

ELFORSK PSO-F&U 2007

Grundvandsvarmepumper og –køling med
grundvandsmagasiner som sæsonlager

Enopsol ApS
DONG Energy A/S
Hundsbæk & Henriksen A/S
Cenergia ApS
SBI

April 2008

Indholdsfortegnelse

1. INDLEDNING	2
2. FORMÅL	2
3. ATES FUNKTIONSPRINCIP	3
4. ATES ENERGIBESPARELSE	9
5. Grundvandskølig og ATES. Teknologistade i Danmark.	21
6. Grundvandskøling og ATES. Teknologistade udland.	25
7. Internationalt samarbejde under IEA.	25
8. Varmepumper og absorptionsanlæg. Teknologistade	27
8.1 Varmepumpens virkemåde	27
8.2 Valg af kølemiddel	28
8.3 Kredsprocessen for et CO ₂ varmepumpeanlæg	31
8.4 Kapacitetsregulering	34
8.5 Anlægsudformning og økonomi	35
8.6 Varmedrevne anlæg	36
9. Ventilationsanlæg. Teknologistade	38
10. Solvarme. Teknologistade.	38
11. Bygningsreglement. Status og fremtid	38
12. Kortlægning af potentiale for ATES i DK.	43
13. MYNDIGHEDSFORHOLD	44
14. Barrierer og virkemidler for teknologiens udbredelse.	44
15. Lovgivning.	46
16. Beregningsværktøj for udlægning af ATES	46
17. Gennemregning af 4 anlægseksempler	47
18. Checkliste for etablering af ATES	47
19. FREMTID	50
20. REFERENCER	50

Bilag 1.

Bilag 2.

Bilag 3.

1. INDLEDNING

Grundvandet har den heldige egenskab, at temperaturen er konstant året rundt – i Danmark ca. 9°C, hvilket er en ideel temperatur for mange køleformål, herunder bygningskøling. De strukturer, hvori grundvandet befinder sig (sand, grus og kalk) er samtidigt effektive til at opbevare kulde og varme over lange tidsrum.

Det er ved brug af sæsonlagring af lavtemperatur varme og kulde i terrænnære, grundvandsførende jordlag muligt at opnå rentable energibesparelser på op til 90% til køling og opvarmning af fx hoteller, lufthavne, indkøbscentre, kontorbygninger og andre større bygninger.

De store energibesparelser betyder samtidigt store reduktioner i CO₂-udledningen.

Teknologien er ny i Danmark, men velkendt i bl.a. Holland og Sverige.

Den internationale betegnelse er ATES, der står for Aquifer Thermal Energy Storage.

Projektet, der har opnået støtte fra ELFORSK PSO-F&U 2007, er initieret af firmaerne DONG Energy og Enopsol med Enopsol som projektleder. Desuden har Hundsbæk & Henriksen, Cenergia og Statens Byggeforskningsinstitut (SBI) deltaget i projektet.

4 virksomheder: Hotel Opus i Horsens, Novo Nordisk i Hillerød, Sydvestjysk Sygehus i Esbjerg og Fields på Amager har bidraget med anlægsdata til brug i de under projektet udviklede beregningsværktøjer .

2. FORMÅL

Formålet med projektet har været at udvikle løsninger og gennemføre en vifte af aktiviteter, der kan fremme udbredelsen af anlæg til opvarmning og køling med grundvand. Det vil kunne sikre store el- og varmebesparelser i Danmark, hvor teknologien, i modsætning til udlandet, generalt er overset.

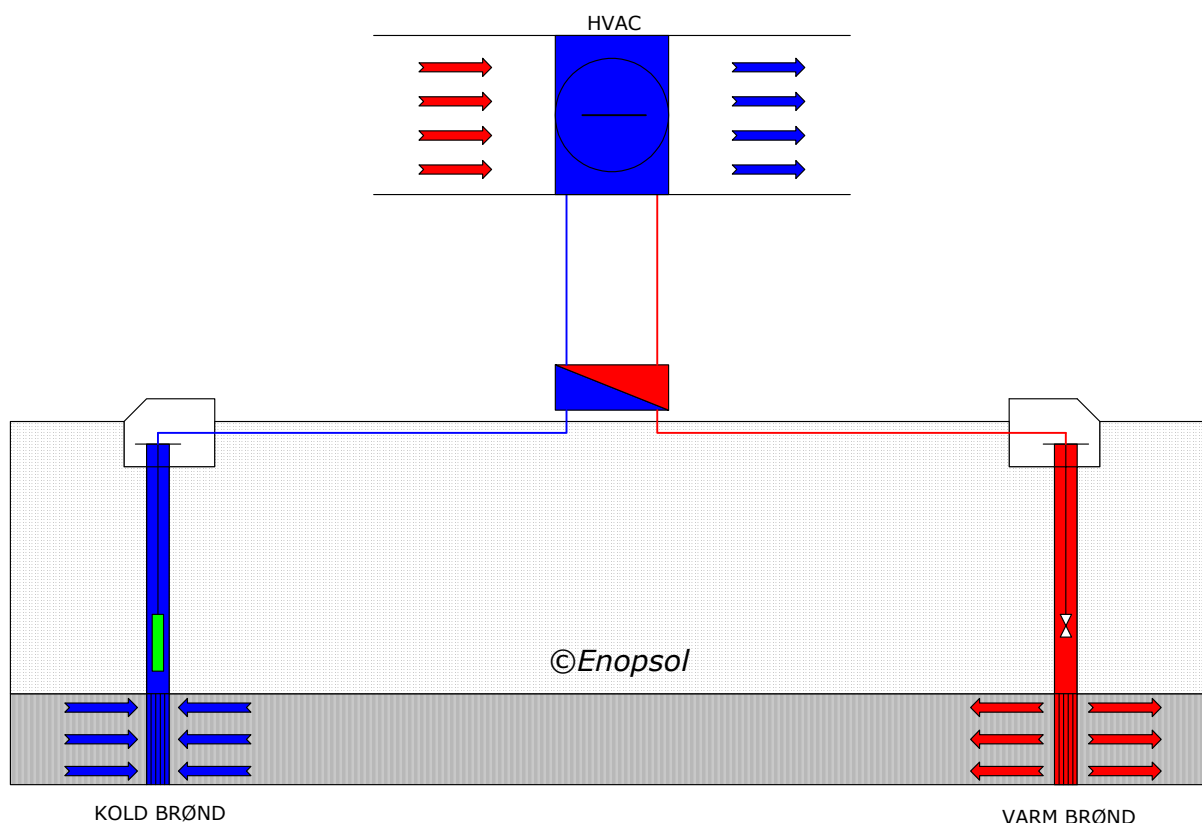
Målet er søgt opnået gennem en kombination af vidensopsamling i udlandet, udvikling af værktøjer til etablering af

”state of the art” anlæg med grundvandskøling og grundvandsbaserede varmepumper med sæsonlagring under danske forhold, samt forankring og formidling af viden om teknologien.

3. ATES FUNKTIONSPRINCIP

I sin mest enkle udformning består et ATES-system af en boring til indvinding af grundvand og en boring til returledning af grundvand en såkaldt kold og varm boring. Grundvandet pumpes i sommertiden fra den kolde boring i et lukket rørsystem gennem en eller flere varmevekslere, hvor grundvandet ved varmeveksling afkøler ventilationsluften i en bygning eller proceskølevand i en produktionsvirksomhed. Ved varmevekslingen opvarmes grundvandet, hvorefter det tilbageføres til grundvandsmagasinet gennem den varme boring. Der sker således ikke noget forbrug af grundvand, kun en opvarmning. I vintertiden vendes pumperetningen, og der pumpes fra den varme boring og returledes i den kolde boring efter udnyttelse af varmen lagret i sommertiden til bygningsopvarmning. Der sker således ikke noget forbrug af grundvand, kun en opvarmning eller afkøling. Systemet udlægges normalt, så der ikke sker nogen netto varmetilførsel til grundvandsmagasinet. ATES-systemer er derfor normalt både i grundvandsmæssig og termisk balance

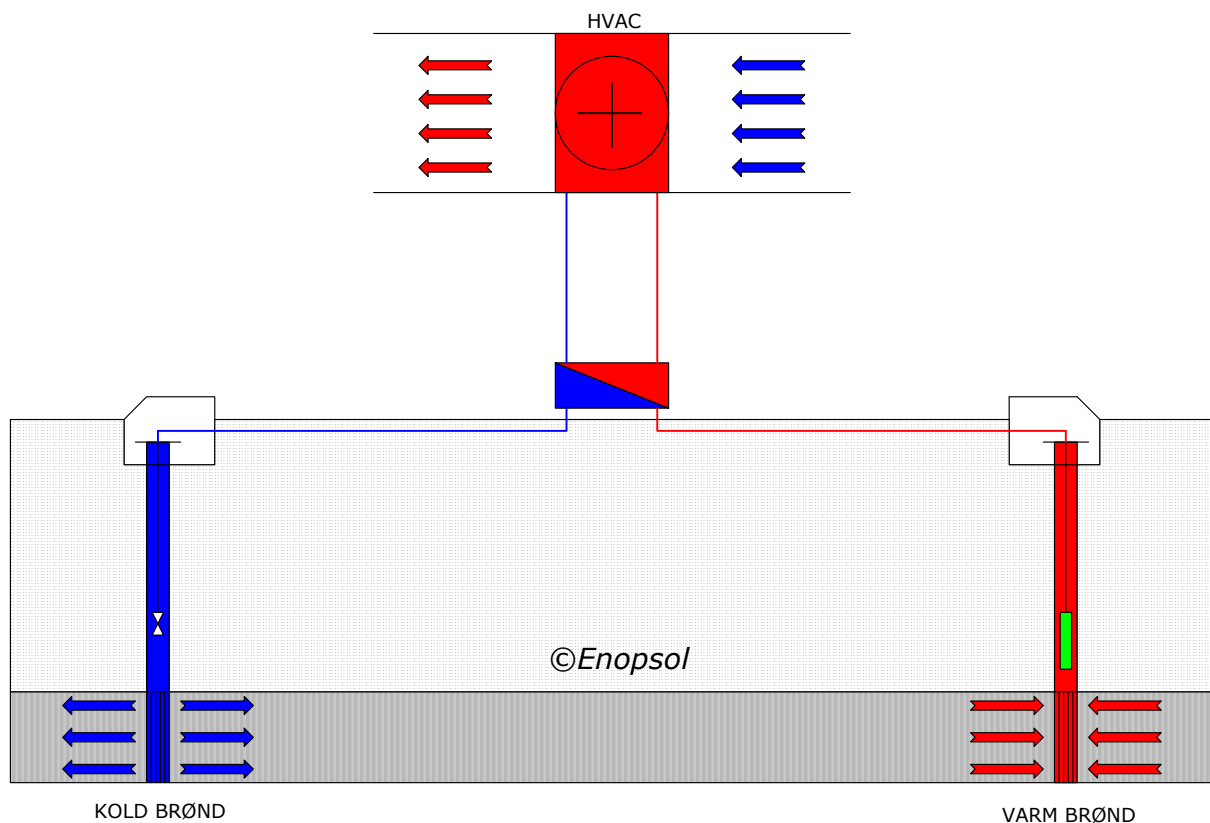
Figur 1 viser en sommersituation, hvor der er behov for køling i en bygning fx ved en udetemperatur over 15°C. Grundvandet pumpes fra den kolde brønd gennem en varmeveksler, hvor grundvandet indirekte opvarmes ved varmeveksling med indblæsningsluften til bygningens luftkonditioneringsanlæg (HVAC-anlæg). Herefter ledes grundvandet opvarmet tilbage i grundvandsmagasinet gennem den varme brønd.



Figur 1. ATES sommertid. Køling med grundvand.

Figur 2 viser en vintersituation, hvor der er behov for rumopvarmning fra grundvandslageret fx ved en udetemperatur under 7°C . Grundvandet pumpes nu fra den varme brønd gennem varmeveksleren, hvor grundvandet indirekte afkøles ved varmeveksling med indblæsningsluften til luftkonditioneringsanlægget. Herefter ledes grundvandet afkølet tilbage i grundvandsmagasinet gennem den kolde brønd.

I tilfælde, hvor bygningens kølebehov er langt større end varmebehovet eller hvor det til rådighed værende grundvandsmagasin er begrænset i ydelse og volumen, kan det være nødvendigt at supplere med lagring af kulde i vintertiden. Dette kan ske ved brug af kold udeluft, hav-, sø eller åvand.



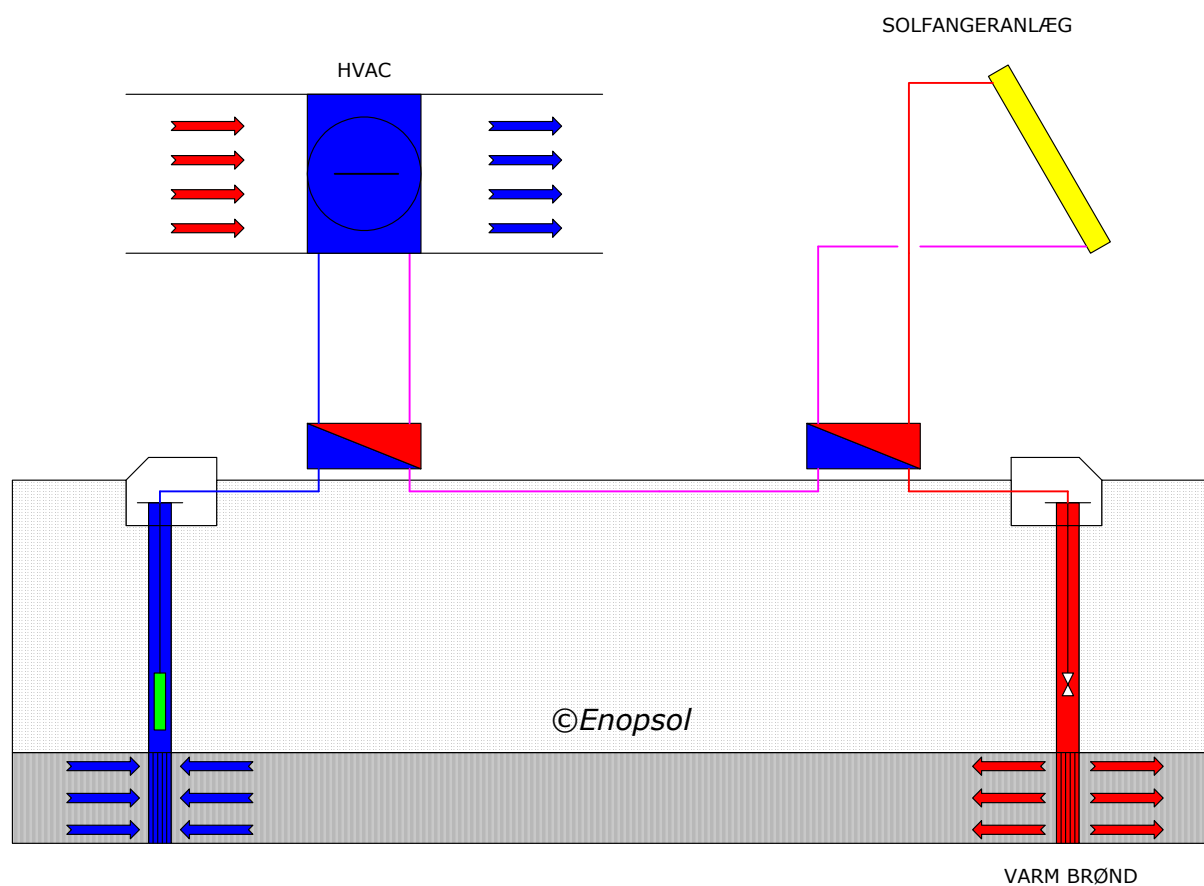
Figur 2. ATES vintertid. Opvarmning med grundvand.

Hvis bygningens varmebehov er langt større end kølebehovet eller hvor det til rådighed værende grundvandsmagasin er begrænset i ydelse og volumen kan der ske lagring af varme i sommertiden fx ved anvendelse af lavtemperatur solvarme.

ATES-systemer kan også kombineres med varmepumper, fjernvarme og andre energikilder afhængig af de lokale forhold.

På figur 3 er der som eksempel på en kombinationsløsning vist et solfangeranlæg, der opvarmer grundvandet om sommeren for lagring af lavtemperatur varme til brug i vintertiden.

På figur 4 er der vist et eksempel på kuldslagring i vintertiden ved at underafkøle grundvandet med kold udeluft via en væskekøler.

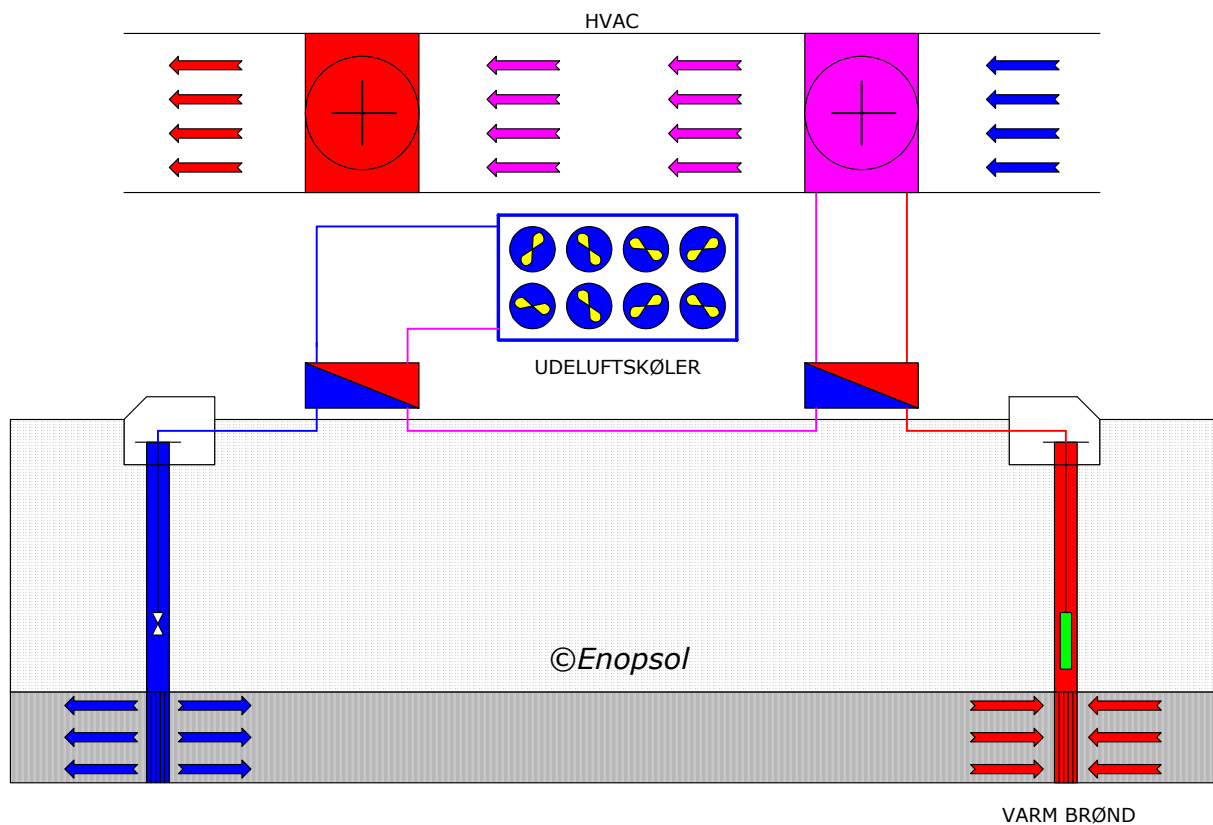


Figur 3 ATES sommertid. Køling med grundvand.
Lagring af lavtemperatur solvarme

Figur 5 viser sommertiden, hvor en kølekompressor leverer supplementskøling til grundvandskøleanlægget og kølekompressorens kondensator afkøles med grundvand. Det herved opvarmede grundvand returledes til grundvandsmagasinet via den varme brønd.

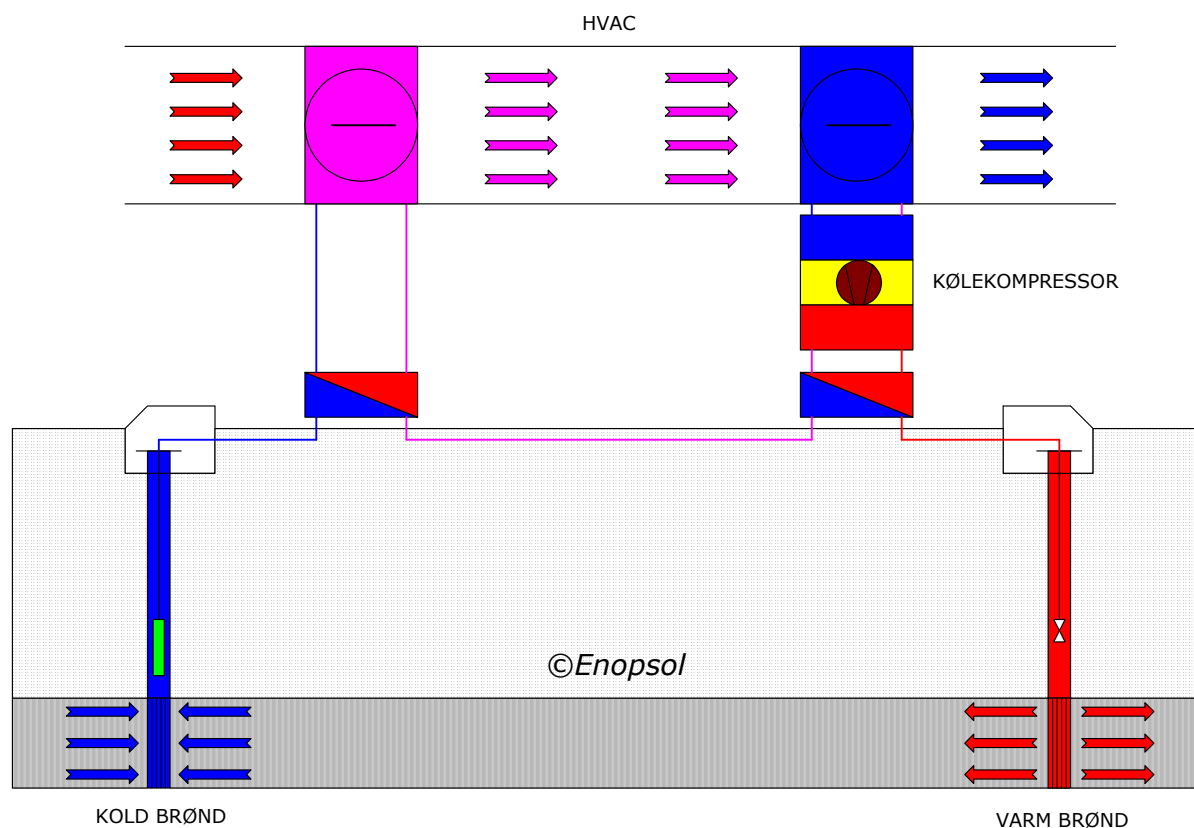
Figur 6 viser vintertiden, hvor kølemaskinen nu drives som varmepumpe og trækker restvarmen ud af grundvandet til brug ved opvarmning af den tilhørende bygning. Herved gennedekøles grundvandet, således at der opstår termisk balance i det vandførende jordlag.

ATES kan som illustreret på figur 1-6 kobles på mange måder med traditionelle systemer og den optimale systemløsning afhænger af det aktuelle forhold mellem de naturlige grundvandsforhold og køle- og opvarmningsbehovet.

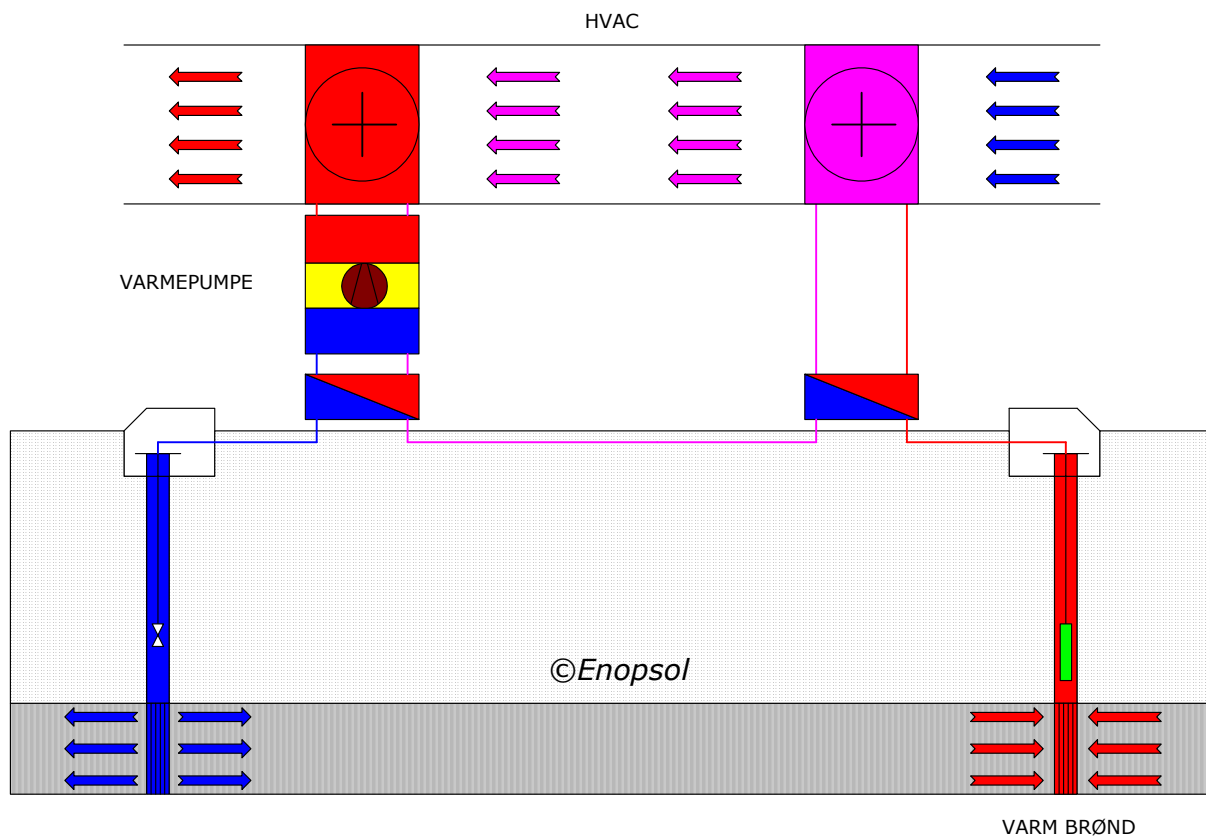


Figur 4. ATES vintertid. For-opvarmning med grundvand og kuldagring med kold udeluft.

I design-fasen er det af største vigtighed, at bygningen udlægges til køling ved så høj en kølevandstemperatur som muligt og ved så lav en varmtvandetstemperatur som muligt for at opnå den bedste rentabilitet af ATES-systemet.



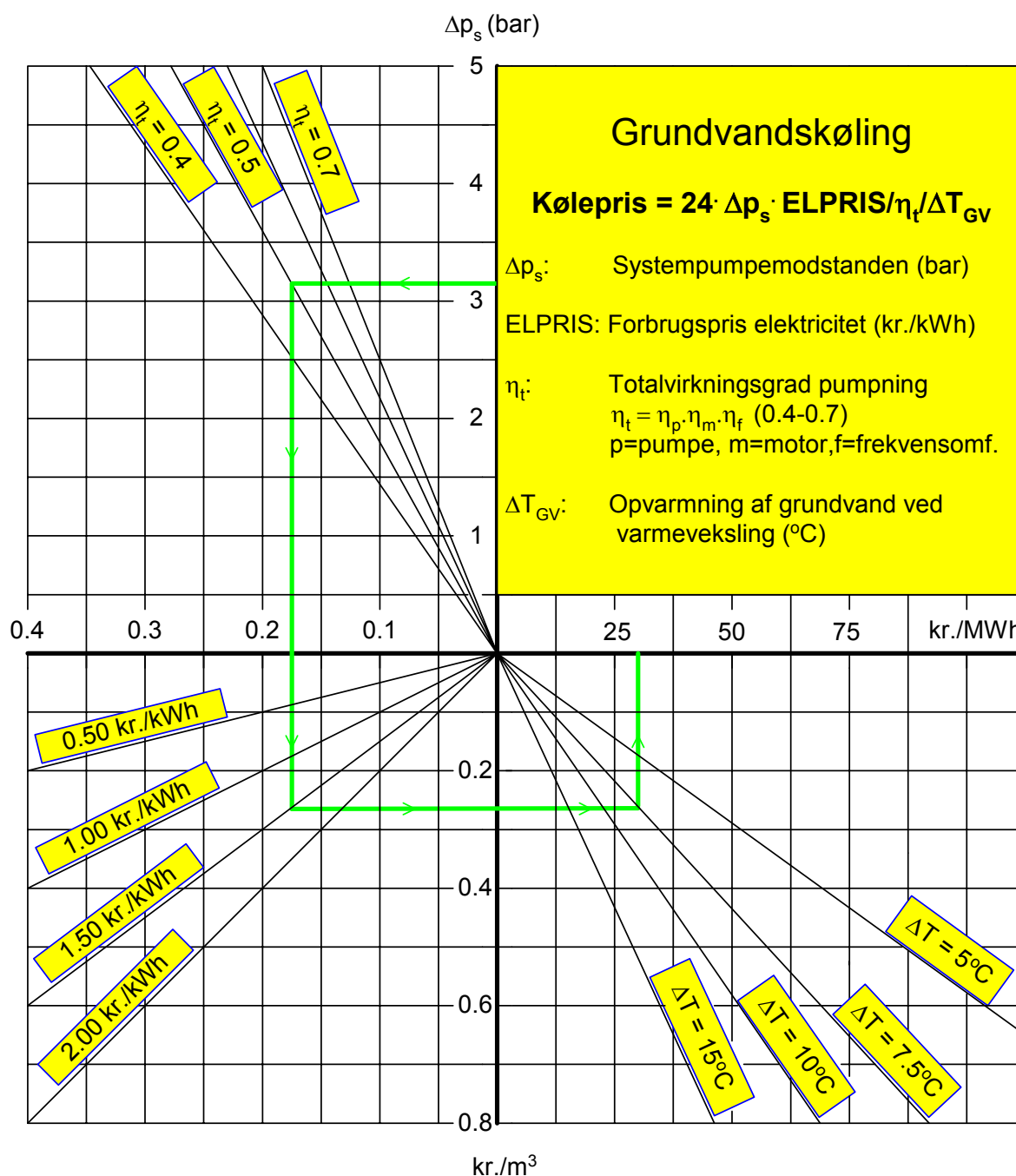
Figur 5. ATES sommertid. Køling med grundvand og kølemaskine. Kølemaskinens kondensator køles med grundvand. Lagring af opvarmet grundvand efter passage af køleanlægget.



Figur 6. ATES vintertid. For-opvarmning med grundvand. Lagring af afkølet grundvand efter passage af en varmepumpe.

4. ATES ENERGIBESPARELSE

I driftsfasen kan prisen for køling og opvarmning i kr./MWh med et ATES-system beregnes af figur 7 (100% grundvandskøling) og figur 8 (100% grundvandsopvarmning). Køle- og varmeprisen afhænger af systemmodstanden i grundvandskredsen, grundvandspumpernes totale virkningsgrad, prisen for elektricitet til at drive grundvandspumperne og den opvarmning/afkøling grundvandet kan opnå ved varmevekslingen.

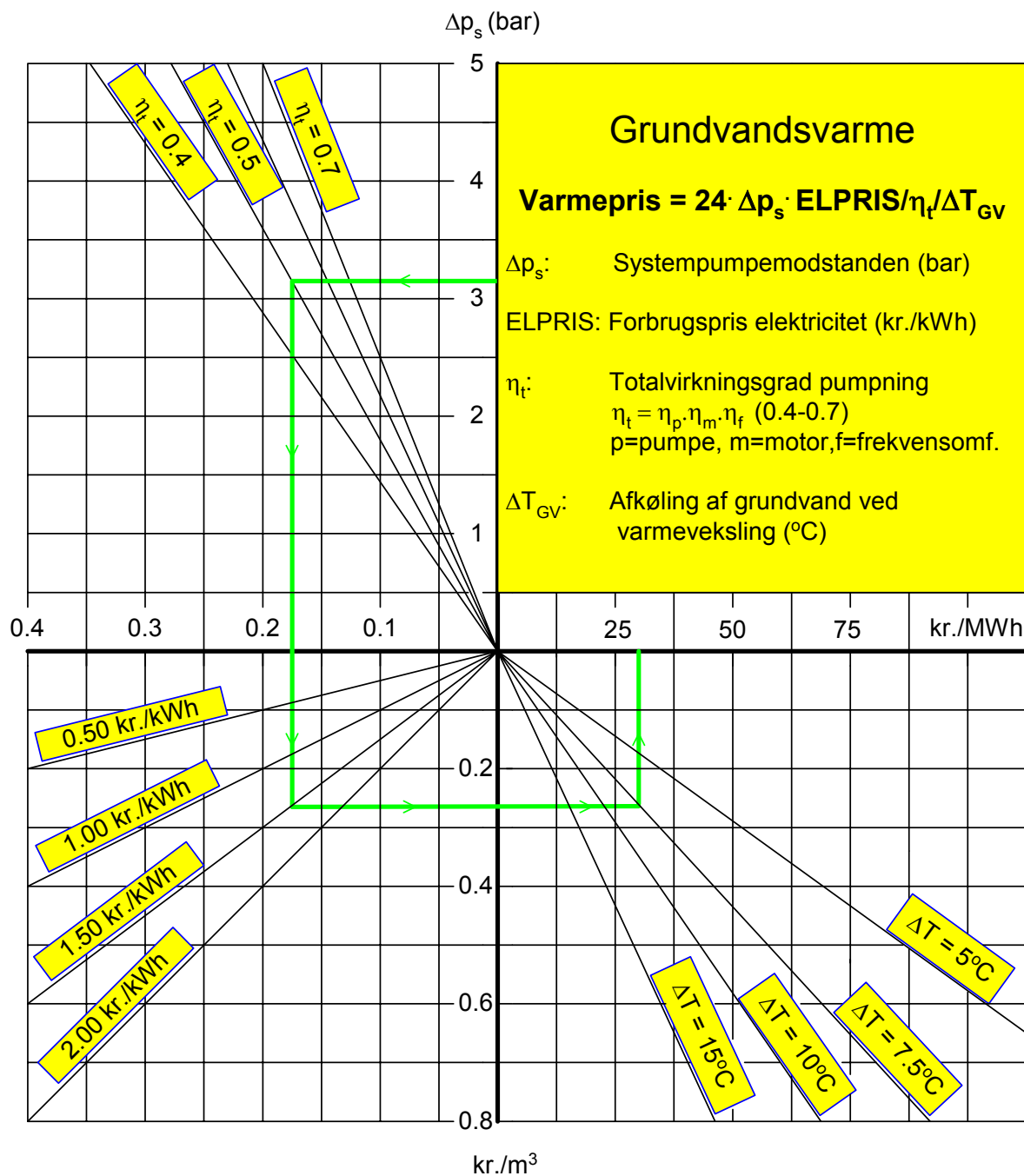


Figur 7. Beregning af kølepris for 100% køling med grundvand.

Forklaring til brug af figur 7:

Med den aktuelle systemmodstand (tryktab) for grundvandskøleanlægget indsat i bar bevæger man sig mod

uret i diagrammet, indtil værdien for grundvandspumpernes



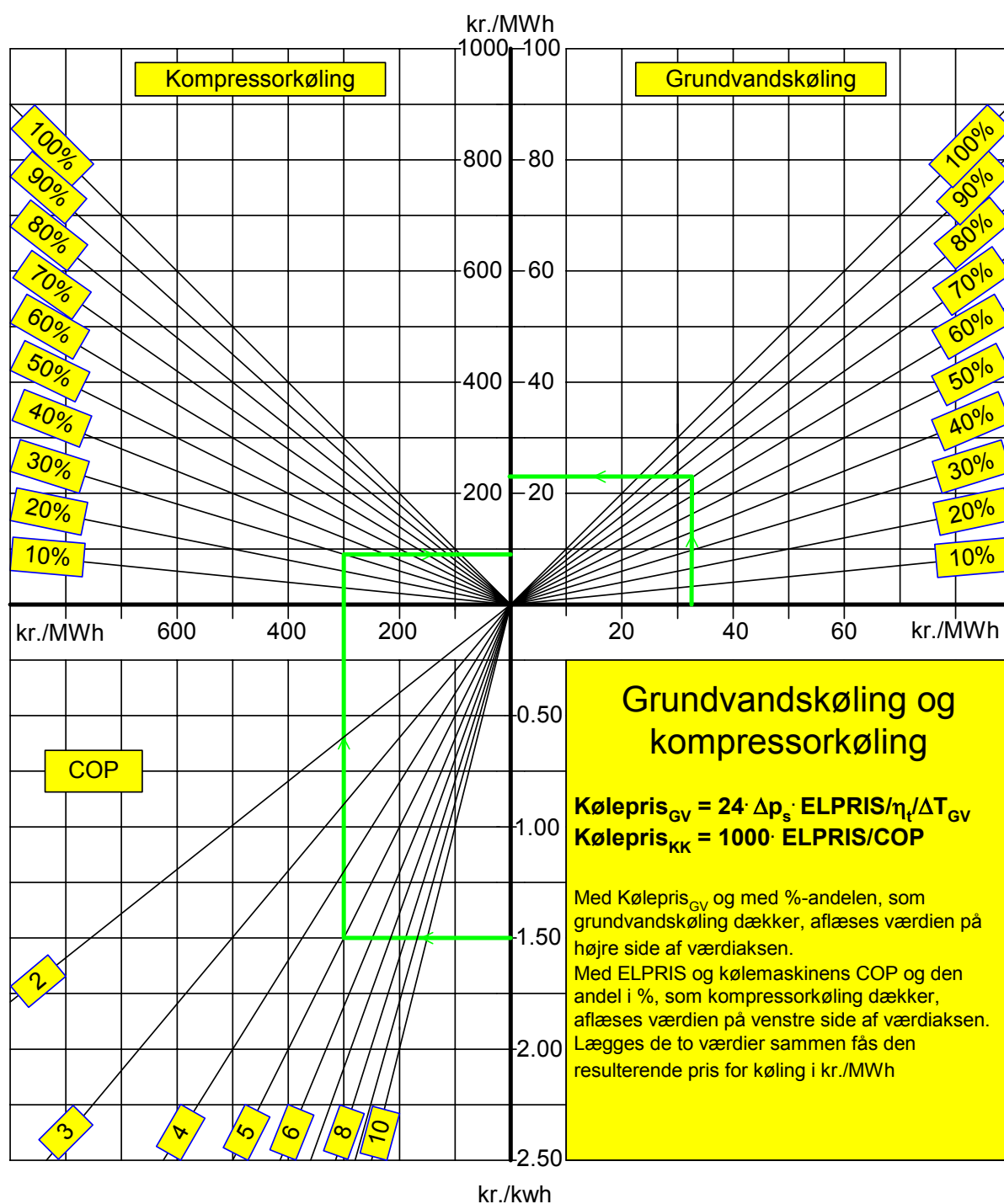
Figur 8. Beregning af varmepris for 100% opvarmning med grundvand.

grundvandspumperne. Herfra bevæger man sig mod højre i diagrammet indtil værdien af den opvarmning grundvandet opnår ved varmeveksling i $^{\circ}\text{C}$. Man bevæger sig sluttelig lodret opad i diagrammet, indtil man på x-aksen kan aflæse køleprisen i kr./MWh.

Forklaring til figur 8:

Med den aktuelle systemmodstand (tryktab) for grundvandskøleanlægget indsat i bar bevæger man sig mod uret i diagrammet, indtil værdien for grundvandspumpernes totale virkningsgrad. Herefter bevæger man sig lodret nedad i diagrammet indtil den elpris i kr./kWh, der betales for strøm til grundvandspumperne. Herfra bevæger man sig mod højre i diagrammet indtil værdien af den afkøling grundvandet opnår ved varmeveksling i °C. Man bevæger sig sluttelig lodret opad i diagrammet, indtil man på x-aksen kan aflæse varmeprisen i kr./MWh.

Alternativet til køling med grundvand er mekanisk køling med kølekompressor anlæg. Figur 9 viser et nomogram til beregning af køleprisen i kr./MWh for kølekompressor anlæg samt til beregning af den samlede kølepris i kr./MWh, når grundvandskøling kombineres med kompressorkøling.

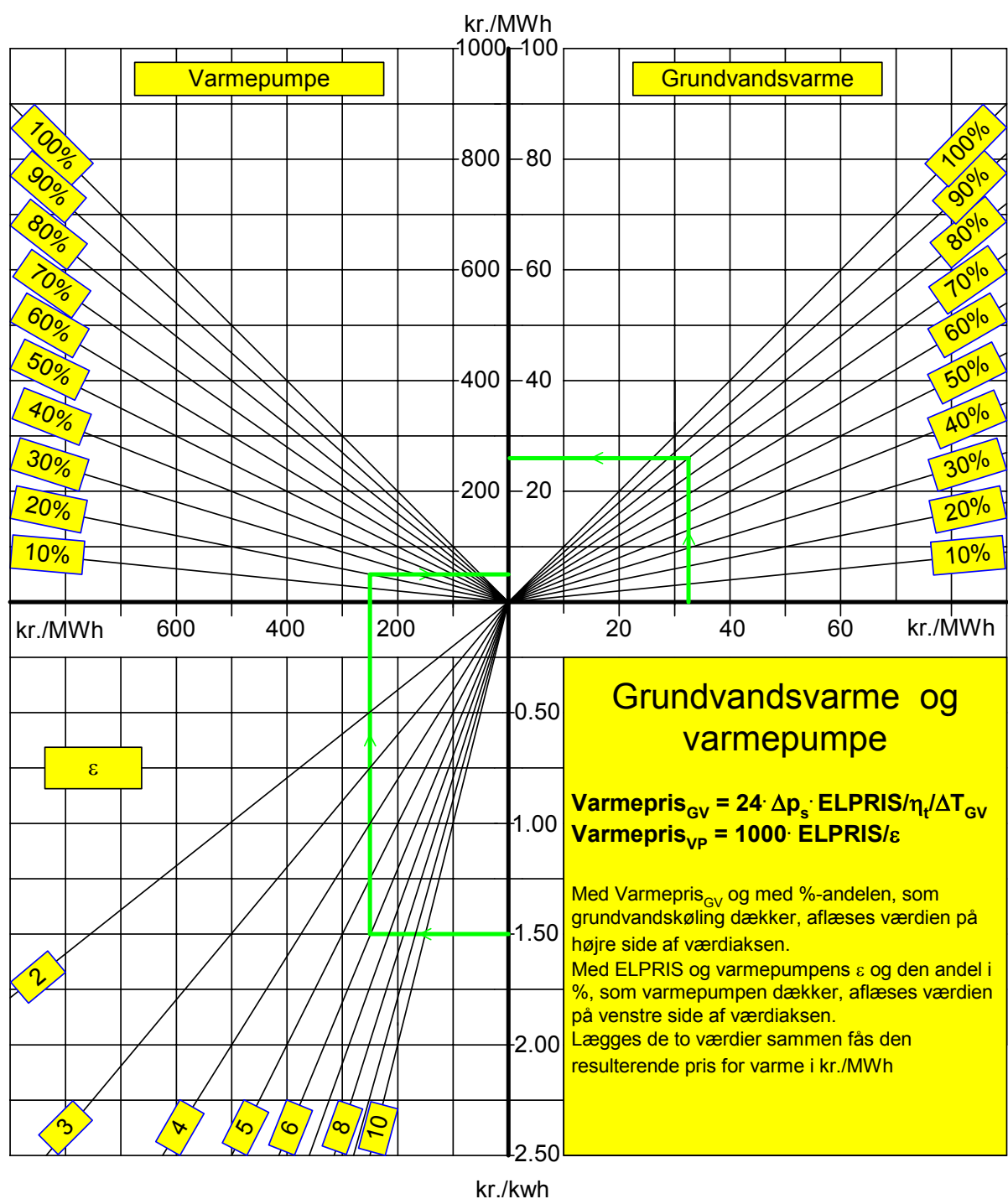


Figur 9. Nomogram til beregning af kølepris i kr./MWh for 100% mekanisk køling med kølekompressorer og beregning af den resulterende kølepris i kr./MWh når fordelingen mellem grundvandskøling og køling med kølekompressorer er kendt.

Forklaring til figur 9:

Ved brug af figur 7 er det beregnet, at køleprisen for 100% grundvandskøling er 32 kr./MWh. For den aktuelle bygning vil 70% af det totale kølebehov blive dækket med grundvandskøling og 30% med kølekompressor anlæg. Med 32 kr./MWh benyttes højre side af diagrammet og man bevæger sig lodret opad indtil 70%-angivelsen. Herfra bevæger man sig vandret mod venstre og aflæser værdien 22,50 kr./MWh. I venstre side af diagrammet begynder man nederst med den aktuelle elpris til drift af kølekompressorer, her 1,50 kr./kWh. Man bevæger sig med denne elpris vandret mod venstre indtil COP-værdien for det aktuelle kølekompressor anlæg, her 5,0. (COP er forholdet mellem et køleanlægs køleydelse og det dertil medgåede effektforbrug). Herfra bevæger man sig lodret opad i diagrammet og aflæser ved passagen af x-aksen køleprisen i kr./MWh ved 100% kølekompressor drift, her 300 kr./MWh. Ved at fortsætte i lodret retning indtil man møder 30%-kurven kan man aflæse værdien 90 kr./MWh på y-aksen. Tillægges den tidligere bestemte værdi på 22,50 kr./MWh bliver den resulterende kølepris på 112,50 kr./MWh. I figur 11 er vist en metode til beregning af COP for kølekompressor anlæg.

Tilsvarende beregning for den resulterende varmepris ved grundvandsopvarmning i samkørsel med varmepumper kan beregnes vha. nomogrammet på figur 10.



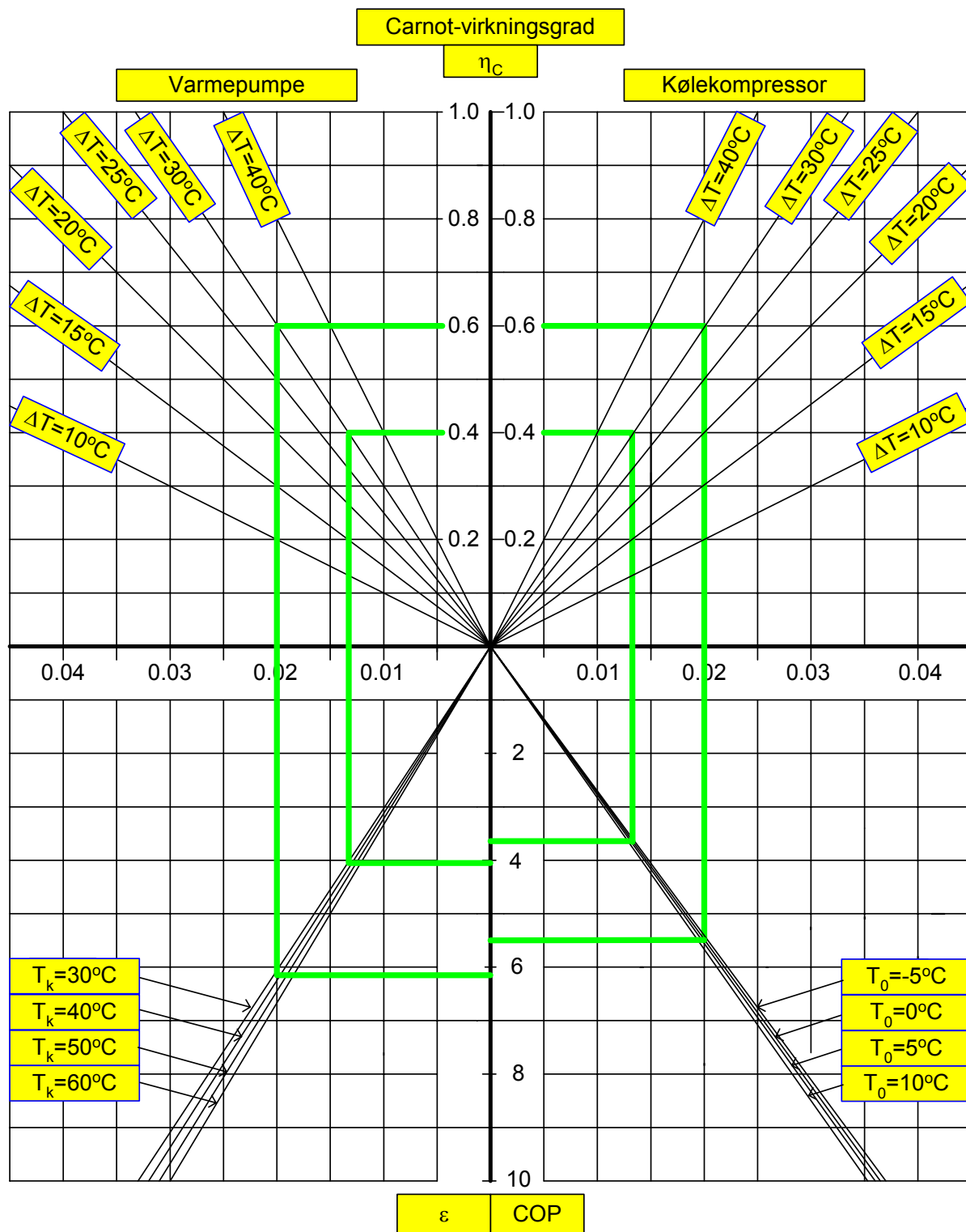
Figur 10. Nomogram til beregning af varmepris i kr./MWh for 100% mekanisk opvarmning med varmepumper og beregning af den resulterende varme i kr./MWh når fordelingen mellem grundvandsopvarmning og opvarmning med med kølekompresorer er kendt.

Forklaring til figur 10:

Ved brug af figur 8 er det beregnet, at varmeprisen for 100% grundvandsopvarmning er 32 kr./MWh. For den aktuelle bygning vil 80% af det totale varmebehov blive dækket med grundvandsopvarmning og 20% med varmepumpeanlæg. Med 32 kr./MWh benyttes højre side af diagrammet, og man bevæger sig lodret opad indtil 80%-angivelsen. Herfra bevæger man sig vandret mod venstre og aflæser værdien 25,50 kr./MWh.

I venstre side af diagrammet begynder man nederst med den aktuelle elpris til drift af varmepumper, her 1,50 kr./kWh. Man bevæger sig med denne elpris vandret mod venstre, indtil effektfaktor-værdien for det aktuelle varmepumpeanlæg, her 6,0. (Effektfaktoren er forholdet mellem varmepumpens varmeydelse og det dertil medgåede effektoptag). Herfra bevæger man sig lodret opad i diagrammet og aflæser ved passagen af x-aksen varmeprisen i kr./MWh ved 100% varmepumpedrift, her 250 kr./MWh. Ved at fortsætte i lodret retning indtil man møder 20%-kurven, kan man aflæse værdien 50 kr./MWh på y-aksen. Tillægges den tidligere bestemte værdi på 25,50 kr./MWh bliver den resulterende varmepris på 75,50 kr./MWh. På figur 11 er vist en metode til beregning af effektfaktorer for varmepumper.

Til beregning af COP og effektfaktorer for kølemaskiner og varmepumper kan figur 11 anvendes med den forklarende tekst i gul markering.



Figur11. Nomogram til beregning af COP for kølemaskiner og effektfaktorer for varmepumper.

Kølekompressor og varmepumpe

Nomogram for beregning af COP for kølekompressoranlæg og effektfaktor (ϵ) for varmepumpeanlæg. Højre side af nomogrammet omhandler kølekompressoranlæg og venstre side af nomogrammet omhandler varmepumpeanlæg.

For kølekompressoranlæg gælder $COP = \eta_c \cdot T_o / (T_k - T_o)$

For varmepumpeanlæg gælder $\epsilon = \eta_c \cdot T_k / (T_k - T_o)$

η_c : Carnotvirkningsgraden, som for kompressoranlæg typisk ligger mellem 0.4 og 0.6

T_o : anlæggets fordampningstemperatur (K)

T_k : anlæggets kondenseringstemperatur (K)

Nomogrammet bruges således for kølekompressor:

Start med anlæggets Carnotvirkningsgrad (leverandøroplysning). Gå vandret til højre i nomogrammet ud for Carnotvirkningsgraden, indtil man møder den værdi for temperaturforskellen mellem anlæggets kondenseringstemperatur og fordampningstemperatur, der er gældende i det driftspunkt, man ønsker at beregne for. Kondenseringstemperaturen bør ikke være mere end 5°C højere end kondensatorkølevandet i afgang fra kondensatoren. Fordampningstemperaturen bør ikke være mere end 5°C lavere end kølevandet, der forlader fordampningen. Fra skæringspunktet bevæger man sig lodret nedad, indtil man møder kurven for den værdi af fordampningstemperaturen, der er gældende for beregningen. Herfra bevæger man sig vandret mod venstre til skæring med værdiaksen og aflæser her COP-faktoren.

Nomogrammet bruges således for varmepumper:

Start med anlæggets Carnotvirkningsgrad (leverandøroplysning). Gå vandret til venstre i nomogrammet ud for Carnotvirkningsgraden, indtil man møder den værdi for temperaturforskellen mellem anlæggets kondenseringstemperatur og fordampningstemperatur, der er gældende i det driftspunkt, man ønsker at beregne for. Kondenseringstemperaturen bør ikke være mere end 5°C højere end kondensatorkølevandet i afgang fra kondensatoren. Fordampningstemperaturen bør ikke være mere end 5°C lavere end kølevandet, der forlader fordampningen. Fra skæringspunktet bevæger man sig lodret nedad, indtil man møder kurven for den værdi af kondenseringstemperaturen, der er gældende for beregningen. Herfra bevæger man sig vandret mod højre til skæring med værdiaksen og aflæser her effektfaktoren (ϵ)

På figur 11 er vist eksempel på to beregninger for kølekompressor (sommerekøling) og to beregninger for varmepumpe (vinteropvarmning). Der er tale om det samme anlæg, dog med to funktioner.

Begge beregningssæt viser hvordan man kan bestemme COP og effektfaktoren (ϵ) under antagelse af en Carnot-effektfaktor på hhv. 0.4 og 0.6 (en dårlig og en god kølekompressor/varmepumpe).

I begge beregninger for kølekompressor (højre side i diagrammet) regnes med en $\Delta T = 30^\circ\text{C}$, altså en forskel mellem kondenseringstemperatur og fordampningstemperatur på 30°C , hvilket fx er gældende for en kondenseringstemperatur på 35°C og en fordampningstemperatur på 5°C . For den energieffektive kølekompressor med en Carnot-virkningsgrad på 0.6 aflæses en COP på 5.5. For den dårlige kølekompressor med en Carnot-virkningsgrad på 0.4 aflæses en COP på 3.6.

I begge beregninger for varmepumper (venstre side i diagrammet) regnes med en $\Delta T = 30^\circ\text{C}$, altså en forskel mellem kondenseringstemperatur og fordampningstemperatur på 30°C , hvilket fx er gældende for en kondenseringstemperatur på 35°C og en fordampningstemperatur på 5°C . For den energieffektive kølekompresor med en Carnot-virkningsgrad på 0.6 aflæses en effektfaktor (\square) på 6.1. For den dårlige kølekompresor med en Carnot-virkningsgrad på 0.4 aflæses en effektfaktor (\square) på 4.0.

Hvor meget der kan spares i % i forhold til traditionel opvarmning kan beregnes i figur 12, der er en udvidelse af figur 8, idet der er indsat en alternativ varmepris i kr./MWh ved fx naturgasfyring.

Hvis prisen for grundvandsvarme fx er 46 kr./MWh og den alternative varmepris er 300 kr./MWh kan besparelsen aflæses til 85%.

Forklaring til figur 12:

Grundvandsvarme

Varmepris_{GV} = 24 · Δp_s · ELPRIS / η_t / ΔT_{GV}

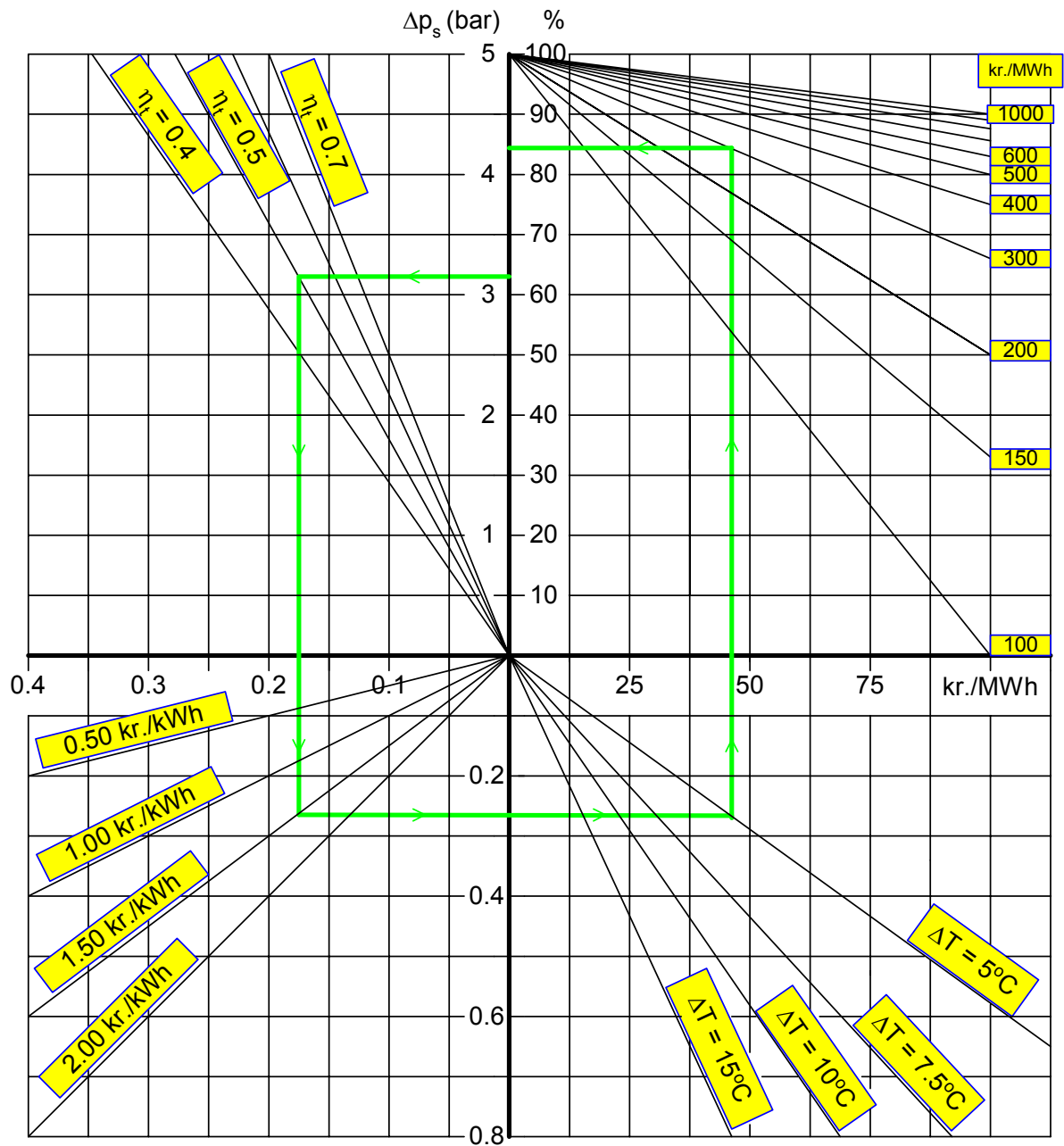
Δp_s: Systempumpemodstanden (bar)

ELPRIS: Forbrugspris elektricitet (kr./kWh)

η_t: Totalvirkningsgrad pumpning $\eta_t = \eta_p \cdot \eta_m \cdot \eta_f$ (0.4-0.7) p=pumpe, m=motor, f=frekvensomf.

ΔT_{GV}: Afkøling af grundvand ved varmeveksling (°C)

I diagrammet er indsat alternativ varmepris fx. naturgasfyring i kr./MWh. Ved at aflæse hvor Varmepris_{GV} rammer alternativ varmepris kan aflæses besparelsen i % ved at gå til venstre i diagrammet.



Figur 12. Beregning af varmepris for 100% opvarmning med grundvand samt besprelsen i % i sammenligning med alternativ opvarmning.

5. Grundvandskølig og ATES. Teknologistade i Danmark.

ATES har været et kendt princip i den vestlige verden efter energikrisen i 1973, men kineserne var de første, der tog teknikken i anvendelse i slutningen af 1950'erne.

I 1980'erne blev der i Danmark etableret ca. 250 grundvandsvarmepumpeanlæg, primært mindre anlæg til opvarmning af parcelhuse. Interessen for konceptet skyldtes de kraftigt stigende oliepriser til husopvarmning i 1979. På grund af de forholdsvis små varmebehov, som hvert enkelt anlæg skulle yde, blev der med det formål at holde anlægsudgifterne på et attraktivt niveau udført meget billigt og dårligt borearbejde, hvilket betød, at et antal anlæg fik driftsproblemer, herunder sandproducerende boringer (dårligt filterdesign) og jern- og manganudfældende (okker), der primært skyldes indtrængning af atmosfærisk luft under grundvandscirkulationen.

DTU spillede i disse år en aktiv rolle for at kortlægge driftsproblemerne og forbedre anlægsdesign og økonomi, analysere de termiske forhold i grundvandsmagasiner samt sæsonlagring af lavtemperatur solvarme og andre naturlige varmekilder. Kildehenvisninger // // //

Fra slutningen af 1970'erne blev der parallelt hermed ofret forskningsmidler på at undersøge mulighederne for at anvende grundvandsmagasiner til sæsonlagring af højtemperatur overskudsvarme fra sommer til vinter. DTU og RISØ var således initiativtager til etableringen af Hørsholm Varmelager, hvor man ville lagre overskudsvarme fra affaldsforbrændingsanlægget Nordforbrænding i et nærliggende grundvandsmagasin til brug for husopvarmning i vintertiden. Varmen skulle distribueres via det til Nordforbrænding tilhørende fjernvarmenet.

Lagringstemperaturen skulle være op imod 100°C. For at dette kunne lade sig gøre var det nødvendigt at udstyre anlægget med et avanceret vandbehandlingsystem, således at grundvandets naturlige indhold af jern, mangan og calcium ikke fældede ud ved opvarmningen. Hørsholm Varmelager deltog sammen med en række andre højtemperatur varmelagringsforsøg i grundvandsmagasiner under IEA (International Energy Agency), herunder SPEOS i Lausanne i Sveiz og University of Minneapolis i U.S.A.

Konklusionen på initiativerne med at forsøge at sæsonlagre højtemperatur varme i grundvandsmagasiner blev dog, at dette ikke var en farbar vej, der væsentligst skyldes de tekniske og miljømæssige problemer ved at fortage vandbehandling af grundvandet. Med afslutningen af Hørsholm-projektet er der ikke siden foretaget initiativer i Danmark med det formål at sæsonlagre højtemperatur varme i grundvandsmagasiner. Internationalt er der heller ikke foretaget yderligere forsøg hermed. Kildehenvisninger / / / / / /

Danmark trådte herefter ud af IEA-samarbejdet, mens en række lande fortsatte samarbejdet under

Siden starten af 1990'erne har det i Danmark drejet sig om den kommercielle udnyttelse af grundvandsmagasiner som kilde til primært proceskøling i industrien og et fåtal anlæg for rumkøling.

Billund Lufthavns nye terminalbygning var det første store byggeri herhjemme, hvor metoden blev benyttet til køling af rumluft. Anlægget blev idriftsat i 2002.

I 2000 blev der opnået tilladelse til grundvandskøling med reinjektion for Rigsarkivets nye bygning i Ørestaden ved København. Byggeriet blev imidlertid opgivet umiddelbart efter regeringsskiftet 2001.

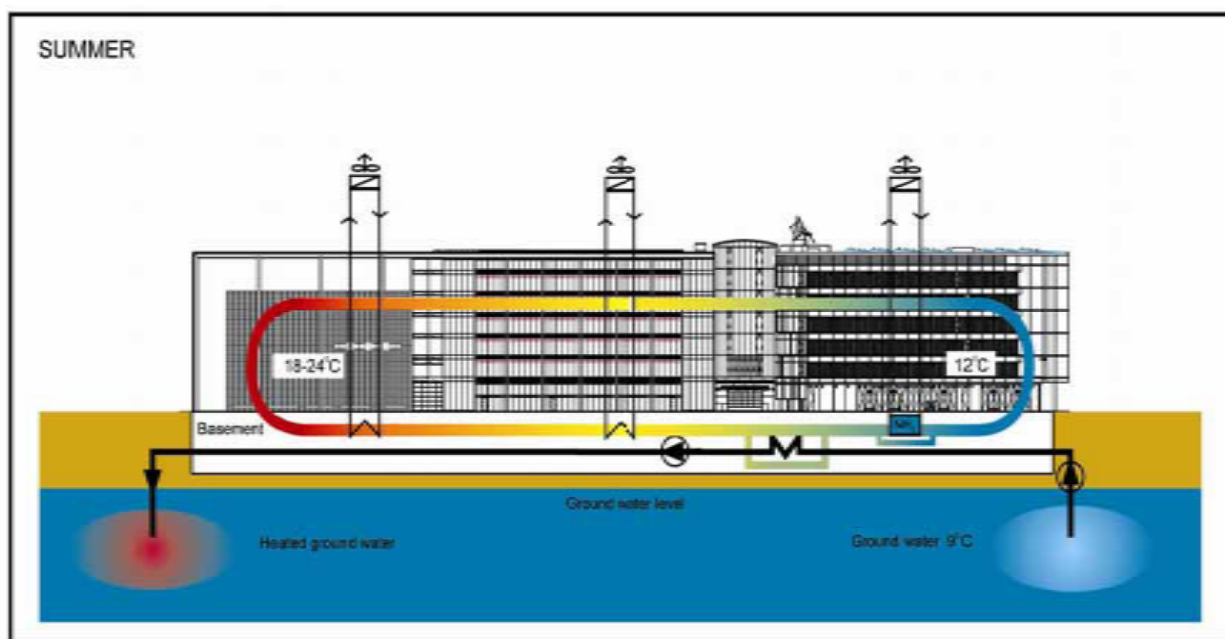
DR-Byen i Ørestaden vil som et af de første projekter herhjemme anvende et ATES-system til bygningskøling. Det drejer sig om Nyhedshuset, der er DR-Byens Segment 2. På internettet kan hentes flg. oplysninger om projektets visioner:

Danmarks Radios nye hovedsæde i Ørestad bliver udført som et miljøvenligt byggeri. DR har formuleret en miljøpolitik for byggeriet, som skal efterleves af alle på projektet. Det betyder blandt andet, at der skal spares på ressourcerne, vælges miljøvenlige og sunde materialer og skabes et godt indeklima og arbejdsmiljø. Kravene gælder både for byggefasen, hvor sikkerhed og sundhed er i fokus og for det færdige byggeri. Alle krav til projektet skal opfyldes inden for det godkendte budget på 3 mia. kr. DR Byen har dog derudover fået EU-midler som et demonstrationsbyggeri for minimering af miljøbelastningerne fra moderne IT-tungt kontorbyggeri, som har et stort behov for køling. I DR Byen vil op mod 80 % af det samlede kølebehov blive dækket af alternative kølemetoder såsom frikøling med udeluft og grundvandskøling med vand, der pumpes op fra undergrunden. Udover de alternative kølemetoder får bygningen energibesparende dobbeltfacader og Danmarks største solcelleanlæg på 1200 m².

Grundvandsanlægget er designet for termisk balance af grundvandsmagasinet og med 100% back-up i form af

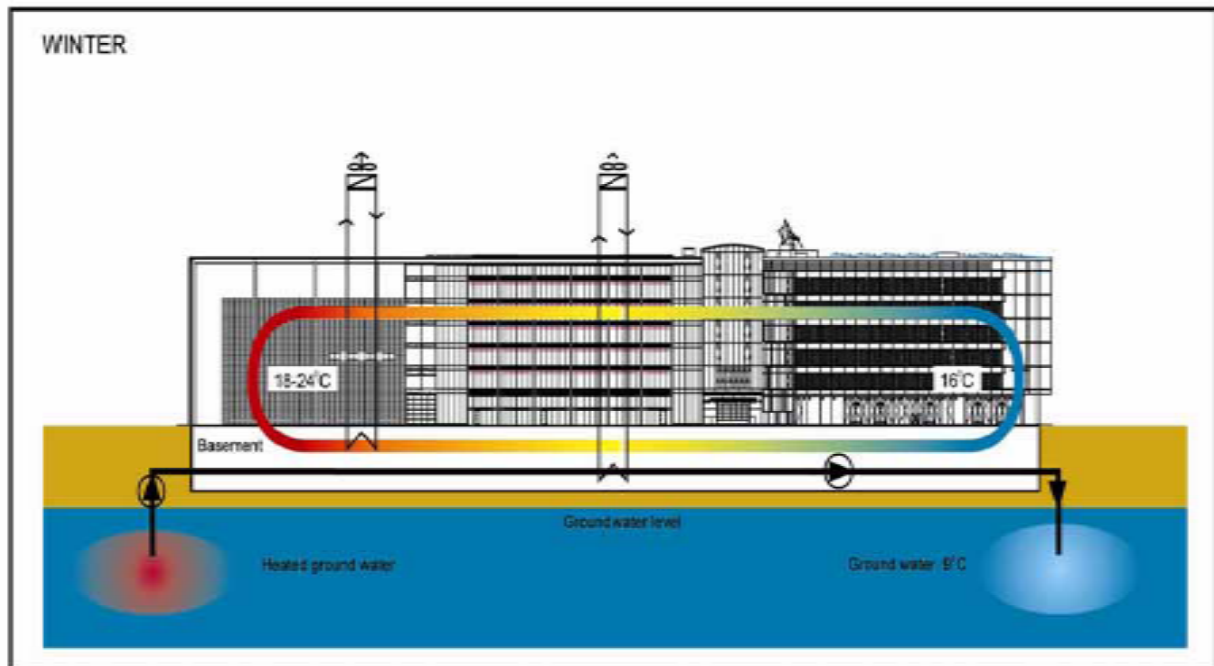
mekanisk køling med kølekompresoranlæg. Anlægget er endnu ikke idriftsat.

Et antal byggerier i Danmark er under opførelse, hvor teknologien finder anvendelse.



CONCEPT FOR COOLING - SUMMER

Figur 13. ATES til DR-Byen. Sommerdrift



CONCEPT FOR COOLING - WINTER

Figur 14. ATES til DR-Byen. Vinterdrift.

De fleste større anlæg for grundvandskøling er indtil nu etableret i danske industrivirksomheder. Her er kølebehovet det dominerende, og der findes i dag et antal anlæg med og uden termisk balancering af det anvendte grundvandsmagasin

Tabellen herunder viser nøgledata for nogle af de første større grundvandskøleanlæg med reinjektion, der er etableret i Danmark.

Anlægeejer	Idriftsat Årstal	Grundvandsflow		Kølekapacitet		Elbesparels e MWh/år	CO ₂ - red. t/år
		m ³ /h	m ³ /år	kW	MWh/år		
Chr. Hansen A/S	1996	200	750000	3700	6000	600	468
Knudsen Plast A/S	1998	50	250000	290	1450	430	335
DBI Plastics A/S Anlæg 1	1998	30	150000	175	875	260	202
Primo DK A/S ^{*)}	1999	65	260000	600	1500	400	312
Sky-Light A/S	2000	80	600000	450	3500	880	686
Mikron Faarevejle A/S	2001	45	160000	520	1850	420	327
Superfos A/S ^{**)}	2001	75	600000	1000	6700	1350	1053
Billund Lufthavn A/S	2002	300	150000	2400	870	260	202
Faerch Plast A/S ^{**)}	2003	208	1800000	2650	+/-16700	1460	1138
AKV Langholt A/S	2004	210	470000	3900	8750	1650	1290
DBI Plastics A/S Anlæg 2	2006	100	450000	1625	7300	1350	1050
Kunst-Stof Kemi A/S	2007	55	275000	700	3500	825	495
Hotel Opus	2007	80	280000	555	1930	420	250

Data for 13 af de første større grundvandskøleanlæg med reinjektion i Danmark. ^{*)} Med vandrette borer for returledning af grundvand. ^{**)} Med termisk balancering af grundvandsmagasinet.

Kilde: Energi & Miljø A/S og Enopsol ApS.

6. Grundvandskøling og ATES. Teknologistade udland.

I Holland er der flere hundrede anlæg i drift til køling og opvarmning af store bygninger ved brug af ATES. I Sverige er der også etableret en række ATES-anlæg (ca. 40).

I forbindelse med det omhandlede projekt har projektdeltagerne været på studiebesøg i Holland og Sverige, hvor der blev givet generelle foredrag og præsentation af udvalgte projekter. For nærmere information desangående henvises til hjemmesiden www.enopsol.dk.

7. Internationalt samarbejde under IEA.

IEA (International Energy Agency) har været den organisation, hvori de fleste internationale initiativer og projekter indenfor teknikområdet har været gennemført.

Allerede i 1978 blev der igangsat et program under IEA med titlen "Energy Conservation Through Energy Storage" (ECES) for forskning, udvikling og demonstration af nye, innovative

teknologier indenfor termisk energilagring med det formål at fremme energibesparelser og udnyttelse af fornybare energikilder. Flg. focusområder blev valgt: Underground Seasonal Thermal Energy Storage, Short Term Thermal Energy Storage, Phase Change Materials (PCM) og Thermo-Chemical Reactions for Heating and Cooling. Indenfor focusområderne er der indtil nu taget initiativ til dannelsen af følgende Annex:

- Annex 1: Large Scale Thermal Storage Systems Evaluation. Afsluttet 1981.
- Annex 2: Lake Storage Demonstration Plant in Mannheim. Projektet blev opgivet
- Annex 3: Aquifer Storage Demonstration Plant in Lausanne Dorigny (SPEOS) Afsluttet 1989.
- Annex 4: Short Term Water Heat Storage Systems Afsluttet 1988.
- Annex 5: Full Scale Latent Heat Storage Installations Afsluttet 1992.
- Annex 6: Environmental and Chemical Aspects of Thermal Energy Storage in Aquifers and Research and Development of Water Treatment Methods. Afsluttet 1996.
- Annex 7: Innovative and Cost Effective Seasonal Colsd Storage Applications. Afsluttet 1996.
- Annex 8: Implementing Underground Thermal Energy Storage Systems.
- Annex 9: Electrical Energy Storage Technologies for Utility Network Optimization.
- Annex 10. Phase Change Materials and Chemical Reactions for Thermal Energy Storage.
- Annex 12. High-Temperature Underground Thermal Energy Storage (HT UTES).
- Annex 13. Design, Construction and Maintenance of UTES Wells and Boreholes.
- Annex 14. Cooling with TES in all Climates
- Annex 17. Advanced Thermal Energy Storage Techniques –Feasibility Studies and Demonstration Projects.

For nærmere information vedr. IEA-programmet henvises til hjemmesiden www.iea-eces.org

Med bl.a. IEA som sponsor er der indtil nu afholdt 10 konferencer under fællesbetegnelsen "International Conference on Energy Storage for Building Heating and Cooling":

- 1981: Seattle
- 1983: Stockholm (Subsurface Heat Storage)
- 1985: Toronto (ENERSTOCK 85)
- 1988: Versailles (JIGASTOCK 88)
- 1991: Scheveningen (THERMOSTOCK 91)
- 1994: Espoo (CALORSTOCK 94)
- 1997: Sapporo (MEGASTOCK 97)
- 2000: Stuttgart (TERRASTOCK 2000)
- 2003: Warszawa (FUTURESTOCK 2003)
- 2006: New Jersey (ECOSTOCK 2006)

I 2009 afholdes den næste konference i Stockholm (EFFSTOCK 2009)

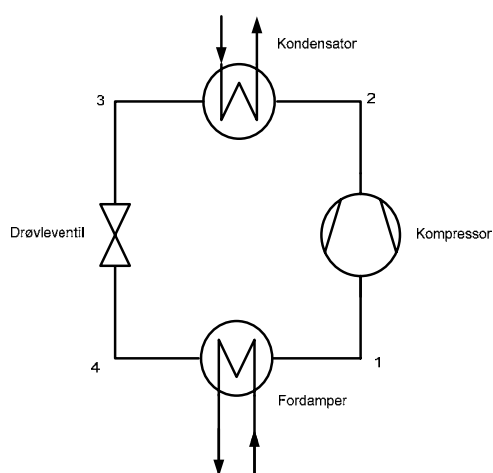
8. Varmepumper og absorptionsanlæg. Teknologistade

8.1 Varmepumpens virkemåde

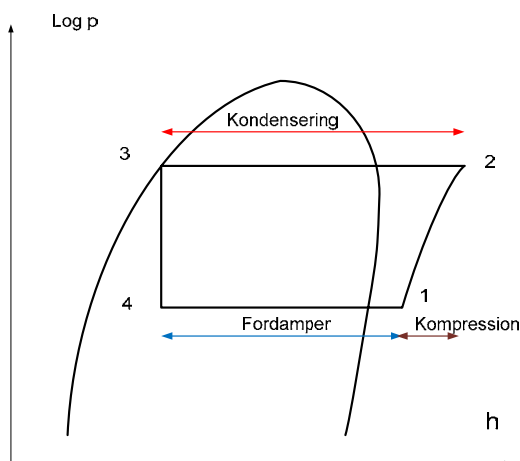
Der findes flere typer af varmpumper, både varme og eldrevne. Det vil normalt være et eldrevne kompressorbaseret anlæg der anvendes.

Anlægget er opbygget på samme måde som et kompressorkøleanlæg.

Processen foregår ved 2 forskellige tryk, fordampetrykket og kondenseringstrykket. Ved det lave trykniveau (lav temperatur) optages varme, ved at kølemidlet fordampes og optager varme. Herefter komprimeres det fordampede kølemiddel til det høje trykniveau. Det komprimerede kølemiddel er nu en varm gas der føres til en kondensator, hvor det kondenseres ved bortførelse af varme ved en højere temperatur end da det fordampede. Det er varmen fra kondenseringen der skal anvendes til opvarmning. Efter at kølemidlet er kondenseret, drøvels det (ensbetydende med et tryk og et temperaturfald) gennem ventil ned til fordampetrykket, hvor det fordampes på ny ved optagelse af varme.



Figur 1. Kredsproces for køleanlæg



Figur 2. Log(p)-h diagram for kredsproces

Til at drive processen bruges energi til kompressoren. Hvor meget energi der bruges afhænger primært af de ønskede temperaturniveauer, der ønskes ved opvarmningen og kølingen. Men det det anvendte kølemiddel og anlægsbestykningen har også betydning for effektiviteten. Ønskes en højere temperatur til opvarmning kræves et højere kondenseringstryk, at komprimere gassen yderligere koster mere energi til kompressoren.

COP (Coefficient Of Performance) er kuldeydelsen Q_0 leveret af kompressoren divideret med den elektriske effekt W_k optaget af kompressoren. $COP = Q_0 / W_k$. I Figur 2 svarer kuldeydelsen Q_0 til fordamperydelsen.

8.2 Valg af kølemiddel

Der findes flere forskellige typer af kølemidler, der kan anvendes i varmepumpesystemer. Fra 1. januar 2007 er der dog kommet nye krav til HFC kølemidler. Det er blandt andet ikke tilladt at sælge køle- og varmepumpesystemer med en fyldning over 10 kg. Dette kan derfor udelukke HFC kølemidler i de helt store anlæg.

De i dag mest anvendte HFC-kølemidler er R407C, R134a og R410a.

Kølemidlerne benævnes som værende mere eller mindre "grønne" i relation til deres tilbøjelighed til at påvirke miljøet, hvis de bevæger sig frit i atmosfæren. Som erstatning for HFC kølemidler anvendes i Danmark primært de naturlige kølemidler som kulbrinter, CO_2 og ammoniak.

Valget af kølemiddel afgøres bl.a. af hvilke temperaturniveauer, der ønskes opnået.

Har man behov for varme ved en høj temperatur (80-90°C) er det muligt at få en høj COP med en varmepumpe med CO_2 som kølemiddel. For ammoniak ligger

grænsen formentligt på 70°C også med en ”rimelig” høj COP. Skal man opnå så høje temperaturniveauer med kølemidlet R134a bliver COP dårligere end for CO₂ og ammoniak.

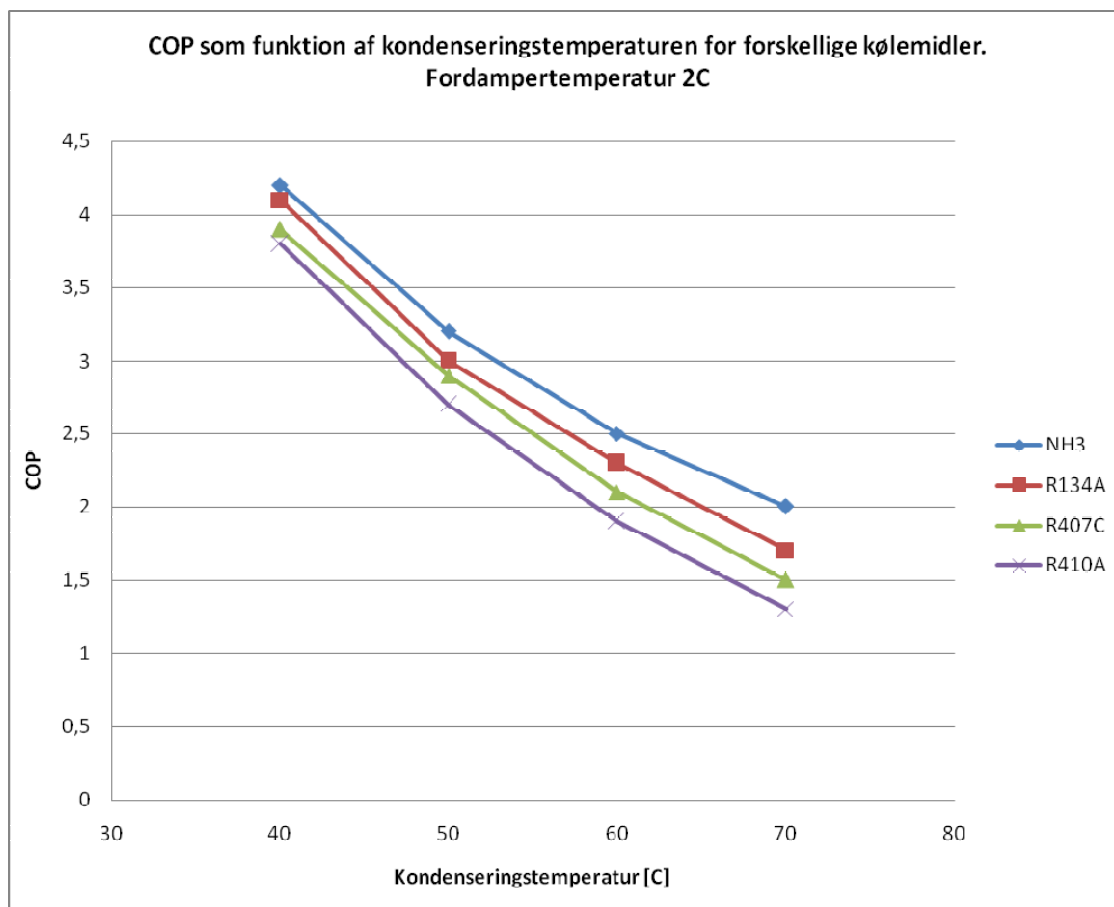
Kølemiddel	Maksimal temperatur for varmebærer [°C]	Kapacitets regulering	Forventet COP ved en temperatur på 50°C af varmebærer [-]	Bemærkning
CO ₂	80	god	2 - 2,5 ¹	Højt trykniveau Teknologi under udvikling
Ammoniak	70	Rigtig god	2,5 - 3	Giftig Teknologi kendt og udviklet
HFC	50	god	2 - 2,5	Krav til maksimal fyldning på 10 kg
Kulbrinter	ikke kendt, men formentlig meget lig HFC	god	-	Anvendes normalt ikke i større anlæg pga. eksplosionsfaren

Skema 1. Fordele og ulemper for forskellige kølemidler. Det er antaget at varmepumpen placeres i et ATES med en fordampningstemperatur på ca. 5°C.

Det bliver formentligt bliver ammoniak og CO₂, der kommer i brug som kølemiddel på meget store varmepumpeanlæg i fremtiden. På mindre anlæg vil det formentlig stadig være HFC kølemidlerne der anvendes.

Anlægsopbygningen kommer da til at bestå af flere mindre anlæg, der hver har en fyldning under 10 kg. Når der vælges en løsning med flere mindre anlæg/kompressorer vil man næsten altid tabe en smule i effektiviteten, da mindre kompressorer normalt er mindre effektive.

¹ Ved en gasafkøling ned til 30°C

COP for forskellige kølemidler

Figur 3. COP som funktion af kondenseringstemperaturen for forskellige kølemidler.

I figur 3 ses COP som funktion af kondenseringstemperaturen for forskellige kølemidler. Figuren skal illustrere hvad der kan opnås ved at vælge et kølemiddel frem for et andet.

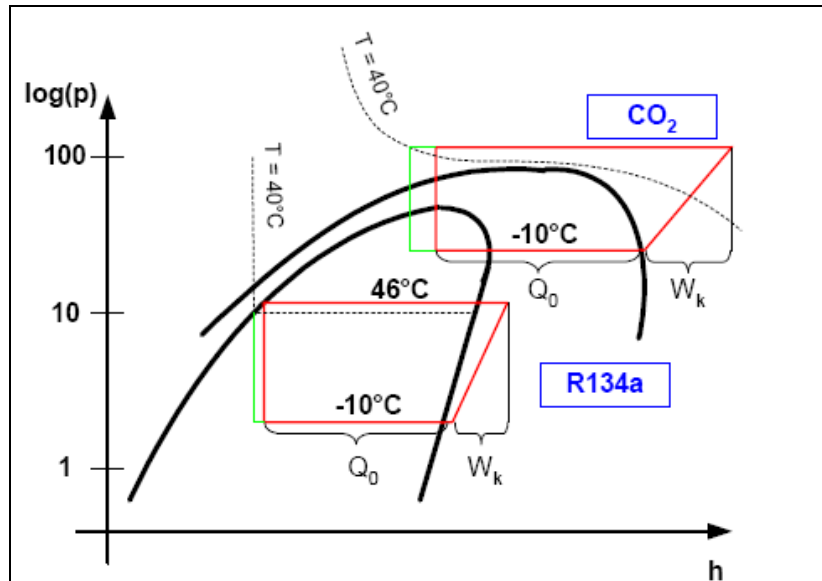
Eksempelvis vil et anlæg med NH3 (ammoniak) have en COP på 2,5 ved en kondenseringstemperatur på 60°C, for R410 vil COP være 1,9 ved en kondenseringstemperatur på 60°C.

Elbesparelsen i procent ved at vælge anlægget med ammoniak kan beregnes som:

$$(\Delta\text{COP} / \text{COP}_{\text{ny}}) \cdot 100 \% = ((1,9 - 2,5) / 2,5) \cdot 100 \% = \underline{24 \%}$$

Et anlæg med ammoniak er normalt dyrere i anskaffelse og i service, men da der formentligt bliver flere anlæg (kompressor) med et HFC kølemiddel (grundet den maksimale fyldning på 10 kg) kan det vise at serviceudgifterne her bliver dyrere.

8.3 Kredsprocessen for et CO₂ varmepumpeanlæg

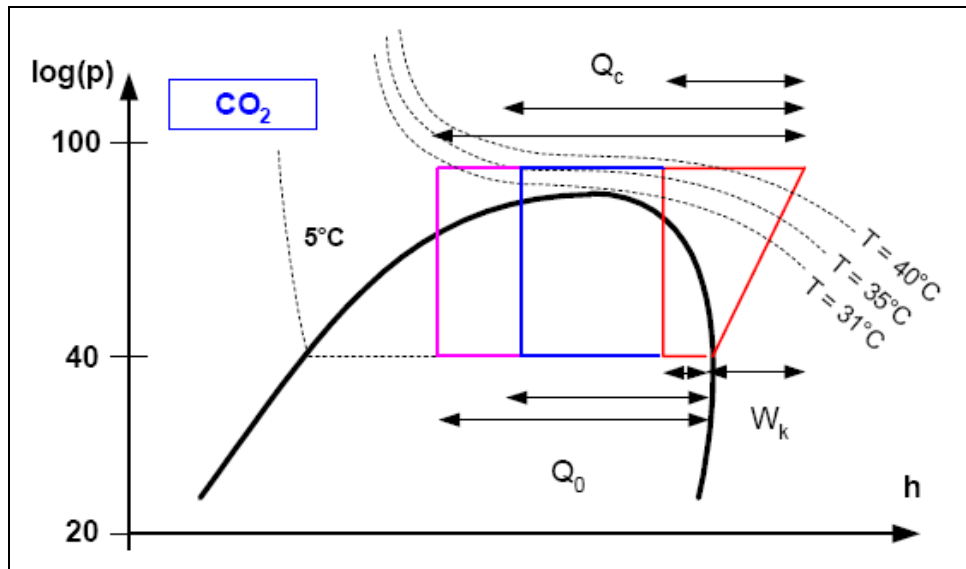


Figur 4. Kredsproces for R134a og CO₂.

I Figur 1 er der i et $\log(p),h$ diagram vist kredsprocesser for R134a og CO₂. Den store forskel på de 2 systemer er at kondenseringen for R134a foregår ved en konstant temperatur. For CO₂ vil der ikke være tale om en kondensering men en gasafkøling. For at udnytte CO₂ i en varmepumpe bedst muligt skal man udnytte det temperaturlid, der er ved gasafkølingen. Dvs. jo lavere returtemperatur (bedre afkøling) man kan få af sin ”varmebærer” (vand der cirkulerer varmen til brugssteder) jo højere COP.

CO₂-anlæg og kapacitetsregulering

For CO₂ anlæg der fungerer i det overkritiske område er der ikke afhængighed mellem tryk og temperatur. Det betyder, at det er muligt at styre trykket og temperaturen i gaskøleren uafhængigt.

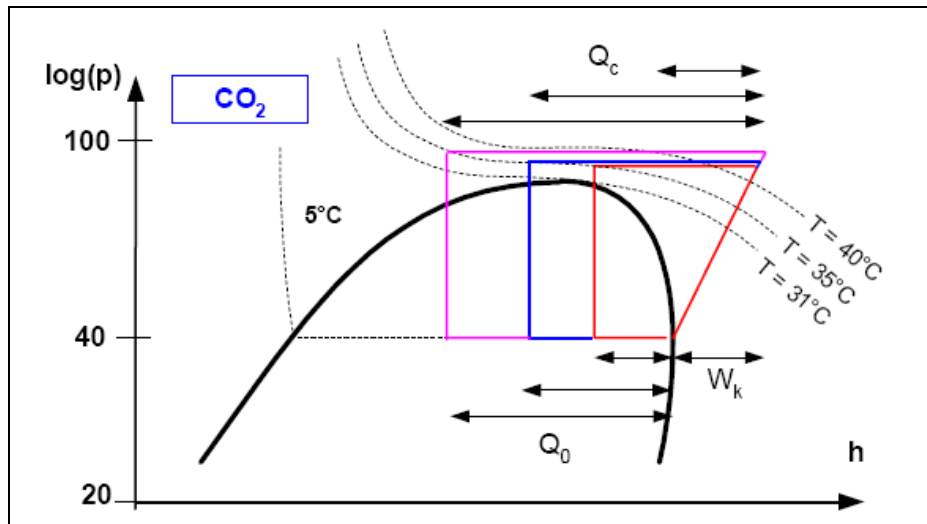


Figur 5. Ydelsens afhængighed af gastemperaturen ud af gaskøleren

Figur 5 viser hvorledes varmeydelsen (Q_c) drastisk forøges ved at temperaturen af CO₂'en ud af gaskøleren sænkes.

Kompressorens arbejde (W_k) er det samme. Under normale forhold kan temperaturen af CO₂'en ud af gaskøleren ikke vælges vilkårlig, den vil afhænge af konditionerne, hvorunder anlægget kører. Det vil normalt være returtemperaturen af varmemediet, der bestemmer gastemperaturen ud af gaskøleren

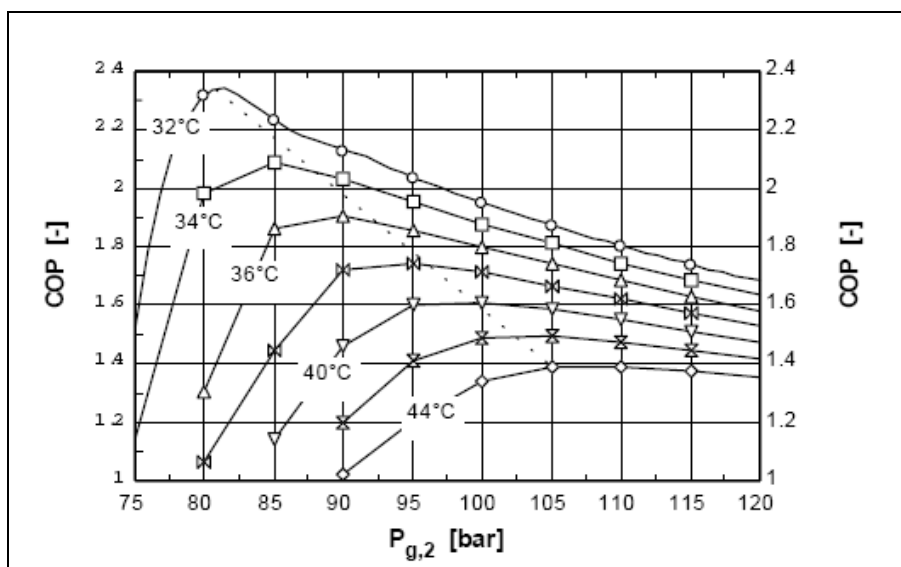
Dette betyder, at man ikke kan styre temperaturen ud af gaskøleren, men at man i stedet kan vælge et tryk i gaskøleren, der er optimal for en ønsket drift (høj/ lav kapacitet), da der findes et trykniveau, der giver den bedste COP.



Figur 6. Ydelsens afhængighed af trykket i gaskøleren ved fastholdt afgangstemperatur ud af gaskøleren.

Det antages at CO_2 'ens temperatur ud af gaskøleren er bestemt af de ydre konditioner og ligger på 35°C . Som det ses, er det muligt at forøge anlæggets kapacitet væsentligt ved at hæve trykket i gaskøleren en smule. Omvendt er det også muligt at reducere kapaciteten, hvis dette er ønsket, hvorved der samtidig opnås en energibesparelse på kompressoren.

Der vil således ofte ikke være behov for traditionelle metoder til kapacitetsregulering (hotgas eller bypass), men det vil stadig være en fordel energimæssigt at kunne kapacitetsregulere systemet ved at styre kompressorens omdrejninger. I denne situation vil det være oplagt at styre efter den maksimale COP af processen. Der findes et optimalt tryk mht. COP for en given afgangstemperatur fra gaskøleren. I Figur 7 er dette illustreret.



Figur 7. Følsomhed for korrekt valg af tryk i gaskøleren for at opnå optimal COP. Temperaturen er for CO_2 efter gaskøler.

8.4 Kapacitetsregulering

Et energioptimalt varmepumpeanlæg vil typisk have en god kapacitetsregulering. Kapacitetsreguleringen er typisk:

- omdrejningsregulering på kompressoren
- udkobling af trin på stempelkompressorer
- flere kompressorer i kaskade
- gliderregulering på skruekompressor
- varmgas bypass

Her er omdrejningsregulering på kompressoren normalt den mest energioptimale og varmgas bypass er decideret dårlig løsning.

En skruekompressor med gliderregulering vil normalt være meget effektiv ved en høj belastning. Fra en belastning under 60-70 % af ydelsen begynder effektiviteten at falde og man bør overveje en anden løsning, hvis skruekompressoren kører i dette belastningsområde en stor del af tiden.

Det er muligt at få ”standardkomponenter” til næsten alle systemer inden for ammoniak- og HFC-anlæg. For CO₂-anlæg er udvalget endnu ikke så bredt. Man skal formentlig eftermontere en frekvensomformer hvis der ønskes omdrejningsregulering i et CO₂ anlæg.

8.5 Anlægsudformning og økonomi

I mange store industrianlæg med kølemidlet ammoniak er anlæggene med oversvømmede fordampere. Disse anlæg har ofte en fordampertemperatur, der ligger tæt på den ønskede fremløbstemperatur af kølevandet, hvilket skyldes ammoniakkens gode varmeovergangstal. Dette betyder at den fordampede gas skal komprimeres fra et højere tryk hvilket giver en bedre COP. Med CO₂ anlæg er det også muligt at opnå de tilsvarende egenskaber. Effektiviteten ved at anvende ammoniak- eller CO₂ anlæg i forhold til et HFC anlæg er derfor ofte endnu bedre end det kurverne i Figur 3 viser.

Pladsforhold kan, udover en ønsket temperatur på den varme side, også være afgørende for valget af kølemiddel i anlægget. Her kommer HFC anlæggene til at fylde mest pga. af den maksimale fyldning på 10 kg. CO₂ anlæggene er de mest kompakte.

Erfaringsmæssigt er der typisk følgende specifikke priser for forskellige typer af køleanlæg. Priserne er vurderet ud fra, at der skal være vandkølet kondensator.

I kapacitets området op til 500 kW kan det komme på tale at anvende HFC anlæg. Anlæg over 500 kW vil næsten altid være Ammoniak anlæg.

Anlægstype	kr. pr. kW kuldeydelse $T_e/T_c = 0/35 \text{ } ^\circ\text{C}$
Ammoniak	2.500 – 3.000
HFC	2.000 – 2.500
CO ₂	3.000

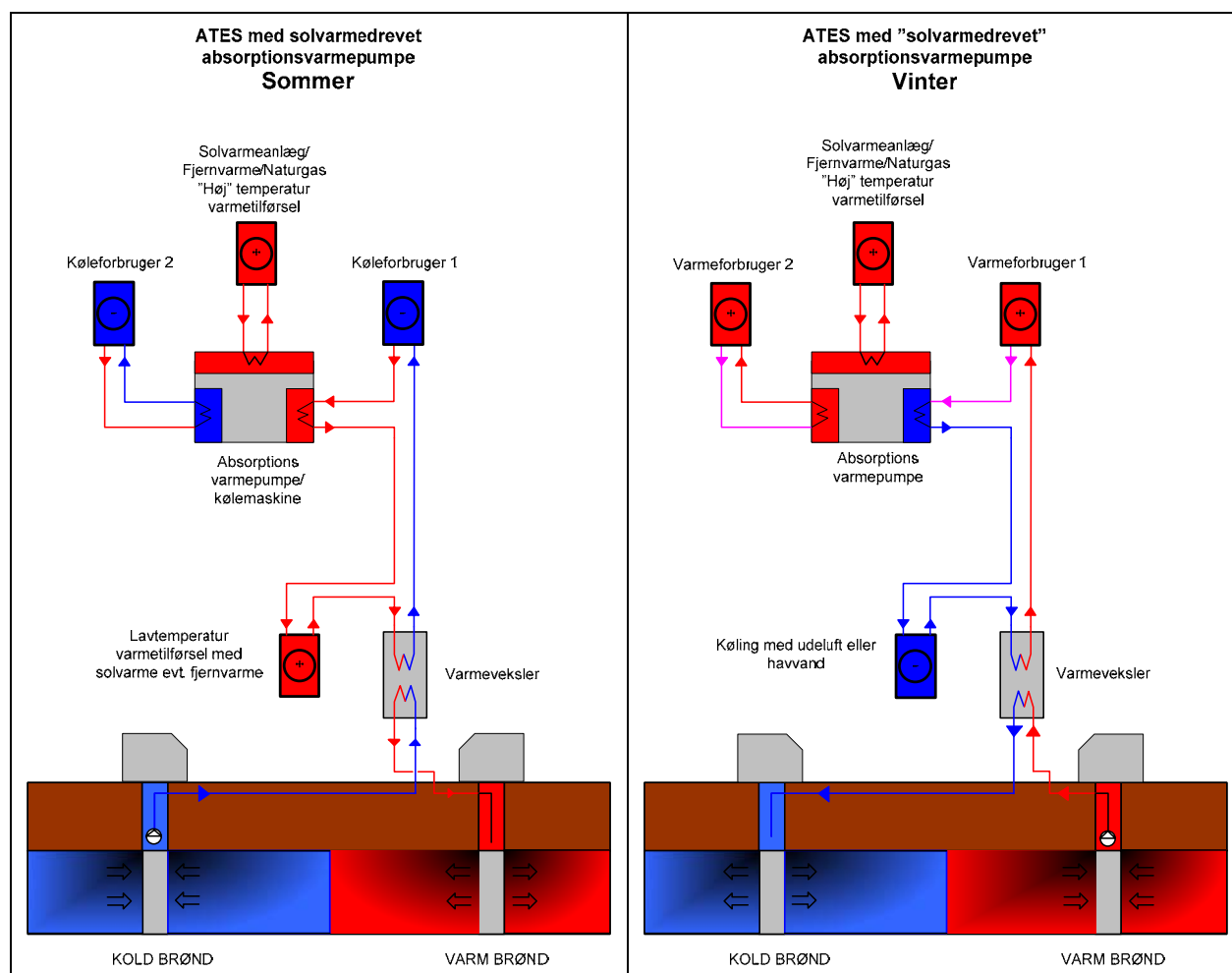
Tabel 1. Specifikke priser for køleanlæg.

8.6 Varmedrevne anlæg

Det er også muligt at lave et varmedrevet varmepumpeanlæg baseret på et absorptionskøleanlæg. Anlægget tænkes drevet af et solvarmeanlæg kombineret med en anden energikilde som fjernvarme. Rentabiliteten af anlægget vil afhænge meget af prisen på fjernvarmen. Bemærk yderligere at solfangerne også kræver et areal uden døre.

Et anlæg som dette vil typisk have et varmeforhold på ca. 0,6. Dvs. at for hver kW køl der skal bruges hos køleforbrugeren skal der betales med næsten dobbelt så meget varme ved den høje temperatur.

Anlægget er muligvis interessant ved komfortkøling da størstedelen af kølebehovet ligger i perioden om dagen med sol, hvor solvarmeanlægget kan anvendes.



Figur 8. Eksempel på solvarmedrevet absorptionsvarmepumpe.

Sammenfatning

Den ønskede temperatur på varmen fra et varmepumpeanlæg har afgørende indflydelse på valget af kølemiddel og effektiviteten af anlægget. Ved meget høje temperaturer på eksempelvis 80°C kan CO₂ anlæg anvendes, her skal man dog være opmærksom på at en god effektivitet for anlægget kræver at returtemperaturen efter opvarmning er lav (30°C eller lavere).

Ammoniak-anlæg er de mest effektive anlæg ved temperaturer op til 65°C på den varme side.

Kompressorer til ammoniak findes i dag i alle størrelser monteret fra fabrikken med omdrejningsreguleret motor. Det er derfor muligt at dække mange kapacitetsbehov effektivt.

HFC-anlæg må ikke være påfyldt mere end 10 kg kølemiddel, hvilket betyder at der normalt anvendes flere anlæg for at opfylde kapacitetsbehovet. De mange anlæg fordyrer både investeringen og serviceudgifterne. Anlæggene er pladskrævende. Effektiviteten bliver ofte mindre da små kompressorer har en lavere effektivitet end store kompressorer.

Der er lånt illustrationer og tekst fra:

Rapport fra Center for Køle- og varmepumpe teknik: **”MINISKALA-
VARMEPUMPE MED CO₂ SOM KØLE-MIDDEL TIL DECENTRALE
KRAFTVARMEVÆRKER”**

Rapport kan findes på www.varmepumpeinfo.dk

Rapport fra Miljøstyrelsen: **”CO₂ som kølemiddel i varmepumper”**

Rapport kan findes på www.mst.dk

Rapport fra Teknologisk Institut: ”CO₂-SYSTEMER designmanual”
Rapport kan findes på www.hfc-fri.dk
DONG Energy A/S

9. Ventilationsanlæg. Teknologistade

Hundsbæk & Henriksen A/S

10. Solvarme. Teknologistade.

Cenergia ApS

11. Bygningsreglement. Status og fremtid

ATES' muligheder for at bidrage til energirammen for bygninger

Beregningsprogrammet Be06 benyttes til eftervisning af, at en ny bygning overholder Bygningsreglementets krav om energiramme i forbindelse med byggesagsbehandling. Der skal således foreligge dokumentation for, at bygningen overholder energirammen med den valgte udformning og brug af materialer og installationer.

Be06 bygger på en periodestationær (tolv måneder) beregning af energistrømme og temperaturer i en bygning under indflydelse af alle de systemer i bygningen, som påvirker energiforholdene og temperaturen (personer, varmt brugsvand, belysning, udstyr, varmeanlæg, ventilationsanlæg, fordelingsanlæg, osv).

Opvarmning

På opvarmningssiden er den installation, som pt er tættest på et ATES system varmepumpen (se *Figur 9* for inddata) som bl.a. kan forsynes via jordslanger og levere varmen direkte til rumluften, til indblæsningsluften i et ventilationsanlæg eller til et vandbåret varmeanlæg.

Beskrivelse		Ny varmepumpe
Varmepumpe		
Type	Andel af etageareal, -	
Brugsår	<input type="text" value="0"/>	
Rumopvarmning		VBV
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	Nominel effekt, kW
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	Nominel COP, -, Inklusive pumper, ventilatorer og automatik
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	Rel. COP ved 50% last, -
Test-temperaturer, °C		
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	Kold side
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	Varm side
Jordslange	Jordslange	Kold side: Jordslange, Aftræk eller Udeluft
Rumluft		Varm side: Rumluft, Indblæsning eller Varmeanlæg
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	Særligt hjælpeudstyr, W, som ikke er med i nominel COP
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	Automatik, stand-by, W, fx pumpe til jordslange
Varmepumper tilknyttet ventilationen		
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	Temp. virk.grad for vgv før VP, -
<input type="text" value="0"/>		Dim. indblæsningstemperatur, °C, ved -12 °C udetemp.
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	Luftstrømsbehov, m ³ /s

Figur 9. Inddatadialog i Be06 for definition af varmepumper til levering af varme.

Det er således ikke direkte muligt at angive driftsforholdene for et ATES anlæg, idet temperaturen i den varme brønd ikke kan gives som inddata. Dette vil dog til dels kunne omgås i en test-fase ved en justering af effektiviteten (COP faktoren) for varmepumpen.

Køling

Køling, som især benyttes til andre bygningstyper end boliger, betragtes i Be06 som et simpelt mekanisk køleanlæg, som er defineret ved en kølevirkningsgrad samt en eventuel forøgelsesfaktor (se Figur 10). Indpasning af et ATES anlæg kan i en test-fase ske ved en justering af effektiviteten for et mekanisk køleanlæg.

Beskrivelse		Mekanisk køling
Mekanisk køling (eldrevet)		
<input type="text" value="2"/>	Kølevirkningsgrad, -, (incl. alle pumper, blæsere og automatik)	
<input type="text" value="1,5"/>	Forøgelsesfaktor, -, Ekstra køleenergi p.g.a. vandudslag	
Dokumentation, (effektivitet og virkningsgrad)		
<input type="text"/>		

Figur 10. Dialog med inddata for et mekanisk køleanlæg i Be06.

Mulighed for tilpasning af Be06 med ATES-model

Be06 programmet er under stadig udvikling, og der er allerede nu planlagt udsendelse af en opdateret version i løbet af efteråret 2007. Denne udvidelse vil bl.a. omfatte en række alternative energikilder, hvorfor en justering for at kunne beregne et ATES anlæg vil passe godt sammen med disse planer. For at kunne få implementeret en ændring af Be06 til at kunne beregne virkningen af et ATES anlæg er der behov for:

1. at definere de algoritmer, som er nødvendige for beregningen,
2. at definere eventuelle hjælpesystemer (pumper, ventilatorer, osv), som skal tilknyttes systemet for at få det til at operere,
3. at vurdere, om algoritmerne eventuelt kan integreres i algoritmerne for varmepumper og mekanisk køling,
4. at vurdere, om indlæsning af inddata eventuelt kan ske gennem en udvidelse af de eksisterende dialoger for varmepumper og mekanisk køling,
5. at vurdere, om data for reservoirets temperatur over årets 12 måneder kan gives som standardværdier eller som inddata af brugeren.

En udvidelse af Be06, og dermed beregningen af en bygnings energibehov i forhold til energirammen, med mulighed for at beregne ydelsen fra et ATES anlæg, bliver umiddelbart opfattet positivt, under forudsætning at ovenstående beskrivelse af modellen kan etableres.

Om der skal implementeres en udvidelse af Be06 med nye modeller specielt rettet mod brugen af ATES systemer er en politisk beslutning.

Eksisterende modeller i TRNSYS

I simuleringstværværktøjet TRNSYS findes en række modeller som alle er relateret til forskellige konfigurationer af energi hentet fra / lagret i undergrunden. I de følgende gengives nogle af de informationer som kan findes på www.trnsys.com.

TRNSYS

TRNSYS is a well respected energy simulation tool under continual development by a joint team made up of the Solar Energy Laboratory (SEL) at the University of Wisconsin – Madison, The Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) in Sophia Antipolis, France, Transsolar Energietechnik GmbH in Stuttgart, Germany and Thermal Energy Systems Specialists (TESS) in Madison, Wisconsin. TRNSYS currently boasts a graphical interface, a library of 80 standard components, add on libraries offering over 300 other components, a world wide user base and distributors in France, Germany, Spain, Sweden, Luxembourg, the US and Japan.

Model libraries in TRNSYS

Through various consulting projects well over 200 TRNSYS components have been developed. The components contained in these libraries represent the best of our in-house *Types*. Each of the components in these libraries has been extensively tested and comes complete with on-line documentation, source code, example projects, printed reference documentation and free technical support. Each of these libraries comes in a format compatible with the Simulation Studio front-end (source code, documentation, on-line help, icon, etc.) but may also be used outside that environment. The source code is provided for each of these models so that they can be quickly and easily modified if the user wishes to make changes to the model. Each of the component libraries comes with or more Studio/TRNSYS projects that demonstrate typical uses of the component models found in that library. Screen captures from several of the example projects are included in the detailed information section for each library. With the release of Libraries version 2.0, extensive technical documentation as well as new models and new examples have been added.

Geothermal Heat Pump Component Models

Ground Temperature Model



This component models the temperature of the earth as a function of depth and time of year. The model is based on the Kusuda correlation and is used in geothermal heat pump applications and basement loss calculations.

Simple Buried Pipe



This component models a horizontal pipe that is buried in the earth. This simple approach (based on the standard TRNSYS type 31 plug-flow approach) requires the user to provide the heat transfer coefficient from the fluid to the ground and the ground temperature (usually provided by the new ground temperature model). Heat storage in the ground is not considered.

Detailed Buried Pipe (Horizontal Ground Heat Exchanger)



This component models a horizontal pipe (or horizontal ground heat exchanger) that is buried in the earth. This model relies on a finite-difference approach to solve the temperature distribution in the pipe and soil and is based on a method developed by Oak Ridge National Laboratories. Heat storage in the ground is considered, but heat exchange between several buried pipes is not considered.

Tube-in-Tube Vertical Ground Heat Exchanger



This component represents the finest vertical ground heat exchanger model in the world today! Written by the University of Lund, Sweden, this component has been extensively tested and updated over the past several years and is available for the very first time in TRNSYS format. The model includes both tube-in-tube and U-tube vertical ground heat exchangers (both single and multiple). The models rely on both analytical and finite-difference methods to model the complex heat transfer between the working fluid and the earth in which the heat exchanger is buried. This is the only ground heat exchanger model that we'll use - it's simply the best there is.

U-Tube Vertical Ground Heat Exchanger

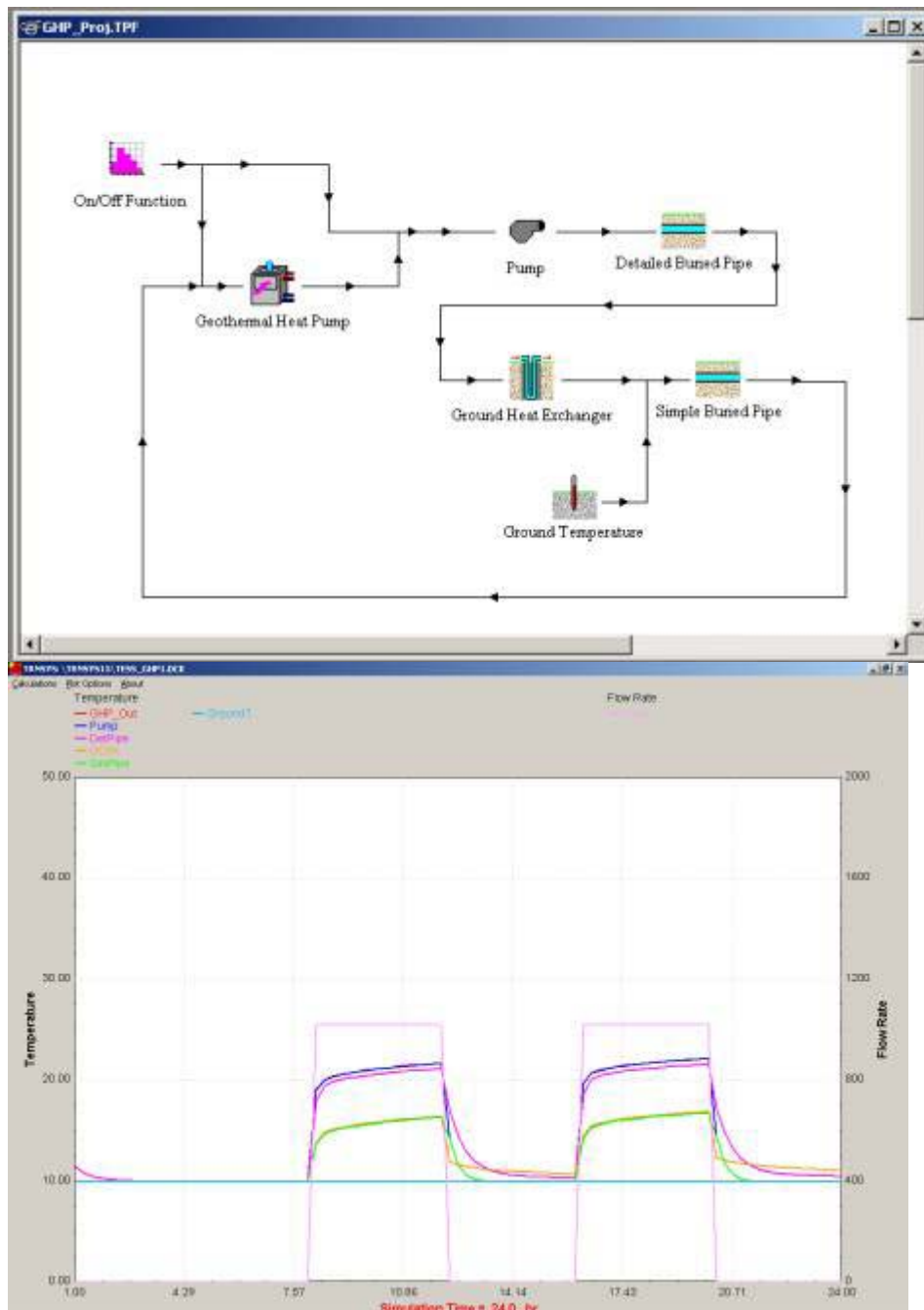


This component represents the finest vertical ground heat exchanger model in the world today! Written by the University of Lund, Sweden, this component has been extensively tested and updated over the past several years and is available for the very first time in TRNSYS format. The model includes both tube-in-tube and U-tube vertical ground heat exchangers (both single and multiple). The models rely on both analytical and finite-difference methods to model the complex heat transfer between the working fluid and the earth in which the heat exchanger is buried.

Geothermal Heat Pump



This new component models the performance of a water-source heat pump (water to refrigerant to air heat transfer). The component uses a look-up table approach to calculate the cooling and heating capacities and power based on tables of manufacturer's data. Two sample data files are included with purchase (1 heating and 1 cooling). Data files for other manufacturer's/models may be created quickly and easily by the user and incorporated into the simulations. This model includes a de-superheater option for the heating of a domestic hot water stream (see next page for examples).



Sample Project and Output from one of the Ground Heat Pump Library Examples.

12. Kortlægning af potentiale for ATES i DK.

Med henvisning til rapporten "Seasonal Thermal Storage in North-West Europe" udarbejdet som en EEC-rapport under Generaldirektoratet XVII Energi, Thermie B-programmet DIS-0463-95-NL vurderes det muligt at etablere mindst 400 ATES-anlæg i Danmark. Anages en gennemsnitlig grundvandscirkulation på 300.000 m³/år pr. anlæg, modsvarer det en

total grundvandsvirkulation på 120.000.000 m³/år eller mindre end 1% af den årlige grundvandsdannelse i Danmark. Energibesparelsen ved at cirkulere 120.000.000 m³ grundvand pr. år er ved antagelse af en ligelig fordeling mellem køling og opvarmning ca. 128 GWh el og ca. 700 GWh varme svarende til en besparelse på 100-200 mio. kr./år for el og 300-600 mio. kr./år for varme i alt en besparelse på 400-800 mio. kr./år. CO₂-besparelsen bliver ca. 76.000 tons CO₂/år for eldelen og ca. 144.000 tons CO₂/år på varmedelen i alt ca. 220.000 tons CO₂/år.

Antages at hvert anlæg i gennemsnit koster 6 mio. kr. at etablere bliver den samlede investering på 2400 mio. kr. Med en potentiel energibesparelse bliver den simple tilbagebetalingstid på mellem 3-6 år afhængig af energipriserne. Bliver det i fremtiden tilladt at lagre varme ved 30°C isf. det nugældende krav på 20°C kan ovennævnte besparelspotentiale og CO₂-reduktion fordobles og tilbagebetalingstiden halveres.

ATES-teknologien har under ovennævnte forudsætninger et potentiale for at reducere Danmarks samlede CO₂-udledning med mellem 0.5 og 1%.

13. MYNDIGHEDSFORHOLD

Det nye bygningsreglement er trådt i kraft med virkning fra pr. 1. april 2006 jf. ref. /1/ og /2/.

Bygningsreglementet stiller krav om en betydelig besparelse på 30% i bygningers samlede energiramme i forhold til det tidligere bygningsreglement. Der vil inden for få år ske yderligere stramninger.

Fra november 2006 er anvendelsen af grundvand til kølings- og opvarmningsformål blevet reguleret af en bekendtgørelse udstedt af Miljøstyrelsen. For nærmere oplysninger henvises til ref. /3/.

14. Barrierer og virkemidler for teknologiens udbredelse.

Det har været en mærkbar barriere for teknologiens udbredelse i Danmark, at der ikke igennem 1990'erne og efter årtusindskiftet har været officiel opbakning til teknologien i

Danmark, herunder manglende støtte til dansk deltagelse i det internationale samarbejde under IEA. Der har også været en markant svag deltagelse fra dansk side (rådgivere og arkitekter) i de internationale konferencer og seminarer indenfor området. ATES har derfor i Danmark været markedsført af et meget lille antal visinære personer og firmaer med risikovillighed og iværksætterånd. Dette står i skærende kontrast til fx Sverige og Holland, hvor de statslige myndigheder aktivt har promoveret teknologien ved massive tilskud i udviklings- og markedsføringsfaserne. Det er trods alt lettere for ny teknologi af markedspenetrere, hvis myndighederne deltager aktivt i de indledende faser. En barriere har været, at der indtil efteråret 2006 ikke var landsdækkende retningslinier for sagsbehandling og vilkår for grundvandskøleanlæg og grundvandsvarmepumpeanlæg. De daværende amter var sagsbehandlere for ansøgninger (Miljøkontrollen i København) og de var som oftest meget lang tid om at træffe afgørelse i ansøgninger om tilladelse. En barriere har også været, at der i de oprindelige amter i Danmark, har siddet sagsbehandlere, der har haft en personlig uvilje mod at give tilladelse til disse anlæg, hvilket i mange tilfælde skyldes uvidenhed om konceptet og i lyset af manglende uvildig oplysning fra de statslige myndigheder har man følt det sikrere (og lettere) at sige nej end ja til en ansøgning. Et antal ansøgninger havnede derfor som klagesager i Miljøstyrelsen og Miljøankenævnet. I disse instansers afgørelser var linien imidlertid en meget stor imødekommenhed overfor konceptet. En barriere har også været, at der i Danmark har været den opfattelse, at alt grundvand skal være til rådighed for drikkevandsindvinding, hvorfor mange amter har været meget forsigtige med at give tilladelse til grundvandskøleanlæg selv i områder hvor der ikke i regionplanerne var planlagt for fremtidig vandindvinding. Denne interessekonflikt tager den nye bekendtgørelse hånd om på bedste vis. De danske rådgiveres og arkitekters manglende viden om ATES har naturligvis også den konsekvens, at developere og byggeriets øvrige beslutningstagere og investorer ikke får en tilstrækkelig kvalificeret og nyanceret rådgivning i byggeriers indledende faser. De fremadrettede virkemidler for ATES udbredelse i Danmark er først og fremmest, at kunne vise konceptets potentiale via

etablerede anlæg. Dernæst er det vigtigt, at de uvildige myndigheder (Energistyrelsen og Miljøstyrelsen) og forsyningsselskaber træder mere aktivt ind i oplysningen om disse anlæg. Et virkemiddel kunne også være at forsyningsselskaberne aktivt investerer i etablering og drift af ATES-anlæg.

15. Lovgivning.

Ansøgninger om tilladelse til etablering af ATES-anlæg behandles efter Vandforsyningsloven (tilladelse til indvinding af grundvand) og Miljøbeskyttelsesloven (tilladelse til tilbageledning af grundvand). Som følge af Kommunalreformen er det kommunerne, der er sagsbehandlere for ansøgningerne.

I medfør af §7a, stk. 1 og §19 stk. 5 i lov om miljøbeskyttelse jf. lovbekendtgørelse nr. 753 af 25. august 2001 har Miljøministeriet udstedt BEK 1206 af 24. november 2006: "Bekendtgørelse om varmeindvindingsanlæg og grundvandskøleanlæg."

Bekendtgørelsen fastsætter regler for kommunalbestyrelsens meddelelse af tilladelse til etablering og drift af varmeindvindingsanlæg og grundvandskøleanlæg, afledning samt egenkontrol med sådanne anlæg. Bekendtgørelsens regler skal sikre, at grundvandskvaliteten i magasinet bevares, og at der ikke er fare for forurening af vandforsyningsanlæg.

I forbindelse med anlægsetableringen skal borearbejder udføres efter gældende bestemmelser omfattende den såkaldte boringsbekendtgørelse og uddannelsesbekendtgørelse.

16. Beregningsværktøj for udlægning af ATES

Enopsol ApS
DONG A/S

Hundsbæk & Henriksen A/S
Cenergia ApS
SBI

17. Gennemregning af 4 anlægseksempler

Enopsol ApS
DONG A/S
Hundsbæk & Henriksen A/S
Cenergia ApS
SBI
Anlægsværter

18. Checkliste for etablering af ATES

Etableringen og driften af et ATES-system er forholdsvis kompleks, idet anlæggene skal designes, bygges og drives individuelt ud fra de naturgivne forhold på etableringsstedet.

Generalt kan et projekt opdeles i flg. faser:

1. Forundersøgelse
2. Projektering og engineering
3. Entrepriser og leverancer
4. Udførelse
5. Dokumentation
6. Driftsinstruktion
7. Drift og overvågning
8. Driftsrapport

Forundersøgelsen inddeles i 3 faser:

Ad 1) Forundersøgelse fase 1. Indledende analyse.

Omfatter:

- Bygningens køle- og varmebehov og tilhørende temperaturkrav
- Geologi og hydrogeologi
- Grundvandskemi
- Grundvandsinteresser
- ATES indpasning i bygningens samlede energisystem
- Anlægsøkonomi, energibesparelse og CO₂-reduktion
- Indpasning i bygningsreglementet
- Myndighedskontakt og møder med myndigheder og interessenter
- Grundvandshydraulisk modelanalyse
- Grundvandstermisk modelanalyse
- Ansøgning om tilladelse til anlægsetablering eller prøveboring(er)
- Rapport

Ad 1) Forundersøgelse fase 2. Prøveboring og prøvepumpning.

Omfatter:

- Etablering af lagfølgeboring(er)
- Prøvepumpningsprogram
- Grundvandskemisk analyse
- Fuldskala test forsøg fx med testcontainer
- Analyse af feltmålinger
- Rapport

Ad 1) Forundersøgelse fase 3. Miljøansøgning.

- Rekalibrering af grundvandshydraulisk model
- Rekalibrering af grundvandstermisk model
- Endelig boringsplaceringer
- Hydraulisk og termisk konsekvensanalyse for grundvandsmagasinet
- Evt. møder med myndighederne
- Rapport
- Udarbejdelse af miljøansøgning

Ad 2) Projektering og engineering.

Det ideelle udgangspunkt for anlægsprojekteringen er naturligvis at vente til forundersøgningsprogrammet er fuldt gennemført. Dette ønske kan ikke altid af tidsmæssige årsager opfyldes. Projekteringen startes derfor ofte så snart ATES-projektet er defineret.

Her tænkes især på installationer over jorden som rør, varmeveksler, ventiler, instrumentering, elinstallationer og automatik. I denne fase

udarbejdes funktionsbeskrivelser og funktionskrav, udbudsmateriale og tilbudsindhentning for underentrepriser. Krav til og udbudsmaterialet for prøveboringer udarbejdes også i denne fase. Når resultatet fra prøveboring(er) og prøvepumpning(er) og andre testresultater foreligger kan der komme projektændringer, herunder boringsantal og boringernes indbyrdes placering.

Ad 3) Entrepriser og leverancer

Der skal indhentes tilbud på anlægsudførelsens enkelte entrepriser eller totalentreprisetilbud. Et totalentreprisetilbud kan dog omfatte samtlige projektfaser. Entrepriser involveret er typisk:

- Boringsentreprise
- Boringsudbygning og –afslutningsentreprise
- Rørentrepriser
- Graveentreprise
- Kabelentreprise
- Tavleentreprise
- El- og fortrådningsentreprise
- SRO-entreprise
- Varmevekslerentreprise
- Instrumenentreprise
- Ventil- og automatikentreprise
- VVS-entreprise
- Isoleringsentreprise

Ad 4) Anlægsudførelse.

Når tilladelser er opnået kan anlægsudførelsen påbegyndes. Her vil den rigtige rækkefølge være at etablere de resterende boringer først, for at sikre sig at de nødvendige vandmængder er til rådighed med det forventede antal boringer og den forventede vandkemi.

Ad 5) Dokumentation.

Der skal udarbejdes fyldestgørende anlægsdokumentation til bygherre, driftsorganisation og myndighederne jf. vilkår i tilladelsen. Anlægsdokumentationen skal indeholde CE-mærkning af det samlede anlæg.

Ad 6) Driftsinstruktion.

Der skal udarbejdes fyldestgørende instruktion til driftspersonalet, således at anlægget kan betjenes forsvarligt.

Ad 7) Drift og overvågning

I anlæggets driftsfase skal dette styres og overvåges således at boringer og anlæg ikke bliver ovebelastet og således at grundvandet ikke bliver forurennet ved lækager i varmevekslere. Der skal indbygges automatisk virkende sikkerhedssystemer, der er nedregulerer anlægget eller stopper det helt, hvis forudinstillede værdier overskrides.

Ad 8) Driftsrapport

Anlæggets overvågningsanlæg skal være udstyret med datalogging af nøgleparametre, således at fejlsøgning lettes og således at de nødvendige rapporter til myndighederne let kan genereres.

19. FREMTID

På baggrund af de nugældende og i fremtiden forventede, skærpede krav til besparelser i energiforbruget for bygninger vil ATES blive et af de teknologier, der vil opnå en større anvendelse i Danmark. Systemet er også attraktivt i kombination med solvarme, udeluftkøling og varmepumper.

20. REFERENCER

/1/ Lov om fremme af energibesparelser i bygninger. Lov nr. 585 af 24. juni 2005.

/2/ Europaparlamentets og Rådets Direktiv 2002/91EF af 16. december 2002 om bygningers energimæssige ydeevne.

/3/ Bekendtgørelse 1206 af 24. november 2006:
"Bekendtgørelse om varmeindvindingsanlæg og grundvandskøleanlæg."