Linköpings universitet | Instutitionen för ekonomisk och industriell utveckling Examensarbete 16 hp | Högskoleingenjörsprogrammet i maskinteknik Vårterminen, 2022 | LIU-IEI-TEK-G–22/02165–SE

# Tekniska förutsättningar för etablering av ett sprickvärmelager i Ljungsbro

-Utveckling av en matematisk värmelagermodell och integrering i fjärrvärmenätet

Technical study for establishment of a geothermal energy storage in Ljungsbro -Development of a mathematical geothermal storage model and integration in the district heating system

Oscar Magnusson Samuel Engel

Handledare: Johan Renner Examinator: Magnus Andersson



Linköpings universitet SE-581 83 Linköping, Sverige 013-28 10 00, www.liu.se

# Sammanfattning

Etablerandet av högtempererade geovärmelager kan bidra med en ökad resurseffektivitet och bättre distributionsförutsättningar i fjärrvärmenät. Ny geolagringsteknik möjliggör att högpresterande geovärmelager kan ersätta mindre lokala spetsvärmeenheter som ofta utnyttjar dyra bränslen vid spetsvärmeproduktion. Tekniska verken i Linköping AB försörjer Linköpings kommun genom ett stort och omfattande fjärrvärmenät vilket medför att höga krav ställs på fjärrvärmeledningarnas kapacitet. Ljungsbro är en ort i Linköpings kommun som snabbt växer vilket medför ökade behov av värmetillförsel. Ledningen till Ljungsbro har inte alltid kapacitet att överföra den värmeeffekt som krävs vilket kräver åtgärder. En möjlig lösning är etableringen av ett lokalt geovärmelager som hjälper till att täcka värmebehovet i Ljungsbro på ett hållbart och resurseffektivt sätt, samtidigt som huvudledningen från Linköping avlastas.

Arbetet syftar till att teoretiskt undersöka förutsättningarna för att integrera ett geovärmelager i det lokala fjärrvärmenätet i Ljungsbro. Arbetet undersöker värmelagrets prestanda för olika upp- och urladdningseffekter genom att utveckla en förenklad matematisk modell i beräkningsprogrammet MATLAB. Ur denna modell undersöks även hur olika geologiska förutsättningar påverkar prestandan på värmelagret genom att ansätta olika termiska egenskaper. De geologiska förutsättningarna och tillhörande termiska egenskaper studeras översiktligt i närmorådet i Ljungsbro genom att relatera geologiska kartor till vetenskaplig litteratur. Sist undersöks värmelagrets inverkan på fjärrvärmenätet vid integrering i olika inkopplingspunkter. Detta görs i simuleringsprogrammet Netsim där både upp- och urladdning av lagret studeras.

Den matematiska modellen visar att lagret gradvis kan upprätthålla högre temperaturer efter upp- och urladdning över tid. Värmelagrets prestanda beroende på placering och geologiska förhållanden medför inga signifikanta skillnader för den teoretiska temperaturdistributionen i berggrunden. Temperatur och flöde vid upp- och urladdning samt storleken på värmelagret har stor betydelse för hur snabbt lagret kan värmas upp samt hur mycket effektiv värmeeffekt som kan utnyttjas vid urladdning.

Integreringen av lagret i fjärrvärmenätet medför både konsekvenser och förbättringar beroende på inkopplingspunkt och lastfall. Vid höga lastfall i nätet medför ett integrerat värmelager stor betydelse för stabiliteten och förmågan att kunna distribuera höga värmeeffekter utan att överbelasta ledningarna. Uppladdning av värmelagret då lasten i nätet i övrigt är relativt låg medför inga nya problem från dagens driftförhållanden. Detta möjliggör att stora mängder energi som annars skulle gå till spillo istället kan utnyttjas för effektivare och mer hållbar värmedistribution i fjärrvärmenätet.

# Abstract

High temperature geothermal energy storages could contribute to both increased resource efficiency and distribution capacity in district heating systems. Recent technology within geothermal storages enables high performance storage units to replace local auxillary heat units which often consumes expensive fuel. Tekniska verken i Linköping AB provides and distributes heat to the municapality of Linköping through a large and comprehensive district heating system, which poses large demands on the capacity of the distribution pipes. Ljungsbro is a nearby town included in the district heating system which are expanding and thereby are in a increasing demand of distributed heat. The district heating pipes does not always have the capacity to supply Ljungsbro with their measured heat demand, which requires meassures. A possible solution is the establishment of a local geothermal storage, which contributes to the distribution in the district heating system in Ljungsbro while unloading the main pipes from Linköping.

This thesis aims to theoretically examine the possibilites to integrate a high temperature geothermal energy storage unit in the local district heating system of Ljungsbro. The thesis investigates the performance of the storage unit for different heatoutputs by developing a simplified mathematical model in MATLAB. The impact on the performance through thermal properties for different geological conditions will also be investigated and evaluated through the mathematical model. The geological conditions and associated thermal properties are studied in the immediate vicinity of Ljungsbro by relating geological maps to scientific litterature. Integration of the storage in the district heating system is examined for a few connection points in the system. This is done using the simulation program Netsim where both the charge and discharge process of the storage unit is studied.

The mathematical model indicates that the storage gradually can maintain higher operating temperatures over time. Results from the model shows that the thermal properties for the different studied geological conditions are unsufficient to determine the most appropriate placement of the storage unit. The temperature and flow of the water which is fed and pumped out of the storage unit greatly effects how fast the bedrock warms up and cools down, while the dimensions entails how much heat that effectively can be discharged.

Integration of the storage into the district heating system brings both consequences and improvements depending on the location of connection point and total load in the system. At higher system loads, discharging the integrated storage proves useful by enhancing the stability and ability to distribute heat without overloading the pipes. Charging the storage while the overall load in the system is low brings no added consequences to the system. Consequently this solution allows large quantities of energy to be utilized which otherwise would go to waste. It also enables more efficient and sustatinable heat distribution in the district heating system in Ljungsbro.

# Förord

Vi riktar ett stort tack till våra handledare Henrik Lindståhl och Niklas Olsson som givit oss chansen att utföra ett mycket roligt och givande examensarbete på Tekniska verken. Vi är otroligt tacksamma för all kunskap och vägledning de givit oss under våren. Vidare vill vi tacka vår handledare på Linköpings universitet, Johan Renner som givit ett tryggt stöd och bra synpunkter. Magnus Andersson ska också ha ett tack som examinerar detta arbete. Sist vill vi också tacka våra opponenter Fred Nordling Israelsson och Oscar Küller som givit goda råd och intressanta synpunkter på arbetet.

# Nomenklatur

# Romanska Symboler

Symbol	Beskrivning	Enhet	
A	Area	$m^2$	
b	Bredd	m	
$c_p$	Specifik värmekapacitet	J/kgK	
С	Värmekapacitet	$J/m^3K$	
d	Diameter	m	
E	Systemenergi	J	
g	Gravitationskonstant	$m/s^2$	
h	Höjd	m	
k	Värmekonduktivitet	W/mK	
L	Längd	m	
'n	Massflöde	kg/s	
p	Tryck	Pa	
$\dot{q}$	Värmeflöde	$W/m^3$	
Ż	Värmeeffekt	W	
r	Radie	m	
R	Radie	m	
t	Tid	s	
Т	Temperatur	$^{\circ}C$	
ũ	Hastighetsvektor	m/s	
W	Arbete	J	
z	Höjd från referenshöjd	m	

# Grekiska Symboler

Symbol	Beskrivning	Enhet
α	Termisk diffusivitet	$m^2/s$
ρ	Densitet	$\rm kg/m^3$
$\lambda$	Friktionsfaktor	-

# Innehåll

1	Inle	edning 1				
	1.1	Bakgrund och problemformulering	1			
	1.2	Syfte	2			
	1.3	Mål	2			
	1.4	Frågeställningar	2			
	1.5	Avgränsningar	2			
<b>2</b>	Bak	grund	3			
	2.1	Typer av geovärmelager	3			
	2.2	Sprickvärmelager	4			
	2.3	Geologiska förutsättningar	5			
	2.4	Hydrogeologiska förutsättningar	5			
	2.5	Juridiska och samhälleliga förutsättningar	6			
	2.6	Miljöpåverkan av geoenergianläggningar	6			
	2.7	Tidigare utveckling av beräkningsverktyget	7			
	2.8	Fjärrvärme och fjärrnätets tekniska krav	8			
3	Teo	ri	10			
	3.1	Grundläggande termodynamik	10			
	3.2	Värmeledning	10			
	3.3	Endimensionell, stationär värmeledning	11			
	3.4	Numerisk analysmetod	12			
		3.4.1 Finita differens metoden i kartesiska koordinater	12			
		3.4.2 Finita differens metoden i cylindriska koordinater	14			
	3.5	Grundläggande strömningslära	15			
4	Met	tod	17			
	4.1	Övergripande strategi bakom arbetet	17			
	4.2	Initiala antaganden och förenklingar	18			
	4.3	Utvärdering av värmebehov och lagerkapacitet	19			

	4.4	Undersökning av geografisk placering och geologiska förutsättningar $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	21
	4.5	Utveckling av beräkningsverktyget	25
	4.6	Modellverifiering av beräkningsverktyget	27
	4.7	Undersökning av massflöden	30
	4.8	In-parametrar vid simulering av lager	30
	4.9	Implementering av lager och analys av fjärrvärmenätet	32
		4.9.1 Introduktion till Netsim och simuleringsmodellen	32
		4.9.2 Metod för nätsimuleringar	33
5	$\operatorname{Res}$	sultat och analys	35
	5.1	Prestanda för varierande massflöden	35
	5.2	Simulerad temperaturspridning i berget	37
		5.2.1 Norra Ljungsbro vid 21 MW belastning	37
		5.2.2 Norra Ljungsbro vid 25 MW belastning	38
	5.3	Uppmätta temperaturer efter uppladdning	39
	5.4	Volym samt effektbehov	39
		5.4.1 Norra Ljungsbro med ökad volym vid 25 MW belastning	40
		5.4.2 Norra Ljungsbro med ökad massflöde in under vintern vid 25 MW belastning	40
	5.5	Nätsimuleringar standard driftfall	41
		5.5.1 Standard driftfall 1	41
		5.5.2 Standard driftfall 2	42
		5.5.3 Standard driftfall 3	43
		5.5.4 Utvärdering av standard driftfall	44
	5.6	Test av integrerade lager	45
		5.6.1 Testlager	45
		5.6.2 Test Lager knutpunkt	46
		5.6.3 Utvärdering av test av integrerade lager	47
	5.7	Nätsimuleringar urladdning	48
		5.7.1 Lager Cloetta	48
		5.7.2 Lager knutpunkt med uppgraderade ledningar	49

		5.7.3	Utvärdering nätsimuleringar urladdning	50
	5.8	Nätsir	nuleringar uppladdning	51
		5.8.1	Lager Cloetta med och utan uppgraderade ledningar	51
		5.8.2	Lager knutpunkt med och utan uppgraderade ledningar	52
		5.8.3	Utvärdering nätsimuleringar uppladdning	53
6	$\mathbf{Dis}$	kussio	n	54
	6.1	Geogr	afisk placering	54
	6.2	Beräk	ningsverktyg	54
		6.2.1	Metod och verifiering av värmelagermodell	54
		6.2.2	Resultat massflöden	55
		6.2.3	Resultat sprickvärmelager	55
		6.2.4	Ökad volym och massflöde under vintern.	56
	6.3	Nätsir	nuleringar	57
		6.3.1	Resultat nätsimuleringar upp- och urladdning	57
		6.3.2	Metod och antaganden för nätsimuleringar	57
		6.3.3	Ytterligare framtida undersökningsområden	58
7	Slut	tsats		59
	7.1	Beräk	ningsverktyg	59
	7.2	Inkop	olingspunkt i fjärrvärmenätet	59
	7.3	Slutgi	ltigt beslutsunderlag	60
A	$\mathbf{Syd}$	västra	Ljungsbro vid 21 MW belastning	62
в	$\mathbf{Syd}$	västra	Ljungsbro vid 25 MW belastning	63
С	Öst	ra Lju	ngsbro vid 21 MW belastning	64
D	Öst	ra Lju	ngsbro vid 25 MW belastning	65
$\mathbf{E}$	Ten	nperat	urer och värmeförluster nätsimuleringar	65

# 1 Inledning

I detta kapitel introduceras arbetets innehåll och fokusområden. Detta ger en kort inblick i arbetets bakgrund, utmaningar, syfte, mål och avgränsningar.

# 1.1 Bakgrund och problemformulering

Allteftersom växande miljökrav sker parallellt med ett ökat energibehov står samhället inför en stor utmaning att kunna balansera både aspekter. Det är viktigt att hitta nya innovativa energilösningar, men minst lika viktigt att kunna ta vara på den energi som redan finns. Underjordisk lagring av värme är en relativt gammal och beprövad metod som visat sig vara gynnsam i det svenska klimatet med varma somrar och kalla vintrar [1]. Marktemperaturen några tiotal meter ner från jordytan är mer eller mindre konstant under året och varierar mellan 3-10 °C från norra till södra Sverige [2]. Därunder kan temperaturen öka med ca 15-30 °C/km vilket ger stor potential för effektivare lagring av värme. Geolagringstekniker som borrhålslager och akviferlager är väl etablerade idag och har sina tydliga för- och nackdelar [3]. Sprickvärmelager är en ny teknik som har flera fördelar jämtemot äldre tekniker vilket kommer undersökas och förklaras mer ingående i detta arbete.

Tekniska verken står för en stor del av el och värmeproduktionen i Linköping kommun genom att hantera och förbränna lokalt och importerat avfall. Den värme som produceras vid förbränning av avfall används i Linköpings fjärrvärmenät under hela året. Under vinterhalvåret ökar behovet och belastningen på fjärrvärmenätet vilket ställer höga krav på leverantörernas kapacitet. Under vissa perioder överstiger värmeefterfrågan den kapacitet som Tekniska verken har vilket medför att dyrare metoder för värmeproduktion måste användas. En typisk sådan metod är förbränning av bioolja och träflis vilket medför höga kostnader. Hantering och värmeutvinning av avfall pågår året runt vilket också innebär att en stor del av överflödig värme kyls bort under sommarhalvåret vilket medför stora onödiga effektförluster. Ett förslag från Tekniska verken för att lösa detta är att använda överskottsvärmen som produceras på sommaren och lagra den i marken i ett sprickvärmelager. I dagsläget utförs tester för ett pilotprojekt av ett sprickvärmelager i Vallastaden, Linköping [4]. Tekniska verken vill parallellt med detta utöka sina testområden genom att undersöka förutsättningarna för att etablera ett lager i Ljungsbro.

I fjärrvärmenät är det viktigt att övervaka tryck och flöde i ledningarna. Ofta måste välplacerade pumpstationer anläggas längs längre ledningar för att bibehålla ett tillräckligt flöde och tryckskillnad mellan framoch returledning. Eftersom friktion uppstår mellan vattnet och ledningens väggar ger detta upphov till stora tryckförluster över längre sträckor. Vid pumpstationerna kan trycket åter höjas i både fram- och returledningen. Differensen av fram- och returtrycket vid en specifik punkt längs ledningen kallas för differenstrycket. Differenstrycket är viktigt att beakta och måste hållas inom ett visst intervall vid varje konsument av fjärrvärmenätet. Detta är viktigt eftersom styrventilerna mot värmeväxlarna hos varje kund är dimensionerade utefter ett specifikt differenstryck för att fungera och leverera ett optimalt flöde. Ofta ligger detta inom intervallet 150 - 600 kPa. Ledningarna har också ett maximalt angivet konstruktionstryck som inte får överskridas då risken för haveri och läckage ökar betydligt [5].

I dagsläget finns det en primärledning till Ljungsbro som maximalt kan leverera en effekt på ca 19 MW vid en temperaturgradient på 55 °C. Under vinterhalvåret kan efterfrågan dock öka mot 21 MW vilket medför stora problem och utgifter då lokal spetsvärme i form av förbränning av bioolja måste nyttjas för att täcka behovet. I ett framtida perspektiv ses toppbehovet kunna nå 25 MW eftersom Ljungsbro växer och fler kunder ansluts till nätet. Tekniska verken vill undersöka förutsättningarna för att anlägga ett lokalt sprickvärmelager i Ljungsbro och därigenom kringgå begränsningen i primärledningen samtidigt som billigare värme kan utnyttjas. Sprickvärmelagrets kapacitet ska kunna täcka värmebehovet för varje vintersäsong med toppar på 25 MW, vilket väntas inom en snar framtid.

#### 1.2 Syfte

Syftet med detta arbetet är att undersöka potentialen och förutsättningarna för att etablera ett sprickvärmelager i Ljungsbro. Intentionen med detta är att långsiktigt minimera kostnader och öka resurseffektiviteten vid värmeproduktion för Tekniska verken. I dagsläget måste lokal spetsvärme nyttjas för att täcka behovet i Ljungsbro under vinterhalvåret. Detta är inte ekonomiskt eller miljömässigt fördelaktigt i längden och en möjlig lösning är att ersätta befintlig lokal produktion med ett sprickvärmelager.

#### 1.3 Mål

Målet med arbetet är att vidareutveckla ett beräkningsverktyg för att beräkna hur temperaturen i lagret varierar vid upp- och urladdning med olika flöden och temperaturer. I ett simuleringsprogram ska lagrets påverkan på det existerande fjärrvärmenätet i Ljungsbro undersökas vid olika lastfall i nätet samt olika upp- och urladdningseffekter från lagret. Den mest optimala inkopplingspunkten och geografiska placeringen för lagret i nätet ska presenteras utifrån resultaten från simuleringarna samt utifrån analys av geologiska förutsättningar i Ljungsbro.

## 1.4 Frågeställningar

- Hur påverkas temperaturen i lagret vid upp- och urladdning med olika flöden och temperaturer?
- Hur påverkas fjärrvärmenätet vid upp- och urladdning för olika inkopplingspunkter av lagret?
- Vilka egenskaper kännetecknar ett optimalt lager i förhållande till geologiska förutsättningar, inkopplingspunkt och samverkan med fjärrvärmenätet?

#### 1.5 Avgränsningar

- Modellen av värmelagret i beräkningsverktyget används främst för att ge generella indikationer på vilket flöde och temperatur som krävs för upp- och urladdning. Beräkningsverktyget används även för att visa hur prestandan av lagret ändras över tid och för olika geologiska förutsättningar.
- Enbart teoretiska och uppskattade värden av fysiska och termiska egenskaper för berggrund och vatten används i beräkningsverktyget av sprickvärmelagret. Värdena baseras på riktvärden och tabellerade värden från vetenskapliga studier och litteratur inom geologi och termodynamik.
- Den geologiska undersökningen av berggrunder, grundvattentillgång och jorddjup begränsas till fakta och data som kan hämtas ur geologiska kartor från Sveriges Geologiska Undersökning (SGU).
- Det undersökta fjärrvärmenätet avgränsas från Tornby och upp till Ljungsbro. Lastfallen som undersöks är utvalda momentana lastfall. Dessa lastfall baseras på den erhållna datan av uppmätta parametrar i fjärrvärmenätet inom intervallet av 2.5 25 MW.
- Upp- och urladdningsflöden samt temperaturer till och från lagret är inte samma för värmelagermodellen i beräkningsverktyget och simuleringarna av integrationen i fjärrvärmenätet. Beräkningsverktyget syftar till att visa lagrets prestanda över längre tid med medelvärden och simuleringarna av integrationen syftar till att visa lagrets påverkan i fjärrvärmenätet för momentana lastfall.

# 2 Bakgrund

I detta kapitel ges en kort bakgrund om den övergripande funktionen av ett geovärmelager samt vilka geologiska och samhälleliga förutsättningar som krävs för att etablera ett sådant lager. Även kort bakgrund om funktionen bakom fjärrvärmenätet samt tidigare utveckling av beräkningsverktyget presenteras.

## 2.1 Typer av geovärmelager

Det finns olika typer av metoder och anläggningar för storskalig lagring av geoenergi. De vanligaste etablerade anläggningarna i Sverige idag är borrhålslager och akviferlager. Tidigare nämnt kommer detta arbete undersöka en nyare geovärmelagringsteknik som kallas sprickvärmelager. Det finns ingen tidigare praktisk forskning om sprickvärmelager då ingen omfattande testning av tekniken ännu har gjorts i praktiken. Däremot sker löpande tester i Vallastaden, Linköping ur ett samarbete mellan Tekniska verken och Hydroc Energy Storage. För att förstå tekniken bakom ett sprickvärmelager hjälper det att först förstå hur mer etablerade tekniker fungerar först.

Ett borrhålslager *BTSE*, konstrueras genom att ett flertal hål borras i berggrunden där kollektorslangar (värmebärande plastslangar) sedan monteras ned i respektive hål som löper i båda riktningar. I kollektorslangarna cirkulerar en köldbärarvätska vilket fungerar som en värmeväxlare [2]. Under sommarhalvåret då det ofta finns ett överskott av värme pumpas köldmediet med hög temperatur ner genom kollektorslangarna som värmeväxlar mot den kringliggande berggrunden. Under vinterhalvåret kan den uppvärmda berggrunden istället värma köldmediet som sedan pumpas upp till ytan för att utbyta sin värme mot fjärrvärmenätet till exempel. Ofta möjliggör även denna metod att den naturliga kylan från berggrunden också kan användas för fjärrkyla under sommaren.

Ett akviferlager ATSE, använder istället grundvatten som värmebärare. Grundvattnet finns naturligt i berggrunden och kan flöda genom sprickor och porer i berggrunden. Beroende på berggrunden kan grundvattnet i helhet bilda ett nyttjande vattenmagasin om det finns tillräckligt mycket vatten vid lagrets position[2]. Akviferlagret är kopplat till ett flertal kalla och varma brunnar där vattnet kan pumpas upp och ned från vattenmagasinet för att värmeväxla mot fjärrvärmenätet. Sommartid pumpas vatten upp från de kalla brunnarna och sedan ner i genom de varma brunnarna efter värmeväxling. Vintertid är processen istället omvänd [3]. Akviferlager medför också möjligheten att användas i kylsyfte likt ett borrhålslager om de varma och kalla brunnarna inte är i direkt hydraulisk kontakt. Akviferlager kan allmänt ses som ett slutet system förutsatt att inga större yttre grundvattenströmmar framträder och stör vattenmagasinet genom att föra bort vatten från systemet [2].

#### 2.2 Sprickvärmelager

Likt ett akviferlager använder ett sprickvärmelager grundvatten som värmebärare. När överskott av värme finns pumpas kallt vatten upp från yttre delen av lagret för att värmas upp och sedan rinna ned via huvudledningen i centrum av lagret, se figur (1). Vid urladdning pumpas det varma vattnet istället upp genom huvudledningen i lagret och rinner sedan ned genom ytterledningarna efter värmeväxling. Sprickvärmelager delar därav flera likheter med ett akviferlager men det finns några viktiga skillnader mellan dem.



**Figur 1:** Schematisk bild över ett sprickvärmelager. De mörkblå cirkelskivorna illustrerar sprickplanen där vattnet kan flöda mellan centrum och ytterranden av lagret [4].

Det som främst skiljer ett sprickvärmelager från ett akviferlager är hur energin lagras och vilken temperatur bergsmassan antar, hur konstruktionsprocessen går till samt kraven på de geologiska förutsättningarna för lagrets position. För att anlägga ett akviferlager är det en förutsättning att det finns en naturligt omfattande och lämplig sprickbildning i berggrunden samt att den även innehåller rikliga mängder grundvatten. Vid konstruktion av ett sprickvärmelager skapas den önskade sprickplansbildningen istället med hjälp av hydrauliska maskiner vilket öppnar upp antalet möjliga placeringar av lagret avsevärt. I sprickvärmelager lagras energin främst direkt i själva bergsmassan och är inte lika beroende av ett stort vattenmagasin även om en substantiell vattenmassa krävs för att stora mängder värme ska kunna transporteras upp och ned från lagret utan att det dräneras. Ett sprickvärmelager skulle även möjligtvis kunna dra nytta av berggrunder med stora vattenmagasin då sprickplansbildningen inte nödvändigtvis behöver göras.

Förutspådda fördelar med tekniken bakom sprickvärmelager är en låg konstruktions- och driftkostnad samt att relativt få borrhål krävs jämfört med borrhålslager. Placeringsmöjligheterna är flexibla och många fler jämfört med exempelvis akviferlager som kräver ett stort vattenmagasin vilket kan vara svårt att finna. Högre temperaturer (upp till 90 °C) lagras och kan nyttjas från sprickvärmelager till skillnad mot traditionella lagringsmetoder. Sprickvärmelager ger också en snabbare samt effektivare lagring och värmespridning av värmen pågrund av de skapade sprickplanen i berggrunden som utger en stor värmeöverföringsyta mellan vatten och berg [4].

### 2.3 Geologiska förutsättningar

Vid en initial dimensionering och planering av ett sprickvärmelager är de geologiska förutsättningarna viktiga att granska ur lagrets effektivitetsperspektiv. Olika typer av berggrunder och bergarter har olika bra fysikaliska egenskaper som påverkar lagrets kapacitet och termiska effektivitet. En viktig parameter att ta reda på är berggrundens värmeledningsförmåga (värmekonduktivitet , k) som bestämmer hur lätt värmen kan sprida sig i materialet. Värmeledningsförmågan beror på materialsammansättning i berggrunden samt dess ingående fysikaliska parametrar som porositet och permeabilitet [2].

Exakta sammansättningar och utformning av olika typer av berggrunder är svårt att precisera eftersom det ofta kan variera kraftigt. Däremot är det generellt lättare att uppskatta de fysikaliska egenskaperna i en kristallin berggrund, även kallt urberg som oftast består av snarlika varianter av granit och gnejs med liknande materialegenskaper. Sedimentära berggrunder är betydligt svårare att analysera eftersom material-sammansättningarna varierar mer och ytterligare med djupet då sedimentära berggrunder ofta är uppbyggt i skikt med skiftande bergarter. Sedimentära berggrunder kan bestå av sandsten, kvartsit, kalksten och lersten för att nämna några. Till exempel kan värmekonduktiviteten mellan kalksten och sandsten variera från 1 – 7 W/mK vilket gör det svårt att göra korrekta och rättvisa uppskattningar av de termiska egenskaperna vid dimensionering av ett geovärmelager [2].

Utöver värmeledningsförmågan är berggrundens densitet, specifika värmekapacitet och temperatur avgörande vid dimensionering av ett sprickvärmelager. Berggrundens temperatur kan ofta förenklat ansättas som grund-vattnets ostörda temperatur (temperatur utan yttre påverkan av anläggningen). Data om mediantemperaturen av grundvattnet i olika delar av Sverige finns tillgänglig i SGU:s databas för grundvattenmätningar.

## 2.4 Hydrogeologiska förutsättningar

För sprickvärmelager som är beroende av flödeskaraktären och mängden grundvatten, är de hydrogeologiska förutsättningarna minst lika viktiga att beakta vid konstruktionsplanering. Ett vanligt problem vid konstruktion av ett akviferlager är ofta att grundvattenförhållandena inte är tillräckliga eller optimala i avseende av vattenmassa och kemisk kvalitet [3]. Detta är också viktigt att beakta för ett sprickvärmelager. Vattenmassan är viktig för att storskalig transport av vattnet upp och ned från ledningarna ska vara möjlig utan att vattenmagasinet blir torrbelagt eller översvämmat [2].

Berggrunden i Sverige utgörs till störst del av den kristallina berggrunden. Huvudsakligen förekommer tillgången av grundvatten för denna typ av berggrund i sprickor och mängden vatten utgörs då av berggrundens sprickighet. Desto mer sprickor, desto mer och bättre flöde av vatten finns tillgänglig. De kristallina bergarterna är generellt oporösa och därför ofta ganska begränsade av grundvattentillgången vilket åtminstone gör akviferlager olämpliga i dessa förhållanden. Sprickvärmelager är mer lämpade att fungera bra i en kristallin berggrund än akviferlager eftersom grundvattentillgången inte behöver vara lika omfattande i ett sprickvärmelager då övervägande del av energin lagras i bergsmassan. Däremot gynnas grundvattenbärande lagermetoder mer av en sedimentär berggrund som är mer porös och tillgår mycket mer grundvatten [6]. Sedimentära berggrunder är dock mycket ovanligare och förkommer främst i södra delarna av Sverige.

#### 2.5 Juridiska och samhälleliga förutsättningar

En viktig faktor att ta hänsyn till vid planeringen av ett geovärmelager är att anläggningen inte på något vis påverkar samhället och dess invånares livskvalitet negativt. En stor punkt inom det kan vara att anläggningen inte förändrar eller skadar källor för dricksvattenförsörjningen. Idag är flera större vattentäktsområden i Sverige skyddade av juridiska vattenskyddsområden som bidrar med flera föreskrifter för att vattnet inte ska bli förorenat eller försämras i kvalitet. Några exempel på reglerande föreskrifter i Linköpings kommun är reglering av borrning för bergvärme, utsläpp av dagvatten och hantering av drivmedel eller kemiska produkter [7]. Inom kommunen finns nio stycken vattenskyddsområden varav två är ytvattentäkter och resterande är grundvattentäkter. De största skyddsområdena som bidrar Linköpings kommun med dricksvatten är ytvattentäkterna i Motala ström och Stångån [8]. I figur (2) ses vattenskyddsområdet för Motala ström som omfattas av en primär och en sekundär skyddzon. Den primära skyddzonen innefattar det faktiska ytvattensområdet samt ett ca 50 m brett landområde från vattnet och den sekundära skyddzonen omfattar tillrinningsområdet till Motala ström [8]. Normalt är geovärmeanläggningar strängt reglerade inom dessa skyddsområden och helt förbjudna inom den primära zonen. De stora riskerna av att anlägga ett geolager är främst anknutet till byggnationsfasen och spridning av de kemikaliska vätskor (bränslen, oljor, fetter osv.) som används för borr- och grävmaskiner [2].



Figur 2: Vattenskyddsområdet för Motala ström, i anslutning till Ljungsbro och mynnar ut i Roxen. Den fetmarkerade blå linjen avgränsar den sekundära skyddzonen. Bilden är tagen från Naturvårdsverkets naturvårdsregisterkarta.

#### 2.6 Miljöpåverkan av geoenergianläggningar

Det är viktigt att vara medveten om vilka konsekvenser ett geovärmelager kan föra med sig rent miljömässigt. Eftersom geovärmelager i sig är passiva och inte producerar koldioxid eller andra växthusgaser påverkar de inte den globala miljön på något sätt. Däremot kan miljön lokalt kring lagret påverkas av den onaturliga uppvärmning som sker i berggrunden över tid. Beroende på vart lagret placeras och vilka geologiska förutsättningar som råder på den specifika platsen kan grundvattnet komma att påverkas. I vissa känsliga områden finns risken att ett geovärmelager kan bilda ett utrymme för olika vattenförande lager av berggrunden så att grundvattenkemin påverkas på ett oönskat sätt [1]. En konsekvens av detta kan vara att grundvattnet tränger sig in i närliggande dricksvattenbrunnar eller liknande och förstör vattentillgången. Hur och i vilken omfattning vattenkemin påverkas beror dock på den lokala mineralogiska sammansättningen i berggrunden. Beroende på hur djupt lagret är byggt kan det ytligare lagret av marken och jordlagret komma att påverkas av en högre temperatur. Detta kan påverka makro- och mikroorganismer i jordlagret och grundvattnet, samt flora och fauna. Omfattningen av dessa inverkningar finns det däremot inte underlag nog för att uttala sig om [9]. Dessa konsekvenser är också endast noterade för befintliga akvifer- och borrhålslager vilket normalt sett inte kommer upp i lika hög temperatur. Lagret som undersöks i detta arbete siktas komma upp i runt 90 °C. Forskning om geovärmelager vid dessa höga temperaturer är ännu inte riktigt vedertagen. Till följd av det finns det i dagsläget för lite underlag om tekniken för att kunna uttala sig om exakta konsekvenser för den lokala miljöpåverkan.

#### 2.7 Tidigare utveckling av beräkningsverktyget

Beräkningsverktyget bygger på flera förenklingar och antaganden som beskrivs i avsnitt 4.2. De parametrar som använts i tidigare beräkningsverktyg presenteras i tabell (1). Tidigare tester av beräkningsverktyget gick ut på att testa de olika parametrarna och jämföra hur temperaturspridningen i berget förändras. Mest intressant var diffusiviteten, massflödet på grundvattenströmmen, volymen på lagret samt in-effekten. En del av dessa parametrar har förts vidare in i vidarutvecklingen av beräkningsverktyget, varav en del har byts ut mot andra parametrar som är mer relevanta.

Symbol	Beskrivning	Enhet
r	Radie på lager	20 m
ri	Radie till nod	20.1 m
$\Delta r$	r - ri	0.1 m
h	höjd	30 m
$ ho_{berg}$	Densitet på bergmassan	$2500 \text{ kg/m}^3$
K	värmekonduktivitet	$3.5 \mathrm{W/mK}$
$C_{p,berg}$	Specifik värmekapacitet berggrund	$790~{ m J/kgK}$
$C_{p,vatten}$	Specifik värmekapacitet vatten	4194  J/kgK
t	Tidssteg	60 s
$Q_{in}$	In-effekt	300 kW
T <sub>marktemperatur</sub>	Ostörd marktemperatur	8 °C
$\dot{m}_{grundvatten}$	Grundvattenström	$0.5 \ \mathrm{kg/s}$

**Tabell 1:** Exempel på parametrar som användes i tidigare beräkningsverktyg.

Beräkningsverktyget skapades i syfte att simulera en matematisk modell som kan beräkna den tidsberoende temperaturspridningen i den isolerande bergsmassan runt lagrets center vid uppladdning av lagret. Metoden som valdes för att realisera detta var den finita differens metoden som beskrivs i kapitel 3.

#### 2.8 Fjärrvärme och fjärrnätets tekniska krav

Fjärrvärme är en mycket bekväm och enkel uppvärmningsmetod av bostäder. Ungefär hälften av Sveriges fastigheteter utnyttjar fjärrvärmen från sin lokala fjärrvärmeanläggning. Vid fjärrvärmeanläggningarna värms vatten upp till höga temperaturer för att sedan distribueras ut genom långa framledningar till alla kunder som är anslutna till fjärrnätet (primärsystemet). Vid varje kund finns en fjärrvärmecentral installerad med en värmeväxlare som överför värmen från fjärrvärmenätet till bostaden (sekundärsystemet). Efter värmeväxling pumpas vattnet i framledningen vidare tillbaka till fjärrvärmeanläggningen genom den parallella returledningen för att åter värmas upp igen [10]. Fjärrvärmenätet är således ett slutet system där samma vatten kontinuerligt återanvänds och cirkulerar i nätet efter uppvärmning och nedkylning. Inom fastigheterna finns ett eget lokalt slutet system som kallas sekundärsystemet där vatten cirkulerar till radiatorer eller tappvattenkranar i fastigheten.

Varje kund/fastighet har ett specifikt värmebehov beroende på storlek, väder och uppvärmningseffektivitet i bostaden. Därför måste fjärrvärmeanläggningen aktivt justera framledningstemperaturen och flödet på vattnet som skickas ut i systemet till respektive fjärrvärmecentral. Framledningstemperaturen regleras vid värmeverket i fjärrvärmeanläggningen. Flödet är korrelerat med trycket längs ledningen enligt Bernoullies utvidgade ekvation, se avsnitt 3.6. Flödet och således trycket regleras med distributionspumpar vid produktionsanläggningar och pumpstationer längs ledningen. En förenklad tryckbild för fram- och returtrycket längs en sträcka visualiseras i figur (3).



Figur 3: En schematisk bild över hur trycket i ledningarna generellt ändras över en sträcka utan hänsyn till höjdskillnader. Fjärrvärmecentralerna är konsumenter anslutna till fjärrvärmenätet vid olika avstånd från distributionspumpen.  $\Delta p$  är differenstrycket, vilket ändras med avståndet från pumpen.

Differenstrycket  $\Delta p$  är viktigt att beakta i nätet då det måste vara inom ett visst intervall för att leverera ett tillräckligt flöde genom styrventilerna i fjärrvärmecentralerna. Om differenstrycket blir för lågt eller för högt för vad styrventilerna är dimensionerade för, klarar de inte att upprätthålla full kapacitet av flödet som fjärrvärmecentralen kräver [5]. För att se till att differenstrycket hålls inom givet intervall kan pumpstationer installeras längs ledningen där trycket kan höjas i både fram- och returledning. Vid längre sträckor är detta nödvändigt för att bibehålla ett tillräckligt differenstryck och flöde till konsumenterna. I figur (4) visas en förenklad schematisk bild över hur tryckbilden i ett fjärrvärmesystem kan se ut med en pumpstation längs sträckan.



**Figur 4:** Tryckbilden i ett fjärrvärmesystem med en pumpstation som höjer trycket i fram- och returledningen. Genom detta kan differenstrycket upprätthållas inom önskat intervall under en längre sträcka.

Fjärrvärmenätets ledningar dimensioneras utefter teknisk och konstruktionsmässig data beroende på typ av fjärrvärmesystem. De flesta fjärrvärmesystem i Sverige är i regel konstruerade som konventionella system (högtemperaturssystem). Konventionella system är generellt konstruerade för att klara en framledningstemperatur på 120 °C och ett tryck på 1600 kPa för en ledning med PN16 klassificering. Differenstrycket vid fjärrvärmecentralerna ska då dimensioneras mellan 100-600 kPa [5].

Fjärrvärmenätet i Ljungsbro är av konventionell typ med äldre fjärrvärmecentraler som minst kräver en framledningstemperatur på ca 80 °C och ett idealt differenstryck mellan 150-600 kPa. Ledningsnätet i Ljungsbro är PN16-klassificerat vilket klarar ett maximalt tryck på 1600 kPa.

#### 3 Teori

I detta kaptitel presenteras relevant teori som använts för arbetets beräkningsmoment.

#### 3.1 Grundläggande termodynamik

Termodynamikens 1:a huvudsats definieras som lagen om energins bevarande. I ett system som undergår en tillståndsförändring kan energin endast omvandlas till olika former av energi [11]. Energi kan inte skapas eller förstöras, vilket är en av det grundläggande principerna inom fysiken. Energins bevarande för ett slutet system som undergår en tillståndsförändring från tillstånd 1-2 kan tecknas [12]:

$$Q_{12} = E_2 - E_1 + W_{12} \tag{1}$$

där  $Q_{12}$  är den totala värmen,  $E_2$  och  $E_1$  är energin i respektive tillstånd och  $W_{12}$  är det totala utförda arbetet. Ofta delas den totala energin i systemet upp av dess inre energi, kinetiska och potentiella energi. För ett slutet system som undergår en tillståndsförändring där den kinetiska och potentiella energin är försumbar samt att mediet är en solid, underkyld vätska eller en perfekt gas, kan ekvation (1) istället tecknas [12]:

$$Q_{12} = mc_p(T_2 - T_1) \tag{2}$$

där m är massan av mediet,  $c_p$  är den specifika värmekapaciteten och  $T_2$ ,  $T_1$  är temperaturen i respektive tillstånd.

#### 3.2 Värmeledning

Värmeledning är en av tre värmeöverföringsmekanismer som kan transportera värmeenergi genom ett medium eller en fluid [12]. Värmeledning förekommer främst vid energitransport genom fasta material och är därför den mest centrala typen av värmeöverföring i detta arbete. För att definiera värmeledningen genom en fast materia används oftast Fouriers värmeledningslag. Ur Fouriers lag kan den generella värmeledningsekvationen härledas och uttrycks i kartesiska koordinater:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}_{gen}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$
(3)

Denna ekvation beskriver hur värme flödar genom en tredimensionell kropp förutsatt att värmekonduktiviteten är konstant i alla riktningar. Det vänstra ledet representerar hur temperaturen distribueras samt magnituden av den inre genererade energin i kroppen  $(\dot{q}_{gen})$ . Det högra ledet representerar hur temperaturen varierar med tiden i förhållande till materialets egenskaper. Den termiska diffusiviteten  $\alpha$  beskriver ett materials förmåga att leda värme kontra att lagra värme och kan skrivas enligt ekvation (4).

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \tag{4}$$

Där k och  $\rho$  är materialets värmekonduktvivitet och densitet.

#### 3.3 Endimensionell, stationär värmeledning

I vissa fall kan ekvation (3) förkortas för att förenkla specifika analyser genom att endast beräkna värmeledning i en riktning, utan inre genererad energi och med tidskonstanta randvillkor för temperaturerna. För att beräkna temperaturgradienten genom en plan isotrop vägg som separerar ett varmt och kallt rum med konstanta temperaturer kan den generella värmeledningsekvationen tecknas:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \tag{5}$$

Eftersom värmeledningen endast sker i en riktning samt att väggen inte genererar inre energi och att temperaturerna inte är tidsberoende, så är de resterande termerna lika med noll. Värmeffekten ur Fouriers lag för en plan vägg kan ur detta uttryck sedan härledas ur integration och med givna randvillkor skrivas enligt ekvation (6).

$$\dot{Q} = kA \frac{T_i - T_y}{b} \tag{6}$$

där temperaturen varierar linjärt genom väggen i värmeledningens riktning [11].  $\dot{Q}$  är värmeeffekten, A är väggytans area,  $T_i$ ,  $T_y$  är inre respektive yttre temperaturen för väggen och b är tjockleken på väggen.

För endimensionell stationär värmeledning genom cirkulära tvärsnitt varierar inte temperaturgradienten längre linjärt eftersom den värmeöverförande ytan ändras längs radien. Värmeledningens riktning sker i radiellt led med cylindriska koordinater och Fouriers lag för cirkulära tvärsnitt tecknas istället enligt ekvation (7).

$$\dot{Q} = k2\pi L \frac{T_i - T_y}{ln\frac{R_i}{R_y}} \tag{7}$$

L är längden av hela väggen och  $R_i$ ,  $R_y$  är den inre respektive yttre radien av tvärsnittet.

#### 3.4 Numerisk analysmetod

Vid komplicerade värmeledningsberäkningar som är tidsberoende och kräver flera beräkningspunkter kan en numerisk metod appliceras som fördelaktigt beräknas i ett datorprogram [13]. Den metod som valdes i detta arbete kallas finita differensmetoden (FDM) och kan lösa avancerade differentialekvationer genom att ersätta derivatan mot finita differenser i det intervall av beräkningspunkter som är önskat. Diskretisering av problemet sker genom att dela upp hela problemet i flera noder (beräkningspunkter), där temperaturen i varje aktuell nod beräknas i turordning givet initiala randvillkor av temperaturen i noden innan och efter. För illustration kan en nod i x-riktningen benämnas som i och är då den aktuella beräkningspunkten, se figur (5). Noden efter och innan den aktuella noden kan därför skrivas som i + 1 och i - 1.

Beroende på hur det fysikaliska problemet som undersöks ser ut och vad som prioriteras av resultaten från beräkningarna, kan antingen en explicit eller implicit metod användas. Den explicita metoden beräknar den sökta variabeln endast utifrån känd data från föregående tidssteg. Den implicita metoden beräknar den sökta variabeln utifrån data från både föregående samt det nuvarande tidssteget. Denna metod medför att stabilitetsproblematik kan undvikas lättare men däremot krävs mer beräkningskraft för att lösa problemet. Valet av användingen av en explicit eller implicit beräkningsmetoden beror på vilken som är applicerbar för problemet och om stabilitet eller precision prioriteras för målet av beräkningarna. I detta arbete beräknas temperaturerna genom att explicit använda data från tidigare tidssteg. Således används en explicit lösningsmetod då den är applicerbar för det uppställda problemet, kräver mindre beräkningskraft och generellt ger högre precision av beräkningarna [13].

#### 3.4.1 Finita differens metoden i kartesiska koordinater

För fallet av endimensionell värmeledningen i en kropp med en tidsvarierande temperatur utan någon inre genererad energi, kan den generella värmeledningesevkationen skrivas som i ekvation (8), där t är tiden.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \tag{8}$$

För den aktuella noden i kan vänsterledet i ekvation (8) med hjälp av partiell integration approximeras som ekvation (9) [13].

$$\left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right]_i \approx \frac{\left[\frac{\partial T}{\partial x}\right]_{i+1/2} - \left[\frac{\partial T}{\partial x}\right]_{i-1/2}}{\Delta x} = \frac{T_{i+1} + T_{i-1} - 2T_i}{(\Delta x)^2} \tag{9}$$

Ur samma princip kan tidsderivatan i högerledet av ekvation (8) approximeras till följande uttryck:

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T_i^{p+1} - T_i^p}{\Delta t} \tag{10}$$

Exponenten p betecknar det aktuella tidssteget och p + 1 betecknar nästa tidssteg. Med ekvation (9) och (10) kan ekvation (8) skrivas om till

$$\frac{T_{i+1}^p + T_{i-1}^p - 2T_i^p}{(\Delta x)^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{T_i^{p+1} - T_i^p}{\Delta t}$$
(11)

Vid första tidssteget då temperaturerna för alla noder är känd kan den nya temperaturen  $T_i^{p+1}$  efter nästa tidssteg  $\Delta t$ , beräknas för den första noden. Efter temperaturen i första noden beräknats kan temperaturen i nästa nod beräknas utifrån det nya värdet av temperaturen i den första noden. Sedan kan temperaturen för varje nod beräknas med det nya randvillkoret från föregående nod. Denna operation kan sedan itereras för antalet önskade tidssteg och därav erhålla en metod för att beräkna temperaturerna i alla noder som en funktion av tiden [13]. Det resulterande uttrycket för  $T_i^{p+1}$  blir följande efter omskrivning:

$$T_{i}^{p+1} = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^{2}} (T_{i+1}^{p} + T_{i-1}^{p}) + \left[1 - \frac{2\alpha \Delta t}{(\Delta x)^{2}}\right] T_{i}^{p}$$
(12)

Eftersom den nya temperaturen  $T_i^{p+1}$  för noden i kan beräknas direkt ur ekvation (12) med alla kända temperaturer för det aktuella tidssteget p, är lösningsmetoden således explicit. Ur denna ekvation kan det också tydas att längre steg mellan beräkningspunkterna och tidsstegen leder till att beräkningarna av temperaturspridningen kan utföras snabbare. Däremot ger kortare steg ett noggrannare resultat av temperaturspridningen mot kostnad av en långsammare beräkningstid [13]. Därav är kvoten  $\frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2}$  en viktig parameter att

bestämma beroende av vad som prioriteras i beräkningarna. Om inversen till denna kvot, dvs  $\frac{(\Delta x)^2}{\alpha \Delta t}$  är större än 2 blir temperaturen  $T_i^p$  negativ vilket strider mot termodynamikens andra lag. Ett villkor för denna kvot måste därför införas för att säkerställa stabiliteten av beräkningarna och att ingen bestridelse mot fysikaliska lagar råder [13]. För att vidare styrka detta villkor kan det också bevisas matematiskt då lösningen av den finita differens metoden inte kommer att konvergera om inte villkoret är uppfyllt. Härledningen till detta matematiska bevis hänvisas till (J.P.Holman, Heat transfer, 2010). Villkoret uttrycks enligt ekvation (13) för ett endimensionellt fall.

$$\frac{(\Delta x)^2}{\alpha \Delta t} \ge 2 \tag{13}$$

Eftersom beräkningarna utförs i en dimension och fysiken i modellen är relativt simpelifierad, används endast första ordningen av noggrannhet för de numeriska beräkningarna. Högre ordningar av noggrannhet skulle kunna utnyttjats för att möjligen erhålla lite högre precision i beräkningarna. Däremot tenderar högre ordningar av noggrannhet också att ge konvergens och stabilitetsproblem och presenteras därför inte i detta arbete.



Figur 5: Schematisk illustration av beräkningspunkter och dess steglängder i vertikal riktning, sett från sidan.

#### 3.4.2 Finita differens metoden i cylindriska koordinater

Den finita differens metoden kan också användas för beräkningar i radiellt led i cylindriska koordinater vilket är centralt i detta arbete. Den generella värmeledningsekvationen för en dimension ser då istället ut på följande vis i cylindriska koordinater [14]:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\frac{\partial T}{\partial r}) = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t}$$
(14)

Med insatta tidssteg och beräkningsindex kan uttrycket likt kartesiska koordinater sedan approximeras med partiell integration för att erhålla följande uttryck:

$$\frac{r_{i+1/2}\frac{T_{i+1}^p - T_i^p}{\Delta r} - r_{i-1/2}\frac{T_i^p - T_{i-1}^p}{\Delta r}}{r_i \Delta r} = \frac{1}{\alpha} \frac{T_i^{p+1} - T_i^p}{\Delta t}$$
(15)

Då stegavståndet mellan respektive nod är  $\Delta r$ , se figur (6), kan radien för noden innan och efter den aktuella noden skrivas som följande:

$$r_{i+1/2} = r_i + \frac{1}{2}\Delta r$$
 (16)

$$r_{i-1/2} = r_i - \frac{1}{2}\Delta r \tag{17}$$

Med detta insatt i ekvation (15) kan den resulterande temperaturen efter omskrivning uttryckas:

$$T_i^{p+1} = \frac{\alpha \Delta t}{r_i (\Delta r)^2} (r_{i+1/2} T_{i+1}^p + r_{i-1/2} T_{i-1}^p) + \left[ 1 - \frac{2\alpha \Delta t}{(\Delta r)^2} \right] T_i^p$$
(18)

Även här gäller ett ekvivalent villkor för att inte bryta mot termodynamikens andra lag.

$$\frac{(\Delta r)^2}{\alpha \Delta t} \ge 2 \tag{19}$$



Figur 6: Schematisk illustration av beräkningspunkter och dess steglängder i radiell riktning, sett ovanifrån.

#### 3.5 Grundläggande strömningslära

Inom strömningsläran är strömning av fluider i rör ett vanligt fenomen att undersöka inom ingenjörsmässiga problem. För att skapa ett flöde av en inkompressibel fluid måste en drivande kraft eller tryckskillnad mellan två punkter längs en strömlinje uppstå. Denna tryckskillnad kan antingen uppstå genom en höjdskillnad, skillnad i statiskt tryck eller tillförandet av energi i form av en pump [15]. För att analytiskt beskriva hur ett element av en fluid strömmar längs en strömlinje i en rörsektion från punkt 1 till 2 används ofta Bernoullies utvidgade ekvation, se ekvation (20). Figur (7) visar ett tillämpningsområde för ekvationen.

$$p_1 + \frac{\rho \tilde{u}_1^2}{2} + \rho g z_1 + \rho w_t = p_2 + \frac{\rho \tilde{u}_2^2}{2} + \rho g z_2 + \Delta p_f$$
(20)

I denna ekvation är p det statiska trycket i respektive punkt,  $\tilde{u}$  är fluidens hastighet i respektive punkt och z är höjden till strömlinjen för respektive punkt från en referensnivå.



Figur 7: En schematisk bild över en rörsektion där Bernoullies utvidgade ekvation kan tillämpas mellan punkt 1 och 2.

Bernoullies utvidgade ekvation är en teoretisk approximation av förhållandet mellan tryck, hastighet och höjdnivåer och bygger på ett flertal antaganden [11]. Ekvationen kan skrivas i energiform, tryckform eller höjdform beroende på tillämpning. I detta arbete tillämpas tryckformen. För att ekvationen ska vara applicerbar måste fluiden vara inkompressibel, strömningen är stationär samt att skjuvspänningar som verkar på fluidelementet är försumbara [12]. Denna ekvation tar hänsyn till tryckförluster som uppstår vid strömning i rör, där  $\Delta p_f$  är summan av friktion och engångsförluster. Friktionsförluster uppstår mellan fluiden och rörväggarna vid strömning och kan uttryckas enligt ekvation (21).

$$\Delta p_f = \lambda \frac{L}{d} \frac{1}{2} \rho \tilde{u}^2 \tag{21}$$

Friktionsförlusterna är beroende av hastigheten på fluiden  $\tilde{u}$ , rörets dimensioner där L är längden och d är diametern över tvärsnittet, och friktionsfaktorn  $\lambda$ . Friktionsfaktorn är i sin tur en funktion av Reynoldstalet beroende på om strömningen är laminär eller turbulent. Rörets ytskrovlighet kan även påverka friktionsfaktorn. Engångsförluster förekommer vid specifika platser där rörets dimensioner hastigt ändras eller vid strypningar och ventiler. Engångsförluster är ofta försumbara i förhållande till friktionsförlusterna i stora och långa rörnätverk, som fjärrvärmenät till exempel. Därför presenteras ingen vidare teori om engångsförluster.

Genom att utgå från Bernoullies utvidgade ekvation kan ett flöde skapas genom att en tryckskillnad mellan punkt 1 och 2 råder. Om det statiska, dynamiska och hydrostatiska trycket i punkt 1 och 2 är samma medför detta att tryckförlusterna är lika med noll och ingen tryckskillnad råder. För att erhålla ett flöde måste ett arbete, ( $\rho w_t$  i tryckform) tillföras för att således skapa ett flöde och en tryckskillnad,  $\Delta p_f$ , se ekvation (22) [15].

$$\Delta p_f = p_1 - p_2 + \frac{\rho}{2} (\tilde{u}_1^2 - \tilde{u}_2^2) + \rho g(z_1 - z_2) + \rho w_t$$
(22)

# 4 Metod

I detta kapitel presenteras strategin bakom arbetet och motiveringar till utnyttjade förenklingar och antaganden. Även användandet av vetenskapliga metoder utvärderas.

# 4.1 Övergripande strategi bakom arbetet

Strategin och arbetsgången för denna förstudie består av följande arbetsmoment i kronologisk tidsordning.

- 1. Data och statistik av det årliga värmebehovet i Ljungsbro analyseras och utvärderas.
- 2. Tre större geografiska områden i Ljungsbro med olika geologiska förutsättningar undersöks och utvärderas genom att beakta rimligheten för positioneringen och hur lovande förutsättningarna är prestandamässigt för lagret.
- 3. Baserat på utvärdering av värmebehovet bestäms lagrets upp- och urladdningsflöde samt respektive flödestemperatur. Den erforderliga energikapaciteten för lagret beräknas av den mängd lokal produktion som utnyttjas i dagsläget.
- 4. Vidare utveckling av beräkningsverktyget sker parallellt med tidigare moment och fokuserar primärt på att använda finita differens metoden för att beräkna värmespridingen i det vertikala ledet av lagret. Beräkningsverktyget adderas även med vidare funktioner för att simulera urladdningsprocesser av lagret.
- 5. I simuleringsprogrammet Netsim undersöks lagrets påverkan på fjärrvärmenätet vid upp- och urladdning för olika inkopplingspunkter och lastfall.
- 6. Vid simulering undersöks främst differenstrycket mellan fram- och returledning, flöde och framledningstemperaturen. Därefter utvärderas hur olika inkopplingspunkter av lagret påverkar dessa parametrar i det lokala nätet.
- 7. Sist utvärderas resultaten från beräkningsverktyget, simuleringarna i Netsim samt placeringen av lagret för att presentera ett beslutsunderlag för sprickvärmelagerets utformning och placering.

# 4.2 Initiala antaganden och förenklingar

Nedanstående antaganden är både generella och specifika för olika arbetsmoment.

- Behovssberäkningar baseras på tillgänglig data från Tekniska verken för år21/22 .
- Även om kartorna från SGU är generellt precisa kan bergartsfördelningen och egenskaperna i berggrunden avvika lokalt från vad som kan tydas från SGU. För att precisera bergarter och dess unika termiska egenskaper måste omfattande fälttester och undersökningar utföras där anläggningen är tänkt att placeras vilket kräver utrustning, kompetens inom geologiska fältstudier och pengar. Därför approximeras de termiska egenskaperna ur generella samband för värmeledningsförmåga, specifik värmekapacitet och densitet baserat på data som kan utvinnas från SGU:s geokartor.
- Termiska parametrar som värmekonduktivitet, densitet, specifik värmekapacitet antas inte ändras med temperatur eller tid.
- Den ostörda marktemperaturen antas vara 8 °C i hela berggrunden.
- I beräkningarna tas det ej hänsyn till värmeväxlingen mellan geolagret och fjärrvärmenätet.
- Värmelagret kan maximalt anta en temperatur på 90 °C.
- Uppladdningstemperaturen av värmelagret antas vara 95 °C i beräkningsverktyget.
- Tidsintervaller för upp- och urladdningstid bestäms godtyckligt baserat på hur många timmar det finns behov respektive överflöd av extra värme i Ljungsbro.
- Urladdningseffekten bestäms utifrån mängden lokalproducerad effekt under de antal timmar lokal produktion sker. Urladdningseffekten blir således en medeleffekt som används i beräkningsverktyget.
- Uppladdningsflödet bestäms genom tester av massflöden i beräkningsverktyget.
- Lagret antas ha en homogen temperaturfördelning vid upp- och urladdning.
- Berggrunden utanför geovärmelagret antas vara homogen, det vill säga att endast värmeledning i fast materia för en given bergart används för beräkningarna av finita differens metoden i omgivande berggrund.
- Lagret antas vara cylindriskt formad och är således axisymmetrisk. Därav kan denna symmetri användas för att förenklat approximera värmespridningen från lagrets mantelyta i en dimension (radiellt).
- Värmeledning i vertikalt led beräknas uppåt och nedåt från lagrets topp- och bottenarea.
- Värmeledningen som sker diagonalt från lagrets kanter beräknas ej utan uppskattas istället genom att utföra beräkningarna på en större cirkelarea i den vertikala riktningen. Radien för denna area motsvarar 125 % av värmelagrets faktiska radie.
- Driftfallen för varje simulering i Netsim baseras och utformas av data från verkliga driftfall. Vid driftfall som inte kan efterliknas från verkliga data, baseras det på den data som närmast liknar driftfallet.

#### 4.3 Utvärdering av värmebehov och lagerkapacitet

Den data som tillhandahålls är uppmätta flöden, fram- och returledningstemperaturer samt motsvarande tryck, differenstryck, utetemperatur och lokal produktion i Ljungsbro. Datan är från år 21/22 och är momentanvärden på timbasis. För att beräkna överföringseffekten från Tornby till Ljungsbro utnyttjas ekvation (2) tillsammans med flödet samt fram- och returtemperaturerna uppmätta i Tornby. Genom att addera värmeeffekten från lokal produktion erhålls det totala värmeeffektbehovet i Ljungsbro för varje timme.

Ur denna data kan flera slutsatser och beräkningar göras för att bestämma generella driftparametrar och lagrets erforderliga kapacitet. December månad var den kallaste månaden under den undersökta tidsperioden och även den enda månaden då lokal produktion var aktiv i Ljungsbro. Lokal produktion var igång 434 timmar under december månad och den totala producerade energin var ca 527 MWh. Lokal produktion drar generellt igång när det är kallt ute och värmebehovet når ca 14 MW men det kan variera. I figur (8) illustreras lokal produktion i förhållande till utetemperaturen.



Figur 8: Variationen av lokal produktion i Ljungsbro mot utetemperaturen under december månad 2021. Observera att lokal produktion generellt sker då utetemperaturerna är som lägst.

Baserat på denna data skulle lagerkapaciteten endast behöva vara ca 527 MWh för att täcka behovet under denna vintersäsong eftersom december var den enda månaden då lokal produktion utnyttjades. För att ansätta en säkrare och mer realistisk lagerkapacitet antas det dock att januari och februari också kräver ett tillskott på 527 MWh per månad. Eftersom december månad var ovanligt kylig ger detta en lagerkapacitet baserat på ett extremfall som med god marginal bör kunna leverera behovet som krävs under framtida vintersäsonger [16].

Med ett lite längre tidsperspektiv ses en utveckling och expandering i Ljungsbro vilket spår ett ökat värmebehov med toppar upp mot 25 MW, jämfört mot dagens 21 MW. För att ta hänsyn till detta och framtidssäkra lagret beräknas det långsiktiga behovet av lokal produktion. Det görs genom att multiplicera dagens produktion med en faktor ekvivalent mot effektökningen från 21 - 25 MW. Detta ändrar den lokal produktionen från 527 MWh till ca 627 MWh under en månad. Lagrets erforderliga kapacitet blir således ca 1900 MWh för de tre vintermånaderna.

Genom att utgå från antalet timmar lokal produktion var igång under december kan således totala tiden för värmeproduktion beräknas. Den totala produktionen i december var 434 timmar vilket betyder att den totala produktionstiden under hela vintersäsongen blir 1302 timmar eller motsvarande ca 54 dagar. Medeleffekten

under dessa dagar blir 1.22 MW för lastfallet med 21 MW och 1.45 MW vid lastfallet med 25 MW.

Temperaturerna i fram- och returledningen justeras lite beroende på hur kallt det är ute. Figur (9) visar hur ledningstemperaturerna ändras med utetemperaturen. Generellt används framledningstemperaturer mellan 105 och 110 °C när det är riktigt kallt ute, vid utetemperaturer över noll grader används en framledningstemperatur på ca 95 °C. Responstiden av ändringar i framledningstemperatur beroende på utetemperatur är även lite fördröjda, speciellt om utetemperaturen varierar snabbt så hinner inte produktionen justera temperaturen omedelbart. Returtemperaturen ändras relativt lite i förhållande till framtemperaturen och håller sig konstant runt 50 °C.



Figur 9: Illustration baserad på data för hela December 2021 som visar hur ledningstemperaturerna ändras då utetemperaturen varierar under dagarna. Observera att returtemperaturen ändras marginellt i förhållande till framledningstemperaturen.

## 4.4 Undersökning av geografisk placering och geologiska förutsättningar

Metoden för undersökning och utvärdering av placeringen av lagret och de geologiska förhållandena är främst präglad av informationshämtning av geologiska kartvisare utgivna från SGU. Dessa kartor ger översiktlig information i olika nogrannhetskalor baserat på data från brunnsarkiv och tidigare geologiska fältundersökningar.

För att studera geolagrets termiska effektivitet utifrån de vanligaste typerna av geologiska förhållanden i Ljungsbro väljs tre större geografiska områden att undersöka, se figur (10). Storleken och positionen av dessa områden väljs godtyckligt utifrån arbetets omfattning och geografiska position från fjärrvärmenätet, utanför bostadsområden samt bortifrån rådande vattenskyddsområden och dricksvattentäkter.



**Figur 10:** Olika berggrunder i Ljungsbro-området. Gröna området består främst av kalksten, gult/ljusgrönt är främst sandsten och skiffer medan rött område är granit. Det heldragna svarta linjerna är regionala deformationszoner och de streckade linjerna är lokala deformationszoner . Deformationszoner (eller sprickzoner) medför hög grundvattenströmning och är inte önskvärt i närheten av ett geolager [17].

De vanligaste typerna av berggrunder i närmorådet av Ljungsbro är sedimentära och kristallina berggrunder. Den sedimentära berggrunden består främst av kalksten men sandsten och skiffer är också mycket framträdande, se figur (10). Den kristallina berggrunden utgörs främst av granit.

Grundvattentillgången i Ljungsbro är till övervägande del utgjord av goda uttagsmöjligheter med en mediankapacitet på 2000-6000 l/h för det dominerande blå området, se figur (11).



Figur 11: Grundvattenkapaciteten i Ljungsbro uttryckt i möjligt uttag av vatten per tidsenhet. Det blå området är kapaciteten för sedimentär berggrund med en mediankapacitet på 2000-6000 l/h. Det gröna området är kapaciteten för en kristallin bergrund med en mediankapacitet på 600-2000 l/h [17].

Utöver information om bergarter och grundvattentillgångar, är jordlagrets djup (mäktighet) viktig att beakta av främst ekonomiska skäl [2]. Vid konstruktion av ett geolager medför djupa jordlager onödiga kostnader då borrningsprocessen blir mer resurskostsam och tidskrävande. Därför utnyttjas jordmäktigheten för att reducera områdena ner till mindre områden där jorddjupet är relativt grunt och därav mer ekonomiskt gynnsamt, se figur (12).



Figur 12: Jordtäckets djup (mäktighet) i Ljungsbro. Grön/gula områden har ett djup på 0-5 m, orange/ljusröda områden är 5-20 m och mörkröd/helröd är 20-50 m.

Sammanfattade generella förutsättningarna för respektive område beskrivs nedan:

#### Sydvästra Ljungsbro (Område 1)

- Sedimentär berggrund, främst bestående av kalksten.
- God grundvattentillgång, 2000-6000 l/h.
- Jorddjupet varierar generellt mellan 3-10 m.

#### Östra Ljungsbro (Område 2)

- Sedimentär berggrund, främst bestående av sandsten och skiffer.
- God grundvattentillgång, 2000-6000 l/h.
- Jorddjupet varierar generellt mellan 5-20 m.

#### Norra Ljungsbro (Område 3)

- Kristallin berggrund, främst bestående av granit.
- Tämligen god grundvattentillgång, 600-2000 l/h.
- Jorddjupet varierar generellt mellan 0-20 m.

Eftersom de sedimentära berggrunderna i synnerhet varierar i värmeledningsförmåga används en beräkningsmetod från Sveriges geotekniska institut [18] där de termiska egenskaperna approximeras på ett förenklat vis utifrån porositet och vatteninnehåll i bergarterna. Sambandet för värmekonduktiviteten tecknas enligt ekvation (23) för jord och sedimentärt berg och förutsätter att porerna i berggrunden är vattenmättade.

$$k = k_w^n \cdot k_g^{1-n} \tag{23}$$

 $k_w$  och  $k_g$  är vattnets respektive bergarternas värmekonduktivitet, *n* är kornens (bergartens byggstenar) porositet och  $S_r$  är vattenmättnadsgraden. Vattenmättnadsgraden antas vara 100 % då vattentillgången för båda sedimentära områden är god. För område 1 och 2 valdes värmekonduktiviteter och porositet enligt tabell (2) för respektive bergart.

**Tabell 2:** Parameterdata och resulterande värmekonduktivitet för kalksten och sandsten i område 1 och 2. Värmekonduktiviteten för vatten är hämtad från [12] (s.77). Värmekonduktiviteten för bergarterna och porositeten är riktvärden från [18] (s.12, 16).

Område	Bergart	$k_w \; [W/mK]$	$k_g \; [W/mK]$	n	$k \; [W/mK]$
1	Kalksten	0.65	2.5	0.1	2.18
2	Sandsten	0.65	5	0.1	4.08

Sambandet för värmekapaciteten i bergarterna tecknas enligt ekvation (24) där värmekapaciteten C är produkten av densiteten  $\rho$  och den specifika värmekapaciteten  $c_p$ . Korndensiteten och den specifika värmekapaciten hos kalksten och sandsten är relativt lika [19], varför de valdes till samma värden i tabell (3).

$$C = C_g(1-n) + C_w n S_r \tag{24}$$

**Tabell 3:** Parameterdata och resulterande värmekapacitet för kalksten och sandsten i område 1 och 2. Densitet och specifik värmekapacitet för vatten är hämtad från [12] (s.77). Densitet och specifik värmekapacitet för bergarterna är generella riktvärden från [20] (s.35–38).

Område	Bergart	$C_g[kJ/m^3K]$	$C_w[kJ/m^3K]$	n	$S_r$	$C[kJ/m^3K]$
1	Kalksten	1898	4195	0.1	1	2055
2	Sandsten	1898	4195	0.1	1	2055

Den kristallina berggrunden i område 3 är mindre komplicerad att approximera då porositeten är väldigt låg vilket innebär att vattenmättnadsgraden i stort sätt är försumbar [18], därav behöver endast bergartens mineralsammasnättning tas hänsyn till. Avgörande för de termiska egenskaperna hos kristallina bergarter är andelen av mineralen kvarts. Värmekonduktiviteten för kvarts har ett schablonvärde på 7.7 W/mK vilket betyder att kvartsrika bergarter har en god värmeledningsförmåga [2] (s.20). Granit har generellt en kvartshalt på 20-40 % vilket ger ett medianvärde av värmekonduktivitet på 3.5 W/mK [18]. Resterande egenskaper presenteras i tabell (4) och har valts utifrån riktvärden för granit [20] (s.35-38).

 Tabell 4: Parameterdata för granit i område 3.

Område	Bergart	k[W/mK]	$ ho[kg/m^3]$	$c_p[J/kgK]$
3	Granit	3.5	2650	730

#### 4.5 Utveckling av beräkningsverktyget

Beräkningsverktyget är uppbyggt i den matematiska programmeringsmjukvaran MATLAB (v.R2021b). Grundläggande fysik och struktur är implementerad sedan tidigare, se kapitel 3.6. Däremot finns det behov av förbättringar i programmet som bör tillämpas för att skapa en mer sofistikerad modell. De förbättringspunkter som tillämpas är en mer omfattande och nogrann uträkning av temperaturspridningen runt lagret (det isolerande lagret), dimensionering av lagret utefter dess energikapacitet samt funktioner för att simulera urladdningsprocesser från lagret.

Tidigare beräknas enbart temperaturspridningen i lagrets isolerande bergslager i en dimension (radiellt led) vilket inte är tillräckligt för att ge en represantiv bild över den totala värmespridningen. Detta kompletteras ytterligare med beräkningar för temperaturspridningen i axiell riktning (vertikal riktning). En förenklad metod för att approximera värmespridningen i diagonal riktning från lagret införs också för att utöka noggrannheten, se figur (15). Nedan beskrivs tillvägagångsättet och de antagenden som gjorts för att utveckla värmespridningsberäkningarna.

För att kunna beräkna uppvärmningen av lagret behöver även förlusterna tas i beaktning. Då lagret anses värmas upp under homogent tillstånd kan ekvationerna för värmeöverföring genom plan vägg och cirkulärt rör tillämpas, se ekvation (6) och (7). Förlusterna antas ske enligt figur (13) där värmeöverföringen sker med omgivande bergmassa (genom systemgränsen för huvudlagret). Det finns ytterligare en förlust som verkar vilket är regionala grundvattenströmmar som strömmar igenom och för med sig värme från lagret, även denna illustreras i figur (13). Förlusten av grundströmmen beräknas ur ekvation (2). Genom att subtrahera alla förluster från den tillförda värmeeffeketen kan således temperaturen i sprickvärmelagret beräknas ur första huvudsatsen i energiform.



Figur 13: Illustration av de förluster som verkar på sprickvärmelagret.

För att beräkna temperaturen i den omgivande bergsmassan används finita differensmetoden för vertikalt och radiellt led, se ekvation (18) och (12). Se även kapitel 3.4 för en översiktlig beskrivning av funktionen för finita differensmetoden. Första noden väljs i lagrets ytterrand närmast systemgränsen. Temperaturen i denna nod antas vara lika med temperaturen på lagret och ändras således med avseende på tillförd effekt och förluster från lagret, se beskrivning i stycket ovan. Den sista noden väljs godtyckligt långt bort för att garantera ett konstant randvillkor under hela iterationens tid, se figur (14). Hur detta bestäms förklaras djupare i kaptiel 4.6. Valet av steglängder och tidssteg förklaras även i samma kapitel.



Figur 14: Schematisk illustration av noder och dess steglängder i axiell (vertikal) och radiell riktning för en cylinder.

Genom att enbart beräkna värmeöverföringen vertikalt och radiellt så förekommer det en felkälla genom den diagonala värmespridningen. Detta kompenseras för genom att öka kontaktytan för värmeöverföringen genom plan vägg, se ekvation (6). Genom att öka arean ökar ytan som värmespridningen sker i vilket leder till att sprickvärmelagrets temperatur blir mer representativt för verkligheten, se figur (15).



Figur 15: Illustration över hur radien används för att kompensera för den diagonala värmespridningen.

Dimensioneringen av lagret bestäms ur den energikapacitet lagret kräver för att täcka spetsvärmebehovet i Ljungsbro under en säsong, vilket beräknades till 1900 MWh för lastfall med topplaster på 25 MW. Då returtemperaturen till sprickvärmelagret är ca 50 °C beräknas den efterfrågade energikapaciteten med den användbara temperaturen i sprickvärmelagret, dvs mellan 90 och 50 °C. Eftersom värmen främst lagras i bergsmassan används materialegenskaperna för den aktuella bergarten vid beräkning av energikapaciteten i lagret. Första huvudsatsen tillämpas för att erhålla massan som krävs av lagret, se ekvation (2). Ur detta kan sedan lagrets storlek beräknas.

Det utvecklas även en metod för att kunna simulera lagrets tempereturutveckling efter flera laddnings- och urladdningscykler. Detta görs för att det är i intresse att på en större tidskala se hur sprickvärmelagrets

värmeförmåga utvecklas. Implementeringen av urladdningsprocesser fungerar på samma vis som för urladdningsprocesser, skillnaden att värmeeffekten förs ut ur lagret.

#### 4.6 Modellverifiering av beräkningsverktyget

För att kunna avgöra hurvida modellens komplexitet ger tillräckligt noggranna resultat utförs en modellverifiering. Genom att ansätta olika tidssteg, tjocklekar samt steglängder går det att simulera hur det isolerande lagret påverkas vid variation och således kan modellens osäkerhet uppskattas. Detta används som underlag för att bestämma hur finfördelad modellen behöver vara vid simulering av resultat. Generell data som används vid test av modellen ses i tabell (5).

**Tabell 5:** Indata vid testning av beräkningsverktyg. Den data som är angiven används i alla tester varav variation på en parameter kan ske beroende på vilken variabel som granskas.

Symbol	Beskrivning	Värde	Enhet
r	Radie på lager	20	m
$r_i$	Radie till nod		m
$r_{iso}$	Totala tjockleken på isolering	50	m
$T_{ut}$	Önskad ut-temperatur från lagret	85	$^{\circ}\mathrm{C}$
$T_{in}$	In-temperatur från värmeväxlaren	95	°C
$T_r$	Returtemperatur	50	$^{\circ}\mathrm{C}$
$T_{mark}$	Ostörd marktemperatur	8	$^{\circ}\mathrm{C}$
$\dot{m}_{in}$	Massflödet i lagret	20	$\rm kg/s$
$\dot{m}_{in_{vinter}}$	Massflödet till lagret under vinter	2.12	$\rm kg/s$
$\dot{m}_{grundvattenstr{ m o}m}$	Genomströmmande vatten		$\rm kg/s$
t	tidssteg	60	s
$t_{upp}$	Antal dagar som uppladdning sker i sträck	13	dagar
$t_{ur}$	Antal dagar som urladdning sker i sträck	3	dagar
$t_{upp_{cirk}}$	Antal dagar som vattnet cirkulerar i sträck	1	dagar
$t_{upp_{vinter}}$	Antal dagar som uppladdning kan ske under vintertid	2	dagar
$I_{upp+cirk}$	Antal intervaller av uppladdning och cirkulation i sträck		intervaller
$I_{ur+upp(vinter)}$ Antal intervaller av urladdning och uppladdning under vinter		18	intervaller
$C_p$	Specifik värmekapacitet		J/kgK
ρ	Bergets densitet	2650	$kg/m^3$
k	bergets värmekonduktivitet	3.5	W/mK

Första parametern som granskas är tjockleken på det isolerande lagret runt sprickvärmelagret. Testning av detta är väsentligt då värmespridningen är tidsberoende. Då tiden går mot oändligheten kommer temperaturspridningen runt värmelagret att öka varav det påverkade området testas inom ett begränsat tidsintervall för att avgöra en rimlig tjocklek. Detta testas genom att ändra tjockleken inom ett intervall av 20 m upp till 100 m. Resultatet av detta ses i figur (16). Simuleringen sker med ett tidsteg på 60 s och steglängd på 0.1 m eftersom preliminära tester av dessa parametrar visade sig ge en god precision och stabilitet för beräkningarna.



**Figur 16:** Simulerade temperaturspridningen beroende av tjockleken där varje uppmätt temperatur är per decimeter i det isolerande lagret. Simuleringen sker med tidssteg på 60s och en steglängd på 0.1m

Då värmespridningen är tidsberoende så är det intressant att undersöka hur värmespridningen ser ut under en längre tidsintervall. I figur (16a) framkommer det att första året är det ostörd marktemperatur några meter innan beräkningsverktyget har nått slutet av det isolerade lagret, dock uppstår det ett problem vid nästa år och åren därefter. Finita differensmetoden fungerar genom att ansätta två randvilkor, vilket är första temperaturen och sista temperaturen som är ansatt till att vara ostörd marktemperatur. Då uppvärmningen sker under en längre tid blir detta randvilkor istället en störning som förhindrar en högre temperaturen ökar från 8 °C till ca 40 °C då tjockleken ökat från 20 till 100m. I verkligheten kommer det finnas fler störningar i marken och tillslut kommer temperaturspridningen att avta pga genomströmmande grundvattnet. Med avsende på detta ansågs resultatet i figur (16c) vara tillräckligt representativt, dvs ett isolerande lager med tjockleken 50m. En annan metod för att beräkna tjockleken på det isolerade lagret är att sätta ett randvilkor på att differensen i nästsista noden samt randvilkoret i sista noden ska vara noll. Detta stöds dock inte i beräkningsverktyget då dess uppbyggnad bygger på en bestämd tjocklek i det isolerade lagret.

Andra parametern som testas är steglängden som används i ekvation (18) och (12). Noggrannheten av beräkningarna beror delvis på hur fin diskretiseringen av steglängden är. Testning av detta görs för att avgöra hur fin diskretisering som behövs för att ge representativa resultat. Intervallet som används är mellan 0.1 m och 10 m. Resultatet presenteras i figur (17). Vid simulering används ett tidsteg på 60 s då detta är


den initiala gissningen på hur litet tidsteget bör vara för att inte ha för stor påverkan på resultatet.

Figur 17: Test med olika steglängder och deras påverkan på beräkningen av det isolerande lagret. Simuleringen sker med tidssteget 60s.

I figur (17) framkommer det att vid ökat avstånd mellan varje nod så ökar även dess temperatur, men då volymen är konstant minskar antalet noder. Detta resulterar i ett utseende med färre noder med en ojämn uppdelning, se figur (17c). En jämförelse mellan noder med motsvarande distans till huvudlagret visar att samma nod med två olika steglängder kan simulera fram olika temperaturer. I figur (17a) och (17c) är samma nod ca 150 % större i det fallet vid större steglängd då temperaturen är 25 °C istället för 10 °C. Då beräkningsverktyget bygger på att iterera fram temperaturer är det mest rimliga att anta en så liten steglängd som möjligt för att ge ett rimligt resultat, därav bestämdes det att använda stegländen i figur (17a), dvs 0.1 m.

I finita differensmetoden är tidssteget en avgörande parameter för dess prestanda, se ekvation (18) och (12). Testning av detta går till genom att ändra tiden från 30 s upp till 60 minuter för att avgöra vilken tidsintervall som ger tillräckligt representativa reslutat. Resultatet presenteras i figur (18). Steglängden som används vid simulering är 0.1 m.



**Figur 18:** Olika tidssteg påverkan uppmäta temperatur på det isolerande lagret. Simuleringen sker med steglängden 0.1m.

Vilket tidssteg som används påverkar också precisionen av beräkningarna. Figur (18) visar att vid ökad tidsteg så blir avvikelsen för den tidsberoende temperaturen större. Olika tidssteg innebär att det sker beräkningar med olika tidstintervaller. Anledningen till att det skulle vara önskvärt att ha ett större tidssteg är om beräkningstiden är för lång. Resultatet av att ändra tidssteget framkommer i figur (18), där störst skillnad framkommer när tidssteget sätts till 60 minuter jämfört med tidssteg på 30 och 60 sekunder. Samma nod under tidsstegen 1 h och 60/30 s visar att temperaturen ökar mot 100 % i vissa noder vid det högre tidssteget. Då resultatet inte varierar mellan 30 och 60 s, anses 60 s vara rimlig med avseende på tidseffektivitet.

## 4.7 Undersökning av massflöden

För att bestämma vilket massflöde som krävs för att ladda upp lagret till önskad nivå undersöks olika massflöden genom att simulera lagret med olika uppladdningar. Genom att undersöka påverkan på det simulerade lagrets temperatur kan således ett optimalt massflöde konstateras. De massflöden som kommer att undersökas är 10 kg/s, 20 kg/s och 30 kg/s.

Något som för med sig en stor osäkerhet för beräkningsverktyget samt har en stor påverkan på sprickvärmelagrets funktionalitet i verkligheten är det genomströmmande grundvattnet. Då denna ej kan bestämmas enligt vilka geologiska förutsättningar som finns utförs det tester för att uppskatta dess påverkan på det simulerade lagrets temperatur. De olika massflödena på grundvattenströmmen som undersöks är 0.2 kg/s, 1 kg/s samt 5 kg/s.

## 4.8 In-parametrar vid simulering av lager

Vid simulering av de olika sprickvärmelagren används olika data baserat på vilka geologiska förutsättningar som finns, detta presenteras i tabell (6). Resultatet blir baserat på indatan från de olika geologiska förutsättningarna men även efter vilka olika behov som kan finnas, dvs ett driftfall med 21 MW och ett med 25 MW.

Områden	Område 1	Område 2	Område 3	Område1	Område 2	Område 3
Driftfall [MW]	21	21	21	25	25	25
medeleffekt ut [MW]	1.22	1.22	1.22	1.45	1.45	1.45
$ ho[kg/m^3]$	2600	2600	2650	2600	2600	2650
$C_p[J/kgK]$	790	790	730	790	790	730
k [W/mK]	2.18	4.08	3.5	2.18	4.08	3.5
$\dot{m}_{in}[kg/s]$	20	20	20	20	20	20
$\dot{\mathbf{m}}_{invinter}[kg/s]$	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12
$\dot{\mathrm{m}}_{grundvatten}[kg/s]$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
$T_{in}[^{\circ}C]$	95	95	95	95	95	95
t [s]	60	60	60	60	60	60
$\mathbf{r}_{iso}[m]$	50	50	50	50	50	50
r [m]	20	20	20	20	20	20
$\Delta r[m]$	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
h [m]	70	70	70	70	70	70

Tabell 6: Indata för olika sprickvärmelager baserat på behov och geologiska förutsättningar

Många av parametrarna är satta till samma värde för att de olika sprickvärmelagren ska kunna jämföras. Radien på lagret är sedan tidigare bestämt till 20 m varav det visat sig att den kan öka ytterligare, detta testas vidare i resultatet. Höjden på lagret är satt till 70 m då det visade sig att volymskillnaden för vilken bergtyp som används är minimal, se tabell (9).

## 4.9 Implementering av lager och analys av fjärrvärmenätet

#### 4.9.1 Introduktion till Netsim och simuleringsmodellen

För att undersöka hur lagret integrerar med fjärrvärmenätet används simuleringsprogrammet Netsim som hjälpmedel [21]. I programmet kan en modell av hela fjärrvärmenätet i Linköping implementeras och överskådas. I detta arbete avgränsas det undersökta området från Tornby och upp till Ljungsbro. Detta görs praktiskt i programmet genom att koppla bort resterande del av nätet i Linköping vid huvudledning i Tornby och sedan ansätta ett en produktionsanläggning vid Tornby som representerar ordinarie produktion från Linköping. Se figur (19) för en grovt förenklad och översiktligt bild av den undersökta fjärrvärmenätsmodellen.



**Figur 19:** Grovt översiktlig illustration av fjärrvärmenätet i Ljungsbro. Relevanta punkter i nätet är uppmärkta och döpta för att förstå hur de förhåller sig till varandra. Bilden är inte skalenlig.

I modellen finns alla konsumenter anslutna till fjärrvärmenätet. Lasten (behovet) av dessa konsumenter styrs av en lastfaktor i programmet där lasten justeras mot det värde som ska undersökas. Även pumpar och lokala produktionsanläggningar finns med i modellen som kan ansättas till önskade tryckhöjningar respektive producerade flöden och temperaturer. För att simulera ett driftfall i modellen anges följande driftparametrar i programmet:

- Värmeeffekt och framledningstemperatur från ordinarie produktion i Linköping.
- Tryckhöjningen i fram- och returledningen vid pumpen i Berg.
- Den totala lasten hos anslutna konsumenter i Ljungsbro.

- Differenstrycket i en mätpunkt i södra nätet.
- Returtryck i ledningen vid Tornby.
- Returtemperaturer från konsumenter.
- Värmeeffekt och framledningstemperatur från lokala produktionsanläggningar.

I programmet utförs beräkningarna baserat på Bernoullies teorier och ekvationer, se kapitel 3.6. Beräkningarna i nätet utförs baklänges genom att utgå från lasten hos varje kund och bestämma vilket flöde, differenstryck och temperatur som krävs för att leverera den ansatta värmeeffekten. För att beräkningarna ska vara möjlig måste ett referenstryck i nätet ansättas som beräkningarna kan arbeta mot. För simuleringarna i detta arbete används differenstrycket i södra mätpunkten som referens.

## 4.9.2 Metod för nätsimuleringar

Metodiken för att undersöka och hitta bästa inkopplingspunkten för lagret i fjärrvärmenätet inleds med att göra en kartläggning över nätet som det ser ut i dagsläget. Detta görs genom att först undersöka några standard driftfall genom att implementera parametrar från verklig data. Dessa driftfall rekonstruerades i Netsim genom att ansätta ett antal basinställningar för att efterlikna de verkliga driftfallen så gott som möjligt. De valda standard driftfallen och dess basinställningar presenteras i tabell (7).

Standard driftfall	1	2	3	Enhet
Värmebehov	2.5	14	21	[MW]
Framledningstemperatur	94	100	109	[°C]
Tryckhöjning fram pumpstation	15	200	300	[kPa]
Tryckhöjning retur pumpstation	15	250	300	[kPa]
Differenstryck södra mätpunkt	180	210	170	[kPa]
Returtryck Tornby	500	500	500	[kPa]
Returtemperatur konsumenter	50	50	50	[°C]
Lokal production	0	0	2	[MW]

Tabell 7: Standard driftfall och dess driftparametrar från verkliga driftfall.

Efter analys och utvärdering av fjärrvärmenätets begränsningar baserat på standard driftfallen görs logiska gissningar på vilka inkopplingspunkter som kan vara lovande för integrering av lagret ur både upp- och urladdningsperspektiv. Genom iterativa tester och resulterande utvärderingar av olika inkopplingspunkter kan fler begränsningar upptäckas och vidare utöka vetskapen om nätets styrkor och svagheter. I figur (33) visas lagerplatserna för de främst undersökta inkopplingspunkterna i denna rapport.

Vid simuleringar med integrering av lagret används även dessa basinställningar som utgångspunkt. Vid urladdning av lagret undersöks lastfall på 21 och 25 MW för att undersöka hur nätet påverkas vid maximal belastning i nätet för tillfället samt i framtiden. Detta anses relevant eftersom det skulle ge resultat över hur lagret hjälper nätets prestanda vid de värsta förhållandena. För dessa lastfall används basinställningarna för standard driftfall 3. Vid uppladdning av lagret undersöks uppladdningslaster på 1 och 2 MW för lagret med en baslast i nätet för övriga konsumenter på 2.5 och 14 MW. Således blir den totala lasten i nätet baslasten plus uppladdningslasten av lagret för respektive fall. Vid baslast 2.5 MW används basinställningarna för standard driftfall 1, och vid baslast 14 MW används basinställningarna för standard driftfall 2.

I tabell (7) sätts returtrycket till ett konstant värde för alla driftfall. Eftersom returtrycket vid Tornby varierar marginellt runt 500 kPa för flera olika driftfall och flöden, anses det rimligt att ansätta den som konstant, se figur (20). Returtemperaturen från konsumenterna antas också vara konstant för alla driftfall då returtemperaturen i Tornby mäts vara strax under 50 °C relativt konstant, se figur (9) under avsnitt 4.3.



Figur 20: Returtrycket i förhållande till flödet i Tornby under hela december månad.

# 5 Resultat och analys

## 5.1 Prestanda för varierande massflöden

Här presenteras resultat av tester på variation av osäkra parametrar för att avgöra vilka värden som ger representativa resultat.



Figur 21: Olika massflöden i lagret och dess påverkan på uppvärmingen av sprickvärmelagret. Grundvattenströmmen har ett flöde på 0.2kg/s.

I figur (21) så framkommer det att vid för lågt massflöde i lagret så når inte lagrets temperatur 90 °C, vilket den gör vid ökat massflöde. urladdningstemperaturen blir lägre vid lågt massflöde jämfört med vid högt massflöde varav 20 kg/s och 30 kg/s har ungefär likvärdig prestanda.



Figur 22: Sprickvärmelagrets simulerade temperatur beroende av olika grundvattenströmmar. Uppladdningsflödet är 20kg/s.

Vid ökad grundvattenstöm framkommer det i figur (22) att sprickvärmelagret med högre grundström inte uppnår önskad temperatur, samt minskar den simulerade temperaturen snabbare jämfört med ett sprickvärmelager med lägre genomströmmande grundvatten.

## 5.2 Simulared temperaturspridning i berget



#### 5.2.1 Norra Ljungsbro vid 21 MW belastning

Figur 23: Driftfall vid 21 MW belastning och medeleffekten 1.22 MW

I figur (23) framkommer det att simulerad uppladdning av sprickvärmelager uppnår önskad temperatur inom ett år. Den simulerade temperaturen efter urladdning ökar från 55 °C upp till 62 °C efter 10 år.



(a) Simulerade temperaturen i det isolerande lagret efter uppladdning.

(b) Simulerade temperaturen i det isolerande lagret efter urladdning.

Figur 24: Simulerade temperaturen i det isolerande lagret med marktypen granit efter uppladdning och urladdning vid behovet 21 MW och medeleffekten 1.22 MW.

Figur (24) beskriver den simulerade temperaturen i varje nod i det isolerade lagret. Det visar även hur temperaturen längs denna sträcka ändras år efter år. Vid uppladdning framkommer det att högsta temperaturen är i noden närmast sprickvärmelagret, dvs 0.1 m bort, se figur (24a). Vid urladdning är istället den högsta simulerade temperaturen ca 4m bort, se figur (24b). Temperaturen i det isolerade lagret ökar med tiden och börjar konvergera mot en maximal temperaturspridning efter ca 10 år.



## 5.2.2 Norra Ljungsbro vid 25 MW belastning

Figur 25: Driftfall vid 25 MW belastning och medeleffekten 1.45 MW.

I figur (25) framkommer det att simulerad uppladdning av sprickvärmelager uppnår önskad temperatur inom ett år. Den simulerade temperaturen efter urladdning ökar från 51 °C upp till 58 °C efter 10 år.



(a) Simulerade temperaturen i det isolerande lagret efter uppladdning.

(b) Simulerade temperaturen i det isolerande lagret efter urladdning.

Figur 26: Simularing av temperaturen i det isolarande lagret med marktypen sandsten efter uppladdning och urladdning vid behovet 25 MW och medeleffekten 1.45 MW. Figur (26) beskriver den simulerade temperaturen i varje nod i det isolerade lagret. Vid uppladdning framkommer det att högsta temperaturen är i noden närmast sprickvärmelagret, dvs 0.1 m bort, se figur (26a). Vid urladdning är istället den högsta simulerade temperaturen ca 4m bort, se figur (26b). Även vid lastfallet på 25 MW konvergerar den maximala temperaturspridningen i det isolerade lagret efter ca 10 år.

## 5.3 Uppmätta temperaturer efter uppladdning

Här presenteras resultatet av varjes simulerade sluttemperatur årsvis efter urladdning. Urladdningen är simulerad utefter att lika en vanlig vintersäsong med ökat värmebehov.

Placering	Max effektbehov	År 1	År 2	År 3	År 4	År 5	År 6	År 7	År 8	År 9	År 10
Område 1	21 MW	57.3	59.8	60.8	61.3	61.7	62.0	62.2	62.4	62.5	62.6
Område 2	21 MW	55.4	59.4	60.9	61.6	62.1	62.5	62.7	62.9	63.1	63.2
Område 3	21 MW	54.8	58.5	59.7	60.4	60.8	61.2	61.4	61.6	61.8	61.9
Område 1	$25 \mathrm{MW}$	53.2	55.6	56.6	57.1	57.5	57.5	57.9	58.1	58.2	58.4
Område 2	25 MW	51.5	55.5	57.0	57.7	58.2	58.5	58.8	59.0	59.2	59.3
Område 3	25 MW	50.7	54.3	55.5	56.2	56.6	57.0	57.2	57.4	57.6	57.7

**Tabell 8:** Simulerade temperaturer [°C] årsvis efter urladdning.

Tabell (8) beskriver den simulerade temperaturen i sprickvärmelagret efter urladdning för varje område. Sluttemperaturen ökar ca 5-7 °C från första året till sista året i alla simuleringar.

## 5.4 Volym samt effektbehov.

Här presenteras beräkningen av de olika lagrens volym och höjd baserat på effektbehov.

Områden	Effektbehov [MW]	$ ho[kg/m^3]$	$C_p[J/kgK]$	$\Delta T[^{\circ}C]$	r [m]	h [m]
Område 1	1900	2600	790	40	20	66
Område 2	1900	2600	790	40	20	66
Område 3	1900	2650	730	40	20	70

Tabell 9: Data för olika sprickvärmelager baserat på behov och geologiska förutsättningar

Djupet på lagret är bestämt utefter vilket effektbehov som behövs. För kalksten och sandsten behövs ett djup på ca 66m varav granit behöver 70m för att kunna leverera minsta effektbehov.

#### 5.4.1 Norra Ljungsbro med ökad volym vid 25 MW belastning



Figur 27: Simulering av ett geovärmelager med temperaturgradienten 15 °C i norra ljungsbro.

Figur (27) visar en simulering av ett sprickvärmelager med ökad volym i norra Ljungsbro. Sprickvärmelagret når efter ca 5 år en temperatur på ca 88 °C. Efter urladdning har temperaturen sjunkit till ca 75 °C.

#### 5.4.2 Norra Ljungsbro med ökad massflöde in under vintern vid 25 MW belastning



Figur 28: Simulering av ett geovärmelager med ökad massflöde in under vintern. Massflödet har ökat från 2.12 kg/s till 10 kg/s.

Figur (28) visar en simulering med ökat massflöde in från 2.12 kg/s till 10 kg/s under vintern. Sprickvärmelagret är simulerat efter att vara i norra Ljungsbro med max effektbehov på 25 MW. Efter ca 3 år stabiliseras temperaturen på ca 65 °C efter urladdning.

## 5.5 Nätsimuleringar standard driftfall

I detta kapitel presenteras resultaten från fjärrvärmenätsimuleringarna i Netsim. Resultaten visar differenstryck, tryckförluster och framledningstemperaturer för tre olika standard driftfall i Ljungsbronätet. Det som är intressant att observera är hur tryckförlusterna och det motsvarande differenstrycket vid ca 12 000 m längs den undersökta ledningssträckan. Dessa höga tryckförluster uppstår främst efter knutpunkten upp i norra nätet, se figur (19).

#### 5.5.1 Standard driftfall 1

Det första standard driftfallet som undersöktes var då värmebehovet i Ljungsbro var ca 2.5 MW. Detta fall undersöktes för att få information om hur förutsättningarna i nätet ser ut då behovet är som lägst. I figur (29) ses differenstrycket och motsvarande tryckförluster längs ledningen i olika delar av nätet.



(a) Tornby till norra Ljungsbro.

(b) Tornby till södra Ljungsbro.

**Figur 29:** Differenstryck och tryckförluster längs ledningssträckan från Tornby till en mätpunkt i norra och södra Ljungsbro. Tryckhöjningen vid ca 8000 m är från pumpen i Berg. Effektöverföringen från Tornby och det totala behovet är 2.5 MW

Detta driftfall gav inte mycket information om begränsningar i systemet utöver indikationen på att högre tryckförluster uppkommer i norra ledningen efter knutpunkten. Värmeförlusterna längs ledningarna är relativt små och presenteras i bilagor, se bilaga (E.1).

#### 5.5.2 Standard driftfall 2

Nästa standard driftfall som undersöktes var då värmebehovet i Ljungsbro var ca 14 MW. Anledning till varför detta fall undersöktes var för det ansågs ge ett bra underlag för att lokalisera eventuella begränsningar i systemet eftersom det är ett övergångsområde för när lokal produktion normalt drar igång. I figur (30) ses differenstrycket och motsvarande tryckförluster i ledningarna från Tornby ut till en mätpunkt i norra respektive södra delen av Ljungsbronätet. Notera tryckförlusterna och fallet av differenstrycket i slutet norra nätet, se figur (30a).



(a) Tornby till norra Ljungsbro.

(b) Tornby till södra Ljungsbro.

**Figur 30:** Differenstryck och tryckförluster längs ledningssträckan från Tornby till en mätpunkt i norra respektive södra Ljungsbro. Effektöverföringen i huvudledningen från Tornby och det totala behovet är 14 MW. Tryckhöjningen vid ca 8000 m är från pumpen i Berg.

Genom att analysera dessa simuleringsresultat kan mycket information om ledningarnas befintliga begränsningar fastställas. Efter knutpunkten i norra nätet (vid ca 12 000 m) ses ett brant fall av differenstrycket i ledningarna vilket leder till att tryckbilden i norra nätet snabbt blir låg, nära 150 kPa, se figur (30a). Detta beror på att ett stort flöde från huvudledningen vid knutpunkten strömmar upp i det norra nätet där en stor del av konsumenterna befinner sig. I dagsläget vid normal lastfördelning går ca 57 % av flödet upp i norra nätet medan resterande går till det södra nätet. Tryckförlusterna längs ledningen från knutpunkten upp i norra nätet är stora och ca 150 kPa förloras på en ca 600 m lång ledningssträcka. Tryckförlusterna i södra delen av nätet är mindre eftersom lasten är lägre där och ledningarna är tillräckligt dimensionerade utefter rådande flöden.

Värmeförlusterna längs ledningen är små och försumbara och presenteras i bilagor, se bilaga (E.2).

#### 5.5.3 Standard driftfall 3

Sista fallet att undersöka var vid värmebehovet 21 MW som är toppbehovet i dagsläget. Vid 21 MW krävs bidragande lokal produktion eftersom huvudledningen maximalt kan överföra 19 MW. Det finns två produktionsanläggningar i Ljungsbro, en i norra respektive södra nätet. Därav undersöks två fall då lokal produktion sker vidd norra respektive södra produktionsanläggningen. I figur (31) ses differenstryck och tryckförluster med lokal produktion i norra nätet. I figur (32) ses differenstrycket och tryckförlusterna med lokal produktion i södra nätet.





(b) Tornby till södra Ljungsbro.

**Figur 31:** Differenstryck och tryckförluster längs ledningssträckan från Tornby till mätpunkten i norra respektive södra Ljungsbro. Effektöverföringen i huvudledningen från Tornby är 19 MW och det totala behovet är 21 MW. Lokal produktion sker i norra nätet. Tryckhöjningen vid ca 8000 m är från pumpen i Berg.



(a) Tornby till norra Ljungsbro.

(b) Tornby till södra Ljungsbro.

**Figur 32:** Differenstryck och tryckförluster längs ledningssträckan från Tornby till mätpunkten i norra respektive södra Ljungsbro. Effektöverföringen i huvudledningen från Tornby är 19 MW och det totala behovet är 21 MW. Lokal produktion sker i södra nätet. Tryckhöjningen vid ca 8000 m är från pumpen i Berg.

I figur (31) ses det att differenstrycket inte faller lika drastiskt i det norra nätet då lokal produktion även sker där. Fördelningen av huvudflödet till norra respektive södra nätet för detta fall blir ca 50/50 vilket avlastar ledningen efter knutpunkten som leder norrut. Södra nätet påverkas marginellt av det högre flödet som skapar aningen större tryckförluster.

Figur (32) visar samma sak fast vid lokal produktion i det södra nätet. Detta ger ett ökat flöde till norra nätet eftersom konsumenterna är helt beroende av flödet från huvudledningen. Andelen av huvudflödet som strömmar norrut blir i detta fall 67 % vilket genererar överbelastar ledningen med högre tryckförluster och ett differenstryck under 100 kPa i det norra nätet, se figur (32a).

#### 5.5.4 Utvärdering av standard driftfall

Baserat på dessa testfall då värmebehovet varierar, kan vissa prediktioner om optimala inkopplingspunkter för lagret göras. Det mest antydande problemet i fjärrvärmenätet är att flera ledningar är underdimensionerade för de flöden de utsätts för när värmebehovet är stort. Tryckförlusterna är stora och differenstrycket i stora delar av yttre norra nätet hamnar under 100 kPa. Den mest centrala flaskhalsen i systemet är lokaliserad i ledningen som löper mellan knutpunkten och norra nätet där ett stort flöde behöver strömma igenom om ingen lokal produktion sker i den norra delen.

Ur ett uppladdningsperspektiv är förutsättningar istället motsatta eftersom lagret då agerar som en konsument. Alltså blir det en högre last i den del av nätet lagret integreras i. Om lagret integreras i det norra nätet betyder det att ett högre flöde måste strömma upp genom flaskhalsen i den norra ledningen eftersom allt flöde kommer från Tornby vid uppladdning. Genom att integrera lagret tidigare vid knutpunkten hamnar den extra lasten istället i direkt anslutning till huvudledning där inga problem med tryckförluster uppmätts i tidigare tester. I figur (33) visas de inkopplingspunkter som presenteras och undersöks mer ingående i de nästkommande kapitlen. I resterande del av rapporten kommer namnen presenterade i figuren för respektive lager användas vid referering för inkopplingspunkt.



Figur 33: Grovt översiktlig bild över fjärrvärmenätet i Ljungsbro med undersökta inkopplingspunkter för lagret i grönt.

## 5.6 Test av integrerade lager

Efter utvärdering av standard driftfallen valdes några initiala inkopplingspunkter som bedömdes vara lämpliga. Genom dessa tester kunde ytterligare konsekvenser observeras för att utöka vetskapen och kartläggningen av nätets begränsningar. För dessa tester undersöktes två lastfall på 21 och 25 MW, vilket anses ge relevanta resultat för hur nätet påverkas vid maximal belastning i dagsläget samt inom en snar framtid. Vid dessa lastfall ansattes överföringskapaciteten i huvudledning från Tornby till sitt maximala, vilket är 19 MW. Således måste lagret leverera ca 2 och 6 MW vid respektive lastfall. Alla tester med lastfall vid 21 MW och över är baserade på basinställningarna från driftfall 3, urladdningstemperaturen från lagret är 85 °C för alla tester.

#### 5.6.1 Testlager

Den första inkopplingspunkten för lagret valdes högt upp i norra nätet (Testlager), se figur (33). Nedan i figur (34) ses differenstryck i norra och södra nätet för två lastfall. I figur (34a) ökar differenstrycket kraftigt och överstiger 900 kPa i slutet av norra nätet vid lastfallet på 25 MW. I figur (34b) upprätthålls differenstrycket över 200 kPa i slutet av södra nätet.



(a) Tornby till norra Ljungsbro.

(b) Tornby till södra Ljungsbro.

**Figur 34:** Differenstryck längs ledningssträckan från Tornby till mätpunkten i norra respektive södra Ljungsbro. Effektöverföringen i huvudledningen från Tornby är 19 MW. Lagret levererar 2 och 6 MW för respektive lastfall. Tryckhöjningen vid ca 8000 m är från pumpen i Berg.



(a) Knutpunkt till Cloetta.

(b) Knutpunkt till Cloetta.

Figur 35: Differenstryck och framledningstemperatur längs ledningssträckan från knutpunkten till Cloetta. Effektöverföringen i huvudledningen från Tornby är 19 MW. Lagret levererar 2 och 6 MW för respektive lastfall.

I figur (35) ses differenstrycket och framledningstemperaturen i en mer högupplöst lokal sträcka i det norra nätet. Framledningstemperaturen ändras skarpt vid 600 - 800 m upp i norra nätet beroende på lastfall. Det beror på att huvudflödet från knutpunkten och flödet från lagret möts och blandas med varandra högre eller längre ner i nätet beroende på hur många konsumenter lagret kan tillförse på egen hand. Beroende på storleken av respektive flöde ändras temperaturen mer eller mindre mot temperaturen av det dominerande flödet.

#### 5.6.2 Test Lager knutpunkt

Den andra inkopplingspunkten för lagret som undersöktes djupare var Lager knutpunkt, se figur (33). Denna punkt valdes för att den initialt verkade lämplig i uppladdningssyfte. Men också för att temperaturavvikelsen i framledningen förmodades bli mindre eftersom flödet ut från lagret blandas med ett mycket större flöde direkt från huvudledningen. Däremot var flaskhalsen forfarande ett stort problem som även blir värre då flödet ökar ytterligare. Detta specifika fall undersöktes därför främst i syfte av att hitta möjliga åtgärder för flaskhalsen. I figur (36) ses differenstrycket från Tornby och i figur (37) ses differenstryck och framledningstemperaturen till Cloetta.



(a) Tornby till norra Ljungsbro.

(b) Tornby till södra Ljungsbro.

**Figur 36:** Differenstryck längs ledningssträckan från Tornby till mätpunkten i norra respektive södra Ljungsbro. Effektöverföringen i huvudledningen från Tornby är 19 MW. Lagret levererar 2 och 6 MW för respektive lastfall. Tryckhöjningen vid ca 8000 m är från pumpen i Berg.



(a) Knutpunkt till Cloetta.

(b) Knutpunkt till Cloetta.

Figur 37: Differenstryck och framledningstemperatur längs ledningssträckan från knutpunkten till Cloetta. Effektöverföringen i huvudledningen från Tornby är 19 MW. Lagret levererar 2 och 6 MW för respektive lastfall.

#### 5.6.3 Utvärdering av test av integrerade lager

Problemet som uppstod för Testlager i norra nätet var att tryckhöjningen i norra delen av nätet blir för hög då flera konsumenter får ett differenstryck upp mot 1000 kPa när lasten är 25 MW, se figur (34a). Eftersom lagret i detta fall inte kopplats in i nära anslutning till en större konsument eller större ledning blir differenstrycket som krävs för att ladda ur höga flöden för stort för ledningen och således hos en stor del av konsumenterna i norra nätet. Utifrån denna undersökning kunde det konstateras att lagret bör kopplas in mot en större ledning i närmare anslutning till stora konsumenter som kan "sluka" upp en stor del av flödet från lagret och därmed jämna ut trycket i ledningen.

Med Lager knutpunkt sjunker inte framledningstemperaturen lika mycket vilket motiverar fördelen med att integrera lagret tidigare i nätet. Tryckförlusterna i flaskhalsen blir dock högre, speciellt vid 25 MW vilket motiverade idén om att flaskhalsen måste åtgärdas genom en uppgradering av ledningarna efter knutpunkten. Genom att rekonstruera den underdimensionerade ledningen från knutpunkten och ca 600 m upp skulle högre flöden kunna skickas upp i norra nätet utan att större tryckförluster medförs. I figur (38) illustreras var denna uppgradering av ledningar skulle genomföras.



Figur 38: Grovt översiktlig bild över fjärrvärmenätet i Ljungsbro med valda inkopplingspunkter för lagret. Den gröna linjen illustrerar platsen för flaskhalsen och där uppgradering av ledningarna skulle behövas.

## 5.7 Nätsimuleringar urladdning

Baserat på utvärdering av testerna med integrerade lager, presenteras i detta kapitel resultatet vid urladdning för två utvalda inkopplingspunkter av lagret. Urladdningstemperaturen från lagret ut i fjärrvärmenätet är 85 °C för alla tester.

## 5.7.1 Lager Cloetta

Här presenteras resultaten för två lastfall med Lager Cloetta. Inga ändringar i ledningsnätet har gjorts för detta resultat då det inte behövs vid urladdning. En uppgradering av ledningarna skulle däremot minska tryckfallet ytterligare i norra nätet. Simuleringen är baserad på standard driftfall 3 för båda lastfall vid 21 och 25 MW. Notera hur differenstrycket håller sig över 150 kPa i slutet av både norra och södra nätet, se figur (39).



(a) Tornby till norra Ljungsbro.

(b) Tornby till södra Ljungsbro.

Figur 39: Differenstryck längs ledningssträckan från Tornby till mätpunkten i norra respektive södra Ljungsbro. Effektöverföringen i huvudledningen från Tornby är 19 MW. Lagret levererar 2 och 6 MW för respektive lastfall. Tryckhöjningen vid ca 8000 m är från pumpen i Berg.



(a) Knutpunkt till Cloetta.

(b) Knutpunkt till Cloetta.

**Figur 40:** Differenstryck och framledningstemperatur längs ledningssträckan från knutpunkten till Cloetta. Effektöverföringen i huvudledningen från Tornby är 19 MW. Lagret levererar 2 och 6 MW för respektive lastfall.

I figur (40a) ses differenstrycket i en mer detaljerad skala för de olika lastfallen. Figur (40b) visar hur framledningstemperaturen ändras till följd av lagrets inverkan. Beroende på vilken värmeeffekt lagret producerar ändras framledningstemperaturen mer eller mindre.

#### 5.7.2 Lager knutpunkt med uppgraderade ledningar

Här presenteras resultaten för olika lastfall med Lager knutpunkt för norra och södra nätet. Simuleringen är baserad på standard driftfall 3 för båda lastfall vid 21 och 25 MW. Notera att differenstrycket håller sig över 150 kPa i slutet av både norra och södra nätet, se figur (41). Ledningarna har uppgraderats från 150 mm till 250 mm i diameter.



(a) Tornby till norra Ljungsbro.

(b) Tornby till södra Ljungsbro.

Figur 41: Differenstryck längs ledningssträckan från Tornby till mätpunkten i norra respektive södra Ljungsbro. Effektöverföringen i huvudledningen från Tornby är 19 MW. Lagret levererar 2 och 6 MW för respektive lastfall. Tryckhöjningen vid ca 8000 m är från pumpen i Berg.



(a) Knutpunkt till Cloetta.

(b) Knutpunkt till Cloetta.

Figur 42: Differenstryck och framledningstemperatur längs ledningssträckan från knutpunkten till Cloetta. Effektöverföringen i huvudledningen från Tornby är 19 MW. Lagret levererar 2 och 6 MW för respektive lastfall.

I figur (42a) ses differenstrycket i en mer detaljerad skala för de olika lastfallen. Figur (42b) visar hur framledningstemperaturen ändras till följd av lagrets inverkan för samma ledningssträcka.

#### 5.7.3 Utvärdering nätsimuleringar urladdning

Integrering av Lager Cloetta med befintligt ledningsnät medför att tryckbilden genom hela nätet är jämn och inom intervallet av 150 - 600 kPa i de områden det finns konsumenter, se figur (39). Differenstrycket i Tornby är ca 800 kPa för båda lastfall vilket medför att det maximala konstruktionstrycket i framledningen inte överskrids då returtrycket är 500 kPa. Framledningstemperaturen till Cloetta sjunker till ca 80 - 90 °C beroende på lastfall, se figur (40b). Hur tidigt flödena möts beror också på lastfall.

Integrering av Lager knutpunkt ger också en tryckbild inom intervallet 150 - 600 kPa för de flesta konsumenter, förutsatt att en uppgradering av ledningarna i norra nätet är gjord, se figur (41). Däremot ger tryckhöjningen vid pumpstationen i Berg ett differenstryck på nästan 800 kPa vid lasten 25 MW vilket kan påverka de närmaste konsumenterna i Berg. Differenstrycket vid Tornby ökar också med lasten men överskrider ändå inte det maximala konstruktionstrycket i ledningen. Avvikelsen i framledningstemperaturen efter Lager knutpunkt blir mindre då flödet från lagret blandas med det stora flödet i huvudledningen.

## 5.8 Nätsimuleringar uppladdning

I detta kapitel presenteras uppladdningsprocesser av lagret för samma inkopplingspunkter likt avsnitt 5.7. Här jämförs hur differenstrycket påverkas i norra nätet med och utan uppgraderade ledningar. Ledningarna har uppgraderats från 150 mm till 250 mm i diameter. Endast resultat från det norra nätet presentereras då södra nätet inte är lika drabbat av stora tryckförluster, speciellt vid lägre lastfall. Uppladdningseffekten till lagret för alla lastfall är 1 och 2 MW. Framledningstemperaturen till lagret är 94 °C vid lastfallet på 2.5 MW, och 100 °C vid lastfallet på 14 MW.

## 5.8.1 Lager Cloetta med och utan uppgraderade ledningar

För baslasten 2.5 MW ses det att en uppgradering av ledningarna medför att differenstrycket kan hållas över 150 kPa i slutet av nätet, se figur (43). Vid baslastfallet på 14 MW krävs det att ledningarna uppgraderas för att upprätthålla ett differenstryck över 150 kPa i slutet av nätet, se figur (44).





(a) Tornby till norra Ljungsbro med befintligt ledningsnät.

(b) Tornby till norra Ljungsbro med uppgraderade ledningar.

Figur 43: Differenstryck i norra nätet med och utan uppgraderade ledningar. Lasten i nätet är 2.5 MW plus den effekt som lagret laddas upp med, vilket är 1 respektive 2 MW.



Tornby - Norra Ljungsbro

(a) Tornby till norra Ljungsbro med befintligt ledningsnät.



Figur 44: Differenstryck i norra nätet med och utan uppgraderade ledningar. Lasten i nätet är 14 MW plus den effekt som lagret laddas upp med, vilket är 1 respektive 2 MW.

#### 5.8.2 Lager knutpunkt med och utan uppgraderade ledningar

effekt som lagret laddas upp med. Lagret laddas upp med 1 respektive 2 MW.

För baslasten 2.5 MW kan ett differenstryck över 150 kPa upprätthållas utan en uppgradering av ledningar, se figur (45). Vid baslast 14 MW krävs heller ingen uppgradering av ledningarna för att upprätthålla 150 kPa. Däremot hjälper det för att hålla högre marginal mot lägsta godkända differenstryck, se figur (46).



(a) Tornby till norra Ljungsbro med befintligt ledningsnät.(b) Tornby till norra Ljungsbro med uppgraderade ledningar.Figur 45: Differenstryck i norra nätet med och utan uppgraderade ledningar. Lasten i nätet är 2.5 MW plus den



(a) Tornby till norra Ljungsbro med befintligt ledningsnät.



Figur 46: Differenstryck i norra nätet med och utan uppgraderade ledningar. Lasten i nätet är 14 MW plus den effekt som lagret laddas upp med. Lagret laddas upp med 1 respektive 2 MW.

## 5.8.3 Utvärdering nätsimuleringar uppladdning

Lager Cloetta medför att en uppgradering av ledningarna krävs för att upprätthålla ett differenstryck över 150 kPa i slutet av nätet för båda uppladdningseffekter. Genom att uppgradera ledningarna i norra nätet kan tryckbilden hållas inom intervallet av 150 - 600 kPa genom hela nätet där konsumenter finns.

Lager knutpunkten ger en stabil tryckbild under uppladdning vid det lägsta lastfallet, se figur (45). Vid det högre lastfallet medför uppladdning av lagret att tryckförlusterna i den norra ledningen blir stora utan uppgraderade ledningar. Däremot håller sig trycket över 150 kPa i slutet av nätet. Uppgraderade ledningar medför dock att marginalen mot lägsta differenstryck blir större för det högre lastfallet på 14 MW, se figur (46).

# 6 Diskussion

I detta kapitel diskuteras resultat och använd metod för de huvudområden arbetet har berört.

## 6.1 Geografisk placering

Utifrån den översiktliga geologiska analys som gjorts i närområdet av Ljungsbro finns det flera för- och nackdelar som påverkar valet av placeringsområde. Rent geotekniskt bör östra Ljungsbro vara mest lämplig i avseende på termiska egenskaper då värmekonduktiviteten är högst där baserat på teoretiska approximationer, se avsnitt 4.4. Om grundvattenförhållandena är stabila och inga större grundvattendrag förekommer skulle detta område långsiktigt vara mest fördelaktigt prestandamässigt för lagret, se tabell (8). Variationerna är dock små mellan de olika områdena och utgör ingen betydelsefull inverkan om beslutet av vilket område som är mest lämpligt i verkligheten. För att bestämma den mest lämpliga platsen måste riktiga fältstudier utföras för att ta reda på de termiska egenskaper och grundvattenförhållanden som råder lokalt på varje plats.

En annan aspekt är konstruktionsmöjligheterna för lagret i varje område. I sydvästra och östra Ljungsbro är berggrunden mer porös och vattenmättad vilket kan vara en för- eller nackdel beroende på de lokala grundvattenförhållandena. Om grundvattnet är relativt stillastående kan det vara av en fördel av att placera lagret där då skapandet av sprickplan i berggrund inte nödvändigtvis krävs för att erhålla en god kontaktyta mellan grundvatten och bergsmassa. Däremot finns risken att tekniken bakom sprickvärmelager inte går att applicera pågrund av att lagret inte blir slutet på samma vis som i en kristallin berggrund. Det vill säga att beteendet av grundvattencirkulationen i lagret kan vara mer oförutsägbar och okontrollerbar.

Att placera lagret i norra Ljungsbro med en kristallin berggrund skulle vara ett säkrare val om övriga förhållanden visar sig vara goda där. Eftersom pilotlagret i Vallastaden anlagts i en kristallin berggrund lik den som finns i Ljungsbro, finns det en större informationskälla att använda för att göra prediktioner om prestandan av lagret i en berggrund främst bestående av granit. Norra Ljungsbro skulle därför vara det mest säkra placeringsvalet om testerna från pilotanläggningen skulle visa sig vara önskvärda.

# 6.2 Beräkningsverktyg

## 6.2.1 Metod och verifiering av värmelagermodell

Värmelagermodellens simplicitet medför att realismen för den resulterade temperaturspridningen i berggrunden är svår att definiera. På grund av den omfattande sprickplansbildningen som uppkommer i det verkliga värmelagret bör uppvärmningen av lagret vara väldigt snabb, effektiv och förhållandevis jämn jämfört med andra tekniker. I kombination med en komplex och oförutsägbar struktur av sprickor och större sprickplan gjordes antagandet att uppvärmning och nedkylning av lagret sker homogent. Detta antagande medför således en mycket mer optimistisk förväntan av slutresultatet för värmelagret prestanda. Eftersom konvektion mellan fluid och berggrund även bör vara en väsentlig process för effektiviteten och värmeöverföringen i ett sprickvärmelager finns mycket förbättringspotential för att utveckla en mer sofistikerad modell i ett 3D simuleringsprogram där mer omfattande och detaljerad fysik kan implementeras. En sådan utvecklingsmetod bör utnyttjas om en specifik prestanda av värmelagret önskas undersökas för att bestämma exakta dimensioner och driftförhållanden. Detta kräver dock mer underlag i form av praktiska testresultat för att kunna verifiera och utforma modellen efter verklig data. För ett teoretiskt ändamål där indikationer om prestandan för olika förhållanden endast önskas, anses dock modellen i detta arbete utgöra ett tillräckligt bra jobb. Däremot finns det inte tillräckligt med underlag som kan styrka detta fullt ut förutom preliminära utkast av den termiska prestandan där liknande kvantiteter och mönster kan observeras. Då de gelogiska förutsättningarna kan variera väldigt mycket i de olika områden kan det även innebära att vidarutvecklingen av värmelagermodellen inte nödvändigtvis kommer vara gynnsamt.

För beräkningarna av den resulterande temperaturspridningen i berggrunden runt om lagret användes även en simplifierad lösningsmetod i form av finita differens metoden för endimensionell värmeledning. Noggrannheten och realismen av denna numeriska metod beror på valet av lösningsmetod och tillhörande diskretisering av problemet. I detta arbete valdes den explicita lösningsmetoden vilket i allmänhet medför en mer direkt och naturlig beräkningsprocess. Den explicita metoden är dock endast stabil under specifika förhållanden mellan tidssteg och steglängder enligt ekvation (13). Genom modellverifieringen undersöktes stabilitet och precision av beräkningarna vid variation av tidssteg, steglängd och tjocklek på det isolerande lagret. Modellverifieringen visade att resultaten inte ändras avsevärt efter en viss upplösningsnivå av steglängd och tidssteg. Standardavvikelsen av resultaten mellan en steglängd på 0.1 och 1 m är mindre än 1 % vilket innebär att finare diskretisering än 0.1 m inte tillför ytterligare precision, se figur (17). Standardavvikelsen mellan tidssteg på 30 och 60 s är nästan obefintlig vilket också medför att finare tidssteg än 60 s inte tillför någon ytterligare precision, se figur (18).

#### 6.2.2 Resultat massflöden

Vid utveckling av beräkningsverktyget så krävs det en del antaganden för osäkra parametrar för att det ska fungera. Dessa parametrar tillsammans med oförutsägbara geologiska förutsättningar bidrar med en större osäkerhet i beräkningsverktygets prestanda och resultat. För att kunna bedöma rimligheten i de antagna parametrar används en känslighetssanalys genom att testa varje specifik parameter för att se hur resultatet ändrar sig vid variation.

En parameter som som har större betydelse i när lagret kan sättas i drift är vilket massflöde som önskas. Då lagret anses värmas upp homogent så beräknas den lagrade energin genom att subtrahera energiöverföringen till det isolerande lagret samt förlusterna till genomströmmande grundvatten från den ingående energin genom som beräknas genom ekv (2), den kvarstående energi är det som sprickvärmelagret tar upp. Massflödet i figur (21) hänvisar till det flödet som går in i lagret. Vid för lågt massflöde så kommer inte sprickvärmelagret upp i den önskade temperaturen på 90 °C. Detta medför att ett högre massflöde kan behövas varav simuleringar med 20-30 kg/s genomförts. Resultatet visar att önskad temperatur uppnås under första året varav de resterande åren uppnås det snabbare. Då urladdningstemperaturen ej skiljer sig så mycket vid fallet 20 kg/s och 30 kg/s så anses det ej behövas ett högre massflöde än 20kg/s.

Förutsättningarna att ett geovärmelager ska fungera grundas väldigt mycket i att rätt geologiska förutsättningar måste uppfyllas, en av dessa är att det ej ska vara för mycket genomströmmande vatten i lagret. Ifall flödet är för högt riskerar lagret att inte komma upp i temperatur eller rentav ha för stora förluster för att anses användbart. Resultatet av olika test med olika grundvattenströmmar presenteras i figur (22). Det framkommer att vid ett högre massflöde än 1 kg/s så kommer inte sprickvärmelagret att uppnå önskad temperatur under dess förutsättningar. Då beräkningsverktyget enbart fungerar teoretiskt används det lägsta massflödet i resterande resultat. För att resultatet skulle ligga så nära verkligheten som möjligt behövs det istället ske platsprov med borrning för att avgöra om massflödet är för högt, då detta ej är aktuellt så har flödet istället blivit antaget att vara det lägsta.

#### 6.2.3 Resultat sprickvärmelager

Resultatet från alla simuleringar av sprickvärmelagren visar att det inte skiljer sig mycket emellan. Då skillnaden mellan de olika sprickvärmelagren ej var stor finns resterande resultat i bilagor varav enbart figurerna för norra Ljungsbro finns i resultatkapitlet. Resultatet i figurerna (23) och (25) visar att efter temperaturen i det isolerande lagret värms upp stegvis under varje år som lagret är i drift. Detta indikerar att vid ökad tid kommer lagret att bli mer stabilt och en högre uttemperatur kommer att fås. Vid urladdning kommer en del av den värmenergi som förts över till det isolerande lagret hjälpa till att upprätthåla en stabil uttemperatur genom att strömma tillbaka till huvudlagret. Ett exempel på detta ses i figur (24b) där

temperaturen är varmare ca 5 m bort i det isolerande lagret.

I tabell (8) framkommer det att temperaturerna skiljer sig minimalt efter 10 år. Bäst prestanda fås i område 2 dvs vid placering i östra Ljungsbro med marktypen sandsten, varav sämst prestanda förekommer i område 3, norr om ljungsbro där det är granit. Dock kan detta försummas då temperaturdifferensen är minimal och inte har någon större påverkan på sprickvärmelagrets prestanda. Samma trend förekommer såväl när max effektbehov är 25 MW som 21 MW. Vid ökad max effektbehov minskar sprickvärmelagrets temperatur med ca 4 °C jämfört med fallet vid 21 MW. Generellt för alla simuleringar sker det en temperaturökning efter urladdning på totalt ca 7 °C under perioden på 10 år.

## 6.2.4 Ökad volym och massflöde under vintern.

En genomgående trend i alla simuleringar är att sprickvärmelagrets temperatur sjunker för snabbt. Med en minskande temperatur ökar massflödet för att behålla samma ut-effekt vilket leder till fler problem i systemet. Två möjliga lösningar på detta är att öka lagrets kapacitet samt att öka den uppladdningen som finns under vintersäsongen.

Genom att minska temperaturdifferensen som lagret får arbeta emellan samt bibehålla samma effektbehov i ekvation (2) ökar volymen som sprickvärmelagret beräknas behöva. Då volymen ökar innebär det att lagringskapaciteten också ökar vilket leder till att det tar längre tid att ladda upp lagret till önskad temperatur, förutsatt att det är med samma volymflöde, se figur (27). Detta resulterar i att det tar ca 3-4 år för lagret att uppnå en önskad temperatur. Totalt sker det vid urladdning en temperatur ökning på 12 °C under 10 års tid. Långsiktigt innebär temperaturökningen till att i sprickvärmelagret kan leverera en temperatur på 88-75 °C vilket är mer acceptabelt i fjärrvärmenätet. Något som är oförutsägbart är dock den outforskade grundvattenströmmen. Vid ökad volym innebär det att det kan dyka upp mer geologiska förhinder som bör tas i beaktning vid placering av sprickvärmelager.

Den andra lösningen är att utöka möjligheten för att ladda lagret mer under vintern. Beräkningarna på sprickvärmelagren använder ett inflöde på 2.12 kg/s under vinterhalvåret. Denna variabel kommer ifrån data på aktuellt överskott i systemet som finns, dock finns det möjlighet att tillföra mer i systemet än vad datan visar. Vid en ökning från 2.12 kg/s till 10 kg/s ökar det slutgiltiga temperaturen från 57.7 till ca 65 °C efter urladdning. samtidigt som temperaturerna blivit bättre är de dock fortfarande för låga för vad som anses gynnsamt. Ifall det ska ske ytterligare en ökning kan detta innebära att fjärrvärmenätet blir för belastat eller att det ej är lönsamt att tillföra mer i systemet. Detta indikerar att enbart ett ökat massflöde inte är tillräckligt utan sprickvärmelagrets volym bör också ökas parallellt.

## 6.3 Nätsimuleringar

## 6.3.1 Resultat nätsimuleringar upp- och urladdning

Resultaten från nätsimuleringarna tyder på att den norra ledningen efter knutpunkten är ett stort problem oavsett vart lagret placeras i antingen upp- eller urladdningssyfte. Problemet förstärks vid högre lastfall vilket sannolikt även kommer öka i framtiden då behovet kommer bli ännu större.

I dagsläget går det att överse detta problem genom att placera lagret i nära anslutning till Cloetta i det norra nätet. Urladdning från lagret vid denna inkopplingspunkt är inga problem och hjälper tryckbilden i nätet då en mindre andel av huvudflödet behöver fördelas till det norra nätet, se figur (39). Uppladdning ger däremot problem, speciellt vid högre lastfall då ett stort flöde måste passera genom den norra ledningen för att ladda upp lagret och tillförse resten av konsumenterna med deras behov, se figur (44a). Vid lägre lastfall är det däremot möjligt det att ladda upp lagret med en lägre uppladdningseffekt utan att differenstrycket blir för lågt, se figur (43a). Troligtvis går det också att ladda upp lagret vid lastfall över 2.5 MW om pumpen i Berg justeras upp. Eftersom önskan är att kunna ladda upp lagret även då lastfallet är stort i Ljungsbro (över 14 MW) är denna inkopplingspunkt inte applicerbar under rådande omständigheter eftersom differenstrycket i det norra nätet blir för lågt vid uppladdning av lagret.

Genom att omdimensionera och uppgradera de mest drabbade ledningar i norra nätet minskar tryckförlusterna och fallet av differenstryck i det norra nätet avsevärt. Detta medför att uppladdning av Lager Cloetta fungerar bättre, speciellt vid högre lastfall i nätet, se figur (44b). En uppgradering av ledningarna öppnar också upp möjligheterna av att koppla in lagret på fler ställen vilket möjliggör integreringen av lagret tidigare i nätet i anslutning till huvudledingen. Fördelen med att ansluta lagret vid knutpunkten är att framledningstemperaturen inte blir lika påverkad vid urladdning eftersom flödet från lagret blandas med ett väldigt stort flöde från huvudledningen, jämför figur (42b) och (40b). En annan fördel är att den extra lasten vid uppladdning hamnar i huvudledningen och inte i norra eller södra nätet där ledningarna är trängre och mer benägna att medföra stora tryckförluster.

Vid urladdning under höga lastfall med Lager knutpunkt håller sig differenstrycket över 150 kPa i hela nätet, se figur (41). Vid lastfallet 25 MW blir däremot differenstrycket lite högt precis efter pumpstationen i Berg vilket kan medföra problem för ett antal konsumenter i Berg. Resultaten för driftfallen vid 25 MW kan däremot vara lite missvisande eftersom de är baserade på inställningar för ett lastfall på 21 MW vilket är det högsta uppmätta verkliga lastfallet. Pumpen i Berg arbetar nära sitt max vid dessa driftfall för att differenstrycket och således framledningstrycket vid Tornby inte ska hamna för nära det maximala konstruktionstrycket på 1600 kPa.

Flera tester av inkopplingspunkter som inte presenterats i rapporten har även gjorts. Dessa resultat valdes att inte presentera i rapporten då de inte gav upphov till några förbättringar i nätet eller ytterligare vital kunskap om nätets begränsningar. Inkopplingspunkter som testades var i södra nätet och även tidigare i huvudledning innan knutpunkten.

## 6.3.2 Metod och antaganden för nätsimuleringar

Den övergripande använda metodiken för att hitta lämpliga inkopplingspunkter för lagret anses vara tillämpbar och relevant för detta arbete baserat på erhållna resultat. Genom att undersöka flera olika verkliga driftfall tillgavs tydlig information om vilka de mest kritiska begränsningarna i nätet var. Därifrån kunde flera motiverade prediktioner om lämpliga inkopplingspunkter göras för att erhålla ytterligare information och betrakta mönster som uppstår mellan olika driftfall. Valet av undersökta driftfall ansågs ge en god bild över det generella beteendet av nätet vid kritiska laster. Det fall som undersöktes mest omfattande var vid höga lastfall vilket ansågs vara mest betydelsefullt och användbart för att observera nätets prestanda vid de värsta förhållandena. Vid lastfall på 25 MW med integrerade lager kunde driftparametrarna för simuleringarna inte helt baseras på verklig data eftersom det är en framtida approximation. Ett antagande utifrån detta är även att den tillkommande lasten har fördelats jämnt över hela Ljungsbro vilket inte är ett helt säkert utfall. Beroende på vart majoriteten av lasten skulle hamna i Ljungsbronätet skulle tryckbilden kunna se annorlunda ut. Däremot bedömdes det vara mest rättvist att fördela lasten jämnt över hela nätet vid undersökning av detta lastfall.

Eftersom både det statiska trycket och returtemperaturen i Tornby antagits till konstanta värden för alla driftfall erhålls en viss felmarginal i resultaten. Däremot är intervallet som dessa varierar mellan så litet så det anses inte ge en betydlig inverkan på resultaten även om det är värt att känna till.

Vid nätsimuleringarna för uppladdning är driftfallen uppbyggda på data för standard driftfallen vid 2.5 och 14 MW. När lagren integreras och laddas upp med 1 respektive 2 MW används samma basinställningar även fast lasten då blir 1 och 2 MW större än standard driftfallet som utgicks ifrån. Detta kan medföra en viss felmarginal i resultaten för uppladdning. Idealt skulle nya driftparametrar för varje lastfall med integrerat lager användas för att erhålla mer säkerhet i resultaten för uppladdning.

## 6.3.3 Ytterligare framtida undersökningsområden

Vid alla driftfall för urladdning undersöktes endast en urladdningstemperatur från lagret, 85 °C. Denna temperatur valdes för att det ansågs vara en rimlig temperatur att leverera till äldre fjärrvärmecentraler som har en lägre effektivitet än moderna fjärrvärmecentraler. Däremot skulle urladdningstemperaturer på 80 eller 75 °C även vara värt att undersöka. Fördelen med att ladda ur en lägre temperatur från lagret är att kapaciteten i lagret skulle räcka längre och inte sjunka i temperatur lika snabbt. Däremot skulle det motsvarande flödet ut i fjärrvärmenätet behöva vara större för att leverera samma effekt. Utifrån resultaten för nätsimuleringarna framgick det att höga flöden är den betydande faktorn som skapar höga tryckförluster i systemet och därav för låga differenstryck i stora delar av nätet. Att höja flödet ytterligare skulle förvärra problemen och troligtvis leda till att fler ledningar skulle behöva omdimensioneras för att tryckbilden i nätet ska vara acceptabel. Däremot skulle det inte skada att undersöka driftfall med lägre urladdning i figur (39b) och (41b) kan det tydas att tryckförlusterna är relativt stora i det södra nätet också. Problemet har dock inte varit lika omfattande i undersökningen av detta arbete då differenstrycket aldrig understigit 150 kPa. I framtiden då värmebehovet är större i Ljungsbro och om en eventuell majoritet av lasten hamnar i det södra nätet, kommer däremot en uppgradering av södra ledningsnätet även behöva ses över.

För uppladdning hade det varit givande att undersöka uppladdningseffekter till lagret över 2 MW för lägre lastfall i nätet då det finns god marginal mot maximala kapaciteten i huvudledningen från Tornby, vilket är 19 MW. Det är teoretiskt möjligt att högre uppladdningseffekter till lagret kan tillföras om den totala lasten i nätet inte är för hög. Detta kräver också att ledningarna till lagret är tillräckliga för att leverera så höga flöden eftersom lasten blir mer koncentrerad. Även vid det högre lastfallet på 14 MW hade det varit värt att undersöka högre uppladdningseffekter givet en uppgradering av ledningar i norra nätet.

# 7 Slutsats

# 7.1 Beräkningsverktyg

Vid uppvärming av det simulerade sprickvärmelagret krävs ett massflöde till lagret motsvarande ca 20 kg/s för att sprickvärmelagret ska nå önskad temperatur under en säsong. Är flödet för lågt kan detta innebära att sprickvärmelagret inte hinner bli brukbart samt att uttemperaturerna är för låga när behovet uppstår. Är flödet för högt kan det innebära att det blir för stor belastning på lagret samt att det blir för högt differenstryck i fjärrvärmenätet

Urladdningen av systemet simulerades genom att beräkna en medeleffekt ut ur lagret motsvarande den lokala produktionen som finns i Ljungsbro under en vintersäsong. Förutsatt att den medeleffekten ska vara konstant så får det resultatet att temperaturen sjunker snabbt samt att massflödet som krävs ökar till den gräns som anses obrukbart. Detta är en konsekvens av de ursprungliga beräkningarna för lagrets energikapacitet som ej togs i beaktning. En lösning på detta är att öka sprickvärmelagrets erforderliga volym genom att minska temperaturdifferensen till 15 °C. Resultatet av detta ger en urladdningstemperatur som håller sig inom intervallet 75-88 °C vilket är godkänt i fjärrvärmenätet i Ljungsbro. Detta kan även förbättras vidare om mellanuppladdningen under vintern ökar.

Projektet ämnade att undersöka tre olika områden med olika geologiska förutsättningar i form av diffusivitet. Efter undersökning och simulering i beräkningsverktyget så kan det konstateras att skillnaden i bergets egenskaper skiljer sig lite men inte tillräckligt för att kunna utse en specifik plats som är mer lämplig för placering av ett sprickvärmelager, utan det beror på andra aspekter i fjärrvärmenätet.

## 7.2 Inkopplingspunkt i fjärrvärmenätet

Utifrån undersökande tester baserat på verkliga driftfall kunde det konstateras att en betydelsefull ledningssträcka i norra nätet begränsade storleken på flödet som kan strömma dit utan stora tryckförluster. Ur både upp- och urladdningsperspektiv visade sig denna ledningssträcka vara ett problem oavsett vart lagret placerades i nätet, speciellt vid högre lastfall. Redan vid ett lastfall på 14 MW och en temperaturgradient på 50 °C uppstod stora tryckförluster vilket medförde låga differenstryck, främst i norra delen av nätet som konsekvent var det mest drabbade området pågrund av detta. De två mest lovande och undersökta inkopplingspunkterna för lagret var nära Cloetta i norra nätet och vid knutpunkten i huvudledningen, se figur (38).

Integrering av lagret vid Cloetta, visade sig medföra en betydelsefull förbättring av fjärrvärmenätets tryckbild vid urladdning under höga lastfall. För urladdning med denna inkopplingspunkt krävs ingen uppgradering av ledningsnätet, men tryckförlusterna skulle minska ytterligare om en uppgradering gjordes. För uppladdning av lagret krävs däremot uppgraderade ledningar i norra nätet för att ett differenstryck över 150 kPa ska upprätthållas för både låga och medelhöga lastfall i nätet. Både för uppladdningseffekter till lagret på 1 och 2 MW med en temperaturgradient mellan 44-50 °C.

Integrering av lagret vid knutpunkten var också en lovande inkopplingspunkt, förutsatt att en uppgradering av ledningarna i norra nätet görs. Däremot är differenstrycket genom nätet inte lika stabilt vid urladdning då tryckförlusterna och det erforderliga differenstrycket från Tornby är större vid det högsta undersökta lastfallet på 25 MW vilket kan påverka vissa konsumenter. Uppladdning av lagret i denna inkopplingspunkt ger dock bra förutsättningar för upprätthållandet av ett tillräckligt differenstryck då den extra lasten hamnar tidigare i huvudledningen.

# 7.3 Slutgiltigt beslutsunderlag

Eftersom de undersökta geologiska förutsättningarna bedömts inte vara tillräckligt betydelsefulla för lagrets teoretiska prestanda, så grundas placering av lagret främst ur avseendet av mest lämpliga inkopplingspunkten i fjärrvärmenätet. Det alternativet som ger bäst förhållanden av differenstryck för både upp- och urladdning är en placering av lagret i norra Ljungsbro, Lager Cloetta. Detta är förutsatt att ledningen upp i norra nätet från knutpunkten omdimensioneras för att klara högre flöden utan för stora tryckförluster. En uppgradering av ledningen innebär att sprickvärmelagret kan laddas upp med ett högre massflöde för flera lastförhållanden i nätet samt att differenstrycket i fjärrvärmenätet stabiliseras vid urladdning.

Sprickvärmelagret skulle kunna placeras i alla de undersökta områdena då avståndet till inkopplingspunkten ungefärligen är lika lång. Det som slutligen kommer avgöra vilket område som är bäst lämpat och möjligt att anlägga lagret i är om tillstånd kan ges och genom provborrning på plats.

För att en urladdningstemperatur över 75 °C ska upprätthållas under hela urladdningsperioden från värmelagret, måste det dimensioneras utifrån en temperaturgradient på 15 °C. I simuleringarna fungerar ett lager med radien 20 m samt djupet 185 m bra, dock kan lagret omdimensioneras givet volymen. Under uppladdningen av lagret som sker under sommaren önskas ett massflöde motsvarande ca 20 kg/s och en framledningstemperatur runt 95 °C för att garantera att lagret uppnår önskad temperatur innan vintersäsongen.

# Referenser

- (1) Gehlin, S., Guide för geoenergi; SKR: 2017.
- (2) Erlström, M.; Mellqvist, C.; Schwarz, G.; Gustafsson, M.; Dahlqvist, P. Geologisk information för geoenergianläggningar en översikt. **2016**.
- (3) Nordell, B. Large-scale thermal energy storage. 2000.
- (4) Hydrocs hemsida https://www.hydroc.se/.
- (5) Wallenskog, J. Fjärrvärmecentralen, utförande och installation. 2014.
- (6) Nordell, B. Geoenergin i samhället: En viktig del i en hållbar energiförsörjning: forskningsläget. 2012.
- (7) Vattenskyddsområden https://www.linkoping.se/bygga-bo-och-miljo/naturvard-ochparkskotsel/vattenskyddsomraden/.
- (8) Vattenskyddsområden https://www.tekniskaverken.se/om-oss/verksamheten/vatten-ochavlopp/dricksvatten/vattentakter/.
- (9) Nilsson, J. Potentiella miljörisker med geoenergisystems temperaturpåverkan i mark och grundvatten.
   2020.
- (10) Rydegran, E. Fjärrvärme https://www.energiforetagen.se/energifakta/fjarrvarme/.
- (11) Cengel, Y.; Cimbala, J.; Turner, R., Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences, 5th edition; McGraw Hill: 2020.
- (12) Storck, K.; Karlsson, M.; Andersson, I.; Renner, J.; Loyd, D., *Formelsamling i termo- och fluiddynamik*; Instution för ekonimisk och industriell utveckling, Linköping universitet: 2016.
- (13) Holman, J., Heat transfer, tenth edition; McGraw Hill: 2010.
- (14) Hellström, G. Ground heat storage : thermal analyses of duct storage systems. 1991.
- (15) Eriksson, G. Grundläggande Strömningslära. 2007.
- (16) Medeltemperaturens avvikelse december 2021 https://www.smhi.se/data/meteorologi/kartor/ avvikelse/manadsmedeltemperatur-avvikelse/manad/december.
- (17) Sveriges Geologiska Undersökning, kartvisare https://apps.sgu.se/kartvisare/.
- (18) Sundberg, J. Termiska egenskaper i jord och berg. 1991.
- (19) Robertson, E. C. Thermal poroperties of rocks. **1988**.
- (20) Sundberg, J.; Thunholm, B.; Johnson, J. Värmeöverförande egenskaper i svensk berggrund. 1985.
- (21) Vitec, Netsim grid simulation https://www.vitecsoftware.com/en/product-areas/energy/ products/netsim-grid-simulation/.

Bilagor



# A Sydvästra Ljungsbro vid 21 MW belastning

Figur A.1: Simulering av temperaturen i ett sprickvärmelager med bergtypen kalksten vid behovet 21 MW och medelffekten 1.22MW.

# B Sydvästra Ljungsbro vid 25 MW belastning



Figur B.1: Simulering av temperaturen i ett sprickvärmelager med bergtypen kalksten vid behovet 25 MW och medelffekten 1.45MW.

# C Östra Ljungsbro vid 21 MW belastning



Figur C.1: Simulering av temperaturen i ett sprickvärmelager med bergtypen sandsten vid behovet 21 MW och medelffekten 1.22MW.
## D Östra Ljungsbro vid 25 MW belastning



Figur D.1: Simularing av temperaturen i ett sprickvärmelager med bergtypen sandsten vid behovet 25 MW och medelffekten 1.45 MW.

## E Temperaturer och värmeförluster nätsimuleringar



(a) Tornby till norra Ljungsbro.



**Figur E.1:** Standard driftfall 1. Fram- och returledningstemperaturen längs ledningssträckan från Tornby till en mätpunkt i norra respektive södra Ljungsbro. Effektöverföringen i huvudledningen från Tornby och det totala behovet är 2.5 MW.



(a) Tornby till norra Ljungsbro.

(b) Tornby till södra Ljungsbro.

**Figur E.2:** Standard driftfall 2. Fram- och returledningstemperaturen längs ledningssträckan från Tornby till en mätpunkt i norra respektive södra Ljungsbro. Effektöverföringen i huvudledningen från Tornby och det totala behovet är 14 MW.