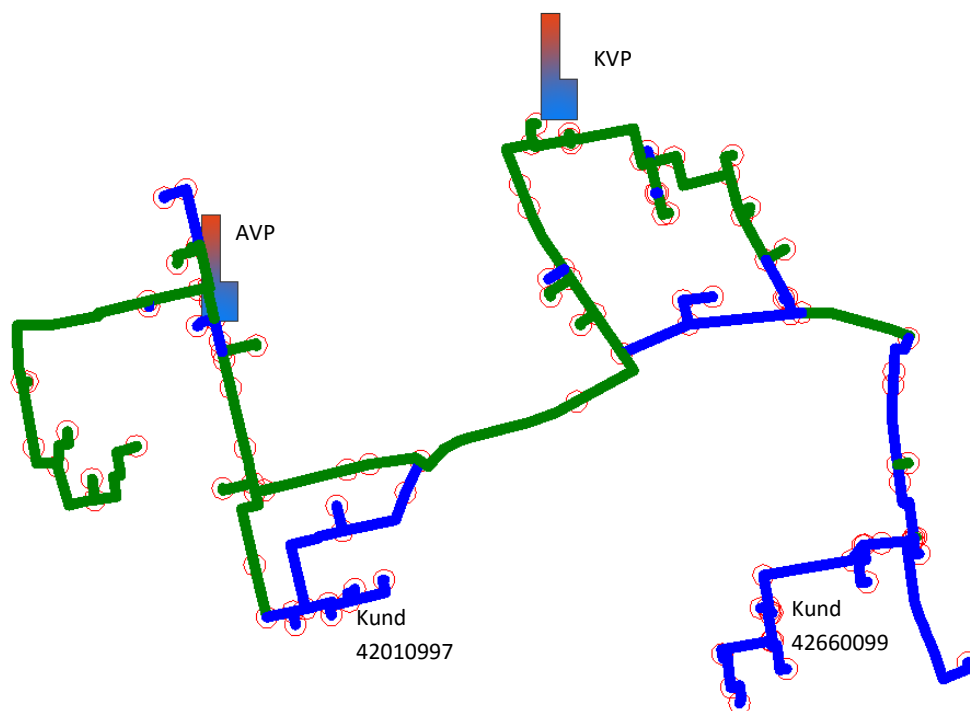
När förluster beaktas från enbart framledningen, är det fördelaktigt att använda isolerade ledningar vid styrd borrhning, när marktemperaturen överskrider framledningens temperatur.

8 Simuleringar av fjärrkylanät

E.ON Värmes fjärrkylanät i Malmö har studerats närmare. En simuleringsmodell i NetSim har använts, se Figur 27. Simuleringsverktyget är utvecklat för fjärrvärme. Förluster ges av ett värmeövergångstal och en temperaturskillnad mellan rör och omgivning. Det finns inga kopplade värmeövergångstal som tar hänsyn till värmeläckage mellan fram- och returledning i datorprogrammet.

Två relativt stora kunder långt ut i nätet har i första hand beaktats. Det finns uppmätta temperaturer hos framledningen vid produktionsanläggningen och hos samtliga kunder. Vidare finns även uppgifter om förbrukning hos samtliga kunder och returtemperatur efter fjärrkylacentralerna. Den producerade energin och returtemperatur vid produktionsanläggningarna registreras också.

Fjärrkylanätet i Malmö består idag av oisolerade ledningar. Produktion- och förbrukningsdata har erhållits för en sommarvecka 1-7 augusti (lördag-fredag) och en höstvecka 17-23 oktober (lördag-fredag), 2015. I ett först steg har resultat från simuleringsmodellen jämförts med registrerade data från anläggningen. I ett andra steg har indata anpassats för att få överensstämmelse. Avståndet (mellanrummet) mellan fram- och returledning har satts till 0,15 m. Markens värmekonduktivitet har valts till 2,5 W/m K och täckningen är 1,0 m. Nätet beskrivs mer detaljerat i Bilaga 2.



Figur 27: Modell av E.ON Värmes fjärrkylanät i Malmö. Blå linjer betecknar polyetenledningar och gröna ställedningar. Utsträckningen av nätet är 1,5 km x 1 km. Produktion kan ske vid AVP och KVP. Rörlängd (summan av fram- och returledning) är 13 km, volym 670 m³ och dimensionerade effekt 10 W.

Model of E.ON cooling network in Malmö. Blue lines represent polyethylene pipes and green steel pipes. Extent of the network is 1.5 km x 1 km. Production can take place at AVP and KVP. Pipe length (sum of flow and return) is 13 km, volume 670 m³, and design power 10 MW.

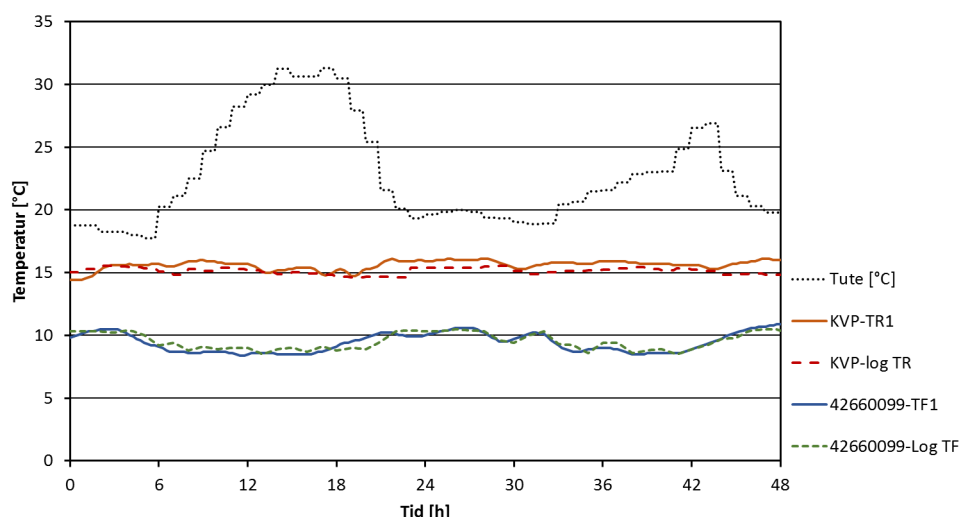
När värmeöverföringen mellan fram- och returledning saknas har det visat sig svårt att få överensstämmelse mellan simulerade resultat och de registrerade resultaten från anläggningen. Detta beror på att värmeöverföringen mellan ledningarna är stor när ledningarna är oisolerade. För en isolerad framledning minskar överföringen med en storleksordning och ytterligare en om båda ledningarna isoleras. För att komma till rätta med detta har förluster från fram- och returledning beräknats i en extern beräkning utanför NetSim. Beräknade flöden har använts som indata i den externa beräkningen.

För beräkningar rörande framledningen används temperaturer levererade av produktionsenheterna och konsumtion hos kunderna. Simulerad framledningstemperatur hos utvalda kunder jämförs med registrerad. Värmekonduktiviteten och marktemperaturen anpassas inom rimliga gränser för att nå överensstämmelse. För returtemperaturen används registrerade returtemperaturer hos kunderna och flöden som indata. Returtemperaturerna vid produktionsanläggningarna bestäms och jämförs med registrerade.

Produktionen kan bestämmas utgående från registrerade temperaturer och flöden, eller utgående ifrån simulerade returledningstemperatur och flöden samt registrerad framledningstemperatur vid produktionsanläggningarna. Konsumtionen hos kunderna ges alltid av registrerade värden från fjärrkylacentralerna.

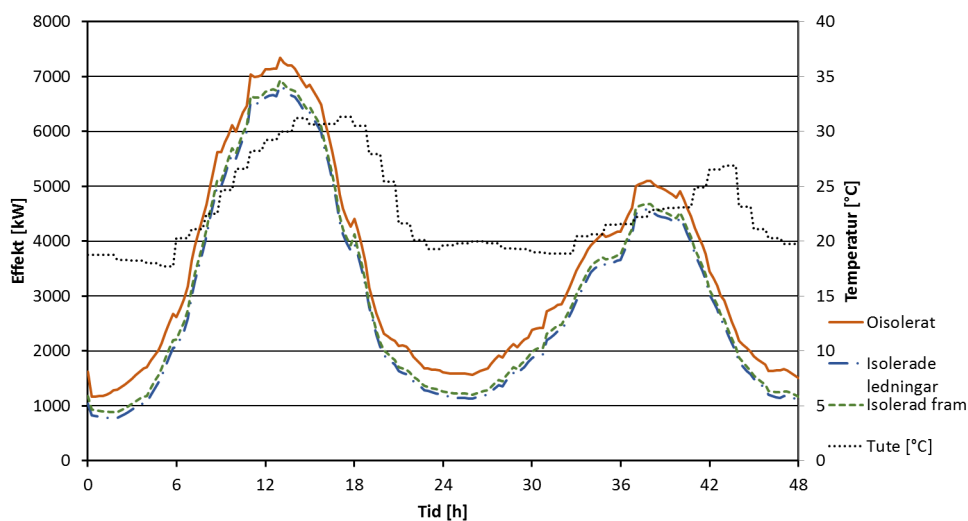
För två dagar i augusti (4-5 augusti, 2015) utförs simuleringar. Den omgivande temperaturen har valts till 21 °C, vilket verkar rimligt jämfört med uppmätta utomhustemperaturer i Malmö och marktemperaturmätningar i Göteborg.

I Figur 28 jämförs uppmätta och beräknade temperaturer för en fjärrkylacentral och returtemperaturerna vid produktionsanläggningen KVP. I Figur 29 visas beräknad produktionseffekt vid AVP och KVP för det faktiska fallet med oisolerade ledningar, men även produktionseffekt för isolerade ledningar och enbart isolerad framledning.



Figur 28: Uppmätta och beräknade framledningstemperaturer hos kund 42660099, samt returtemperaturer vid produktionsenheten KVP för två dagar i augusti.

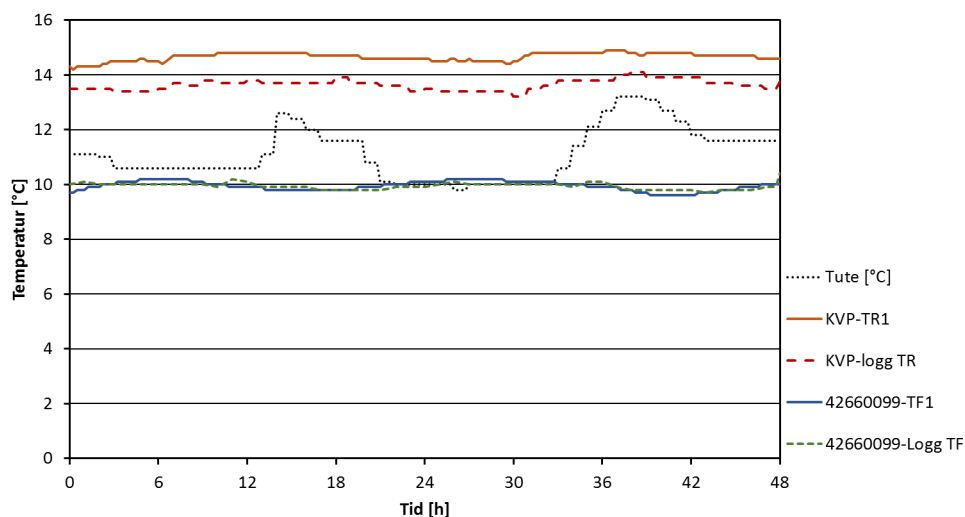
Measured and simulated flow temperatures at customer 42660099 and return temperatures at production unit KVP for two days in August.



Figur 29: Beräknade produktionseffekter vid AVP och KVP för två dagar i augusti för det faktiska fallet med oisolerade ledningar samt för isolerade ledningar och för enbart isolerad framledning.

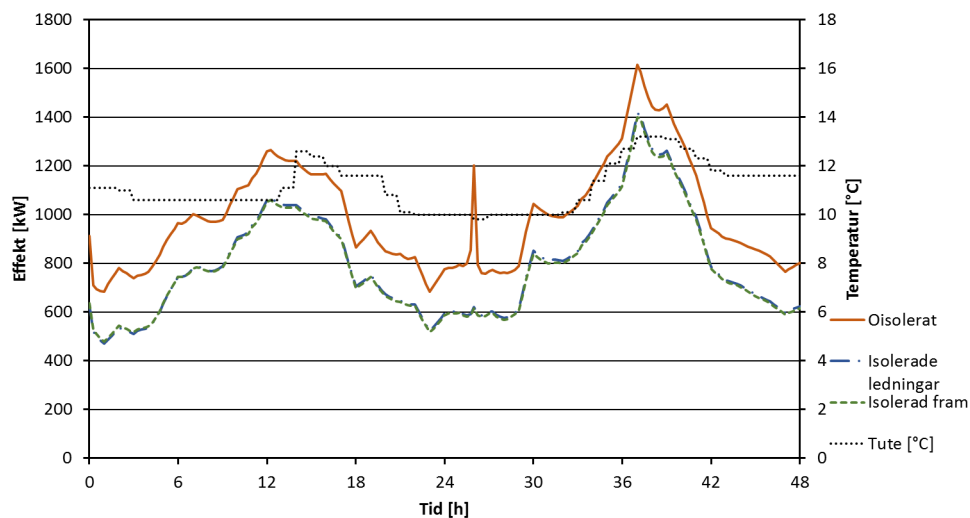
Measured and simulated production power at AVP and KVP for two days in August for the actual case without insulated pipes, but also for insulated lines and insulated flow line only.

För två dagar i oktober (20-21 oktober, 2015) utförs också simuleringar. Den omgivande temperaturen har valts till 15 °C, vilket bedöms vara rimligt jämfört med uppmätta utomhustemperaturer i Malmö och marktemperaturmätningar i Göteborg. I Figur 30 jämförs uppmätta och beräknade temperaturer för en fjärrkylacentral och returtemperaturerna vid produktionsanläggningen KVP. I Figur 31 visas beräknad produktionseffekt vid AVP och KVP för det faktiska fallet med oisolerade ledningar, men även produktionseffekt för isolerade ledningar och enbart isolerad framledning.



Figur 30: Uppmätta och beräknade framledningstemperaturer hos kund 42660099, samt returtemperaturer vid produktionsenheten KVP för två dagar i oktober.

Measured and simulated flow temperatures at customer 42660099 and return temperatures at production unit KVP for two days in October.



Figur 31: Beräknade produktionseffekter vid AVP och KVP för två dagar i oktober för det faktiska fallet med oisolerade ledningar samt för isolerade ledningar och för enbart isolerad framledning.

Simulated production power at AVP and KVP during two days in October for the actual case without insulated pipes, but also for insulated lines and insulated flow line only.

Beräknade förluster för de två dagarna i respektive månad extrapoleras till en vecka. För augusti- och oktoberveckan blir förlusterna 56 MWh respektive 2 MWh. Dessa förluster kan relateras till konsumerad energi vilken var 498 MWh respektive 132 MWh.

Ett befintligt fjärrkylanät har simulerats och resultaten har jämförts med uppmätta data. I ett tredje steg undersöks vad det innebär om ledningarna hade varit isolerade, och resultat har visats i Figur 29 och Figur 31. Två alternativ har undersökts antingen isoleras både fram- och returledning i hela nätet eller så isoleras enbart framledningen. I de studerade fallen har ledningarna isolerats med polyuretan och vald isoleringstjocklek framgår av Bilaga 2. Värmeledningskoefficienten 0,020 W/m K används för polyuretan. Beräknade förluster redovisas för de olika fallen i Tabell 7. Förlusterna är de totala förlusterna från både fram- och returledning. Ur förlustsynpunkt är det mest gynnsamt att isolera både fram- och returledning under de studerade perioderna.

I simuleringarna har värmeövergångstalen presenterade i Bilaga 2 använts. För beräkningen av framledningstemperaturen har endast den interna beräkningen i NetSim tillämpats med värmeövergångstal U_{11} . För returledningen har förluster beräknats enligt Kapitel 5.

Tabell 7: Uppmätt konsumtion och beräknade förluster för befintligt och modifierat fjärrkylanätet i Malmö.

	Oisolerat	Isolering av fram- & returledning	Isolering av framledning
Konsumtion under en vecka i augusti [MWh]	498	498	498
Förluster under en vecka i augusti [MWh]	55,8	9,3	25,1
Konsumtion under en vecka i oktober [MWh]	132	132	132
Förluster under en vecka i oktober [MWh]	1,8	1,3	1,6

9 Analys av simuleringsresultat

Förutom tekniska krav att fjärrkylasystemet skall fungera under bestämda förutsättningar, så behövs det en bedömning om isolering av fjärrkylaledningarna är lönsam. Ett sätt att utvärdera detta presenteras här. Utgångspunkten är fjärrkylanätet i Malmö. Anta att det skall byggas ut i en enda etapp och då skall det beslutas om ledningarna skall isoleras eller inte. Det finns två val av isolering antingen isoleras både fram- och returledning eller enbart framledning.

I Tabell 8 görs en förenklad uppskattning av den årliga besparingen av energi de två isoleringsalternativen skulle ge. Den utgår ifrån de två perioder som har studerats i simuleringarna. Veckan i augusti representerar de dagar då det behövs komfort- och processkyla, och veckan i oktober representerar de veckor då det enbart behövs processkyla. På årsbasis blir det en störst besparing att isolera både fram- och returledningen.

I Tabell 9 redovisas uppskattningar av de extra investeringar som behövs för att isolera ledningarna med polyuretan och förse dessa med mantel, samt isolera skarvar. En antagen produktionskostnad och en kalkylränta ges också. En årlig besparing i pengar beräknas.

Tabell 8: En förenklad uppskattning av årlig besparing i minskade förluster vid isolering av antingen både fram- och returledning eller enbart framledning för fjärrkylanätet i Malmö.

	Oisolerat	Isolering av fram- & returledning	Isolering av framledning
Förluster under en vecka i augusti [MWh]	55,8	9,3	25,1
Besparing under en vecka i augusti [MWh]		46,6	30,7
Antal representativa veckor		16	16
Förluster under en vecka i oktober [MWh]	1,8	1,3	1,6
Besparing under en vecka i oktober [MWh]		0,5	0,2
Antal representativa veckor		36	36
Årlig besparing vid isolering [MWh]		760	500

Tabell 9: Antagna indata till en investeringsbedömning angående isolering av fjärrkylaledningar i Malmös fjärrkylanät.

	Indata	Isolering av fram- & returledning	Isolering av framledning
Kalkylränta	5%		
Kostnad för kyla [kr/kWh]	0,50		
Investering [kkr]		6 000	3 000
Minskade förluster [MWh]		760	500
Årlig besparing [kkr]		380	250

Tabell 10: Beräkning av när investeringen av isolerade fjärrkylaledningar i Malmö blir lönsam med här antagna data.

NPV(besparing)-Investering [kkkr]	Antal år	Isolering av fram- & returledning	Isolering av framledning
Vinst efter	0	-6 000	-3 000
Vinst efter	5	-4 355	-1 918
Vinst efter	10	-3 066	-1 070
Vinst efter	15	-2 056	-405
Vinst efter	16	-1 882	-291
Vinst efter	17	-1 716	-181
Vinst efter	18	-1 558	-78
Vinst efter	19	-1 408	21
Vinst efter	20	-1 264	116
Vinst efter	25	-644	523
Vinst efter	30	-158	843
Vinst efter	31	-75	898
Vinst efter	32	5	951

När vi känner investeringens storlek och den årliga besparingen, kan vi med payback-metoden bestämma när investering är intjänad. Nuvärdet av årliga besparingar B bestäms enligt

$$NPV = B \left[\frac{1}{1+K} + \frac{1}{(1+K)^2} + \frac{1}{(1+K)^3} + \dots + \frac{1}{(1+K)^N} \right] = B \frac{(1+K)^N - 1}{K(1+K)^N} \quad (6)$$

I Tabell 10 beräknas vinsten av investeringsalternativen efter olika antal år. Innan någon besparing har gjorts är noll är vinsten lika med minus investeringen. Efter 19 år har isoleringen av enbart framledningen tjänats in och efter 32 år har isoleringen av både fram- och returledning tjänats in. Enligt dessa uppskattningar är det mer intressant att isolera enbart framledningen, men tiden för att återfå investeringen av isoleringen bedöms som lång.

10 Erfarenheter

Göteborg Energi har i sitt senaste större fjärrkylaprojekt valt att använda polyetenledningar där framledningen isolerats med polyuretan och för setts med en mantel. Fortum Värme valde prefabricerade fjärrkyla-ledningar med medierör av stål, polyuretanisolering och polyetenmantel. I det senare fallet är både fram- och returledning likadana och isoleringstjockleken är tunn.

I Tabell 11 ges en sammanställning av för och nackdelar med tre olika typer av isolerade fjärrkyla-ledningar. Sammanställningen baseras på synpunkter inhämtade från personer knutna till projektet (Hulander 2015, Svarc 2015, Åström 2015).

Tabell 11: Fördelar och nackdelar med olika isolerade fjärrkyla-ledningar.

Typ	Fördelar	Nackdelar
Prefabricerade fjärrkylarör med medierör av stål, isolering av PUR och mantel av PE	• Prefabricerade rör och detaljer enligt standard finns • Tillgång till olika isolerings-tjocklek • Ledning med läckage detektering via larmtrådar finns • Inget korrosionsskydd krävs	• Omfattande installation med olika yrkeskategorier där svetsning och täthetskontroll av medierör, samt muffning ingår • Rören är styva, vilket vid läggning ger liten flexibilitet att komma förbi hinder • Svårt att torka ut fukt ur isolering
Fjärrkylarör med medierör av PE, isolering av PUR och mantel av PE	• Enklare svetsning av medierör med spegelsvetsning och elmuffsvetsning • Rören är inte så styva, vilket vid läggning ger viss flexibilitet att komma förbi hinder • Ingen risk för korrosion • Läckage detektering via larmtrådar kan installeras • Enkelt att skarva ihop med oisolerade PE-ledningar lagda med styrd borrhning • Enkelt att kombinera med oisolerad retur	• Det krävs yrkesmän för muffning • Elmuffsvetsning med stora dimensioner är besvärligt • Det saknas preisolerade rör och detaljer enligt standard • Diffusion av syre genom medierör • Svårt att torka ut fukt ur isolering (aktuellt för läckage-detektering)

Typ	Fördelar	Nackdelar
Fjärrkylarör med medierör av PE, isolering av EPS	• Enklare svetsning av medierör med spegelsvetsning och elmuffsvetsning. • Ingen muffning • Rören är inte så styva, vilket vid läggning ger viss flexibilitet att komma förbi hinder • Ingen risk för korrosion • Mindre fuktkänslig isolering • Enkelt att skarva ihop med oisolerade PE-ledningar lagda med styrd borrhning • Enkelt att kombinera med oisolerad retur	• Elmuffsvetsning med stora dimensioner är besvärligt • Separat hantering av EPS vid installation • En jämnare botten behövs i rörgraven • Diffusion av syre genom medierör • Svår läckage detektering

Växjö Energi (VEAB) och Halmstad Energi (HEM) och miljö har valt att använda polyetenledningar med isolerad framledning av expanderad polystyren (EPS). Detta val grundas på att det blir smidig installation, snabb återfyllnad av rörgrav och kostnader. Det är enkelt att svetsa, när både spegelsvets och elmuffar kan utnyttjas. Större längder kan fogas ihop med spegelsvets bredvid rörgrav. Det krävs en kategori yrkesfolk vid läggning. I Växjö är täckningen 0,6 m i regel (Björdal, 2015) och i Halmstad är täckningen drygt 1 m eftersom inga andra typer ledningar utnyttjar det djupet (Rasmusson, 2015). Man har valt att isolera enbart framledningen med tanke på att kunna upprätthålla funktionen under lågsäsong på vår och höst, när flödet är litet i fjärrkylanätet (Björdal, 2015).

När det gäller förläggning med styrd borrhning är oisolerade polyetenledningar ett enkelt och bra alternativ att använda (Hulander, 2015).

11 Slutsatser och rekommendationer

I projektet har vi konstaterat att mycket höga temperaturer kan råda ytligt på de djup som fjärrkylaledningarna förläggs i rörgrav. Mätningar har genomförts på platser som kan betraktas som extrema ur svenska förhållanden. Det har varit solbelysta platser med asfalts- och plattytor, men även grönytor. När det gäller grönytan var denna något jordig efter klen grästillsväxt. På en solbelyst plats kan det i medel under en sommarvecka bli över 20 °C i marken på djup mellan 0,6-0,9 m. Uppmätta temperaturskillnader mellan olika ytor på sommaren är maximalt ca 2 °C på djupet 0,3 m.

Det har även genomförts simuleringar av fjärrkylanät i drift. Som ett första steg har parametrar anpassats så att simulerade temperaturer stämmer överens med uppmätta. Driftsdata för några sommar- och höstdagar har beaktats. Simuleringarna styrker de generellt höga marktemperaturerna som mätts upp. I ett andra steg har alternativa nät studerats med isolerade fram- och returledningar eller enbart framledning.

När förluster från ledningar beaktas bör även produktionskostnaden beaktas. Är det billigt att producera kyla, så är det väsentligt att beakta förlusterna från framledningen. Är det dyrare att producera är det aktuellt att beakta de totala förlusterna från både fram- och returledning.

Isolering av ledningar minskar förluster till omgivande mark, men även förlusterna kopplat till värmeutbytet mellan fram- och returledning. Utbytet blir väsentligt mindre om enbart framledningen isoleras, men ytterligare en storleksordning mindre om båda ledningarna isoleras.

Isolering är inte av intresse på enbart sommartid, eftersom kylfunktionen behöver upprätthållas för kunder långt ut i nätet även då den allmänna konsumtionen och flödet i ledningarna är mindre. En isolerad framledning ger mindre behov av att pumpa runt vatten i rundgång för att säkerställa kylfunktion under lågsäsong och minimera frysrisk vintertid än en oisolerad.

Mätningar visar att fjärrvärmeledningar värmer upp den omgivande marken rejält. Under sommartid uppmättes en extra temperaturhöjning i marken med 8 °C på avstånd 0,7 m från centrum av en fjärrvärmeframledning DN300/450 mm med medietemperaturen 83 °C. Vidare på ett avstånd av 1,0 m från framledningen förlagd på djupet 1,6 m har den stationära temperaturen beräknats med stöd av mätningar till 24 °C som varmast under augusti 2015, vilket kan jämföras med uppmätta 16 °C långt från andra ledningar på djupet 1,5 m vid samma tidpunkt. Detta talar för större avstånd än 1,0 m mellan framledningar tillhörande fjärrvärme och fjärrkyla då ledningarna ligger parallellt under en längre sträckning. Då avståndet är 3,0 m beräknas den stationära temperaturen bli en grad högre än markytans. Ett mer attraktivt alternativt till stora avstånd kan vara att lägga returledningarna bredvid varandra istället för framledningarna - speciellt då oisolerade fjärrkylaledningar installeras.

Det är fördelaktigt att förlägga fjärrkylaledningar i rörgravar längs mindre solbelysta ytor och grönytor. Då bra isolerade fjärrkylaledningar installeras, är dock placeringen av dessa av mindre betydelse. Ett försök till sammanfattning ges i Tabell 12.

Förutom att det är väsentligt att göra simuleringar av fjärrkylanät i projekteringsstadiet för att säkerställa kylfunktionen hos kunderna i nätet vid olika driftsförhållanden under året, är det av intresse att kvantifiera om det är lönsamt att isolera fjärrkylaledningarna. Payback-metoden baserad på nuvärde har använts där årliga besparingar tack vare isolering diskonterats och jämförts investering för isoleringen. Med metoden bestäms hur lång tid det tar att få igen investeringen.

I projektet har inte någon detaljerad kartläggning gjorts vad gäller materialval. De mest attraktiva materialvalen har ändå tolkats som polyetenrör eller traditionella prefabricerade fjärrvärmerör med stålmedierör och polyuretan isolering med mantel av polyeten. Polyetenrören kan förses med isolering av antingen polyuretan med mantel eller EPS-isolering utan mantel, eller kan vara utan isolering.

Tabell 12: Rekommendationer av förläggning av fjärrkylaledningar.

Förläggning	Förutsättningar	Bra alternativ
Rörgrav	Normal täckning på mindre än 1 m	Isolerad framledning
	Närliggande värmande fjärrvärmeledning längs en längre sträcka	Isolerad framledning
	Fjärrkylasystemets kylfunktion kan säkerställas under olika driftsförhållanden och kyla är billigt att producera i dagsläget under systemets livslängd	Oisolerade ledningar
	Det är dyrt att producera kyla och produktionen under sommaren dominerar den totala produktionen	Isolerad fram- och returledning
Styrd borrhning	Långt avstånd mellan fram- och returledning	Oisolerade ledningar
	Närliggande fram- och returledning	Isolerad framledning
	Fjärrkylasystemets kylfunktion kan säkerställas under olika driftsförhållanden och kyla är billigt att producera i dagsläget under systemets livslängd	Oisolerade ledningar

Referenser

Babus'haq, R. F., Probert, S. D. & Shilston, M. J., District-cooling distribution network: Optimal configuration of a double-pipe system in a rectangular trench, *Applied Energy* 25 (4), s 273-298, 1986.

Björdal, P., Personlig kommunikation, december 2015.

Bøhm, B., On transient heat losses from buried district heating pipes, *International Journal of Energy Research*, 24(15), s 1311-1334, 2000.

Bøhm, B., Experimental determination of heat losses from buried district heating pipes in normal operation, *Heat Transfer Engineering*, 22(3), 41- 51, 2001.

Christiansen, C. H. (red), "Hovedrapport, Energistyrelsen - EFP 2007, Udvikling og demonstration af lavenergi-fjernvarme til lavenergibyggeri", Teknologisk Institut, Taastrup, 2009.

Dalla Rosa, A., Li, H., & Svendsen, S., Method for optimal design of pipes for low-energy district heating, with focus on heat losses, *Energy* 36 (5), s 2407-2418, 2011.

DHC+ Technology Platform, District Heating & Cooling: A vision towards 2020 - 2030 – 2050, 2012.

ELGOCELL, www.elgocell.se, 2015-12-05.

EHP, "Rör för fjärrkyla - Rör och komponenter i fjärrkylesystem", Svensk Fjärrvärme och Euroheat & Power, Tekniska rekommendationer, Bryssel 2008.

Eriksson, D. & Sundén, B., Värme- och masstransport i mantelrör till ledningar för fjärrkyla och fjärrvärme, Fjärrvärmeföreningen, Rapport FOU 1997:15, ISSN 1402-5191, Stockholm 1997.

Hulander, S., E-post, 2015-10-21.

IDEA, District cooling best practice guide, First edition, International District Energy Association, Westborough, MA, 2008.

Kvisgaard, B. & Hadvig S., Varmetab fra fjernvarmeledninger (Heat loss from Pipelines in District Heating Systems), Teknisk Forlag, Copenhagen. ISBN 87-571-0635-5, 1980.

McCabe, R. E., Bender, J. J. & Potter, K. R., Subsurface ground temperature: implications for a district cooling system, *ASHRAE Journal*, 37 (12), s 40-45, 1995.

Nilsson, S., Sällberg, S-E, & Bergström, G., Grund förläggning av fjärrvärme-ledningar, Svensk Fjärrvärme, Rapport Värmegles 2006:25, ISSN 1401-9264, Stockholm 2006

Oppelt, T., Urbaneck, T., & Platzer, B., District cooling networks: Comparison of moduls for calculating heat flow through walls of buried parallel pipes, *Euroheat and Power (English Edition)*, 10 (2), s 26-31, 2013.

Perpar, M., Rek, Z., Bajric, S.; & Zun, I., Soil thermal conductivity prediction for district heating pre-insulated pipeline in operation, *Energy*, 44 (1), s 197-210, 2012.

Persson, C., & Claesson, J., Steady-state thermal problem of insulated pipes solved with the multipole method, Report 2005:3, Division of Building Technology/ Building

Physics, Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers, Göteborg 2005a.

Persson, C., & Claesson, J., Multipole Method to Compute Heat Losses from District Heating Pipes, Proceedings of the 7th Nordic Symposium on Building Physics, June 13-15, 2005b, Reykjavik, Iceland.

Persson, C., & Claesson, J., Prediction of heat losses from district heating twin pipes, Proceedings of the 11th International Symposium on District Heating and Cooling, August 31 to September 2, 2008, Reykjavik, Iceland.

Rasmusson, T., Personlig kommunikation, december 2015.

Sundberg, J., Termiska egenskaper i jord och berg, Statens geotekniska institut, Information 12, Linköping 1991.

Svanström, M., Blowing Agents in Rigid Polyurethane Foam - Analytical Studies - Technical and Environmental Aspects, Doktorsavhandling, Institutionen för kemisk miljövetenskap, Chalmers, ISBN 91-7197-446-6, Göteborg 1997.

Svarc, M., E-post, 2015-11-10.

SvF, "Läggningsanvisningar för fjärrvärme- och fjärrkyleledningar", Svensk Fjärrvärme, Tekniska bestämmelser D:211, ISSN 1401-9264, Stockholm 2015.

SvF, Fjärrkylerör - Medierör och komponenter i fjärrkylesystem, Svensk Fjärrvärme, Tekniska bestämmelser D:215, ISSN 1401-9264, Stockholm 2005.

Thunholm, B., Methods for Estimating Thermal Diffusivity of the Subsoil Based on Annual Temperature variations, Swedish Journal of Agricultural Research, 18(4), s 179-184, 1988.

Thunholm, B., Personlig kommunikation 2015-12-29.

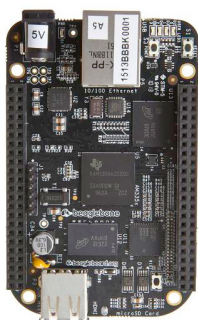
Vinka, T.-G., Almquist, J., & Gubner, R., Korrosionsrisker vid användning av polyetenrör i fjärrkylesystem, Svensk Fjärrvärme, Rapport FOU 2005:135, ISSN 1401-9264, Stockholm 2005.

Åström, J.-Å., E-post, 2015-11-05.

Bilaga 1: Mätsystemet på mätplatserna

För mätdatainsamling används en generell dator av storlek som ett kreditkort. Den har operativsystem Linux Debian. En router kan ansluta till en server på SP via modem och skicka över mätdata från systemet. Komponenterna i systemet har tabellerats i Tabell 1: 1.

Tabell 1: 1: Komponenterna i mätdatorsystemet



Dator Beaglebone Black CC BY-SA 3.0
Foto: Beagleboard.org (Publicerat med tillstånd av BeagleBoard)



Router Dovado Tiny
Foto: Dovado.com (Publicerat med tillstånd av Dovado)



1-Wire™ bus master HA7E
Foto: Cindy Wesley



Ruggad temperaturgivare Dallas DS18B20+
Foto: Marcus Kempe



Nätaggregat 5V/12V Traco Power TML 15205C
Foto: Marcus Kempe



USB-RS232
Foto: Marcus Kempe

Tabell 1: 2: Elskåp



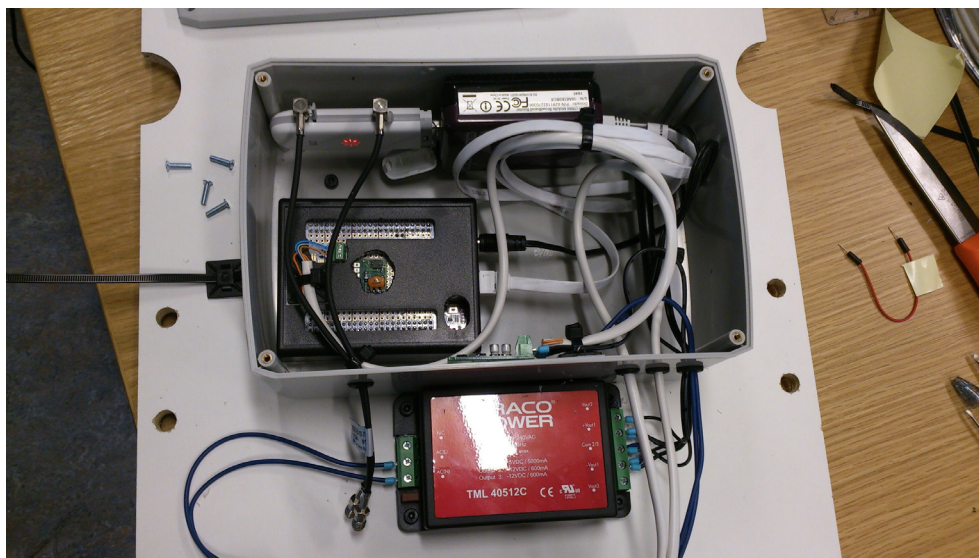
Elskåp i Göteborg - ABB Cewe
Foto: Marcus Kempe



Elskåp i Kista - Rittal
Foto: Marcus Kempe

Temperaturgivare och andra givare är kopplade på en datorbuss. Gränssnittet mellan datorbuss och dator utgörs av en 1-Wire™ bus master - HA7E. I systemet ingår också en USB/RS232-övergång, eftersom datorn Beaglebone Black saknar RS232-serieport och 1-Wire™ bus mastern kommunicerar via RS232. För strömförsörjning har ett nät-aggregat MeanWell 12V/5V använts. För att ansluta till internet behövs också ett USB-modem som ansluts till routern. Här har ett ZTE MF 823-modem använts.

På mätplatsen i Göteborg har utrustningen placerats utomhus och i en vattentät låda, se Figur 1: 1, i ett Elskåp från ABB Cewe. I Kista sitter utrustningen monterad inomhus och i ett elkåp från Rittal, se Tabell 1: 2.



Figur 1: 1: Mätssystem monterat i vattentät låda utan täcklock. Bild är tagen innan slutgiltig varianten av HA7E valts. Överst syns modem och router. Modemet har extern antennanslutning monterad. Mellan router och dator ansluts en nätverkskabel. Längst ner i skåpet syns ett kretskort som mäter spänningen från jordfuktgivaren. Foto: Marcus Kempe.

Measurement system mounted in watertight box without lid. Picture is taken before final HA7E was selected. Modem and router are seen above. Modem has connection for external antenna. Network cable connects router and computer. At bottom of cabinet circuit board is seen that measures voltage from soil moisture sensor.

Tabell 1: 3: Skarvdon och tång

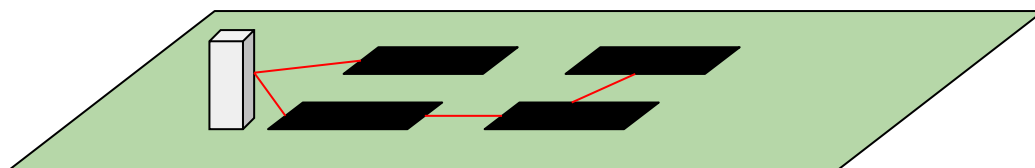
Silikonfyllt skarvdon 3M ScotchLok™
Foto: Marcus KempeKlämtång 3M ScotchLok™
Foto: Marcus Kempe

SENSORBUSS

På båda mätplatserna har en mätbuss implementerats. Denna bygger på protokollet 1-Wire™, utvecklad av Dallas Semiconductors. I Göteborg används 22 enheter som är anslutna till bussen. Dessa är kopplade i ett stjärnnät, vilket inte rekommenderas, men utläsningen fungerar bra ändå. En linjär buss gick inte att implementera på grund av att sensorer lades till i efterhand när andra schakt lagts igen, se Figur 1: 2. En vattentät skarvning av bussen gjordes vid varje sensor med skarvdon 3M Scotchlok™ och eltejp. Det är viktigt att 3M Scotchlok™ kläms ordentligt för att skapa bra galvanisk kontakt vid skarven, se Tabell 1: 3.

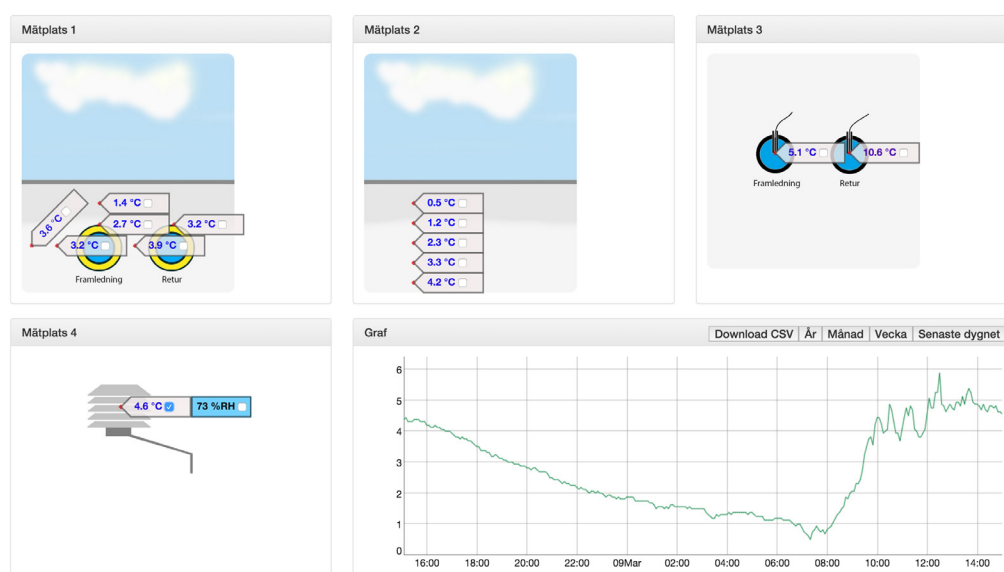
MJUKVARA

För avläsning av sensorerna skrevs en drivrutin i python som kommunicera seriellt med HA7E-modulen. Denna kommunicerar i sin tur med 1-wire-sensorerna. En gång var tionde minut körs mjukvaran och samlar in mätdata. Därefter skickas de till en CouchDB-databas (<http://couchdb.apache.org/>). Detta är en databas för lagring av JSON-dokument. Mätssystemen skickar därför JSON som går rakt in i databasen. I databasen kan man sedan lägga in beräkningar och andra operationer för att bearbeta data och få ut data på valfritt format. En fördel med CouchDB är också att den kan synkronisera en lokal databaskopia på fältsystemet till den centrala databasen. Detta gör att om modemmet eller uppkopplingen skulle fallera sparas data ändå till den lokala kopian på systemet. När uppkopplingen kommer tillbaka kan databasen synkroniseras och dataförlust kan på så vis undvikas. Från CouchDB-databasen kan mätvärdena sedan laddas ner i CSV-format för vidare analys. Två hemsidor, en för varje mätplats, skapades för att kunna övervaka sensorerna. En skärmbild på detta finns i Figur 1: 3



Figur 1: 2: Schematisk skiss av mätplats i Göteborg. Röda linjer är signalbuss. Schaktens position och kabeldragningarna är enbart principiella.

Schematic sketch of measurement site in Almedal (Göteborg). Read lines are signal bus. Position of trenches and cable draws are only in principle.



Figur 1: 3: Skärmbild av hemsida tillhörande mätplats.

Picture of homepage for measurement site.

Bilaga 2: Beskrivning av fjärrkyla nätet i Malmö

Nedan ges tabeller som del av indata till simuleringsmodell av E.ON Värmes fjärrkylanät i Malmö.

I Tabell 2: 1 anges rörtyper, längder, diametrar och konduktivitet för rörmaterial och mark.

Tabell 2: 1 Rörtyper i E.ON Värmes fjärrkylanät i Malmö

Rörtyp / dim	Diameter medie - rör [mm]	Rör-gravs - längd [m]	Mellan - rum [mm]	Diameter man-tel [mm]	Tjocklek man-tel [mm]	Tjocklek PUR [mm]	Konduktivitet medie-rör [W/mK]	Konduktivitet PUR [W/mK]	Konduktivitet jord [W/mK]
PE110	110	112	150	180	3	35,0	0,4	0,02	2,5
PE125	125	332	150	200	3	37,5	0,4	0,02	2,5
PE140	140	39	150	200	3,2	30,0	0,4	0,02	2,5
PE160	160	288	150	225	3,4	32,5	0,4	0,02	2,5
PE180	180	95	150	250	3,6	35,0	0,4	0,02	2,5
PE200	200	112	150	280	3,9	40,0	0,4	0,02	2,5
PE250	250	654	150	315	4,1	32,5	0,4	0,02	2,5
PE280	280	319	150	355	4,5	37,5	0,4	0,02	2,5
PE315	315	282	150	400	4,8	42,5	0,4	0,02	2,5
PE355	355	529	150	450	5,2	47,5	0,4	0,02	2,5
PE450	450	31	150	560	6	55,0	0,4	0,02	2,5
PE75	75	23	150	140	3	32,5	0,4	0,02	2,5
PE90	90	30	150	160	3	35,0	0,4	0,02	2,5
PS100	114,3	109	150	180	3	32,9	55	0,02	2,5
PS125	139,7	169	150	200	3,2	30,2	55	0,02	2,5
PS150	168,3	804	150	225	3,4	28,4	55	0,02	2,5
PS200	219,1	186	150	280	3,9	30,5	55	0,02	2,5
PS250	273	429	150	355	4,5	41,0	55	0,02	2,5
PS300	323,9	1592	150	400	4,8	38,1	55	0,02	2,5
PS350	355,6	55	150	450	5,2	47,2	55	0,02	2,5
PS400	406,4	367	150	500	5,6	46,8	55	0,02	2,5
PS65	76,1	112	150	140	3	32,0	55	0,02	2,5
PS80	88,9	151	150	160	3	35,6	55	0,02	2,5

I Tabell 2: 2 anges värmeövergångstal som använts för simuleringarna.

Tabell 2: 2 Beräknade värmeövergångstal för ledningar i E.ON Värmes fjärrkylanät i Malmö

Rörtyp/ dim	Oisolerade ledningar			Isolerad fram- och returledning			Isolerad framledning		
	U11 [W/m]	U12 [W/m]	U22 [W/m]	U11 [W/m]	U12 [W/m]	U22 [W/m]	U11 [W/m]	U12 [W/m]	U22 [W/m]
PE110	4,49	-2,20	4,49	0,26	-0,01	0,26	0,26	-0,12	3,43
PE125	4,65	-2,29	4,65	0,27	-0,01	0,27	0,27	-0,13	3,53
PE140	4,77	-2,36	4,77	0,35	-0,02	0,35	0,36	-0,17	3,65
PE160	4,92	-2,43	4,92	0,37	-0,02	0,37	0,38	-0,18	3,75
PE180	5,05	-2,50	5,05	0,38	-0,02	0,38	0,39	-0,18	3,85
PE200	5,16	-2,55	5,16	0,37	-0,02	0,37	0,38	-0,18	3,93
PE250	5,43	-2,67	5,43	0,54	-0,03	0,54	0,55	-0,26	4,19
PE280	5,56	-2,72	5,56	0,53	-0,03	0,53	0,54	-0,25	4,28
PE315	5,69	-2,77	5,69	0,52	-0,03	0,52	0,53	-0,25	4,39
PE355	5,83	-2,81	5,83	0,52	-0,03	0,52	0,54	-0,25	4,50
PE450	6,11	-2,88	6,11	0,57	-0,03	0,57	0,58	-0,26	4,76
PE75	4,11	-1,97	4,11	0,20	-0,01	0,20	0,21	-0,09	3,17
PE90	4,29	-2,08	4,29	0,22	-0,01	0,22	0,22	-0,10	3,29
PS100	6,45	-3,83	6,45	0,28	-0,01	0,28	0,29	-0,16	4,21
PS125	6,91	-4,17	6,91	0,36	-0,02	0,36	0,37	-0,21	4,46
PS150	7,37	-4,49	7,37	0,44	-0,02	0,44	0,46	-0,27	4,72
PS200	8,05	-4,97	8,05	0,52	-0,03	0,52	0,54	-0,32	5,10
PS250	8,65	-5,37	8,65	0,49	-0,03	0,49	0,50	-0,30	5,39
PS300	9,14	-5,68	9,14	0,61	-0,04	0,61	0,63	-0,38	5,72
PS350	9,41	-5,85	9,41	0,54	-0,03	0,54	0,56	-0,33	5,83
PS400	9,80	-6,09	9,80	0,62	-0,04	0,62	0,64	-0,38	6,10
PS65	5,61	-3,21	5,61	0,21	-0,01	0,21	0,21	-0,12	3,80
PS80	5,92	-3,43	5,92	0,22	-0,01	0,22	0,22	-0,12	3,93

FJÄRRKYLA – FRAMTIDA DESIGN OCH STANDARD

En varm sommardag utnyttjas fjärrkylesystemen maximalt och varje temperaturökning av kylvattnet i systemet spelar roll. Varje grad leder till sämre kylkapacitet för kunden och en försämrad affär för energibolaget.

Dagens kunskapsläge inom distributionssystem för fjärrkyla har kartlagts och rapporten innehåller underlag för ett effektivare system. Effekten av isolering och placering av fjärrkyleledningar har analyserats genom mätningar av temperaturer i mark kring olika ledningar och beräkningar av temperaturfält och förluster.

Mätningar visar att det kan bli över 20 °C i medel under en sommarvecka kring fjärrkylrören på djup mellan 0,6-0,9 m under en solbelyst plats. Vidare visar mätningar att fjärrvärmeledningar värmer upp den omgivande marken rejält.

För att säkerställa kylfunktionen är isolerad framledning en väg att gå. Isolering av ledningar minskar förluster till omgivande mark, men även förlusterna kopplat till värmeutbytet mellan fram- och returledning.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se