

Inspirationskatalog

for store varmepumpeprojekter
i fjernvarmesystemet

December 2017



Udarbejdet for Energistyrelsen og Grøn Energi

Varmekilder

- Røggas
- Overskudsvarme/køling
- Geotermi
- Spildevand
- Grundvand
- Luft
- Andre

Kortet på forsiden viser den geografiske placering af de danske varmepumpeprojekter, som er beskrevet i inspirationskataloget.

Udarbejdet for:



Udarbejdet af:



Grøn Energi
Hanne Kortegaard Støchkel
hks@danskfjernvarme.dk



PlanEnergi
Bjarke Lava Paaske
blp@planenergi.dk



DFP
Kim S. Clausen
ksc@dfp.dk

Forord

Dette er et inspirationskatalog, der viser forskellige varmepumpeprojekter i tilknytning til fjernvarmesystemer. Inspirationskataloget kan læses selvstændigt, men er fremstillet i sammenhæng med drejebogen for store varmepumper.

Drejebogen og inspirationskataloget kan inspirere til nærmere overvejelser om, hvorvidt varmepumper kan blive en del af den fremtidige fjernvarmeproduktion i et konkret fjernvarmesystem. Udgivelserne kan således øge vidensniveauet hos målgruppen samt understøtte udarbejdelsen af et beslutningsgrundlag.

1. Se eksempler på varmepumpeprojekter i **inspirationskataloget**, og bliv inspireret af **drejebogen**.
2. Afprøv **beregningsværktøjet** med data fra dit eget værk.
3. Tag kontakt til en rådgiver, hvis der skal udarbejdes et egentligt beslutningsgrundlag for, om investering i en varmepumpe er relevant for dit værk.

Dette inspirationskatalog er en grundig opdatering af det inspirationskatalog, som blev udgivet i 2014 på opdrag fra Energistyrelsen. Inspirationskataloget indeholder beskrivelser af konkrete anvendelser af varmepumper i danske fjernvarmesystemer. Fokus i inspirationskataloget er at vise de forskellige anvendelsesmuligheder, der er for varmepumper, samt at sætte fokus på de mange forskellige varmekilder en varmepumpe kan anvende. I denne opdaterede udgave er der tilføjet detaljerede beskrivelser af seks nye cases:

- Broager
- Høje Taastrup
- Kalundborg
- Rødkærsbro
- Sig
- Tønder

Inspirationskataloget hører sammen med en drejebog, som også er opdateret. Drejebogen og inspirationskataloget kan læses som separate dokumenter.

Målgruppen for drejebogen og inspirationskataloget er primært fjernvarmeværker (driftsledere, direktører og bestyrelser) og varmeplanlæggere i kommunerne. De vil også kunne fungere som et nyttigt værktøj for rådgivere, leverandører af energianlæg samt personer og virksomheder, der har interesse for varmepumper. Ambitionen for udgivelserne er at bidrage til grundlaget for vurdering af, hvorvidt en varmepumpe kan indgå i den fremtidige fjernvarmeproduktion, og således bidrage til at komme nærmere en afklaring af, hvorvidt muligheden skal undersøges nærmere fx med hjælp fra en rådgiver.

En afgørende parameter i forhold til varmepumper er hvilke(n) varmekilde(r), der er til rådighed. Derfor er inspirationskataloget opdelt i kapitler efter typen af varmekilde. De forskellige typer af varmekilder er desuden beskrevet i drejebogens kapitel 2.

Sammen med drejebog og inspirationskatalog er der udviklet et beregningsværktøj, der kan understøtte de første overvejelser, og eventuelt kan give en indikation af, om der er grundlag for at arbejde videre med idéen om en varmepumpe. Resultaterne fremkommet ved anvendelse af beregningsværktøjet kan udelukkende danne grundlag for en beslutning om at undersøge muligheden nærmere, og kan ikke bruges som grundlag for en investeringsbeslutning.

Som en del af processen har projektgruppen været i dialog med nogle repræsentanter for nogle forskellige fjernvarmeselskaber. Dette har givet værdifuldt input ved færdiggørelsen af drejebogen og inspirationskataloget. Det vil projektgruppen gerne takke for.

Projektgruppen ønsker god fornøjelse med læsningen. Du er velkommen til at kontakte os, hvis du har spørgsmål.

Indholdsfortegnelse

Kapitel 1	Indledning	1
Kapitel 2	Røggas	3
2.1	Røggaskondensering, absorptionsvarmepumpe - Bjerringbro Varmeværk	3
2.2	Røggaskondensering, eldrevne varmepumper - Bjerringbro Varmeværk	6
2.3	Røggaskondensering, eldrevet varmepumpe - Vejen Varmeværk	12
2.4	Røggaskondensering, absorptions-varmepumper - Vestforbrænding	15
Kapitel 3	Overskudsvarme	19
3.1	Overskudsvarme – Grundfos / Bjerringbro Varmeværk	19
3.2	Overskudsvarme – Skjern Papirfabrik	25
3.3	Samproduktion af køl og varme - Høje Taastrup Fjernvarme	31
3.4	Anden mulighed for samproduktion - Skejby Sygehus	35
Kapitel 4	Geotermi	37
4.1	Geotermi - Thisted Varmeforsyning	37
Kapitel 5	Spildevand	41
5.1	Rødkærsbro Fjernvarmeværk	41
5.2	Spildevand - Kalundborg Forsyning	46
5.3	Udenlandske anlæg	51
Kapitel 6	Grundvand	53
6.1	Rye Kraftvarmeværk	53
6.2	Broager Fjernvarmeselskab a.m.b.a.	59
6.3	Andre eksempler på grundvandsvarmepumper	65

Kapitel 7 SØ- og ÅVAND	67
7.1 Varmepumpe med søvand - Ans Kraftvarmeværk	67
Kapitel 8 LUFT	75
8.1 Samproduktion af køling og varme - Sapa Extrusion / Tønder Fjernvarmeselskab	75
8.2 Luft, el-drevet varmepumpe - Sig Varmeværk	80
Kapitel 9 Andre varmekilder	85
9.1 Sæsonvarmelager med solvarme	85
9.2 Drikkevand - Morsø Forsyning	87
9.3 Indirekte varmekilder - Lading-Fajstrup Varmeforsyningselskab	87
9.4 Havvand	87
Referencer	91
Lovtekster	91
Andre kilder	91

1 Indledning

Dette inspirationskatalog supplerer “Drejebog for store varmepumpeprojekter i fjernvarmesystemet”. Inspirationskataloget beskriver idriftsatte varmepumper i danske fjernvarmesystemer med det formål at gøre erfaringer med varmepumper mere tilgængelige for branchen og dermed bidrage til en øget udbredelse af varmepumper i fjernvarmesystemet.

Inspirationskataloget er struktureret efter varmekilderne og indeholder detaljerede beskrivelser af en række danske varmepumpeprojekter. Beskrivelserne følger samme skabelon for at gøre beskrivelserne overskuelige og nemme at sammenligne. De detaljerede beskrivelser indeholder:

- Baggrund
- Information om systemet
- Driftserfaringer
- Organisation/ejerskab
- Teknik og specifikationer
- Budget og økonomi

Eksemplerne er beskrevet så kort som muligt, med fokus på tekniske og økonomiske forhold i hvert tilfælde. For at eksemplerne bedst beskriver de økonomiske forhold på en sammenlignelig måde, er der så vidt muligt brugt standardiserede el- og brændselspriser. Disse forudsætninger er fælles med antagelserne anvendt i den tilhørende drejebog. Reelt varierer el- og brændselspriserne i de enkelte tilfælde, og eksemplerne viser derfor ikke den eksakte økonomi i løsningerne, men giver et billede af, hvordan økonomien vil være under de givne forudsætninger.

Derudover er der lagt vægt på at beskrive nogle af de vigtigste erfaringer fra gennemførelsen af varmepumpeprojekterne. Dette giver en erfaringsudveksling som kan være værdifuld for kommende varmepumpeprojekter.

Inspirationskataloget spænder bredt over mange varmekilder og varmepumpetyper, og det har fokus på de konkrete tal og erfaringer fra de beskrevne cases. Tabel 1.1 giver et overblik over de varmepumpeanlæg, som er beskrevet detaljeret i inspirationskataloget.

Case	Størrelse [MW]	Varmekilde	COP	Varme- produktionspris u. afskrivning [kr./MWh]	Investering [mio. kr.]	Simpel tilbage- betalingstid [år]
2.1 Bjerringbro (absorption)	2,1	Røggas	1,7	55	3,1	2,1
2.2 Bjerringbro (motor)	0,8	Røggas	5,1	185	3,0	5,1
2.2 Bjerringbro (kedel)	0,5	Røggas	5,2	185	2,0	26,9
2.3 Vejen	1,1	Røggas	5,2	146	3,5	52,5
2.4 Vestforbrænding (abs.)	32,0	Røggas	1,7	3	82,5	4,0
3.1 Grundfos/Bjerringbro	3,7 (2,9)	Proceskøl	4,6 (3,6)	190	26,7	4,6
3.2 Skjern	6,0	Overskudsvarme	6,9	150	5 og 12,4	2,1 og 4,2
3.3 Høje Taastrup	2,3	Samproduktion	3,1	155	22,3	5,4
4.1 Thisted	6,5 og 12	Geotermisk vand	1,7	71	-	-
5.1 Rødkærsbro	1,6	Spildevand	4,6	163	11,0	7,0
5.2 Kalundborg	10,0	Spildevand	4,5	156	63,0	1,9
6.1 Rye	2,0	Grundvand	3,8	207	9,0	7,6
6.2 Broager	4,0	Grundvand	4,2	189	28,0	6,9
7.1 Ans	1,6	Søvand	3,7	223	9	6,3
8.1 Tønder	3,2 - 4,9	Proceskøl og udeluft	2,1	220	29,7	4,0
8.2 Sig	0,8	Luft	3,6	211	4	5,2

Table 1.1 – Oversigt over eksemplerne beskrevet i inspirationskataloget.

2 Røggas

2.1 Røggaskondensering, absorptionsvarmepumpe - Bjerringbro Varmeværk

Bjerringbro Varmeværk er et decentralt, naturgasbaseret kraftvarmeværk, der i dag råder over fire forskellige varmepumpeanlæg. Det ældste anlæg er en absorptionsvarmepumpe, som afkøler røggas fra et af værkets motoranlæg. Før gassen køles, ledes den varme røggas igennem varmepumpen direkte fra motoren, så den høje temperatur kan udnyttes som drivenergi til varmepumpen. Anlægget har været i drift siden 2007 og udvinder ca. 900 kW yderligere energi fra gasmotorens røggas. Motorens kapacitet øges herved fra 3,7 MW til 4,6 MW uden yderligere el- og gasforbrug.

2.1.1 Baggrund

Varmepumpen er installeret for at forbedre driftsøkonomien ved kraftvarmeproduktion. Varmepumpetypen blev valgt, fordi den kan give en direkte besparelse i form af reduceret naturgasforbrug. Varmepumpen kan dog kun benyttes, når der er kraftvarmeproduktion. Økonomien afhænger altså af antallet af driftstimer på den tilkoblede naturgasmotor.

2.1.2 Systemet

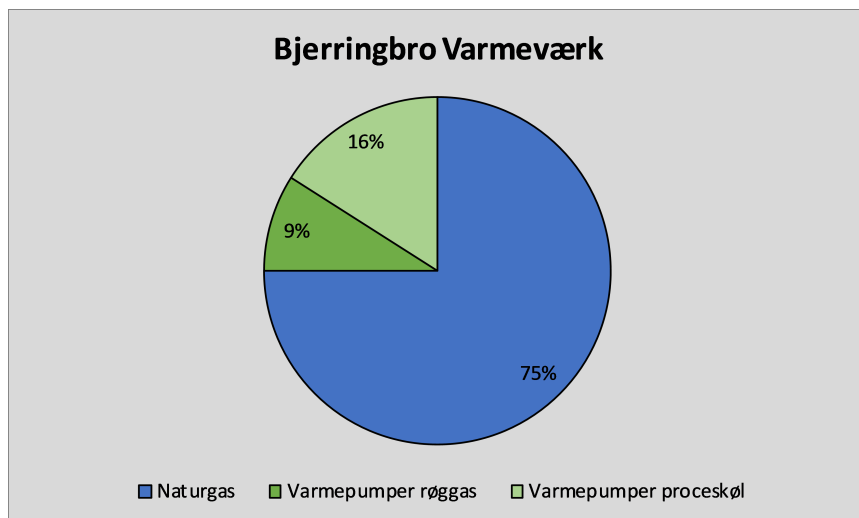
Bjerringbro Varmeværk leverer varme til ca. 2100 forbrugere. Den årlige varmeproduktion udgør omkring 84 000 MWh, som primært produceres på naturgas. Bjerringbro Varmeværk er opdelt geografisk i en kedelcentral, en kraftvarmecentral og en energicentral (med et større

Fjernvarmeværk / Kontaktperson	Bjerringbro Varmeværk / Charles Hansen
Leverandør	SEG
Type	Thermax ES40BP
Installations år / driftstimer	2007 / ca. 4500 timer/år
Varmekilde	Kondensering af røggas fra naturgasmotor
Drivenergi	Varm røggas fra naturgasmotor
Nominel varmeydelse	2,1 MW (heraf er ca. 1,2 MW drivenergi)
Nominel COP	1,7
Fjernvarme opvarmes fra-til	Ca. 40-70 °C
Varmekilde afkøles fra-til	63-27 °C

varmepumpe-anlæg). En mere detaljeret beskrivelse af Bjerringbro Varmeværk findes i afsnit 3.1.

Kraftvarmecentralen har en samlet varmeeffekt på ca. 18 MW og består af fire identiske gasmotorer. Heraf er én udstyret med absorptionsvarmepumpen, som beskrives her, og én er udstyret med en eldrevet varmepumpe, som er beskrevet i afsnit 2.2. Den typiske varmeproduktionsfordeling ses på figur 2.1.

Den pågældende naturgasmotor var ikke tidligere udstyret med economizer, og varmevirkningsgraden kunne derfor øges med mere end 10 %-point fra ca. 48 % til 60 %. El-virkningsgraden er ca. 42 % og påvirkes ikke af varmepumpen. De øvrige motoranlæg har samme el-virkningsgrad,

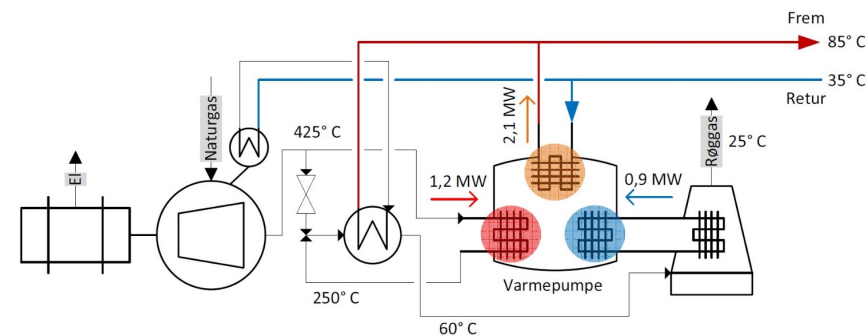


Figur 2.1 – Varmeproduktionsfordeling på Bjerringbro Varmeværk.

men disse er udstyret med economizer, hvor returvandet udnyttes til røggaskondensering. For de øvrige motoranlæg er varmeeffektiviteten ca. 55 %, og her er røggassen mindre interessant end for motoranlæg med lav varmeeffektivitet.

Varmepumpen

Motorens røggas ledes direkte til varmepumpen. Her udnyttes den høje temperatur til indkogning af kølemiddel, som herefter kan optage energi ved lav temperatur. Røggassen ledes igennem varmepumpen ved ca. 425 °C og afkøles til ca. 250 °C. Bagefter gennemløber gassen motorens HT- og LT-vekslere, hvor den køles til ca. 60 °C, inden den sidste energi indvindes. Dette sker i en ekstra LT-veksler, som køles af varmepumpen og afkøler røggassen til ca. 25 °C. I den sidste LT-veksler udvindes 900 kW ekstra varme pga. kondensering af røggassens vanddamp. Opbygningen er skitseret på figur 2.2.



Figur 2.2 – Principskitse over absorptions-varmepumpe til røggaskondensering på motoranlæg. Kilde: Teknologisk Institut.

Fjernvarmereturen opdeles, så en delstrøm ledes til varmepumpen og opvarmes til ca. 70 °C, afhængigt af behovet. Her afsættes ca. 2,1 MW, som stammer fra varmepumpens drivenergi fra gasmotoren på 1,2 MW, samt de 900 kW som indvindes i røggaskøleren. Resten af fjernvarmereturen ledes til motorens intercoolere og øvrige varmevekslere, hvor den opvarmes til ca. 95 °C. Dette blandes til sidst med delstrømmen fra varmepumpen, så den ønskede fremløbstemperatur opnås. I perioder med drift på den eldrevne varmepumpe, som også køler røggas på et motoranlæg, forvarmer den eldrevne varmepumpe returvandet som ledes til absorptionsvarmepumpen. I disse perioder vil returtemperaturen til varmepumpen øges til ca. 43 °C.

2.1.3 Driftserfaringer

I varmepumpens første driftstid opstod en utæthed i varmeveksleren, hvor drivenergien overføres fra den varme røggas. Varmevekslerne i den konkrete varmepumpe er normalt ikke egnede til aggressive medier, og det viste sig desværre at røggassen var korrosiv og derfor tærede på varmeveksleren. Leverandøren har udskiftet varmeveksleren til en type, som er bestandig til motorens røggas. Samtidig er der blevet la-

vet en ændring, der gør at varmepumpen er mindre følsom over den meget høje temperatur på røggassen. Dette kan være et problem, da kogningen i varmepumpens generator kan blive for voldsom og saltet dermed udkrystalliserer. Efter ændringerne har varmepumpen fungeret uden problemer. Leverandøren anbefaler dog generelt, at der etableres en hedtvandskreds imellem røggas og varmepumpe så der kan bruges standard varmevekslere.

Varmepumpen er meget driftssikker og har, ud over ovenstående, ikke krævet vedligehold indtil videre. Der er en vis træghed i varmepumpen. Ved hurtig opstart producerer varmepumpen først varme efter en halv til en hel time, imens den fortsætter en tilsvarende periode efter motoren afbrydes. Rent styringsmæssigt er det dog ikke problematisk med hurtige lastændringer på varmepumpen.

2.1.4 Organisation/ejerskab

Varmepumpen ejes og drives af Bjerringbro Varmeværk, som betragter den som en del af den pågældende naturgasmotor.

2.1.5 Teknik og specifikationer

- Kold side (fordamper)
 - Varmepumpe og røggaskøler er forbundet via en koldt-vandskreds. Røggaskøleren er en rustfri, lodret rørvarmeveksler leveret af Hollensen. Den er udstyret med en røgsuger, som er monteret før køleren og forhindrer, at modtryk- ket for turboladeren ikke øges.
- Varm side (absorber og kondensator)
 - Fjernvarmevandet ledes direkte igennem varmepumpen. Absorber og kondensator er serielt koblede direkte i varme- pumpen.

- Drivenergi (generator)
 - Motorens røggas ledes direkte igennem varmepumpen.
- Varmepumpe
 - Et-trins LiBr-absorptions-varmepumpe som leverer en mak- simal fjernvarmetemperatur på ca. 70 °C, når røggassen kø- les til 25 °C.
- CO₂
 - Løsningen reducer CO₂-udledningen fra det pågældende motoranlægs varmeproduktion med ca. 20 %. Med et årligt antal driftstimer på 4500 svarer dette til ca. 1200 ton CO₂/år.

2.1.6 Budget og økonomi

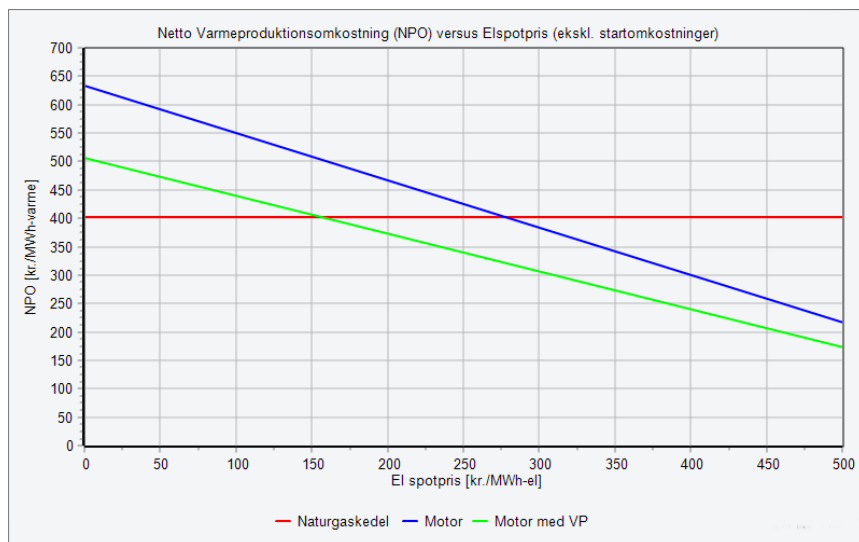
Investering

Nøgletallene for investeringen ses herunder:

Varmepumpe	2,0 mio. kr.
Røggaskøler	1,0 mio. kr.
Tilslutning og SRO	0,1 mio. kr.
Total	3,1 mio. kr.

Driftsøkonomi

Varmepumpens elforbrug udgøres udelukkende af to små cirkulations- pumper, som stort set ikke har indflydelse på anlæggets driftsøkonomi. I praksis har varmepumpen derfor ikke noget energiforbrug, men bidra- ger udelukkende til en øget varmevirkningsgrad på det tilkoblede mo- toranlæg. Varmevirkningsgraden er øget fra ca. 48 % til 60 % uden på- virkning af el-virkningsgraden. Løsningen gør dog at en stor mængde



Figur 2.3 – Nettoproduktionsomkostninger for kedel, samt motor med og uden varmepumpe.

vanddamp kondenserer fra røggassen. Denne skal bortledes, og der betales derfor afledningsafgift. Ud over pumperne, har varmepumpen ikke nogen bevægelige dele, og indtil videre har der ikke været udgifter til service og vedligehold. De samlede driftsomkostninger for varmepumpen udgør ca. 55 kr./MWh som primært udgøres af vandafledningsafgift.

Med den højere varmevirkningsgrad fås en højere varmekapacitet med samme naturgasforbrug, og den konkrete driftsbesparelse afhænger af gas- og elpriser. Ved en gaspris på 1,95 kr./Nm³ bliver driftsbesparelsen ca. 60-75 kr./MWh for det samlede anlæg. Den lavere varmeproduktionspris gør kombinationen af motor og varmepumpe mere konkurrencedygtig i forhold til kedelproduktion. Motoren får derfor flere driftstimer samtidig med, at drift på kedlerne reduceres.

Figur 2.3 viser nettoproduktionsomkostningen for motor uden varmepumpe, motor med varmepumpe samt kedel som funktion af elprisen.

Figuren viser den driftsafhængige varmeproduktionspris for kedel, samt motor med og uden varmepumpe. Med varmepumpen reduceres skæringspunktet imellem motor og kedel, så elspotprisen nu skal være under ca. 150 kr./MWh, før kedeldrift er rentabel.

Samlet økonomi

Økonomien varierer med el- og gaspris samt antallet af driftstimer. I det følgende er forudsætningerne:

- Driftsbesparelse ved varmeproduktion = 70 kr./MWh
- Årligt antal driftstimer = 4500 timer

Absorptionsvarmepumpe på gasmotor		
Investering	3 100 000	kr.
Årligt antal driftstimer	4500	timer
Årlig varmeproduktion	27 000	MWh
Driftsbesparelse pr. MWh (samlet anlæg)	70	kr./MWh
Årlig driftsbesparelse	1 449 000	kr./år
Simpel tilbagebetalingstid	2,1	år
Intern rente over 15 år	47	%

2.2 Røggaskondensering, eldrevne varmepumper - Bjerringbro Varmeværk

Bjerringbro Varmeværk er et decentralt naturgasbaseret kraftvarmewærk, der i dag råder over fire forskellige varmepumpeanlæg. To af de fire varmepumper er eldrevne ammoniak-varmepumper, som afkøler røggas fra henholdsvis en gasmotor og en gaskedel. Begge varmepumper stammer fra samme leverandør.

Fjernvarmeværk / Kontaktperson	Bjerringbro Varmeværk / Lars B. Laursen
Leverandør	Johnson Controls
Varmepumpe på gasmotor	
Type	Sabroe ChillPac SMC 112 SR
Installations år / driftstimer	2010 / ca. 4500 timer/år
Varmekilde	Røggas
Nominal varmeydelse	800 kW
Nominal COP	5,1
Fjernvarme opvarmes fra-til	Ca. 37-45 °C
Varmekilde afkøles fra-til	40-15 °C
Varmepumpe på gaskedel	
Type	Sabroe ChillPac SMC 106 L
Installations år / driftstimer	2011 / ca. 900 timer/år
Varmekilde	Røggas
Nominal varmeydelse	500 kW
Nominal COP	5,2
Fjernvarme opvarmes fra-til	Ca. 37-42 °C
Varmekilde afkøles fra-til	40-15 °C

Varmepumpen på motoranlægget er installeret i 2010 og yder ca. 800 kW, hvorved motorens varmeeffekt øges fra ca. 4,2 til 5,0 MW. Varmepumpen på kedlen er installeret i 2011 og yder ca. 500 kW. Herved øges kedlens kapacitet fra ca. 9,0 til 9,5 MW.

2.2.1 Baggrund

Bjerringbro Varmeværk betragter varmepumper som en væsentlig produktionsenhed i et fremtidigt fjernvarmesystem. I takt med stigende naturgaspriser og faldende indtægter på elmarkedet, kan varmepumper bidrage til fornuftige fjernvarmepriser ved de naturgasbaserede varmekilder, som ikke må skifte brændsel. Fremfor at udnytte eksterne var-

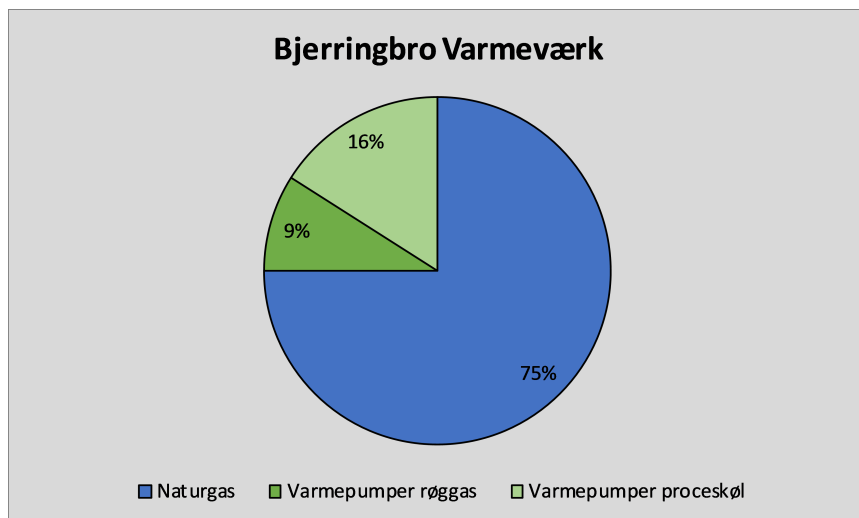
mekilder til varmepumperne, har man først og fremmest udnyttet teknologien ved de varmekilder som er tilgængelige fra motor- og kedelanlæg. Varmeværket forventer, at en vis del af produktionen vil foregå med både kedel- og motordrift de næste mange år. Derfor har værket besluttet at installere varmepumper på én af værkets tre kedler, samt på to af de fire gasmotorer. I forhold til selvstændige varmepumpeløsninger, er denne type løsning billigere i installation og har højere COP. Varmepumpen på den ene gasmotor er en absorptionsvarmepumpe og er beskrevet i det forrige afsnit.

2.2.2 Systemet

Bjerringbro Varmeværk leverer varme til ca. 2100 forbrugere, og den årlige varmeproduktion udgør ca. 84 000 MWh, som primært produceres på naturgas. Bjerringbro Varmeværk er opdelt geografisk i en kedelcentral, en kraftvarmecentral og en energicentral (et større varmepumpeanlæg). En mere detaljeret beskrivelse af Bjerringbro Varmeværk findes under afsnit 3.1. Den typiske varmeproduktionsfordeling ses på figur 2.4.

Kraftvarmecentralen har en samlet varmeeffekt på ca. 18 MW og består af fire identiske naturgasmotorer. Én af de fire naturgasmotorer er udstyret med en eldrevet varmepumpe, som beskrives her, og én er udstyret med en absorptions-varmepumpe som er beskrevet i det forrige afsnit. Den pågældende gasmotor var i forvejen udstyret med en lavtemperaturveksler, som afkøler røgen til ca. 40 °C. Med varmepumpen køles røgen helt ned til ca. 15 °C, og varmevirkningsgraden øges herved fra ca. 54 % til 63 %. Motorens varmekapacitet øges fra 4,2 MW til 5,0 MW. Varmepumpen bruger dog ca. 140 kW elektricitet, som skal trækkes fra motorens elproduktion. Varmepumpens elforbrug bliver dog også til varme, og samlet betyder varmepumpen, at anlæggets virkningsgrader går fra 54 %_{varme} og 41 %_{el}, til 65 %_{varme} og 39 %_{el}, hvormed totalvirkningsgraden øges fra 95 % til 104 %.

Kedelcentralen består af tre identiske kedler med en samlet varmeeffekt på 27,5 MW. Den ene kedel er udstyret med en varmepumpe på 500 kW.

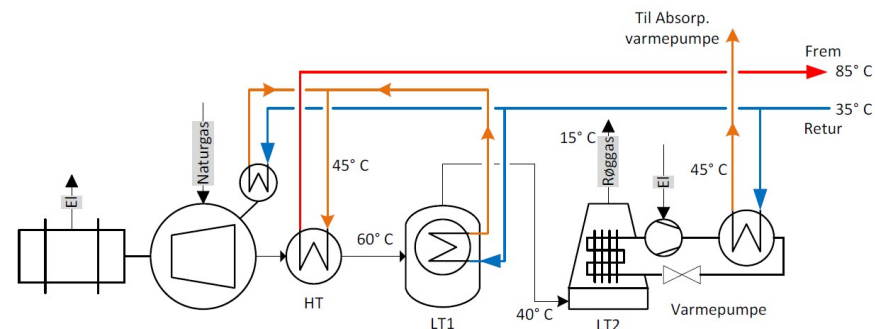


Figur 2.4 – Varmeproduktionsfordeling på Bjerringbro Varmeværk.

Alle kedler har lavtemperaturvekslere, som afkøler røgen til ca. 40 °C, og kedlerne opnår en virkningsgrad på 103 %. Med varmepumpen afkøles røggassen på den ene kedel til 15 °C, hvilket øger virkningsgraden til 108 %. Varmepumpen bruger dog omkring 100 kW_{el}, som også bliver til varme.

Varmepumperne

Begge varmepumper er lavtryks-ammoniak-varmepumper, som i princippet er identiske med industrielle køleanlæg. Dette gør anlæggene prisgunstige, men betyder samtidig, at den maksimale afgangstemperatur er omkring 50 °C. Da varmepumperne altid er i drift med motor- eller kedelanlæg, er det dog ikke nødvendigt med højere temperatur. Størstedelen af varmen produceres fortsat ved en væsentlig højere temperatur, og varmepumperne forvarmer blot en delstrøm af returvandet. Den an-



Figur 2.5 – Principskitse af eldrevet varmepumpe til røggaskondensering på motoranlæg. Kilde: Teknologisk Institut.

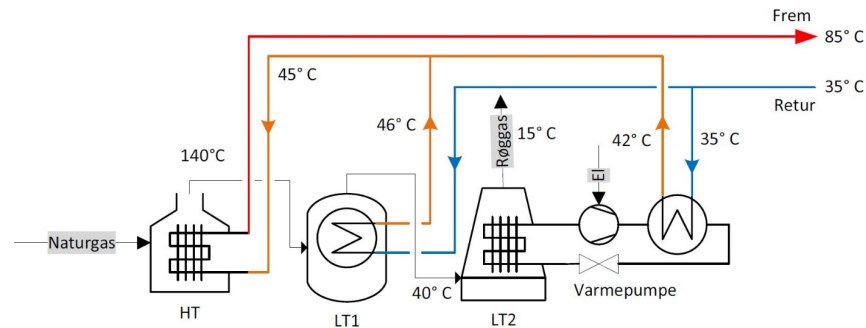
den delstrøm ledes til anlæggenes lavtemperatur-vekslere, så disse ikke påvirkes.

Fra varmepumpen på motoranlægget, ledes det forvarmede vand videre til absorptionsvarmepumpen som er beskrevet i forrige afsnit. I absorptionsvarmepumpen opvarmes vandstrømmen herefter til ca. 70 °C. Fordi varmeproduktionsomkostningen er lavest på motoren med absorptionsvarmepumpen, er denne altid i drift, når den elektriske varmepumpe er i drift.

Ved kedelanlægget samles de to forvarmede delstrømme fra varmepumpe og LT-veksler og ledes til højtemperatur-veksleren, som opvarmer fjernvarmevandet til den krævede temperatur. På både kedel og naturgasmotor er der monteret en ekstra lavtemperaturveksler, hvor røggassen afkøles fra 40 til 15 °C af varmepumpen via en væskekreds.

Opbygningen af de to anlæg er skitseret på figurerne 2.5 og 2.6.

Fjernvarmereturen opdeles, så en delstrøm opvarmes af varmepumpen til ca. 45 °C. Den anden delstrøm opvarmes ligeledes til 45 °C af motorens lavtemperaturvekslere. Delstrømmen fra varmepumpen ledes videre



Figur 2.6 – Principskitse af eldrevet varmepumpe til røggaskondensering på gaskedel. Kilde: Teknologisk Institut.

re til absorptionsvarmepumpen, som er beskrevet i afsnit 2.1. Her eftervarmes det til ca. 70 °C og blandes sammen med de øvrige fremløb.

For kedlen opvarmes en delstrøm af fjernvarmereturen via varmepumpen til ca. 42 °C. Den anden delstrøm opvarmes af kedlens lavtemperatur-veksler til 46 °C. De to delstrømme samles inden højtemperatur-veksleren, hvor der eftervarmes til den krævede fremløbstemperatur.

2.2.3 Driftserfaringer

Begge varmepumper har fungeret upåklageligt siden installationen.

2.2.4 Organisation/ejerskab

Varmepumperne ejes og drives af Bjerringbro Varmeværk, som betragter dem som en del af de tilknyttede varmeproduktionsanlæg.

Teknik og specifikationer

- Kold side
 - For begge varmepumper er røggaskøleren forbundet via en koldtvandskreds. Røggaskøleren ved varmepumpen på motoranlægget er en rustfri lodret rørvarmeveksler leveret af Hollensen. Den er udstyret med en røgsuger, som er monteret før køleren og forhindrer at modtrykket for turboladeren ikke øges. Røggaskøleren ved varmepumpen på kedlen består af to standard køleflader på ca. 1 x 1 m i rustfrit stål. Kølefladerne er leveret af Dansk Energi Service.
- Varm side
 - På begge varmepumper ledes fjernvarmevandet direkte igennem varmepumpernes indbyggede pladevarmevekslere.
- Varmepumpe
 - 25 bar ammoniak-varmepumper med stempel-kompressorer. Leverer maksimalt en temperatur på ca. 50 °C.
- CO₂
 - For kedelanlægget reduceres CO₂-udslippet med ca. 3 %, imens det reduceres 9 % på naturgasmotoren for den del, som vedrører varmeproduktion. Med en årlig driftstid på 900 og 4500 timer svarer dette til en CO₂-reduktion på henholdsvis ca. 60 og 440 ton CO₂/år

2.2.5 Budget og økonomi

Investering

Nøgletallene for investeringen ses herunder:

Varmepumpe på naturgaskedel:

Varmepumpe	0,8 mio. kr.
Røggaskøler	0,2 mio. kr.
Elforbindelse	0,2 mio. kr.
Tilslutning og SRO	0,8 mio. kr.
Total	2,0 mio. kr.

Varmepumpe på naturgasmotor:

Varmepumpe	1,0 mio. kr.
Røggaskøler	1,0 mio. kr.
Elforbindelse	0,2 mio. kr.
Tilslutning og SRO	0,8 mio. kr.
Total	3,0 mio. kr.

Driftsøkonomi

De to varmpumper har en COP på omkring 5,2 og isoleret set bliver varmeproduktionsomkostningen for varmpumperne derfor ganske fornuftig. Der er udgifter til vedligehold, vandaflledning og indkøb af elektricitet. Disse udgør ca.:

Vedligehold 10 kr./MWh_{varme}

Vandaflledning 40 kr./MWh_{varme}

Indkøb af elektricitet

Spot 213 kr./MWh_{el}

Transport overordnet 83 kr./MWh_{el}

Transport lokal 92 kr./MWh_{el}

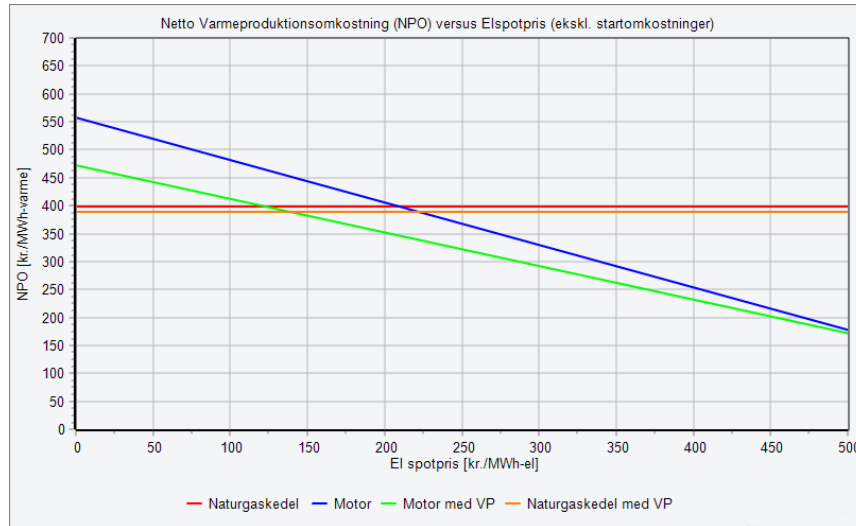
Elafgift 310 kr./MWh_{el}

Samlet 698 kr./MWh_{el}

Med en COP på 5,2 bliver omkostninger til elektricitet til 135 kr./MWh_{varme}. Med vandaflledning og vedligehold bliver varmeproduktionsprisen for de to varmpumper derfor omkring 185 kr./MWh. Uden varmpumper ligger motoren og kedlen typisk med en varmeproduktionspris på 300-400 kr./MWh, og driftsbesparelsen bliver mellem 115 og 215 kr./MWh produceret på varmpumperne. Det skal dog samtidig bemærkes, at varmpumperne kun fungerer, når der er drift på de tilhørende "dyre" produktionsanlæg, og varmpumperne reducerer derfor ikke den samlede produktionspris så markant som tallene herover indikerer. Dette er særlig tydeligt for kedlen, hvor varmpumpen kun producerer 500 kW varme ud af 9500 kW. Her skal der altså produceres 9 MW "dyr" varme på kedlen for at få 0,5 MW "billig" varme fra varmpumpen. Det er derfor vigtigt at betragte varmpumpe og brændselsanlæg som én enhed med en samlet varmeproduktionspris.

På figur 2.7 ses produktionspriserne for motor og kedel med og uden varmpumpe. Der er regnet med en gaspris på 1,95 kr./Nm³.

Figuren viser den driftsafhængige varmeproduktionspris for motor og kedel, med og uden varmpumper. Som det ses af figuren, er der ikke væsentlig forskel på den samlede produktionspris. Dette skyldes, at varmpumpernes kapacitet er begrænset i relation til de produktionsanlæg de er tilknyttede. Af kedlens totale kapacitet på 9,5 MW, stammer kun 0,5 MW fra varmpumpen. Selvom varmpumpen er 40 % billig-



Figur 2.7 – Varmeproduktionspris for kedel, kedel med varmepumpe, motor og motor med varmepumpe.

ere end kedlen, påvirkes den samlede pris derfor kun marginalt med ca. 10 kr./MWh. For motoranlægget er varmepumpen kun rentabel, når spotprisen er under ca. 500 kr./MWh_{el}. Dette skyldes, at varmepumpens produktionsomkostning øges med spotprisen, og derfor er mest rentabel ved lave spotpriser. Kombinationen af motor og varmepumpeanlæg er derfor kun rentabel i perioder med moderate spotpriser. I det konkrete tilfælde ved spotpriser imellem ca. 150 og 500 kr./MWh_{el}.

Selvom denne type løsninger ikke ændrer drastisk på varmeproduktionsprisen, er den alligevel interessant på værker, hvor man ikke kan undgå mange driftstimer på brændselsanlæg. Her har man en god og tilgængelig varmekilde i form af røggas. Det giver høj COP-værdi og kræver mindre investering end selvstændige varmepumpe-løsninger. I de fleste tilfælde vil større, selvstændige varmepumpeanlæg dog kunne reducere den samlede varmeproduktionspris med større virkning end mindre anlæg som kombineres med naturgasenheder.

Samlet økonomi

Den samlede økonomi varierer med gaspriser og antallet af driftstimer fra år til år. I det følgende er der regnet med disse forudsætninger:

- Variabel gaspris = 1,95 kr./Nm³.
- Samlet elpris = 698 kr./MWh_{el}.
- Vedligehold og vandafledningsafgift = 50 kr./MWh_{varme}

Eldrebet varmepumpe på kedel - 500 kW		
Investering	2 000 000	kr.
Årligt antal driftstimer	900	timer
Årlig varmeproduktion (varmepumpe)	450	MWh
Driftsbesparelse pr. MWh	165	kr./MWh
Årlig driftsbesparelse	74 250	kr./år
Simplet tilbagebetalingstid	26,9	år
Intern rente over 15 år	-6,6	%

Eldrebet varmepumpe på motor - 800 kW		
Investering	3 000 000	kr.
Årligt antal driftstimer	4500	timer
Årlig varmeproduktion (varmepumpe)	3600	MWh
Driftsbesparelse pr. MWh	165	kr./MWh
Årlig driftsbesparelse	594 000	kr./år
Simplet tilbagebetalingstid	5,1	år
Intern rente over 15 år	18,2	%

I tabellen kan det ses at økonomien i varmepumpen på kedlen ikke er specielt god under nuværende forhold. Det skyldes at driftstimerne er

reduceret de seneste år, hvilket bl.a. skyldes at driftsøkonomien er bedre på motorerne end på kedeldrift. Tidligere har driftstimerne på kedeldriften været højere, hvilket viste at driftsøkonomien var god og tilbagebetalingen ca. 5 år. Antallet af driftstimer er altså meget vigtig i forhold til om investeringen i en varmepumpe er en god ide eller ej.

2.3 Røggaskondensering, eldrevet varmepumpe - Vejen Varmeværk

Vejen Varmeværk er et fjernvarmeverk, hvor værkets to fliskedler begge er udstyret med en eldrevet varmepumpe til yderligere afkøling af røggassen. Varmepumperne er etableret i forbindelse med opførelsen af en ny fliskedel og har været i drift siden 2013. Hver varmepumpe har en kapacitet på ca. 550 kW_{varme}.

2.3.1 Baggrund

Vejen Varmeværk har haft et ældre varmepumpeanlæg tilknyttet værkets fliskedel siden 2003. I forbindelse med opførelsen af en ny fliskedel i 2013 blev både den nye og den eksisterende kedel forsynet med nye ammoniak-varmepumper. Selvom træflis er et billigt brændsel, som varmepumper normalt ikke kan konkurrere med, øger varmepumperne

Fjernvarmeverk / Kontaktperson	Vejen Varmeværk / Erik Jensen
Leverandør	Johnson Controls
Type	Sabroe HeatPac HPC 106 S VSD
Installations år / driftstimer	2013 / ca. 3100 timer/år
Varmekilde	Røggas
Nominal varmeydelse	1100 kW (samlet for 2 stk.)
Nominal COP	5,2
Fjernvarme opvarmes fra-til	Ca. 45-55 °C
Varmekilde afkøles fra-til	40-20 °C

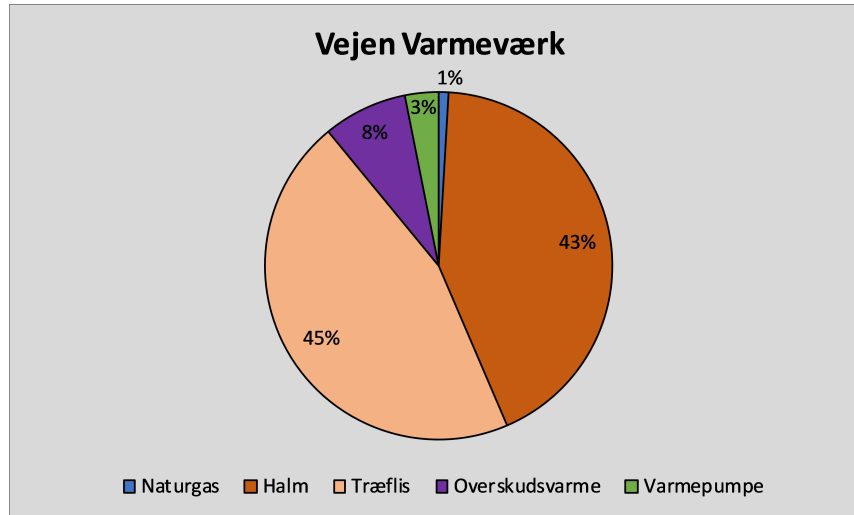
ne fliskedlernes effektivitet og samtidige kedlernes kapacitet. Før varmepumperne blev sat i drift, brugte Vejen Varmeværk naturgaskedler om vinteren. Varmepumperne har været med til at fortrænge naturgaskedler, hvilket har givet en fornuftig besparelse. Vejen Varmeværk har i 2014 idriftssat en halmkedel og dermed fortrænger varmepumperne i dag stort set ikke naturgas, men halm. Varmepumperne har dog også en miljømæssig effekt, da røggassen renses yderligere på grund af afkølingen. Varmeværket har således også let ved at overholde emissionskravene fordi afkølingen renses røgen yderligere for støv og tungmetaller.

2.3.2 Systemet

Vejen Varmeværk leverer varme til ca. 4300 forbrugere, og den årlige varmeproduktion udgør knap 110 000 MWh, som primært produceres på halm, træflis og overskudsvarme. Vejen Varmeværk er opdelt geografisk i en kedelcentral med naturgas, Vejen Energianlæg med træflis, bioolie og varmepumper, samt halmcentralen, som blev sat i drift i 2014. Fordelingen i 2017 kan ses på figur 2.8.

Varmepumperne

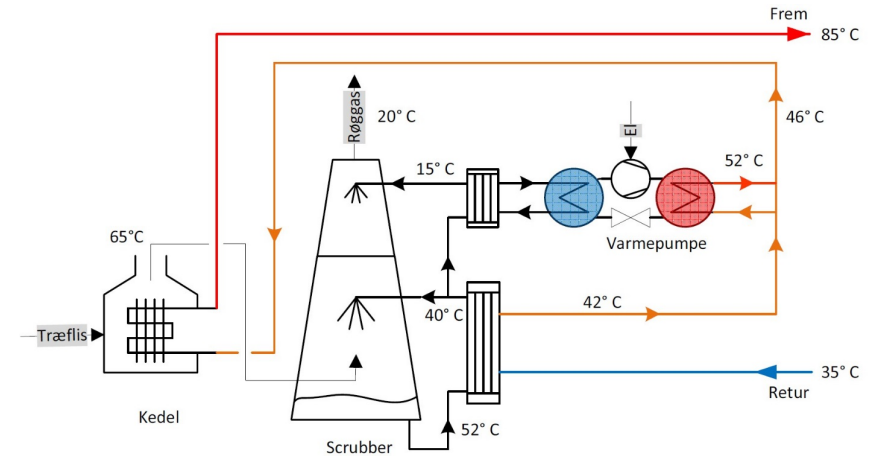
Begge varmepumper er 40 bar ammoniakvarmepumper, som typisk har en maksimal fremløbstemperatur på ca. 70 °C. Typen er derfor bedst egnet til fjernvarmesystemer med lav fremløbstemperatur eller i kombination med øvrige enheder, hvor varmepumpen ikke leverer direkte til fremløb. I Vejen er varmepumperne altid i drift med de tilhørende fliskedler, og varmepumperne forvarmer derfor kun fjernvarmefløden, inden det ledes til kedlerne. Inden fjernvarmereturen ledes til varmepumperne, har vandet allerede været igennem varmeveksleren til scrubberet, så scrubberet har så lav en temperatur som muligt, og effekten af scrubberet ikke reduceres. Varmepumpernes kolde sider er koblet til et sekundært trin på scrubberet så kun en delstrøm afkøles. Havde varmepumperne kølet hele mængden af returvand, skulle køleeffekten være langt større og den bortkølede energi vil ikke blive indvundet i scrubbertårnet.



Figur 2.8 – Varmeproduktionsfordeling på Vejen Varmeværk.

Princippet for varmepumpernes tilslutning er skitseret på figur 2.9.

Fjernvarmereturen ledes først igennem en pladevarmeveksler, hvor varme fra scrubbevandet overføres til fjernvarmevandet. Scrubbevandet afkøles herved fra 52 °C til 40 °C, imens fjernvarmevandet opvarmes fra 35 °C til 42 °C. Efter pladevarmeveksleren deles scrubbevandet, så en delstrøm ledes til scrubberen, mens en anden delstrøm ledes gennem endnu en pladevarmeveksler og afkøles til ca. 15 °C af varmepumpen. Herefter indsprøjtes det kolde scrubbevand øverst i tårnet. Scrubberen er inddelt i to temperaturtrin som passer til røggassens aftagende temperatur. Varmepumpen afgiver varmen til en delstrøm af det forvarmede vand, som opvarmes fra 42 til 52 °C. Herefter samles hovedstrømmen igen og temperaturen øges til ca. 46 °C. Årsagen til, at det kun er en delstrøm som opvarmes er, at varmepumpens varmevekslere ikke er dimensioneret til hele flowmængden.



Figur 2.9 – Principskitse af eldrivet varmepumpe koblet til scrubbertårn på fli-skedel. Kilde: Teknologisk Institut.

2.3.3 Driftserfaringer

Varmepumperne har været i drift siden 2013 og har fungeret upåklageligt siden installationen. I første omgang blev varmepumperne koblet på returvandet, så dette afkøledes inden indløb i varmeveksleren til scrubberen, men det viste sig hurtigt at denne model ikke fik den ønskede effekt. Når varmepumpen sænkede temperaturen, betød det en tilsvarende sænkning af temperaturen ud af scrubberveksleren, og fli-skedlerne måtte efterfølgende tilføre mere energi til vandet for at få det op på den ønskede temperatur. Fejlen blev dog hurtigt rettet inden varmepumperne rigtigt blev taget i brug. I denne opstilling er det vigtigt, at varmepumperne køler en separat delstrøm, så det rigtige temperatur-niveau kan rammes. Problemstillingen er beskrevet nærmere i drejebogens Bilag C.

2.3.4 Organisation/ejerskab

Varmepumperne ejes og drives af Vejen Varmeværk, som betragter dem som en del af de tilknyttede varmeproduktionsanlæg.

Teknik og specifikationer

- Kold side
 - Varmepumper og scrubbevand er forbundet via en sekundær koldtandskreds og en pladevarmeveksler.
- Varm side
 - Fjernvarmevandet ledes direkte igennem varmepumpernes indbyggede varmevekslere.
- Varmepumpe
 - 40 bar ammoniakvarmepumper med stempelkompressorer. Leverer maksimalt en afgangstemperatur på ca. 70 °C.
- CO₂
 - Da varmeproduktionen i Vejen primært udgøres af halm og flis (og dette betragtes CO₂-neutralt), reduceres CO₂-udledningen ikke for denne del. I spidslasten vil varmepumpen kunne fortrænge gas i 70 timer, hvilket svarer til 77 MWh. Det estimeres, at den årlige reduktion udgør ca. 10 ton CO₂. Til gengæld betyder varmepumpens røgrensende effekt, at der sker en væsentlig reduktion i de øvrige emissioner.

2.3.5 Budget og økonomi

Investering

Nøgletallene for investeringen ses herunder:

Varmepumpe	2,1 mio. kr.
El og SRO	0,3 mio. kr.
Hus og tilslutning	1,1 mio. kr.
Total	3,5 mio. kr.

Driftsøkonomi

De to varmepumper har en COP på omkring 5,2. Der er udgifter til vedligehold og indkøb af elektricitet. Disse udgør ca.:

Vedligehold	15 kr./MWh _{varme}
Indkøb af elektricitet	
Spot	215 kr./MWh _{el}
Transport overordnet	83 kr./MWh _{el}
Transport lokal	77 kr./MWh _{el}
Elafgift	305 kr./MWh _{el}
Samlet	680 kr./MWh _{el}

Med en COP på 5,2 bliver omkostningerne til elektricitet til ca. 131 kr./MWh_{varme}. Indregnes vedligehold bliver varmeproduktionsprisen for de to varmepumper derfor omkring 146 kr./MWh. I forhold til flis og halm, som er marginal de fleste af årets timer, vil der være en mindre besparelse når PSO-tariffen ikke regnes med og lempelsen af elvarmeafgiften fra 2019 ligeledes indregnes. I øjeblikket er der dog ingen driftsbesparelse, da Vejens produktionspriser på både halm og flis ligger på ca. 160 kr./MWh. Tværtimod forøges driftsomkostningerne med varme-

pumpen under de nuværende forhold. I omkring 70 timer/år er marginalen dog naturgas, hvor varmepumpen giver en driftsbesparelse.

Samlet økonomi

Den samlede økonomi varierer med gaspriser og antallet af driftstimer fra år til år. I det følgende er der regnet med disse forudsætninger (hvor elprisen regnes uden PSO og med lempet elvarmeafgift):

- Produktionspris på gaskedler = 405 kr./MWh_{varme}
- Samlet elpris = 680 kr./MWh_{el}
- Vedligehold = 15 kr./MWh_{varme}
- Årligt antal driftstimer med halm som marginal = 3030 timer
- Årligt antal driftstimer med gas som marginal = 70 timer

Varmepumper på fliskedler - 1100 kW		
Investering	3 500 000	kr.
Årligt antal driftstimer m. halmmarginal	3030	timer
Årlig varmeproduktion	3333	MWh
Driftsbesparelse pr. MWh	16	kr./MWh
Driftsbesparelse med halmmarginal	46 662	kr./år
Årligt antal driftstimer m. gasmarginal	70	timer
Årlig varmeproduktion	77	MWh
Driftsbesparelse pr. MWh	259	kr./MWh
Driftsbesparelse med gasmarginal	19 943	kr./år
Årlig driftsbesparelse	66 605	kr./år
Simpel tilbagebetalingstid	52,5	år
Intern rente over 15 år	-12,7	%

2.4 Røggaskondensering, absorptions-varmepumper - Vestforbrænding

Vestforbrænding er et affaldsselskab som bl.a. udnytter varme fra affaldsforbrænding til kraftvarmeproduktion. Varmen sælges dels til slutkunder i Vestforbrændings eget net og dels til andre forsyningsselskaber i Københavnsområdet. For at udvinde kondenseringsenergi fra røggassens vanddamp, blev det ene af Vestforbrændings to anlæg forsynet med en røggasscrubber og varmepumper til afkøling af røggassen.

Anlægget har været i drift siden 2007 og genvinder nominelt ca. 13 MW yderligere energi fra røggassen i det ene forbrændingsanlæg. Afhængigt af returtemperaturen og røggassen kan varmepumperne dog køle med op imod 17 MW.

Fjernvarmeværk / Kontaktperson	Vestforbrænding / Anders Emus
Leverandør	Götaverken Miljö
Type	Thermax G119
Installations år / driftstimer	2007 / ca. 8000 timer/år
Varmekilde	Røggas
Drivenergi	Udtagsdamp fra turbine; 163 °C
Nominel varmeydelse	32 MW (heraf er ca. 19 MW drivenergi)
Nominel COP	1,7
Fjernvarme opvarmes fra-til	Ca. 60-80 °C
Varmekilde afkøles fra-til	Ca. 115-65 °C

2.4.1 Baggrund

Varmepumperne blev installeret for at muliggøre kondensering på røggassen, så den store energimængde heri kunne udnyttes. Dette krævede dog en større ombygning, da røggasset ikke var udstyret med scrubberanlæg og skorstenen ikke var egnet til kold røggas. Varmepumpeinstallationen blev derfor foretaget sammen med opstilling af et

scrubberanlæg og installation af en ny glasfiberkerne i skorstenen. Varmepumperne drives af udtagsdamp ved 163 °C og påvirker derfor værket elvirkningsgrad en lille smule. På grund af de seneste års lave elpriser, har det dog vist sig at være en langt bedre forretning end tidligere antaget.

2.4.2 Systemet

Vestforbrænding er et affaldsbaseret kraftvarmeværk, som leverer fjernvarme igennem Vestforbrændings eget fjernvarmenet til kunder i Ballerup, Furesø, Herlev og Gladsaxe kommuner. Når produktionen overstiger behovet i Vestforbrændings net, sælges varmen til transmissionsnettene hos CTR og VEKS. Der produceres godt 1,1 mio. MWh_{varme} årligt, mens elproduktionen udgør omkring 250 000 MWh årligt. Varmepumperne udvinder omkring 100 000 MWh fra røggassen, svarende til knap 10 % af den samlede varmeproduktion.

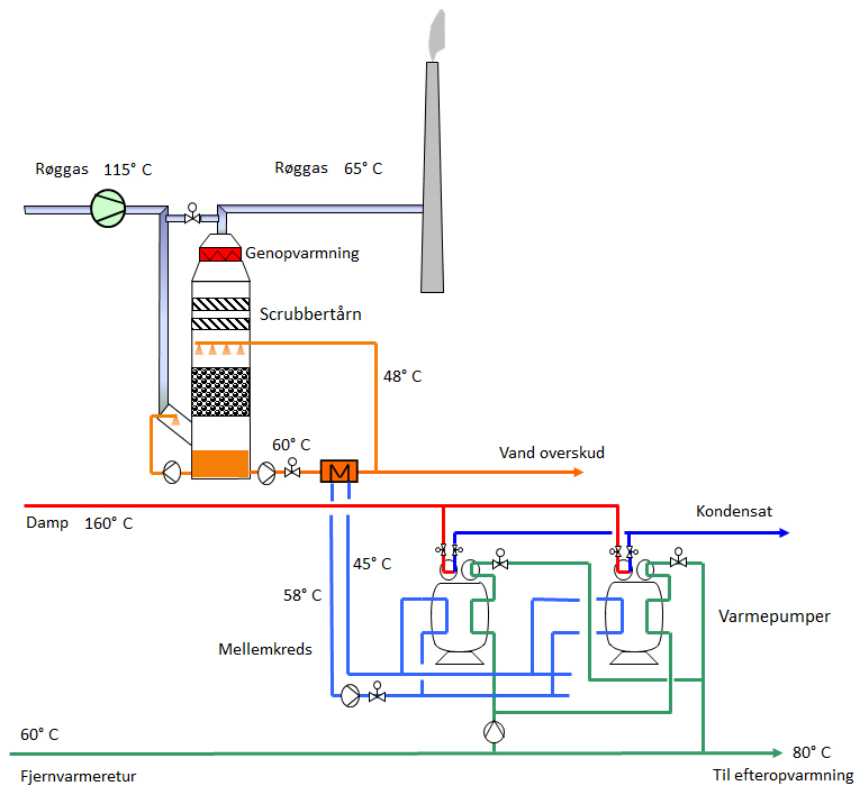
Vestforbrænding har drift på to kraftvarmeanlæg, som stort set er i drift alle årets timer. Røgen fra de to anlæg ledes til samme skorsten, men det er kun røgen fra det ene kraftvarmeanlæg, som køles via varmepumperne. Herefter ledes den afkølede røg videre til skorstenen og blandes med ikke-kølet røg fra det andet kraftvarmeanlæg. På længere sigt forventes det, at der også skal installeres et kondenseringsanlæg på anlægget, som ikke har røggaskøling i dag.

Varmepumperne

De to varmepumper er koblet parallelt på både kølevand, fjernvarmevand og drivdamp. Varmepumperne kan således drives uafhængigt af hinanden. Fjernvarmevandet ledes direkte igennem varmepumperne og opvarmes normalt fra 60 til 80 °C. Automatikken regulerer fjernvarmestrømmen igennem varmepumperne, og kan lede en delstrøm udenom, hvis det er aktuelt. Normalt ledes det fulde flow dog igennem varmepumperne. I perioder med lavere returtemperatur er varmepumperne i stand til at køle røggassen yderligere og øge køleeffekten til omkring 17 MW. Fjernvarmetemperaturen ud af varmepumperne er ikke så



Figur 2.10 – Absorptionsvarmepumpe ved Vestforbrænding.



Figur 2.11 – Principskitse over absorptions-varmepumper ved Vestforbrænding. Kilde: Vestforbrænding.

afgørende, da vandet eftervarmes på forbrændingsanlægget. Opbygningen er skitseret på figur 2.11.

Som det ses af figuren, køles scrubbevandet igennem en mellemkreds, så det aggressive scrubbevand ikke ledes direkte igennem varmepumperne. Mellemkredsen køles til ca. 45°C og køler igen scrubbevandet til omkring 47°C. I scrubberen afkøles røggassen fra ca. 115°C til omkring 65°C, og scrubbevandet opvarmes herved til omkring 60°C, som herefter på ny afkøles af mellemkredsen fra varmepumpen.

Scrubbertårnet er forsynet med en genopvarmningsveksler, som kan genvarme røggassen for at undgå dråbenedfald omkring skorstenen. Varmevexleren har en ydelse på omkring 1 MW, men har vist sig at være overflødig, da røggassen fra scrubberen blandes med den varme røggas fra det andet forbrændingsanlæg, og temperaturen ud af skorstenen derfor ikke nærmer sig dugpunktet.

2.4.3 Driftserfaringer

Varmepumperne har været i drift siden 2007 og udover justeringer i den første tid, har anlæggene fungeret upåklageligt med omkring 8000 årlige driftstimer siden 2007.

2.4.4 Organisation/ejerskab

Varmepumperne ejes og drives af Vestforbrænding.

Teknik og specifikationer

- Kold side (fordamper)
 - Varmepumper og scrubbevand er forbundet via en sekundær koldtvandskreds og en pladevarmeveksler.
- Varm side (absorber og kondensator)
 - Fjernvarmevandet ledes direkte igennem varmepumperne. Varmepumpernes automatik styrer vandstrømmen.
- Drivenergi
 - 163°C damp (6,8 bar) ledes direkte igennem varmepumpernes generatorer.
- Varmepumpe
 - To stk. 1-trins LiBr-absorptionsvarmepumper. Leverer maksimalt en temperatur på ca. 80°C.

- CO₂
 - De to varmepumper udvinder i alt ca. 100 GWh_{varme} årligt igennem kondenseringsvarmen. Brændslet, som varmepumperne fortrænger, svinger over årstiden. Anlæggets CO₂-reduktion er ikke opgjort.

2.4.5 Budget og økonomi

Investering

Nøgletallene for investeringen ses herunder:

Scrubber og varmepumper	39,0 mio. kr.
El og SRO	4,5 mio. kr.
Rør og tilslutninger	15,0 mio. kr.
Ombygning af skorsten	10,0 mio. kr.
Bygning	5,0 mio. kr.
Andre omkostninger	9,0 mio. kr.
Total	82,5 mio. kr.

Driftsøkonomi

I 2006 blev varmepumpeanlægget projekteret med en tilbagebetalingstid på omkring 10 år. Den aktuelle tilbagebetalingstid svinger fra år til år afhængigt af varmebehov, marginal varmepris samt elpriser. Det estimeres dog, at tilbagebetalingstiden vil blive væsentlig kortere end de 10 år, da forholdet imellem el- og varmepriser er mere gunstigt nu end i 2006.

Varmepumpernes elforbrug er minimalt, og driftsomkostningerne udgøres derfor alene af service og vedligehold. Vestforbrænding har en serviceaftale, som dækker al vedligehold og reparation. Dog kommer eventuelle reservedele og forbrugsstoffer oveni.

Serviceaftalen koster 200 000 kr./år for begge maskiner, og igennem de senere år har udgiften til reservedele været 15-20 000 kr./år.

Værdien af varmen svinger meget, afhængigt af om det sælges i eget net eller til CTR og VEKS, hvor det igen afhænger af marginale produktionsenheder. En årlig gennemsnitsværdi vil ligge omkring 200 kr./MWh, og med denne værdi bliver den samlede økonomi som følger:

Samlet økonomi

Den samlede økonomi varierer med marginale varmepriser, elpriser og antallet af driftstimer fra år til år. I det følgende er der regnet med disse forudsætninger:

- Værdi af varme = 200 kr./MWh_{varme}
- Vedligehold = 220 000 kr./år
- Årligt antal driftstimer = 8000 timer

Varmepumper til røggaskondensering - 13 MW		
Investering	82 500 000	kr.
Årligt antal driftstimer	8000	timer
Årlig varmeproduktion	104 000	MWh
Værdi af varme	200	kr./MWh
Serviceomkostninger	220 000	kr./år
Årlig fortjeneste	20 580 000	kr./år
Simpel tilbagebetalingstid	4,0	år
Intern rente over 15 år	24	%

3 Overskudsvarme

Dette kapitel indeholder tre cases. Den første løsning er etableret i Bjerringbro, hvor varme fra Grundfos' proceskøl genvindes og udnyttes i fjernvarmesystemet. Løsningen i Bjerringbro er ligeledes interessant, da der er tale om samproduktion af varme og køling, hvorfor en særlig afregningsmodel benyttes.

Den næste løsning ejes af Skjern Papirfabrik og udnytter overskudsvarme fra papirtørring, hvilket også er interessant, da papirfabrikken hermed er blevet den primære varmereproducent i Skjern.

Det sidste anlæg er etableret ved Høje Taastrup Forsyning og er et kombineret varme/køleanlæg, som producerer kulde til Copenhagen Markets imens varmen udnyttes i fjernvarmenettet i Høje Taastrup.

3.1 Overskudsvarme – Grundfos / Bjerringbro Varmeværk

Grundfos og Bjerringbro Varmeværk har lavet en fælles investering i et større varmepumpeanlæg til samproduktion af køling og varme. Varmepumpen varetager Grundfos' behov for proceskøling, og varmen udnyttes i Bjerringbros fjernvarmesystem. I forbindelse med investeringen har Bjerringbro Varmeværk etableret et nyt selskab, som ejer og driver varmepumpen. Grundfos og det eksisterende fjernvarmeværk køber henholdsvis kulde og varme fra det nye selskab, og et eventuelt overskud deles. Varmepumpen er installeret i en ny bygning ved Grundfos, som kaldes Energicentralen, og ligger ved siden af varmeværkets kraftvarmecentral. Fordi der ikke er samtidighed imellem byens fjernvarmebehov og Grundfos' kølebehov, er der samtidig etableret en forbindelse

Virksomhed / Kontaktperson	Grundfos Bjerringbro / Klaus Christensen
Fjernvarmeværk / Kontaktperson	Bjerringbro Varmeværk / Charles Hansen
Leverandør	ICS Energy
Type	3 stk. specialbyggede ammoniak-anlæg, Sabroe stempel-kompressorer
Installations år / driftstimer	2007 / ca. 3700 timer/år
Varmekilde	Proceskøl
Nominel varmeydelse	3,7 MW - 2 stk. á ca. 1,3 MW + 1 stk. á ca. 1,1 MW
Nominel COP	4,6 (ved samlet drift på alle tre anlæg)
Fjernvarme opvarmes fra-til	Ca. 37-67 °C
Varmekilde afkøles fra-til	18-6 °C

til et grundvandsmagasin, som bruges til lagring af overskudsvarme fra sommer til vinter. Energicentralen blev indviet i januar 2013.

Løsningen består af tre parallelle ammoniak-varmepumper, hvoraf de to er 2-trinsanlæg og den sidste er et lavtryks-anlæg i et trin. Den samlede varmeeffekt er ca. 3,7 MW, og varmepumpen har hvad der svarer til 3700 årlige fuldlasttimer.

3.1.1 Baggrund

Bjerringbro Varmeværk har i forvejen erfaring med varmepumper til køling af røggas og har længe haft en forventning om, at varmepumper bliver en vigtig del af den fremtidige fjernvarmeforsyning. Grundfos har haft et ønske om at udskifte en række ældre, decentrale køleanlæg med færre og større, centralt placerede anlæg. Energicentralen var en oplagt løsning, da der var synergi både omkring investering og driftsomkostninger. Løsningen både er miljøvenlig, energibesparende og samtidig økonomisk attraktiv for begge parter.

Projektet kunne være strikket sammen efter flere forskellige økonomiske modeller. Efter grundige overvejelser blev en fælles styregruppe med det overordnede ansvar for projektet oprettet. Økonomien imellem Grundfos og fjernvarmeselskabet simplificeres på denne måde, og samtidig sikres det, at begge parter tager ejerskab og har vedblivende interesse i projektet.

3.1.2 Systemet

Bjerringbro Varmeværk leverer varme til ca. 2100 forbrugere. Grundfos er den største forbruger og aftager omkring 24 % af den samlede varmel leverance. Den årlige varmeproduktion udgør ca. 84 000 MWh, hvoraf Energicentralen producerer omkring 13 500 MWh, svarende til ca. 15 %. Det er Bjerringbro Varmeværk som står for den daglige drift af Energicentralen.

Fjernvarmesystemet

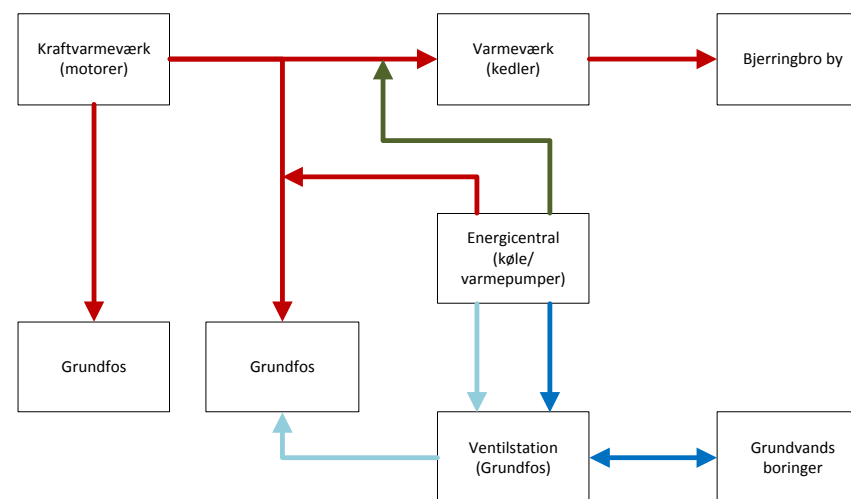
Bjerringbro Fjernvarme har en kedelcentral og en kraftvarmecentral i Bjerringbro. Der er stor overkapacitet i systemet, og varmen kan produceres på forskellige vis:

- Med tre naturgaskedler, der er placeret på kedelcentralen. Heraf én med en eldrevet varmepumpe til røggaskøling. Den samlede varmeeffekt er ca. 28 MW.

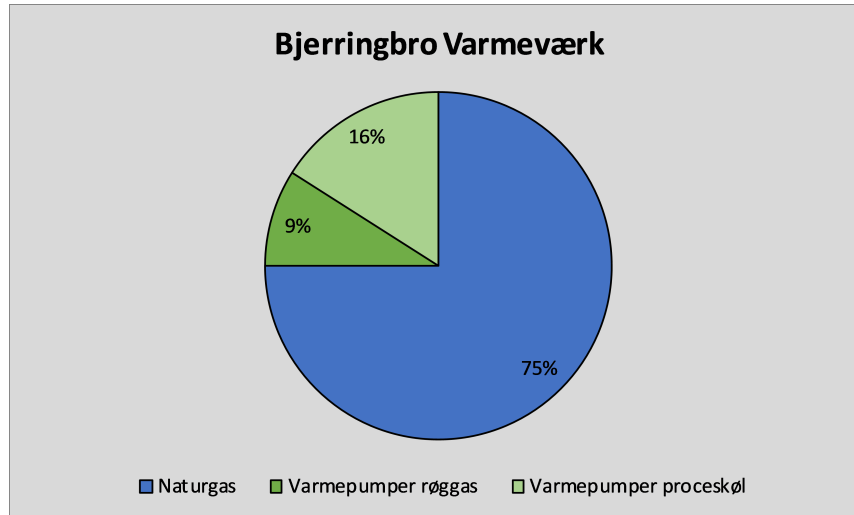
- Med fire naturgasmotoranlæg, der er placeret i kraftvarmecentralen. Heraf én med en eldrevet varmepumpe og én med en varmedrevet varmepumpe til røggaskøling. Den samlede varmeeffekt er ca. 18 MW.
- Med to 2-trins og én 1-trins varmepumpe, placeret i Energicentralen ved Grundfos. Den samlede effekt er ca. 3,7 MW.

Naturgasmotoranlæggene er forsynet med lagertanke til korttidslagring, som kan indeholde en varmemængde på ca. 320 MWh.

Byens forbrugere forsynes fra kedelcentralen, og varmen fra kraftvarmeenhederne distribueres også ud til Bjerringbro igennem kedelcentralen. Varmetabet i fjernvarmenettet er forholdsvis lavt, da storkunden Grundfos ligger lige ved siden af kraftvarmeværket. Figur 3.1 viser opbygningen i Bjerringbro.



Figur 3.1 – Fjernvarmesystem og Energicentral i Bjerringbro. Kilde: Teknologisk Institut.



Figur 3.2 – Varmeproduktionsfordeling på Bjerringbro Varmeværk.

Figur 3.1 viser opbygningen i Bjerringbro. Kraftvarmeenhederne kan enten forsyne Grundfos direkte eller producere varme til kedelcentralen, hvorfra det videredistribueres til byen. Energicentralen kan både levere op til 70 °C fremløb fra 2-trins-anlæggene samt op til 50 °C fremløb fra 1-trinsvarmepumpen.

Anlægget driftes aldrig alene, og fremløbet kan derfor hæves yderligere i temperatur ved at sammenblende fjernvarmevand fra øvrige produktionsenheder. I sommerperioden dækkes varmebehovet af kraftvarmeenhederne, som leverer reguleringsydelser på elmarkedet og derfor altid har en vis varmeproduktion. I månederne juni til september dækkes varmebehovet af motoranlæggene, og varmepumperne er derfor ikke i drift disse 4 måneder. Kølebehovet ved Grundfos er størst i disse måneder og her gemmes varmen i grundvandsboringer, som afkøles vha. varmepumperne i vinterperioden, hvor kølebehovet er mindre. Den typiske varmeproduktionsfordeling ses på figur 3.2.



Figur 3.3 – Varmepumperne i Energicentralen i Bjerringbro.

Energicentralen

Som nævnt producerer varmepumperne aldrig direkte til byen, og dette udnyttes ved hele tiden at minimere varmepumpernes fremløbstemperatur. Hermed opnås en højere COP på varmepumperne og energiforbruget reduceres. Energicentralen leverer varme ved to temperaturniveauer, som nominelt er lagt ud for henholdsvis 46 og 67 °C. Varmen ved 46 °C ledes omkring kedelcentralen og opblandes til fremløbstemperatur, imens varmemængden på 67 °C enten kan forsyne Grundfos direkte eller ledes til kedelcentralen. Der kan leveres en effekt på ca. 1,1 MW ved 46 °C og ca. 2,6 MW ved 67 °C. Systemet temperaturoptimeres hele tiden, så der altid køres med en så lav fremløbstemperatur som muligt. Den krævede fremløbstemperatur afhænger af varmebehovet ved både Grundfos og byens fjernvarmebrugere samt varmeproduktionen på kedler og motoranlæg.

Kølebehøvet ved Grundfos var oprindeligt inddelt i to niveauer med fremløbstemperaturer på henholdsvis 6 og 12 °C. Returtemperaturen på kølevandet er lagt ud for 18 °C. Ligesom fjernvarmetemperaturene fra Energicentralen minimeres, er der arbejdet med at øge fremløbstemperaturen på kølevandet. Dette har resulteret i, at der på nuværende tidspunkt køres med fremløbstemperaturer på 12 °C i begge systemer, som øger både varmepumpernes COP og kapacitet.

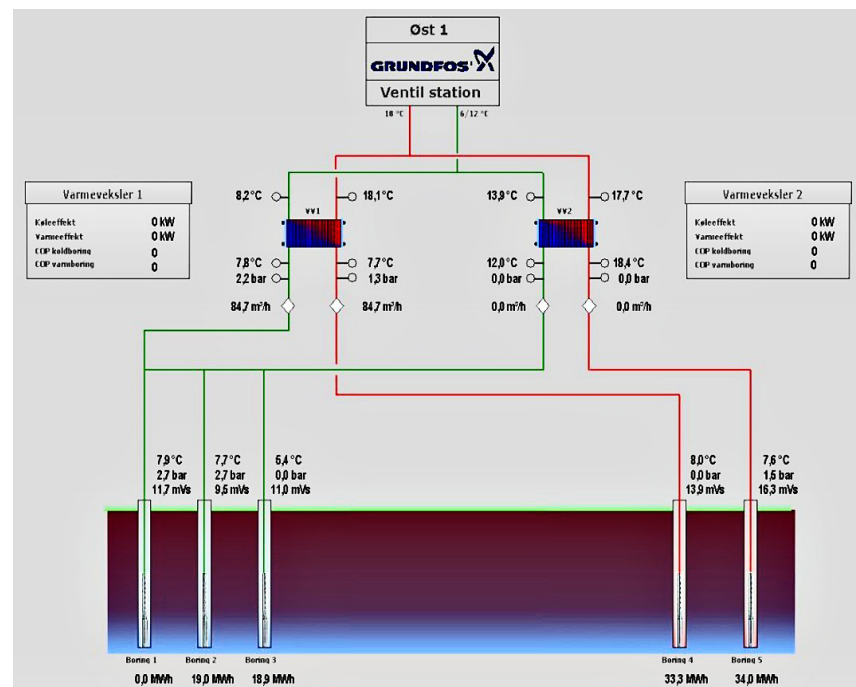
Figur 3.3 viser varmepumperne i Energicentralen.

Det tilknyttede grundvandslager anvendes til lagring af overskudsvarme fra sommer til vinter. I sommerperioden dækkes varmebehøvet af grundlast på motoranlæggene, og Energicentralen er derfor ikke i drift. Om sommeren dækkes Grundfos' kølebehov af grundvandslageret, som nedkøles igen i vinterhalvåret, så der er energibalance. Der kan skiftes imellem køling fra Energicentralen og grundvandslageret via en ventilstation ved Grundfos. Et billede fra det tilknyttede SRO-anlæg ses på figur 3.4.

Anlægget består af to varmevekslere imellem kølevand og grundvand samt fem grundvandsboringer, hvoraf tre eller to bruges henholdsvis til oppumpning og tilbageledning af grundvandet. Brøndene reverseres afhængigt af om lageret oplades eller aflades med energi. Kuldageret kan køle med en effekt på ca. 1,5 MW, og kapaciteten er beregnet til minimum at udgøre 3500 MWh.

Etableringen af energicentralen betyder, at Bjerringbro Fjernvarme har en større fleksibilitet end tidligere. Hermed kan naturgasmotorerne driftes ved høje elpriser, imens Energicentralen er i drift ved lave elpriser. Grundvandslageret og kraftvarmeværkets akkumuleringstanke understøtter denne fleksibilitet.

Fleksibiliteten udnyttes yderligere ved opblanding af varme fra varmepumper og motor- eller kedelanlæg. Da varmepumperne kun dækker en del af behovet, er der altid samdrift med enten kedel- eller motoranlæg alligevel. På den måde kan den høje fremløbstemperatur fra kedel- og motoranlæg med fordel udnyttes til at holde fremløbstemperaturen fra varmepumperne så lav som muligt, mens fremløbet til



Figur 3.4 – SRO-billede af ventilstationen til grundvandslageret (anlægget er ikke i drift i den viste situation). Kilde: Grundfos.

slutforbrugerne kan holdes inden for de krævede grænser. Varmeandele og temperaturniveauer for de forskellige produktionsenheder styres og optimeres hele tiden for at opnå den lavest mulige samlede nettoproduktionsomkostning.

3.1.3 Driftserfaringer

I forbindelse med indkøring af varmepumpesystemet har der været mindre udfordringer med regulering og indjustering. Igennem indkøringen er systemet blevet justeret ind og tilpasset de fluktuationer, som

har været forstyrrende. Efterfølgende har anlægget fungeret uden egentlige problemer.

På nuværende tidspunkt har anlægget haft mere end 10 000 driftstimer, hvoraf mange dog har været i delast. Pga. optimering af temperaturniveauer på både varm og kold side, har det været muligt at øge anlæggets COP-værdi, så energiforbruget er lavere end beregnet.

3.1.4 Organisation/ejerskab

Energicentralen ejes i fællesskab af Grundfos og Bjerringbro Fjernvarmeværk, som hver har dækket omkring halvdelen af etableringsomkostningerne. På den måde har begge parter en stor andel i projektet og samme interesse i optimal drift. Fra Energicentralen sælges køling til Grundfos og varme til fjernvarmesystemet. Både køling og varme sælges til samme pris som Grundfos og fjernvarmeværket ellers kunne have produceret ydelsen til på eksisterende produktionsenheder. Fordi både varme og køling har værdi, bliver produktionsomkostningerne forholdsvis lave, og der opbygges et overskud som altså deles ligeligt imellem Grundfos og fjernvarmeværket.

At fjernvarmeværket står for den daglige drift betyder, at anlægget i højere grad kan variere fremløbstemperaturerne afhængigt af produktionen på de øvrige varmeproduktionsanlæg. På koldesiden holdes temperaturniveauerne konstante.

3.1.5 Teknik og specifikationer

- Kold side
 - Varmepumperne køler direkte på kølevandet fra Grundfos, som samtidig er forbundet til grundvandslageret via to pladevarmevekslere. I vinterperioden bruges kølevandet således som mellemkreds til køling af grundvandslageret.
- Varm side
 - Fjernvarmevandet ledes direkte igennem varmepumperne og blandes efterfølgende sammen med fjernvarmevand fra de øvrige produktionsenheder. Der bruges ikke akkumulering.
- Varmepumpe
 - 3 stk. parallelle ammoniak-varmepumper - én 1-trins og to 2-trins. Maks. temperatur er henholdsvis 50 °C og 70 °C.
- Elforsyning
 - Der er etableret en ny eltilslutning med fuld netadgang.
- CO₂
 - Samlet set giver løsningen i Bjerringbro en betydelig CO₂-besparelse. Kigges der på kølingen alene, bruger varmepumperne mere energi end et moderne køleanlæg, hvor varmen ikke udnyttes. Men fordi køleenergien fortrænger gasbaseret fjernvarmeproduktion, resulterer løsningen i en samlet CO₂-reduktion på ca. 2700 ton CO₂/år.

3.1.6 Budget og økonomi

Investering

Nøgletallene for investeringen ses herunder:

Rådgivning	1,4 mio. kr.
Ny bygning	3,0 mio. kr.
Varmepumper	7,7 mio. kr.
Grundvandsboringer og kølesystem	11,8 mio. kr.
Tilslutning og SRO	4,5 mio. kr.
El	2,0 mio. kr.
Uforudsete ekstraomkostninger	1,0 mio. kr.
Total	31,4 mio. kr.

Samlet investering for Grundfos: 15,7 mio. kr.

Samlet investering for Bjerringbro FV: 15,7 mio. kr.

Driftsøkonomi

Økonomien i Energicentralen gøres op ved, at Grundfos i princippet betaler det, der svarer til produktionsprisen på et normalt køleanlæg. På samme vis betaler varmeværket det, der svarer til varmeprisen for et normalt kedelanlæg. Summen af solgt varme og kulde lægges sammen, hvorefter produktionsomkostningerne fratrækkes. Dette resulterer i et overskud, som deles ligeligt mellem Grundfos og Varmeværket.

Nettoproduktionsomkostningen for Energicentralen udgøres af:

Vedligehold	20 kr./MWh _{varme}
Indkøb af elektricitet	
Spot	215 kr./MWh _{el}
Transport overordnet	83 kr./MWh _{el}
Transport lokal	105 kr./MWh _{el}
Elafgift	305 kr./MWh _{el}
Samlet	708 kr./MWh_{el}

Da Grundfos ikke sælger varme, men køber køling betales der ikke overskudsvarmeafgift. Grundfos får refunderet den del af afgiften, som vedrører proceskøl.

Med en COP på 4,6, fås 4,6 MWh_{varme} og 3,6 MWh_{køling} for hver MWh_{el} der bruges på Energicentralen. Samlet resulterer hver MWh_{el} altså i 8,2 MWh brugbare enheder, hvoraf de 4,6 er varme (56 %) og de 3,6 er køling (44 %). Afgiftsmæssigt fordeles elektriciteten i dette forhold, så de 56 % udnyttes til rumvarme, hvor elafgiften reduceres. 44 % udnyttes til proceskøling, hvor Grundfos kan få refunderet afgiften.

Samlet økonomi

Den overordnede økonomi for Energicentralen er opgjort herunder. Økonomien er beregnet med følgende forudsætninger:

- Salgspris af fjernvarme = 405 kr./MWh.
- Salgspris af køling = 250 kr./MWh (heraf får Grundfos en refusion i elafgiften så nettoomkostningen for Grundfos udgør knap 210 kr./MWh_{køling})

Energicentralen		
Investering	31 400 000	kr.
Årligt salg af varme	13 500	MWh
Salgspris	405	kr./MWh
Årligt varmesalg	5 467 500	kr./år
Årligt salg af køling	10 500	MWh
Salgspris	250	kr./MWh
Årligt kølesalg	2 625 000	kr./år
COP	4,6	
Elpris	708	kr./MWh _{el}
Drift og vedligehold	20	kr./MWh _{varme}
Samlet el	2 077 826	kr./år
Samlet D&V	270 000	kr./år
Årlige driftsomkostninger	2 347 826	kr./år
Årligt overskud	5 744 674	kr./år
Værdi af 1. års energibesparelse	350	kr./MWh
Samlet værdi af energibesparelse	4 725 000	kr.
Simpel tilbagebetalingstid	4,6	år
Intern rente over 15 år	20,2	%

3.2 Overskudsvarme – Skjern Papirfabrik

Skjern Papirfabrik i Skjern har investeret i et større varmepumpeanlæg, som indvinder spildvarme fra fabrikkens tørreproces. Papirfabrikken ejer varmepumpen, som blev idriftsat i december 2012. Varmen sælges til Skjern Fjernvarme via en ny fjernvarmeledning, som blev etableret sammen med varmepumpeanlægget. Løsningen er en kombination af tre parallelle ammoniak-varmepumper og en direkte varmeveksler. Den samlede varmeeffekt er ca. 6,0 MW, og varmepumpen har omkring 8000 årlige driftstimer. Mange af driftstimerne foregår dog ved dellast.

3.2.1 Baggrund

Skjern Papirfabrik blev på et tidspunkt opmærksom på, at deres procesenergi primært ender i afblæsningsluft fra tørreprocessen. Det betyder, at energiintensiteten i afblæsningsluften er meget høj, samtidig med at temperaturen er høj. Det gør overskudsvarmen meget velegnet til en varmepumpeløsning. En række målinger på afblæsningsluften vi-

Virksomhed / Kontaktperson	Skjern Papirfabrik (ejer) / Søren Skærbæk
Fjernvarmeværk / Kontaktperson	Skjern Fjernvarme / Karsten Jørgensen
Leverandør	Johnson Controls
Type	Sabroe, 3 stk. HeatPac Sab 157 HR Ammoniak
Installations år / driftstimer	2007 / ca. 5300 timer/år
Varmekilde	Overskudsvarme - Fugtig luft
Nominel varmeydelse	6 MW (3 x 1,33 MW + 2,0 MW direkte veksling)
Nominel COP	6,9 (inkl. direkte varmeveksling)
Fjernvarme opvarmes fra-til	Ca. 37-70 °C
Varmekilde afkøles fra-til	55-30 °C

ste, at der var mulighed for at genvinde op imod $8 \text{ MW}_{\text{varme}}$. Papirfabrikken bruger selv varme fra naturgaskedler i et dampsystem ved mere end 200°C . Pga. den høje temperatur i det interne system, er der ikke mulighed for at udnytte overskudsvarmen på selve fabrikken. Skjern Papirfabrik leverede allerede fjernvarme inden varmepumpeløsningen blev etableret. Dette sker igennem LT-vekslere på naturgaskedler, hvor lavtemperatur-energi fra røggassen indvindes til Skjern Fjernvarme. Både papirfabrikken og Skjern Fjernvarme var enige om at udvide det eksisterende samarbejde, og en model for finansiering og afregning blev udarbejdet inden projektet blev realiseret.

3.2.2 Systemet

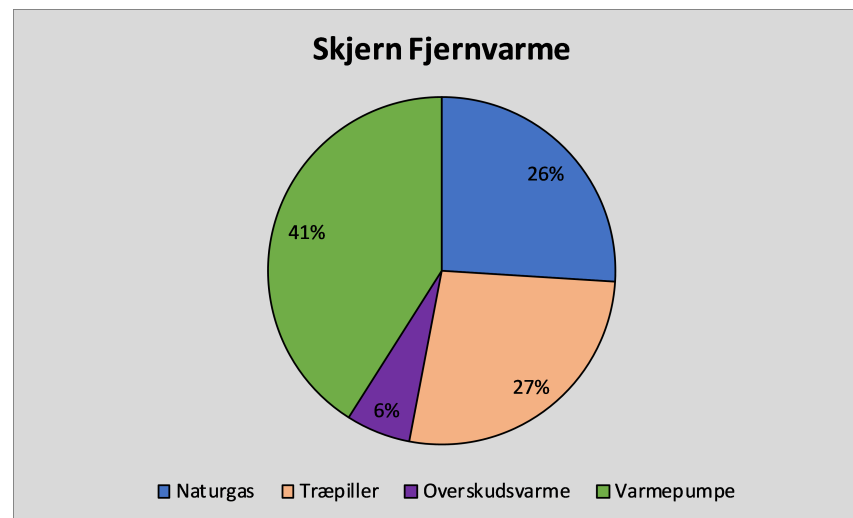
Skjern Fjernvarme leverer varme til ca. 3100 forbrugere og har en varmeproduktion på ca. 80 000 MWh årligt. Skjern Papirfabrik leverer ca. 37 000 MWh årligt, svarende til godt 45 % af byens varmebehov. Af de 37 000 MWh, produceres ca. 32 000 MWh på varmepumpeanlægget, og ca. 5000 MWh produceres ved direkte varmeindvinding på de eksisterende naturgaskedler.

Fjernvarmesystemet

Skjern Fjernvarme har egne produktionsanlæg til træpiller og naturgas. Varmeleverance fra papirfabrikken er altid billigste mulighed og udgør derfor grundlasten i systemet, som suppleres med de øvrige enheder efter behov. Den typiske varmeproduktionsfordeling ses på figur 3.5.

Varmepumpeanlægget

Energien til varmepumpen indvindes fra fugtig afkastluft, som tidligere blev ledt direkte ud til det fri. Fjernvarmevandet opvarmes fra ca. 37°C , og da tørreluften er imellem 50 og 58°C klares den første del af opvarmningen med direkte varmeveksling. Varmepumperne flytter energien i det temperaturområde, som ikke er muligt med direkte veksling. Fjernvarmenettet er koblet direkte på anlæggene, og systemet er forsynet med en akkumuleringstank til at stabilisere produktionen. Varme-

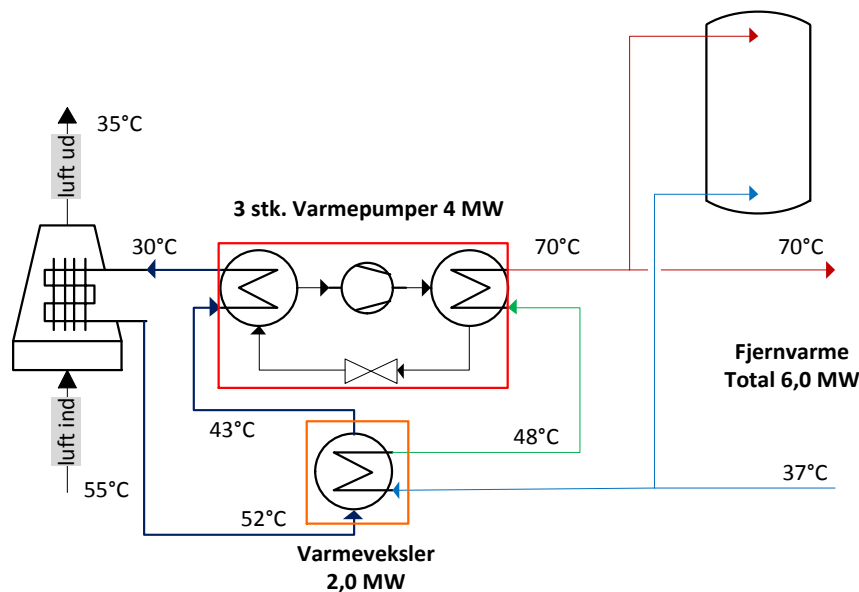


Figur 3.5 – Varmeproduktionsfordeling ved Skjern Fjernvarme.

pumperne er tre ens, parallelt koblede ammoniak-anlæg med en samlet nominel ydelse på $4,0 \text{ MW}$. I kombination med den direkte varmeindvinding bliver den totale varmeeffekt fra tørreprocessen ca. $6,0 \text{ MW}$. Figur 3.6 viser et simplificeret diagram af anlægget.

Anlægget er placeret på Skjern Papirfabrik, som ligeledes driver anlægget. Varmeværket har derfor ikke selv driftsansvar for den del af varmen, som købes ved Skjern Papirfabrik.

Anlægget var egentlig kun lagt ud for en ydelse på $5,4 \text{ MW}$, men fordi temperaturen i afblæsningsluften generelt er lidt højere end forventet, bliver effekten af den interne varmeveksler, og hermed den samlede effekt, højere. Afhængigt af papirtype, kan anlægget i perioder yde helt op til 7 MW . Normalt er ydelsen omkring 6 MW , når der køres fuld last. Kapaciteten overstiger fjernvarmebehovet i lange perioder og her begrænses ydelsen. Dette resulterer i en højere fordampningstemperatur, som



Figur 3.6 – Luft/vand-veksler og varmepumpe i kombination med direkte varmeveksling. Kilde: Teknologisk Institut.

betyder at COP stiger. I perioder med dellast ligger COP typisk imellem 8 og 10, imens årsgennemsnittet for 2013 var 6,9.

For at øge COP yderligere, arbejdes der på en sammenkobling mellem varmepumper og et nyt kedelanlæg. Kedlerne producerer varme ved højere temperaturer, som kan blandes med koldere vand fra varmepumperne. Herved falder fremløbstemperaturen fra varmepumperne og COP bliver højere.

3.2.3 Driftserfaringer

En af de komponenter, man har haft stor fokus på, var kølefladen, som skal trække varmen ud af den fugtige luft. Luften er aggressiv ved materialerne, og der har derfor været fokus på at finde en løsning, som kan

tåle det aggressive miljø. Samtidig betyder olie/fedt-rester og papirfibre, at mekanisk tilsmudsning også hurtigt kan blive et problem. For at holde kølefladen ren, overrisles hele varmeveksleren med spædevand en gang i timen. Med denne procedure har kølefladen fungeret problemfrit. Det har dog vist sig, at den udkondenserede vandmængde kræver omfattende filtrering, inden den kan genanvendes i papirproduktionen. Dette problem er løst via en kombination af oliefiltrering og sandfiltre, som fanger de uønskede bestanddele. Dette har samtidig en stor miljømæssig gevinst, da den ufiltrerede tørreluft tidligere blev udledt i atmosfæren. Varmepumpeanlægget har således betydet, at papirfabrikken ikke har behøvet at foretage yderligere tiltag i forhold til miljøgodkendelsen. Uden varmepumpeanlægget skulle der have været investeret i andet udstyr for fortsat at sikre en miljøgodkendelse.

En af de lidt større udfordringer efter opstart af anlægget har været at sikre en konstant høj fremløbstemperatur til fjernvarmen. I tilfælde af driftsstop, som bl.a. sker ved papirbrud, stopper hele anlægget i løbet af meget kort tid. Her har det været en udfordring at sikre, at der ikke opstår koldpropper i fjernvarmenettet. Der er foretaget nogle ændringer og justeringer i de første måneder efter anlæggets idriftsættelse, som har løst problemerne.

Varmepumpernes “kolde side” er konstrueret med komponenter til 25 bar, som betyder at sikkerhedsventilerne åbner, hvis temperaturen kommer over ca. 53 °C. Fordi tørreluft er op til 58 °C kan der ved stilstand opstå situationer, hvor trykket bliver for højt. Det har derfor været nødvendigt at foretage nogle styringsmæssige ændringer, så der ikke kan ledes vand med højere temperatur end 50 °C frem til varmepumperne.

Efter ovennævnte tilkøring og justering har der ikke været de store driftsmæssige problemstillinger med anlægget. Det er blevet tydeligt for papirfabrikken, at varmepumpen er en væsentlig indtjeningskilde, hvorfor der siden er arbejdet med minimering af papirstop for at øge antallet af driftstimer. Samtidig optimeres temperaturniveauerne løbende, så COP altid bliver størst mulig.

3.2.4 Organisation/ejerskab

Varmepumpe-anlægget er etableret igennem investeringer ved både fjernvarmeselskab og papirfabrik. Fjernvarmeselskabet har sørget for etablering af transmissionsledningen, imens Skjern Papirfabrik har stået for investeringerne på selve fabrikken.

Forud for etableringen blev en afregningsmodel mellem Skjern Papirfabrik og Skjern Fjernvarme fastlagt. Denne var baseret på et fast dækningsbidrag, som lægges oven på produktionsprisen. Skjern Papirfabrik garanterer en minimums-COP for anlægget, imens Skjern Fjernvarme garanterer at aftage en bestemt varmemængde. Samlet set giver det både en sikkerhed for investeringen ved Skjern Papirfabrik og en sikkerhed for varmeprisen til forbrugerne ved Skjern Fjernvarme.

I 2013 blev elafgiften og overskudsvarmeafgiften ændret, og her valgte man at skifte til en anden dynamisk afregningsmodel for salg af fjernvarmen. Denne model går ud på, at man hver måned beregner afregningsprisen på baggrund af de faktiske produktionsomkostninger for varmepumpe-anlægget, samt de marginale produktionsomkostninger for Skjern Fjernvarme. Afregningsprisen lægges midt imellem, så papirfabrikkens fortjeneste svarer til fjernvarmeselskabets besparelse.

3.2.5 Teknik og specifikationer

- Kold side
 - Varmepumper og røggaskøler er forbundet via en koldt-vandskreds. Røggaskøleren er fra Sical AB og leveret igennem Aco Engineering.
- Varm side
 - Fjernvarmevandet ledes direkte igennem varmepumperne. Den varme side er koblet til en akkumuleringstank på 1250 m³, svarende til ca. 45 MWh.
- Varmepumpe
 - 3 stk. parallelle ammoniakvarmepumper med højtryks skruekompressor. Maksimal temperatur er ca. 90 °C.
- Elforsyning
 - En eksisterende transformator, som tidligere var kommet i overskud, bliver nu brugt til varmepumperne. Papirfabrikken havde fuld kapacitet til varmepumperne i den gældende aftale og skulle derfor ikke købe yderligere tilslutning.
- CO₂
 - Varmepumpen fortrænger både varme baseret på naturgas og træpiller. Heraf udgør ca. 75 % naturgas og 25 % træpiller. Når træpillerne regnes for CO₂-neutrale bliver den årlige CO₂-reduktion omkring 3600 ton CO₂.

3.2.6 Budget og økonomi

Investering

Nøgletallene for investeringen ses herunder:

Skjern Fjernvarme	
Transmissionsledning	5,0 mio. kr.
Skjern Papirfabrik	
Varmepumper og rør	14,0 mio. kr.
Køleflade og ventilator	2,0 mio. kr.
Akkumuleringstank	1,5 mio. kr.
SRO	3,0 mio. kr.
Flytning af transformator og el	0,5 mio. kr.
Bygning	1,0 mio. kr.
<hr/>	
Total	22,0 mio. kr.

Driftsøkonomi

Der anvendes en dynamisk model i forbindelse med varmesalg til fjernvarmeselskabet. Afregningsprisen lægges hele tiden midt i mellem fjernvarmeselskabets marginale nettoproduktionsomkostning og produktionsomkostningen på papirfabrikken. Hvis fjernvarmeselskabets marginale nettoproduktionsomkostning f.eks. er 200 kr./MWh, og papirfabrikens produktionsomkostning er 100 kr./MWh, bliver afregningsprisen således 150 kr./MWh. Produktionsomkostningerne for både fjernvarmeselskab og papirfabrik er dynamiske og afhænger af naturgaspris, spotpris, PSO-tarif m.m., hvorfor afregningsprisen beregnes dynamisk.

Nettoproduktionsomkostningen for papirfabrikken udgøres af:

Vedligehold	12 kr./MWh _{varme}
Overskudsvarmeafgift	33 % af vederlag (COP > 3)
Indkøb af elektricitet	
Spot	215 kr./MWh _{el}
Transport overordnet	83 kr./MWh _{el}
Transport lokal	97 kr./MWh _{el}
Elafgift	305 kr./MWh _{el}
<hr/>	
Samlet	700 kr./MWh _{el}

Da varmen, som indvindes, stammer fra procesenergi hvor der godtgøres afgifter, skal der betales overskudsvarmeafgift, når den anvendes til rumvarme. I den konkrete situation i Skjern er den del af varmen som svarer til tre gange elforbruget i varmepumpen fritaget for overskudsvarmeafgift, og for den øvrige del betales 33 % af vederlaget, som varmen sælges for.

Fordi virksomheden er en kvotevirksomhed, giver løsningen omkring 5000 CO₂-kvoter ekstra pr. år, som har en værdi af ca. 75 kr./kvote.

I forbindelse med etableringen udløste varmepumperne desuden en energibesparelse på ca. 30.000 MWh, som på daværende tidspunkt blev solgt til markedsprisen.

Samlet økonomi

Varmeproduktionsomkostning og marginal fjernvarmepris varierer dynamisk med energipriser, COP og fjernvarmens marginale produktionsenheder. I det følgende eksempel er det antaget, at produktionsprisen på varmepumpen er 150 kr./MWh, og at fjernvarmens marginale produktionspris er 300 kr./MWh. Afregningsprisen bliver hermed 225 kr./MWh. Det er samtidig antaget at energibesparelsen kan sælges til en værdi af 350 kr./MWh. Med disse forudsætninger bliver økonomien som følger:

Skjern Fjernvarme		
Investering	5 000 000	kr.
Årligt køb af varme	32 000	MWh
Købspris	225	kr./MWh
Marginale produktionsomkostning	300	kr./MWh
Besparelse	75	kr./MWh
Årlig besparelse	2 400 000	kr.
Simpel tilbagebetalingstid	2,1	år
Intern rente over 15 år	47,9	%

Skjern Papirfabrik		
Investering	22 000 000	kr.
Årligt salgspris af varme	32 000	MWh
Salgspris	225	kr./MWh
Årligt varmesalg	7 200 000	kr.
Salg af CO ₂ -kvoter	375 000	kr./år
Årlige indtægter	7 575 000	kr./år
COP	6,9	
Elpris	700	kr./MWh _{el}
Overskudsvarmeafgift	33 %	COP > 3
Drift og vedligehold	12	kr./MWh _{varme}
Samlet el	3 246 377	kr./år
Samlet overskudsvarmeafgift	1 009 742	kr./år
Samlet D&V	384 000	kr./år
Årlige driftsomkostninger	4 640 119	kr./år
Årligt overskud	2 934 881	kr./år
Værdi af 1. års energibesparelse	350	kr./MWh
Samlet værdi af energibesparelse	9 576 812	kr.
Simpel tilbagebetalingstid	4,2	år
Intern rente over 15 år	22,5	%

3.3 Samproduktion af køl og varme - Høje Taastrup Fjernvarme

Høje Taastrup Fjernvarme har i 2016 etableret et varmepumpeanlæg til samproduktion af køl og varme. Kølekompresoren varetager kølebehovet for det nyopførte Copenhagen Markets, som er en 67 000 m² stor grønttorvshal, som åbnede i april 2016. Høje Taastrup Fjernvarme har i den forbindelse etableret en energicentral med et varmepumpeanlæg. En eldrevet ammoniakvarmepumpe udnytter energien fra køleprocessen som sendes ud i Høje Taastrup Fjernvarmes distributionsnet. Den samlede varmeeffekt er 2,3 MW, og varmepumpen har hvad der svarer til 3000 fuldlasttimer. Dette er baseret på en aftalt køleleverance på 6000 MWh_{køl} årligt, hvilket giver en årlig varmeproduktion på 9200 MWh_{varme}.

Virksomhed / Kontaktperson	Høje Taastrup Fjernvarme A.m.b.a. / Uffe Schleiss
Leverandør	ICS Energy
Type	Eldrevet GEA kompressor, to-trins varmepumpe, ammoniak-baseret anlæg
Installations år / driftstimer	2016 / ca. 3000 timer/år
Varmekilde	Samproduktion
Nominel varmeydelse	2,3 MW _{varme} fordelt på fire kompressorer 2,0 MW _{køling}
Nominel COP	3,14 varme 2,16 køling
Fjernvarme opvarmes fra-til	48-75 °C
Varmekilde afkøles fra-til	-1--8 °C

3.3.1 Baggrund

I 2016 blev grøntsagstorvet i Valby erstattet af Copenhagen Markets i Taastrup. Et nyt og omfangsrigt indendørs grøntsagsmarked med et dertilhørende stort behov for køling. Høje Taastrup Fjernvarme, - som ifølge deres vedtægter - både leverer fjernvarme og fjernkøling til sine andelshavere, etablerede derfor en energicentral, der via et varmepumpeanlæg leverer køling til Copenhagen Markets og fjernvarme til deres distributionsnet. Det gamle grøntsagsmarkeds kølebehov blev dækket af ældre og ineffektive, individuelle køleenheder, som nu er erstattet af et centraliseret system. Fra varmepumpeanlægget leveres fjernkølingen via et internt fjernkølingsnet i Copenhagen Market videre til deres 55 lejere.

Det var et ønske, at kølingen blev leveret ved lavere temperaturer end det normalt er tilfældet ved levering af fjernkøling, hvorfor effektiviteten af varmepumpen vil være lavere end tilsvarende anlæg, hvor fjernkølingen leveres ved en højere fremløbstemperatur.

3.3.2 Systemet

Fjernvarmesystemet

Høje Taastrup Fjernvarme leverer varme til ca. 6800 kunder. Den årlige varmeleverance til nettet udgjorde i 2016 ca. 330 000 MWh, hvoraf Energeticentralens varmepumpeanlæg forventes at kunne producere 9200 MWh, svarende til ca. 3 % af den totale varmeleverance. Det overordnede system udnytter synergierne ved samproduktion af varme og køling, hvor det ene ikke kan produceres uden det andet.

Høje Taastrup Fjernvarme er en del af det samlede fjernvarmesystem i Storkøbenhavn og køber al deres varme fra transmissionsselskabet VEKS. Varmen leveres dels som biomassekraftvarme, affaldsvarme og fra olie-og gasspidslastkedler.

Da Høje Taastrup Fjernvarme er beliggende i et centralt kraftvarmeområde har det krævet dispensation fra kraftvarmekravet fra Energistyrelsen for etablering af varmepumpen. Da varmepumpen også sampro-

ducerer varme og køl samt opfattes som et demonstrationsprojekt, er Energistyrelsen givet dispensationen.

Fremløbstemperaturen i distributionsnettet er om sommeren 72 °C, mens den om vinteren er 77 °C. Returtemperaturen i distributionsnettet er 51 °C om sommeren, mens den er 46 °C om vinteren. Varmepumpen er eldrevet og sender fjernvarmevand ud i nettet med en fremløbstemperatur på ca. 73 °C, hvilket er tilstrækkeligt for systemet.

Fjernkølesystemet

Fjernkøling leveres fra varmepumpeanlægget med en fremløbstemperatur på 6 °C, men kunderne hos Copenhagen Markets kræver temperaturer helt ned til 2 og 5 °C, der anvendes til køling af henholdsvis grøntsager og blomster. Det kræves derfor, at kølevandet køles yderligere ned. Dette gøres via to 1 MW chillere, der kan køle ned til -8 °C. Al køling til Copenhagen Markets leveres ved -8 °C. Elforbruget til de to chillere er inkluderet i varmepumpens COP på 3,14.

Der arbejdes kontant på at optimere og finjustere Energicentralens varmepumpeanlæg for derved at øge COP-værdien.

3.3.3 Driftserfaringer

Anlægget i Energicentralen har indtil nu kørt som forventet. Der har været enkelte startproblemer, som der stadig arbejdes med i Høje Taastrup Fjernvarme. Kølingssystemet reguleres udelukkende via temperaturerne, hvilket har givet udfordringer i forhold til samspillet med varmesiden, som har et fluktuerende tryk.

Dertil har man i fjernvarmesystemet oplevet ineffektive brugeranlæg, som har gjort, at returtemperaturen er for høj. Dette forsøges rettet op med en returtemperatur-tarif i stedet for en afkølings-tarif samt med vejledning til kunder med en for høj returtemperatur.

Varmepumpeanlægget har kørt fint siden installationen i foråret 2016.



Figur 3.7 – Varmepumpeanlægget i energicentralen. Kilde: Høje Taastrup Fjernvarme A.m.b.a.

3.3.4 Organisation/ejerskab

Fjernkøling leveres af Høje Taastrup Fjernvarme A.m.b.a., men er skilt ud i særskilt regnskab.

3.3.5 Teknik og specifikationer

- Kold side
 - Varmepumperne køler direkte på returvand fra fjernkølingsnettet fra Copenhagen Markets.
- Varm side
 - Fjernvarmevandet opvarmes til fremløbstemperatur og ledes ud på fjernvarmenettet.
- Varmepumpe
 - 4 stk. eldrevne og ammoniakbaserede kølekompressorer med en samlet varmepumpe effekt på 2,3 MW. Derudover er der etableret to 1 MW chillere til ekstra køling til Copenhagen Markets. Kølingen foregår ved en glykolbaseret proces med temperaturer på -8°C .
- Elforsyning
 - Der er etableret en eltilslutning på 0,4 kV niveau.
- CO₂
 - o Samlet set resulterer samproduktion af køl og varme i besparelser af CO₂. Det centraliserede fjernkølingsanlæg fortrænger ældre og ineffektive køleenheder.

3.3.6 Budget og økonomi

Investering

Finansiering af varmepumpeanlægget til køle- og varmeproduktion er sket med långivning fra Nykredit til fjernkølingsdelen og fra Kommunekredit til fjernvarmedelen.

De samlede investeringer til etablering af bygning og varmepumpeanlægget ved Copenhagen Market beløber sig til 25 mio. kr. Nøgletallene for investeringen ses herunder:

Rådgivning	1,8 mio. kr.
Bygning	1,5 mio. kr.
Varmepumper	11,9 mio. kr.
Tilslutning og SRO	6,4 mio. kr.
El	3,0 mio. kr.
Uforudsete ekstraomkostninger	0,4 mio. kr.
Total	25,0 mio. kr.

Driftsøkonomi

Driftsøkonomien af varmepumpen afhænger af de samlede omkostninger til vedligehold og indkøb af elektricitet. Disse vurderes til at udgøre ca.:

Vedligehold	15 kr./MWh _{varme}
-------------	-----------------------------

Indkøb af elektricitet

Spot	228 kr./MWh _{el}
Transport overordnet	83 kr./MWh _{el}
Transport lokal	129 kr./MWh _{el}
Elafgift	305 kr./MWh _{el}
Samlet	745 kr./MWh _{el}

Med en COP på 3,14 leveres ca. 3,1 MWh_{varme} og 2,1 MWh_{køling} for hver MWh-elektricitet som bruges i varmepumpeanlægget. Driftsomkostningerne hentes hjem fra salg af fjernvarme samt salg af fjernkøling til Copenhagen Markets.

Samlet økonomi

Høje Taastrup Fjernvarme A.m.b.a. ikke har ønsket at oplyse tal for driftsøkonomien, da fjernkølingen agerer på det kommercielle marked. Der er derfor gjort følgende antagelser for salg af køling og varme:

- Salgspris af fjernvarme = 350 kr./MWh.
- Salgspris af køling = 400 kr./MWh.

Den overordnede økonomi for Energicentralen, som leverer fjernkøling til Copenhagen Markets, er dermed opgjort herunder.

Energicentralen		
Investering	25 000 000	kr.
Årligt salg af varme	9200	MWh
Salgspris	350	kr./MWh
Årligt varmesalg	3 220 000	kr./år
Årligt salg af køling	6000	MWh
Salgspris	400	kr./MWh
Årligt kølesalg	3 200 000	kr./år
COP	3,14	
Elpris	745	kr./MWh _{el}
Drift og vedligehold	15	kr./MWh _{varme}
Samlet el	2 182 800	kr./år
Samlet D&V	138 000	kr./år
Årlige driftsomkostninger	2 320 800	kr./år
Årligt overskud	4 099 200	kr./år
Værdi af 1. års energibesparelse	350	kr./MWh
Samlet værdi af energibesparelse	2 719 522	kr.
Simpel tilbagebetalingstid	5,4	år
Intern rente over 15 år	16,5	%

3.4 Anden mulighed for samproduktion - Skejby Sygehus

Skejby Sygehus ved Aarhus har igennem flere år anvendt to isobutan-varmepumper til forsyning af rumvarme og brugsvand. Afhængigt af temperaturniveauerne har varmepumperne en samlet varmeeffekt på omkring 500 kW. Varmebehovet overstiger dog langt kølebehovet i vinterperioden, hvorimod den omvendte situation forekommer i sommermånederne. Derfor er det kun muligt at udnytte en mindre del af overskudsvarmen fra køleanlæggene i sommerperioden, men løsningen betyder at fjernvarmen, som ellers forsyner sygehuset, typisk kan afbrydes de tre varmeste sommermåneder, hvor sygehuset således er selvforsynende.

I forbindelse med opførslen af det nye supersygehus i samme område, er der installeret et væsentlig større anlæg, hvis primære funktion er at varetage hospitalets kølebehov. Anlægget består af fem varmepumper, som tilsammen kan yde omkring 10 MW_{varme}. De fem parallelle varmepumper er alle 2-trinsanlæg med stempelkompressorer på det nederste trin, og en blanding af skrue- og stempelkompressorer på det øverste trin.

Varmepumperne er koblet på distributionssystemet ved hospitalet, som ligger i nærheden af en række nyere kontor- og lejlighedskomplekser. Varmen leveres primært til nærområdet, men da affaldsforbrændingen også ligger i umiddelbar nærhed, kan der være overkapacitet af varmeproduktion i sommerperioden, hvorfor varmen fra sygehuset ikke kan udnyttes. Varmepumperne er designet til en høj fremløbstemperatur på omkring 90 °C, da det giver den største fleksibilitet i forhold til afsætning af varmen. I de fleste perioder produceres varmen dog ved en lave-re temperatur.

Samproduktion af varme- og køling er under de fleste forhold en meget rentabel løsning. Et varmepumpe-anlæg er ikke meget dyrere end et køleanlæg, såfremt dette alligevel skal installeres. Er der samtidighed for

behovene, kan varme og kulde produceres langt billigere i samproduktion end hver for sig.

4 Geotermi

4.1 Geotermi - Thisted Varmeforsyning

Thisted Varmeforsyning producerer bl.a. fjernvarme vha. to geotermiboringer, hvor det varme geotermivand afkøles med absorptionsvarmepumper.

Den første absorptions-varmepumpe har været i drift siden 1988 og har en køleeffekt på 2,7 MW. I år 2000 blev endnu en varmepumpe installeret på samme boring, hvor der nu udvindes yderligere 5 MW. De to varmepumper drives af den samme hedtvandkreds fra et affaldskraftvarmeværk og en halmkedel.

4.1.1 Baggrund

Thisted Varmeforsyning overtog en geotermiboring fra DONG i 1985. DONG havde etableret et eldrevet varmepumpe-anlæg på boringen i 1984, men fordi elektriciteten efterfølgende blev afgiftsbelagt, var løsningen ikke længere interessant for DONG. Thisted Varmeforsyning overtog derfor boringen og fik etableret den første absorptionsvarmepumpe på boringen i 1988. I år 2000 fik man øget flowmængden fra boringen, så der kunne etableres yderligere en varmepumpe på ca. 5 MW køleeffekt. Geotermivandet er omkring 43 °C og køles udelukkende via varmepumperne, da temperaturen ikke er høj nok til direkte varmeveksling med returvand. I løbet af de senere år er modtrykket i injiceringsboringen steget og derfor er man i øjeblikket i gang med at etablere en ny injiceringsboring, så produktionen kan vedblive i fremtiden.

Fjernvarmeværk / Kontaktperson	Thisted Varmeforsyning / Henrik Schultz
2,7 MW Sanyo Varmepumpe	
Leverandør	Eksisterer ikke længere
Type	Sanyo TSA GH-900XVH
Installations år / driftstimer	1988 / 3000 timer/år
Varmekilde	Geotermisk vand
Drivenergi	Hedtvand fra affaldsforbrænding eller halm; 150 °C
Nominal varmeydelse	6,5 MW (heraf er ca. 3,8 MW drivenergi)
Nominal COP	1,7
Fjernvarme opvarmes fra-til	40-60 °C
Varmekilde afkøles fra-til	22-12 °C
5,0 MW Thermax Varmepumpe	
Leverandør	SEG
Type	Thermax G119
Installations år / driftstimer	2000 / 3000 timer/år
Varmekilde	Geotermisk vand
Drivenergi	Hedtvand fra affaldsforbrænding eller halm; 150 °C
Nominal varmeydelse	12 MW (heraf er ca. 7 MW drivenergi)
Nominal COP	1,7
Fjernvarme opvarmes fra-til	40-60 °C
Varmekilde afkøles fra-til	42-22 °C

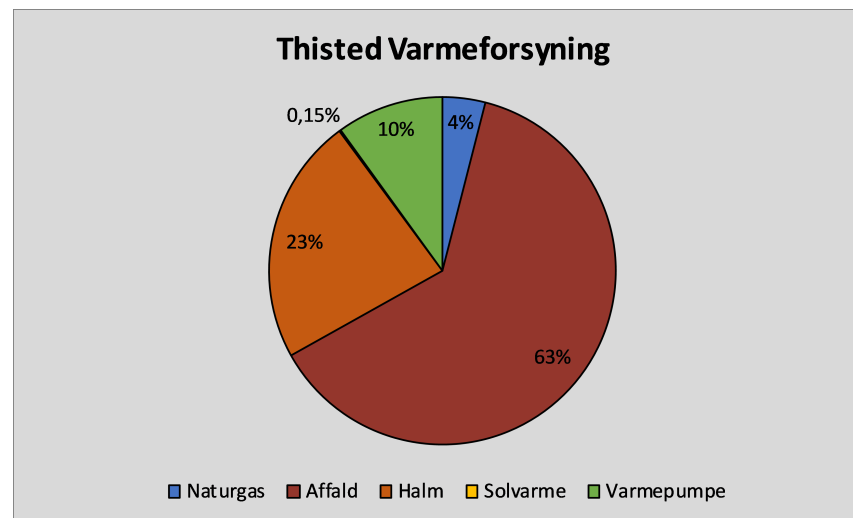
4.1.2 Systemet

Thisted Varmeforsyning har omkring 5000 forbrugere, og producerer årligt ca. 200 000 MWh_{varme}. Hoveddelen af fjernvarmen produceres på et affaldsforbrændingsanlæg med kraftvarmeproduktion. Herudover suppleres med halm, geotermi og naturgas, hvor naturgassen udelukkende bruges som spidslast. I 2012 har Thisted Varmeforsyning fået installeret et mindre anlæg med koncentreret solvarme (CSP). Dette anlæg producerer varme på forsyningens hedtvandskreds, men er et pilotanlæg og forholdsmæssigt lille. Varmeproduktionen fra solvarmeanlægget udgør derfor kun en meget lille del af den samlede produktion. Grundlasten i Thisted består af affaldskraftvarme, og i sommerperioden dækker denne hele byens behov. Varmepumperne startes op på dellast i løbet af efteråret, hvor ydelsen hele tiden justeres i forhold til produktionen på affaldsforbrændingen og byens behov. Normalt er varmpumperne i drift i 5000-5500 timer/år, men mange af driftstimerne foregår ved dellast, og samlet producerer varmpumperne hvad der svarer til ca. 3000 fuldlasttimer årligt. Varmeproduktionsfordelingen for 2013 ses på figur 4.1.

Varmepumperne

De to varmpumper er koblet i serie på den kolde side, så geotermivandet først køles af varmpumpen på 5 MW og herefter af den mindre på 2,7 MW. Ved fuld last køles geotermivandet til omkring 22 °C i den store maskine og videre til ca. 12 °C igennem den mindre. Begge maskiner er bestykket med titaniumvekslere så geotermivandet kan ledes direkte igennem varmpumperne uden mellemkreds. Herved bliver det muligt at få en højere temperatur på fjernvarmevandet ud af varmpumperne.

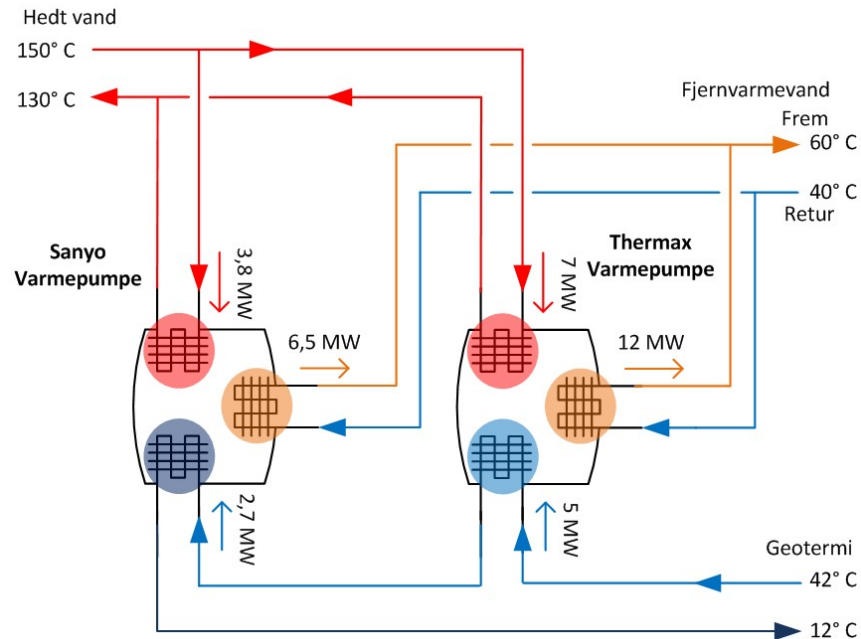
De to varmpumper er forbundet parallelt til hedtvandskredsen, som driver varmpumperne, og til fjernvarmevandet, som typisk opvarmes til 60 °C. Temperaturen ud af det lille anlæg vil som regel være lidt lavere, da det køler geotermivandet til den laveste temperatur, og lidt højere for det store anlæg. Fjernvarmetemperaturen ud af varmpumperne er ikke så kritisk, da vandet eftervarmes på forbrændingsanlægget. Nor-



Figur 4.1 – Varmeproduktionsfordeling - Thisted Varmeforsyning.

malt er udgangstemperaturen efter sammenblanding omkring 60 °C, men afhængigt af efteropvarmningen på affaldsforbrændingen kan varmpumperne levere op til ca. 72 °C. Opbygningen er skitseret på figur 4.2.

Begge maskiner forsynes parallelt fra hedtvandssystemet på 150 °C. Igennem varmpumperne afkøles dette til ca. 130 °C, og ved fuld last optages der ca. 10,8 MW. Geotermivandet gennemløber de to varmpumper serielt, så det først afkøles fra 42 °C til ca. 22 °C i Thermax varmpumpen. Herefter gennemløber det Sanyo-varmpumpen, hvor det køles yderligere til 12 °C. Fjernvarmevandet opvarmes parallelt fra 40 til 60 °C i de to maskiner. Under dellast reduceres vandstrømmen for geotermivandet, så det fortsat køles til omkring 12 °C.



Figur 4.2 – Principskitse over absorptionsvarmepumperne ved Thisted Varmeforsyning. Kilde: Teknologisk Institut.

4.1.3 Driftserfaringer

De to varmepumper er meget driftssikre, og der har ikke været nedbrud eller udskiftninger af hovedkomponenter siden installationen. For at kunne regulere varmepumpernes ydelse i forhold til affaldsforbrændingen, er det vigtigt at kunne styre temperatur og flow i generatorerne med stor nøjagtighed. Dette har givet nogle styringsmæssige udfordringer, men det er lykkedes at få ændret styringen, så ydelsen kan moduleres meget præcist. For at øge temperaturdifferencen på hedtvandskredsen, er den ene varmepumpe udstyret med to generatorer. Dette har dog været med til at komplicere styringen til dellast, da denne var-

mepumpe er særligt følsom overfor korrekt temperatur og flow på drivvarmen.

4.1.4 Organisation/ejerskab

Varmepumperne ejes og drives af Thisted Varmeforsyning, imens affaldsforbrændingen ejes halvt af Thisted Varmeforsyning og halvt af Thyra I/S.

4.1.5 Teknik og specifikationer

- Kold side (fordamper)
 - Varmepumperne er udstyret med titaniumvekslere på den kolde side, så geotermivandet kan gennembløbe varmepumperne direkte uden mellemkreds.
- Varm side (absorber og kondensator)
 - Fjernvarmevandet ledes direkte igennem varmepumpen, absorber og kondensator er serielt koblede direkte i varmepumpen.
- Drivenergi (generator)
 - Hedtvandskredsen ledes direkte igennem varmepumpernes generatorer. Thermax-varmepumpen er udstyret med to generatorer, for at opnå en bedre afkøling af hedtvandet.
- Varmepumpe
 - To stk. 1-trins LiBr-absorptions-varmepumper, maks. temperatur ud ca. 72°C.

- CO₂
 - De to varmepumper udvinder i alt ca. 21 GWh fra geotermiboringen årligt og fortrænger dels halm og dels naturgas. Fordelingen svinger fra år til år, og det er ikke opgjort, hvor meget af hvert brændsel som fortrænges.

4.1.6 Budget og økonomi

Investering

Pga. anlæggenes alder er det ikke relevant at opgøre investeringsomkostningerne som eksempel. Thisted Varmeforsyning oplyser dog, at man overvejer at investere i yderligere to anlæg, og at prislejet for denne type varmepumper ligger ved 1,5-2,0 mio. kr./MW køleeffekt. Dette er inkl. installation, men uden eventuelle installationer omkring varmekilden samt drivvarme, og afhænger samtidig af krav til fjernvarmetilslutning og SRO.

Driftsøkonomi

Fordi både geotermianlægget og varmepumperne er afskrevet, resulterer den lave varmeproduktionspris i en direkte besparelse. Varmeproduktionsomkostningerne udgør blot 71 kr./MWh, som primært stammer fra elforbrug og løbende vedligehold af pumperne til geotermivandet. Selve varmepumperne har stort set ingen driftsomkostninger.

Ud over solvarmeanlægget, er varmepumperne varmeforsyningens billigste produktionsenhed. Varme fra affaldsforbrændingen koster ca. 125 kr./MWh, fra halm ca. 175 kr./MWh og fra naturgas ca. 405 kr./MWh.

Varmepumperne fortrænger primært halm i forårs- og efterårsperioden, imens der fortrænges naturgas i vinterperioden. Som tidligere nævnt er andelen af henholdsvis halm og naturgas ikke opgjort. Antages det, at fordelingen er ligelig, så halvdelen af den producerede varme fortrænger halm og halvdelen naturgas, bliver den årlige besparelse ca. 4,6 mio. kr..

Samlet økonomi

Investeringerne i varmepumper og geotermiboring er allerede afskrevet, hvorfor økonomien i løsningen resulterer i en direkte årlig besparelse. Den faktiske marginal er ikke kendt, men i eksemplet herunder antages det, at halvdelen udgøres af halm og halvdelen af naturgas:

- Produktionspris varmepumper = 71 kr./MWh
- Produktionspris halm = 175 kr./MWh
- Produktionspris naturgas = 405 kr./MWh
- Årligt antal fuldlasttimer = 3000 timer

Thisted Varmeværk		
Årligt antal driftstimer m. halmmarginal (antaget)	1500	timer
Årlig varmeproduktion	10 500	MWh
Driftsbesparelse pr. MWh	104	kr./MWh
Årligt antal driftstimer m. gasmarginal (antaget)	1500	timer
Årlig varmeproduktion	10 500	MWh
Driftsbesparelse pr. MWh	334	kr./MWh
Årlig driftsbesparelse	3 507 000	kr./år
Samlet driftsbesparelse (med antagede marginaler)	4 599 000	kr./år

5 Spildevand

5.1 Rødkærsbro Fjernvarmeværk

Rødkærsbro Fjernvarmeværk har længe udnyttet varme fra en mindre biogasmotor i nærområdet, men i 2016 blev der etableret to sæt transmissionsledninger til Arlas mejeri i Rødkærsbro. Den ene transmissionsledning leverer fjernvarme fra en ny biogasmotor, som Arla har installeret. Den anden transmissionsledning leverer varme fra Arlas spildevandsanlæg til en 1,6 MW varmepumpe, som er installeret på fjernvarmeværket.

Fjernvarmeværk / Kontaktperson	Rødkærsbro Fjernvarmeværk / Frede Hansen
Leverandør	Johnson Controls
Type	2 stk. serielt koblede DualPac ammoniak varmepumper med fire kompressorer i alt
Idriftsat / driftstimer	2017 / Forventet ca. 4000 timer/år
Varmekilde	Renset spildevand fra Arla Foods
Nominal varmeydelse	1600 kW
Nominal COP	4,6
Fjernvarme opvarmes fra-til	Ca. 35-70 °C
Varmekilde afkøles fra-til	22-5 °C

5.1.1 Baggrund

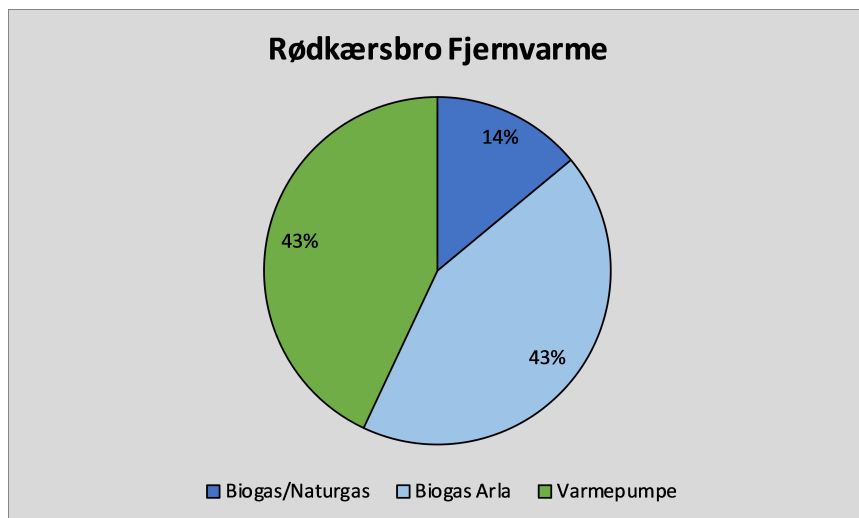
Hovedformålet med projektet er at etablere et anlæg, som kan erstatte størstedelen af Rødkærsbro Fjernvarmeværks naturgasbaserede varmeproduktion. Herved opnås en økonomisk gevinst i form af en lavere varmeproduktionspris for varmeværket samt en miljømæssig gevinst i form af reduceret forbrug af brændsel og derved reducerede emissioner. Projektet tager udgangspunkt i udledning af rensat spildevand til Gudenåen fra Rødkærsbro Mejeri. Spildevandet stammer fra processerne på mejeriet og udgør mindst 65 m³/h, hvor temperaturen ligger imellem 22 og 25 °C, når det forlader rensningsanlægget.

En afledt positiv miljøeffekt af projektet er, at det rensede spildevand ledes til Gudenåen med en lavere temperatur, da varmepumpen via en vekslerstation afkøler vandet til omkring 5 °C i den del af året, hvor anlægget er i drift.

Projektet har fået støtte fra Energistyrelsens tilskudsordning for investeringer i eldrevne varmepumper til produktion af fjernvarme. Tilskudsordningen var åben for ansøgninger i 2015.

5.1.2 Systemet

Rødkærsbro Fjernvarmeværk er et naturgasfyret værk med ca. 600 forbrugere og en årlig varmeproduktion på 15 000 MWh. Værket råder over en gasmotor, en gaskedel og en oliekedel som reserveenhed. Med de to transmissionsledninger og den installerede varmepumpe er naturgasen dog stort set udfaset. Biogasmotoren ved Arla producerer den billigste varme og udgør derfor grundlasten med omkring 6500 MWh årligt.



Figur 5.1 – Varmeproduktionsfordeling hos Rødkærsbro Fjernvarmeværk.

Varmepumpen sættes i drift, når varmforsyningen fra Arlas biogasmotor ikke er tilstrækkelig og producerer ligeledes omkring 6500 MWh/år. De resterende 2000 MWh købes fra et mindre biogasanlæg og suppleres herudover med naturgasenhederne.

Den årlige varmereproduktionsfordeling fremgår af figur 5.1.

I forbindelse med projekteringen af varmpumpen, var det vigtigt at få afklaret afgiftsforholdene omkring udnyttelse af overskudsvarmen. Der blev anmodet om et bindende svar fra SKAT, således at man havde visshed for at Arla Foods ikke skulle betale overskudsvarmeafgift for den leverede varmemængde eller af det tekniske anlæg, som blev installeret på rensningsanlægget. Det blev bekræftet, at der ikke skal betales overskudsvarmeafgift i det konkrete tilfælde.

Transmissionsledningen til mejeriets rensningsanlæg er ca. 1800 m og føres under en jernbane, hvilket kræver særlige tilladelser. Ved rensningsanlægget er der etableret en vekslerstation med to serielle plade-

varmevekslere, som afkøler spildevandet via en kold mellemkreds. Efterfølgende afkøles spildevandet af varmpumpen på fjernvarmeværket. Transmissionsledningen bruges altså til denne mellemkreds og indeholder almindeligt behandlet vand, som afkøles til ca. 3 °C ved varmpumpen og opvarmes til ca. 20 °C i pladevarmevekslerne ved rensningsanlægget. De to pladevarmevekslere er forsynet med et CIP-anlæg, som kan rense én af pladevarmevekslerne imens der fortsat er drift på den anden.

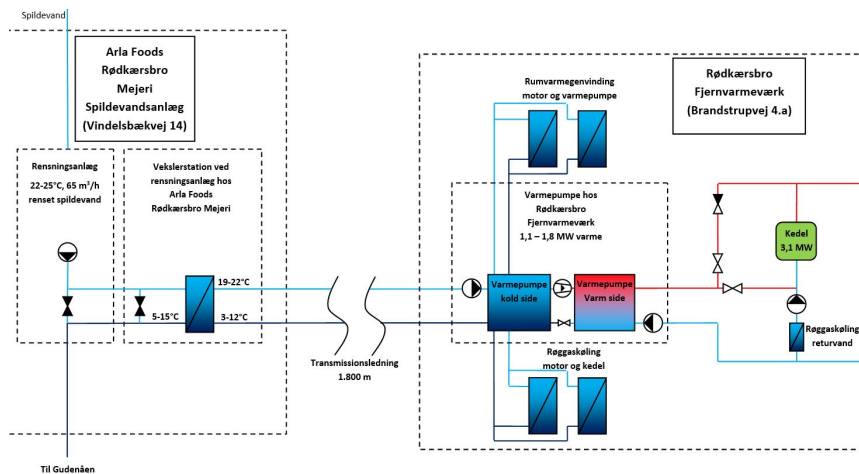
Det var meningen at varmpumpen ligeledes skulle udnyttes til røggaskøling på de eksisterende motor- og kedelanlæg. Igennem detailprojekteringen blev det dog tydeligt, at antallet af driftstimer på disse enheder blev for få til, at den ekstra investering ville blive rentabel.

I perioder med drift på gaskedlen, kan denne supplere varmpumpen, så varmpumpens fremløbstemperatur kan reduceres.

Varmepumpen

Anlægget består af to separate ammoniakvarmepumper af typen Sabroe DualPac. Denne type er ret ny men bygger på standardiserede køle- og varmpumpeløsninger. Fornyelsen består i at der er tale om en sammenbygning af to 1-trins standardanlæg, så man får et meget kompakt og standardiseret 2-trinsanlæg, som har øget virkningsgrad og et større temperaturspænd i forhold til de enkelte 1-trinsanlæg.

De to separate varmpumper er forbundet i serie, så både fjernvarmevand og kølevand gennemløber de to varmpumper serielt. De to anlæg er opbygget på samme måde og kan således også driftes enkeltvist, hvis det ene anlæg er ude til service. Begge varmpumper er opbygget som 2-trinsanlæg med en lavtryksskubekompressor, som hæver temperaturen til et mellemniveau og en højtryksskubekompressor som løfter temperaturen til afgangstemperatur. Fjernvarmevand opvarmes fra 38 til 52 °C i den første varmpumpe og videre herfra til 70 °C i den anden varmpumpe. Kølevand gennemløber varmpumperne i modsat retning, hvor det først afkøles til 11 °C og herefter videre ned til 4-5 °C. Spildevandstemperatu-

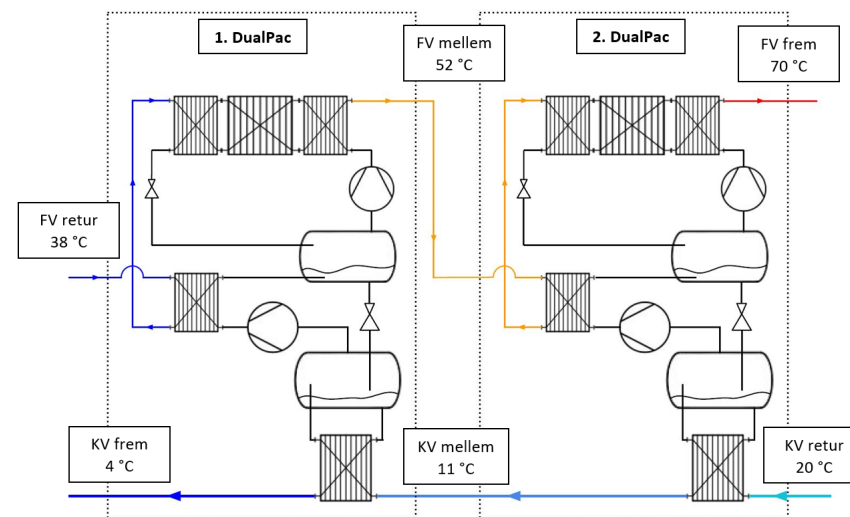


Figur 5.2 – Varmepumpeanlægget i Rødskær. Til venstre ses spildevandsledningen som løber til Gudenåen men ledes igennem pladevarmevekslerne før det udledes. Varmepumpen er installeret på varmeverket omkring 1800 m fra rensningsanlægget. Varmevexlerne til øget røggaskøling nederst på figuren er ikke installeret.

ren er konstant henover året og det samlede anlæg yder 1,6 MW med en COP på 4,6.

Begge DualPac's består af to kompressorer, en fordamper til kølevandet, en mellemtryksbeholder og fire varmevekslere til opvarmning af fjernvarmefølelse. Med fire varmevekslere opnås en god virkningsgrad da energien fra ammoniakken kan udnyttes optimalt fra både gas-, kondensering- og væskefase.

Varmepumpen har omkring 4000 årlige fuldlasttimer med en samlet varmeproduktion på ca. 6500 MWh. Med en kapacitet på 1,6 MW kunne varmepumpen godt producere en væsentlig større varmemængde, men fordi varmen fra Arlas biogasmotor udgør grundlasten, begrænses varmepumpens drift.



Figur 5.3 – Principskitse over spildevandsvarmepumpen i Rødskær.

5.1.3 Driftserfaringer

Varmepumpen blev sat i drift marts 2017, men har i skrivende stund kun haft et begrænset antal driftstimer, da anlægget ikke er i drift i sommerperioden. På nuværende tidspunkt har der ikke været udfordringer i forhold til driften og systemet fungerer efter hensigten.

Omkring vekslerstationen for det rensede spildevand har det vist sig, at spildevandet indeholder væsentlig større partikler end først antaget og at der langsomt opbygges biofilm på vekslerne. Det er derfor nødvendigt med filtre og CIP-anlæg i denne slags applikationer. Det præcise behov for filtrering og rensning var ikke kendt ved anlæggets opførelse, men der blev installeret automatisk udstyr til håndtering af eventuelle problemstillinger, hvilket nu har vist sig at være fornuftigt. Driftserfaringerne er dog stadig for få til at fastlægge det præcise behov og interval for rensning af veksler og øvrigt udstyr.



Figur 5.4 – Varmepumpeanlægget i Rødkærsgade, Til venstre ses de to kompressorer oven på tilhørende varmevekslere, som udgør den ene DualPac. I baggrunden anes den anden DualPac, som er opbygget tilsvarende.

5.1.4 Organisation/ejerskab

Varmepumpe, transmissionsrør og vekslerstation er etableret af Rødkærsgade Fjernvarmeværk, som også driver anlægget. Vekslerstationen er installeret i Arlas bygning, hvor renselanlægget er placeret. Rødkærsgade Fjernvarme har afholdt alle omkostninger i forbindelse med installationen. Rødkærsgade Fjernvarme betaler husleje til Arla vedrørende den bygning, hvor vekslerstationen er installeret. Huslejen er fastsat på markedsvilkår og Rødkærsgade Fjernvarme har fået bindende svar fra SKAT på, at der ikke skal betales overskudsvarmeafgift ved nyttiggørelse af varmen.

5.1.5 Teknik og specifikationer

- Kold side (fordamper)
 - Varmepumperne er leverede med almindelige fuldsvejste “shell-and-plate”-fordampere. Fordamperne på de to varmpumper er koblet i serie.
- Varm side (kondensator)
 - Hver af de to varmpumper er forsynet med en overhedningsfjerner på lavtrykstrinnet, samt en sammenbygget varmeveksler på højtrykstrinnet, som både indeholder overhedningsfjerner, kondensator og underkøler. Alle varmevekslerne er af “shell-and-plate”-typen.
- Varmepumpe
 - To stk. DualPac 2-trins varmpumper, som er forbundet i serie på både varm og kold side. Hver DualPac er bestykket med to stempelkompressorer og den maksimale fremløbstemperatur er ca. 73 °C.
- Elforsyning
 - Anlægget er tilsluttet som afbrydelig enhed, da det har reduceret anlægsomkostningerne og ikke har indflydelse på driftsomkostningerne.
- CO₂
 - Anlægget fortrænger naturgas og reducerer CO₂-udledningen med ca. 1000 ton CO₂/år

5.1.6 Budget og økonomi

Varmepumpen producerer 40-45 % af varmebehovet i Rødkærsbro. Denne varmeproduktion ville ellers foregå på de eksisterende gasbaserede enheder. Med den høje COP-værdi på 4,6 kan varmepumpen producere væsentlig billigere end alternativet med gas.

Investering

Nøgletallene for investeringen ses herunder:

Varmepumper	5,8 mio. kr.
Transmissionsledning	2,3 mio. kr.
Vekslerstation og tilbehør	2,3 mio. kr.
Eltilslutning, rør og bygning	0,9 mio. kr.
SRO/Scada	1,0 mio. kr.
Rådgivning og diverse	1,1 mio. kr.
<hr/>	
Total	13,4 mio. kr.

Varmepumpen blev etableret før den gældende Energispareordning, og varmepumpens energibesparelse kan således ikke indberettes. Til gengæld har Rødkærsbro Fjernvarmeselskab modtaget støtte fra Energistyrelsens demonstrationsprogram for store varmepumper, hvor man har modtaget et tilskud på 2,4 mio. kr., så den samlede investering har udgjort 11,0 mio. kr..

Driftsøkonomi

Der er udgifter til vedligehold og indkøb af elektricitet. Disse udgør ca.:

Vedligehold	10 kr./MWh _{varme}
Indkøb af elektricitet	
Spot	215 kr./MWh _{el}
Transport overordnet	83 kr./MWh _{el}
Transport lokal	105 kr./MWh _{el}
Elafgift	305 kr./MWh _{el}
<hr/>	
Samlet	708 kr./MWh _{el}

Afhængigt af den aktuelle spotpris, vil varmeproduktionsprisen ligge omkring 163 kr./MWh inklusive serviceomkostninger. I forhold til værket naturgaskedler bliver besparelsen med varmepumpen på ca. 242 kr./MWh produceret varme.

Samlet økonomi

Den samlede økonomi varierer med gaspriser og antallet af driftstimer fra år til år. I det følgende er der regnet med disse forudsætninger:

- Variabel gaspris = 1,95 kr./Nm³
- Samlet elpris varmepumper = 708 kr./MWh_{el}
- Vedligehold = 10 kr./MWh_{varme}
- Årligt antal driftstimer = 4000 timer

Med disse forudsætninger ses den samlede økonomi på tabellen herunder:

Varmepumper på spildevand - 1600 kW		
Investering (efter tilskud)	11 000 000	kr.
Årligt antal driftstimer	4000	timer
Årlig varmeproduktion	6500	MWh
Driftsbesparelse pr. MWh	242	kr./MWh
Årlig driftsbesparelse	1 573 000	kr./år
Simpel tilbagebetalingstid	7,0	år
Intern rente over 15 år	11,5	%

5.2 Spildevand - Kalundborg Forsyning

På grund af den store koncentration af industrivirksomheder i Kalundborg, er spildevandet i området varmere end normalt og derfor særligt interessant i forhold til varmepumper. I forbindelse med at Asnæsværket ombygges og konverteres til biomasse, har Kalundborg Forsyning installeret Danmarks største varmepumpeanlæg med en effekt på 10 MW_{varme}. Anlægget udnytter energien i byens spildevand.

5.2.1 Baggrund

Kalundborg Forsyning har haft behov for en udskiftning og opgradering af nettets spidslastkapacitet, som tidligere har bestået af et antal ældre oliekedler. Da Asnæsværket samtidig skulle ombygges og kapaciteten herfra derfor vil være begrænset, valgtes at investere i varmepumpeanlægget. Hermed øges spidslastkapaciteten og anlægget vil indtil biomassekonverteringen er gennemført kunne få et stort antal driftstimer.

Fjernvarmeværk / Kontaktperson	Kalundborg Forsyning / Finn Bertelsen
Leverandør	Johnson Controls
Type	3 parallelle sæt af 2 stk. serielt koblede DualPac ammoniak varmepumper med 4 kompressorer hver og 12 kompressorer i alt.
Idriftsat / driftstimer	2017 / ca. 8000 timer/år (indtil Asnæsværket er færdigombygget)
Varmekilde	Renset spildevand
Nominal varmeydelse	10 000 kW
Nominal COP	4,5
Fjernvarme opvarmes fra-til	57-72 °C
Varmekilde afkøles fra-til	25-15 °C

Varmepumpen agerer grundlastenhed indtil Asnæsværket er færdigkonverteret til træflis, hvilket forventes at være gennemført primo 2020. I denne overgangsperiode, vil varmepumpen give en betydelig driftsbesparelse. Derfor blevet anlægget etableret på omkring 6 måneder, hvilket er meget hurtigt for denne type anlæg.

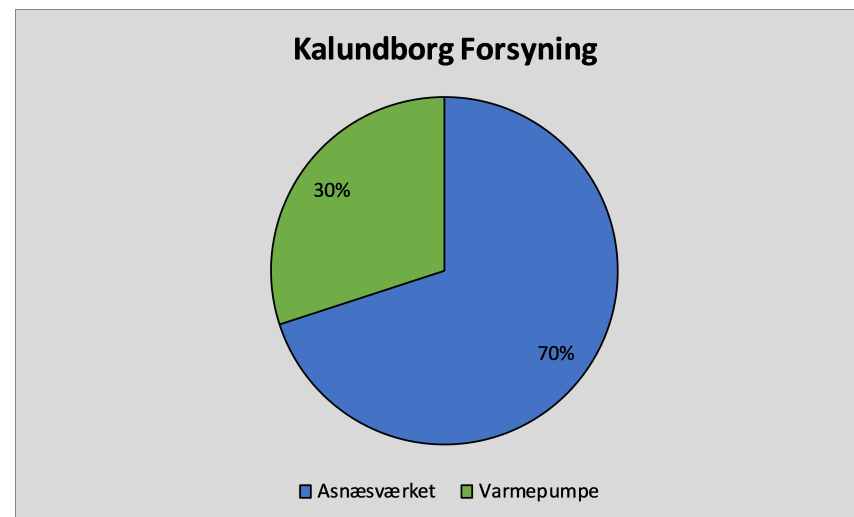
På grund af den store koncentration af industrielle virksomheder har Kalundborg en årlig spildevandsmængde på 6 mio. m³ og samtidig er vandet ved ca. 10 °C varmere end ved typiske rensningsanlæg. I Kalundborg er spildevandet i gennemsnit 25 °C, men varierer henover året fra ca. 15 °C i vinterperioden og op til 30 °C i sommermånederne. Den højere temperatur, gør udnyttelse af varmekilden særlig relevant i Kalundborg.

5.2.2 Systemet

Kalundborg forsyning leverer fjernvarme til omkring 5000 husstande og omkring 10 storforbrugere. Den samlede varmeproduktion udgør omkring 250 000 MWh. Indtil ombygningen af Asnæsværket er gennemført producerer varmepumpen omkring 80 000 MWh. Herefter forventes det, at varmeproduktion på varmepumpeanlægget vil falde. Varmepumpen kobles på transmissionssystemet i Kalundborg, hvorfor temperaturniveauerne er relativt høje. Der arbejdes særligt på en reduktion i returtemperaturen og det forventes, at indløbet til varmepumpen på sigt kan komme under 50 °C. Når ombygningen af Asnæsværket er gennemført, kan last fordelingen ændre sig, afhængigt af aktuelle brændsels- og elpriser. I timer hvor der er samproduktion på Asnæsværket og varmepumpen, vil varmepumpens fremløbstemperatur kunne reduceres, da produktionen fra varmepumpen kan opblandes med fjernvarme fra kraftvarmeverket.

Den årlige varmeproduktionsfordeling fremgår af figur 5.5.

Varmepumpens fordampere er af "shell and plate"-typen og kan derfor ikke adskilles og rengøres mekanisk. Derfor er anlægget udstyret med en mellemkreds, så spildevandet afkøles i traditionelle pladevekslere, som kan adskilles og renses såfremt det skulle blive nødvendigt. Det sam-



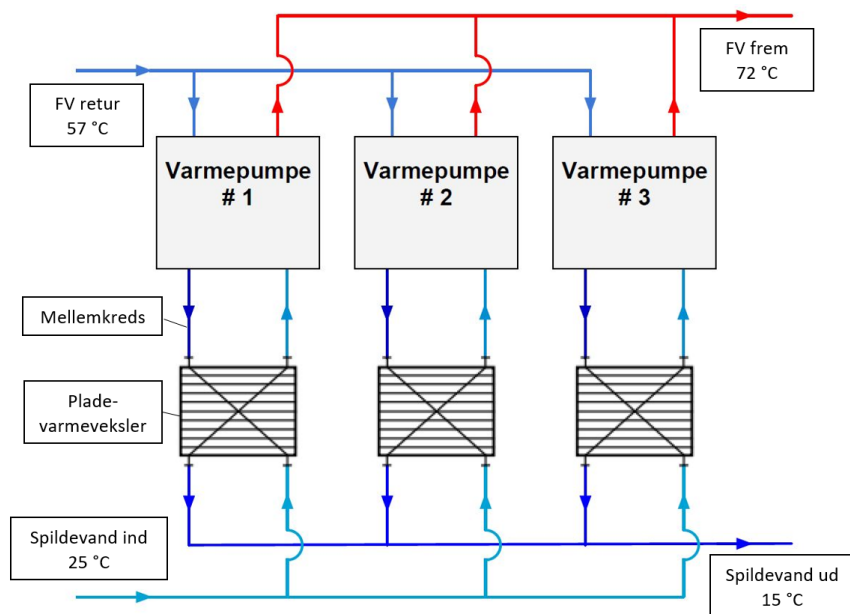
Figur 5.5 – Varmeproduktionsfordeling hos Kalundborg Forsyning.

lede anlæg består af tre parallelle varmepumpeenheder med hver sin pladevarmeveksler for spildevandet. Herved kan én varmeveksler renses imens driften opretholdes på de to øvrige enheder.

Før anlægget blev taget i drift, blev der lavet simple forsøg med CIP-væske, hvor det blev eftervist at udfældninger i spildevandet kan fjernes.

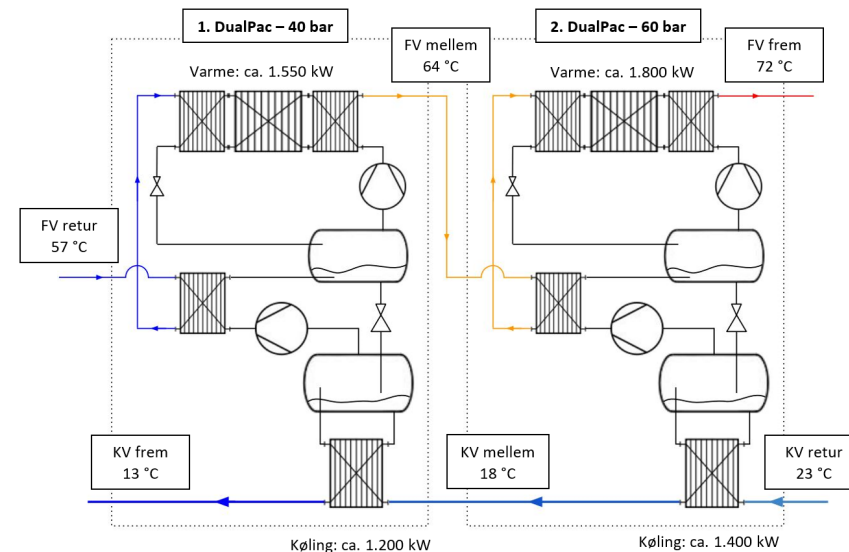
Varmepumpen

Anlægget er dimensioneret efter fjernvarmesystemets sommerlast på ca. 10 MW, så der opnås et højt antal årlige driftstimer. Anlægget består af tre identiske parallelle sæt, som hver opbygget af to serielle 2-trinsanlæg med stempelkompressorer for at opnå en høj COP-værdi i et bredt temperaturområde. Hvert "sæt" har en kapacitet på 3,33 MW_{varme} ved en spildevandstemperatur på 15 °C og det samlede anlæg kan således også yde omkring 10 MW i en vintersituation.



Figur 5.6 – Anlægsopbygning i Kalundborg. De tre parallelle varmepumper ses øverst, hvor fjernvarmevandet indløber fra venstre og leveres til fremløbet i højre side. Under varmepumperne ses pladevarmevekslerne, som adskiller spildevandet fra mellemkredsen.

Hvert 2-trinsanlæg består af en 16-cylindrede lavtrykskompressor, samt en mindre højtrykskompressor, som hæver trykket yderligere til den ønskede fjernvarmetemperatur. Lavtrykskompressorerne er alle ens, men de to højtrykskompressorer i hvert "sæt" er forskellige. Her er højtrykskompressoren i det første 2-trinsanlæg designet til 40 bar, mens kompressoren i det andet 2-trinsanlæg er designet til 60 bar. Med det høje tryktrin i den sidste del af varmepumpeanlægget, er det muligt at nå fremløbstemperaturer på ca. 85 °C. De to højtrykskompressorer har stort set samme slagvolumen, men det andet 2-trinsanlæg har en lidt højere ydelse, da spildevandet indløber dette anlæg først. Her er spil-



Figur 5.7 – Principskitse af varmepumpeanlæg i Kalundborg. Figuren viser et ud af tre identiske sæt.

devandstemperaturen ca. 5 °C højere, hvilket giver en højere ydelse på lavtrykskompressoren.

Hver lavtrykskompressor er udstyret med en overhedningsfjerner, så en del af energien allerede udnyttes ved det lave tryktrin. Højtrykskompressorerne er udstyret med et sammenbygget varmevekslersæt, som består af en overhedningsfjerner, en kondensator og en underkøler. Sammenbygningen af de tre varmevekslere sikrer et mere kompakt anlæg. De tre varmepumpesæt er parallelt forbundne og driftes derfor ved identiske conditioner. Den samlede effekt for de tre sæt er 10 MW ved en spildevandstemperatur på 15 °C.

Da anlægget både skal kunne udnyttes selvstændigt som grundlast og som supplement til Asnæsværket, er der lagt vægt på høj ydelse og god virkningsgrad ved flere forskellige driftspunkter. Anlægget er designet til



Figur 5.8 – Varmepumpeanlægget i Kalundborg, Enheden forrest på billedet med de to elskabe, udgør den ene halvdel af et “varmepumpesæt”. Det samlede anlæg består af i alt seks lignende enheder.

at operere med fremløbstemperature imellem 70 og 80 °C, og leverandøren har garanteret en maksimal fremløbstemperatur på 82 °C.

Varmepumpens fordampere er af “shell and plate”-typen og kan derfor ikke adskilles og rengøres mekanisk. Derfor er anlægget udstyret med en mellemkreds, så spildevandet afkøles i traditionelle pladevekslere, som kan adskilles og renses såfremt det skulle blive nødvendigt. Før anlægget blev taget i drift, blev der lavet simple forsøg med CIP-væske, hvor det blev eftervist at udfældninger i spildevandet kan fjernes.

Indtil Asnæsværket er ombygget, vil varmepumpen have omkring 8000 årlige fuldlasttimer og producere som omkring 80 000 MWh om året.

5.2.3 Driftserfaringer

I skrivende stund har varmepumpeanlægget været i drift i ca. 6 måneder og anlægget producerer efter hensigten. Ydelsen på pladevarmevekslerne overvåges hele tiden og efter de første to måneders drift faldt ydelsen relativt drastisk, hvorefter varmevekslerne blev rensed med det monterede CIP-anlæg, hvilket er det interval, som Kalundborg Forsyning nu bruger som udgangspunkt. Erfaringen er, at ydelsen stort set ikke påvirkes i relativ lang tid, men at det så pludselig går hurtigt. Derfor er det vigtigt med et godt overvågningssystem.

I forbindelse med et stort regnskyl har der været urensed vand i systemet og herefter oplevede man et hurtigt ydelsestab. Det er dog kun sket i det ene tilfælde og det kan derfor ikke udelukkes, at der er tale om tilfældigheder.

5.2.4 Organisation/ejerskab

Det er Kalundborg Spildevandsanlæg, som har købt og installeret varmepumpen. Herved kunne anlæggets energibesparelse indberettes i 2016, hvilket reducerer investeringsomkostningen væsentligt. Driftsafdelingen fra Kalundborg Forsyning, som både indeholder Kalundborg Spildevandsanlæg og Kalundborg Varmeforsyning, står for den daglige drift af anlægget.

5.2.5 Teknik og specifikationer

- Kold side (fordamper)
 - Varmepumperne er leverede med almindelige fuldsvejste “shell-and-plate”-fordampere. Fordamperne på de to varmepumper i hvert sæt er koblet i serie og afkøler en sekundær kreds, som herefter afkøler spildevandet igennem en traditionel pladevarmeveksler.

- Varm side (kondensator)
 - Hver af de to varmepumper er forsynet med en overhedningsfjerner på lavtrykstrinnet, samt en sammenbygget varmeveksler på højtrykstrinnet, som både indeholder overhedningsfjerner, kondensator og underkøler. Alle varmevekslerne er af “shell-and-plate”-typen.
- Varmepumpe
 - 6 stk. DualPac 2-trins varmepumper, som er forbundet i serie to og to. Hver DualPac er bestykket med to stempelkompressorer og den maksimale fremløbstemperatur er ca. 85 °C.
- Elforsyning
 - Anlægget er tilsluttet på 10 kV-nettet med fuld tilslutning.
- CO₂
 - Indtil Asnæsværket er færdigkonverteret, resulterer varmepumpen i en CO₂-reduktion på omkring 16 000 ton CO₂/år

5.2.6 Budget og økonomi

Så længe varmepumpen kører som grundlastenhed, producerer den omkring 30 % af varmebehovet i Kalundborg. Denne varmeproduktion ville ellers foregå på interimistiske oliekedler frem til Asnæsværket tages i drift igen. Dermed opnås en meget høj besparelse i de første år af varmepumpens levetid. I de efterfølgende år vil besparelsen dog blive reduceret, da antallet af driftstimer vil blive reduceret.

Investering

Nøgletallene for investeringen ses herunder:

Varmepumpeanlæg	26,0 mio. kr.
Elarbejde og SRO	5,0 mio. kr.
Transformatorstation og elkabler	5,0 mio. kr.
Bygning og ventilation	6,4 mio. kr.
Spildevand og anlægsarbejde	2,1 mio. kr.
Fjernvarmepumper og tilslutning	6,3 mio. kr.
Transmissionsledning	8,0 mio. kr.
Projektering	2,4 mio. kr.
Diverse	1,8 mio. kr.
Total	63,0 mio. kr.

Anlægget har udløst en Energibesparelse som kan kapitaliseres til omkring 30 mio. kr.. Herved ender den samlede anlægsinvestering på 33 mio. kr..

Driftsøkonomi

Der er udgifter til vedligehold og indkøb af elektricitet. Disse udgør ca.:

Vedligehold	10 kr./MWh _{varme}
Indkøb af elektricitet	
Spot	228 kr./MWh _{el}
Transport overordnet	83 kr./MWh _{el}
Transport lokal	39 kr./MWh _{el}
Elafgift	305 kr./MWh _{el}
Samlet	655 kr./MWh_{el}

Afhængigt af den aktuelle spotpris, vil varmeproduktionsprisen ligge på omkring 156 kr./MWh inklusive serviceomkostninger. I forhold til varmeleverancen fra Asnæsværket, bliver besparelsen med varmepumpen omkring 220 kr. pr. produceret MWh.

Samlet økonomi

Den samlede økonomi varierer med produktionsmarginal og antallet af driftstimer fra år til år. I det følgende er der regnet med disse forudsætninger:

- Varmepris fra Asnæsværket = 376 kr./MWh_{varme}
- Samlet elpris varmepumpe = 655 kr./MWh_{el}
- Vedligehold = 10 kr./MWh_{varme}
- Årligt antal driftstimer = 8000 timer

Med disse forudsætninger ses den samlede økonomi på tabellen herunder:

Varmepumper på spildevand - 10 000 kW		
Investering (efter tilskud)	63 000 000	kr.
Årligt antal driftstimer	8000	timer
Årlig varmeproduktion	80 000	MWh
Driftsbesparelse pr. MWh	220	kr./MWh
Samlet værdi energibesparelse	30 000 000	kr.
Årlig driftsbesparelse	17 600 000	kr./år
Simpel tilbagebetalingstid	1,9	år
Intern rente over 15 år	53,2	%

5.3 Udenlandske anlæg

I Norge er der etableret en række varmepumpeanlæg, der anvender spildevand som varmekilde og er tilkøbt fjernvarmenettet, b.la. nedenstående varmepumpeanlæg:

Anlægsnavn	Beliggenhed	Varmekilde	Anlægsdata	Bemærkninger
Strømmen Akershus Energi	Strandveien 22, 2010 Strømmen Lillestrøm, forstad til Oslo	Renset spildevand	4,5 MW _{varme} 2-trins turbo-kompressor Varme til fjernvarme	Del af større renewable energisystem (bio, sol mv.)
Sandvika Fortum Fjernvarme	Sandvika, forstad til Oslo	Urenset spildevand (Mekanisk rensed, sedimenteret)	2 x 6 MW _{varme} , 2 x 4,5 MW _{køl} R134a to-trins anlæg (fjernvarme og -køling)	Idriftsat 1989

I Sverige er der ligeledes etableret større varmepumper, der anvender spildevand som varmekilde, her kan b.l.a. nævnes følgende varmepumpeanlæg:

Anlægs navn	Beliggenhed	Varmekilde	Anlægsdata	Bemærkninger
Øresundskraft	Helsingborg	Renset spildevand	2-trins turbo-kompressor 29 MW _{varme} , 60/80 °C 20 MW spildevand 6-18 °C til 3 °C COP 3,4	Etableret i 1996 Konverteret til R134a.
Ryaverket Göteborg	Norra Fågelrovägen 3 418 34 Göteborg (Göteborg vest)	Renset spildevand	2 x 30 MW _{varme} + 2 x 50 MW _{varme} COP ca. 3,5 VP lev. Carrier / Atlas Copco Rørvekslere (Lufkin og Renk)	Nogle af de ældste varmepumper i Sverige 1980'erne

I Finland er der ligeledes tradition for større varmepumper, hvor der også anvendes spildevand som varmekilde. Et eksempel er nedenstående varmepumpe på 21 MW_{varme}:

Anlægs navn	Beliggenhed	Varmekilde	Anlægsdata	Bemærkninger
Kakola WWT Plant Oy Turku Energia	Turku, Finland	Renset spildevand	Fjernvarme og -køling 21 MW _{varme} , 14,5 MW _{køling} , COP 3,3 VP lev. Friothersm	Idriftssat 2009

6 Grundvand

Man kan finde grundvand stort set alle steder i Danmark, og grundvandet har en konstant temperatur på 8-10 °C uafhængigt af årstiden. Grundvand er derfor en potentiel varmekilde for mange varmepumpeprojekter. Grundvandsressourcen begrænses dog dels af undergrundens fysiske beskaffenhed og hydrogeologiske egenskaber, og dels af andre interesser, primært som drikkevandsressource. Et grundvandsprojekt afhænger derfor både af viden om undergrunden og mulighed for at opnå de fornødne tilladelser fra kommunen. Den nødvendige grundvandsmængde afhænger af varmepumpens kapacitet og der skal omkring 100 m³ grundvand i timen pr. MW_{varme}, som varmepumpen yder.

6.1 Rye Kraftvarmeværk

Rye Kraftvarmeværk, som er et naturgasfyret barmarksværk, har etableret en grundvandsvarmepumpe på 2,0 MW, som er sat i drift i starten af 2015. Projektet, som blev støttet af Energistyrelsens EUDP-program, omfatter desuden et solvarmeanlæg på 2400 m². Varmepumpen leverer ca. 2/3 af Rye Kraftvarmeværks varmebehov på 9325 MWh/år. Varmepumpen er "overdimensioneret" således at den - i kombination med kraftvarmeværkets akkumuleringstank - kan nøjes med at køre ca. 3000 timer om året for dermed at øge værkets evne til at integrere fluktuerende el fra vindkraft og solceller.

6.1.1 Baggrund

Region Midtjyllands Vækstforum støttede i 2010 udredningsprojektet PlanEnergi, m.fl. (2011), hvis formål var at udvikle et fjernvarmekon-

Anlægs ejer	Rye Kraftvarmeværk a.m.b.a. i Gl. Rye
Kontaktperson	Søren K. Frandsen (formand)
Leverandør	Johnson Controls
Type	Pladsbygget ammoniakvarmepumpe med 4 Sabroe stempelkompressorer (2 stk. LT og 2 stk. HT)
Idriftsat / driftstimer	2015 / Forventet ca. 3000 timer/år
Varmekilde	Grundvand
Nominal varmeydelse	2,0 MW
Nominal COP	3,8-4,0 *
Fjernvarme opvarmes fra-til	Ca. 35-75 °C
Varmekilde afkøles fra-til	9-2 °C

* Ekskl. forbrug til grundvandspumper

cept baseret på solvarme, varmelagre og varmepumper. Konceptet skulle fortrænge afbrænding af naturgas og biomasse og samtidig øge fjernvarmesystemets el-reguleringsevne samt reducere varmeprisen for forbrugerne. Som en del af projektet blev potentialet for regionens fjernvarmeværker opgjort med hensyn til varmekilder og varmelagre. Demonstrationsprojekterne "Borehuller i Brædstrup", som er støttet af ForskEl og EUDP, og "Ny varmepumpe og solvarme", som er støttet af EUDP, er begge fortsættelser af "Naturgassens afløser".

Deltagerne i demonstrationsprojektet "Ny varmepumpe og solvarme" var PlanEnergi (projektleder), Rye Kraftvarmeværk (anlægsvært), Johnson Controls (udvikling og leverandør af varmepumpen) og Teknologisk

Institut (optimering af og målinger på varmepumpen). Formålet med projektet er:

- at demonstrere samspillet mellem et decentralt kraftvarmeværk, et solvarmeanlæg og en varmepumpe.
- at udvikle en ny varmepumpe, som er optimeret til fjernvarmesystemer.
- at demonstrere brugen af grundvand som varmekilde.
- at demonstrere driften af en varmepumpe, som er "overdimensioneret" for at reducere antallet af årlige driftstimer og dermed øge værkets el-reguleringsevne.

EUDP gav tilsagn om støtte til projektet i juni 2011, og etableringen af anlægget blev påbegyndt i januar/februar 2014. Solvarmeanlægget blev idriftsat i juli 2014, og varmepumpen blev idriftsat i starten af 2015.

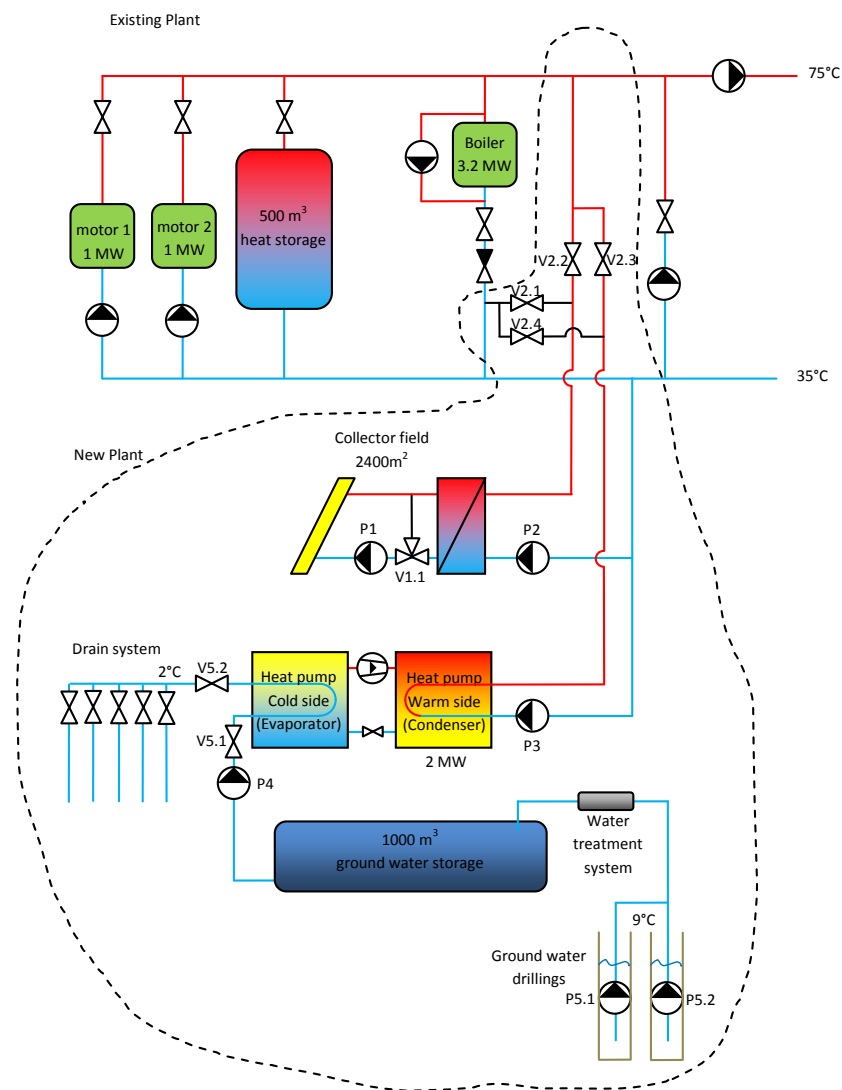
6.1.2 Systemet

Rye Kraftvarmeværk er et naturgasfyret barmarksværk fra 1995/96. Værket har 360 forbrugere og et årligt varmebehov på 9325 MWh. Værket har indtil 2014 produceret varme på to gasmotorer og en gaskedel, jf. den øverste del af figur 6.1.

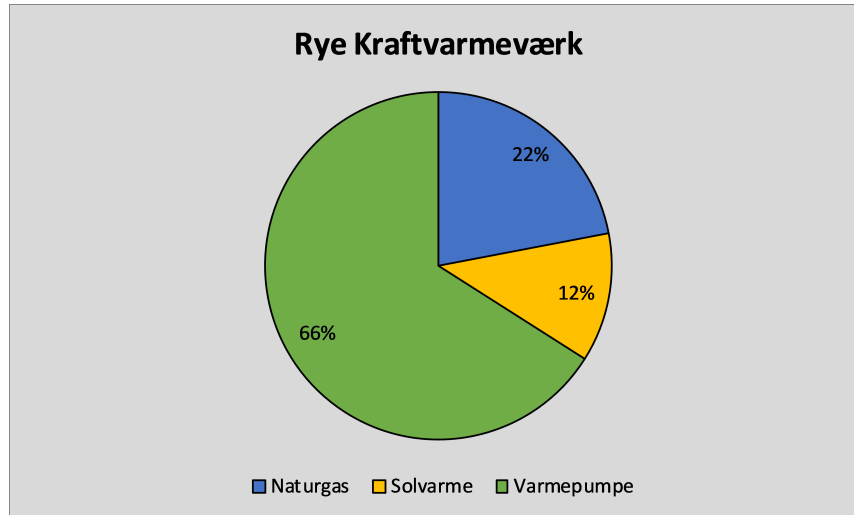
I 2014 blev værket suppleret med et solvarmeanlæg på 2400 m² og en grundvandsbaseret varmepumpe på 2,0 MW. Varmeproduktionsfordelingen udgør herefter 12 % på solvarmen, 66 % på varmepumpen og 22 % på naturgas, jf. figur 6.2.

Både solvarmeanlægget og varmepumpen køles med returvand (vha. pumperne P2 og P3), og begge enheder kan - uafhængigt af hinanden - levere opvarmet vand enten direkte til fremløbet eller til efteropvarming med kedlen.

Varmepumpens varmekilde er grundvand, og grundvandskredsen består af to stk. ca. 60 m dybe grundvandsboringer med dykpumper (P5.1 og P5.2), et ilttings- og jernudfældningsanlæg, en buffertank på



Figur 6.1 – Principdiagram over Rye Kraftvarmeværk. Øverst fra venstre ses de to naturgasmotorer, akkumuleringsstanken, naturgaskedlen, anlægsshunten og bypumperne, og inden for den stiplede afgrænsning ses det nyetablerede solvarmeanlæg og grundvands-varmepumpe-system.

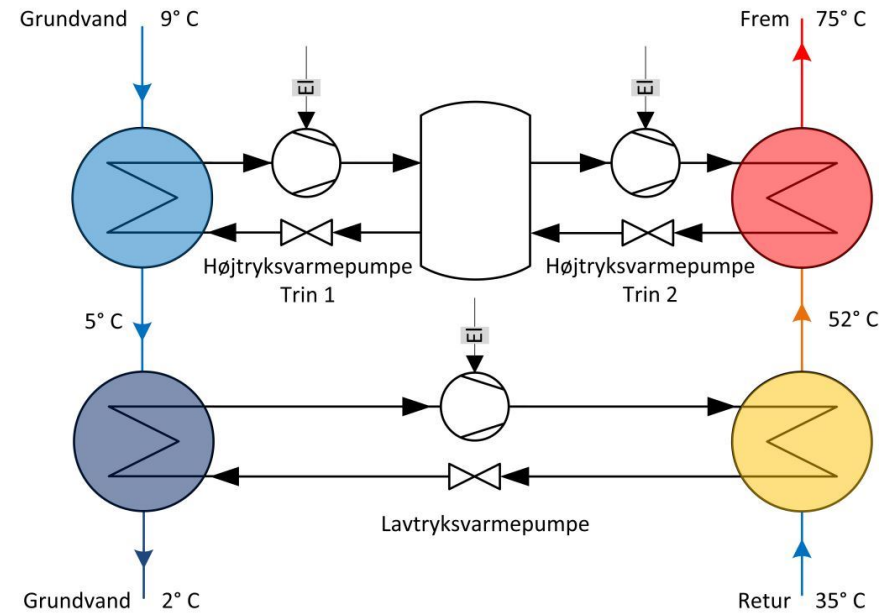


Figur 6.2 – Forventet varmeproduktionsfordeling på Rye Kraftvarmeværk.

1000 m³, en pumpe (P4) på varmepumpens kolde side samt et nedsivningsanlæg.

Ved fuldlast er grundvandsflowet gennem varmepumpen 200 m³/h. De to grundvandsboringer yder tilsammen ca. 100 m³/h, men det er vurderet at være mere hensigtsmæssigt at introducere en buffertank frem for at etablere flere grundvandsboringer.

Grundvandskredsen er etableret med et nedsivningsanlæg frem for reinjektionsboringer. Grundvandet i Gl. Rye har vist sig at være meget jernholdigt, og det har derfor været nødvendigt finde en løsning på dette, således der ikke opstår problemer med okkerudfældning i varmepumpens fordamper eller i nedsivningsanlægget. Der er etableret en vandbehandling, som svarer til vandbehandlingen på et almindeligt vandværk. Dette har fordyret projektet væsentligt, men løsningen med nedsivning er til gengæld billigere end injektionsboringer.



Figur 6.3 – Forsimpleret principdiagram for varmepumpen ved Rye Kraftvarmeværk.

Varmepumpeanlægget bruger ammoniak som kølemiddel og er dimensioneret med henblik på så høj COP som mulig. Derfor er der valgt et pladsopbygget anlæg bestående af en lavtryks- og en højtryksvarmepumpe, som er forbundet i serie. Højtryksvarmepumpen er et to-trinsanlæg, som hæver den samlede COP yderligere. På grund af den trinvis opbygning bliver varmepumpen meget effektiv med en COP på 4,0, hvilket svarer til 60 % af det teoretisk mulige. Da anlægget ofte stoppes og startes, har det dog vist sig at den gennemsnitlige COP bliver lidt lavere - omkring 3,8. Dette skyldes, at en del af den producerede varme ikke nyttiggøres tilstrækkeligt i forbindelse med opstart og nedlukning.

Figur 6.3 viser et forsimpleret principdiagram af selve varmepumpen. Lavtrykstrinnet nederst forvarmer fjernvarmevandet til 52°C, hvorefter

ter vandet gennemløber højtryksdelen og eftervarmes til 75 °C. Grundvandet gennemløber først højtryksdelen, afkøles til 5 °C, og herefter lavtryksdelen, hvor det køles yderligere til 2 °C. Skitsen herover er forsimplet idet trin 2 på højtryksvarmepumpen består af to parallelle kompressorer. På skitsen ses to varmevekslere på den varme side, mens varmen afleveres i seks forskellige varmevekslere på det rigtige anlæg. Der anvendes IE3 motorer uden frekvensomformere for yderligere at øge virkningsgraden.

6.1.3 Myndighedsbehandling

Gl. Rye ligger i Skanderborg Kommune, og myndighedsbehandlingen er således varetaget af Skanderborg Kommune. Myndighedsbehandlingen har været en langvarig proces, som har båret præg af, at det er et ukendt område for kommunen. For at få lov til at etablere anlægget har det været nødvendigt, at kraftvarmeværket gennemførte følgende punkter:

- Udarbejdelse af projektforslag i henhold til Varmeforsyningsloven (2017).
- Udarbejdelse af ny lokalplan og kommuneplantillæg for området.
- Redegørelse for miljøpåvirkninger og anmodning om VVM-screening for lokalplanen.
- Redegørelse for miljøpåvirkninger og anmodning om VVM-screening for projektet.
- Ansøgning om prøveboringer.
- Ansøgning til byrådssekretariatet om etablering af boring på kommunal grund.
- Ansøgning om tilladelse til etablering og drift af anlægget i henhold til Bekendtgørelse om varmeindvindingsanlæg og grundvandskøleanlæg BEK nr. 1716 (2015), herunder udarbejdelse af en numerisk grundvandsmodel.
- Ansøgning om nedsivningstilladelse.
- Ansøgning om etablering af pejleboringer til overvågning af nedsivningsanlægget.

- Ansøgning om ny miljøgodkendelse.
- Ansøgning om byggetilladelse.
- Løbende overvågning før og efter idriftsættelsen af varmepumpen af nærliggende § 3-vandhuller med bilag IV-arter.

Det første møde med kommunen omkring myndighedsbehandlingen af projektet blev holdt i september 2011, men først i januar 2014 blev den endelige lokalplan godkendt. Årsagen til det lange forløb er dels at flere procedurer måtte gå om i kommunens sagsbehandling, og dels at VVM-screening og lokalplan ikke kan behandles før projektets detaljer omkring vandindvinding, nedsivning og øvrig miljøpåvirkning er fuldstændigt dokumenteret. Desuden gjorde Naturstyrelsen indsigelse mod lokalplanen. At grundvandsdelen skal dokumenteres før behandling af lokalplan og VVM-screening medfører, at det er nødvendigt at lave prøveboring, prøvepumpning og grundvandsmodel til dokumentation af påvirkningen af grundvandsressourcen. Derefter kunne lokalplansarbejdet igangsættes.

6.1.4 Driftserfaringer

Driftserfaringerne med anlægget er gode, og der har ikke været egentlige problemer igennem de seneste tre år, hvor anlægget har været i drift. Det har dog vist sig, at driftsformen, hvor anlægget kun er i drift omkring 12 timer/døgn, reducerer den samlede COP. Dette skyldes, at COP-værdien er lav under opstart, hvor en del af energien går til opvarmning af selve anlægget. Denne erfaring bør man være opmærksom på i forbindelse med andre anlæg, hvor anlægget ofte startes og stoppes.

6.1.5 Organisation og ejerskab

Varmepumpen er etableret af Rye Kraftvarmeværk, som også ejer og driver den. Rye Kraftvarmeværk har en driftsaftale med Brædstrup Fjernvarme, som derfor står for den daglige drift af værket. Brædstrup Fjern-

varme har også selv både et solvarmeanlæg og en varmepumpe, og har derfor stor erfaring med at drive disse produktionsenheder.

6.1.6 Teknik og specifikationer

- Kold side
 - Varmepumpen køler grundvandet direkte i to serielt forbundne “plate and shell” fordampere, med hvert sit fordampningstryk.
- Varm side
 - Fjernvarmevandet ledes serielt igennem seks forskellige varmevekslere. Disse er én underkøler, to kondensatorer og tre overhedningsfjernere.
- Varmepumpe
 - To serielle ammoniak varmepumper bestående af et 1-trins anlæg med én kompressor og et 2-trins anlæg med tre kompressorer. Maks. temperatur er 75 °C.
- Elforsyning
 - På værket findes to 1000 kVA transformatorer, som bruges i forbindelse med naturgasmotorerne. Transformatorerne ejes af Galten Elværk og varmepumpen er tilsluttet den ene med begrænset netadgang.
- CO₂
 - Solvarmeanlægget og varmepumpen reducerer tilsammen CO₂-udledningen med ca. 772 ton/år.

6.1.7 Budget og økonomi

Varmepumpen producerer 2/3 af varmebehovet, som ellers dækkes af solvarme i sommerperioden og af eksisterende kedel- og kraftvarmeanlæg, når behovet overstiger varmepumpens kapacitet eller spotprisen på el er særlig høj.

Under den daglige drift med start og stop hvert døgn er varmepumpens gennemsnitlige COP 3,8. Når anlægget er driftsvarmt og kører stabilt er COP 4,0, men fordi COP'en er væsentlig lavere under opstartsforløbet, reduceres den gennemsnitlige COP til ca. 3,8. Dette er uden grundvandspumperne, som bruger elektricitet svarende til ca. 10 % af varmepumpens eloptag. Elektriciteten til pumperne er dog afgiftsfritaget og derfor billigere i drift. På grund af varmepumpens høje effekt og det tilknyttede vandlager, vil anlægget som regel kun være i drift i de 12 timer/døgn, hvor elprisen er lavest.

Investering

De budgetterede nøgletal for anlægget ses herunder:

Varmepumper	7,2 mio. kr.
Grundvandssystem, rør og el	2,8 mio. kr.
Tilslutning og SRO	0,7 mio. kr.
Tilbygning og diverse	1,0 mio. kr.
Total	11,7 mio. kr.

Varmepumpen er tilsluttet med “begrænset nettilslutning”, hvilket betyder at udgifter til udbygning af eltilslutning er meget lave. Til gengæld kan elleverandøren afbryde forbindelsen, hvis elsystemet bliver overbelastet. Det forventes at dette vil ske yderst sjældent, hvorfor denne løsning er valgt. Projektet i Gl. Rye er støttet af EUDP, hvor varmepumpeanlægget er støttet med omkring 2,7 mio. kr., så den samlede anlægssum for værket har udgjort 9,0 mio. kr..

Driftsøkonomi

Der er udgifter til vedligehold og indkøb af elektricitet. Disse udgør ca.:

Vedligehold	15 kr./MWh _{varme}
El til grundvandspumper	10 kr./MWh _{varme}

Indkøb af elektricitet

Spot	200 kr./MWh _{el} (kører 12 timer/døgn)
Transport overordnet	83 kr./MWh _{el}
Transport lokal	105 kr./MWh _{el}
Elafgift	305 kr./MWh _{el}
Samlet	693 kr./MWh _{el}

Afhængigt af den aktuelle spotpris, vil varmeproduktionsprisen ligge på omkring 207 kr./MWh inkl. elforbrug på grundvandspumper samt serviceomkostninger.

Samlet økonomi

Den samlede økonomi varierer med gaspriser og antallet af driftstimer fra år til år. I det følgende er der regnet med disse forudsætninger:

- Variabel gaspris inkl. transport = 1,95 kr./Nm³
- Samlet elpris varmepumper = 693 kr./MWh_{el}
- El til grundvandspumper = 10 kr./MWh_{varme}
- Vedligehold = 15 kr./MWh_{varme}
- Årligt antal driftstimer = 3000 timer

Varmepumper på grundvand - 2000 kW

Investering	9 000 000	kr.
Årligt antal driftstimer	3000	timer
Årlig varmeproduktion	6000	MWh
Driftsbesparelse pr. MWh	198	kr./MWh
Årlig driftsbesparelse	1 188 000	kr./år
Simpel tilbagebetalingstid	7,6	år
Intern rente over 15 år	10,1	%

6.2 Broager Fjernvarmeselskab a.m.b.a.

Broager Fjernvarmeselskab er som udgangspunkt bygget som et naturgasfyret varmeværk, hvor der i 2010 yderligere blev installeret et ca. 10 000 m² stort solvarmeanlæg. Broager Fjernvarmeselskab har senest idriftsat en grundvandsvarmepumpe på 4,0 MW. Varmepumpen forventes at kunne levere omkring 75 % af Broager Fjernvarmeselskabs varmebehov på 24 900 MWh/år. Varmepumpen er dimensioneret således, at den forventes at være i drift ca. 5000 timer årligt og agere grundlast i opvarmningssæsonen, hvor solfangeranlægget ikke producerer.

6.2.1 Baggrund

Broager Fjernvarmeselskab er oprindeligt et naturgasfyret kraftvarmeværk med en gasmotor, tre gaskedler samt to akkumuleringstanke på hver 960 m³. Disse er beliggende på Østergade, hvorfra Broager by forsynes med fjernvarme.

I 2010 etablerede selskabet et solvarmeanlæg på 9988 m² på Banestien, som ligger ca. 400 m syd for værket på Østergade. Solvarmen sendes via en transmissionsledning til Østergade. Solvarmeanlægget producerer ca. 18 % af det årlige varmebehov mens resten af varmen produceres med naturgas og primært på gaskedlerne.

Varmepumpeprojektet er blandt andet baseret på en grundvandskortlægning, som det daværende Sønderjyllands Amt har udført i forbindelse med en MTBE-forurening fra en tankstation. Kortlægningen indikerede blandt andet en 400 m dyb begravet dal, og der er lavet en 200 m dyb undersøgelsesboring på kanten af den begravede dal, som har vist sig at være meget højtydende. I forbindelse med projektet blev det erfaret, at [Undergrundsloven] træder i kraft, hvis grundvandsboringerne er dybere end 250 m (dette er en administrativ grænse). Dette betyder, at boringer indtil 250 meters dybde kan godkendes af kommunen, hvorimod dybere boringer skal godkendes af Energistyrelsen efter de samme regler som geotermiske boringer. Dette ville kræve et forholdsvist stort arbejde, der vil være for omkostningskrævende. Boringer til grund-

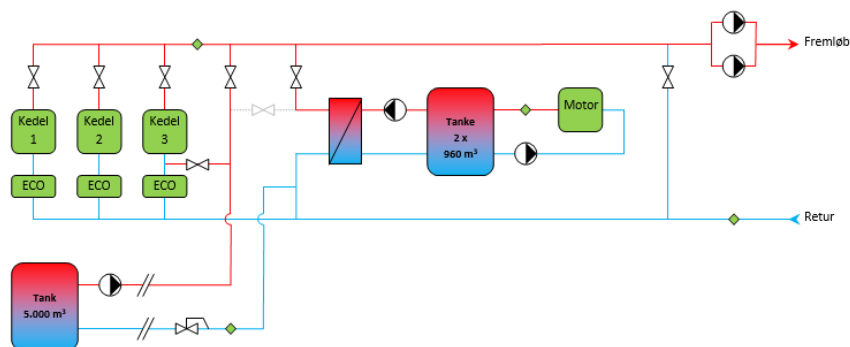
Anlægssejer	Broager Fjernvarmeselskab a.m.b.a. i Broager
Kontaktpersoner	Peer Allan Monger (formand) Povl Bonde Christiansen (driftsleder)
Leverandør	ICS Industrial Cooling Systems A/S, Vojens
Type	Pladsbygget ammoniakvarmepumpe med 7 GEA Grasso stempelkompressorer (3 stk. LT og 4 stk. HT)
Idriftsat / driftstimer	Ultimo 2016 / Ca. 5000 timer/år
Varmekilde	Grundvand
Nominal varmeydelse	4,0 MW
Nominal COP	4,2*
Fjernvarme opvarmes fra-til	Ca. 35-75 °C
Varmekilde afkøles fra-til	11-2 °C

* Ekskl. forbrug til grundvandspumper

vandsvarmepumpen er derfor de facto blevet begrænset til maksimalt 250 meters dybde.

Der blev i foråret 2014 lavet en testboring, som desværre viste sig ikke at kunne anvendes. I efteråret 2014 blev der lavet en ny testboring, som udviste et meget lovende resultat. På dette grundlag blev det besluttet at lave yderligere tre produktionsboringer (fire i alt), efterfulgt af fem reinjektionsboringer. Myndighedsarbejdet i forbindelse med grundvandsdelen, både omkring boringer og transmissionsledningen imellem boringer og teknikbygning, har været meget omfattende. Dette skyldes blandt andet, at transmissionsledningen gennemløber et område med beskyttede diger.

Deltagerne i projektet er Broager Fjernvarmeselskab (anlægsvært), PlanEnergi (bygherrerådgiver og projektleder), ICS Industrial Cooling Systems A/A (leverandør af varmepumpen), A. Højfeldt A/S (leverandør



Figur 6.4 – Principdiagram over det eksisterende kraftvarmeværk på Østergade. Øverst fra venstre ses de tre gaskedler, i midten varmeveksleren og de to eksisterende akkumuleringsstanke, gasmotoren og de to bypumper. Nederst på billedet ses den nye akkumuleringsstank på Banestien, hvor solvarmeanlægget (ikke vist) og varmepumpen (ikke vist) også er tilsluttet.

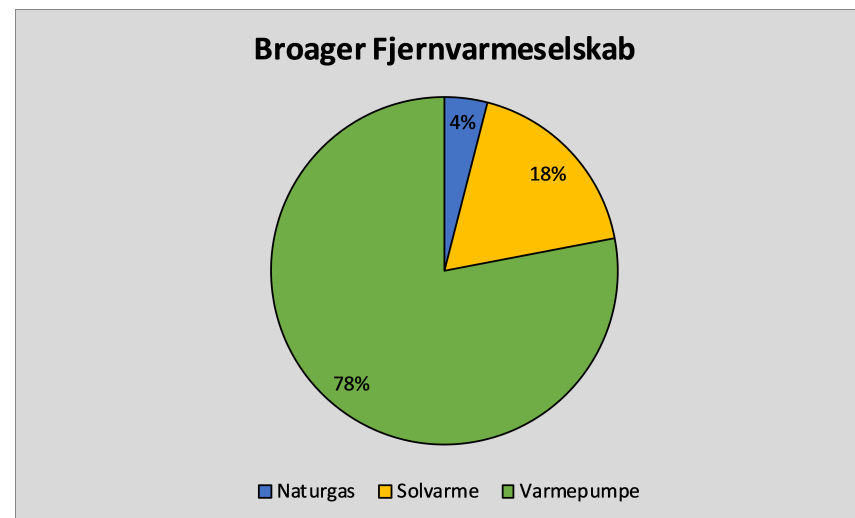
grundvandsboringer, råvandsstationer og transmissionsledning) samt Jan Teichert ApS (leverandør af bygning til varmepumpen).

Energistyrelsen gav i december 2015 tilsagn om støtte til projektet fra støtteordningen til varmepumper ved fjernvarmeværker (Tilskud til fremme af store eldrevne varmepumper til fjernvarmeproduktion, jf. BEK nr. 849 af 01/07/2015).

6.2.2 Systemet

Broager Fjernvarmeselskab er et naturgasfyret Kraftvarmeværk fra 1962. Værket har 1120 forbrugere og et årligt varmebehov på 24 900 MWh. Værket på Østergade har indtil 2010 produceret varme på tre gaskedler og en gasmotor, jf. figur 6.4.

I 2010 blev værket suppleret med et solvarmeanlæg på 9988 m². Dette solvarmesystem blev i 2015-16 opgraderet med en ny solvarmeunit, en ny akkumuleringsstank på 5000 m³ samt en ny bygning på Banestien

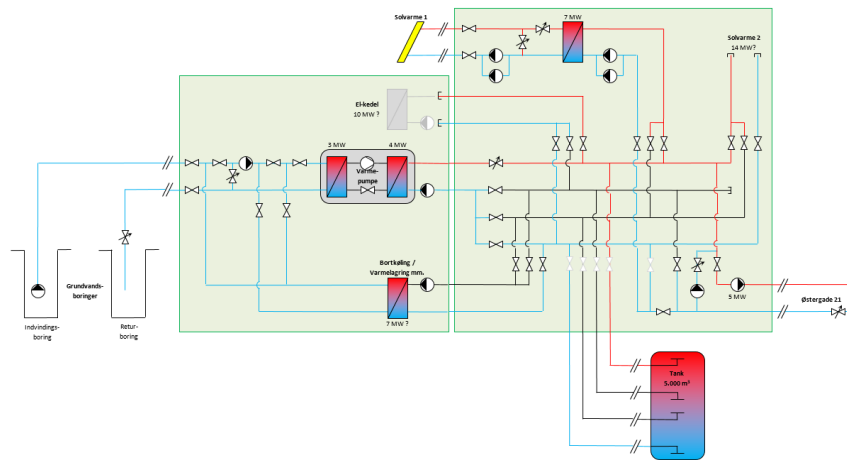


Figur 6.5 – Forventet varmeproduktionsfordeling på Broager Fjernvarmeselskab.

400 m syd for værket på Østergade. Denne bygning huser varmevekslere, pumper, styring mm. som indtil da havde været placeret på det eksisterende varmeværk på Østergade. I 2016 påbegyndtes yderligere en bygning ved siden af den nye solvarmebygning. Denne bygning huser grundvandsvarmepumpen på 4,0 MW med tilhørende kontor, kontrolrum samt toilet.

Varmeproduktionsfordelingen forventes herefter at blive 18 % på solvarme, 78 % på varmepumpe og 4 % på naturgassen, jf. figur 6.5.

Varmepumpen er opbygget som et kompakt modul- og delvist pladsopbygget 1- og 2-trins NH₃-anlæg. Varmepumpen indeholder syv højeffektive stempelkompressorer, varmevekslere til kold- og varmtvandssiderne, vandpumper, elforsyning og en fuldt integreret styring til værkets eksisterende SRO-anlæg.

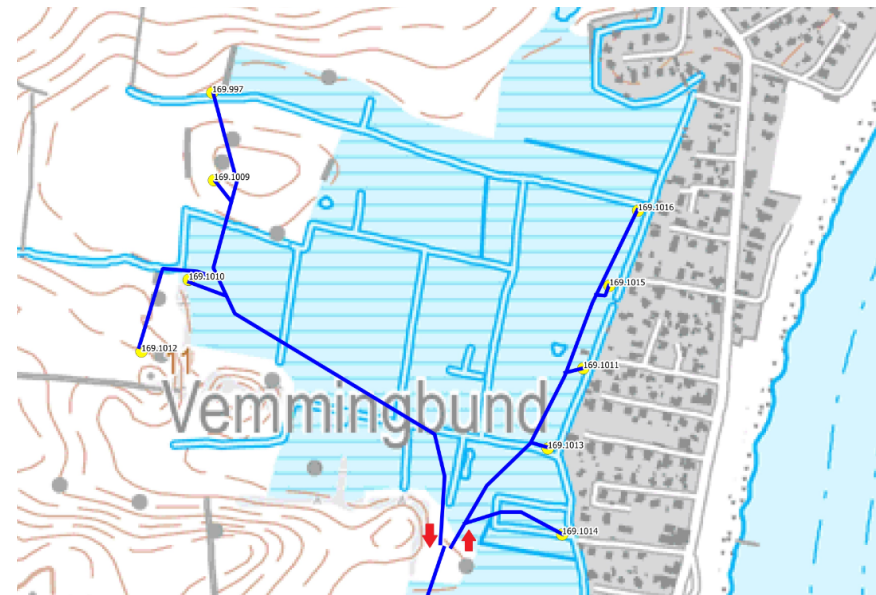


Figur 6.6 – Den nye Varmepumpe- og solvarmeinstallation på Banestien.

Både solvarmeanlægget og varmepumpen køles med returvand fra bypumperne på Østergade samt vandet fra bunden af den nye akkumuleringstank. Begge enheder (solvarmen og varmepumpen) kan uafhængigt af hinanden levere opvarmet vand enten direkte til fremløbet eller til lagring på forskellige lag i akkumuleringstanken.

Grundvandskredsen består af fire ca. 250 m dybe indvindingsboringer med dykpumper samt fem ligeså dybe reinjektionsboringer. Der anvendes ingen form for iltningssanlæg, bundfældningstanke eller tilsætning af kemikalier, da der ikke er påvist de store koncentrationer af jern, mangan eller lignende som ville kunne foranledige aflejringer i varmevekslere og andet udstyr.

Ved fuldlast ligger grundvandsflowet gennem varmepumpen på ca. 300 m³/h. De fire grundvandsboringer yder tilsammen ca. 400 m³/h, men det har vist sig, at grundvandstemperaturen er omkring 11 °C, hvilket er et par grader højere end forventet. Det har derfor været muligt at sænke flowet betydeligt, og derved også mindske elforbruget til grundvandspumperne.



Figur 6.7 – Placering af indvindingsboringer (tv.) set i forhold til injektionsboringer (th.) Helt til højre ses Vemmingbund der støder ud til Sønderborg Bugt og Flensborg Fjord.

Varmepumpeanlægget bruger ammoniak (NH₃) som kølemiddel og er dimensioneret med henblik på en så høj COP som muligt. Anlægget er pladsbygget (se billeder herunder), og består af syv Grasso stempelkompressorer fordelt på et lavtryktemperatur-anlæg og højtemperatur-anlæg. De to anlæg er forbundet i serie. På grund af den trinvis opbygning bliver varmepumpen meget effektiv med en COP på 4,2. Et forsimplet diagram af opbygningen ses på figur 6.9.

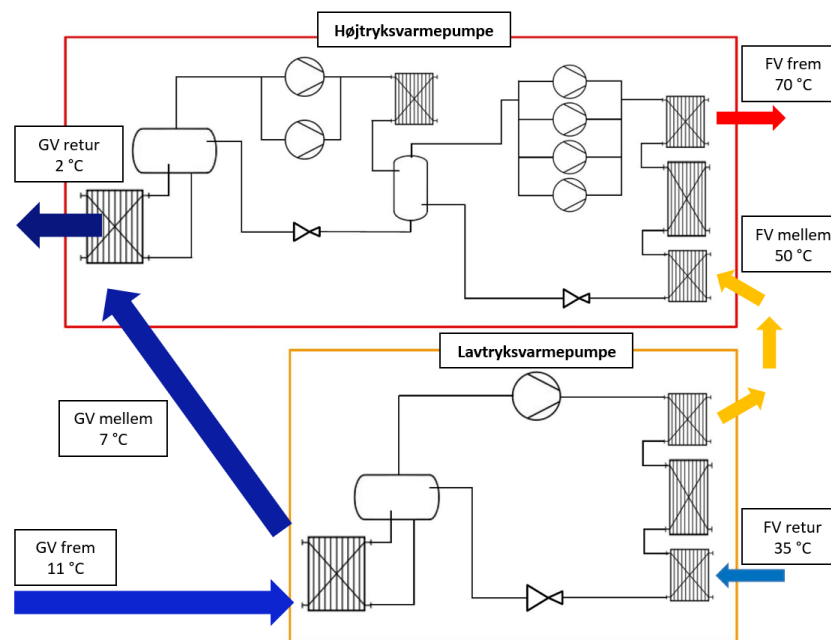
Figur 6.9 viser et forsimplet principdiagram af selve varmepumpen. Både fjernvarmevand og grundvand gennemløber de to separate varmepumper i serie. Lavtryksvarmepumpen er bestykket med en enkelt stor kompressor, som øger trykket i et enkelt trin. Højtryksvarmepumpen er et to-trinsanlæg, som i første trin er bestykket med to parallelle kom-



Figur 6.8 – Grundvandsvarmepumpe i Broager.

pressorer samt fire mindre højtrykskompressorer, som ligeledes er kob- lede parallelt.

Lavtryksvarmepumpen forvarmer fjernvarmevandet til ca. 50 °C, hvor- efter vandet gennemløber højtryksdelen og eftervarmes til 70-75 °C. Grundvandet gennemløber først lavtryksdelen og afkøles til omkring 7 °C, og herefter højtryksdelen, hvor det køles yderligere til 2 °C. For at få den højeste virkningsgrad anvendes der i alt syv varmevekslerer på fjernvarmesiden. Der anvendes IE3 motorer, som alle er med frekven- somformere for yderligere at kunne optimere de mange forskellige drift situationer.



Figur 6.9 – Principdiagram for det samlede varmepumpeanlæg i Broager.

6.2.3 Driftserfaringer

Der har været budgetoverskridelser ved udførelsen af projektet. Over- skridelserne kan primært henvises til, anlægsarbejdet omkring grund- vandsboringer, transmissionsledninger, etablering af kørselsveje til bo- ringer, samt reetablering af samme arealer efter endt udførelse.

Der har været nogle problemer i forbindelse med indkøring og optime- ring varmepumpeanlægget, som har betydet, at dette har taget væsent- lig længere tid end forventet.

Grundvandskredsen med oppumpning, transmission, afkøling, re- turtransmission og reinjektion fungerer nu rigtig godt. Værket har nu efter ca. et halvt års drift haft den ene fordampner åben for inspektion,

og det har her vist sig, at der ikke er nogen form for aflejringer eller misfarvning af plader.

Støj har været en væsentlig udfordring for projektet. Selvom varmepumpen overholder den oplyste maksimale støjgrænse, har det ikke været uden problemer for bygningsentreprenøren at overholde de maksimalt tilladte 36 dB i skel. Der er blevet udført diverse konstruktionsændringer på selve bygningen, og der arbejdes stadig på at få nedbragt støjen med yderligere én dB, således at varmepumpen kan driftes døgnet rundt.

6.2.4 Organisation og ejerskab

Varmepumpen er etableret af Broager Fjernvarmeselskab, som også ejer og selv driver denne.

6.2.5 Teknik og specifikationer

- Kold side
 - Varmepumpen køler grundvandet i to fordampersæt på hver sin kølekreds (LT og HT), som hver består af to Alfa-Laval pladevarmevekslere. De to fordampersæt er koblet i serie.
- Varm side
 - Fjernvarmevandet ledes serielt i to kredse gennem syv forskellige fuldsvejste varmevekslere fra Vahterus. Disse er: to underkølere, to kondensatorer og tre overhedningsfjernere.
- Varmepumpe
 - En lavtryksammoniak varmepumpe bestående af et 1-trins anlæg med én kompressor, og et 2-trins anlæg med to lavtrykskompressorer og fire højtrykskompressorer. Maksimal fremløbstemperatur er 75 °C.

- Elforsyning
 - På værket, der huser den nye varmepumpe, er der installeret en ny 2000 kVA transformatorer med skærmede viklinger, som bruges til forsyningen af alle varmepumper og den eksisterende solvarmebygning. Transformatoren ejes af ikke af Broager Fjernvarmeselskab, men er direkte leveret af el-selskabet SE Syd Energi.
- CO₂
 - Varmepumpen reducerer tilsammen CO₂-udledningen med ca. 3000 ton/år.

6.2.6 Budget og økonomi

Varmepumpen producerer ca. 75 % af Broagers samlede varmebehov. Dette varmebehov ville ellers været blevet dækket af eksisterende gaskedler og kraftvarmeanlæg.

Som tidligere nævnt er varmepumpens COP-værdi 4,2. Dette er uden grundvandspumperne, som bruger elektricitet svarende til ca. 6 % af varmepumpens eloptag. Elektriciteten til pumperne er dog afgiftsfritaget og derfor billigere end el til selve varmepumpen.

Investering

De budgetterede nøgletal for anlægget ses herunder:

Varmepumper	12,0 mio. kr.
Grundvandssystem, rør og el	16,0 mio. kr.
Eltilslutning og SRO	2,5 mio. kr.
Bygning	1,2 mio. kr.
Rådgivning og diverse	2,3 mio. kr.
Total	34,0 mio. kr.

Varmepumperne er ikke tilsluttet med “begrænset netadgang”, men er direkte tilsluttet SE Syd Energi under normalt gældende tariffer. Varmepumpen blev etableret før den gældende Energispareordning, og varmepumpens energibesparelse kan således ikke indberettes. Til gengæld har Broager Fjernvarmeselskab modtaget støtte fra Energistyrelsens demonstrationsprogram for store varmepumper, hvor man har modtaget et tilskud på 6,0 mio.kr., så den samlede investering har udgjort 28,0 mio. kr.

Driftsøkonomi

Der er udgifter til vedligehold og indkøb af elektricitet. Disse udgør ca.:

Vedligehold 15 kr./MWh_{varme}

El til grundvandspumper 6 kr./MWh_{varme}

Indkøb af elektricitet

Spot 215 kr./MWh_{el}

Transport overordnet 83 kr./MWh_{el}

Transport lokal 105 kr./MWh_{el}

Elafgift 305 kr./MWh_{el}

Samlet 708 kr./MWh_{el}

Afhængigt af den aktuelle spotpris, vil varmeproduktionsprisen ligge på omkring 189 kr./MWh inklusive elforbrug på grundvandspumper samt serviceomkostninger. I forhold til værkets naturgaskedler bliver besparelsen med varmepumpen på ca. 216 kr./MWh_{varme}.

Samlet økonomi

Den samlede økonomi varierer med gaspriser og antallet af driftstimer fra år til år. I det følgende er der regnet med disse forudsætninger:

- Variabel gaspris inkl. transport = 1,95 kr./Nm³
- Samlet elpris varmepumper = 708 kr./MWh_{el}
- El til grundvandspumper = 6 kr./MWh_{varme}
- Vedligehold = 15 kr./MWh_{varme}
- Årligt antal driftstimer = 4687 timer

Varmepumper på grundvand - 4000 kW		
Investering (efter tilskud)	28 000 000	kr.
Årligt antal driftstimer	4687	timer
Årlig varmeproduktion	18 750	MWh
Driftsbesparelse pr. MWh	216	kr./MWh
Årlig driftsbesparelse	4 050 000	kr./år
Simpel tilbagebetalingstid	6,9	år
Intern rente over 15 år	11,7	%

6.3 Andre eksempler på grundvandsvarmepumper

6.3.1 Han Herred Havbåde

I 2010 blev der etableret en grundvands-varmepumpe på 70 kW hos Han Herred Havbåde (<http://www.havbaade.dk/>). Grundvandskredsen består af én produktionsboring og én reinjektionsboring. Varmepumpen, som er leveret af Advansor, er en transkritisk CO₂-varmepumpe med to parallelt forbundne semihermetiske stempelkompressorer.

Varmepumpen leverer ikke fjernvarme, men producerer 70 °C varmt vand til en akkumuleringstank på 10 m³, som bruges til at opvarme Han Herred Havbådes tre bygninger samt til varmt brugsvand.

Han Herred Havbåde har haft problemer med okkerudfældning fra grundvandet.

6.3.2 Bjerringbro Varmeværk

Energicentralen i Bjerringbro er forbundet med et grundvandslager, hvor overskudsvarme fra Grundfos kan lagres fra sommer til vinter. Der henvises til afsnit 3.1 for yderligere detaljer om dette anlæg.

7 Sø- og åvand

Mange områder i Danmark har adgang til fersk overfladevand, der kan udnyttes som varmekilde til varmepumper. Vandmængderne er ofte meget store og giver derfor mulighed for udvinding af væsentlige mængder energi, uden at temperaturforholdene i miljøet påvirkes nævneværdigt. Temperaturniveauerne afhænger naturligvis af årstiden, og i år med særligt kolde vinterperioder vil overfladetemperaturen ofte nærme sig frysepunktet. Det betyder, at anlægget enten kræver særlige varmevekslere, som kan håndtere isdannelse, eller at varmepumpen må stoppes og varmen produceres på et andet anlæg.

Konceptet udnyttes flere steder i udlandet, men i Danmark findes der endnu ikke større anlæg til udnyttelse af energi fra sø- eller åvand. Ans Kraftvarmeværk i Midtjylland har arbejdet på et projekt i længere tid. Projektet er blevet godkendt af myndighederne og færdigprojekteret, men der er samtidig opstået en nærliggende mulighed for fysisk sammenkobling med Rødkærnsbro, Bjerringbro og Ulstrup. Det er blevet besluttet, at der ikke foretages nye investeringer i produktionsudstyr før rammerne for en eventuel sammenkobling ligger fast. Konceptet i Ans er beskrevet i det følgende.

7.1 Varmepumpe med søvand - Ans Kraftvarmeværk

Ans Kraftvarmeværk er et naturgasfyret kraftvarmeværk med to naturgaskedler og en kraftvarmemotor. Varmepumpe-projektet har været i gang i flere år, og miljøtilladelse har desværre været meget tidskrævende pga. langvarig myndighedsbehandling og efterfølgende klager.

Fjernvarmeværk / Kontaktperson	Ans Kraftvarmeværk / Carl Lau Jensen
Leverandør	Johnson Controls (forventes)
Type	4 identiske isobutan-varmepumper med skruekompressorer
Installations år / driftstimer	Ikke etableret / 6000 timer/år
Varmekilde	Søvand
Drivenergi	Hedtvand fra affaldsforbrænding eller halm; 150 °C
Nominel varmeydelse (sommer/vinter)	1,6 MW/1,2 MW (samlet for 4 stk.)
Nominel COP (sommer/vinter)	3,7/3,2
Fjernvarme opvarmes fra-til (sommer/vinter)	30-70 °C/35-75 °C
Varmekilde afkøles fra-til (sommer/vinter)	17-13 °C/5-2 °C

Systemet er dog projekteret, og der er fortsat en forventning om, at anlægget vil blive etableret. Den lange behandlingstid for miljøtilladelse skyldes til dels, at anlægget er det første af sin slags, og det må forventes at efterfølgende etablering af lignende anlæg vil kræve mindre arbejde til miljøtilladelse.

7.1.1 Baggrund

Ans Kraftvarmeværk har længe kigget efter alternativer til værkets eksisterende naturgasanlæg. Da værket ligger tæt på Tange Sø, er det nærliggende med en varmepumpeløsning, som indvinder energi fra søen. Med de seneste års lave elspotpriser, vil varmeværket kunne producere fjernvarme væsentligt billigere med et eldrevet varmepumpeanlæg end på de eksisterende enheder.

7.1.2 Systemet

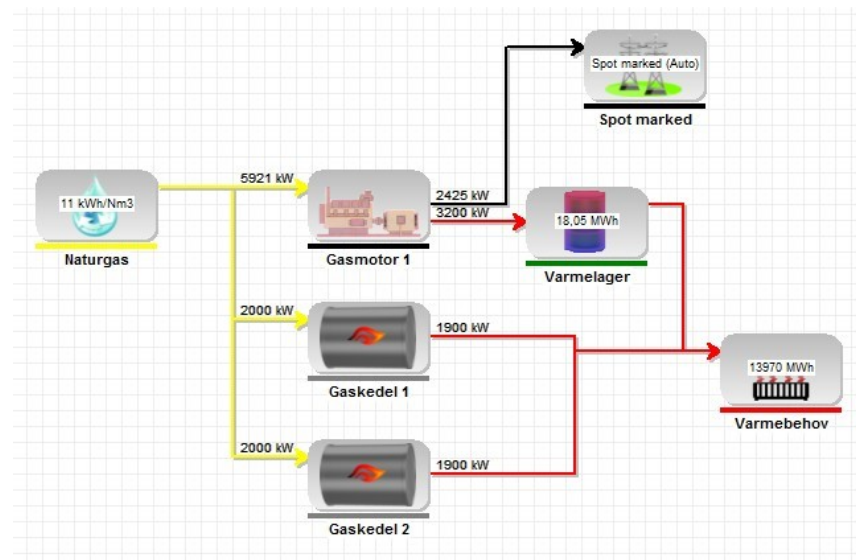
Ans Kraftvarmeværk har tilknyttet ca. 500 forbrugere, og der produceres årligt omkring 14 000 MWh_{varme}. Varmeværket råder over to naturgaskedler på hver 1,9 MW og en enkelt naturgasfyret kraftvarmeenhed med en varmeeffekt på 3,2 MW. Elproduktionen fra kraftvarmemotoren afregnes på spotmarkedet, og motoren er koblet til akkumuleringstanke på sammenlagt 380 m³. Figur 7.1 viser en principskitse for produktionsenhederne på varmeværket.

Varmepumpeanlægget er dimensioneret til mange fuldlasttimer og vil producere omkring 56 % af varmen på Ans Kraftvarmeværk. Dette er illustreret på figur 7.2.

Afhængigt af vandtemperaturen i de enkelte vintre, kan varmepumpeanlægget få flere eller færre driftstimer, og dermed en lidt større eller mindre del af varmeproduktionen. I særligt kolde vintre kan blive nødvendigt at slukke varmepumperne. I varme vintre vil anlægget til gengæld kunne driftes det meste af tiden.

Varmepumpekonceptet

Ans Kraftvarmeværk ligger meget tæt på Tange sø. Søen indeholder en meget stor vandmængde og gennemløbes af Gudenåen. Den er derfor oplagt som varmekilde for en varmepumpe. En delstrøm af den vandmængde som gennemløber søen, pumpes ind omkring varmeværket, afkøles 3-4 °C og ledes herefter tilbage til søen. Der bliver etableret en pumpestation ved varmeværket og to filter-sier i søen til ind- og udled-

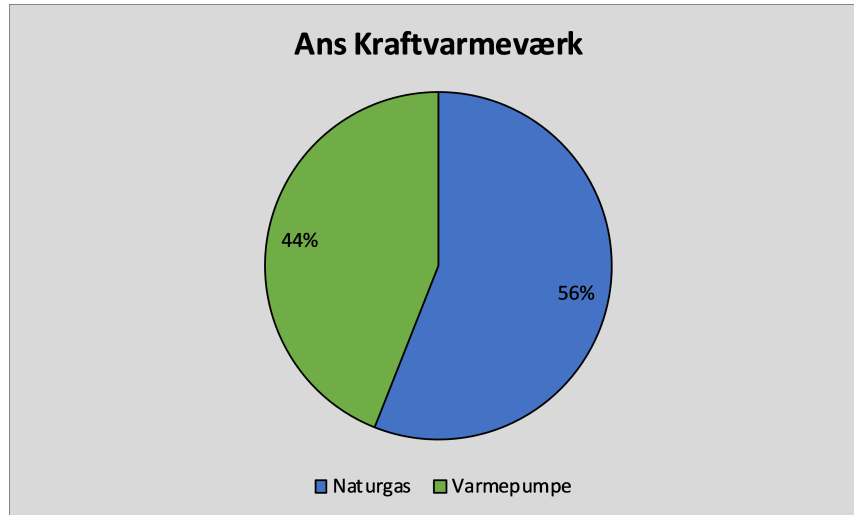


Figur 7.1 – De nuværende produktionsenheder ved Ans Kraftvarmeværk. Kilde: Teknologisk Institut.

ning af søvandet. Sierne monteres før og efter en vejbro, fordi vandhastigheden er særlig høj her, og risikoen for termisk kortslutning derfor elimineres.

For at opnå den ønskede effekt med en afkøling på 3-4 °C bliver vandstrømmen igennem varmepumpen omkring 240 m³/h. Søen indeholder ca. 20 mio. m³ vand og har en gennemsnitlig vandgennemstrømning på 20 m³/s. Den høje vandgennemstrømning gør, at varmepumpens energioptag ikke påvirker den naturlige balance eller temperaturforholdene i søen. Figur 7.3 viser rørledningerne imellem sø og varmeværk.

På grund af pladsmangel på varmeværket, bliver varmepumperne installeret i en ny tilbygning ved siden af pumpebrønden. En skitse ses på figur 7.4.



Figur 7.2 – Forventet varmeproduktionsfordeling ved Ans Kraftvarmeværk med varmepumper.

Vandet suges ind igennem sien syd for broen, igennem pumpe, filter, varmepumpe, et mindre modsatrettet filter og tilbage til søen nord for broen. Sien i søen filtrerer partikler på mere end ca. 5 mm fra imens filtret efter pumpebrønden filtrerer partikler større end 1 mm fra. Herved blokeres sien i søen ikke af mindre partikler. Disse fanges i det fine filter, som let kan renses. Systemet er lavet så vandstrømmen kan reverseres i tilfælde af, at sugesien bliver tilstoppet. Her bruges det lille filter efter varmepumpen til at holde større partikler uden for varmepumpen.

Dimensionering

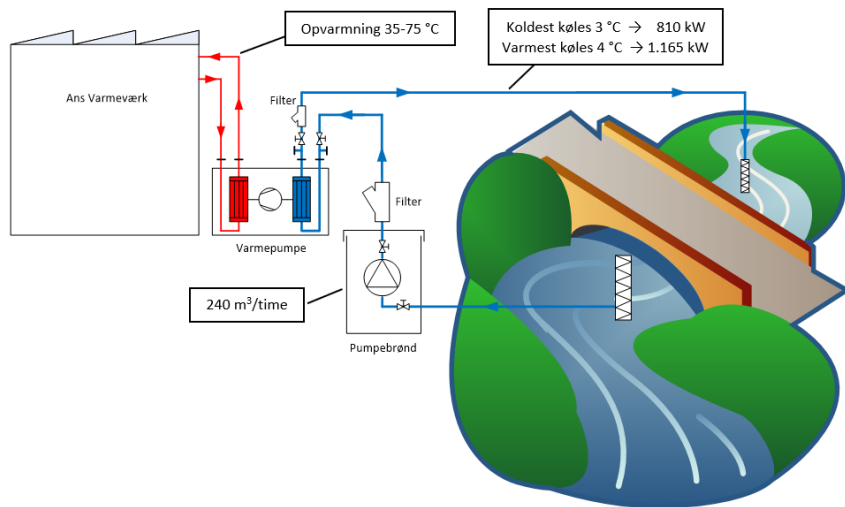
Med søen som varmekilde er varmepumperne ikke afhængige af de øvrige produktionsanlæg, og varmepumperne er derfor dimensioneret som "stand alone"-enheder, der varetager værkets samlede varmeproduktion i en stor del af året. Temperaturkriteriet har derfor været 75 °C, som er værkets typiske fremløbstemperatur i vinterperioden.



Figur 7.3 – Forventet rørføring imellem sø og varmeværk. Kilde: Teknologisk Institut.

På grund af problemer med myndighedsgodkendelser, er der indhentet tilbud af to omgange fra alle kendte leverandører. Løsninger med både kuldioxid, ammoniak og isobutan er blevet vurderet. Umiddelbart var en løsning med isobutan mest interessant, og derfor blev den endelige miljøgodkendelse givet på baggrund af dette kølemiddel. I det seneste tilbud indeholder løsningen tre parallelle anlæg, som tilsammen yder omkring 1,1 MW i vinterperioden og 1,6 MW om sommeren, hvor vandet er varmere. Isobutan-varmepumperne kan producere fjernvarmevand op til ca. 85 °C, men det er altid en fordel at køre med så lav en temperatur som muligt, da dette øger COP-værdien.

Sø vandet må ikke nedkøles til en temperatur under 2 °C inden det tilbageledes. Fordi anlægget er lagt ud til en temperaturdifferens på 3 °C om



Figur 7.4 – Principdiagram for varmepumpe i Ans. Kilde: Teknologisk Institut.

vinteren, skal kapaciteten derfor reduceres, når vandtemperaturen er lavere end 5 °C. Om sommeren køres der med samme flowmængde på søvandet selvom køleeffekten er større. Her afkøles vandet derfor 4 °C, når kapaciteten er størst.

Det er planlagt at installere tre varmepumper, hvor søvandssystemet er forberedt på at kunne udvides med 50 %. På figur 7.5 ses isobutan-varmepumper, som er installeret på Skejby Sygehus ved Aarhus og er af samme type som de tiltænkte ved Ans Kraftvarmeværk.



Figur 7.5 – Varmepumper til kombineret varme- og kuldeproduktion på Skejby Sygehus. Kilde: Teknologisk Institut.

7.1.3 Myndighedsbehandling

I forbindelse med etablering af den skitserede løsning har Silkeborg Kommune bedt om behandling af følgende godkendelser/tilladelser:

- VVM-screeningsafgørelse
- Indvindingstilladelse efter vandforsyningslovens § 20
- Udledningstilladelse efter miljøbeskyttelseslovens § 28
- Reguleringssag efter vandløbslovens § 17
- Dispensation efter Naturbeskyttelseslovens § 3
- Tillæg til miljøgodkendelse efter miljøbeskyttelseslovens § 33
- Byggetilladelse efter byggeloven, ingen klagefrist
- Godkendelse efter varmforsyningsloven
- Gravetilladelse efter vejloven

Da anlægget er det første af sin slags, har myndighedsbehandlingen været tidskrævende, men det er lykkedes at få de relevante tilladelser. VVM-screeningen blev påklaget af Danmarks Naturfredningsforening, men klagen blev efterfølgende afvist ved Natur- og Miljøklagenævnet.

7.1.4 Driftserfaringer

Da varmepumpen endnu ikke er idriftsat, er der ingen driftserfaringer med denne. For at opnå så en høj virkningsgrad som muligt, ledes søvandet direkte igennem varmepumpernes fordampere. Dette medfører en risiko for tilsmudsning af varmevekslerne, og det er selvfølgelig vigtigt, at der tages højde for de udfordringer, der vil komme i denne forbindelse. Varmepumperne forberedes for installation af et CIP-anlæg og tømning af vekslerne ved længere tids pauser. Det har ikke været muligt at finde entydige erfaringer omkring problematikken, men meget tyder på, at biofilm særligt opbygges ved stilstand. Tømmes vekslerne vil det formentlig bremse opbygningen.

7.1.5 Organisation og ejerskab

Varmepumpeanlægget vil blive ejet og drevet af Ans Kraftvarmeværk. Gudenåcentralen, som ejer Tange Sø og de involverede matrikler, har givet tilladelse til etablering af anlægget.

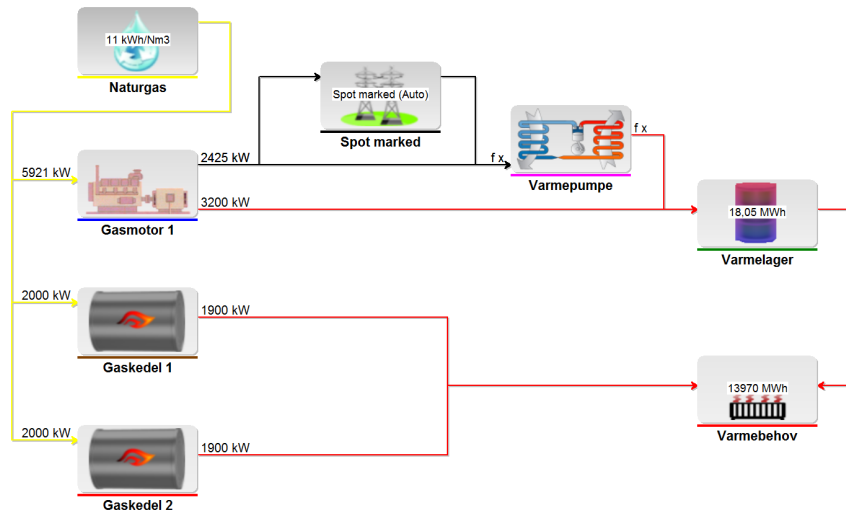
7.1.6 Teknik og specifikationer

- Kold side
 - Det filtrerede søvand ledes direkte igennem varmepumpernes fordampere, som består af loddede pladevarmevekslere.
- Varm side
 - Fjernvarmevandet ledes direkte igennem varmepumpernes indbyggede kondensatorer, som ligeledes er loddede pladevarmevekslere.
- Varmepumper
 - 3 stk. isobutan-varmepumper med skruekompressor. Leverer maksimalt en temperatur ud på ca. 85 °C.
- CO₂
 - Varmepumperne fortrænger primært varmeproduktion på naturgaskedlerne. Med en årlig varmeproduktion på 7800 MWh, bliver den samlede CO₂-reduktion ca. 940 ton CO₂/år.

7.1.7 Budget og økonomi

Varmepumpen vil blive grundlastenhed og producere omkring 55 % varmebehovet. Der suppleres med eksisterende kedel og kraftvarmeanlæg, når behovet overstiger varmepumpens kapacitet.

Søvand som varmekilde har en relativ lav temperatur, og i kombination med relativ høj fremløbstemperatur (varmepumpen skal kunne levere

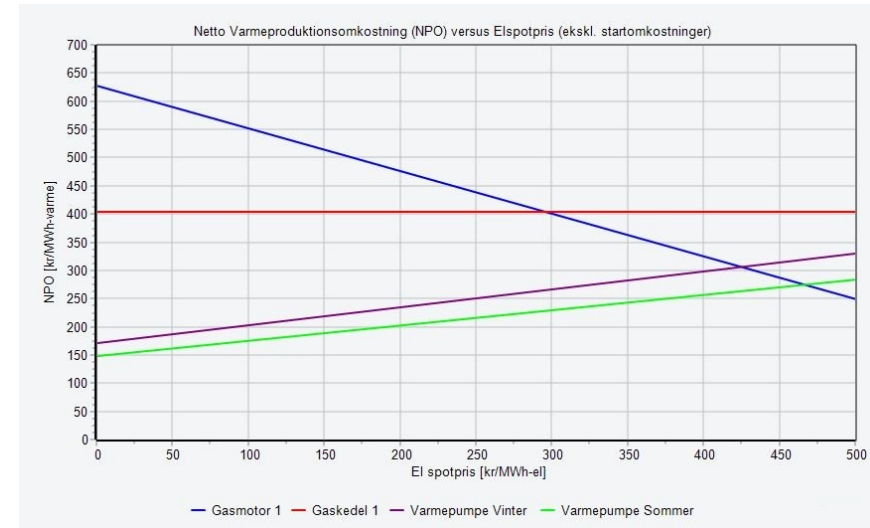


Figur 7.6 – Produktionsenheder inkl. varmepumpe.

varmen selvstændigt) betyder det, at der opnås en COP-værdi på ca. 3,2 når det er koldest, og 3,7 når det er varmest. Anlægget kobles på varmelageret, så timer med lave elspotpriser kan udnyttes i perioder med overkapacitet. Dette er illustreret i figur 7.6.

Varmeproduktionsomkostningerne for de forskellige anlæg ses på figur 7.7. Grundet vandets svingende temperaturer, varierer varmepumpens produktionspris med årstiden, og figuren har derfor to grafer for varmepumpens produktionsomkostning. Én for januar (vinter) og én for juli (sommer).

Som det ses af figuren er varmepumpen den billigste produktionsenhed, når elspotprisen er under 425 kr./MWh i vinterperioden, og 470 kr./MWh i sommerperioden. Med de nuværende elspotpriser vil varmepumpen være grundlastenhed og producere omkring 55 % af varmen.



Figur 7.7 – Netto varmeproduktionsomkostninger for kedel, motor og varmepumpe i henholdsvis januar og juli.

Investering

De budgetterede nøgletal for anlægget ses herunder:

Varmepumper	4,2 mio. kr.
Kold side (filtre, rør, pumper m.m.)	3,3 mio. kr.
Tilslutning og SRO	1,5 mio. kr.
Bygning	1,0 mio. kr.
Rådgivning	1,0 mio. kr.
Total	11,0 mio. kr.

Varmepumperne kommer på “begrænset nettilslutning”, hvilket betyder at udgifter til udbygning af eltilslutning er meget lave. Til gengæld kan elleverandøren afbryde forbindelsen, hvis elsystemet bliver overbe-

lastet. Det forventes, at dette vil ske yderst sjældent, hvorfor denne løsning er valgt.

Driftsøkonomi

Der er udgifter til vedligehold og indkøb af elektricitet. Disse udgør ca.:

Vedligehold 15 kr./MWh_{varme}

Indkøb af elektricitet

Spot 213 kr./MWh_{el}

Transport overordnet 83 kr./MWh_{el}

Transport lokal 106 kr./MWh_{el}

Elafgift 305 kr./MWh_{el}

Samlet 707 kr./MWh_{el}

Med en COP på 3,4 i gennemsnit bliver omkostninger til elektricitet til 208 kr./MWh_{varme}. Med vedligehold bliver varmeproduktionsprisen for de tre varmepumpeanlæg derfor omkring 223 kr./MWh.

Samlet økonomi

Den samlede økonomi varierer med gaspriser og antallet af driftstimer fra år til år. I det følgende er der regnet med disse forudsætninger:

- Gaspris inkl. transport = 1,95 kr./Nm³
- Samlet elpris = 707 kr./MWh_{el}
- Vedligehold = 15 kr./MWh_{varme}
- Årligt antal driftstimer = 6000 timer

Varmepumpe på søvand - 1300 kW		
Investering	11 000 000	kr.
Årligt antal driftstimer	6000	timer
Årlig varmeproduktion	7800	MWh
Driftsbespargelse pr. MWh	182	kr./MWh
Årlig driftsbespargelse	1 420 000	kr./år
Værdi af 1. års energibesparelse	350	kr./MWh
Samlet værdi af energibesparelse	1 927 000	kr.
Simpel tilbagebetalingstid	6,3	år
Intern rente over 15 år	15,4	%

8 Luft

Alle steder i Danmark har adgang til luft, som varmekilde til en varmepumpe. Dette er med til at gøre varmekilden interessant, hvis fjernvarmeselskabet ikke har andre varmekilder til rådighed. På trods af, at luft kan anvendes alle steder i landet er det væsentligt at anlægget ikke anlægges i nærhed af boligbebyggelse på grund af støjgener. Generne kan afskærmes, hvilket er vist i eksemplet hos Tønder Fjernvarmeselskab. Temperaturniveauerne afhænger af årstiden, og udeluften er koldest om vinteren, hvor der efterspørges mest varme. Om sommeren er luft en rigtig fornuftig varmekilde, som kan være med til at give en rigtig god COP-faktor. Hos Sig Varmeværk har værket valgt at investere i en luft/vand varmepumpe på trods af, at de har solvarme. Man kan læse mere om Sigs varmepumper i afsnit 8.2. En stor del af året vil luften blive afkølet ned omkring eller under frysepunktet. Dette vil give isdannelse på tørluftkølerne, hvilket gør det nødvendigt at afrime kølerne løbende. De to anlæg, som er beskrevet i dette kapitel har mulighed for at afrime uden at stoppe produktionen.

8.1 Samproduktion af køling og varme - Sapa Extrusion / Tønder Fjernvarmeselskab

Tønder Fjernvarmeselskab har investeret i et varmepumpeanlæg, som skal levere både køling og varme. Varmen aftager Tønder Fjernvarmeselskab selv og kølingen aftages af Sapa Extrusion. Tønder Fjernvarmeselskab havde før investeringen i varmepumpeanlægget kun fjernvarmeproduktion på naturgaskedler, hvilket gjorde det interessant at se efter andre løsninger.

Virksomhed / Kontaktperson	Sapa Extrusion / Claus Jensen
Fjernvarmeværk / Kontaktperson	Tønder Fjernvarmeselskab / Johnny Pedersen og Kristian Jacobsen
Leverandør	Solid Energy
Type	2 stk. ammoniak-anlæg, Sabro stempelkompressorer. Hver af de to anlæg har både en højtryks- og lavtryksvarmepumpe.
Installations år / årlige antal driftstimer	2017 / ca. 8000 fuldlasttimer/år
Varmekilde	Proceskøl og udeluft
Nominel varmeydelse	4,9 MW (17 °C udeluft) og 3,2 MW (-3 °C udeluft) ved gasmotordrift 4,4 MW (17 °C udeluft) og 2,4 MW (-3 °C udeluft) ved elmotordrift
Nominel COP	2,1 ved gasmotordrift 3,5 ved elmotordrift 2,84 (20 °C kølevand) ved gasmotordrift*
Fjernvarme opvarmes fra-til	Ca. 40-70 °C
Varmekilde afkøles fra-til	Udeluft: Fra udetemperatur til (udetemp. -5 °C) Proceskøl: Fra ca. 20 til 15 °C

* COP og varmeydelse ved drift hos SAPA er endnu usikker fordi der endnu ikke foreligger driftsdata.

Løsningen består af to parallelle mekaniske varmepumper, som enten er drevet af en naturgasmotor eller en elmotor alt afhængigt af de økonomiske forhold. De er begge to-trins-anlæg, som anvender ammoniak til kølemiddel. Varmepumperne kan anvende både udeluft og kølevand som varmekilde alt afhængigt af kølebehovet fra SAPA. Ved udeluft er den samlede varmeeffekt ved gasmotordrift ca. 4,3 MW (ved 7 °C), og 3,3 MW (ved 7 °C) ved elmotordrift.

8.1.1 Baggrund

Tønder Fjernvarmeselskab havde indtil varmepumpen blev sat i drift kun naturgaskedler til at producere fjernvarme. Naturgaskedler er en forholdsvis dyr produktionsenhed til grundlast og derfor søgte Tønder Fjernvarmeselskab et alternativ til den eksisterende produktion. En løsning med varmepumpe var interessant og med SAPA som modtager af kølingen fra varmepumpen, blev løsningen ikke mindre attraktiv. Tønder Fjernvarmeselskab ville gerne sikre investeringen og har derfor investeret i en varmepumpe, som både kan anvende udeluft og kølevand som varmekilde. Grunden til dette er til dels, at anlægget stadig kan anvendes, hvis SAPA pludselig ikke skulle være interesseret i at aftage køling, men også fordi varmepumpen til tider har behov for en større "varmekildecapacitet" end SAPA kan tilbyde. I projektforslaget fremsendt til Tønder Kommune er hele projektet kun beregnet med udeluft som varmekilde.

8.1.2 Systemet

Tønder Fjernvarmeselskab leverer varme til ca. 2700 forbrugere. Den årlige varmeproduktion udgør ca. 92 000 MWh, hvoraf varmepumpeanlægget forventes minimum at kunne producere 36 100 MWh, svarende til ca. 39 % af den samlede varmeleverance. De 36 100 MWh er beregnet ud fra, at udeluften anvendes som varmekilde hele året rundt. Hvis kølevand fra SAPA bruges vil der kunne produceres mere, og effektiviteten på varmepumpen vil stige.

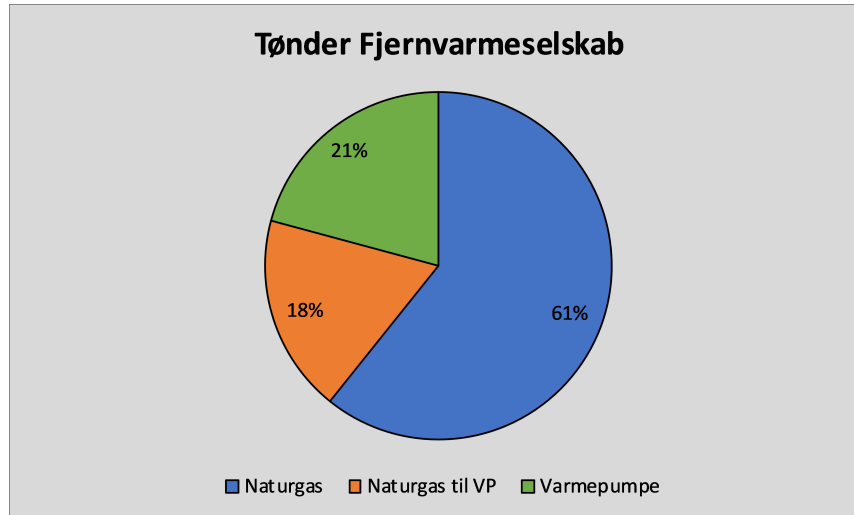
Tønder Fjernvarmeselskab har fire forskellige produktionscentraler i byen:

- Østergade har to naturgaskedler med en samlet kapacitet på 20,5 MW.
- Grønnevej har to naturgaskedler med en samlet kapacitet på 15,5 MW.
- Energivej har en naturgaskedel med en samlet kapacitet på 12,5 MW.
- Varmepumpeanlægget er placeret nær SAPA og har en kapacitet mellem 3,2-4,9 MW.

I tilknytning til varmepumpeanlægget er der etableret en akkumuleringstank til koldt vand, således at forsynings sikkerheden til SAPA sikres. I fjernvarmesystemet er der også en akkumuleringstank til varmt vand, hvor der er mulighed for at lagre en varmemængde på ca. 185 MWh. Varmepumpeanlægget har ikke mulighed for at føre varme på varmelageret og skal dermed producere fremløbstemperatur. Varmeproduktionsfordelingen i Tønder kan ses på figur 8.1.

Varmepumpeanlægget

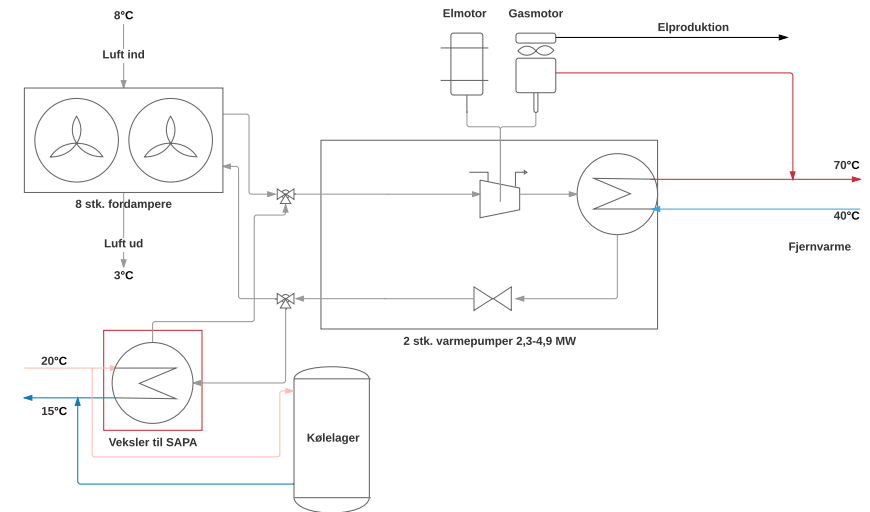
Varmepumperne er ammoniakvarmepumper, som typisk vil have en maksimal fremløbstemperatur på 70 °C. Der er opstillet to anlæg i Tønder, hvor hver har en lavtryks- og en højtryksvarmepumpe. Varmepumpeanlægget er installeret med elmotorer og gasmotorer. På sigt er det derfor muligt at drifte dem, så elmotoren kan drive anlægget ved lave elpriser, mens gasmotorerne kan drive anlægget ved høje elpriser. Dog skal det bemærkes, at der ikke er etableret eltilslutning til elmotoren. I øjeblikket er naturgasprisen så lav, at naturgasmotoren har en klar fordel. Driften med gasmotorer har også en anden fordel, da en gasmotor har behov for motorkøling. Denne motorkøling afgiver varme ved høj temperatur. Dette betyder, at varmepumpen ikke behøver løfte temperaturen så højt, som hvis driften var med elmotoren. Dette er fordelagtigt i Tønder, da varmepumpen er placeret langt væk fra andre produktionsanlæg og derfor skal løfte temperaturen til fremløbstemperaturen.



Figur 8.1 – Varmeproduktionsfordeling på Tønder Fjernvarmeselskab.

Gasmotoren driver samtidig med varmepumperne også en generator, som producerer ca. 200 kW_{el}.

Varmepumperne er hver koblet på fire fordampere ved drift med udeluft. Derudover er de koblet på SAPAs kølekreds, se figur 8.2. For at sikre forsyningsikkerheden til SAPA er der installeret et kølelager, som kan levere køling til SAPA ved kortere udfald. Kølemidlet ammoniak ledes enten i en vandkøler, hvor temperaturen afgives til SAPAs kølevand, eller til luftkølere, således at udeluften bliver kølet ned. Varmepumpen er altså med direkte fordampning i luftkølerne og i vandkøleren. På figur 8.2 kan det også ses, at der er mulighed for at drifte anlægget med enten en elmotor eller en gasmotor. Hvis driften foregår med gasmotoren, vil motor- og røggaskøling løfte temperaturen i fjernvarmevandet til fremløbstemperatur, hvilket gør at løftet på selve varmepumpen ikke behøves at være så højt, som hvis varmepumpen var drevet af elmotoren. På figur 8.3 og 8.4 kan ses billeder af kølerne og montering af støjskærme.



Figur 8.2 – Principskitse for varmepumpeanlæg ved Tønder Fjernvarmeselskab.

8.1.3 Driftserfaringer

Anlægget blev først sat i drift under udarbejdelsen af dette inspirationskatalog og driftserfaringer har derfor ikke været mulige at medtage.

8.1.4 Organisation/ejerskab

Varmepumperne ejes og drives af Tønder Fjernvarmeselskab. SAPA afholdt den investering, som har med køledelen at gøre og modtager kølingen gratis. I forbindelse med projektet har Tønder Fjernvarmeselskab søgt bindende svar fra SKAT, som afgjorde at projektet ikke er skal betale overskudsvarmeafgift.



Figur 8.3 – Billede af udeluftkølerne i Tønder.



Figur 8.4 – Billede af støjskærm ved udeluftkølerne.

8.1.5 Teknik og specifikationer

- Kold side
 - Varmepumperne køler direkte på kølevandet til SAPA.
 - Varmepumperne udnytter udeluft som varmekilde, hvis SAPA ikke har behov for køling eller der er behov for mere varme end hvad kølingen af kølevandet kan producere.
- Varm side
 - Fjernvarmevandet opvarmes til fremløbstemperatur og ledes ud på fjernvarmenettet.
- Varmepumpe
 - 2 stk. ammoniak-anlæg, Sabro stempelkompressor.
- El- og gasforsyning
 - Anlægget er tilsluttet gasnettet.
 - Der er ikke etableret eltilslutning til motorerne, da det ikke er økonomisk rentabelt med nugældende tariffer og afgifter.
- CO₂
 - Samlet set giver løsningen i Tønder Fjernvarmeselskab en betydelig CO₂-besparelse. Varmepumpeanlægget resulterer i en samlet CO₂-reduktion på ca. 4000 ton/år (beregnet kun med luft som varmekilde).

8.1.6 Budget og økonomi

Investering

Nøgletallene for investeringen for varmesiden ses herunder. Investeringen i kølesiden beløb sig i ca. 4,2 mio. kr.

Rådgivning	0,6 mio. kr.
Ny bygning	4,3 mio. kr.
Varmepumpe inkl. luftkølere	30,0 mio. kr.
Tilslutning og SRO	0,6 mio. kr.
Gastilslutning	0,2 mio. kr.
Andre omkostninger	2,0 mio. kr.
<hr/> Total	<hr/> 37,7 mio. kr.

Driftsøkonomi

Økonomien ved varmepumpeanlægget er beregnet ud fra, at anlægget er drevet af naturgasmotorerne, som det ville foregå i praksis. Det giver også det bedste økonomiske resultat i forhold til de givne brændsels- og transportomkostninger samt afgifter. Den gennemsnitlige COP ved ren udeluft vil være 2,19.

Nettoproduktionsomkostningen for varmepumpeanlægget udgøres af:

Vedligehold	20 kr./MWh _{varme}
Indkøb af naturgas	
Brændselspris	141 kr./MWh _{brændsel} (155 øre/Nm ³)
Transport lokal	30 kr./MWh _{brændsel} (33 øre/Nm ³)
Transport overordnet	6 kr./MWh _{brændsel} (7 øre/Nm ³)
Energiafgift ¹	199 kr./MWh _{brændsel} (218,8 øre/Nm ³)
CO ₂	35 kr./MWh _{brændsel} (38,9 øre/Nm ³)
NO _x	3 kr./MWh _{brændsel} (2,8 øre/Nm ³)
Methan	6 kr./MWh _{brændsel} (6,7 øre/Nm ³)
<hr/> I alt	<hr/> 420 kr./MWh _{brændsel} (462,2 øre/Nm ³)

Med en COP på 2,1 bliver omkostningerne til gas ca. 200 kr./MWh_{varme}. Indregnes vedligehold bliver varmeproduktionsprisen for varmepumpen derfor omkring 220 kr./MWh_{varme}. Varmepumpen fortrænger hovedsageligt produktion på værket naturgaskedel, hvor varmen produceres til 405 kr./MWh. Driftsbesparselsen er således på 185 kr./MWh. COP faktoren for drift på kølevand er 2,84 og besparelsen bliver således 237 kr./MWh.

¹I beregninger anvendes lav energiafgift, som kræver samproduktion mellem kraft og varme. Se bindende svar fra SKAT journalnummer 16-1444088. Projektgruppen anbefaler at søge bindende svar hos SKAT ved hvert enkelt projekt, da SKAT kun tager stilling til de konkrete detaljer ved de enkelte projekter.

Samlet økonomi

Den overordnede økonomi for varmepumpeanlægget er opgjort herunder. Der gøres opmærksom på at kølebehovet fra SAPA er meget usikkert, da SAPA ikke har haft måledata over deres nuværende kølebehov. I beregningerne herunder er opstillet et meget konservativt kølebehov til SAPA.

Økonomien er beregnet med følgende forudsætninger.

- Salgspris af køling = 0 kr./MWh
- COP udeluft = 2,1
- COP proceskøl = 2,84

Tønder Fjernvarmeselskab		
Investering	37 700 000	kr.
Varmekilde: Udeluft		
Årlig varmeproduktion	21 100	MWh
Besparelse pr. MWh	185	kr./MWh
Årlig besparelse	3 903 500	kr.
Varmekilde: Proceskøl		
Årlig varmeproduktion	15 000	MWh
Besparelse pr. MWh	237	kr./MWh
Årlig besparelse	3 555 000	kr.
Samlet besparelse	7 458 500	
Værdi af 1. års energibesparelse	350	kr./MWh
Samlet værdi af energibesparelse	8 000 000	kr.
Simpel tilbagebetalingstid	4,0	år
Intern rente over 15 år	24,1	%

8.2 Luft, el-drevet varmepumpe - Sig Varmeværk

Sig Varmeværk er et decentralt kraftvarmeværk, som har naturgaskedler og en naturgaskraftvarmeanhed. I 2013 investerede Sig Varmeværk i et 3500 m² solvarmeanlæg. I oktober 2017 blev en eldrevet luft/vand varmepumpe idriftssat. Varmepumpen har en kapacitet på 840 kW_{varme}.

8.2.1 Baggrund

Sig Varmeværk har igennem en årrække været belastet af høje varmepriser, hvilket hænger sammen med brændselsbindingen til naturgas. I 2013 blev et solvarmeanlæg idriftssat, hvilket reducerede varmeprisen. Efterfølgende har der været overvejelser omkring nye produktionsanlæg, som kunne nedbringe varmeprisen yderligere. Sig Varmeværk har overvejet at investere i en biomassekedel, da værket pga. de høje varmepriser kom på en liste med 85 fjernvarmeverker, som fik dispensation fra projektbekendtgørelsen og dermed mulighed for at investere i en biomassekedel. Sig Varmeværk ønskede imidlertid at undersøge mulighederne for at investere i en varmepumpe nærmere.

Fjernvarmeverk / Kontaktperson	Sig Varmeværk / John Elmertoft (Din Forsyning)
Leverandør	Johnson Controls (Tjæreborg Industri)
Type	HPC 106S (Sabroe)
Installations år / driftstimer	2017 / ca. 4800 timer/år
Varmekilde	Luft
Nominel varmeydelse	0,84 MW
Nominel COP	3,58
Fjernvarme opvarmes fra-til (vin-ter)	34-64 °C (32-55 °C)
Varmekilde afkøles fra-til	Udetemperatur til 3 °C under

Sig Varmeværk havde i 2015 besøg af Energistyrelsens Rejsehold og fik efterfølgende et investeringstilskud fra Energistyrelsen. Der var dog ikke positiv selskabsøkonomi i projektet, da investeringen var højere end budgetteret. Dette ændrede sig med afviklingen af PSO'en, og i 2017 lavede Sig en aftale om køb af en varmepumpe med Tjæreborg Industri. Sig har fået energibesparelser for opførelsen af varmepumpen, hvilket også har forbedret selskabsøkonomien i projektet.

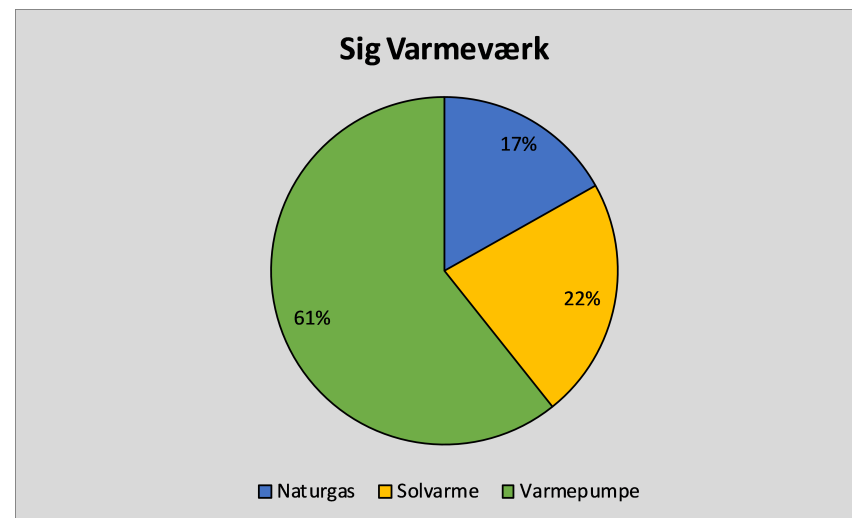
8.2.2 Systemet

Sig Varmeværk leverer varme til ca. 300 forbrugere, og den årlige varmeproduktion udgør ca. 6500 MWh, som indtil oktober 2017 er blevet produceret på naturgas og sol. Varmepumpen blev sat i drift i oktober 2017 og efterfølgende forventes det, at varmepumpen vil levere ca. 60 % af varmeproduktionen. Sig Varmeværk er opdelt geografisk i en kedelcentral med naturgas og et solvarmeanlæg, hvor varmepumpeanlægget også er installeret. Varmeproduktionsfordelingen efter varmepumpen er sat i drift kan ses på figur 8.5.

Varmepumperne

Anlægget er et 2-trins ammoniakvarmepumpeanlæg, hvor 2 stk. varmepumper er koblet i serie. Denne type har typisk har en maksimal fremløbstemperatur på ca. 65 °C. Varmepumpen har kølemidlet ammoniak i en lukket kreds. Kølemidlet veksles til en glykolholdig væske, som opvarmes og nedkøles i sin egen kreds mellem varmepumpen og udeluftskølerne.

Det er i forbindelse med projektet lykkedes at sænke fremløbstemperaturen - i perioder helt ned til 63 °C. Dette forøger varmepumpens COP markant. Varmepumpen er som nævnt opstillet på samme areal som solfangerne. Solvarmeanlæg og varmepumpe er forbundet via en transmissionsledning til Sig Varmeværks naturgasbaserede produktionsenheder. I vinterperioden, hvor der er produktion på værkets gaskedel eller gasmotorer, kan varmepumpens fremløbstemperatur sænkes til ca. 50-55 °C. Fjernvarmevandet fra varmepumpen bliver dermed opvarmet til

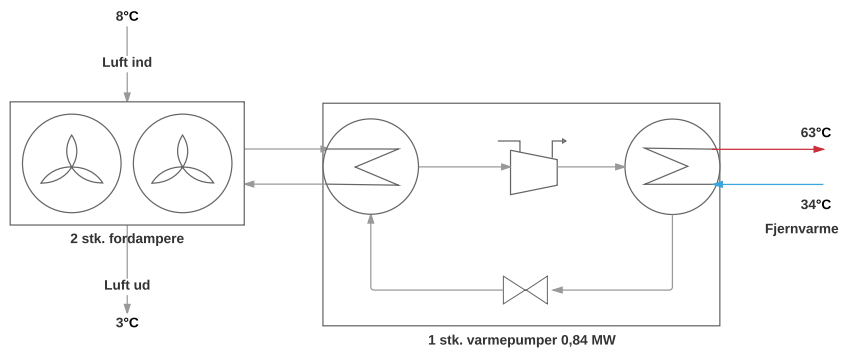


Figur 8.5 – Varmeproduktionsfordelingen på Sig Varmeværk.

fremløbstemperatur af naturgasenhederne. Transmissionsledningen er dimensioneret således, at store mængder varme produceret på solvarme kan transporteres om sommeren. Dette gør, at der er rigeligt plads i rørene til at flytte produktionen fra varmepumpen til varmeværk. Også om vinteren, hvor temperaturen ikke løftes så meget. På figur 8.6 ses en principskitse over anlægget i Sig.

8.2.3 Driftserfaringer

Da varmepumperne først er sat i drift i oktober 2017 er driftserfaringerne yderst begrænsede. COP'en er lidt lavere end forventet, men fremløbstemperaturen er højere. Der arbejdes pt. på at øge COP'en. I de første tre uger har der ikke været driftsproblemer og varmepumpen har været oppe og producere 1,1 MW med en COP på 3,8 ved en fremløbstemperatur på 63 °C og en udetemperatur på 12-15 °C.



Figur 8.6 – Principskitse af el-drevet varmepumpe koblet til luftkøler.



Figur 8.7 – Billede af luftkølerne i Sig.

8.2.4 Organisation/ejerskab

Varmepumperne ejes og drives af Sig Varmeværk.

8.2.5 Teknik og specifikationer

- Kold side
 - Varmepumperne udnytter udeluft som varmekilde.
 - Kølemidlet ammoniak i varmepumpen veksles til en glykoldholdig væske, som kører i en lukket kreds mellem varmepumpe og udeluftkøler.
- Varm side
 - Fjernvarmevandet ledes direkte igennem varmepumpernes indbyggede varmevekslere.
- Varmepumpe
 - 40 bar ammoniak-varmepumper med stempel-kompressorer, maks. afgangstemperatur ca. 65 °C.
- CO₂
 - I forhold til naturgas reduceres CO₂-udslippet med ca. 60 % for den varme, som varmepumperne producerer. Det estimeres at den årlige reduktion udgør ca. 700 ton CO₂.

8.2.6 Budget og økonomi

Investering

Nøgletallene for investeringen ses herunder:

Ny bygning og anlægsarbejde	0,6 mio. kr.
Varmepumpe/udeluftkølere	3,2 mio. kr.
Rør- og smedearbejde	1,1 mio. kr.
El installationer	0,7 mio. kr.
El tilslutning (netselskab)	0,4 mio. kr.
SRO mm.	0,2 mio. kr.
Total	6,2 mio. kr.

Driftsøkonomi

Varmepumpen har en beregnet års-COP på 3,58 og varmeproduktionsomkostningen bliver derfor ganske fornuftig i forhold naturgasenhederne. Udgifterne til vedligehold og indkøb af elektricitet udgør ca.:

Vedligehold 15 kr./MWh_{varme}

Indkøb af elektricitet

Spot	223 kr./MWh _{el}
Transport overordnet	83 kr./MWh _{el}
Transport lokal	92 kr./MWh _{el}
Elafgift	305 kr./MWh _{el}
Samlet	703 kr./MWh_{el}

Med en COP på 3,58 bliver omkostningerne til elektricitet til ca. 196 kr./MWh_{varme}. Medregnes vedligehold bliver varmeproduktionsprisen for varmepumpen omkring 211 kr./MWh. Varmepumpen fortrænger hovedsageligt produktion på værkets naturgaskedel, hvor

varmen produceres til 405 kr./MWh. Driftsbesparselsen er således på 194 kr./MWh_{varme}.

Samlet økonomi

Den samlede økonomi varierer med gaspriser og antallet af årlige driftstimer. I det følgende er der regnet med disse forudsætninger:

- Produktionspris på gaskedler = 405 kr./MWh
- Samlet el-pris = 703 kr./MWh_{el}
- Vedligehold = 15 kr./MWh_{varme}
- Årligt antal driftstimer med gas som marginal = 4800 timer

Varmepumpe på luft - 840 kW		
Investering	6 200 000	kr.
Årligt antal driftstimer	4800	timer
Årlig varmeproduktion	3946	MWh
Driftsbesparselse pr. MWh	194	kr./MWh
Driftsbesparselse	765 524	kr./år
Tilskud fra Energistyrelsen	1 233 000	kr.
Værdi af energibesparelse	1 000 000	kr.
Investering efter tilskud og energibesparelse	3 967 000	kr.
Samlet årlig driftsbesparselse	765 524	kr./år
Simpel tilbagebetalingstid	5,2	år
Intern rente over 15 år	17,6	%

9 Andre varmekilder

Formålet med dette kapitel er kort at omtale øvrige varmekilder, som ofte nævnes i forbindelse med større varmepumpeanlæg, men som endnu ikke er så udbredte, som typisk vil være mindre egnede eller have et begrænset potentiale i forbindelse med fjernvarmeproduktion.

9.1 Sæsonvarmelager med solvarme

Der er de seneste år etableret syv store solvarmeanlæg med sæsonvarmelagre i henholdsvis Brædstrup, Marstal, Dronninglund, Gram, Vojens, Toftlund og Løgumkloster.

9.1.1 Solvarme/lager - Gram Fjernvarme

Gram Fjernvarme besluttede at medtage en varmepumpe på 900 kW varme i den igangværende udvidelse af solvarmeanlægget.

Udvidelsen består af:

1. 122 000 m³ damvarmelager.
2. 34 000 m² solvarme, således der i alt er installeret 44 000 m².
3. 10 MW elkedel.
4. 900 kW varmepumpe.

Varmekilden til varmepumpen er sæsonvarmelageret og den leverer en fremløbstemperatur på 60-70 °C.

Når det er en kobling af denne art, er det af overordentlig stor betydning hvordan varmepumpen påvirker det samlede system, og dermed hvilken system-COP, der opnås. En ting er varmepumpens egen COP, der

både er til at beregne og efterfølgende til at kontrollere. En anden ting er system-COP, som er vanskelig at beregne. En god metode er at foretage simulering over et driftsår og eftervise den, for eksempel over to nogenlunde ens driftsår. Ét med og ét uden varmepumpe.

Problemet er, at når varmepumpeanlægget køler en MWh på damvarmelageret, øges merydelsen af solvarmeanlægget i mange tilfælde kun med 0,2-0,4 MWh. Dermed er det altså kun imellem 20-40 % af varmepumpens arbejde, som direkte omsættes i øget varmeproduktion, hvilket betyder at driftsøkonomien ofte kan være væsentlig anderledes end varmepumpens COP indikerer - også selvom en reduktion i varmetabet fra lageret indregnes.

I Gram er varmepumpen i stand til at afkøle størstedelen af vandet i lageret til 15 °C, hvilket kan ske henover vinteren ved ca. 2000 driftstimer. På varmeafgangssiden er varmepumpen teknisk i stand til at levere 70 °C, men den kan også levere varme ved en lavere temperatur.

- Med 15 °C på kold side og 70 °C på varm side kan opnås en COP på 4,5.
- Reduceres temperaturkravet til 60 °C, øges COP til 5,0.

Varmepumpen har en køleeffekt på ca. 700 kW.

Drift

Da varmepumpen har en begrænset effekt i forhold til behovet på nettet, vil det året rundt være muligt og oplagt at blande en lav temperatur fra varmepumpen med en højere temperatur fra kedel og motoranlæg.

I det efterfølgende er forudsat en temperatur på 60 °C på den varme side og derved en varmepumpe-COP på 5,0. Der er gennemført en simulering af et normalt års drift.

- Denne viser, at varmepumpen vil være i drift ca. 2000 timer. Varmepumpen skal derfor have tilført ca. 1400 MWh_{varme} fra lageret og have tilført ca. 350 MWh_{el}. Den afgivne mængde varme er således 1750 MWh.
- Imidlertid er merydelsen for solvarme og lager ikke den samme mængde, som varmepumpen optager (1400 MWh), men er beregnet til ca. 1200 MWh.
- Der er stadig behov for 350 MWh_{el} til varmepumpen, hvilket giver en system-COP på 4,4.
- Grunden til at system-COP'en er forholdsvis høj i Gram hænger sammen med at lageret er lidt for lille. En forøgelse af lagerstørrelsen kan derfor give samme effekt som varmepumpen, hvor et større lager oftest vil være den mest rentable løsning. Derfor er det ikke altid at økonomien bliver positiv, som det er illustreret nedenfor. Se en mere detaljeret forklaring i Drejebogens Bilag C.

Etablering

Merpris for varmepumpeinstallationen er omkring 3,5 mio. kr. og omfatter varmepumpen, en andel af el- og rørinstallationen, samt en marginalt større bygning.

Samlet økonomi

Økonomien ved varmepumpe-løsningen kan summeres til:

Forrentning og afskrivning	250 000 kr.
El til pumper, service mv.	31 800 kr.
350 MWh _{el} til kompressor	245 000 kr.
<hr/>	
Total pr. år	526 800 kr.

Den afgivne mængde varme er netto 1200 MWh (merydelse solvarme mv.) plus 350 MWh_{el}, totalt 1550 MWh.

Omkostninger til denne mængde varme beløber sig således til:

- 340 kr./MWh_{varme} leveret

Alternativet er varme fra gaskedlen, der koster omkring 406 kr./MWh, hvilket betyder at varme fra varmepumpen, med en system-COP på de 4,4 er rentabel.

9.1.2 Solvarme/lager - Brædstrup Fjernvarme

Brædstrup Fjernvarme har i 2012, som en del af projektet Borehuller i Brædstrup, etableret en varmepumpe i forbindelse med et pilot-borehullerlager, jf. afsnit 2.7.7 i drejebogen. Varmepumpen, som er leveret af Johnson Controls, er et pilotanlæg baseret på en højtryksskruekompressor der anvender ammoniak som kølemiddel. Varmepumpen har en varme-effekt på 1,2 MW. Projektet i Brædstrup er støttet af Forskel og EU DP.

9.1.3 Solvarme/lager - Marstal Fjernvarme

Marstal Fjernvarme har i 2012, som en del af SUNSTORE 4-projektet, etableret en varmepumpe i forbindelse med et damvarmelager på 75 000 m³, jf. afsnit 2.7.7 i drejebogen. Varmepumpen, som er leveret af Advansor, er en CO₂-varmepumpe på 1,5 MW, som er en videreudvikling af varmepumpen i Frederikshavn, jf. kapitel 5. SUNSTORE 4-projektet er støttet af EU's 7. rammeprogram.

9.1.4 Solvarme/lager - Dronninglund Fjernvarme

Dronninglund Fjernvarme har i 2013, som en del af SUNSTORE 3-projektet, etableret en absorptions-varmepumpe i forbindelse med et damvarmelager på 60 000 m³, jf. afsnit 2.7.7 i drejebogen. Energisystemet i Dronninglund var oprindeligt designet med en eldrevet varmepumpe på 3,0 MW, men selskabsøkonomien i den eldrevne varmepumpe hang på daværende tidspunkt ikke sammen, blandt andet på grund af de daværende høje elafgifter. Den eldrevne varmepumpe blev derfor erstattet med en absorptionsvarmepumpe med samme køle-effekt (2,0 MW). Absorptionsvarmepumpen drives af hedtvand fra en biooliekedel. SUNSTORE 3-projektet er støttet af EUDP.

9.1.5 Solvarme/lager - Løgumkloster Fjernvarme

Løgumkloster Fjernvarme har etableret et solvarmeanlæg på 50 000 m², et damvarmelager på 150 000 m³, en absorptionsvarmepumpe på ca. 5 MW og en hybridvarmepumpe på 1,3 MW, jf. bilag B i drejebogen. Absorptionsvarmepumpen drives af hedtvand fra en biomassekedel. Projekterne "Aluminiumssolfangere til fjernvarme" og "Hybridvarmepumpe til fjernvarme" er begge støttet af EUDP.

9.2 Drikkevand - Morsø Forsyning

Morsø Forsyning Vand har et vandtårn, hvor drikkevandet om sommeren bliver varmere end ønsket. Morsø Forsyning Vand har derfor i 2014 investeret i en varmepumpe, som kan køle drikkevandet ned til den ønskede temperatur, jf. drejebogens afsnit 2.7.4. Varmepumpen, som er leveret af Cronborg, er på 150 kW, og forvarmer returvand til 60 °C inden det efteropvarmes i en naturgaskedel. Varmens afsættes til Dueholm Fjernvarme, som ejes af Morsø Forsyning. Der er etableret en sikkerhedskreds mellem varmepumpens fordamper og drikkevandet, således risikoen for at forurene drikkevandet med kølemiddel eller kompressorolie minimeres mest muligt.

9.3 Indirekte varmekilder - Lading-Fajstrup Varmeforsyningselskab

Ved Lading-Fajstrup varmeværk er der installeret to R410A-varmepumpe-enheder med en samlet varmeydelse på 128 kW. Varmepumperne køler returvandet inden det løber ind i LT-røggasveksleren, hvorved dennes effekt øges. Varmepumperne forvarmer en delstrøm af fjernvarmevandet til 45-50 °C, som herefter opblandes med vand fra motoranlæggene. Varmepumpernes COP er ca. 4,2, men fordi køleeffekten ikke fører til øget effekt på LT-veksleren i forholdet 1:1, bliver den effektive COP af varmepumperne ca. 2,6. Varmepumperne er koblet på lagertanken, så returvandet kan køles og lagres i bunden af tanken uafhængigt af drift med motoranlæggene. Lading-Fajstrup Varmeforsyningselskab er nu fusioneret med Hammel Varmeforsyning, og der er derfor stort set ikke drift på anlæggene.

Der kan læses mere om princippet i drejebogens afsnit 2.7.5 og bilag C. Selve løsningen er beskrevet i et projekt fra Dansk Fjernvarmes (Dansk Fjernvarmes F&U-Konto, 2013).

9.4 Havvand

Havvand, som de fleste større byer ligger i nærheden af, er i praksis en uudtømmelig varmekilde. Havvand har dog den udfordring, at temperaturen om vinteren ofte er meget tæt på frysepunktet. Derfor må man enten slukke varmepumpen, når der er mest brug for varmen, eller anvende vandets frysevarme (energien mellem tilstandsændringen fra vand til is ved frysepunktet) vha. en vanddampkompressor.

9.4.1 Aarhus Ø

AffaldVarme Aarhus ønsker at forsyne den nye bydel Aarhus Ø med et varmepumpeanlæg, som supplement til byens kraftvarmeproduktion på biomasse og affaldsforbrænding. Varmepumpeanlægget er endnu

ikke taget i drift, men det forventes, at det første 2 MW forsøgsanlæg idriftsættes i løbet af 2018.

I forbindelse med udbygningen af Aarhus Ø, er man efterhånden nået til en begrænsning i de eksisterende transmissionsledninger. Disse skal under alle omstændigheder opgraderes for at varetage det stigende varmebehov i bydelen og udvidelsen kombineres med en havvandsbase-ret forsøgsvarmepumpe på 2 MW. Hermed udnyttes den havnære placering og anlægget forberedes for en udvidelse til 14 MW, såfremt forsøgsresultaterne er positive.

Havvandsvarmepumpen skal udnytte en ny type vanddampkompressor, som anvender havvand som kølemiddel under vakuum. Dette eliminerer tabet ved varmeveksling og muliggør stabil drift, når vandtemperaturen nærmer sig frysepunktet. Her har det ikke være muligt at udnytte den sensible energi ved afkøling af vandet, men vanddampkompressoren kan i stedet udnytte den latente energi ved havvandets faseskift fra væske til fast stof (is). På grund af havvandets saltindhold, dannes der relativt små ispartikler (grød-is) ved faseskiftet, som kan pumpes ud sammen med havvand på væskeform.

Anlægget opbygges som et kaskadeanlæg med vanddamp som kølemiddel i det nederste trin og ammoniak i det øverste. Vanddampkompressoren er en nyudviklet aksiel type, som kan skabe en trykforskel, der svarer til et temperaturløft på ca. 20 °C. Ved havvandstemperaturer tæt på frysepunktet, kondenserer vanddampen fra havvandet altså ved ca. 20 °C. Energien opfanges i ammoniakvarmepumpen og løftes videre til fremløbstemperatur. Den nye type vanddampkompressor har en kølekapacitet på ca. 750 kW ved en havvandstemperatur på 0 °C og i kombination med en ammoniakvarmepumpe, bliver den samlede ydelse 1 MW. For at opnå en varmekapacitet på 2 MW anvendes derfor to parallelt koblede enheder, hver bestående af en vanddamp kompressor og en ammoniak varmepumpe. Den endelige udformning af varmevekslingen til ammoniakvarmepumpen er endnu ikke fastlagt, men det forventes, at anlægget bliver med direkte varmeveksling imellem vand-

damp og ammoniak. Ammoniakvarmepumperne er traditionelle typer med en enkelt stempelkompressor.

9.4.2 Hofor i København

Hofor ser et stort potentiale for varmepumper i fremtidens fjernvarmeproduktion og har i samarbejde med CTR og VEKS igangsat et projekt, hvor to pilot varmepumper testes på forskellige varmekilder. Det ene anlæg skal testes på geotermianlægget ved Amagerværket, mens det andet skal testes med både havvand og rensset spildevand ved Sjællandsbroens spildevandspumpestation. Projektet er støttet af EUDP-ordningen og havvandsvarmepumpen forventes at blive idriftsat i 2018.

Anlægget ved Sjællandsbroen er designet som et pilotanlæg og dimensioneret efter en effekt på knap 5,2 MW med både hav- og spildevand som varmekilder. Det forventes, at et efterfølgende fuldskalaanlæg vil bestykses med skruekompressorer for at kunne nå den krævede effekt med relativt få enheder. For at opnå de mest retvisende driftserfaringer, bestykses pilotanlægget derfor også med skruekompressor. Anlægget er opbygget af to serielle 2-trinsanlæg for at få bedst mulig COP i et bredt temperaturområde. Der bruges ammoniak som kølemiddel og almindelige pladevarmevekslere, og der kan derfor opstå problemer med dannelse af is, når havvandstemperaturen nærmer sig frysepunktet.

Udover at afprøve og demonstrere anlæggets virkningsgrad og driftssikkerhed, vil projektgruppen også analysere eventuelle problemstillinger med tilsmudsning af vekslere ved udnyttelse af spildevand, samt køling af havvand tæt på frysepunktet.

9.4.3 Udenlandske anlæg

Drammen, Norge

I Drammen er der etableret en ammoniak-baseret varmepumpe med en varmeeffekt på i alt 14 MW fordelt på tre 2-trins-varmepumper. Varmepumpeanlægget anvender havvand fra Drammensfjorden som varmekilde. Anlægget er ejet af Drammen Fjernvarme.

Fornebu Nord Energisentral, Norge

- Varmekilde: Havvand.
- 2-trins R134a-centrifugal-kompressor-anlæg for køling og opvarmning.
- Varmepumpe varmeeffekt: 13,7 MW.
- Indirekte køling via havvandsvarmeveksler.
- Anlægs ejer: Fortum Fjernvarme.
- Kilde: <http://www.barum-fjernvarme.no/>

Värtan Ropsten - Havvandsbaseret varmepumpeinstallation, Stockholm

- Varmekilde: Havvand, overfladevand i sommerperiode, og indtag 15 meter underhavsoverflade i vinterperiode (temperatur 3 °C) .
- Varmepumpe varmeeffekt: 180 MW (6 stk. varmepumper).
- Køleydelse: 110 MW.
- Driftspunkt: Kondenseringstemperatur på 82 °C og fordampningstemperatur på -3 °C.
- Fabrikat: Friotherm Unitop 50.
- Etablering: Fra starten af 1980'erne med R22 kølemiddel. Ombygget til R134a i 2003.

Referencer

Lovtekster

BEK nr. 1716 (2015). *Bekendtgørelse om varmeindvindingsanlæg og grundvandskøleanlæg*, BEK nr. 1716 af 15/12/2015. URL: <https://www.retsinformation.dk/Forms/R0710.aspx?id=176576>.

Varmeforsyningsloven (2017). *Bekendtgørelse af lov om varmforsyning*, LBK nr. 523 af 22/05/2017. URL: <https://www.retsinformation.dk/Forms/R0710.aspx?id=190081>.

Andre kilder

Dansk Fjernvarmes F&U-Konto (2013). *Industrivarmepumper på kraftvarmeværker*, Dansk Fjernvarmes F&U-Konto, Projekt nr. 2012-06, Lading-Fajstrup Varmeforsyningssselskab og Aaen, 2013. URL: <http://www.danskfjernvarme.dk/viden-om/f-u-konto-subsection/rapporter/2012-06-industrivarmepumper-paa-kraftvarmevaerker>.

PlanEnergi, m.fl. (2011). *Region Midtjyllands udredning Naturgassens afløser - udvikling af koncept for solvarme, varmepumpe og varmelagring til fjernvarmforsyning*, Brædstrup Totalenergianlæg, PlanEnergi, Teknologisk Institut m.fl., 2011. URL: https://issuu.com/planenergi.dk/docs/naturgassens_afl__ser__slutrapport_.