Påverkan av turbindrift vid införing av en större hetvattenackumulator

Analys av en turbins förändrade driftmönster efter införandet av större hetvattenackumulator för värmelagring

JONAS GUSTAFSSON
HASSAN JAMALI

Akademin för ekonomi, samhälle och teknik

Kurs: Examensarbete, Energiteknik
Kurskod: ERA206
Ämne: Energiteknik
Högskolepoäng: 15 hp
Program: Högskoleingenjörsprogrammet i Energiteknik

Handledare: Anders Nordstrand
Examinator: Erik Dahlquist
Uppdragsgivare: Mälarenergi Värme AB
Datum: 2025-11-21
E-post:
Jgn22007@student.mdu.se
Hji25001@student.mdu.se

ABSTRACT

This thesis investigates how the operation of Turbine 6 at Mälarenergi has changed after a large underground hot-water storage system was put into operation. The storage makes it possible to store heat when the demand is low and use it later, which reduces the need to adjust the turbine's load in real time.

The purpose of the study is to examine how the turbine's operating patterns, average output, efficiency, and role in the electricity and reserve markets have been affected by the introduction of the heat storage system.

The work is based on a comparison of operating data from before and after the storage was activated. The analysis includes start and stop frequency, electricity and heat production, efficiency, and how much of the available energy was not used.

The results show that the turbine now runs more steadily and needs fewer starts and stops. Both electric and heat output have increased, and the turbine's efficiency has improved. The amount of unused energy has also decreased, which means the turbine is used more effectively. Overall, the study shows that the heat storage has made the system more flexible and efficient. Turbine 6 can operate closer to its optimal load, while Mälarenergi gains better opportunities to adjust production according to changes in electricity prices and heat demand.

Keywords: Turbine operation, thermal energy storage, district heating, efficiency improvement, load flexibility, hot-water accumulator, CHP plant

FÖRORD

Som avslutande moment på Högskoleingenjörsprogrammet i Energiteknik – Elektroteknik vid Mälardalens universitet genomförs detta examensarbete. Programmet omfattar totalt 180 hp, och kursen motsvarar 15 hp, genomförd på heltid under HT 2025. Arbetet har utförts i samarbete med Mälarenergi AB, och vi vill härmed uttrycka vår största tacksamhet för möjligheten att genomföra detta projekt.

Vi vill i första hand rikta ett varmt tack till vår externa handledare på Mälarenergi AB, Magnus Allmyr och alla inom Mälarenergi AB som gett deras stöd, vägledning, kunskaper och värdefulla insikter kring kraftvärmeverkets verksamhet i Västerås. Tack för hjälpen med data och för att ni delat er expertis kring anläggningens processer och drift.

Slutligen vill vi rikta ett stort tack till vår handledare Anders Nordstrand samt examinator Erik Dahlquist för värdefull feedback, vägledning och stöd i rapportens struktur och utformning.

Västerås, januari 2026

Jonas Gustafsson

Hassan Jamali

SAMMANFATTNING

I takt med ökade krav på flexibilitet och resurseffektivitet inom dagens energisystem behöver kraftvärmeanläggningar kunna anpassa sin drift efter varierande elpriser och värmebehov. Vid Mälarenergi i Västerås har ett storskaligt underjordiskt hetvattenlager, bergrummet, byggts för att öka systemets flexibilitet och möjliggöra mer effektiv drift av Turbin 6. Problemet som undersöks i detta arbete är hur turbinens driftbeteende och prestanda har förändrats till följd av lagrets införande.

Syftet med studien är att analysera hur införandet av bergrummet påverkat Turbin 6:s driftcykler, medeleffekt, verkningsgrad samt roll som elproducent på marknaden. Fokus ligger även på att identifiera eventuella driftoptimeringar som blivit möjliga genom lagrets buffrande funktion.

Metoden grundas på jämförelser av historisk driftdata före och efter lagrets implementering. Parametrar som start- och stoppfrekvens, lastvariationer, el- och värmeproduktion, bortkyld effekt och energiflöden mot lagret har analyserats. Litteraturstudier och tekniska referenser har använts för att tolka resultaten i relation till tidigare forskning om energilagring i kraftvärmesystem.

Resultaten visar tydliga förändringar i driften. Antalet start- och stoppcykler har minskat, och turbinen körs mer stabilt över längre perioder. Medeleffekten har ökat för både el och fjärrvärme, från 32,40 MW till 37,71 MW respektive 117,07 MW till 123,64 MW, samtidigt som verkningsgraden förbättrats. Den outnyttjade effekten har minskat, vilket innebär att turbinen utnyttjas mer effektivt. Driftprofilen visar också att bergrummet används aktivt för att jämna ut värmevariationer, vilket minskar behovet av snabba laständringar i turbinen.

I diskussionen framgår att den minskade cykliska driften leder till lägre mekaniskt slitage, ökad driftsäkerhet och bättre möjlighet för turbinen att köras inom sitt optimala lastintervall. Samtidigt öppnar energilagret för mer avancerade styrstrategier, där elproduktion kan anpassas efter marknadspriser snarare än endast värmebehov. Det finns även potential för ytterligare optimering genom utvecklade styrmodeller och justerad minimallast.

Slutsatsen är att införandet av bergrummet har gett Mälarenergi ett mer flexibelt, stabilt och effektivt kraftvärmesystem. Turbin 6 kan hållas närmare sina optimala driftförhållanden, vilket förbättrar både teknisk och ekonomisk prestanda. Arbetet visar också att storskalig värmelagring är ett värdefullt verktyg för att möta framtidens krav på hållbara och dynamiska energisystem.

Nyckelord: hetvattenlager, kraftvärmeverk, Turbin 6, driftoptimering, verkningsgrad, fjärrvärme, energilagring

INNEHÅLL

1 INLEDNING 1

1.1 Bakgrund 1

1.1.1 Turbinen 2
1.1.2 Bergrummet 2
1.1.3 Hetvattenackumulatorer och energilagring 3
1.1.4 Turbiners roll i elmarknaden 3

1.2 Problemformulering 4

1.3 Syfte 4

1.4 Frågeställningar 5

1.5 Avgränsning 5

2 METOD 7

2.1 Litteraturstudier 7

2.2 Datainsamling 7

2.2.1 Primärdata 8
2.2.2 Sekundärdata 8

2.3 Dataanalys 8

2.4 Simuleringar och scenarier 9

2.5 Validitet, Noggrannhet 9

2.6 Kontakt 10

3 ÄMNESMÄSSIG REFERENSRAM 10

3.1 Fjärrvärmesystem och kraftvärmeproduktion 10

3.2 Hetvattenackumulatorer och energilagring 11

3.3 Turbiner och driftsmönster 12

3.4 Utmaningar i dagens energisystem 13

4 AKTUELL STUDIE 14

4.1 Beskrivning av anläggningen 14

4.2 Införandet av hetvattenackumulatorn 16

4.3 Driftcykler och belastningsvariationer 16

4.4 Driftsmönster före införandet 17

4.5 Driftsmönster efter införandet 18

5 RESULTAT 19

5.1 Förändringar i driftcykler och start/stopp-frekvens 19

5.2 Påverkan på medeleffekt och verkningsgrad 24

5.3 Turbinens roll som elproducent 26

5.4 Identifierade driftoptimeringar 27

6 DISKUSSION 28

6.1 Tolkning av resultat i relation till litteratur 28

6.1.1 Driftcyklar 29
6.1.2 Verkningsgrad 29
6.1.3 Marknadsdeltagande 30

6.2 Tekniska implikationer för Mälarenergi 31

6.2.1 mekanisk belastning och driftsäkerhet 31
6.2.2 Ombyggnader vid värmelagring 31
6.2.3 Möjligheter till avancerade styrstrategier 32
6.2.4 Sammanfattning tekniska implikationer 33

6.3 Begränsningar i studien 33

6.3.1 Tidsperiodens omfattning 33
6.3.2 Yttre faktorer och variationer 33
6.3.3 Datakvalitet och mätosäkerhet 34
6.3.4 Modellantaganden 34
6.3.5 Sammanfattning begränsningar 34

6.4 Möjligheter för framtida tillämpningar 34

6.4.1 Integration med förnybar energi och elsystemet 34
6.4.2 Samverkan med nya tekniker och sektorkoppling 35
6.4.3 Skalbarhet och överförbarhet till andra anläggningar 35
6.4.4 Strategisk utveckling och digital optimering 36

7 SLUTSATSER 36

8 FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE 37

8.1 Vidare tekniska analyser 37

8.2 Utvidgning till andra turbiner/anläggningar 38

8.3 Ekonomiska och miljömässiga aspekter 38

9 DEKLARATION AV GENERATIV AI OCH AI-BASERADE TEKNOLOGIER I SKRIVPROCESSEN 39

REFERENSER 40

BILAGA 1: BERÄKNINGAR 42

BILAGA 2: RENA-TIMVÄRDEN 43

FIGURFÖRTECKNING

Figur 1 - Turbin 6 med alla dess avtappningar 15
Figur 2 - Turbin 6 med alla dess delar i helhet i 3D-format 15
Figur 3 - Aktiv EL Effekt från G6 Till Stamnätet (MW) före bergrummet, med tydliga variationer och återkommande driftstopp 19
Figur 4 - Aktiv EL Effekt från G6 Till Stamnätet (MW) efter bergrummet, med tydliga variationer, men mycket stabilare än innan 20
Figur 5 - Fjärrvärme Effekt från P6 till fjärrvärmenätet (MW) före bergrummet, med tydliga variationer och återkommande driftstopp 21
Figur 6 - Fjärrvärme Effekt från P6 till fjärrvärmenätet (MW) efter bergrummet, med tydliga, variationer men mycket stabilare än innan 22
Figur 7 - Laddnings Effekt in i bergrummet (MW), med tydliga laddningar och urladdningar 23
Figur 8 - Total effekt i Bergrummet (MWh), Med tydliga täcken på att det laddas och urladdas 23

TABELLFÖRTECKNING

Tabell 1 - Antal korta och långa stop av elproduktionen 20
Tabell 2 - Medelvärden för centrala driftparametrar före och efter införandet av bergrummet under drifttid 24
Tabell 3 - Beräknade verkningsgrad på turbin före och efter bergrummet 25
Tabell 4 - skillnaden mellan före och efter bergrummet när man korrigerar för graddagar ... 26
Tabell 5 - Jämförelse av energiproduktion och ekonomiska nyckeltal före och efter bergrummets införande 27

EKVATIONSFÖRTECKNING

Ekvation 1 - Totala verkningsgrad 8
Ekvation 2 - Alfa värdet 8
Ekvation 3 - Turbinverkningsgrad ifrån entalpier 8
Ekvation 4 - Turbinverkningsgrad ifrån Bränsle 8
Ekvation 5 – Total entalpi i två-fasområdet 9

BETECKNINGAR

Beteckning	Beskrivning	Enhet
η	Verkningsgrad	%
h	Entalpi	kJ/kg
m	Massflöde	Kg/s
P	Effekt	MW
Q	Effekt	MW
α	Alfa-värde	-
H^V	Mättad entalpi i gasfas	kJ/kg
H^L	Mättad entalpi i vätskeform	kJ/kg
x	ångkvalité	-

FÖRKORTNINGAR

Förkortning	Beskrivning
CFB	Cirkulerande fluidiserad bädd
SVK	Svenska kraftnät
CCU	Carbon Capture and utilization
CCS	Carbon Capture and Storage
VK	Varm-Kondensator
LTFV	Låg-trycks förvärmare

1 INLEDNING

1.1 Bakgrund

Mälarenergi är ett kommunalt energibolag med en verksamhet som sträcker sig över 160 år, är en central aktör inom energiförsörjning och samhällsservice i Västra Mälardalen. Bolaget tillhandahåller ett brett spektrum av tjänster inom fjärrvärme, elproduktion samt vattenförsörjning. Fjärrvärme och elproduktion är integrerade delar i energisystemet där deras ömsesidiga påverkan och samverkan spelar en avgörande roll för att optimera resursanvändning och minska klimatpåverkan.

I takt med en accelererande elektrifiering och ökad digitalisering av energisystemet blir sambandet mellan fjärrvärmeproduktion och elproduktion alltmer komplext. Digital infrastruktur som möjliggör realtidsmätning och styrning som utgör en kritisk komponent för att säkerställa en effektiv och flexibel energihantering Siemens. Genom att analysera hur dessa system interagerar och påverkar varandra bidrar denna studie till en fördjupad förståelse av möjligheter och utmaningar i omställningen mot ett fossilfritt energisystem där Mälarenergi har satt som mål att vara helt fossilfritt senast 2035.

Mälarenergi har under det senaste decenniet genomfört betydande investeringar i anläggningar som bidrar till både resurseffektivitet och minskad klimatpåverkan. År 2014 invigdes Block 6 vid kraftvärmeverket i Västerås. Denna panna är utformad som en samförbränningsanläggning som kan använda såväl avfall som biobränsle och producerar både el och fjärrvärme. Genom att kombinera kraft- och värmeproduktion uppnås en hög total verkningsgrad, samtidigt som anläggningen bidrar till att ta vara på avfall som annars skulle behöva deponeras (Mälarenergi, u.å.-e).

För att ytterligare stärka systemets flexibilitet invigdes i september 2024 ett nytt värmeenergilager ofta benämnt *"Bergrummet"*. Detta lager är inrymt i ett tidigare oljelager i berggrunden och har en kapacitet på cirka 300 000 kubikmeter, motsvarande omkring 13 GWh lagrad värmeenergi. Syftet med lagret är att möjliggöra säsongslagring av fjärrvärme. Överskottsvärme som genereras under perioder med låg efterfrågan kan lagras och sedan användas under kalla dagar med högt värmebehov. På så sätt kan elanläggningens produktion optimeras över året och behovet av fossila spetsbränslen reduceras (Mälarenergi, u.å.-a).

Dessa investeringar illustrerar hur Mälarenergi som energibolag kan bidra till lösningen av systemutmaningar som rör integration av variabel förnybar energi avfalls- och resurshantering samt behovet av flexibel värmeproduktion. Block 6 och energilagret i berget utgör därmed

exempel på hur tekniska innovationer i kombination med resurseffektivitet kan stärka både försörjningstrygghet och klimatanpassning på regional nivå.

1.1.1 Turbinen

Den ångturbin som används vid Mälarenergis kraftvärmeverk i Västerås är en Siemens SST-600, en flexibel mottrycksturbin konstruerad för industriella kraftvärmeapplikationer. Modellen är anpassad för ett brett effektområde, vanligtvis mellan 0 och 50 MW, beroende på pannans kapacitet och driftförhållanden. Vid Mälarenergi arbetar turbinen med ett ångtryck på cirka 75 bar och en ångtemperatur på omkring 475 °C, vilket möjliggör hög total verkningsgrad i kombinerad el- och värmeproduktion (Siemens, u.å.-b).

Turbinen är även en viktig komponent i Mälarenergis pågående omställning mot ett fossilfritt energisystem. Genom dess förmåga att arbeta flexibelt inom ett brett lastområde kan anläggningen optimera produktionen i samspel med det nya underjordiska värmelagret Bergrummet och på så sätt bidra till ökad systemeffektivitet och minskad klimatpåverkan (Mälarenergi, u.å.-c).

1.1.2 Bergrummet

Det energi lager som idag kallas *"Bergrummet"* har en lång historisk bakgrund som speglar både Sveriges energipolitik och omställningen mot mer hållbara lösningar. Anläggningen konstruerades under perioden 1969–1971 som ett underjordiskt bergrum avsett för lagring av eldningsolja 5. Med en lagringskapacitet på omkring 300 000 kubikmeter utgjorde det ett av landets största beredskapslager för bränsle under kalla krigets energipolitiska villkor (Mälarenergi, u.å.-a).

Efter oljekriserna och den successiva minskningen av oljans betydelse för energiförsörjningen avvecklades lagret 1985. Bergrummen konserverades och stod därefter oanvända i flera decennier. När tillståndet för oljehantering upphörde 2007 aktualiserades frågan om en ny användning, i takt med att klimatmål och behov av förnybar energi satte press på energisystemets flexibilitet (Mälarenergi, u.å.-a).

År 2019 påbörjades förprojekteringen för att omvandla de tidigare oljelagren till ett storskaligt värmeenergilager. Projektet inleddes med en omfattande sanering, där cirka 3 300 kubikmeter kvarvarande olja togs om hand under 2021. Under 2022–2023 installerades ny teknisk utrustning såsom rörsystem och värmeväxlare för att möjliggöra användningen av bergrummen som ackumulator för fjärrvärme (Mälarenergi, u.å.-a).

I slutet av 2023 började anläggningen fyllas med vatten, och under sommaren 2024 togs den i praktisk drift som säsongslager för värme. Den officiella invigningen ägde rum den 12 september 2024, då anläggningen presenterades som världens största energi lager för värme med en kapacitet motsvarande cirka 13 GWh. Närvaron av H.M. Konungen vid invigningen

markerade lagrets symboliska betydelse som en nationell milstolpe i utvecklingen av hållbar energiinfrastruktur (Mälarenergi, u.å.-c).

1.1.3 Hetvattenackumulatorer och energilagring

Hetvattenackumulatorer är en central komponent i moderna fjärrvärmesystem eftersom de möjliggör lagring av termisk energi och därmed bidrar till ökad flexibilitet i produktionen. Principen bygger på att varmvatten lagras i stora tankar eller underjordiska utrymmen vid perioder med överskott på värme, och att energin sedan kan återanvändas när efterfrågan stiger. På så sätt kan produktionen av el och värme delvis frikopplas från den momentana belastningen i fjärrvärmenätet, vilket bidrar till både effektivare drift och minskat behov av fossila spetsbränslen.

I kraftvärmesystem fungerar hetvattenackumulatorn som en buffert som jämnar ut skillnader mellan produktion och förbrukning. Under perioder med låg värmeförbrukning kan överskottsvärme från pannan lagras i ackumulatorn i form av hetvatten. När efterfrågan ökar, exempelvis under kalla dygn, kan det lagrade vattnet återföras till fjärrvärmenätet via värmeväxlare. Detta ger kraftvärmeverket möjlighet att köra turbinen mer optimalt med hög verkningsgrad och undvika ineffektiva delbelastningar (Mälarenergi, u.å.-d).

Vid Mälarenergi används både en traditionell ackumulatortank och ett storskaligt underjordiskt värmelager, det så kallade *Bergrummet*, som tillsammans utgör ett flexibelt energilagringssystem. Bergrummet har en lagringskapacitet på cirka 13 GWh och gör det möjligt att lagra värmeenergi över längre tidsperioder, vilket skapar förutsättningar för säsongutjämning av produktionen. Denna lösning gör att anläggningen kan lagra överskottsvärme från sommarens drift och använda den under vintern, vilket bidrar till minskade driftkostnader och en mer stabil energiförsörjning (Mälarenergi, u.å.-a).

1.1.4 Turbiners roll i elmarknaden

Turbiner är centrala i elmarknaden eftersom de möjliggör reglerbar elproduktion, vilket är avgörande för att upprätthålla balans mellan produktion och efterfrågan. I Sverige används turbinbaserade kraftslag, såsom vattenkraft, kärnkraft och kraftvärme, för att leverera planerbar elproduktion som snabbt kan anpassas efter variationer i efterfrågan eller fluktuationer i förnybar energi som vind- och solkraft. Denna flexibilitet gör turbiner till viktiga aktörer på balansmarknaden där svenska kraftnät upphandlar stödtjänster för att säkerställa systemets stabilitet. Genom att kunna öka eller minska sin produktion på kort varsel bidrar turbiner till frekvensstabilitet och driftsäkerhet i elsystemet. Dessutom ger deltagande på balansmarknaden möjlighet för kraftproducenter att skapa ytterligare intäkter utöver den vanliga elförsäljningen. Sammantaget spelar turbiner därför en viktig roll både som energiproducerande enheter och som resurser för systemstabilitet i den svenska elmarknaden(Svenska kraftnät, u.å.).

1.2 Problemformulering

Ökad flexibilitet och resurseffektivitet är centrala utmaningar för dagens fjärrvärmesystem, särskilt i kraftvärmeanläggningar där både el och värme produceras. För att möta dessa krav har Mälarenergi implementerat ett underjordiskt bergrum för hetvattenlagring, vilket fungerar som en stor ackumulatortank.

Källan visar hetvattenackumulatorer gör det möjligt att koppla isär el- och värmeproduktion vilket ger ökad flexibilitet i elmarknadsdeltagande samt minskat behov av fossil reservkapacitet. därför kan stora underjordiska ackumulatorer dimensioneras och optimeras för både kort och långsiktig lagring, samt har att de har potential att bidra till både minskade utsläpp och ökad systemnytta. I synnerhet diskuteras hur värmelagring möjliggör att topp laster hanteras utan att behöva köra turbiner i låg verkningsgrad (Tosatto m.fl., 2022).

källa demonstrerar i sin studie hur integrationen av värmeackumulatorer i kraftvärmeanläggningar har en direkt inverkan på turbinens driftbeteende. Genom att reglera mängden ånga som leds till värmenätet, en metod som benämns är ”heatsource regulation” detta möjliggör en omfördelning av ångflödet så att en större andel passerar genom turbinen. Detta resulterar i en ökad elektrisk effekt vid behov. Följaktligen förändras turbinens funktion från att vara relativt statisk till att kunna agera mer aktivt i lastföljning och reglering av elproduktion på effektmarknaden (W. Wang m.fl., 2018).

Resultaten från detta arbete kan vara värdefulla för flera aktörer. För Mälarenergi ger studien insikt i hur Turbin 6:s driftmönster förändrats och hur det kan optimeras. För andra energibolag med liknande system kan resultaten ge vägledning vid design och implementering av termiska lagringslösningar. Även tillverkare av turbiner och styrsystem kan dra nytta av en djupare förståelse för nya belastningsmönster och dess påverkan på komponenter och reglerstrategier.

1.3 Syfte

Syftet med detta examensarbete är att undersöka hur Turbin 6:s användning och driftmönster har förändrats till följd av införandet av det underjordiska bergrummet för hetvattenlagring vid Mälarenergi. Fokus ligger på att analysera tekniska effekter av värmelagringen, såsom förändringar i driftcykler, verkningsgrad och turbinens roll i el- och effektmarknaden. Genom att koppla praktisk driftdata till teoretisk kunskap om termisk energilagring och styrning i kraftvärmesystem syftar arbetet till att identifiera möjliga optimeringar och bidra med insikter som kan vara värdefulla för både Mälarenergi och andra aktörer inom energibranschen.

1.4 Frågeställningar

För att uppfylla studiens syfte formuleras följande frågor, vilka ligger till grund för den tekniska analysen av Turbin 6:s drift före och efter införandet av värmelagret i bergrummet. Frågorna fokuserar på centrala driftparametrar och turbinens funktion i systemet.

- Hur har antalet driftcykler samt start/stopp-frekvens för Turbin 6 förändrats efter införandet av bergrummet
- Hur har medeleffekten, verkningsgraden samt alfa-värde påverkats efter införandet av bergrummet?
- Hur har Turbinens roll i effekt- och reservmarknaden utvecklats efter lagringens införande?
- Vilka driftoptimeringar skulle kunnas föreslås baserat på analyser av driftdata?

1.5 Avgränsning

Detta examensarbete är avgränsat till att undersöka hur Turbin 6:s driftmönster har förändrats till följd av införandet av bergrummet för hetvattenlagring vid Mälarenergi. Studien omfattar endast denna specifika turbin och inkluderar inte analys av andra produktionsenheter, såsom ytterligare turbiner eller pannor.

Analysen baseras på driftdata från en definierad tidsperiod för som är mellan 2023-07-1 till 2024-06-17. Sen är tidsperioden 2024-06-17-20 till 2025-06-30 efter lagringssystemet togs i drift. Händelser utanför detta intervall beaktas inte. Vidare begränsas analysen av turbinens deltagande i el- och effektmarknader till tekniska och kvantitativa aspekter, såsom lastprofil, start- och stoppfrekvens samt verkningsgrad. Ekonomiska kalkyler, affärsmodeller eller marknadsstrategiska analyser, såsom avbetalning eller intäktsoptimering, ingår inte.

Miljömässiga effekter, såsom utsläppsberäkningar eller livscykelanalyser, behandlas inte i arbetet. Fokus ligger på tekniska förändringar i driften, särskilt avseende start- och stoppfrekvens, verkningsgrad och lastprofil. Simuleringar som används för att analysera alternativa driftfall bygger på förenklade modeller och antaganden och omfattar inte hela kraftvärmesystemet i detalj.

Vid de beräkningar och simuleringar som genomförs i denna studie används ett antal förenklade antaganden för att beskriva ångsystemets förluster och ångkvaliteten vid de olika avtappningsnivåerna. Då det fullständiga detaljerade ångsystemet är komplext och innehåller ett stort antal komponenter, ventiler och värmeväxlare som inte ingår i studiens omfattning.

För ångflödet mellan avtappningspunkterna antas specifika procentuella förluster som representerar värmeförluster, interna avblåsningar och tryckfall i systemet. Dessa värden är inte exakta mätvärden utan fungerar som tekniskt rimliga antaganden för att förenkla modellen. Följande förluster antas:

- Mellan avtappning 63 till 62 försvinner 1 % av ångflödet.
- Mellan 62 till 61 försvinner ytterligare 1 % av ångflödet.

- Mellan 61 och LTFV antas 10 % av ångflödet förloras.
- Från LTFV till VK62 antas 20 % av ångflödet förloras på grund av högre temperaturfall och större interna systemförluster.

Dessa antaganden syftar till att representera den ökande förlustbilden ju längre ångan rör sig genom systemets nedströmskomponenter. Vidare antas att ångkvaliteten vid värmekondensorerna är konstant under hela analysperioden. För att skapa en stabil beräkningsgrund och undvika att små variationer i kondensordata påverkar resultatet används följande fasta värden:

- För VK62 antas en ångkvalitet på 0,98, vilket representerar nästan torr ånga.
- För VK61 antas en ångkvalitet på 0,87, vilket motsvarar en högre andel fukt i ångan vid utloppet.

Dessa antaganden införs för att möjliggöra direkt jämförbara beräkningar av turbinens verkningsgrad och energiflöden utan att behöva modellera de detaljerade termodynamiska variationerna vid varje driftfall. Modellen fokuserar därmed på övergripande förändringar i driftmönster snarare än exakt termodynamisk precision i varje enskild punkt i ångcykeln.

Slutligen är studiens resultat beroende av tillgången till tillförlitlig driftdata från Mälarenergi. Eventuella brister i datakvalitet, såsom mätfel eller ofullständiga loggar, kan påverka resultatens precision. Externa faktorer som väderförhållanden, bränsleprisvariationer eller energipolitiska beslut inkluderas inte i analysen.

2 METOD

Detta examensarbete genomförs som en teknisk fallstudie med kvantitativ inriktning. Studien fokuserar på Turbin 6 vid Mälarenergi, och syftar till att analysera hur dess drift påverkats av införandet av ett underjordiskt värmelager. Arbetet kombinerar dokumentanalys av teknisk driftdata med beräkningar och intervjuar för att besvara frågeställningarna. Data kommer att samlas in från Mälarenergis interna driftloggar och produktionssystem och omfattar bland annat parametrar som turbindriftstatus, effektuttag och bränsleförbrukning. För att möjliggöra jämförande analys väljs tidsperiod där ackumulatorn inte fanns med en tid där ackumulatorn var i drift. Informationen kommer att struktureras och bearbetas med hjälp av Excel och MATLAB för att beräkna nyckeltal såsom medeleffekt, verkningsgrad, kapacitetsutnyttjande och antalet start- och stoppcykler.

Utöver driftdata används även sekundärkällor såsom marknadsinformation från Nord Pool och svenska kraftnät för att analysera hur Turbin 6:s roll i el- och effektmarknaden kan ha förändrats efter att värmelagringen infördes. Litteraturstudier genomförs parallellt för att identifiera kunskapsluckor och placera studiens resultat i ett forskningssammanhang. Kortare samtal eller intervjuer med teknisk personal kan också förekomma i syfte att bekräfta tolkningar av data eller förstå bakomliggande styrlogik i anläggningen. För att säkerställa att resultaten är tillförlitliga och relevanta används validerade mätdata, och alla antaganden redovisas tydligt. Resultaten kommer att presenteras i form av tekniska nyckeltal, grafer och jämförelser, samt leda fram till rekommendationer om hur turbindriften kan optimeras i system med termisk energilagring.

2.1 Litteraturstudier

Litteraturstudier genomförs för att etablera en teoretisk grund och för att förstå tidigare forskning inom områdena termisk energilagring, kraftverksdrift, styrsystem och flexibilitet på elmarknaden. Syftet med dessa studier är att identifiera kunskapsluckor, kartlägga metoder för analys av driftdata och nyckeltal, samt att skapa en referensram för hur integrationen av värmelager kan påverka turbinens prestanda. Fokus ligger bland annat på tidigare forskning om energilagringens påverkan på verkningsgrad, start- och stoppcykler, kapacitetsutnyttjande och bränsleeffektivitet, samt på driftstrategier som kan optimera turbinens funktion i kombination med lagringssystem.

2.2 Datainsamling

Datainsamlingen omfattar både primär- och sekundärdata.

2.2.1 Primärdata

Primärdata samlas in från Mälarenergis interna drift- och produktionssystem genom export av loggade mätvärden från turbin- och pannstyrsystemet. Driftdata hämtas i form av tidsserier i Excel- eller CSV-format. Där inom tidsperioden tas medelvärdet över varje timme och inkluderar parametrar såsom aktiv effekt (MW), fjärrvärmeeffekt (MW), turbindriftstatus, ångflöden, bränsleflöden. Uttagen görs efter särskilt definierade tidsintervall. vilket säkerställer att datan är komplett och motsvarar samma loggningsfrekvens över hela perioden.

2.2.2 Sekundärdata

Sekundärdata samlas in för att sätta resultaten i ett bredare sammanhang och inkluderar marknadsinformation från Nord Pool samt produktions- och balansdata från Svenska kraftnät. Denna information används för att analysera hur Turbin 6:s roll i el- och effektmarknaden kan ha förändrats till följd av värmelagret och för att belysa interaktionen mellan teknisk drift och marknadsförutsättningar. De entalpivärden som använts har inhämtats från en webbaserad termodynamisk tabellkälla och interpolerats för att få det närliggande värde (LearnChemE, u.å.).

2.3 Dataanalys

Insamlad data bearbetas och analyseras med hjälp av Excel. Analysen omfattar beräkning av centrala nyckeltal såsom medeleffekt, verkningsgrad, kapacitetsutnyttjande samt antal start- och stoppcykler. Genom att jämföra dessa nyckeltal mellan perioder med och utan värmelager kan förändringar i turbinens driftmönster identifieras. Analysen inkluderar även grafiska visualiseringar, såsom tidsserier och jämförande diagram, för att tydligt illustrera variationer i produktion och prestanda över tid.

$$\eta_{tot} = \frac{(P_{el}+Q_{fjärr})}{Q_{bränsle}}$$ Ekvation 1 - Totala verkningsgrad

$$\alpha = \frac{P_{el}}{Q_{fjärr}}$$ Ekvation 2 - Alfa värdet

$$\eta_{turbin} = \frac{(P_{el})}{m_{Ånga}*(h_i-h_u)}$$ Ekvation 3 - Turbinverkningsgrad ifrån entalpier

$$\eta_{turbin.bränsle} = \frac{m_{Ånga}*(h_i-h_u)}{Q_{bränsle}}$$ Ekvation 4 - Turbinverkningsgrad ifrån Bränsle

Effekten med entalpierna används mellan varje avtappningar i turbinen.

$$H = (H^V * x) + ((1 - x) + H^L)$$ Ekvation 5 – Total entalpi i två-fasområdet

2.4 Simuleringar och scenarier

För att komplettera den empiriska analysen genomförs simuleringar i Excel där olika drift senarior modelleras. Dessa simuleringar möjliggör undersökning av turbinens beteende under varierande förutsättningar exempelvis variationer i elpriser och efterfrågan samt alternativa driftstrategier för att minimera start- och stoppcykler utan att kompromissa med energileveransen. Simuleringsresultaten används för att utvärdera potentiella optimeringsstrategier och ge rekommendationer om hur Turbin 6 kan utnyttjas mer effektivt i system med termisk energilagring.

I analysen inkluderas även graddagar för att fånga hur utomhustemperaturen påverkar värmebehovet och därmed driftsförutsättningarna för Turbin 6. Genom att jämföra resultaten med och utan graddagskorrigering kan eventuella skillnader i belastningsmönster och optimeringsmöjligheter identifieras. Simuleringsresultaten används för att utvärdera potentiella optimeringsstrategier och ge rekommendationer om hur Turbin 6 kan utnyttjas mer effektivt i system med termisk energilagring.

2.5 Validitet, Noggrannhet

För att säkerställa studiens validitet och noggrannhet har särskild hänsyn tagits till datakvalitetmetodval och bearbetningstekniker. Primärdata hämtas från Mälarenergis interna driftloggar och produktionssystem, vilka är kontinuerligt validerade och används i den dagliga driften, vilket ger hög tillförlitlighet. Trots detta är det viktigt att beakta möjliga felkällor såsom sensoravvikelser korta avbrott i datainsamlingen eller manuella registreringsfel. För att minimera påverkan av sådana avvikelser genomförs en systematisk granskning av datasetet, där uppenbara felaktigheter identifieras och hanteras enligt definierade kriterier exempelvis genom att utesluta anomalier.

Analysen bygger på beräkning av nyckeltal såsom medeleffekt, verkningsgrad, kapacitetsutnyttjande och start- och stoppcykler. För dessa beräkningar används standardiserade matematiska metoder och programvaror som Excel vilket bidrar till reproducerbarhet och transparens. För att ytterligare stärka validiteten jämförs resultaten med dokumenterade historiska värden och referensdata från tidigare studier inom området. Eventuella antaganden, exempelvis vid uppskattning av bränsleeffektivitet eller interpolering av data redovisas tydligt för att ge läsaren möjlighet att bedöma studiens tillförlitlighet.

2.6 Kontakt

För att säkerställa korrekt tolkning av driftdata och förståelse för anläggningens styrlogik har kontinuerliga dialoger förts med teknisk personal vid Mälarenergi under arbetets gång. Dessa avstämningar har skett informellt vid behov och har haft som syfte att verifiera antaganden, klargöra driftförhållanden och säkerställa att analyserna genomförs utifrån anläggningens faktiska funktion och operativa rutiner.

Genom dessa återkommande kontakter har viktig information erhållits om bland annat prioriteringar mellan el- och värmeproduktion, turbinens start- och stopplogik samt driftsättet vid aktivering av värmelagret. Dialogerna har därmed utgjort ett stöd i att kvalitetssäkra analysen och att säkerställa att metodval och tolkningar ligger i linje med anläggningens praktiska driftförutsättningar.

3 ÄMNESMÄSSIG REFERENSRAM

3.1 Fjärrvärmesystem och kraftvärmeproduktion

Fjärrvärmesystem är en etablerad och effektiv metod för att tillgodose uppvärmningsbehov i tätorter genom central produktion och distribution av värme via ett rörnät till byggnader och industrier. Tekniken möjliggör hög energieffektivitet eftersom restvärme och spillvärme från elproduktion, industriella processer eller avfallsförbränning tas tillvara i stället för att gå förlorad. Enligt (Connolly m.fl., 2014) är detta en av de mest resurseffektiva lösningarna för uppvärmning i urbana områden och bidrar till minskade koldioxidutsläpp.

Enligt (Rezaie & Rosen, 2012) fungerar fjärrvärme som en integrerande del av energisystemet där flera energibärare och sektorer kan kopplas samman. Fjärrvärmenätet kan användas för att integrera värme från förnybara källor industriella processer och kraftvärmeproduktion, vilket bidrar till ett mer flexibelt och robust energisystem. Utvecklingen går mot så kallade fjärde generationens fjärrvärmesystem (4GDH), där lågtemperaturnät, smarta styrsystem och värmelager möjliggör effektiv användning av både el och värme i ett sammanhängande energinät.

Vid kraftvärmeproduktion (CHP) produceras el och värme samtidigt från samma bränslekälla. vilket leder till en betydligt högre total verkningsgrad än vid separat produktion. Enligt (Connolly m.fl., 2014) är kraftvärme en av de mest energieffektiva metoderna för resursutnyttjande i städer och spelar en viktig roll i övergången till ett fossilfritt energisystem.

Denna kombination av el- och värmeproduktion gör det möjligt att nyttja bränslet optimalt och minska klimatpåverkan.

Enligt (Rezaie & Rosen, 2012) blir fjärrvärmens framtida roll allt viktigare i takt med att andelen variabel elproduktion från vind- och solkraft ökar. Fjärrvärmesystem med integrerade värmelager kan användas för att balansera elnätet genom att anpassa värmeproduktionen efter elpriser och tillgång på el. På så sätt skapas synergier mellan el- och värmesektorn. vilket ökar flexibiliteten i hela energisystemet.

Sammantaget visar (Rezaie & Rosen, 2012) att fjärrvärme i kombination med kraftvärmeproduktion och värmelagring kan bidra till både ökad energieffektivitet och minskad klimatpåverkan. Genom att integrera tekniska lösningar som lågtemperaturnät, styrsystem och ackumulatorer kan fjärrvärmesystemen anpassas för framtidens krav på hållbar. flexibel och klimatneutral energiförsörjning.

3.2 Hetvattenackumulatorer och energilagring

Hetvattenackumulatorer används för att lagra energi i form av varmt vatten som kan utnyttjas när värmebehovet ökar. Systemet gör det möjligt att jämna ut skillnader mellan produktion och efterfrågan i fjärrvärmenätet. Enligt (Schneider m.fl., 2016) byggs ackumulatorer ofta som stora isolerade ståltankar eller som underjordiska berglager där vattnet hålls vid hög temperatur under längre tid. På så sätt kan överskottsvärme från kraftvärmeproduktion sparas och användas senare vilket ökar systemets flexibilitet och effektivitet.

Enligt (D. Wang m.fl., 2022) bidrar hetvattenackumulatorer till stabilare drift i kraftvärmeverk. När värme kan lagras minskar behovet av snabba laständringar i pannor och turbiner. Det leder till lägre bränsleförbrukning och mindre slitage på utrustningen. Ackumulatorn fungerar som en buffert som gör att anläggningen kan producera värme och el på ett mer jämnt och kontrollerat sätt. Den bidrar även till högre total verkningsgrad eftersom turbinen kan köras under optimala förhållanden oberoende av värmebehovet i nätet.

Vid koppling till elmarknaden skapar värmelagring nya möjligheter för optimerad drift. Enligt (Tosatto m.fl., 2022) kan ackumulatorn användas för att styra när el ska produceras. När elpriserna är låga lagras överskottsvärme och när priserna stiger frigörs värmen för att ge utrymme för ökad elproduktion. Detta ger en mer flexibel driftstrategi som både sänker produktionskostnader och stärker anläggningens lönsamhet.

Enligt (Sarunac m.fl., 2024) spelar värmelagring också en viktig roll i övergången till ett mer hållbart energisystem. Genom att ta tillvara energi från solvärme, avfallsförbränning eller industriella processer kan hetvattenackumulatorer minska behovet av fossila bränslen. De bidrar samtidigt till att stabilisera systemet när andelen förnybar elproduktion ökar. Det gör energilagring till en central teknik i framtidens energiförsörjning.

Sammantaget visar (Sarunac m.fl., 2024) att hetvattenackumulatorer ökar både effektiviteten och driftsäkerheten i kraftvärmesystem. De gör det möjligt att anpassa produktionen efter både tekniska och ekonomiska förutsättningar samtidigt som utsläppen minskar. För energibolag som Mälarenergi ger tekniken bättre kontroll över produktionen och bidrar till en mer flexibel och hållbar drift.

3.3 Turbiner och driftsmönster

Turbiner utgör den centrala komponenten i ett kraftvärmesystem eftersom de omvandlar den termiska energin i ånga till mekaniskt arbete och därefter till elektricitet. Enligt (W. Wang m.fl., 2018) är turbinens verkningsgrad och driftmönster avgörande för hela anläggningens prestanda, särskilt i anläggningar som är integrerade med fjärrvärmeproduktion. I mottrycksturbiner som ofta används i kraftvärmeverk avges en del av ångan efter expansion för värmeproduktion i fjärrvärmenätet. Detta innebär att turbinen inte enbart optimeras för elproduktion, utan även måste balansera värmebehovet i nätet.

Enligt (W. Wang m.fl., 2018) påverkas turbinens driftstrategi i hög grad av efterfrågevariationer i både el och värmesektorn. I perioder med lågt värmebehov kan en större andel av ångan användas för elproduktion medan högt värmebehov kräver att mer energi avsätts till fjärrvärmenätet. Denna balans styrs genom ventiler och ångflödesreglering, vilket i sin tur påverkar turbinens verkningsgrad och belastningsprofil. Turbiner som används i kraftvärmesystem måste därför vara konstruerade för att hantera frekventa lastväxlingar utan att slitaget ökar markant.

Vid integration av värmelagring förändras turbinens driftsmönster ytterligare. Enligt (W. Wang m.fl., 2018) möjliggör värmelagret att ångflödet kan styras mer flexibelt beroende på elmarknadens prisvariationer. Genom att tillfälligt lagra överskottsvärme kan turbinen köras med högre och jämnare elproduktion under perioder med höga elpriser utan att värmeleveransen till kunderna påverkas negativt. Detta leder till färre start- och stoppcykler stabilare drift och förbättrad livslängd för turbinkomponenter.

En annan aspekt som framhålls i källa är att turbinens flexibilitet är central för att kunna delta på effekt och balansmarknaden. Kraftvärmeturbiner med snabb regleringsförmåga kan användas för att stabilisera frekvensen i elsystemet och leverera reglerkraft. När turbindriften kombineras med energilagring kan anläggningen agera som en styrbar produktionsresurs som svarar på marknadssignaler vilket stärker dess ekonomiska och systemmässiga nytta (W. Wang m.fl., 2018).

Sammantaget visar (W. Wang m.fl., 2018). att turbinens roll i framtidens kraftvärmesystem går bortom traditionell elproduktion. Genom att anpassa driften till dynamiska värme och elmarknader samt integrera värmelagring kan turbinen bidra till ökad systemeffektivitet minskade utsläpp och högre flexibilitet i energiförsörjningen. Denna utveckling gör turbinen

till en aktiv komponent i energiomställningen snarare än enbart en passiv del av produktionskedjan.

3.4 Utmaningar i dagens energisystem

Energisystemet befinner sig i en omfattande omvandling som drivs av behovet att minska klimatpåverkan och samtidigt säkerställa en stabil och kostnadseffektiv energiförsörjning. En av de största utmaningarna är integrationen av variabel förnybar energi särskilt vind- och solkraft i elsystemet. Deras intermittenta natur innebär att produktionen varierar i takt med väderförhållanden vilket skapar svårigheter för både balansen i elsystemet och för planeringen av energiförsörjningen. För att hantera detta krävs nya lösningar för flexibilitet och optimering av befintliga termiska anläggningar (Deng m.fl., 2022).

Ett exempel på tekniska anpassningar är optimeringen av cirkulerande fluidiserade bäddpannor (CFB). Dessa anläggningar kan genom förbättrad driftstrategi och integration med förnybar energi bidra till att stabilisera systemet. Utmaningen ligger dock i att dessa system behöver uppgraderas för att kunna reglera snabbt och ofta sker detta till priset av minskad verkningsgrad eller ökade driftkostnader. Den tekniska komplexiteten och kraven på avancerad styrning gör också att investeringar i sådan flexibilitet kan vara svåra att motivera utan tydliga incitament (Deng m.fl., 2022).

En annan central fråga rör biomassans roll i energisystemet. Biomassabaserade restprodukter har stor potential att användas som bränsle och kan därmed komplettera de intermittenta förnybara källorna. Biomassa är dock en begränsad resurs vars tillgång varierar beroende på regionala förhållanden och säsong. Dessutom måste hållbarhetsaspekter såsom konkurrens med livsmedelsproduktion och påverkan på markanvändning beaktas för att säkerställa att biomassans bidrag inte sker på bekostnad av miljön. Därför kan biomassa snarare ses som en del av en diversifierad lösning än som ett universellt alternativ (Fernandes & Costa, 2010).

Utöver elproduktionen utgör värmesektorn en annan nyckelfråga. Fjärrvärme och fjärrkyla är redan etablerade tekniker i många länder, men deras framtida utveckling präglas av både möjligheter och institutionella utmaningar. Potentialen ligger i att integrera överskottsvärme använda förnybara bränslen och införa lågtemperaturnät vilket skulle minska både energiförluster och klimatpåverkan. Samtidigt finns hinder i form av bristande investeringsvilja långsamma regelverksanpassningar och otillräcklig samordning mellan olika aktörer. Dessa faktorer försvårar en snabb modernisering av fjärrvärmesystemen och gör att omställningen riskerar att gå långsammare än nödvändigt (Werner, 2017).

Sammanfattningsvis står dagens energisystem inför utmaningar som rör såväl tekniska som institutionella och resursmässiga dimensioner. Integration av variabel förnybar energi kräver ökad flexibilitet i termiska system, biomassa kan spela en viktig men begränsad roll, och modernisering av fjärrvärmesektorn kräver tydligare styrmedel och investeringar. För att

möjliggöra en framgångsrik omställning krävs därmed ett helhetsperspektiv som kombinerar teknisk innovation, hållbar resursanvändning och anpassade policy-ramar.

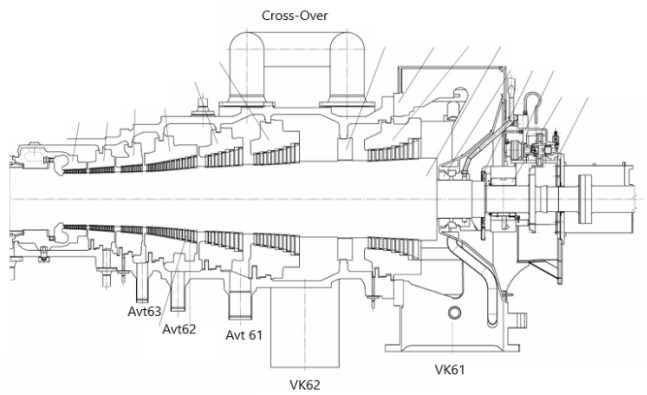
4 AKTUELL STUDIE

4.1 Beskrivning av anläggningen

Block 6 vid Mälarenergis kraftvärmeverk i Västerås är ett av anläggningens större produktionsblock och togs i drift 2014. Det är utformat för att elda enbart avfallsbränsle och utgör en viktig del av Mälarenergis strategi för att minska de fossila koldioxidutsläppen. Enligt källa är blocket utrustat med en avancerad cirkulerade fluidiserande bädd för avfallsförbränning samt en mottrycksturbin som genererar både el och fjärrvärme (Mälarenergi, u.å.-b).

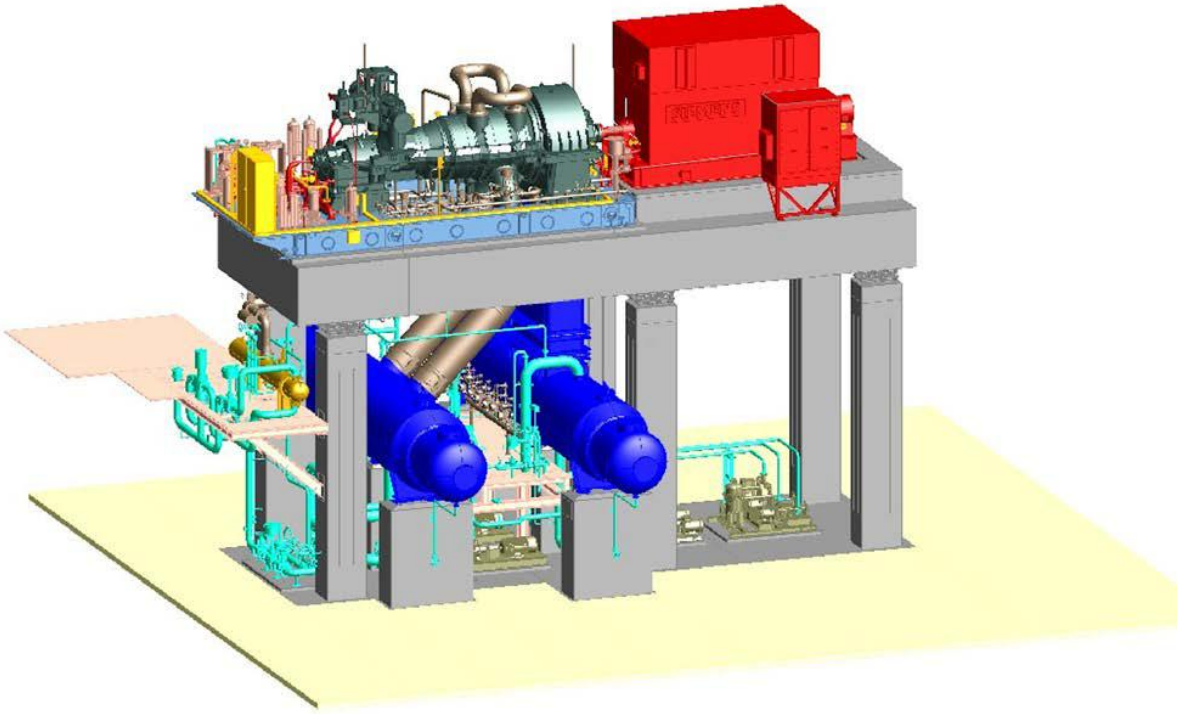
I Block 6 används en ångturbin som är integrerad med anläggningens värmekondensorer. Denna konfiguration möjliggör samtidig elproduktion och återvinning av spillvärme till fjärrvärmenätet, vilket är ett grundläggande kännetecken för kraftvärmeproduktion. Genom att utnyttja samma energikälla för två energitjänster uppnås en högre total verkningsgrad, samtidigt som driftflexibilitet med avseende på både elpris och fjärrvärmebehov förbättras. Turbinens utformning med flera avtappningar återges i Figur 1, vilka möjliggör värmeuttag för olika förvärmnings- och processteg.

SST-600 är uppbyggd med en högtrycksdel, en mellantrycksdel och en lågtrycksdel för fjärrvärmeuttag, vilket gör den särskilt lämpad för drift i kraftvärmeverk (CHP-anläggningar) där både el och värme produceras samtidigt. Genom mottrycksdrift kan turbinen leverera ånga till fjärrvärmenätet efter att den passerat genom turbinen, vilket gör att restvärmen tas tillvara istället för att kylas bort. Denna princip ger en betydligt högre totalverkningsgrad jämfört med konventionell kondenskraft(Siemens, u.å.-a).



Figur 1 - Turbin 6 med alla dess avtappningar

För att ytterligare höja anläggningens effektivitet används en lågtrycksförvärmare i cykeln. Enligt (Mälarenergi, u.å.-b) återvinns en del av ångans värmeenergi för att förvärma matarvattnet innan det återförs till pannan. Denna process minskar behovet av extern uppvärmning och förbättrar därmed den totala termiska verkningsgraden i systemet. Kombinationen av effektiv värmeåtervinning, avfallsförbränning och samproduktion av el och värme gör Block 6 till en viktig komponent i Västerås hållbara energiförsörjning.



Figur 2 - Turbin 6 med alla dess delar i helhet i 3D-format

Som komplement till den schematiska genomskärningen i Figur 1 presenteras i Figur 2 en tredimensionell översiktsmodell av turbinen, generatorn I rött samt tillhörande

kondensorsystem VK61 och VK62 i Blått och LTFV i gult. Figuren illustrerar den rumsliga uppbyggnaden av turbinanläggningen och visar hur komponenterna är placerade i förhållande till varandra, vilket underlättar förståelsen av systemets fysiska struktur. Den övre sektionen innefattar turbinen och generatorn, medan den undre sektionen visar de två kondensorerna VK61 och VK62 samt LTFV som är integrerade i kraftvärmeprocessen.

4.2 Införandet av hetvattenackumulatorn

För att öka flexibiliteten i fjärrvärmesystemet och möjliggöra en mer effektiv drift av Turbin 6 vid Block 6 byggdes ett underjordiskt hetvattenlager i ett bergrum vid Mälarenergis kraftvärmeverk i Västerås. Enligt (Mälarenergi, u.å.-a) är syftet med lagret att lagra värmeenergi i form av hett vatten under perioder med låg värmelast och frigöra den när efterfrågan ökar. Bergrummet fungerar som ett värmelager som kan kopplas till fjärrvärmenätet via värmeväxlare och styrsystem, vilket gör att produktionen av värme kan frikopplas från den momentana efterfrågan.

Lagret är placerat i ett befintligt bergrum som anpassats och tätats för att kunna lagra stora mängder hetvatten. Enligt (Mälarenergi, u.å.-a) används lagret för att lagra fjärrvärmevatten med temperaturer upp till cirka 95 °C. Kapaciteten är dimensionerad för att kunna täcka delar av stadens värmebehov under flera timmar utan att Turbin 6 behöver ändra driftläge. Detta gör det möjligt att jämna ut toppar i värmebehovet och därmed minska antalet snabba lastförändringar i kraftvärmeanläggningen.

Enligt (Mälarenergi, u.å.-a) är bergrumslagret en del av Mälarenergis arbete med att skapa en mer flexibel och hållbar energiförsörjning. Genom att kunna lagra överskottsvärme från Block 6 kan Turbin 6 köras med jämnare last, vilket förbättrar verkningsgraden och minskar slitaget på turbinen. Värmen som lagras under perioder med låg efterfrågan kan sedan återanvändas när systemet når hög belastning, vilket minskar behovet av spetslastpannor.

Lagret bidrar även till en bättre samverkan mellan el- och värmeproduktion. Enligt (Mälarenergi, u.å.-a) kan Turbin 6 fortsätta producera el med hög verkningsgrad även när värmebehovet i fjärrvärmenätet är lågt, eftersom överskottsvärmen då leds till bergrummet istället för att begränsa elproduktionen. Detta ökar både den ekonomiska och energimässiga effektiviteten i systemet. Bergrummet fungerar därmed som en energibuffert som gör det möjligt för Mälarenergi att utnyttja kraftvärmeverket på ett mer optimalt och hållbart sätt.

4.3 Driftcykler och belastningsvariationer

För att kunna tolka resultaten i senare kapitel är det viktigt att klargöra några centrala begrepp kopplade till turbinens driftbeteende. En driftcykel definieras som den period som omfattar

turbinens uppstart, drift under belastning och avställning. Antalet driftcykler under en viss tidsperiod används som ett mått på hur ofta turbinen används och hur flexibelt anläggningen körs i förhållande till el- och värmebehov.

Start/stopp-frekvensen anger hur många gånger turbinen startas och stoppas under en given tidsperiod. En hög frekvens kan indikera ett mer dynamiskt driftsätt men leder samtidigt till ökad termisk och mekanisk påfrestning på komponenter såsom turbinhjul, tätningar och ångledningar. Upprepade temperatur och tryckförändringar under start- och stopp kan ge upphov till utmattning och sprickbildning i materialet vilket på sikt påverkar livslängden.

Även under kontinuerlig drift kan turbinen utsättas för belastningsvariationer det vill säga snabba eller frekventa förändringar i ångflöde eller effektuttag. Dessa laständringar orsakar lokala temperaturgradienter och spänningar i komponenterna vilket bidrar till samma typ av materialutmattning som vid upprepade starter. Därför betraktas både antalet fullständiga driftcykler och graden av belastningsvariation som viktiga indikatorer på turbinens driftsbelastning.

Vid införandet av det underjordiska bergrumslagret för hetvatten förväntas dessa parametrar påverkas. Eftersom lagret möjliggör säsongslagring av värme kan turbinen köras mer behovsstyrt vilket kan leda till färre start- och stoppcykler men eventuellt fler laständringar beroende på elmarknadens variationer.

4.4 Driftsmönster före införandet

Före etableringen av värmelagret kännetecknades turbinen av en starkt värmelaststyrd drift, där produktionen kontinuerligt anpassades till de kortsiktiga variationerna i fjärrvärmebehovet. (Sun m.fl., 2017) beskriver att frånvaro av energilagring i kraftvärmeanläggningar systematiskt leder till en driftform där turbinen utsätts för frekventa start- och stoppförlopp, hög termisk växling och betydligt ökad mekanisk belastning. Den cykliska karaktären försämrar komponentlivslängd och reducerar både tillgänglighet och driftsäkerhet. Detta mönster återfanns tydligt i den studerade anläggningens historiska driftdata, där korta driftperioder och många omlopp mellan lastpunkter dominerade.

(Al Kindi m.fl., 2022) framhåller att termisk lagring möjliggör en strukturell frikoppling mellan värmeproduktion och elproduktion, vilket innebär att turbinen i större utsträckning kan optimeras efter elmarknadens prisvariationer. Värme kan därmed produceras när turbinen opererar mest effektivt och därefter lagras för senare leverans. Denna marknadsanpassade driftstrategi höjer både systemets ekonomiska verkningsgrad och dess förmåga att bidra med reglerkraft. Denna utveckling speglas i anläggningens ökade drifttidskoherens efter införandet av lagret.

(APPLICATIONS OF THERMAL ENERGY STORAGE IN THE ENERGY TRANSITION BENCHMARKS AND DEVELOPMENTS Public Report of IEA ECES Annex 30, 2018) betonar

att bristen på termisk flexibilitet i kraftvärmesystem utan lagring begränsar både systemnytta och marknadsintegration. Utan möjlighet att temporärt lagra överskottsvärme tvingas turbinen reglera sin last i nära realtid, vilket kraftigt minskar möjligheten att optimera el genereringen efter marknadssignaler. Detta strukturella beroende av värmebehovets dygnsprofil identifieras i litteraturen som en av de mest centrala begränsningarna i traditionella kraftvärmesystem och denna begränsning var även fullt synlig i den aktuella anläggningens drift före införandet av lagret.

4.5 Driftsmönster efter införandet

Efter implementeringen av bergrumslagret uppvisade anläggningen en avsevärt mer stabil och långsiktigt hållbar driftprofil. (Krüger m.fl., 2020)visar att införandet av termiska energilager i kraftvärmesystem signifikant minskar frekvensen av start- och stoppförlopp genom att möjliggöra en utjämning av kortsiktiga variationer i värmebehovet. Detta leder till mer sammanhängande driftperioder vid högre och jämnare belastning, vilket även framkommer tydligt i den analyserade anläggningens driftdata efter lagrets integrering.

(Sifnaios m.fl., 2023) framhåller att termisk lagring möjliggör en strukturell frikoppling mellan värmeproduktion och elproduktion, vilket innebär att turbinen i större utsträckning kan optimeras efter elmarknadens prisvariationer. Värme kan därmed produceras när turbinen opererar mest effektivt och därefter lagras för senare leverans. Denna marknadsanpassade driftstrategi höjer både systemets ekonomiska verkningsgrad och dess förmåga att bidra med reglerkraft. Denna utveckling speglas i anläggningens ökade drifttidskoherens efter införandet av lagret.

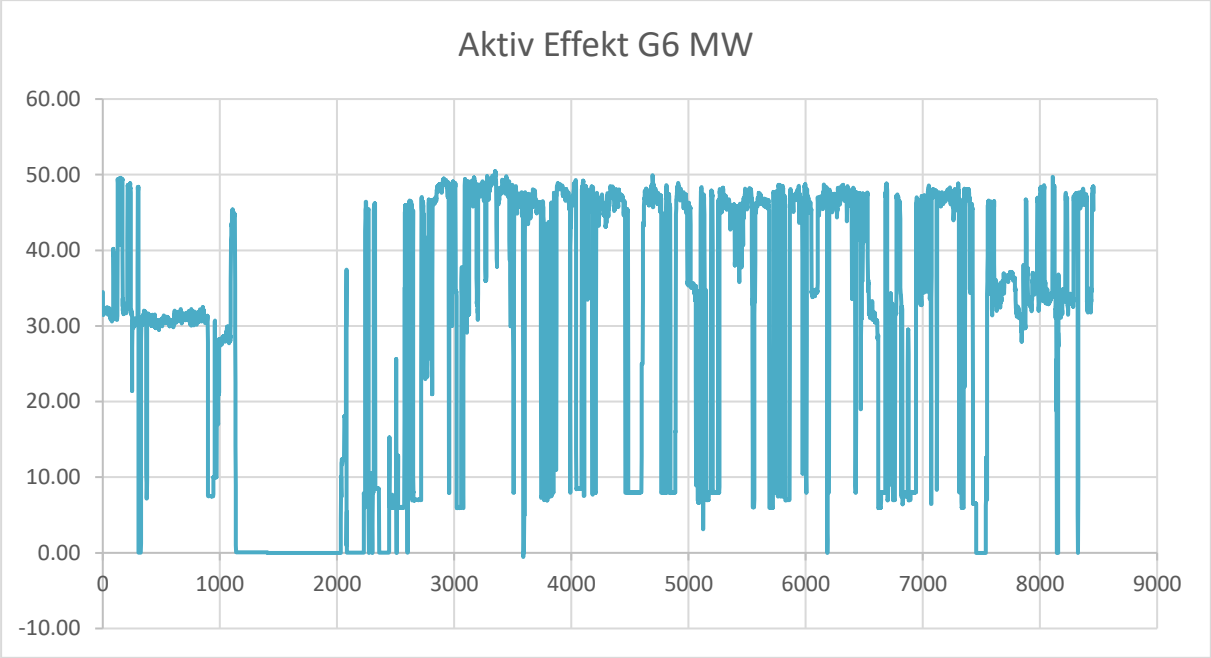
(Stevanovic m.fl., 2020) Visar vidare att användning av värmelagring reducerar lastoscillationer och förbättrar turbinens tekniska verkningsgrad genom att skapa en stabilare termisk miljö. Detta innebär att turbinen kan köras närmare sin optimala lastpunkt, vilket minskar specifik bränsleförbrukning och förbättrar elvärme-kvoten. En liknande förändring återfinns i denna anläggning, där lastprofilerna efter införandet av lagret uppvisar betydligt mindre volatilitet.

Slutligen betonar (APPLICATIONS OF THERMAL ENERGY STORAGE IN THE ENERGY TRANSITION BENCHMARKS AND DEVELOPMENTS Public Report of IEA ECES Annex 30, 2018) att energilager förbättrar systemets övergripande robusthet genom att öka förmågan att hantera effekttoppar och snabba variationer i värmebehov. Möjligheten att snabbt tillhandahålla värme från lagret utan att justera turbinlasten ökar både leveranssäkerhet och driftflexibilitet. Denna mekanism kan även ses i den studerade anläggningens beteende efter införandet av lagret, där turbinen i mindre utsträckning används som primär regulator för fjärrvärmebalansen.

5 RESULTAT

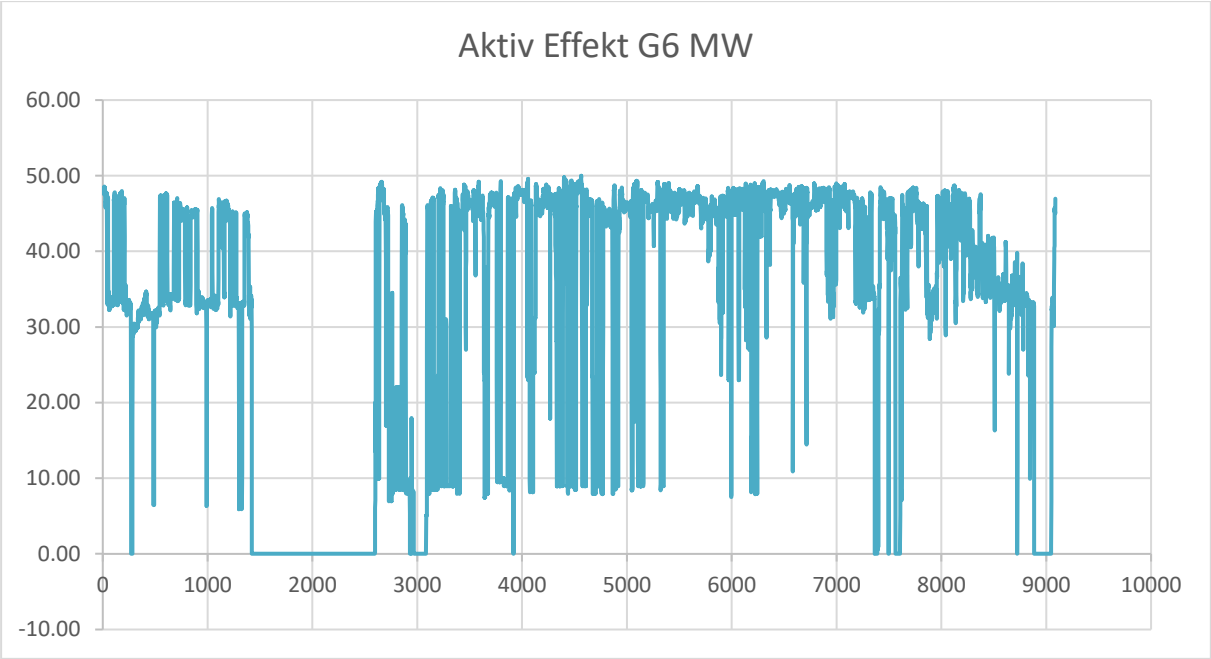
5.1 Förändringar i driftcykler och start/stopp-frekvens

För att undersöka hur turbinens driftmönster har påverkats av införandet av bergrummet har tidsserier för fjärrvärmeeffekten, eleffekten och bergrummets laddnings- och lagringsförlopp analyserats.



Figur 3 - Aktiv EL Effekt från G6 Till Stamnätet (MW) före bergrummet, med tydliga variationer och återkommande driftstopp

I figur 3 visas den aktiva effekten från G6 före bergrummet. Det framgår tydligt att elproduktionen präglades av stora variationer med flera perioder av full drift följt av totala driftstopp. Effekten pendlar mellan noll och omkring 50 MW, vilket tyder på en drift med många driftcyklar där turbinen ändra effekt och slitaget ökar. Denna typ av ojämn produktion innebär en ökad belastning på turbinen och minskad verkningsgrad. I grafen kan man se 4 längre stopp av turbinen medan det är 6 kortare stopp.



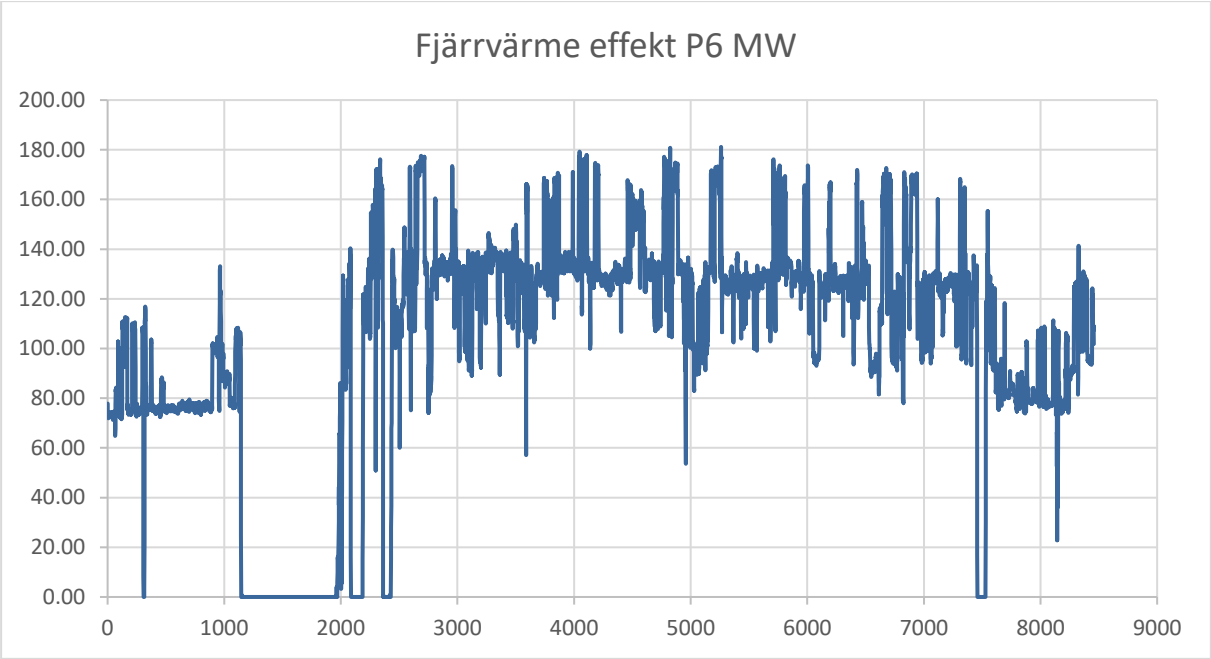
Figur 4 - Aktiv EL Effekt från G6 Till Stamnätet (MW) efter bergrummet, med tydliga variationer, men mycket stabilare än innan

Efter införandet av bergrummet, vilket illustreras i figur 4 är variationerna i elproduktionen fortfarande tydliga men har blivit betydligt mer stabila över längre tidsperioder. De längre driftstiderna vid hög effekt indikerar att turbinen körs mer kontinuerligt vilket i sin tur minskar förekomsten av längre stillestånd.

Tabell 1 - Antal korta och långa stop av elproduktionen

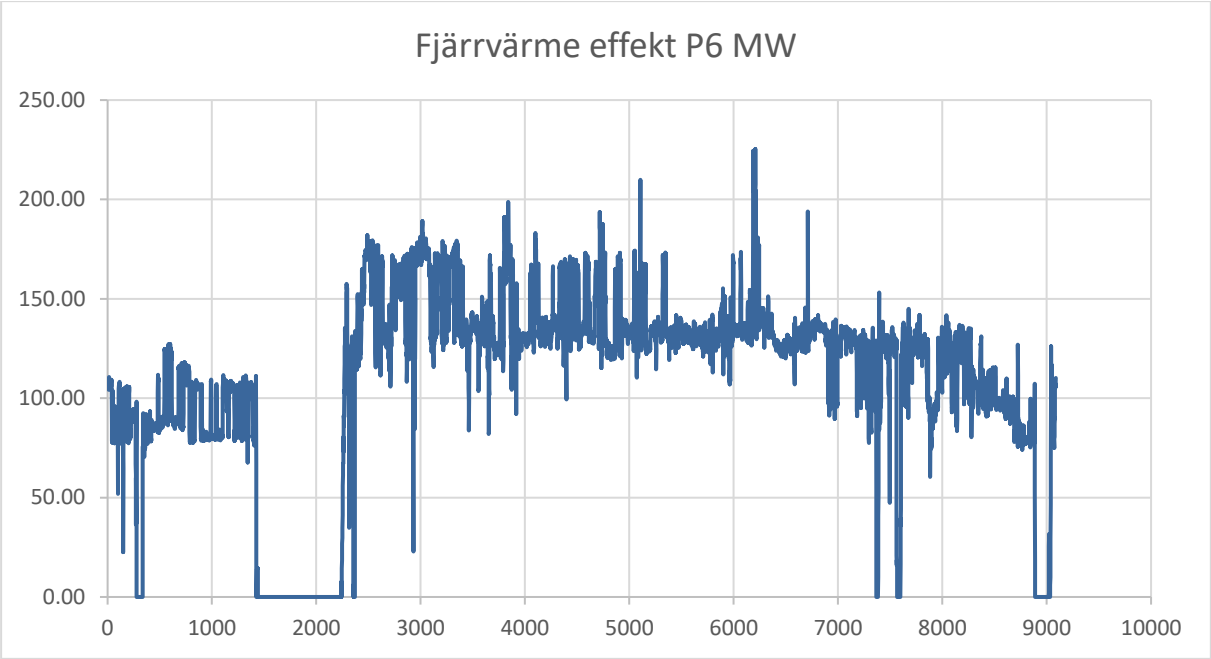
-	Före	Efter
Längre stop	4	3
Kortare stop	6	6

Antalet längre stopp har minskat från fyra till tre jämfört med före införandet medan antalet kortare stopp är oförändrat och uppgår till sex. Sammantaget innebär detta en minskning från tio till nio stopp vilket är en relativt marginell skillnad. Detta tyder på att införandet av bergrummet inte har haft någon större inverkan på det totala antalet stopp men däremot på driftmönstret. Samtidigt har antalet cykler mellan maxlast och minlast minskat vilket innebär färre belastningsväxlingar och därmed ett reducerat slitage på turbinen.



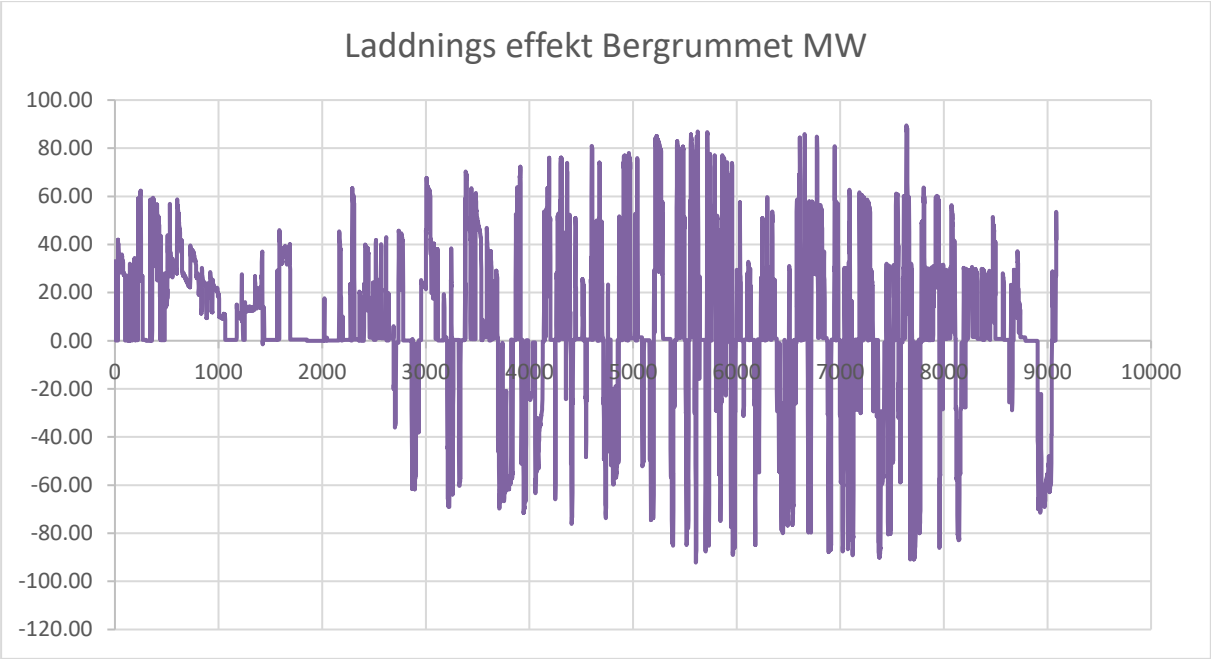
Figur 5 - Fjärrvärme Effekt från P6 till fjärrvärmenätet (MW) före bergrummet, med tydliga variationer och återkommande driftstopp

Före bergrummet figur 5 uppvisar turbinen stora variationer i fjärrvärmeeffekt med kraftiga och täta lastförändringar mellan låga och höga nivåer. Effekten varierar ofta mellan cirka 60 MW och 180 MW vilket tyder på en cyklisk drift med många korta driftperioder och frekventa start- och stoppsekvenser. I figur 3 kan man dessutom urskilja fyra längre driftstopp och ett kortare avbrott. vilket ytterligare bekräftar att turbinen under denna period startades och stoppades ofta i takt med varierande värmebehov. Denna typ av drift är typisk för ett system utan energilagring där produktionen måste följa värmebehovet direkt och snabbt anpassas till efterfrågan. Resultatet blir en högre belastning på turbinen, ökat slitage och en något sämre total verkningsgrad.



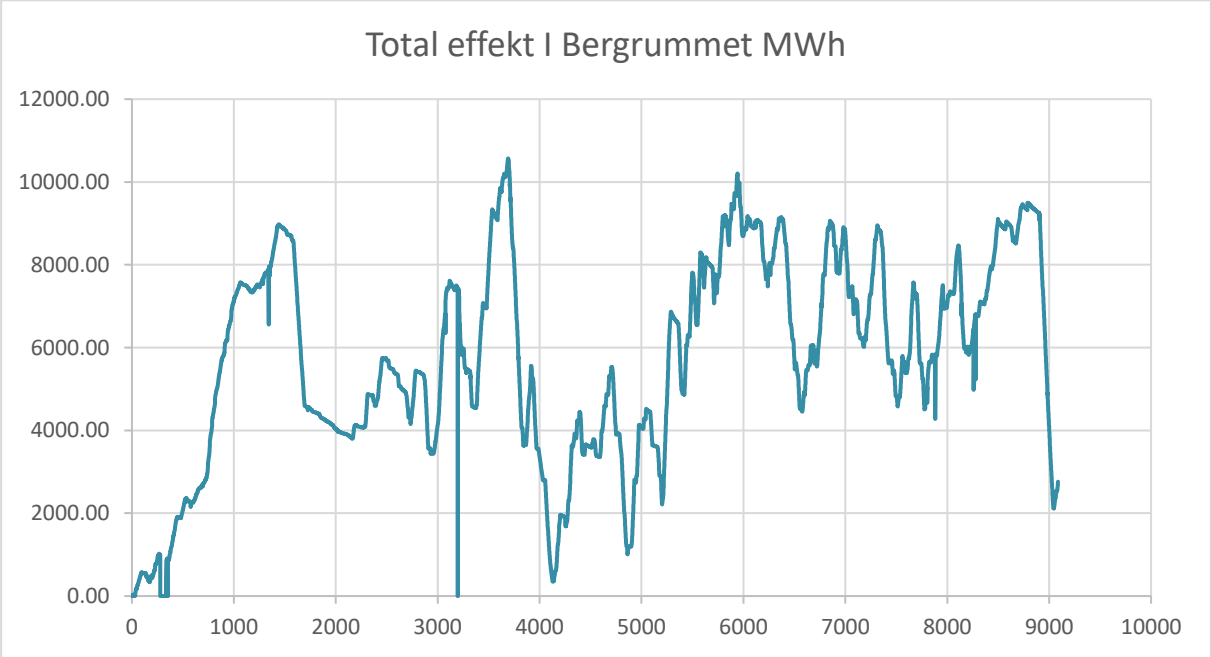
Figur 6 - Fjärrvärme Effekt från P6 till fjärrvärmenätet (MW) efter bergrummet, med tydliga, variationer men mycket stabilare än innan

Efter införandet av bergrummet figur 6 förändras driftmönstret markant. Fjärrvärmeeffekten visar nu en betydligt jämnare och stabilare kurva över tid. Variationerna är mindre, och driftperioderna är längre och mer sammanhängande. I denna figur kan man identifiera tre längre driftstopp och tre kortare avbrott. vilket visar att turbinen fortfarande stoppas vid behov men betydligt mer sällan än tidigare. Den generella nivån på fjärrvärmeeffekten har också ökat något. vilket tyder på att turbinen körs med högre genomsnittlig belastning. Den utjämnade profilen indikerar att systemet i större utsträckning använder bergrummet för att hantera variationer i värmebehovet, vilket minskar behovet av att snabbt reglera turbinens effekt.



Figur 7 - Laddnings Effekt in i bergrummet (MW), med tydliga laddningar och urladdningar

Bergrummets funktion som värmelager illustreras i figur 7, där laddningseffekten varierar kraftigt mellan positiva och negativa värden. Positiva värden visar perioder då bergrummet laddas, alltså när överskottsvärme lagras, medan negativa värden motsvarar urladdning – när lagrad värme återförs till fjärrvärmenätet. Den växlande profilen bekräftar att lagret används aktivt i driften för att jämna ut variationer och balansera energiflödet.



Figur 8 - Total effekt i Bergrummet (MWh), Med tydliga täcken på att det laddas och urladdas

I figur 8 visas den totala ackumulerade effekten i bergrummet. Här framgår att lagrets kapacitet utnyttjas återkommande och att lagernivån varierar mellan 0 och cirka 10 000 MWh. Detta motsvarar ungefär 10 GWh lagrad energi, vilket kan täcka flera dygns fjärrvärmebehov för Västerås under normala vinterförhållanden. Denna effektkurva visar att lagret inte enbart

används som buffert under enstaka timmar, utan som ett strategiskt verktyg för att förskjuta värmeproduktion i tiden.

Sammantaget visar resultaten att införandet av bergrummet har lett till stabilare och mer optimerad drift. Turbinen körs med färre längre driftstopp, jämnare lastnivåer och längre driftperioder. Även om kortare avbrott fortfarande förekommer, verkar de främst vara kopplade till normal laststyrning snarare än tekniska störningar. Denna förändring har minskat variationerna i både el- och värmeeffekt och därmed förbättrat den övergripande driftflexibiliteten och verkningsgraden.

5.2 Påverkan på medeleffekt och verkningsgrad

För att analysera hur införandet av bergrummet påverkat turbinens prestanda har medeleffekter och förhållandet mellan el- och värmeproduktion (α) beräknats. Nyckeltalet α anger andelen elproduktion i förhållande till fjärrvärmeproduktionen och används som ett mått på turbinens elutbyte i kraftvärmeprocessen.

Resultaten visar att α minskat något, från 0,37 till 0,35, vilket betyder att en något större andel av ångenergin används till värmeproduktion efter införandet av bergrummet. Samtidigt har både den genomsnittliga el- och värmeeffekten ökat, vilket indikerar ett förbättrat kapacitetsutnyttjande och en mer flexibel energifördelning.

Tabell 2 - Medelvärden för centrala driftparametrar före och efter införandet av bergrummet under drifttid

-	alfa	Ntot(medel)	El MW	Fjärrvärme MW	Bortkylt MW	Effekt till bergrummet MW
Före Bergrummet	0.37	98.06	32.40	117.07	2.03	-
Efter Bergrummet	0.35	99.28	37.71	123.64	1.92	5.39

Samtidigt visar driftdata att både el- och fjärrvärmeeffekten ökat efter införandet av bergrummet. Den genomsnittliga eleffekten steg från 32,40 MW till 37,71 MW, vilket motsvarar en ökning på cirka 16 %. Även fjärrvärmeeffekten ökade markant, från 117,07 MW till 123,64 MW. Den totala bortkylda minskade också. Vilket är en konsekvens av utomhus temperaturen under sommaren.

En viktig skillnad jämfört med tidigare driftmönster är att en ny effektgren tillkommit: 5.39 MW leds i snitt till bergrummet, vilket visar att en betydande del av energin nu används till aktiv värmelagring. Detta påverkar också alfa-värdet genom att mer energi omdirigeras från elproduktion till lagring och fjärrvärme.

Sammanfattningsvis indikerar resultaten att turbindriften efter införandet av bergrummet blivit mer flexibel och bättre anpassad till det samlade värmebehovet, samtidigt som elproduktionen ändå har kunnat öka. Den marginella minskningen i alfa förklaras inte av försämrad turbinprestanda, utan av ett förändrat energiflöde där större mängder energi används för lagring och fjärrvärmeproduktion. Systemet uppvisar därmed ett förbättrat kapacitetsutnyttjande och en mer balanserad driftstrategi.

Tabell 3 - Beräknade verkningsgrad på turbin före och efter bergrummet

-	Före	Efter
Verkningsgrad	65.57	68.60
Verkningsgrad med bränsle	23.24	23.92

Beräkningen av turbinens verkningsgrad före och efter införandet av bergrummet visar en tydlig förbättring. Som framgår av Tabell 3 ökade verkningsgraden från 65,57% till 68,60%, vilket motsvarar en förbättring på ungefär 3 procentenheter. Denna ökning indikerar att turbinen efter införandet av värmelagret har kunnat arbeta närmare sina optimala driftsförhållanden.

Utöver den interna turbinverkningsgraden har även verkningsgraden med bränsle analyserats, vilket inkluderar hela kedjan från tillförd bränsleenergi till producerad el. Som visas i Tabell 3 ökade denna verkningsgrad endast marginellt, från 23,24% till 23,92%. Den relativt lilla förändringen är förväntad eftersom förbättringarna från bergrummet framför allt påverkar turbinens arbetsförhållanden, inte pannans verkningsgrad eller bränsleinsatsen.

Trots detta kan den svaga ökningen tolkas som ett resultat av att anläggningen efter införandet av värmelagret kan utnyttja den producerade ångan något mer effektivt. Den stabilare drift som möjliggörs av bergrummet leder till att en större del av den bränslebaserade energi som matas in i systemet omsätts till el, även om effekten på den totala bränslebaserade verkningsgraden är betydligt mindre än förbättringen i själva turbinen.

En sannolik förklaring är att bergrummet minskar behovet av att anpassa turbindriften efter kortsiktiga variationer i värmelast. När överskottsvärme kan lagras istället för att behöva dumpas i kondensorerna kan en större andel av ångans entalpidrop utnyttjas i själva turbinen, vilket ger högre elproduktion per kilogram ånga. Detta överensstämmer med litteratur som lyfter att värmelagring bidrar till att utjämna driften och därigenom öka verkningsgraden i mottryckssystem genom mer stabilt ångflöde och minskad delbelastningsdrift.

Den förbättrade verkningsgraden antyder att turbinen efter införandet av bergrummet inte enbart körs jämnare utan också mer elektricitets optimerat, vilket även stödjer resultaten från analysen av medeleffekten. Sammantaget visar detta att värmelagringen haft en positiv teknisk påverkan på turbinens omvandlingseffektivitet.

Tabell 4 - skillnaden mellan före och efter bergrummet när man korrigerar för graddagar

-	Graddagar	Effekt (Mwh)	Korrigerat (Mwh)
Före	3680	865861	-
Efter	3287	869498	973486

Tabellen visar skillnaden i energianvändning före och efter installationen när förbrukningen korrigeras för variationer i utomhustemperatur via graddagar. Antalet graddagar minskar från 3680 till 3287 vilket innebär att perioden efter installationen varit varmare och därmed borde krävt mindre energi för uppvärmning. Trots detta ökar den faktiska energianvändningen något från 865 861 MWh till 869 498 MWh.

När energiförbrukningen korrigeras för graddagar framträder en ännu tydligare skillnad mellan perioderna före och efter installationen. Den temperaturjusterade energianvändningen efter installationen uppgår till 973 486 MWh vilket är avsevärt högre än den faktiska förbrukningen före installationen. Detta motsvarar en ökning på ungefär 12 procent i producerad energi. Resultatet indikerar att den ökade energianvändningen inte kan förklaras av klimatvariationer eftersom graddagskorrigeringen redan justerar för skillnader i utomhustemperatur mellan perioderna.

De observerade graddagarna kan även sättas i relation till Sveriges medianvärde för graddagar, som uppgår till 9724.64 graddagar för perioden 1970–2020 enligt (CEIC, u.å.). Jämförelsen visar att båda analysperioderna ligger inom ett normalt spann för svenskt klimat. Detta stärker slutsatsen att den ökade energianvändningen inte kan förklaras av avvikande klimatförhållanden eftersom variationer i utomhustemperatur redan beaktas genom graddagskorrigeringen.

En möjlig förklaring till den högre energiproduktionen kan vara driftsrelaterade faktorer snarare än förändringar i själva anläggningen. Till exempel kan den ökade produktionen bero på att färre kompletterande eller alternativa anläggningar behövt startas under perioden efter installationen. Om huvudsystemet har körts i större utsträckning exempelvis tack vare högre tillgänglighet eller förändrade driftstrategier kan detta resultera i en högre total energiproduktion utan att den faktiska energieffektiviteten nödvändigtvis har förbättrats.

5.3 Turbinens roll som elproducent

Analysen av turbinens elproduktion före och efter införandet av bergrummet visar en tydlig förändring i hur tillgänglig effekt har utnyttjats. Den outnyttjade effekten minskade från 13,0 MW till 11,5 MW. vilket motsvarar en förbättring på cirka 1,5 MW i genomsnittlig effektanvändning. Samtidigt ökade den totala mängden outnyttjad energi något, vilket kan kopplas till att turbinen körts under längre perioder med lägre lastnivåer.

För att beräkna den ekonomiska konsekvensen av den outnyttjade elproduktionen användes ett genomsnittligt rörligt elpris på 58,57 öre/kWh, hämtat från Vattenfalls prisstatistik för elområde SE3 under aktuell tidsperiod. Resultatet presenteras i tabellen nedan (Vattenfall, u.å.).

Tabell 5 - Jämförelse av energiproduktion och ekonomiska nyckeltal före och efter bergrummets införande

-	MWh	MW	Förlorad inkomst	medelpris (kwh)
Före Bergrummet	83681.25	13.02	49012575.11	58.57
Efter Bergrummet	84743.92	11.46	49634983.10	58.57

Resultatet tyder på att införandet av bergrummet har bidragit till en mer flexibel driftstrategi, där turbinen i större utsträckning kan anpassa sin produktion efter värmebehov och elpris. Den minskade outnyttjade effekten visar att anläggningen har förbättrat sitt kapacitetsutnyttjande, och att en större del av tillgänglig ånga har kunnat passera genom turbinen istället för att ledas direkt till fjärrvärmenätet.

Sammantaget indikerar analysen att turbinens roll som elproducent har stärkts efter införandet av bergrummet. Även om den totala mängden outnyttjad energi inte minskat nämnvärt, har turbinen fått ökad flexibilitet och bättre anpassningsförmåga till variationer i elsystemets efterfrågan, vilket i längden kan bidra till både ökad systemnytta och förbättrad ekonomi för Mälarenergi.

5.4 Identifierade driftoptimeringar

Resultaten visar att Turbin 6 i dag redan körs med hänsyn till elprisets variationer, vilket är en viktig del i Mälarenergis produktionsstrategi. Genom att anpassa driftmönstret efter prisutvecklingen kan anläggningen producera mer el under timmar då marknadspriset är högt och minska produktionen när priset är lågt. Det som tidigare begränsat denna strategi har varit att fjärrvärmeproduktionen måste ske samtidigt som elproduktionen, vilket gjort turbinen beroende av värmebehovet i nätet.

Med införandet av bergrummet har denna begränsning till stor del försvunnit. Möjligheten att lagra värme innebär att turbinen kan köras med högre och jämnare ångflöde även när värmebehovet är lågt, eftersom överskottsvärmen kan ledas till lagret i stället för att kylas bort. Det skapar förutsättningar att producera mer el när elpriserna är höga utan att riskera överproduktion av värme. Samtidigt kan värmen som lagrats i bergrummet utnyttjas senare under dygn eller veckor med hög efterfrågan.

En till möjlig optimering handlar om att justera start- och stopplogiken för turbinen. I nuläget förekommer fortfarande flera kortare avbrott, medan de längre stoppen har minskat. Genom att i styrningen prioritera att undvika långa stillestånd och i stället låta bergrummet hantera

snabba variationer i värmebehovet, kan turbinen hållas i drift under längre sammanhängande perioder. Detta minskar antalet uppstarter, vilket i sin tur reducerar slitaget och förbättrar den genomsnittliga verkningsgraden.

Vidare bör möjligheten att öka turbinens minimallast undersökas. Resultaten visar att anläggningen i dag ofta körs med relativt låg belastning under vissa perioder, trots att bergrummet skulle kunna ta emot överskottsvärmen. Genom att höja den lägsta driftpunkten kan turbinen arbeta mer stabilt, vilket ofta leder till bättre bränsleeffektivitet och lägre andel bortkyld energi.

Bergrummet bör även fortsätta utvecklas som en aktiv buffert i styrningen. Data från laddnings- och urladdningsprofiler visar att lagret används kontinuerligt, men styrningen kan förbättras så att snabba förändringar i värmebehov i första hand hanteras via lagret, snarare än genom att ändra turbinens last. En sådan strategi gör att turbinen kan köras med mer konstant ångflöde, vilket ger högre verkningsgrad och minskat slitage på systemet.

Sammanfattningsvis visar resultaten att Turbin 6 i dagsläget fungerar stabilt och effektivt i kombination med bergrummet, men att det finns potential att ytterligare förbättra driftstrategin genom ökad användning av lagret i styrningen och en mer flexibel lastoptimering. Dessa åtgärder skulle kunna bidra till både ökad systemeffektivitet och förbättrad ekonomi för Mälarenergi, samtidigt som de stärker anläggningens roll som flexibel resurs i energisystemet.

6 DISKUSSION

6.1 Tolkning av resultat i relation till litteratur

Resultaten från denna studie visar tydligt att införandet av bergrummet för hetvattenlagring vid Mälarenergi har haft en märkbar inverkan på Turbin 6:s driftmönster. Det mest framträdande är att antalet start- och stoppcykler har minskat, samtidigt som driften blivit mer stabil över längre perioder. Den genomsnittliga verkningsgraden har ökat något, vilket indikerar att turbinen nu körs mer kontinuerligt nära optimala driftförhållanden. Samtidigt har den årliga elproduktionen minskat något, vilket sannolikt beror på att en större andel av pannans värmeproduktion nu går till fjärrvärmesystemet via lagring, snarare än genom turbinen.

6.1.1 Driftcyklar

Resultaten visar att turbinen uppvisar ett tydligt förändrat driftmönster efter införandet av det underjordiska värmelagret. Före lagrets införande karaktäriserades driften av frekventa start- och stoppcykler, särskilt under vår- och höstsäsongerna då värmebehovet varierade kraftigt. Dessa variationer tvingade anläggningen att anpassa produktionen snabbt, vilket innebar att turbinen ofta kördes under delbelastning eller i korta driftscykler. Detta påverkade inte bara verkningsgraden negativt utan ökade även det mekaniska slitaget på kritiska komponenter såsom lager, tätningar och ventiler.

Efter att bergrummet togs i drift har driften blivit avsevärt jämnare. Det ackumulerade värmelagret fungerar som en buffert mellan produktion och konsumtion, vilket gör att turbinen inte längre behöver följa snabba förändringar i värmebehovet. Genom att lagra överskottsenergi vid låg belastning och frigöra denna vid hög belastning kan pannans och turbinens drift optimeras mot ett mer stabilt lastintervall. Denna förändring överensstämmer med resultaten i tidigare studier som visar att energilager kan reducera start- och stoppfrekvensen med upp till 20–40 % i kraftvärmesystem av liknande typ.

För Mälarenergis del innebär detta att Turbin 6 kan arbeta närmare sin nominella driftpunkt under större delen av året. Minskningen av cykler ger både en ökad livslängd på maskinutrustningen och minskade underhållsbehov, särskilt gällande termisk utmattning och smörjoljebaserade system. Den stabilare driften förbättrar dessutom möjligheterna att förutsäga underhållsintervall baserat på faktiska drifttimmar snarare än antalet cykler, vilket i sig bidrar till en mer kostnadseffektiv driftstrategi.

Det kan även noteras att reduktionen i start/stopp-cykler bidrar till förbättrad systemdynamik i hela fjärrvärmenätet. Genom att undvika snabba temperaturvariationer minskar risken för termiska spänningar i rörsystemet, vilket i längden påverkar hela anläggningens driftsäkerhet. Sammanfattningsvis har energilagrets införande lett till en tydlig övergång från cyklisk till mer kontinuerlig turbindrift, vilket stärker både tillgänglighet och prestanda.

6.1.2 Verkningsgrad

Ett centralt resultat av studien är den positiva inverkan på turbinens genomsnittliga verkningsgrad. Före införandet av bergrummet kördes turbinen ofta i delbelastning, vilket medförde lägre utnyttjande av ångans entalpi och högre relativa värmeförluster i kondensationsstegen. Med införandet av värmelagret har driftprofilen förskjutits mot längre perioder med högre och jämnare effektuttag, vilket resulterat i en ökning av den genomsnittliga el verkningsgraden.

När turbinen körs i sitt optimala lastintervall är förhållandet mellan elproduktion och tillförd ångenergi som mest gynnsamt. Under perioder med låg värmelast kan överskottsvärme lagras istället för att tvinga ner pannans drift till ineffektiva nivåer. Detta innebär att turbinen kan hållas i drift vid stabilt tryck och temperatur, vilket minimerar energiförluster orsakade av frekvent reglering. Samtidigt möjliggör värmelagret en mer strategisk planering av

elproduktionen i förhållande till marknadspriser, vilket ytterligare förbättrar den totala energiutbytet.

Beräkningarna i denna studie visar att turbinen, efter införandet av bergrummet, uppnår en genomsnittlig verkningsgrad som ligger något högre än tidigare, trots att den totala drifttiden minskat något till följd av den ökade flexibiliteten. Detta indikerar att anläggningen körs mer effektivt snarare än mer intensivt. Litteraturen stödjer denna slutsats där termisk energilagring i CHP-system öka den årliga elverkningsgraden med 2–4 % tack vare förbättrad lastfördelning och minskat delbelastningsdrift.

Ytterligare en aspekt är minskad bränsleförbrukning per producerad MWh el, vilket innebär att även den specifika koldioxidbelastningen reduceras. Detta stärker Mälarenergis miljöprofil och bidrar till företagets mål om fossilfri drift senast 2035. Den förbättrade verkningsgraden har således både tekniska och klimatmässiga fördelar, vilket gör energilagringen till en strategiskt viktig investering.

6.1.3 Marknadsdeltagande

Efter införandet av bergrummet har Mälarenergi fått nya möjligheter att agera mer flexibelt på den svenska elmarknaden. Tidigare var Turbin 6 främst begränsad till att producera el som en biprodukt av värmebehovet, men tack vare den utökade lagringskapaciteten kan elproduktionen nu optimeras utifrån elpriser snarare än enbart värmelast. Detta innebär att anläggningen i större utsträckning kan delta i stödtjänstmarknader, exempelvis FCR där snabb reglerbar kapacitet efterfrågas.

Bergrummets buffertfunktion gör det möjligt att temporärt minska värmeproduktionen och istället lagra energin när elpriserna är låga, för att sedan frigöra värme och öka elproduktionen när marknadspriserna stiger. Denna strategi motsvarar det som i litteraturen kallas ”load shifting” eller ”heat-load optimization”, och används i flera europeiska kraftvärmeanläggningar som integrerat storskalig termisk lagring. Effekten blir att anläggningen kan bidra till att balansera elsystemet och samtidigt maximera intäkterna från elförsäljningen.

En ytterligare strategisk fördel är möjligheten att köra samtliga tre pannor mot värmelagret vid situationer med högt nationellt elbehov, exempelvis under kalla och vindstilla perioder då både vind- och solkraft bidrar i begränsad omfattning. Genom att ladda värmelagret och samtidigt avlasta fjärrvärmenätet kan turbinen köras med högre och mer stabil elproduktion under dessa kritiska timmar. Denna flexibilitet är dock begränsad av bergrummets maximala laddeffekt som uppgår till cirka 90 MW vilket ställer krav på planering och optimering av driftstrategin.

För Mälarenergi skapar detta nya affärsmöjligheter men också tekniska krav. En mer marknadsstyrd drift kräver utvecklade styrstrategier och noggrann optimering mellan pannans last, turbins prestanda och lagrets energinivå. Samtidigt kan denna flexibilitet bidra

till ökad ekonomisk hållbarhet genom att bolaget kan producera el när prisnivåerna är gynnsamma och minska produktionen när marginalerna är låga.

Sammanfattningsvis innebär bergrummets införande att Mälarenergi ytterligare stärkt sin roll på den svenska elmarknaden genom att kunna leverera reglerbar och flexibel elproduktion. Möjligheten att använda flera pannor i kombination med storskalig värmelagring gör kraftvärmeanläggningen särskilt värdefull vid effekttoppar i elsystemet. Denna utveckling ligger väl i linje med nationella energimål där kraftvärmeverk ses som en viktig komponent i övergången till ett mer förnybart, robust och stabilt elsystem.

6.2 Tekniska implikationer för Mälarenergi

Resultaten från studien har flera intressanta tekniska implikationer för Mälarenergi. Nedan diskuteras dessa ur ett drift- och underhållsperspektiv, samt med fokus på styrstrategier och systemflexibilitet.

6.2.1 mekanisk belastning och driftsäkerhet

En tydlig konsekvens är den minskade start- och stoppfrekvensen för turbinen vilket innebär lägre mekanisk belastning och potentiellt längre underhållsintervall. Detta kan minska risken för oplanerade driftstopp särskilt under högbelastningsperioder vintertid. Samtidigt bör det noteras att minskad cykling kan påverka systemets reaktionsförmåga vid snabba förändringar i efterfrågan. vilket kräver noggrann övervakning och eventuell justering av driftsstrategin.

Lagringsmöjligheten möjliggör en mer flexibel planering av både pann- och turbindrift. Detta innebär att överskottsvärme kan lagras och användas vid behov, vilket minskar ineffektiv drift vid låg last. I diskussionen bör dock beaktas att lagringens kapacitet och temperaturhållning påverkar hur effektivt energin faktiskt kan nyttjas. Det är därför viktigt att framtida analyser inkluderar både tekniska begränsningar och ekonomiska konsekvenser av olika lagringsstrategier.

6.2.2 Ombyggnader vid värmelagring

Mälarenergi beslutade att använda bergrummet som ett värmebatteri konstaterades att den mest effektiva laddningsstrategin var att tillföra värme via block 6. För att ett stabilt termiskt skikt ska kunna etableras mellan den övre och nedre delen av bergrummet krävs en laddningstemperatur över 95 °C. Laddning under denna temperatur under längre perioder leder till att temperaturskiktet bryts ned vilket i sin tur medför att bergrummets urladdningskapacitet försämras.

För att möjliggöra en laddningstemperatur över 95 °C installerades en bypass ledning förbi VK62. På så sätt säkerställs att bergrummet kontinuerligt kan laddas med tillräckligt hög

temperatur. Det är dock viktigt att poängtera att en bypass av VK62 inte innebär att fjärrvärmeflödet genom värmekondensorn helt elimineras flödet fördelas istället enligt den mest gynnsamma vägen.

Denna driftstrategi påverkar dock turbinens och värmekondensorernas arbetsförhållanden. Turbinen utsätts för ett ökat mottryck i det sista steget vilket resulterar i en marginell minskning av effektuttaget och en viss verkningsgradsförlust. Denna påverkan kan bedöms ligga i storleksordningen 1–1,5 MW. Vidare reduceras värmeöverföringen i VK62 avsevärt vilket kan leda till ojämn temperaturfördelning och därmed risk för långsiktiga material- och driftrelaterade skador. Samtidigt ökar belastningen på VK61, som får ta en större andel av värmeöverföringen, vilket även där medför en ökad termisk påfrestning och potentiell skaderisk.

Det är således tydligt att beslutet att bypassa VK62 innebär medvetna avvägningar där minskat effektuttag, sänkt verkningsgrad och ojämn temperaturbelastning accepteras för att möjliggöra optimal laddning av bergrummet. Dessa driftförhållanden är dock tidsbegränsade och förekommer endast under aktiva laddningsperioder. Under övriga driftperioder återgår turbinen och värmekondensorerna till normala, mer balanserade driftförhållanden.

6.2.3 Möjligheter till avancerade styrstrategier

Införandet av energilager möjliggör implementering av modellbaserad prediktiv styrning MPC där realtidsdata och prognoser för elpris, värmebehov och lagernivåer kan integreras i styrstrategin. MPC kan användas för att optimera samspelet mellan panna, turbin och lager genom att fatta beslut baserade på ett framtida tidsperspektiv snarare än enbart på aktuella driftförhållanden.

Ur ett tidsperspektiv arbetar MPC typiskt med en prediktionshorisont som kan sträcka sig från timmar till dygn, beroende på systemets dynamik och tillgången på tillförlitliga prognoser. Detta gör det möjligt att exempelvis ladda energilagret vid låga elpriser och hög tillgänglig effekt, för att därefter utnyttja lagret under perioder med högre elpris eller ökat värmebehov. På så sätt kan både ekonomisk avkastning och driftsäkerhet förbättras.

Samtidigt är det viktigt att poängtera att MPC ställer höga krav på modellernas noggrannhet och kalibrering. Felaktiga antaganden om systemets dynamik, verkningsgrader eller begränsningar kan leda till suboptimal eller instabil drift. Även kvaliteten på prognoser för elpris och last är avgörande, särskilt vid längre prediktionshorisonter där osäkerheten ökar.

Tekniskt sett bidrar MPC till ett mer flexibelt och robust system som bättre kan hantera variationer i både efterfrågan och elpris. Den ökade flexibiliteten kan även underlätta integration av förnybara energikällor samt skapa ekonomiska incitament genom smart lastbalansering och reducerade effektvariationer. Samtidigt medför den ökade komplexiteten i styrstrategin nya utmaningar, där fler variabler och begränsningar måste övervakas. Detta

ställer ökade krav på systemövervakning, IT-infrastruktur och operatörskompetens, vilket bör beaktas vid en eventuell implementering.

6.2.4 Sammanfattning tekniska implikationer

Införandet av energilagring har tydligt potential att öka Mälarenergis driftsäkerhet, effektivitet och flexibilitet. Minskad cykling minskar mekanisk belastning, medan lagringsmöjligheten möjliggör mer långsiktig och optimerad drift. Möjligheten att implementera avancerade styrstrategier. såsom MPC öppnar för ytterligare effektivisering, men ställer krav på noggrann modellering och övervakning. Samtidigt kvarstår tekniska och operativa begränsningar som bör beaktas vid fortsatt utveckling av systemet. Sammantaget visar diskussionen att denna tekniska lösning skapar goda förutsättningar för framtida flexibilitet och optimering, men att implementering och drift kräver fortsatt noggrann planering.

6.3 Begränsningar i studien

Trots att studien visar tydliga trender och intressanta resultat bör slutsatserna tolkas med viss försiktighet. Flera faktorer begränsar generaliserbarheten och noggrannheten i analysen, och dessa diskuteras nedan.

6.3.1 Tidsperiodens omfattning

En betydande begränsning är studiens tidsram, som omfattar tolv månader före och efter införandet av energilagret. Denna relativt korta period kan ge en begränsad bild av systemets långsiktiga drift och prestanda. Till exempel fångar den inte sällsynta men viktiga händelser som extremt kalla vintrar, ovanliga elpristoppar eller längre perioder av låg belastning. Därför bör slutsatser om energieffektivitet, kapacitetsutnyttjande och styrstrategiers effektivitet tolkas som preliminära, och kompletteras med längre tidsserier i framtida studier.

6.3.2 Yttre faktorer och variationer

Resultaten kan påverkas av externa variabler som ligger utanför anläggningens kontroll. Exempelvis kan vädervariationer, förändringar i värmebehov, bränslemix eller elpris påverka både driftstrategier och teknisk prestanda. Eftersom dessa faktorer inte har isolerats i analysen är det svårt att avgöra hur mycket av de observerade förbättringarna som direkt kan tillskrivas energilagret och optimerad drift, och hur mycket som är en effekt av yttre omständigheter. Detta pekar på vikten av att i framtida studier använda statistiska metoder eller kontrollperioder för att minska effekterna av externa faktorer.

6.3.3 Datakvalitet och mätosäkerhet

Datakvaliteten är en annan potentiell begränsning. Under vissa perioder, särskilt under inkörningsfasen av bergrummet, har loggningen varit ofullständig eller inkonsekvent. Detta kan leda till osäkerhet i analysen, särskilt vid beräkning av verkningsgrad och kapacitetsutnyttjande. Dessutom kan sensorer ha kalibreringsfel eller driftproblem som inte har identifierats. För att öka noggrannheten i framtida analyser rekommenderas kontinuerlig övervakning och validering av mätdata samt användning av redundanta mätpunkter där det är möjligt.

6.3.4 Modellantaganden

Vid beräkning av verkningsgrad och energieffektivitet har förenklade modeller använts för bränsleeffektivitet och värmeproduktion. Dessa modeller antar exempelvis konstanta förluster och förenklade driftförhållanden, vilket kan skilja sig från verklig drift. Detta medför osäkerhet i beräknade värden och kan påverka slutsatser om systemets faktiska prestanda. Framtida studier bör därför komplettera modellerna med mer detaljerad mätdata, inklusive flöden, temperaturer och tryckförhållanden, för att öka precisionen och säkerheten i analysen.

6.3.5 Sammanfattning begränsningar

Sammanfattningsvis ger studien värdefulla insikter om effekterna av energilagring och optimerad drift, men begränsningar kopplade till tidsperiod, externa faktorer, datakvalitet och modellantaganden innebär att resultaten bör tolkas med försiktighet. Begränsningarna identifierar också viktiga områden för framtida forskning, såsom längre mätperioder, bättre kontroll av externa variabler, förbättrad mätning och mer avancerade modelleringstekniker. Att ta hänsyn till dessa faktorer kan bidra till mer robusta och generaliserbara slutsatser om tekniska och ekonomiska effekter av energilagring.

6.4 Möjligheter för framtida tillämpningar

Införandet av det underjordiska värmelagret vid Mälarenergi representerar inte bara en lokal teknisk innovation utan även en modell för hur kraftvärmesystem kan utvecklas mot ökad flexibilitet och systemnytta. Resultaten från denna studie visar att värmelagring i kombination med styrbar turbindrift skapar en robust grund för framtida tillämpningar inom både energiteknik, systemplanering och marknadsintegration.

6.4.1 Integration med förnybar energi och elsystemet

En av de mest betydande framtida tillämpningarna är möjligheten att använda hetvattenlager som ett verktyg för att balansera variabel elproduktion från vind- och solkraft. I takt med att andelen väderberoende kraft ökar blir behovet av flexibilitet i energisystemet alltmer kritiskt. Genom att lagra överskottsvärme när elpriserna är låga och produktionen av förnybar el är hög, kan kraftvärmeverk med energilager bidra till att stabilisera elnätet. Värmelagret kan

därmed fungera som en ”termisk batteribank”, vilket minskar behovet av snabba pannregleringar och samtidigt frigör kapacitet när elsystemet behöver det mest. Detta möjliggör en högre grad av förnybar integration utan att kompromissa med försörjningstryggheten en förutsättning för det fossilfria energisystem som Sverige strävar efter till 2045.

6.4.2 Samverkan med nya tekniker och sektorkoppling

En annan framtida tillämpning ligger i integrationen mellan fjärrvärme, el och andra energisektorer. Genom att kombinera värmelager med värmepumpar, elektrolysörer och koldioxidinfångning (CCU/CCS) kan restenergi utnyttjas mer effektivt.

Till exempel kan överskottsvärme från elektrolys eller industriella processer lagras i bergrummet och sedan återanvändas i fjärrvärmenätet. På motsvarande sätt kan fjärrvärmesystemet bistå vid produktion av vätgas genom att leverera lågtempererad värme under tider med låg efterfrågan. Denna typ av sektorkoppling förväntas bli en viktig del av framtidens energisystem där olika energibärare samverkar för att maximera effektivitet och minska klimatpåverkan.

Ytterligare en möjlig utvecklingsinriktning är integration av avancerade förbehandlingstekniker för bränsle. Exempelvis kan termokemisk avskiljning, optisk sortering eller pyrolysbaserade upparbetningssteg användas för att extrahera plaster och andra fraktioner som innehåller miljö eller hälsofarliga ämnen innan förbränning. Genom att avlägsna dessa komponenter skulle emissioner av exempelvis dioxiner, tungmetaller och mikroplastpartiklar reduceras samtidigt som bränslekvaliteten förbättras och förbränningsprocessen stabiliseras. Detta område bedöms vara tekniskt relevant att utreda vidare i takt med att krav på utsläppsminimering och cirkularitet skärps.

6.4.3 Skalbarhet och överförbarhet till andra anläggningar

Bergrummet vid Mälarenergi kan även fungera som en referensanläggning för framtida projekt både nationellt och internationellt. Tekniken att utnyttja befintliga underjordiska bergrum eller naturliga formationer för hetvattenlagring är skalbar och kostnadseffektiv, särskilt i regioner med kallt klimat och stora säsongsvariationer i värmebehovet.

För mindre fjärrvärmenät eller industrianläggningar kan liknande lösningar implementeras i mindre skala med liknande positiva effekter på driftstabilitet och resurseffektivitet. Detta gör tekniken attraktiv även för kommunala energibolag och industriföretag som vill minska sina klimatavtryck utan att göra omfattande investeringar i helt nya produktionsenheter.

Utifrån ett systemperspektiv kan även större hetvattenlager få en indirekt men betydelsefull påverkan på elbalansen i Sverige. I takt med att elbehovet förväntas öka genom elektrifiering av industri, transporter och nya värmelaster blir frågan om effekt tillgänglig vid topplast allt viktigare. Kraftvärmen i framför allt elområde SE3 har i dag en installerad eleffekt på 3,5 GW

(Hepworth Hannah, 2025). men nyttjandegraden varierar och begränsas ofta av värmeunderlaget under milda perioder. Genom att lagra överskottsvärme i större hetvattenlager kan kraftvärmeverken köras mer flexibelt och med högre fullasttimmar när elsystemet har störst behov av reglerbar effekt. På så sätt kan värmelagring bidra till att frigöra ytterligare elproduktion utan att kräva ny bränslebaserad kapacitet vilket gör tekniken särskilt intressant i ett framtida energisystem med ökande effektutmaningar.

6.4.4 Strategisk utveckling och digital optimering

I framtiden kan den största potentialen ligga i att kombinera energilagringen med avancerade digitala verktyg. Genom AI-baserad driftoptimering, prediktiv underhållsanalys och energimarknadssimulering kan kraftvärmeverk utnyttja sina resurser mer effektivt. Med hjälp av maskininlärning kan styrsystem förutse efterfrågetoppar, elprisvariationer och driftbegränsningar, och därmed automatiskt välja det mest lönsamma driftläget. Detta kan skapa betydande ekonomiska och miljömässiga vinster på sikt.

7 SLUTSATSER

Denna studie har visat att införandet av det underjordiska bergrummet för hetvattenlagring har haft en tydlig och positiv inverkan på Turbin 6:s drift vid Mälarenergi. Genom att analysera driftdata före och efter lagrets implementering framgår att anläggningens flexibilitet, verkningsgrad och kapacitetsutnyttjande har förbättrats avsevärt. Resultaten bekräftar att värmelagringen har skapat en stabilare driftmiljö där turbinen kan arbeta närmare sina optimala lastförhållanden under längre perioder än tidigare.

Analysen av driftcykler visar att start- och stoppfrekvensen minskat markant efter införandet av bergrummet. Den tidigare cykliska driften, som präglades av många korta driftperioder och snabba lastförändringar, har ersatts av längre och mer stabila driftintervall. Detta är en direkt effekt av lagrets buffrande förmåga, som gör att turbinen inte längre behöver anpassa sig lika snabbt efter variationer i värmebehovet. Denna minskning av cykliskt slitage förbättrar både driftsäkerhet och livslängd hos viktiga komponenter.

Medeleffekten för både el- och värmeproduktion har ökat efter att lagret togs i drift. Den genomsnittliga elproduktionen steg från 32,40MW till 37,71MW, samtidigt som fjärrvärmeeffekten ökade från 117,07 MW till 123,64MW. Detta visar att turbinen nu utnyttjas mer effektivt och kan köras närmare sin nominella last. Verkningsgraden för turbinen har också förbättrats tydligt från 65,57% till 68,60%, vilket bekräftar att energilagret möjliggör en mer optimal driftpunkt. Den marginella minskningen i alfa-värdet är inte ett tecken på prestandaförsämring, utan ett resultat av att större energimängder nu aktivt leds till lagring och fjärrvärme.

Turbinens roll i elmarknaden har stärkts. Den outnyttjade effekten har sjunkit från 13,0 MW till 11,5 MW, vilket innebär att en större del av tillgänglig energi nu passerar genom turbinen i stället för att ledas förbi den. Detta visar att bergrummet möjliggör ett mer marknadsanpassat driftbeteende, där turbinen kan bidra mer till nätet i perioder med högre elpriser och effektbehov.

Utifrån den tekniska analysen identifierades även flera möjliga driftoptimeringar. Dessa inkluderar en fortsatt utveckling av styrningen för att låta lagret hantera kortsiktiga lastvariationer, i stället för att turbinen regleras ned. Detta skulle ge ännu stabilare drift och högre verkningsgrad. Höjning av turbinens minimallast, eftersom data visar att turbinen periodvis körs onödigt lågt trots att lagret skulle kunna ta emot mer överskottsvärme. Fortsatt lastoptimering för att minska bortkylning och ytterligare förbättra elvärme-kvoten.

Sammantaget visar studien att bergrummet har lett till en mer flexibel, stabil och energieffektiv drift av Turbin 6. Samtliga frågeställningar besvaras genom att lagret har minskat antalet driftcykler, ökat verkningsgraden, stärkt turbinens roll på elmarknaden och samtidigt öppnat nya möjligheter för tekniska optimeringar. Resultaten understryker även att storskalig värmelagring spelar en central roll i framtidens energisystem, både för att öka flexibilitet och för att förbättra den tekniska och ekonomiska prestandan i kraftvärmeproduktion.

8 FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE

8.1 Vidare tekniska analyser

Ett första steg i det fortsatta arbetet bör vara att genomföra mer detaljerade tekniska analyser av turbinens driftbeteende och systemets dynamiska respons. Denna studie har fokuserat på övergripande nyckeltal såsom medeleffekt, verkningsgrad och start/stopp-frekvens, men framtida arbete kan gå djupare in i turbinens termodynamiska och styrtekniska aspekter.

- Utökad modellering och simulering: Genom att utveckla en mer avancerad simuleringsmodell i exempelvis MATLAB eller Ebsilon kan olika driftfall testas under varierande värme- och elbehov. En sådan modell kan även inkludera realtidsstyrning baserad på elprisdata för att optimera produktionen.
- Analys av transienta förlopp: Korttidsvariationer i ångflöde, tryck och temperatur påverkar turbinens prestanda och slitage. Genom att analysera dessa händelser kan styrstrategier justeras för att minska mekanisk belastning och förbättra långsiktig driftsäkerhet.
- Utökad datainsamling: Ett fortsatt arbete kan inkludera fler mätparametrar, exempelvis kondensortryck, bränslets energiinnehåll och turbinens partiella

lastnivåer, vilket ger en mer fullständig bild av hela kraftvärmesystemets verkningsgrad.

- Underhålls- och livslängdsanalys: Ökade start/stopp-cykler kan på sikt påverka turbinens komponenter. En livslängdsanalys baserad på faktiska driftmönster skulle ge värdefull information om behovet av anpassade underhållsintervall och reservdelsstrategier.

Ett sådant arbete skulle kunna leda till utveckling av nya styrstrategier och driftrekommendationer som maximerar turbinens effektivitet samtidigt som slitaget minimeras.

8.2 Utvidgning till andra turbiner/anläggningar

För att stärka generaliserbarheten av resultaten bör den tillämpade metoden prövas på fler anläggningar med olika tekniska och geografiska förutsättningar. Mälarenergis kraftvärmeverk är en representativ men unik anläggning, och en bredare jämförelse kan ge insikter som gäller fler delar av energisektorn.

- Jämförande fallstudier: Genom att upprepa analysen för andra turbiner inom Mälarenergi eller i liknande kraftvärmeverk kan skillnader i driftsmönster och verkningsgrad identifieras. Detta kan bidra till en generell metodik för hur värmelagring påverkar turbiner.
- Systemövergripande analyser: Ett vidare arbete kan också inkludera interaktionen mellan olika produktionsenheter till exempel samspel mellan turbin, panna och värmelager. Genom helhetssimuleringar kan hela systemets effektivitet och flexibilitet utvärderas.
- Överförbarhet till andra teknologier: Genom att applicera analysen på anläggningar med andra bränslen och turbintyper – exempelvis biobränsleeldade, naturgasdrivna eller geotermiska system – kan resultaten användas för att skapa generella riktlinjer för värmelagringens roll i framtidens energisystem.
- Samarbete mellan aktörer: Ett fortsatt arbete kan med fördel bedrivas i samverkan mellan energibolag, universitet och turbinleverantörer för att skapa en gemensam kunskapsbas kring hur driftsoptimering och energilagring samverkar.

Genom att utvidga analysen på detta sätt kan resultatet bidra till nationella riktlinjer för effektiv integration av termiska lager i fjärrvärmesystem.

8.3 Ekonomiska och miljömässiga aspekter

För att skapa en helhetsbild av värmelagringens nytta bör framtida arbete även inkludera ekonomiska och miljömässiga perspektiv. Denna studie har fokuserat på tekniska parametrar, men de praktiska besluten kring investeringar och driftoptimering påverkas i hög grad av ekonomi, klimatpåverkan och energipolitik.

- Ekonomiska analyser: En detaljerad kostnads- och intäktsanalys bör genomföras för att beräkna hur införandet av ackumulatorn påverkar Mälarenergis driftkostnader, el intäkter och totala lönsamhet. Detta kan inkludera scenarioanalyser med olika elprisnivåer och driftsstrategier.
- Miljömässig påverkan: En livscykelanalys (LCA) kan kvantifiera den faktiska klimatnyttan av värmelagret, inklusive minskat fossilt bränsleanvändande, reducerade CO_2-utsläpp och effektivare energiutnyttjande över året.
- Systemnytta och samhällsperspektiv: En vidare analys kan undersöka hur storskalig värmelagring påverkar försörjningstryggheten och bidrar till den nationella energiomställningen.
- Policy och styrmedel: Genom att utvärdera hur befintliga regelverk och ekonomiska incitament påverkar investeringar i termiska energilager kan framtida arbeten bidra med rekommendationer till beslutsfattare

9 DEKLARATION AV GENERATIV AI OCH AI-BASERADE TEKNOLOGIER I SKRIVPROCESSEN

Det förtydligas härmed att användningen av OpenAI:s ChatGPT-5 i denna examensrapport har varit begränsad till att fungera som ett språkligt hjälpmedel för att höja grammatisk kvalitet och tydlighet. Den konceptuella grunden, de analytiska processerna, den valda metodologin samt referensmaterialet har alla utarbetats av författarna. Fullt ansvar för innehållets korrekthet, originalitet och akademiska integritet vilar således på oss som författare.

REFERENSER

Al Kindi, A. A., Sapin, P., Pantaleo, A. M., Wang, K., & Markides, C. N. (2022). Thermo-economic analysis of steam accumulation and solid thermal energy storage in direct steam generation concentrated solar power plants. *Energy Conversion and Management*, *274*. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116222

APPLICATIONS OF THERMAL ENERGY STORAGE IN THE ENERGY TRANSITION BENCHMARKS AND DEVELOPMENTS Public Report of IEA ECES Annex 30. (2018).

CEIC. (u.å.). *Sweden Heating Degree Days*. https://www.ceicdata.com/en/sweden/environmental-climate-risk/heating-degree-days.

Connolly, D., Lund, H., Mathiesen, B. V., Werner, S., Möller, B., Persson, U., Boermans, T., Trier, D., Østergaard, P. A., & Nielsen, S. (2014). Heat roadmap Europe: Combining district heating with heat savings to decarbonise the EU energy system. *Energy Policy*, *65*, 475–489. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.035

Deng, B., Zhang, Y., & Yang, H. (2022). Operation Optimization of Circulating Fluidized Bed Boilers Integration of Variable Renewables. I *Energies* (Vol. 15, Nummer 16). MDPI. https://doi.org/10.3390/en15166007

Fernandes, U., & Costa, M. (2010). Potential of biomass residues for energy production and utilization in a region of Portugal. *Biomass and Bioenergy*, *34*(5), 661–666. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.01.009

Hepworth Hannah. (2025, mars 27). *Svensk elproduktion och installerad effekt 2024 – en regional översikt*. https://www.energiforetagen.se/medlemsportalen/medlemsnyheter/2025/mars/svensk-elproduktion-och-installerad-effekt-2024--en-regional-oversikt2/.

Krüger, M., Muslubas, S., Loeper, T., Klasing, F., Knödler, P., & Mielke, C. (2020). Potentials of thermal energy storage integrated into steam power plants. *Energies*, *13*(9). https://doi.org/10.3390/en13092226

LearnChemE. (u.å.). *Steam Tables*. https://learncheme.com/student-resources/steam-tables/.

Mälarenergi. (u.å.-a). *Bergrummet – ett gigantiskt energilager*. https://www.malarenergi.se/om-malarenergi/framtidens-samhalle/vara-anlaggningar/energilager.

Mälarenergi. (u.å.-b). *Block 6 - en världsunik anläggning*. https://www.malarenergi.se/om-malarenergi/framtidens-samhalle/vara-anlaggningar/kraftvarmeverket-vasteras/block-6/.

Mälarenergi. (u.å.-c). *Invigning av bergrummet i närvaro av H.M. Konungen*. https://www.malarenergi.se/om-malarenergi/framtidens-samhalle/vara-anlaggningar/energilager/invigning.

Mälarenergi. (u.å.-d). *Jättetermosen som jämnar ut värmeproduktionen*. https://www.malarenergi.se/om-malarenergi/framtidens-samhalle/vara-anlaggningar/kraftvarmeverket-vasteras/ackumulatortanken/.

Mälarenergi. (u.å.-e). *Kraftvärmeverket Västerås*. https://www.malarenergi.se/om-malarenergi/framtidens-samhalle/vara-anlaggningar/kraftvarmeverket-vasteras.

Mälarenergi. (u.å.-f). *Mälarenergi - 150 år i Västeråsarnas tjänst*. https://www.malarenergi.se/om-malarenergi.

Rezaie, B., & Rosen, M. A. (2012). District heating and cooling: Review of technology and potential enhancements. *Applied Energy*, *93*, 2–10. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.020

Sarunac, N., Khalesi, J., Khuda, M. A., Mancini, R., Kulkarni, P., & Berger, J. (2024). Energy Storage Improves Power Plant Flexibility and Economic Performance. *Energies* , *17*(11). https://doi.org/10.3390/en17112775

Schneider, C., Braun, S., Klette, T., Härtelt, S., & Kratzsch, A. (2016). Development of Integration Methods for Thermal Energy Storages Into Power Plant Processes. *Energy Sustainability*, *2*. https://doi.org/10.1115/ES2016-59266

Siemens. (u.å.-a). *Siemens Steam Turbine SST-600*. www.siemens.com/steamturbines

Siemens. (u.å.-b). *Tailor-made and flexible industrial steam turbines*. https://www.siemens-energy.com/global/en/home/products-services/product/industrial-steam-turbines.html.

Sifnaios, I., Sneum, D. M., Jensen, A. R., Fan, J., & Bramstoft, R. (2023). The impact of large-scale thermal energy storage in the energy system. *Applied Energy*, *349*. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121663

Stevanovic, V. D., Petrovic, M. M., Milivojevic, S., & Ilic, M. (2020). Upgrade of the thermal power plant flexibility by the steam accumulator. *Energy Conversion and Management*, *223*. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113271

Sun, W., Hong, Y., & Wang, Y. (2017). Operation optimization of steam accumulators as thermal energy storage and buffer units. *Energies*, *10*(1). https://doi.org/10.3390/en10010017

Svenska kraftnät. (u.å.). www.svk.se

Tosatto, A., Ochs, F., Dahash, A., & Muser, C. (2022). *The Challenge of Planning and Constructing Large-Scale Hot Water TES for District Heating System: A Techno-Economic Analysis*.

Vattenfall. (u.å.). *Prishistorik över rörligt elpris*. https://www.vattenfall.se/elavtal/elpriser/rorligt-elpris/prishistorik/.

Wang, D., Liu, D., Wang, C., Zhou, Y., Li, X., & Yang, M. (2022). Flexibility improvement method of coal-fired thermal power plant based on the multi-scale utilization of steam turbine energy storage. *Energy*, *239*. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122301

Wang, W., Sun, Y., Jing, S., Zhang, W., & Cui, C. (2018). Improved boiler-turbine coordinated control of CHP units with heat accumulators by introducing heat source regulation. *Energies*, *11*(10). https://doi.org/10.3390/en11102815

Werner, S. (2017). International review of district heating and cooling. I *Energy* (Vol. 137, s. 617–631). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.045

BILAGA 1: BERÄKNINGAR

Utrakningar.xlsm

BILAGA 2: RENA-TIMVÄRDEN

PGIM_mall_statistik
_V6_15min.xlsm

Box 883, 721 23 Västerås **Tfn:** 021-10 13 00
Box 325, 631 05 Eskilstuna **Tfn:** 016-15 36 00
E-post: info@mdu.se **Webb:** www.mdu.se