

ELFORSK PSO-F&U 2007

Grundvandsvarmepumper og -køling
med grundvandsmagasiner som
sæsonlager

BILAG 1

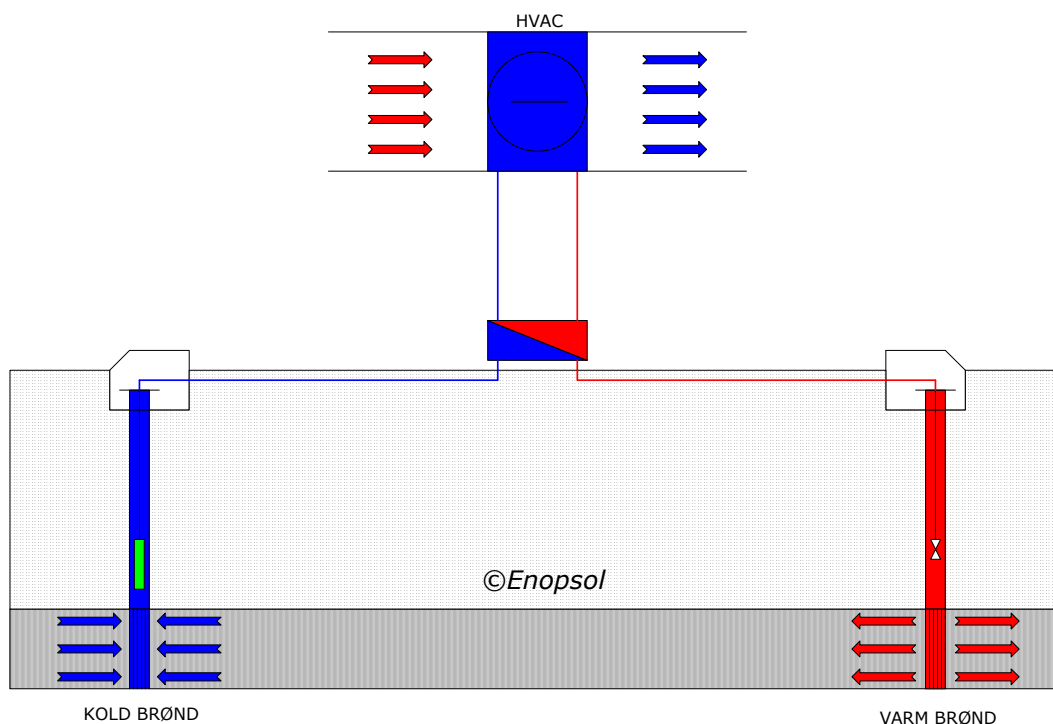
Nomogrammer til beregning af pris for køling og
opvarmning med ATES-anlæg

Indholdsfortegnelse

1. ATES-system med grundvandskøling. Beregning af kølepris. _____	2
2. ATES-system med grundvandsopvarmning. Beregning af varmepris. _____	4
3. ATES-system suppleret med kompressorkøling. Beregning af kølepris. _____	6
4. ATES-system suppleret med varmepumpe drift. Beregning af varmepris. _____	9
5. ATES-system. Beregning af køle- og varme-besparelse i sammenligning med traditionelle løsninger. _____	12
6. ATES-system. Metode til beregning af COP for køle-kompressor anlæg og effektfaktor for varmepumpe anlæg. _____	15
7. ATES-system suppleret med anlæg for varme- og kuldelagring. _____	18

1. ATES-system med grundvandskøling. Beregning af kølepris.

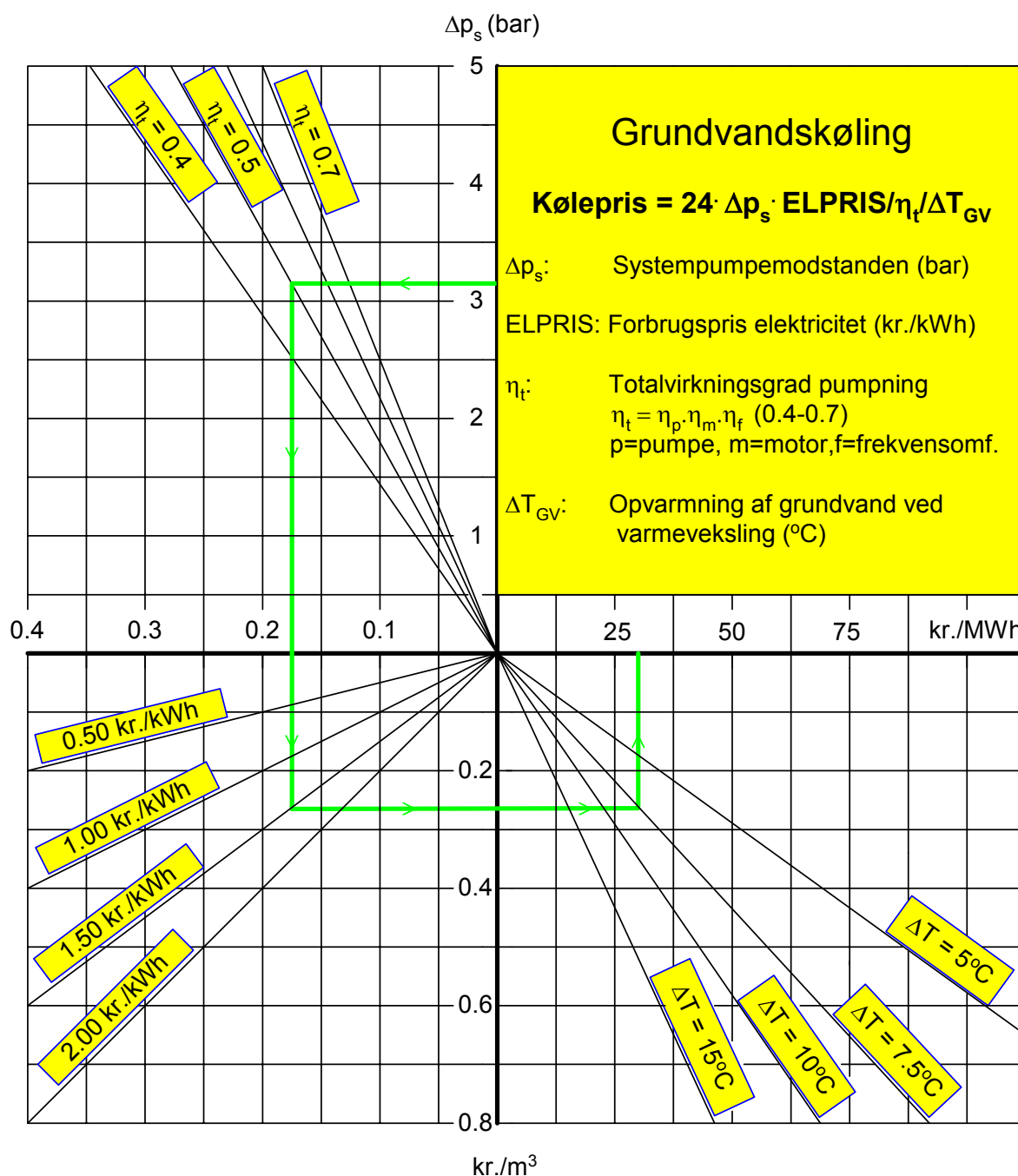
Systemet er vist i figur 1. Køleprisen beregnes i kr./MWh ved hjælp af nomogrammet på figur 2.



Figur 1. ATES-system. Køling med grundvand.

Forklaring til brug af nomogrammet i figur 2:

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

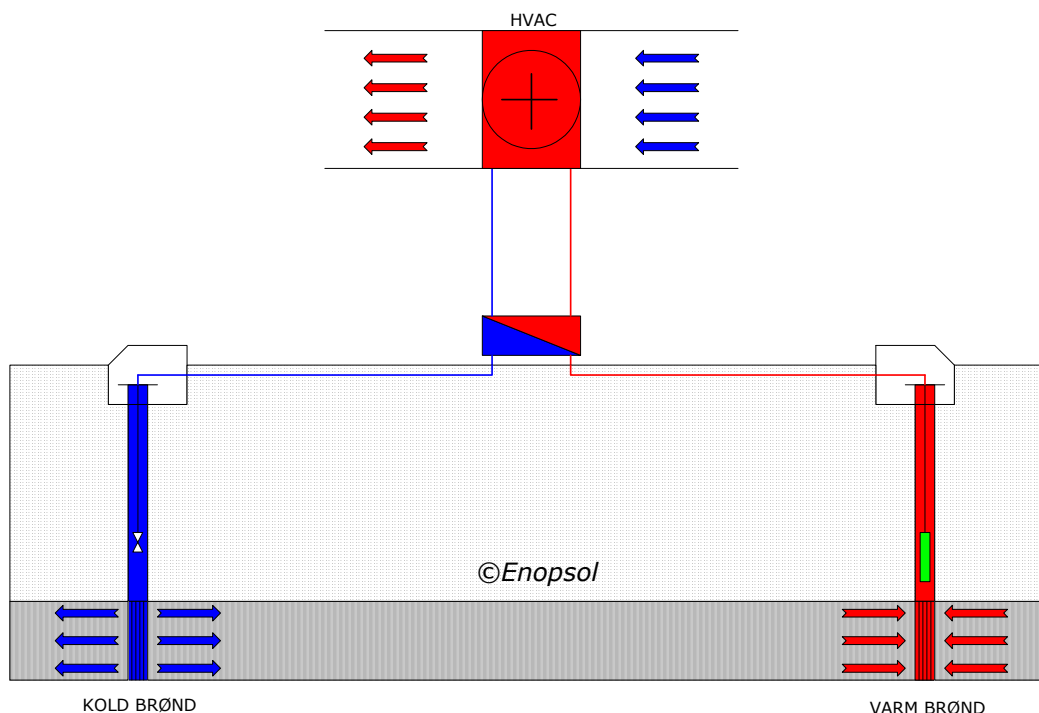


Figur 2. ATES-system i figur 1. Beregning af kølepris i kr./MWh.

Eksempel 1: I et grundvandskøleanlæg er systemmodstanden for cirkulation af grundvand i et driftspunkt beregnet til 3.15 bar. Grundvandspumpens totale virkningsgrad er i dette driftspunkt beregnet til 0.5 og elprisen er 1.50 kr./kWh. Ved varmeveksling er det i det omhandlede driftspunkt muligt at opvarme grundvandet med 7.5 $^{\circ}\text{C}$, hvorfor køleprisen kan aflæses til ca. 30 kr./MWh.

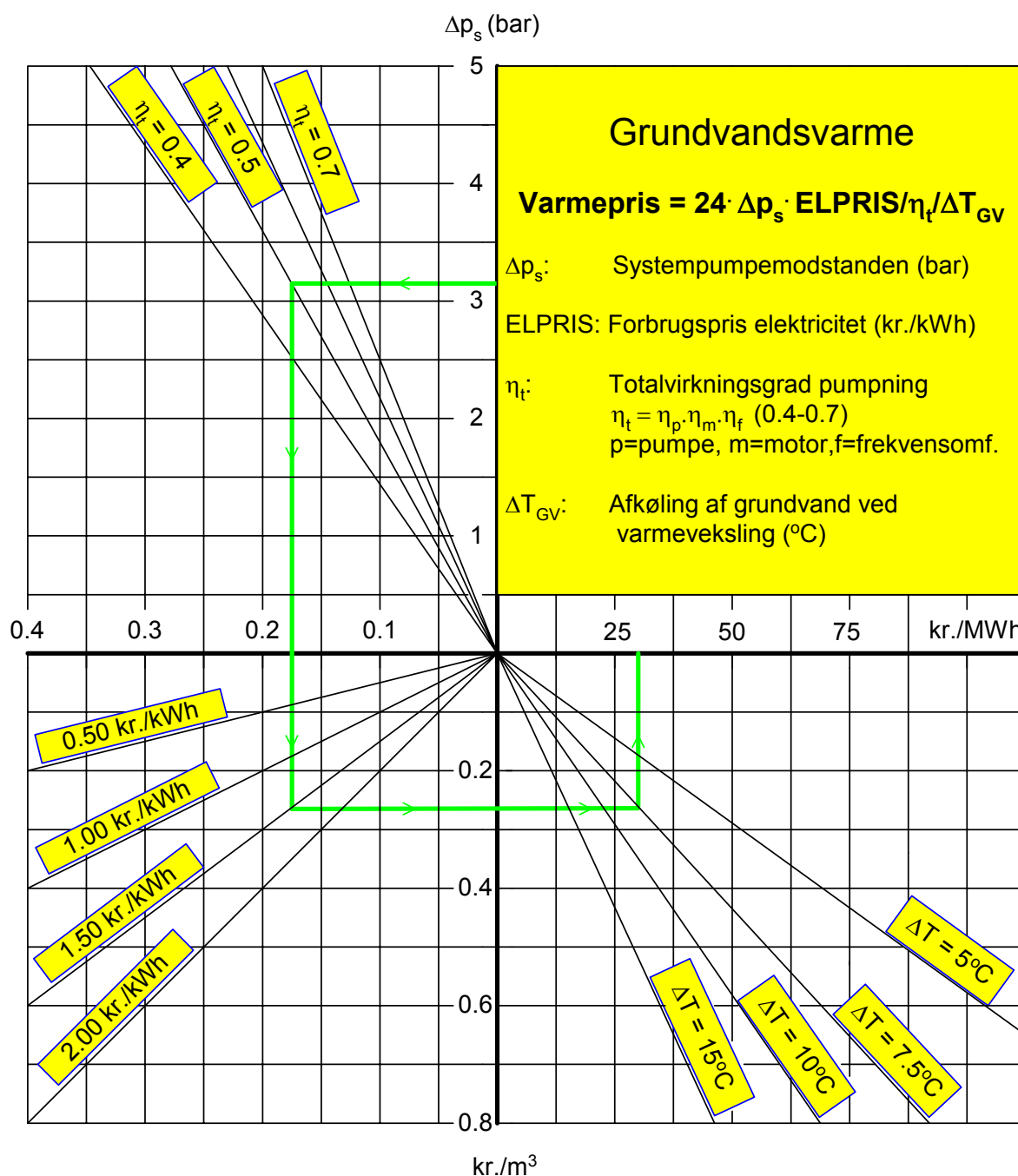
2. ATEs-system med grundvandsopvarmning. Beregning af varmepris.

Systemet er vist i figur 3. Varmeprisen beregnes i kr./MWh ved hjælp af nomogrammet på figur 4.



Figur 3. ATEs vintertid. Opvarmning med grundvand.

Forklaring til brug af nomogrammet i figur 4:
 Med den aktuelle systemmodstand (tryktab) for grundvandsvarmeanlægget indsat i bar bevæger man sig mod uret i diagrammet, indtil værdien for grundvandspumpens totale virkningsgrad. Herefter bevæger man sig lodret nedad i diagrammet indtil den elpris i kr./kWh, der betales for strøm til grundvandspumpen. 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.

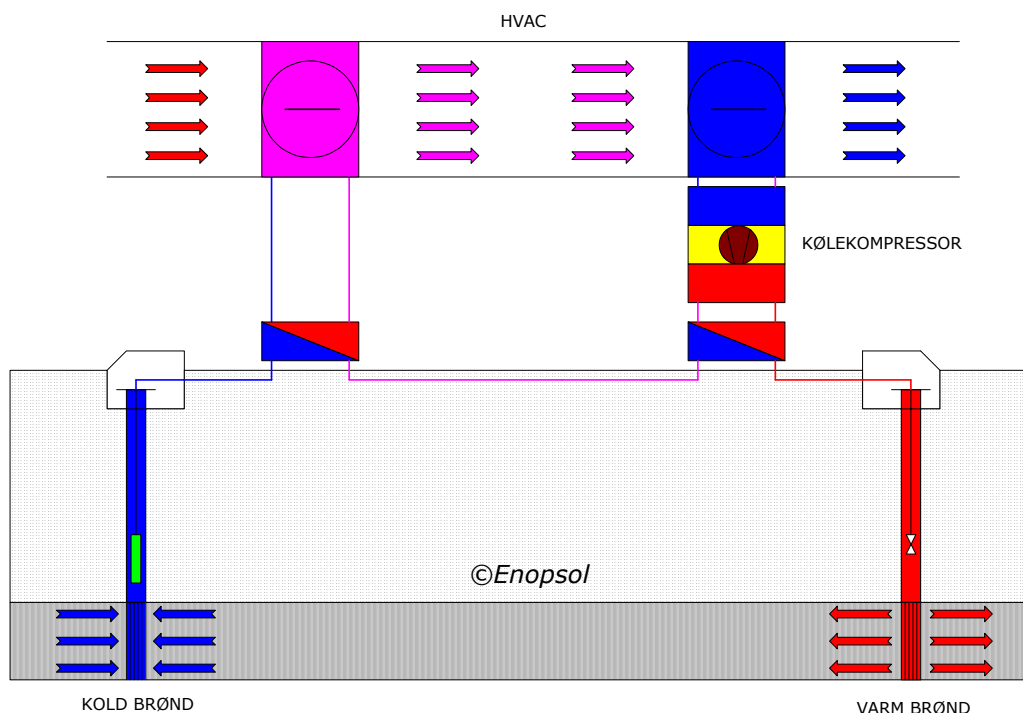


Figur 4. ATES-system i figur 3. Beregning af varmepris i kr./MWh.

Eksempel 2: I et grundvandskøleanlæg er systemmodstanden for cirkulation af grundvand i et driftspunkt beregnet til 3.15 bar. Grundvandspumpens totale virkningsgrad er i dette driftspunkt beregnet til 0.5 og elprisen er 1.50 kr./kWh. Ved varmeveksling er det i det omhandlede driftspunkt muligt at opvarme grundvandet med 7.5°C, hvorfor varmeprisen kan aflæses til ca. 30 kr./MWh.

3. ATES-system suppleret med kompressorkøling. Beregning af kølepris.

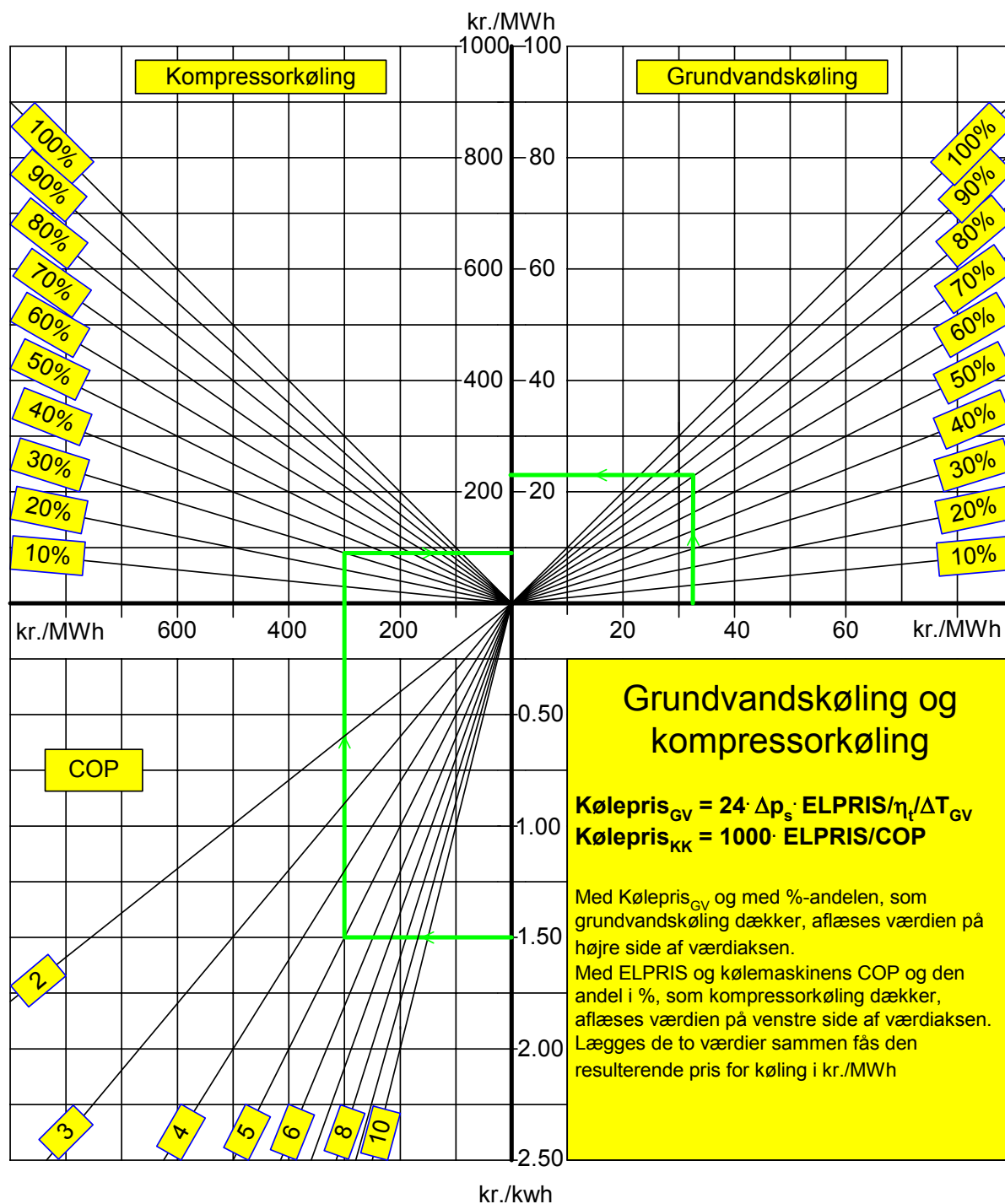
Systemet er vist i figur 5. Køleprisen beregnes i kr./MWh ved hjælp af nomogrammet på figur 6.



Figur 5. ATES-system. Køling med grundvand.

Forklaring til brug af nomogrammet i figur 6:

Figur 2 benyttes til at beregne køleprisen i kr./kWh for køling med grundvand. I det valgte driftspunkt for kølekompresor-anlægget bestemt ved anlæggets COP-faktor og den aktuelle elpris benyttes nomogrammets nederste venstre hjørne til at beregne køleprisen i kr./kWh for køling med kølekompresor-anlægget. Driftsfordelingen i % for grundvandsanlægget og i % for kølekompresoranlægget i den pågældende driftsperiode (fx et driftsår) beregnes. Med den aktuelle kølepris bevæger man sig lodret opad i nomogrammet indtil %-satsen for det omhandlede anlæg og herefter vandret ind på prisaksen. De to værdier lægges sammen og giver den resulterende kølepris i kr./MWh.



Figur 6. ATEs-system i figur 5. Beregning af kølepris i kr./MWh.

Eksempel 3: I et grundvandskøleanlæg er køleprisen beregnet til 32 kr./MWh ved anvendelse af figur 2.

For det aktuelle energisystem vil 70% af det totale kølebehov blive dækket med grundvandskøling og 30% med et traditionelt kølekompressor anlæg, hvor grundvand bortkøler kondensationsvarmen. I nederste venstre side af nomogrammet begynder man med den aktuelle elpris til drift af kølekompressorer, her 1.50 kr./kWh. Man bevæger sig med

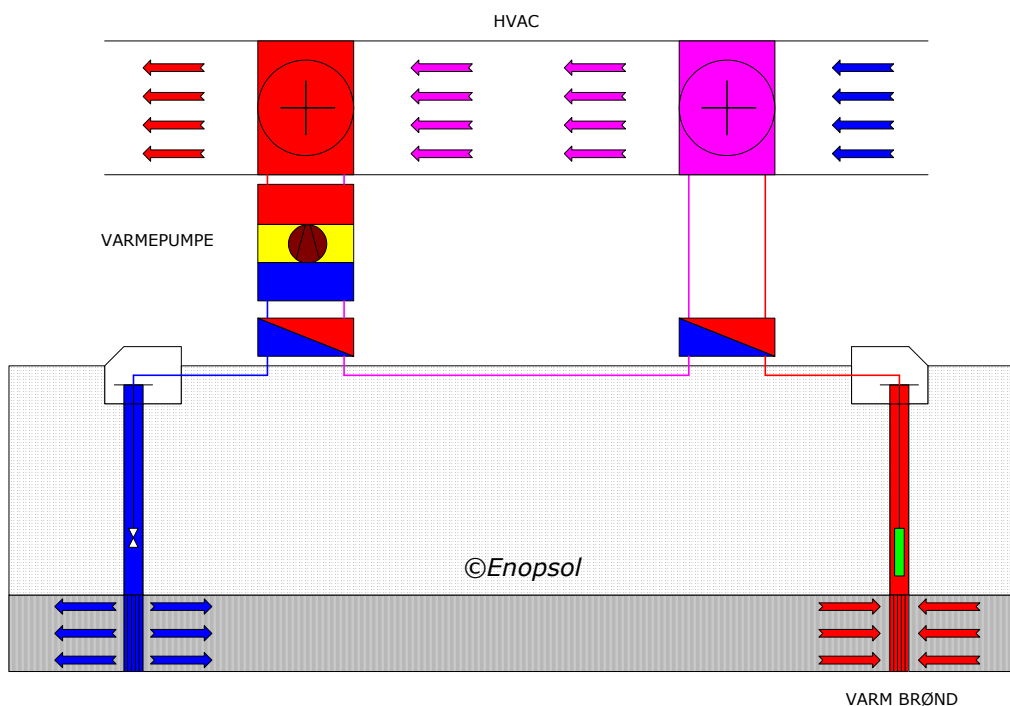
denne elpris vandret mod venstre indtil COP-værdien for det aktuelle kølekompressor-anlæg, her 5.0 (COP er forholdet mellem et køleanlægs køleydelse og det dertil medgåede el-effektforbrug). Herfra bevæger man sig lodret opad i diagrammet og aflæser ved passagen af x-aksen køleprisen i kr./MWh ved 100% kølekompressordrift, her 300 kr./MWh. Ved at fortsætte i lodret retning indtil man møder 30%-kurven kan man aflæse 90 kr./MWh på værdiaksen.

Med 32 kr./MWh for grundvandskøling benyttes højre side af diagrammet og man bevæger sig lodret opad indtil 70%-angivelsen. Herfra bevæger man sig vandret mod venstre og aflæser 22,50 kr./MWh på værdiaksen. Tillægges den vægtede værdi på 90 kr./MWh for kølekompressordrift bliver den resulterende kølepris på 112,50 kr./MWh.

I figur 10 er vist en metode til beregning af COP for kølekompressor-anlæg. Der henvises også til Bilag 2.

4. ATES-system suppleret med varmepumpedrift. Beregning af varmepris.

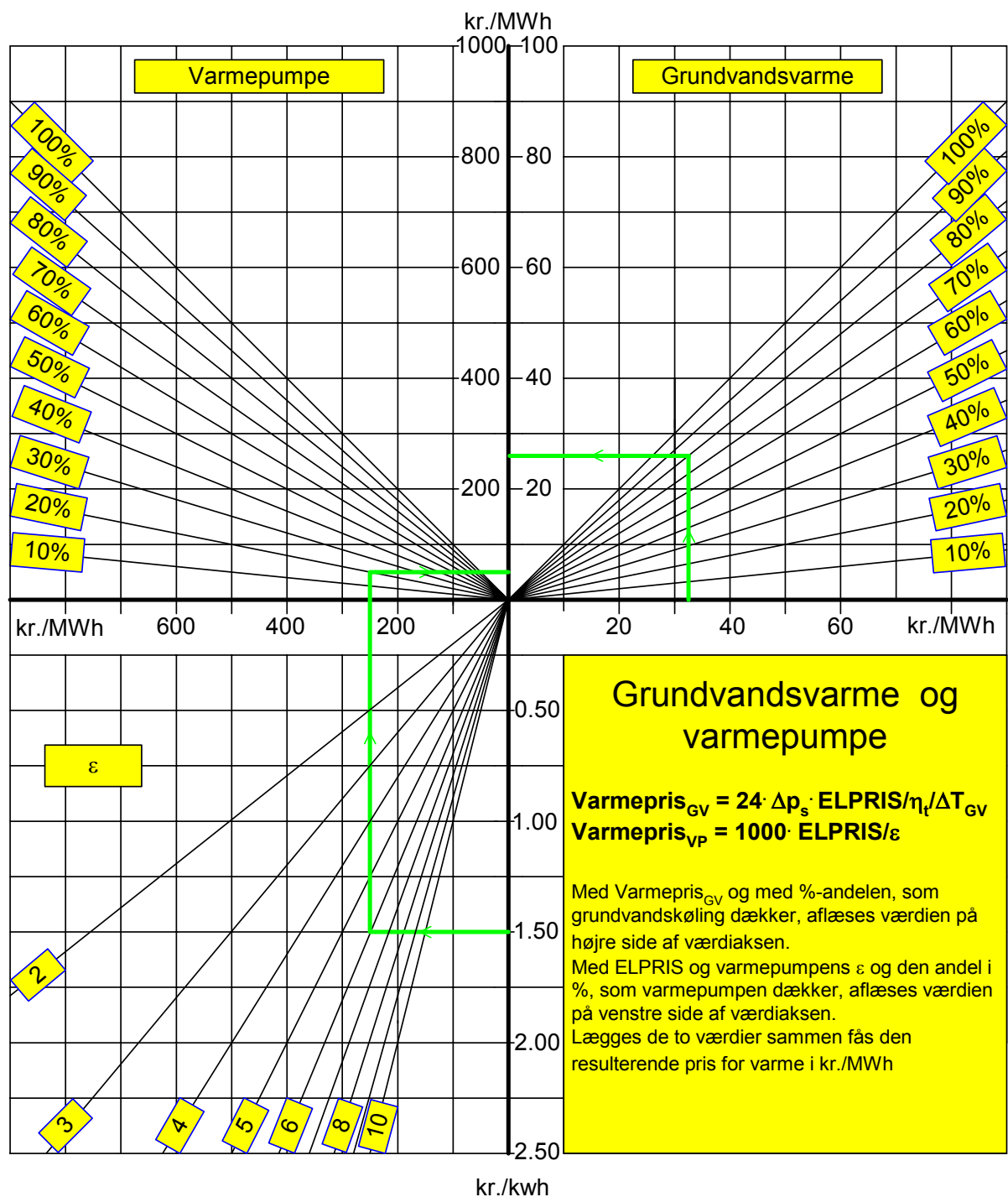
Systemet er vist i figur 7. Varmeprisen beregnes i kr./MWh ved hjælp af nomogrammet på figur 8.



Figur 7. ATES-system. Opvarmning med grundvand.

Forklaring til brug af nomogrammet i figur 8:

Figur 4 benyttes til at beregne varmeprisen i kr./kWh for opvarmning med grundvand. I det valgte driftspunkt for varmepumpeanlægget bestemmes ved anlæggets effekt-faktor og den aktuelle elpris benyttes nomogrammets nederste venstre hjørne til at beregne varmeprisen i kr./kWh for opvarmning med varmepumpeanlægget. Driftsfordelingen i % for grundvandsanlægget og i % for varmepumpeanlægget i den pågældende driftsperiode (fx et driftsår) beregnes. Med den aktuelle varmepris bevæger man sig lodret opad i nomogrammet indtil %-satsen for det omhandlede anlæg og herefter vandret ind på prisaksen. De to værdier lægges sammen og giver den resulterende varmepris i kr./MWh.



Figur 8. ATEs-system i figur 7. Beregning af varmepris i kr./MWh.

Eksempel 4: I et grundvandsvarmeanlæg er varmeprisen beregnet til 32 kr./MWh ved anvendelse af figur 2.

For det aktuelle energisystem vil 80% af det totale kølebehov blive dækket med grundvandskøling og 20% med et traditionelt varmepumpeanlæg.

I nederste venstre side af nomogrammet begynder man med den aktuelle elpris til drift af varmepumpen, 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 en varmepumpes varmeydelse og det dertil medgåede el-effektforbrug). 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 50 kr./MWh på værdiaksen.

Med 32 kr./MWh for direkte grundvandsopvarmning benyttes højre side af diagrammet og man bevæger sig lodret opad indtil 80%-angivelsen. Herfra bevæger man sig vandret mod venstre og aflæser 26 kr./MWh på værdiaksen.

Tillægges den vægtede værdi på 50 kr./MWh for varmepumpedrift bliver den resulterende varmepris på 76 kr./MWh.

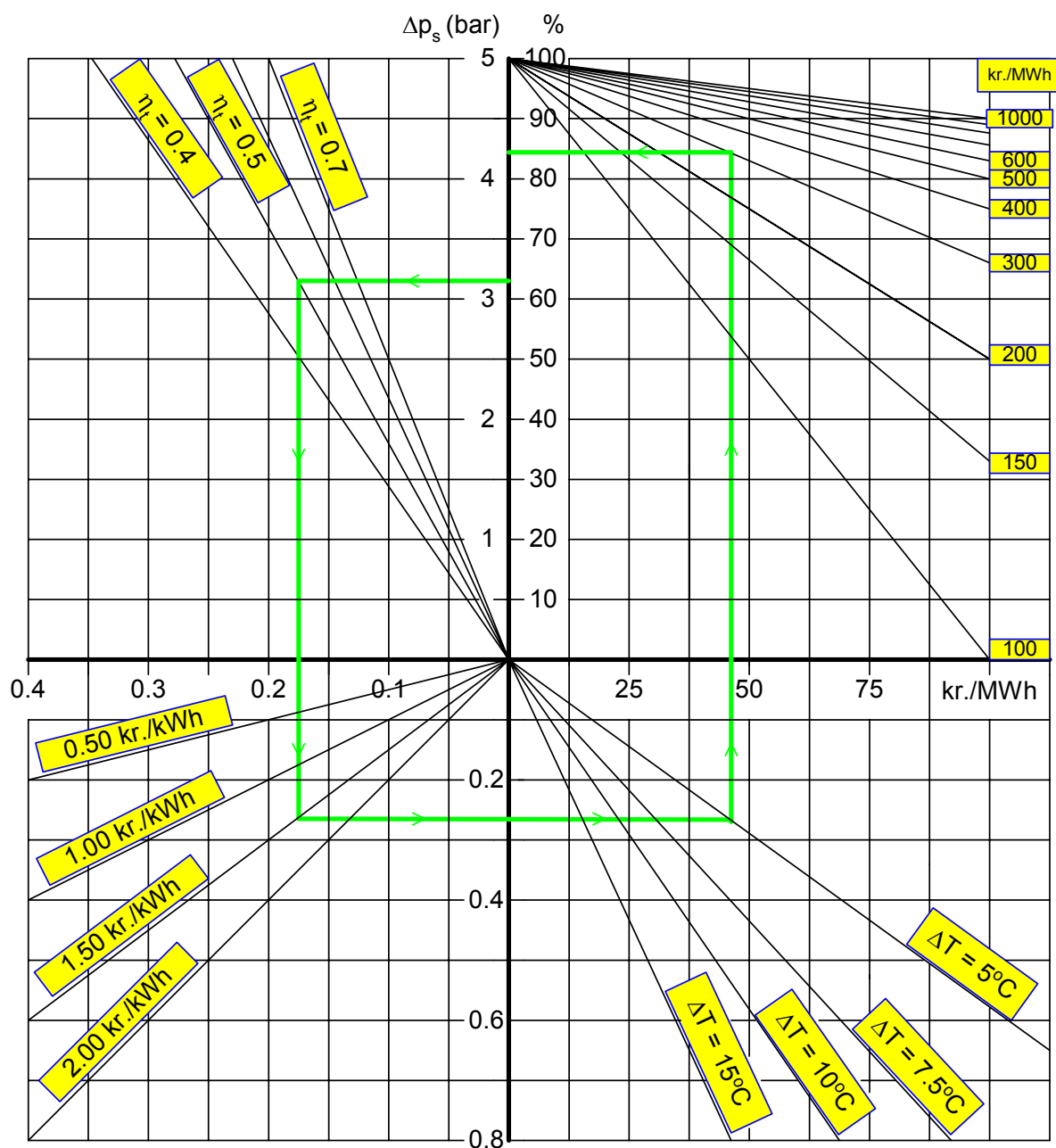
I figur 10 er vist en metode til beregning af effektfaktorer for varmepumpeanlæg. Der henvises også til Bilag 2.

5. ATES-system. Beregning af køle- og varme-besparelse i sammenligning med traditionelle løsninger.

Hvor meget der kan spares i % i forhold til traditionel køling og opvarmning kan beregnes i figur 9 når man kender den alternative pris for køling med fx kølekompressor anlæg og/eller den alternative pris for opvarmning med fx naturgasfyring.

Forklaring til brug af nomogrammet i figur 9:

Med den aktuelle systemmodstand (tryktab) for grundvandsvarmeanlægget indsat i bar bevæger man sig mod uret i diagrammet, indtil værdien for grundvandspumpens totale virkningsgrad. Herefter bevæger man sig lodret nedad i diagrammet indtil den elpris i kr./kWh, der betales for strøm til grundvandspumpen. Herfra bevæger man sig mod højre i diagrammet indtil værdien af den afkøling grundvandet opnår ved varmeveksling i °C. Man bevæger sig herefter lodret opad i diagrammet og under passagen af x-aksen kan man aflæse køle- og/eller varmeprisen for ATES-anlægget. I lodret retning stoppes ved den aktuelle pris for traditionel køling og/eller opvarmning. Beregningen afsluttes ved herfra at bevæge sig vandret til værdiaksen, hvor den %-vise besparelse aflæses.



Figur 9. ATES-system i figur 1 og 3. Beregning af besparelse i % ift. traditionelle løsninger.

Eksempel 5: I et grundvandskøleanlæg er systemmodstanden for cirkulation af grundvand i et driftspunkt beregnet til 3.15 bar. Grundvandspumpens totale virkningsgrad er i dette driftspunkt beregnet til 0.5 og elprisen er 1.50 kr./kWh. Ved varmeveksling er det i det omhandlede driftspunkt muligt at opvarme grundvandet med 5.0°C, hvorfor køleprisen kan aflæses til ca. 45 kr./MWh. Den alternative kølepris ved anvendelse af kølekompressor anlæg er 300 kr./MWh og der kan

aflæses en besparelse på ca. 85% ved grundvandskøling ift. traditionel kompressorkøling.

Anvendes varmeprisen på 76 kr./MWh som beregnet i Eksempel 4 for et kombineret anlæg med varmepumpe og er den alternative varmepris fx 600 kr./MWh kan besparelsen aflæses til 87%.

Kan grundvand ikke anvendes til direkte opvarmning som vist på figur 7, men kun via varmepumpen er varmeprisen i Eksempel 4 på 250 kr./MWh, hvorfor besparelsen kan beregnes til $[(600-250)/600]*100\% = 58\%$.

6. ATES-system. Metode til beregning af COP for kølekompressor anlæg og effektfaktor for varmepumpe anlæg.

Kølekompressorer og varmepumper

Nomogram for beregning af COP for kølekompressor anlæg og effektfaktor (ϵ) for varmepumpe anlæg. Højre side af nomogrammet omhandler kølekompressor anlæg og venstre side af nomogrammet omhandler varmepumpe anlæg.

For kølekompressor anlæg gælder $COP = \eta_C \cdot T_o / (T_k - T_o)$

For varmepumpe anlæg gælder $\epsilon = \eta_C \cdot T_k / (T_k - T_o)$

η_C : Carnotvirkningsgraden, som for kompressor anlæg typisk ligger mellem 0.4 og 0.6

T_o : anlæggets fordampningstemperatur (K)

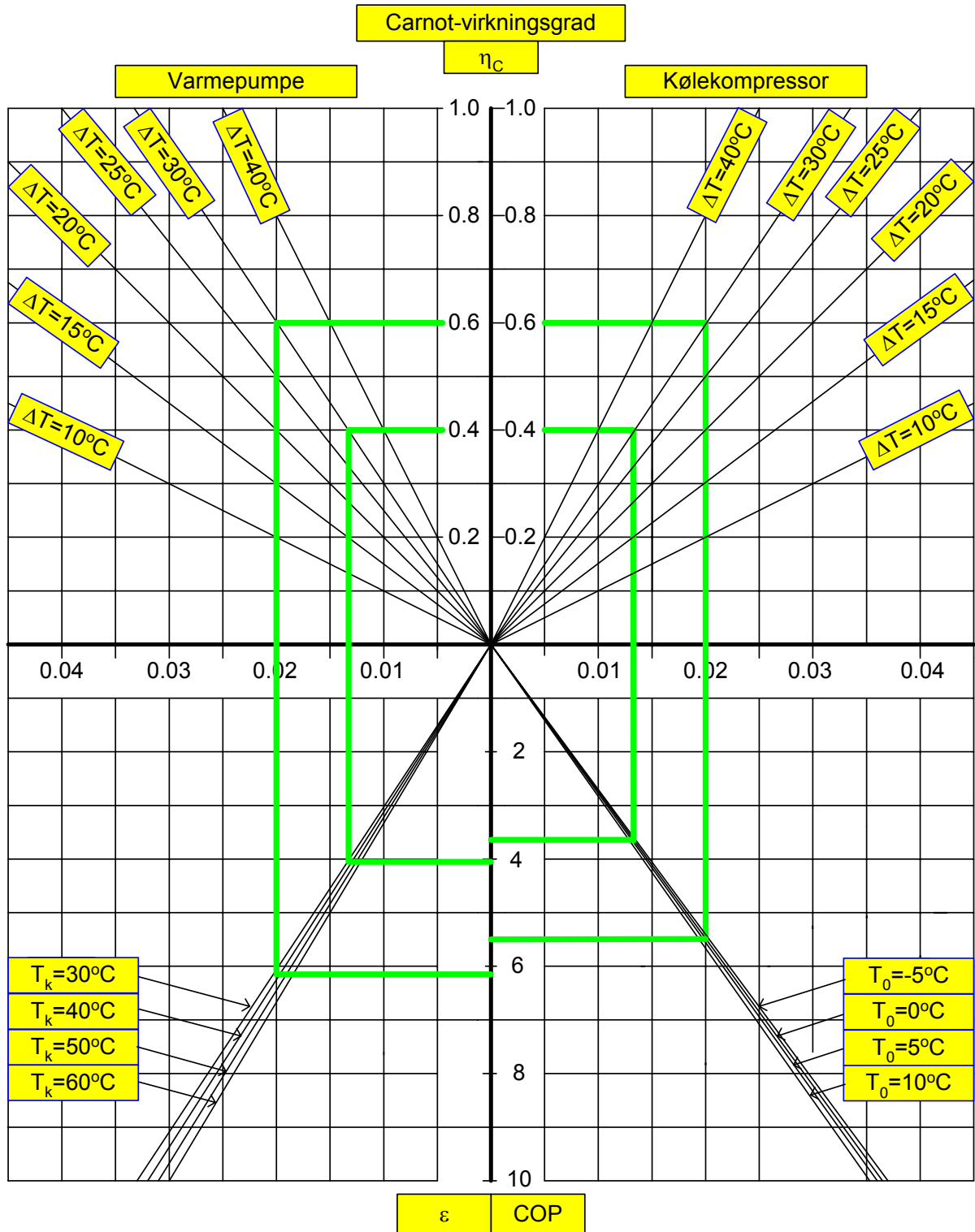
T_k : anlæggets kondenseringstemperatur (K)

Nomogrammet bruges således for kølekompressorer:

Start med anlæggets Carnotvirkningsgrad (leverandør oplysning). 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 (leverandør oplysning). 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).



Figur 10. Nomogram til bestemmelse af COP for kølekom-pressor anlæg og effektfaktor for varmepumpe anlæg.

Eksempel 6: På figur 10 er vist eksempel på to beregninger for kølekompressorer (sommerkøling) og to beregninger for varmepumper (vinteropvarmning). Der er tale om det samme anlæg, dog med to funktioner.

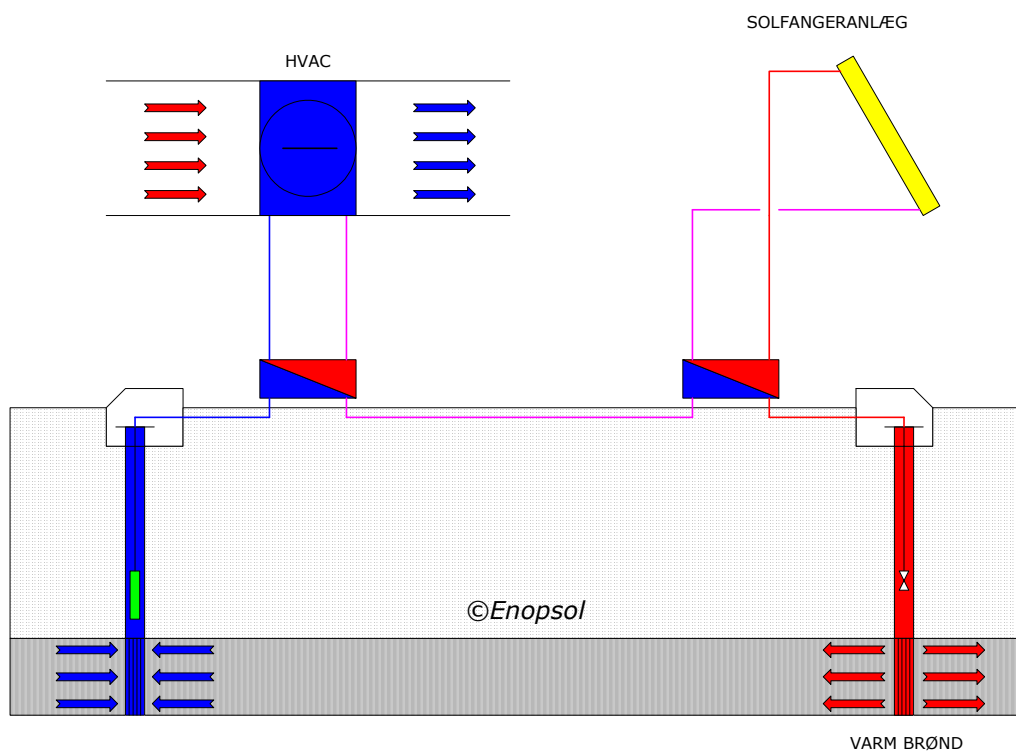
Begge beregningssæt viser hvordan man kan bestemme COP og effektfaktoren under antagelse af en Carnot-effektfaktor på hhv. 0.4 og 0.6 (en dårlig og en god kølekompressor/varmepumpe).

I begge beregninger for kølekompressorer (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 også 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 varmepumpe med en Carnot-virkningsgrad på 0.6 aflæses en effektfaktor på 6.1. For den dårlige varmepumpe med en Carnot-virkningsgrad på 0.4 aflæses en effektfaktor på 4.0.

7. ATES-system suppleret med anlæg for varme- og kuldslagring.

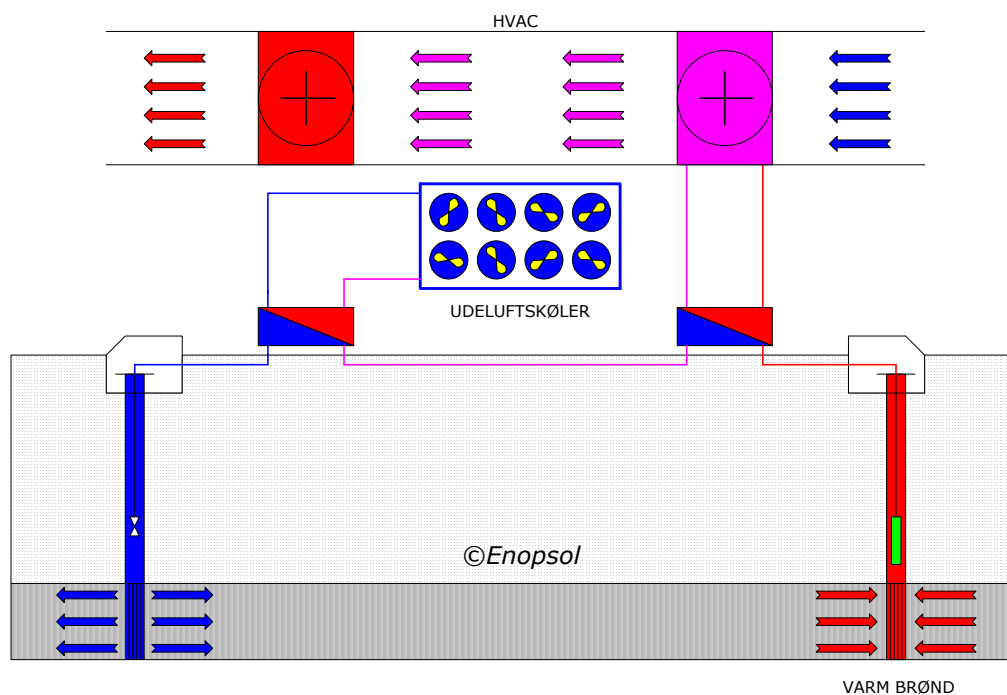
Eksempel på systemopbygning for anlæg med lagring af varme er vist i figur 11. På figuren er vist anvendelsen af lavtemperatur solvarme som supplement til varme fjernet ved rumkøling. Prisen for varmen (kr./MWh) leveret fra anlægget er ikke nødvendigvis dyrere end prisen for varmen leveret fra et anlæg uden solvarme (figur 1). Dette skyldes, at varmen efter lagring kan have en højere temperatur. Investeringsomfanget er naturligvis højere og vil forøge tilbagebetalingstiden.



Figur 11 ATES sommertid. Køling med grundvand og lagring af lavtemperatur solvarme.

Eksempel på systemopbygning for anlæg med gennedkøling/ lagring af kulde er vist i figur 12. På figuren er vist anvendelsen af lagring af kulde fra udeluften som supplement til kulde tilført grundvandet ved rumopvarmning. Prisen for køling (kr./MWh) leveret fra anlægget vil være dyrere end prisen for køling leveret fra et anlæg uden udeluftskølere (figur

3), hvis der er tale om udeluftskøling til brug ved termisk balancering af grundvandsmagasinet. Hvis der er tale om udeluftskøling til brug ved kuldelagrning (underkøling af grundvandsmagasinet til under den naturlige temperatur) vil prisen før køling med grundvand være lavere end prisen for køling med kølekompressor anlæg. Investeringsomfanget er naturligvis højere i tilfældet med gennedkøling og vil forøge tilbagebetalingstiden. I tilfældet, hvor der foretages kuldelagrning med det formål at spare kølekompressor drift vil prisen for grundvandskøling være lavere end prisen for køling med kølekompressor anlæg. Investeringsomfanget vil også blive lavere.



Figur 12. ATEs vintertid. For-opvarmning med grundvand og Kuldelagrning/termisk balancering med kold udeluft.