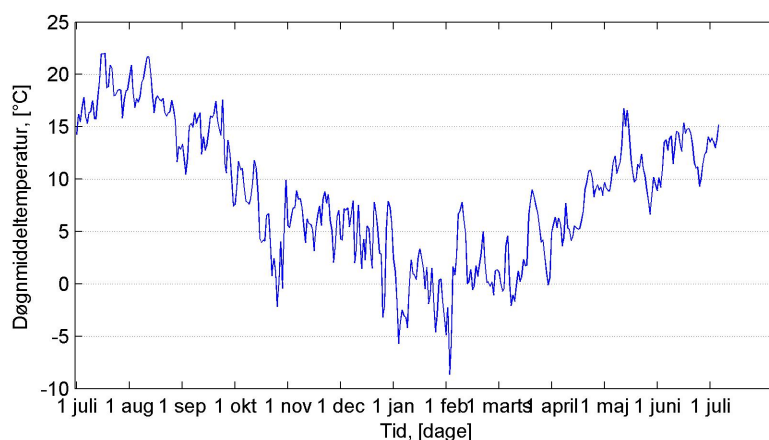


Bilag 2

Følgende beskrivelse belyser virkemåde og opbygning af en vanddampkompressionsvarmepumpe til et typisk parcelhus. På sigt ønskes en eftervisning af at opvarmning af et hus med denne teknologi er en reel mulighed og samtidig en effektivisering og optimering både mht. pris, energiomsætning og miljø, set i forhold til de teknologier der benyttes i dag. Der er i det følgende brugt vejrdata fra 2003-2004 (juli til juli).

Varmebehovet i en gennemsnitshusstand

Huset er således dimensioneret (130 m^2) og isoleret at 7 kW tilført husets varmeanlæg i form af 30°C varmt vand kan holde huset behageligt når temperaturen udenfor er -12°C . Der er nyere huse som behøver mindre tilført varme.

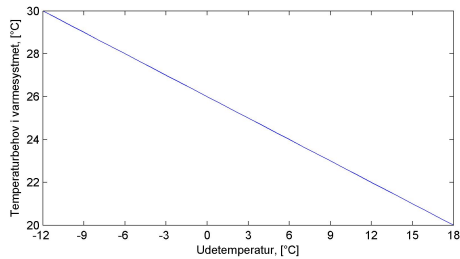


Figur 1: Temperatur af yderluft i perioden 1-7-2003 til 1-7-2004 nær Aalborg (Tylstrup) Angivet ved døgnmiddeltemperaturen på dagsbasis.

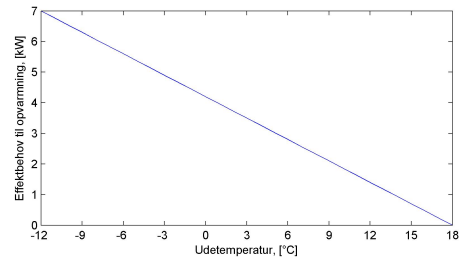
Temperaturkurven for vinteren 2003-2004 i nærheden af Aalborg (Figur 1) viser at perioder med betydelige frostgrader ikke forekommer ret længe af gangen og det er næppe nationaløkonomisk forsvarligt at dimensionere varmepumper, elnet og kraftværker til ekstrem situationen -12°C og det der er værre.

Ved til stadighed at cirkulere $20-28^\circ\text{C}$ vand i huset kan temperaturen heri holdes ved en behagelig temperatur - opvarmningsvandet pumpes rundt i et tempo der sikrer at temperaturen højst falder $1-2^\circ\text{C}$ undervejs. Ved brug af konvektionsvarmesystemer, evt. sammen med gulvvarme, vil denne temperatur være høj nok til opvarmning af boligen.

Dimensioneringen efter en opvarmningstemperatur på 28°C er dels af teknologisk karakter, dels vil det betyde lavere virkningsgrad at opvarme vandet yderligere.



(a) Sammenhæng mellem udetemperatur og nødvendig temperatur i husets varmesystem. Grafen viser at der ved en udetemperatur på -12°C bruges 30°C varmt vand i husets varmesystem, ved 18°C udenfor er den nødvendige vandtemperatur kun 20°C .

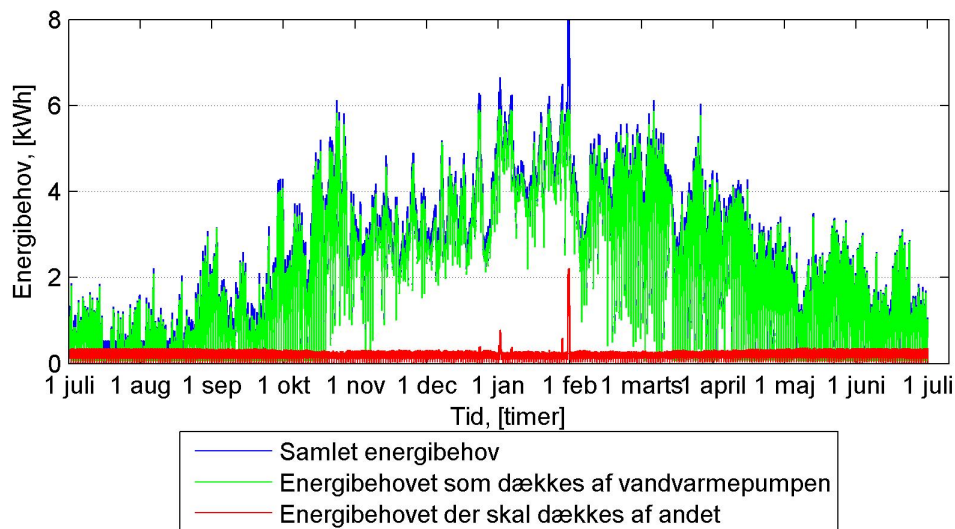


(b) Sammenhæng mellem udetemperatur og nødvendig effekt til opvarmning af huset. Grafen viser at der ved en udetemperatur på -12°C bruges 7 kW til opvarmning og ved 18°C udenfor er den nødvendige effekt 0 kW.

Figur 2: Sammenhæng mellem udetemperatur, nødvendig varme og effekt. I graferne er der kun taget hensyn til effekten til rumopvarmning, dertil kommer energien til varmtvandsforbrug.

På Figur 2 vises den enkle sammenhæng mellem udetemperatur og nødvendig temperatur i husets varmeanlæg, samt effektbehovet til opvarmning - ligeledes som funktion af udetemperaturen.

Varmefluxen fra en typisk bolig er en direkte indikation af hvor meget energi der skal til for at huset ikke afkøles. Hvis den mængde varme der forsvinder fra huset kontinuerligt erstattes af ny, vil indetemperaturen opretholdes.



Figur 3: Husstandens energibehov. Det samlede energibehov (blå kurve). Energibehovet der dækkes af vandvarmepumpen er angivet ved den grønne kurve og udgør ca. 95 procent af det totale. Energibehovet til dækning af andet er den røde kurve (når det er koldest og til opvarmning af brugsvand)

På grafen i Figur 3 er der udover varmefluxen fra boligen, taget hensyn til solindfald og et estimeret varmtvandsforbrug. Det varme brugsvand opvarmes af vandvarmepumpen til systemets temperatur, dernæst boostes temperaturen yderligere op til 45°C ved hjælp af anden lokal teknologi. Ideen er bl.a. at opvarmningen i spidsbelastningerne lægges ud til den enkelte forbruger, da der så kan spares på de kraftværker, som kun kører de få timer om året, hvor der er virkelig koldt.

Beskrivelse af vandvarmepumpen

Virkemåden for en 6 kW vanddampskompressionsvarmepumpe til parcelhuse forklares i det følgende. Vandvarmepumpens opvarmer vandet til 28°C , hvilket dækker behovet til rumopvarmning ved ned til -6°C udenfor. Udetemperaturen er sjældent så lav ret længe ad gangen (se evt. Figur 1).

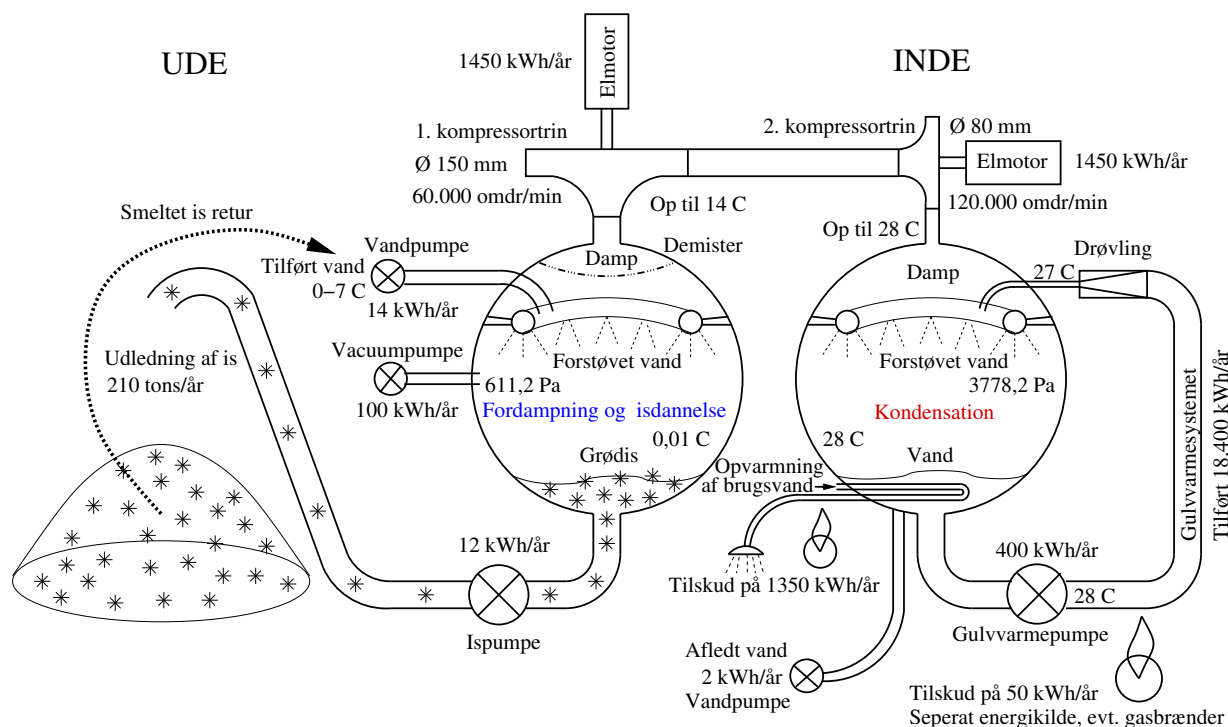


Figur 4: Størrelsen er omtrent som 2 gange en almindelig støvsuger - nogenlunde sådan kan den se ud

I Figur 4 er en 3D-skizse af hvordan vandvarmepumpen kan komme til at se ud, bestående af de to kamre, ét hvor vand ledes ind og omdannes til hhv. is og damp (det lyse kammer) og et andet kammer hvor den komprimerede damp ved kondensation afgiver energien til gulvvarmesystemet.

Teknologien vedr. vandvarmepumper er kendt i stor målestok fra et anlæg i Augustenborg der i flere år leverede 2 MW. Anlægget er netop ophørt med at producere energi på denne måde - ikke fordi anlægget havde teknologiske problemer, men af skattemæssige årsager. Det nedtagne anlæg i Augustenborg har skilt snavset fjordvand ad på den her beskrevne måde i årevis.

De nødvendige kompressorer til en vandvarmepumpe til brug i parcelhuse, ligner og er ikke meget mere kompliceret end delene fra en støvsuger og størrelsen er også nogenlunde den samme. De kører blot meget hurtigere og heri ligger en af udfordringerne, da materialeegenskaber og høj periferihastighed sætter en grænse for hvor stor en kompression, der er mulig i eet kompressortrin.

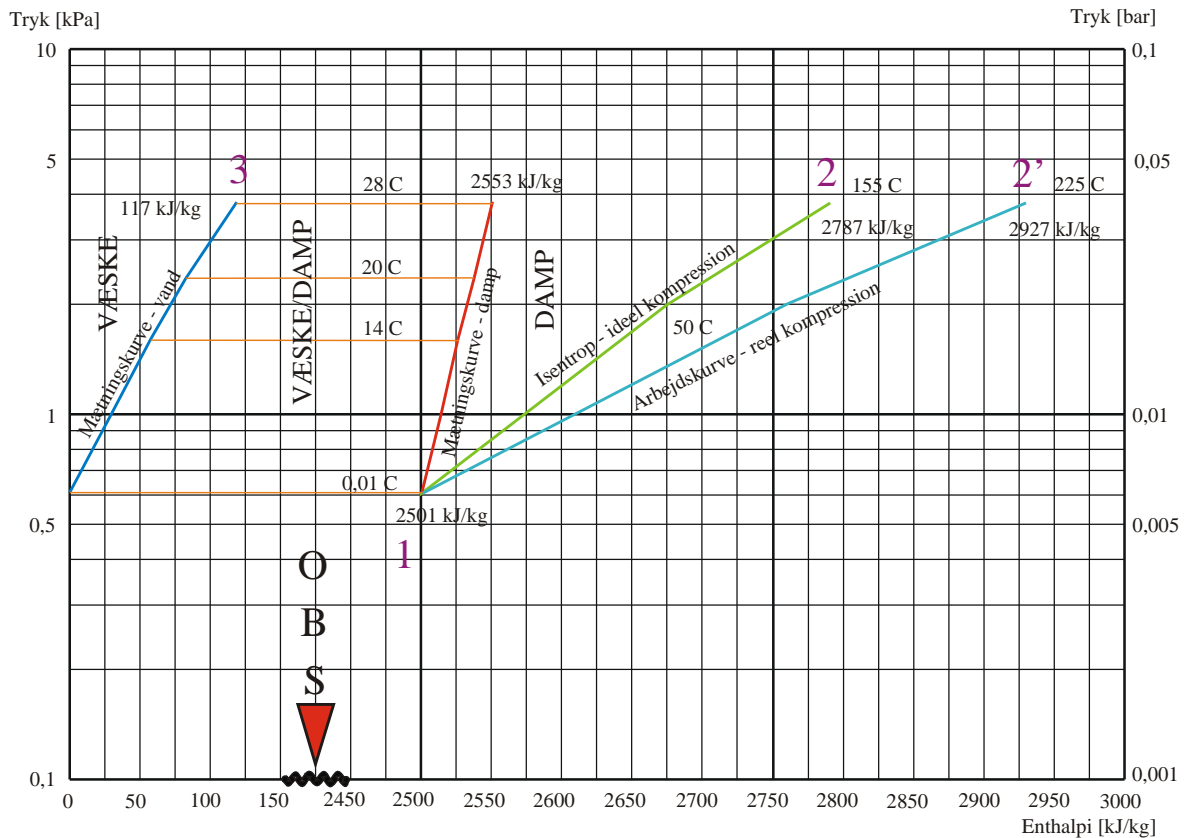


Figur 5: Samlet oversigt over vandvarmepumpesystemets bestanddele og delenes indbyrdes funktion. Skitsen er dels påført årlige værdier for energimængder ind og ud af systemet, dels værdier for det tilfælde hvor den nødvendige vandtemperatur til husets opvarmning er 28°C

I Figur 5 er en 2D-principskitse af vandvarmepumpens bestanddele med påtegning af processer og energiforbrug/tilførsel af energi. I det følgende forklares de basale principper.

Vandvarmepumpen udnytter frysevarmen i (grund)vand til opvarmning. Vand ledes ind i lavtryksdelen af vandvarmepumpen og ved et givet lavt tryk og en bestemt temperatur (0,06112 bar og 0,01°C) opnås vands triplepunkt, hvor både (vand), damp og is dannes i lavtryksbeholderen. Frysevarmen fra den dannede is fordamper en del af vandet. Vanddampen sendes via to eldrevne hurtigløbende turbokompressorer (hvert kompressortrin hæver temperaturen 14°C.) til en kondensator, hvor der hersker tryk og temperatur svarende den ønskede opvarmningsvarmetemperatur og dampen kondenserer direkte på dråber af opvarmningsvarmevandet fra anlæggets returside. Dette vand bliver dermed opvarmet og er klar til atter at blive cirkuleret rundt i opvarmningsanlægget.

Ved vands triplepunkt adskilles vandet til en del tynd og kold damp og 7,5 dele is. I lavtryksdelen dannes der altså ca. 7,5 dele is for hver del damp, dvs. at der til stadighed dannes is som skal afledes, samt nyt vand skal tilføres. På højtrykssiden fortættes hele tiden damp og her skal afledes vand. Det kondenserede damp bliver faktisk til destilleret vand og er fortrinligt til anvendelser hvor kalk i vandet giver problemer - desuden kan det benyttes til drikkevand. Både isen og vandet kan pumpes udenfor, isen til smeltning et sted på matriklen og vandet kan umiddelbart bruges i vandvarmepumpen igen. Når naturen har smeltet isen, kan smeltevandet også genbruges i vandvarmepumpen, eller bruges til f.eks. tøjvask, eller toiletskyl. I løbet af et år dannes en del is, men det meste af denne kan genanvendes efter smeltning i det fri.



Figur 6: Log-ph diagram over vands egenskaber omkring triplepunktet. Den termodynamiske proces er her eksemplificeret for situationen, hvor der skal bruges 28°C varmt vand i husets varmesystem

Den termodynamiske proces i systemet fremgår af Figur 6, heraf dannes et overblik over hvilke processer der gennemløbes:

- (1) Vandet forstøves ind i lavtryksbeholderen hvor der dannes is og damp. Ved vands triplepunkt vil der dannes is og damp i forholdet ca. 7,5:1 dampen vil søge opad og isen vil bundfældes. Frysevarmen fra isen fordamper noget af vandet.
- (1-2') Dampen komprimeres - dette koster noget arbejde (2927 - 2501 = 426 kJ/kg). Grøn kurve er ideel kompression, turkis kurve angiver kompression ved en kompressorvirkningsgrad på 0,68
- (2'-3) Dampen fortættes ved kondensation på vanddråber fra gulvvarmesystemet og energien føres ind i huset (2927 - 117 = 2810 kJ/kg)
- (2'-3) COP for dette tilfælde er givet ved $\frac{2810}{426} \approx 6,6$

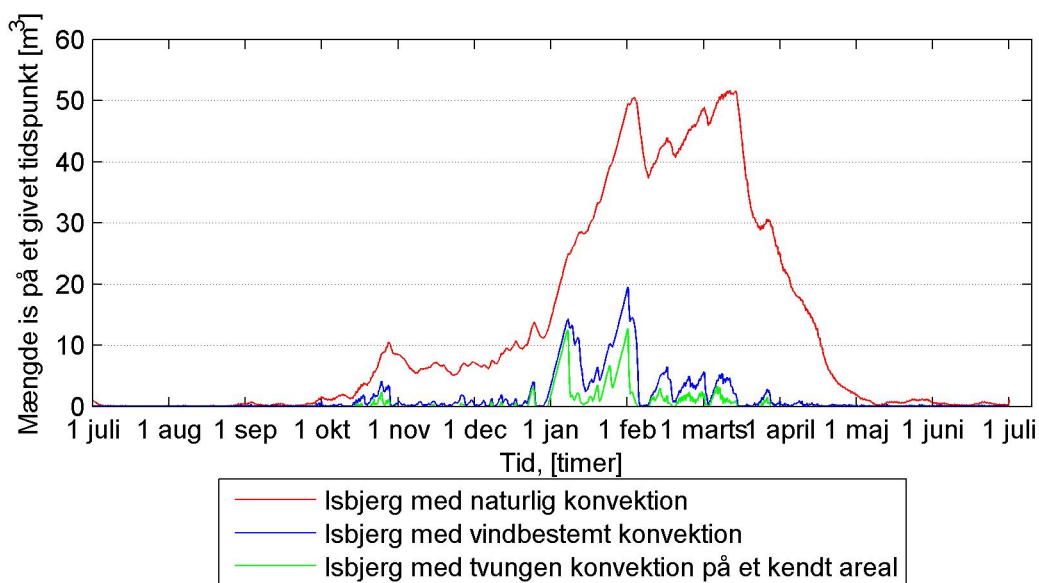
Det kan måske synes lidt kompliceret men fordelten er at forholdet mellem købt effekt (i form af elektricitet) og afgivet effekt (i form af varme) er ca. 1:6 om vinteren og 1:9 i for- og efterår, altså en COP på 6-9.

Vandvarmepumpen fungerer i forhold til andre typer af varmepumper ved kun én varmekreds og eneste 'drivmiddel' er vand. Herved opnås især to fordele, dels varmeveksles der kun én gang, dels vil lækage på systemet ikke forurene omgivelserne. Desuden vil selve implementeringen af anlægget være forholdsvis simpel.

Systemet i funktion

Ved brug af vandvarmepumpen benyttes en del vand ca. 210 m^3 om året. Af denne mængde vand dannes der betydelige mængder is, som kontinuerligt skal bortledes. Isen ledes væk fra huset og set over en periode på et helt år vil isen smelte pga. især udetemperatur, vind og solstråling - smeltevandet kan da bruges i systemet endnu engang.

I vinterhalvåret forgår smeltningen af isen naturligt nok trægere end om sommeren. For at sætte skub i smeltningen kan isbunken påføres tvungen konvektion med en blæser når udetemperaturen er over frysepunktet. Af Figur 7 opnås et indtryk af hvor meget is der er til stede på et givet tidspunkt alt efter hvilken strategi for smeltning der benyttes. Isen kunne også med mellemrum transporteres væk fra husstanden til smeltning på en afsides lokalitet



Figur 7: Mængden af is. Ismængden kan reguleres ved at udsætte isen for tvungen konvektion, som det ses af graferne kan dette have stor indflydelse på den maksimale ismængde i løbet af året. Den grønne graf angiver isbunkens størrelse ved opbevaring i en stor beholder - derved kendt overfladeareal

For at kunne pumpe isen væk er det nødvendigt at der er et vist vandindhold i isen, denne vandmængde vil umiddelbart kunne afledes efterfølgende og bruges i vandvarmepumpen igen og er ikke indregnet.

Der kunne også spekuleres i at gemme isen i en stor 'termokasse' og bruge den til afkøling af boligen om sommeren.

Den del af energien der tilvejebringes ved at omgivelserne smelter isen, vil ikke belaste miljøet, tværtimod vil det være med til at mindske udledningen af CO_2 , da forbruget af fossile brændsler vil falde.

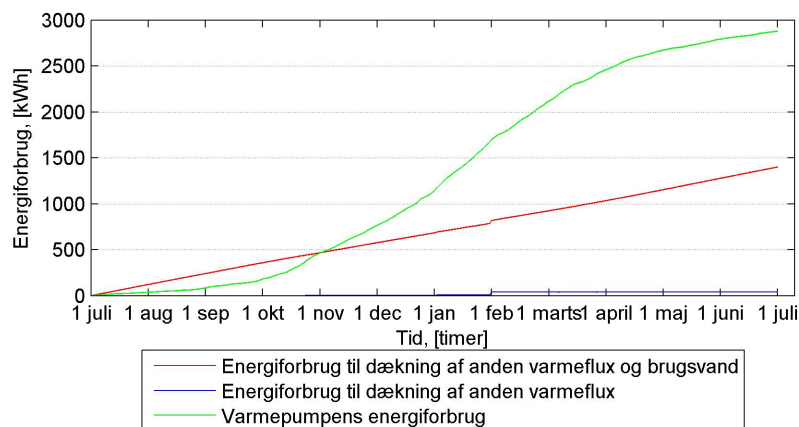
I områder hvor grundvandet er skadet af pesticider eller gødning vil man nok bruge det kondenserede vand til drikkevand og/eller vask. Vandet er meget rent (destilleret) og til stede i rå mængder (cirka 30 tons/år).

I landdistrikter med rigelig gylle og decentrale kraftvarmeanlæg kan man måske med større anlæg af samme type opnå flere fordele:

- Udvinning af større mængder destilleret vand
- Billigere varme
- Koncentrering af gylle eller sågar tørring

Anvendelsen af grundvand til vandvarmepumpen og el til kompressoren er ideel, da langt de fleste husstande allerede har indlagt både vand og el.

Energibehovet til opvarmning af en typisk gennemsnitshusstand er omtrent 20.000 kWh om året. Ved at benytte en vandvarmepumpe nedsættes energibehovet godt nok ikke, men energiforbruget nedsættes betragteligt (til ca. 3000 kWh/år). Af Figur 8 fremgår et opsummering af energiforbruget til at drive kompressorerne, samt energiforbruget til opvarmning af brugsvand og supplerende varme i de koldeste timer.

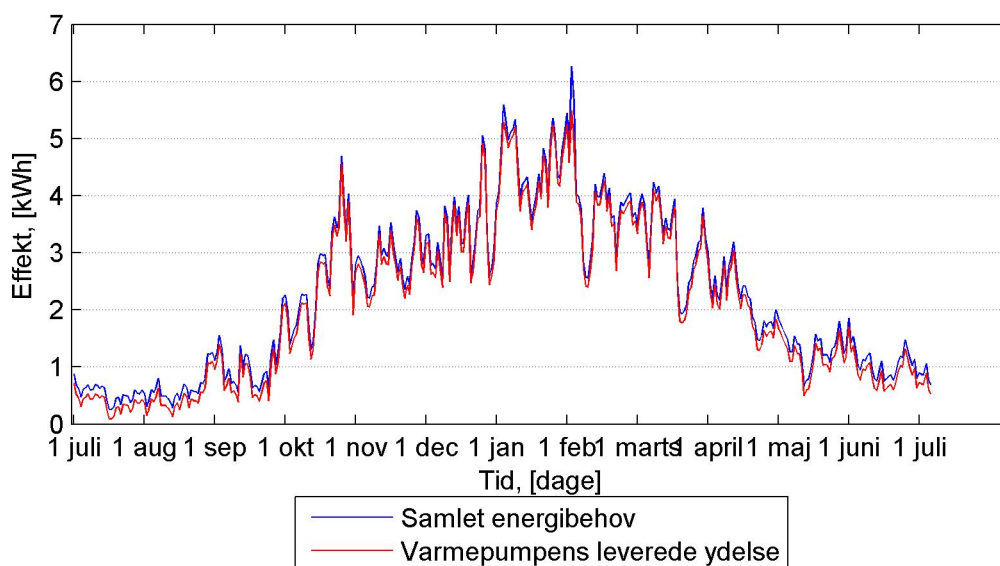


Figur 8: Forbruget af energi til opvarmning. Her angivet som vandvarmepumpens energiforbrug (grøn kurve), samt forbruget til opvarmning alene, der skal dækkes af anden energikilde (blå kurve). Andelen af energiforbruget til brugsvandsopvarmning samt varme er givet ved den røde kurve

Ud over selve vandvarmepumpen er cirkulationen af det varme vand i huset den mest energikrævende del af en komplet vandvarmesystem. Til at cirkulere det varme vand rundt i huset skal der bruges ca. 400 kWh/år.

Varmebehovet som *ikke* dækkes af vandvarmepumpen

Energibehovet til opvarmning af boligen i løbet af et år er angivet på Figur 9 sammen med en angivelse af hvor stor en del af denne energi vandvarmepumpen frembringer. Differensen mellem de to kurver på Figur 9 udgør den energimængde der skal suppleres med fra anden side.



Figur 9: Energibehovet opgjort på dagsbasis for et år

Det antages med baggrund i udregninger at varmepumpeanlægget til opvarmning kan klare belastningen ned til ca. -6°C og så kan der suppleres med anden energikilde. Det skyldes bl.a. at der med dagens teknologi kun kan opnås 14°C temperaturstigning per kompressortrin - altså 28°C ialt

Det er således intentionen at lade eksempelvis en gasbrænder stå for det nødvendige energitilskud i perioder med meget koldt vejr og endvidere opvarmningen af brugsvand fra vandvarmepumpevandets temperatur op til 45°C året rundt - den mængde energi som vandvarmepumpen ikke kan levere er forholdsvis beskeden under disse forudsætninger.

Ved at lade vandvarmepumpen køre afhængigt af forskellige udetemperaturer og variere hvornår en anden energikilde yder et tilskud til opretholdelse af varmen, opstår der forskellige situationer for hvor meget energi der skal skaffes andetsteds. Hvis f.eks. vandvarmepumpen dimensioneres til at klare belastningen ved udetemperaturer ned til 0°C (i stedet for -6), vil den energimængde, der skal suppleres med fra anden side øges, men varmepumpen bruger til gengæld en smule mindre energi, hvilket betyder at elnettet ikke belastes i samme grad.

Det betyder også at hele kompressordelen i vandvarmepumpen kan konstrueres af simple dele, da ydelsesbehovet ikke længere er på grænsen af det teknologisk mulige. Den nødvendige kompression bliver lavere, rotationshastigheden reduceres og kravene til materialeegenskaber mindskes.

Endvidere bliver COP for systemet højere des mindre energibehovet er. Ismængden reduceres da vandvarmepumpen producerer mere is jo koldere der er. I de perioder hvor der produceres mest is, sker der mindst (eller ingen) smeltning.

Udetemp. hvorunder vvp suppleres med yderligere varme [°C]	Afgivet energi fra vvp [kWh/år]	Elforbrug for vvp [kWh/år]	Nødvendig mængde flaskegas til supplerende varme [kg/år]
0	17800	2800	160
-6	18400	2900	120

Tabel 1: Oversigt over den samlede varmefflux på et år og scenariet ved forskellige udetemperatursafgrænsninger for vandvarmepumpens kørsel. Den samlede energiomsætning i systemet er 19.800 kWh/år

Af Tabel 1 fremgår hvordan det vil påvirke energifordelingen mellem vandvarmepumpe og anden energikilde ved brug af vandvarmepumpen ved udetemperatur på hhv. -6 og 0°C.

Den mængde energi der skal suppleres med fra anden side stiger, hvis udetemperaturgrænsen for vandvarmepumpens brug hæves. Som nævnt tidligere kan denne mængde energi tilvejebringes vha. en gasbrænder. Alternativt kunne energien til det varme brugsvand fremstilles med en separat konventionel varmepumpe som enten forhøjer temperaturen fra vandvarmepumpem om vinteren eller tager varme fra yderluften når døgnmiddeltemperaturen er 18 °C eller derover, hvor vandvarmepumpen er stoppet.