

LfV

Energiministeriets ForskningsProgram
Energianvendelse i Bygninger

Effektiv brugsvandsopvarmning

226

DTH

Danmarks Tekniske Højskole

Laboratoriet for Varmeisolering



Effektiv brugsvandsopvarmning

Jørgen M. Schultz

**Laboratoriet for Varmeisolering
Meddelelse nr. 226**

**Danmarks Tekniske Højskole
December 1991**

LAVENERGIGRUPPEN:

Bjarne Saxhof, civ.ing., projektleder

Mogens R. Byberg, lektor, civ.ing.

Jørgen M. Schultz, civ.ing.

Kirsten Engelund Thomsen, civ.ing.

Kim B. Wittchen, civ.ing.

FORORD

Nærværende rapport afslutter projektet "Effektiv brugsvandsopvarmning" finansieret af Energi-ministeriets Energiforskningsprogram 1986, EFP86, ENS j.nr. 602-07-01.

Projektet er udført på Laboratoriet for Varmeisolering som et led i Laboratoriets lavenergi-
projekter.

I projektet er der udviklet et simuleringsprogram til beregning af tappetemperaturer og varmetab fra såvel beholdere som rørstrækninger. Resultatet af projektet viser, at opvarmning af brugsvand med elektricitet er privatøkonomisk urentabelt under enhver form. Udviklingen af små gaskedler med en maksimaleffekt på omkring 8 kW betyder, at brugsvandsopvarmning uden for fyringssæsonen kan udføres med en anlægseffektivitet på ca. 67%. En større indsats på isolering af kedlerne vil kunne øge effektiviteten betydeligt.

Der er i projektet ikke set på anlæg tilsluttet en fælles varmforsyning såsom fjernvarme eller solvarmecentraler ligesom anvendelse af individuelle solvarmeanlæg, samt problemstillingen vedrørende differentierede tariffer for el-afregning heller ikke er behandlet.

INDHOLDSFORTEGNELSE

Forord

Indholdsfortegnelse	1
Resumé	3
Summary	5
Symbolliste	7
Indledning	9
1. Beskrivelse af forsøgsopstilling	10
2. Simuleringsprogrammet	11
2.1 Model for beholdervandvarmer	12
2.2 Model for gennemstrømningsvandvarmer	14
2.3 Model for fordelingsledninger	14
3. Karakteristiske størrelser for vandvarmerne og generering af inddata til programmet	16
3.1 10 liters el-beholdervandvarmer	16
3.2 Gennemstrømningsvandvarmer	18
3.3 60 l central varmtvandsbeholder	21
4. Simulering af traditionelle brugsvandsanlæg i dimensioneringstilstanden	22
4.1 Referenceanlæg	22
4.2 Længden af fordelingsledningerne	24
4.3 Cirkulation af brugsvand	25
5. Optimeret centralt anlæg	27
5.1 Kriterier for optimering	27
5.2 Døgnenergiforbrug og besparelse i forhold til referenceanlægget	30
6. Decentrale brugsvandsanlæg	33
6.1 Alle tappesteder forsynet med gennemstrømningsvandvarmere	33
6.2 Alle tappesteder forsynet med beholdervandvarmere	34
7. Opsummering af resultater fra simuleringer i dimensioneringssituationen	36
7.1 Centrale anlæg	36
7.2 Decentrale anlæg	36
8. Årligt energiforbrug og effektivitet	38
8.1 Tappeprogram for 4 personers husstand	38
8.2 Beskrivelse af lavenergihusmodel	39
8.3 Tomgangstab og anlægseffektivitet	43

8.4	Gas- og oliefyret brugsvandsopvarmning	46
8.5	Decentrale anlæg med el-vandvarmere	53
8.6	Energimæssig sammenligning af anlæg til brugsvandsopvarmning	54
9.	Diskussion af vandnormens krav	56
10.	Økonomi	60
11.	Konklusion	62
12.	Litteraturfortegnelse	64
	LavEnergi Publikationer fra Laboratoriet for Varmeisolering, DTH	65

RESUMÉ

Denne rapport afslutter projektet "Effektiv brugsvandsopvarmning" finansieret under Energiministeriets Forskningsprogram 1986 (EFP86). Projektets formål er at undersøge alternative udformninger af anlæg til brugsvandsopvarmning for opnåelse af et minimalt varmetab fra rør og varmtvandsbeholdere. Projektet omhandler udelukkende anlæg med gas/olie- eller el-opvarmning.

Der er i projektet indkøbt en 10 l el-vandvarmer og en 21 kW el-gennemstrømningsvandvarmer. Disse er undersøgt eksperimentelt ved måling af tappetemperatur under forskellige volumenstrømme samt måling af tomgangstab. Derudover er der udført enkelte forsøg med en 60 l varmtvandsbeholder og et gasfyr med en maksimaleffekt på 14,7 kW.

På baggrund af de udførte målinger er der udviklet et simuleringsprogram til bestemmelse af døgn- og årsenergiforbrug til opvarmning af varmt brugsvand.

Med udgangspunkt i Dansk Ingeniørforenings Norm for vandinstallationer, DS439, [1] er der opstillet et tappeprogram for et døgn. Simuleringer med dette tappeprogram er anvendt til at optimere såvel anlæg med central varmtvandsbeholder, som decentrale anlæg med beholdervandvarmere eller gennemstrømningsvandvarmere. De decentrale anlæg er simuleret for to forskellige udformninger, dels en udformning hvor hvert tappested er forsynet med en særskilt vandvarmer, dels en udformning hvor tappesteder med samme tappetemperatur (bruser og håndvask) forsynes fra en fælles vandvarmer. Desuden er der udført en række analyser af rørtabets afhængighed af rørlængde og eventuel cirkulation af brugsvandet.

Resultatet af simuleringerne viser, at elektriske gennemstrømningsvandvarmere er de mest energiøkonomiske med en besparelse i forhold til et traditionelt oliefyrsanlæg på ca. 2050 kWh/år.

Den optimale løsning for et centralt anlæg består af en 8 kW kedel med 60 l varmtvandsbeholder. Besparselsen, i forhold til et traditionelt anlæg, er ca. 1000 kWh/år. Rørtabet udgør for anlæg uden cirkulation ca. 3,0 Wh/mK pr. døgn. Udføres anlægget med cirkulation, øges rørtabet til 8,6 Wh/mK pr. døgn. Længden, der indgår, er rørlængden fra den centrale beholder til det fjerneste tappested.

Der er endvidere foretaget en vurdering af normens krav med hensyn til volumenstrømme, tappetemperaturer og vandmængde. Kravet til at der skal kunne tappes både i køkkenvask og bruser samtidigt bevirker, at der ved gennemstrømningsvandvarmere skal installeres en effekt på minimum 36 kW. En lempelse af dette krav vil kunne reducere effektkravet til ca. 18 kW. Anvendes vandbesparende brusearmatur kan effekten reduceres fra 18 kW til 12 kW. Tappeprogrammet ved håndvasken svarer ikke til virkelighedens tappemønster, der ofte består af mange små tapninger frem for få og store.

Økonomisk er vandopvarmning ved brug af elektricitet ikke rentabelt hverken på årsbasis eller i sommermånederne, idet prisforskellen pr. kWh ved henholdsvis el- og olie/gasopvarmning ikke opvejes af den bedre effektivitet ved elektrisk vandopvarmning. Den optimale løsning er et lille gasfyr (8 kW med en 60 l varmtvandsbeholder).

Til lavenergihuse, hvor varmetabet fra kedel og varmtvandsbeholder i en stor del af året resulterer i lokale overtemperaturer, er der brug for en væsentlig reduktion af kedeltabet. Fx har varmtvandsbeholderen en varmetabskoefficient på 0,9 W/K medens kedlens er ca. 2,4 W/K.

En reduktion af kedeltab samt investering i vandbesparende armaturer vil kunne reducere energiidgiften til brugsvandsopvarmning betydeligt.

SUMMARY

This report is the final report for the project "Efficient Domestic Hot Water Heating" funded by the Danish Ministry of Energy as a part of its 1986 research programme. The scope of the project is to investigate alternative domestic hot water systems to accomplish a minimum heat loss from pipes and hot water tanks. The project only deals with systems that are electrically heated or gas/oil heated.

Experiments have been carried out with a 10 l electrically heated hot water heater and a 21 kW electric instant water heater. A number of tapping experiments has been performed, measuring stand-by losses and resulting hot water temperatures at different flow rates. Also, some experiments with a 60 l hot water tank heated by a gas boiler (maximum rating 14.7 kW) have been carried out.

Based on these experiments, a simulation program for calculation of daily and annual energy requirements for heating domestic hot water has been developed and validated.

A daily "normal family" water tapping pattern has been chosen from the requirements in the Danish Standard for water installations (DS439, [1]). With this 24-hour pattern, simulations have been performed in order to optimize systems with a central storage tank or with smaller decentralized water heaters (small water tanks as well as instant heaters). Two different versions of the decentralized systems have been simulated. In the first version, each tap has its own water heater; in the second version, taps with the same water temperature demand (wash basin and shower) are supplied from the same water heater. Also, analyses of the distribution losses have been carried out, showing the dependence on pipe length and water circulation.

The simulation results show that the highest energy efficiency is attained with decentralized electric instant heaters, giving energy savings of approx 2050 kWh/year compared to a traditional centralized oil-fired system.

The optimal solution for a centralized system is an 8 kW high efficiency boiler with a 60 l hot water tank. The energy savings compared to the traditional oil-fired system is about 1000 kWh/year. If there is no circulation of hot water, the distribution losses from the pipes are about 3.0 Wh/mK per day. The corresponding figure for a system with circulation is about 8.6 Wh/mK per day. The dimensioning length is the distance from the central water tank to the farthest tapping point.

From the different analyses, the requirements in the Danish Standard DS439 to flows, tapped hot water temperatures and delivered water volumes are evaluated. One requirement in particular, simultaneous use of kitchen tap and bathroom shower, leads to a minimum rating of 36 kW for instantaneous water heaters. A reasonable reduction of this requirement would reduce the necessary power rating to about 18 kW, and introduction of water saving shower heads would further reduce the demand to 12 kW. One problem with the Danish Standard's requirements to tappings at the wash basin is that they are few and large whereas in practice they tend to be many and small.

Seen from the economical viewpoint of a private user, electric water heating is not profitable, neither on an annual basis or in the summer months. The main reason is the Danish energy price policy: the price of 1 kWh delivered to the water heater is 0.91 DKK for electricity and 0.45 DKK for gas or oil. Thus the better energy efficiency of the electric water heater systems cannot weigh up the price difference. The present optimal solution (economically speaking) is a small gas boiler, power rating about 8 kW, with a 60 l water tank.

In low-energy houses the heat losses from boiler, water tank and water pipes generally cannot be considered gains to the house as they lead to local overheating most of the year, and a substantial reduction of the heat losses (no-load losses as well as operation losses) is thus necessary to obtain efficient systems. Especially, a reduction of the heat losses from the boiler is important. For the small efficient system mentioned above, the losses from the water tank are about 0.9 W/K, and the boiler losses are about 2.4 W/K.

A reduction of the boiler heat losses and investment in water saving devices for the fixtures in the house will give a significant reduction in the energy cost for domestic hot water heating.

SYMBOLLISTE (INKL. EDB-NAVNE)

A	: areal [m ²]
C _p	: varmekapacitet [J/kgK]
DL	: delstrækning [m]
E	: effekt [W], [kW]
EL	: el-energitilførsel
EFFM	: effekt afsat i vandvarmer [W]
KV	: koldtvandstilførsel
L	: længde
Q	: energimængde [kWh]
Q	: volumenstrøm [m ³ /s], [l/s]
QB	: tappet volumenstrøm ved tappested [l/s]
QMIN	: minimum volumenstrøm gennem vandvarmer uden at varmelegemet kobles ud [m ³ /s]
QTAP	: volumenstrøm gennem vandvarmer under tapning [m ³ /s]
QVARME	: tilført energi i varmelegeme [J]
R	: radius [m]
RD	: radius af rør mellem to tappesteder [m]
T	: temperatur [°C]
TLN	: lagertemperatur i bunden af lager [°C]
TLO	: lagertemperatur i toppen af lager [°C]
UA	: varmetabskoefficient [W/K]
V	: volumen [m ³]
VV	: varmtvandstapning
XL	: længde af rørstrækning mellem to tappesteder [m]
dt	: tidsskridt [s]
p	: antal personer i husstanden
η	: effektivitet
ρ	: massefylde [kg/m ³]
τ	: tidsrum [h], [s]

Indices:

A	: areal
A	: refererer til anlægseffektivitet
F	: refererer til fyringseffektivitet
I	: lag nummer i varmtvandsbeholder
I	: refererer til internt varmetilskud
K	: koldt vand
L	: lager
NET	: netto
S	: sol
T	: tab fra hus
TAB	: tab fra beholder og rør

TOM	:	refererer til tomgangstab
TV	:	tappet vand
V	:	varmt vand
VT	:	hidrørende fra varmetab fra brugsvandsanlæg
VVT	:	varmt vand inkl. tab fra brugsvandsanlæg
el	:	hidrørende fra forbrug af elektricitet
gl	:	gammel
i	:	tæller
i	:	interval
max	:	maximum
omg	:	omgivelser
opbl	:	opblanding
pers	:	person
p	:	refererer til tidsperiode mellem to tapninger
r	:	refererer til normværdi for tappetemperatur
t	:	til tiden t
tap	:	refererer til tapningen
tot	:	total værdi, integreret værdi
u	:	ude
vspild	:	hidrørende fra vandspild
vv	:	refererer til varmtvandsforbrug

INDLEDNING

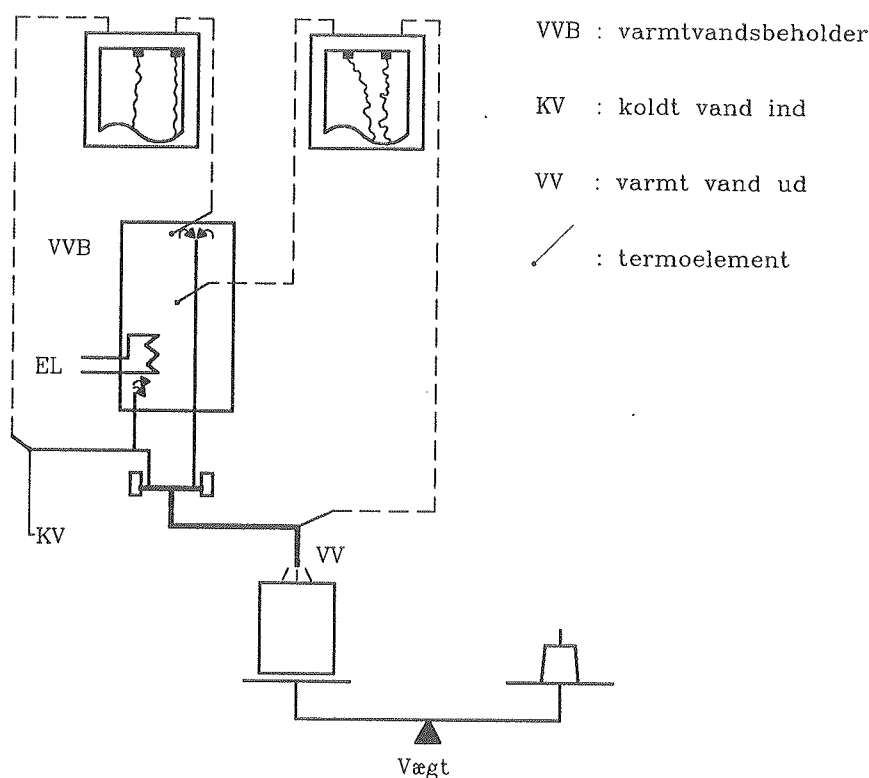
Analyser af energiforbruget i de første 6 lavenergihuse i Hjortekær har vist, at varmetabet ved brugsvandsopvarmning med traditionelle brugsvandssystemer er betydeligt i forhold til det egentlige varmtvandsbehov. En del af varmetabet vil kunne udnyttes til dækning af husets opvarmningsbehov, idet det forudsættes, at alle varmtvandsrør er placeret inden for husets klimaskærm. I velisolerede huse og især i lavenergihuse resulterer dette varmetab imidlertid ofte i ubehagelige og energimæssigt uacceptable overtemperaturer i bryggers/fyrrum og tilstødende rum.

Hvis varmtvandsproduktionen decentraliseres ved hjælp af gennemstrømningsvandvarmere eller små vandvarmere, vil det være muligt at have en differentieret varmtvandstemperatur alt efter tappestedets anvendelse (bad, køkken eller håndvask) og dermed en fordeling og en minimering af varmetabet. Effektiviteten af de enkelte vandvarmere undersøges eksperimentelt med forskellige tappeprogrammer og temperaturniveauer. Ud fra målingerne bestemmes de karakteristiske størrelser for vandvarmeren, og disse indsættes i et simpelt beregningsprogram, der dels kan simulere de enkelte vandvarmere og dels simulere et helt varmtvandssystem. Ved hjælp af ovennævnte program bestemmes det årlige energiforbrug for forskellige anlæg og forskellige tappeprogrammer. Der tages i denne forbindelse stilling til, om normens krav til varmtvandsinstallationer [1] er rimelige. Der foretages endvidere en analyse af variationen i koldt vandstemperaturen over året og dennes betydning for energiforbruget. Anlæggets økonomi analyseres, idet der tages hensyn til besparelser ved den enklere rørføring (kun koldt vand frem til vandvarmeren).

1. BESKRIVELSE AF FORSØGSOPSTILLING

De eksperimentelle undersøgelser er foretaget for tre typer af vandvarmere, dels en 10 l beholder med 2 kW varmelegeme, dels en 21 kW gennemstrømningsvandvarmer og dels en central 60 l varmtvandsbeholder koblet til et gasfyr (8,8-14,7 kW).

Beholdervandvarmeren og varmtvandsbeholderen er udstyret med temperaturmålepunkter øverst og midt i beholderen til fastlæggelse af stratificeringen såvel i stilstand som under tapning. For alle tre vandvarmere måles endvidere koldt vandstemperaturen og tappetemperaturen. Sammen med rumtemperaturen registreres alle de målte størrelser på Kipp & Zonen to-kanals skrivere. Den tappede vandmængde samt gasforbruget findes ved vejning, og tiden for en tapning måles med stopur. El-forbruget aflæses på en særskilt el-måler. Forsøgsopstillingen for 10 liter beholdervandvarmer er vist på figur 1.1.

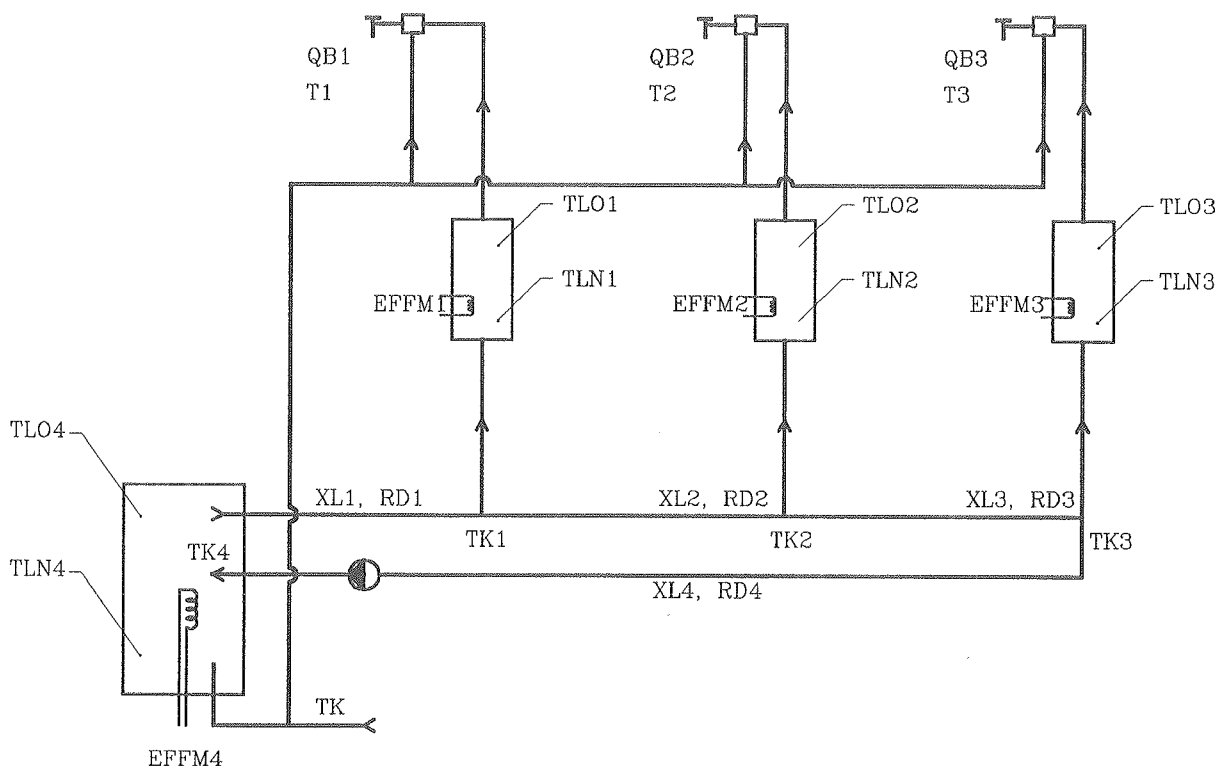


Figur 1.1 Skematisk fremstilling af forsøgsopstilling

De eksperimentelle undersøgelser anvendes til at fastlægge inddata til et enkelt simuleringsprogram, der anvendes til bestemmelse af det årlige energiforbrug til opvarmning af varmt brugsvand.

2. SIMULERINGSPROGRAMMET

Programmet er opbygget i dette projekt og køres på en PC. Programmet består af to dele; en del der simulerer vandvarmerne og en del, der simulerer rørforbindelserne mellem tappestederne. I programmet indgår fire vandvarmere: en central enhed og tre tappesteder, figur 2.1. Det er således muligt at simulere både et traditionelt anlæg med central varmtvandsbeholder og cirkulationsledning og et decentraliseret anlæg med mulighed for centralt forvarmet vand.



Figur 2.1 Model af varmtvandsanlægget, der benyttes i beregningsprogrammet

Programmet deler tappeperioderne op i tidsintervaller på 10 sekunder og opvarmningsperioderne i tidsintervaller på multipla af 60 sekunder. Inden for hvert tidsskridt beregnes temperaturer og energiforbrug svarende til slutningen af intervallet.

Den iterative beregningsgang inden for hvert tidsskridt er følgende:

- 1) På basis af temperaturer og tappemængder fra forrige beregning findes temperaturerne TK1, TK2, TK3, TK4 i knudepunkterne 1 til 4 (figur 2.1), og rørtabet beregnes.
- 2) De netop bestemte knudepunktstemperaturer benyttes i beregning af tappetemperatur, tappemængde, lagertemperaturer, varmetab og tappet energimængde ved de enkelte tappesteder.

- 3) Ud fra ovenstående beregninger beregnes centrallagerets temperaturer, varmetab og tappet energimængde.
- 4) Ovenstående tre punkter gentages, indtil ændringen i temperaturer, varmetab og tappet energimængde mellem to beregninger i samme tidsskridt er tilstrækkelig lille.

De enkelte tappesteders funktion er fastlagt i begyndelsesbetingelserne.

2.1 Model for beholdervandvarmer

Figur 2.1.1 viser en varmtvandsbeholder under tapning, hvor modellen anvender en opdeling af beholderen i N lag, således at hvert lag (undtagen det nederste) har et volumen svarende til den tappede vandmængde inden for tidsskridtet (10 sek.). Ved denne model opnår man, at lag nr. I i det efterfølgende tidsskridt skubbes op i lag nr. I-1. Modellen svarer til, at der er fuld stratificering i lageret. Dette er imidlertid ikke altid korrekt under tapning, især ikke for små beholdere, idet det indstrømmende vand i bunden af beholderen vil forårsage en opblanding. I modellen simuleres dette ved, at der mellem to nabolag udveksles en vandmængde svarende til en procentdel af den tappede vandmængde inden for tidsskridtet. Vandmængden, der på denne måde udveksles med et nabolag, forudsættes opblandet fuldstændigt i dette.

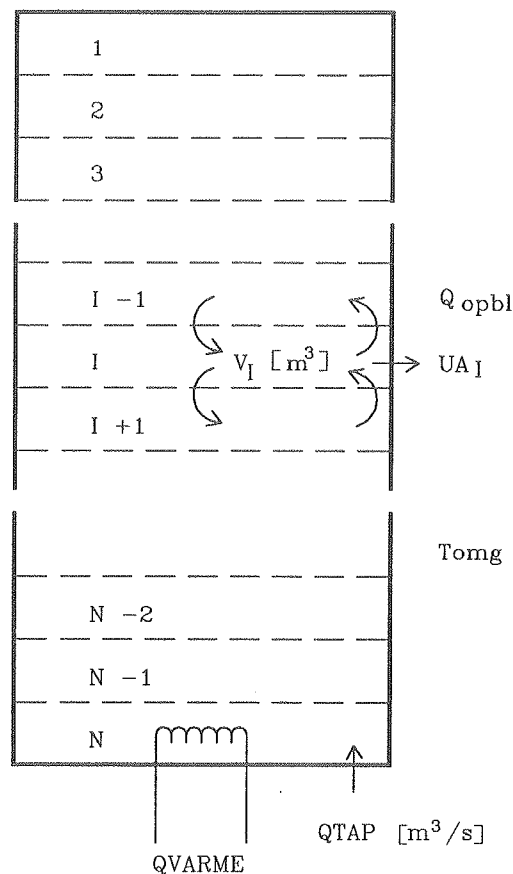
Med benævnelserne i figur 2.1.1 kan varmebalancen beskrives på følgende måde:

$$\begin{aligned} (V\rho C_p)_I \cdot (T_{I,t} - T_{I,t-dt}) = & Q_{opbl} \cdot \rho \cdot C_p \cdot dt (T_{I-1,t} + T_{I+1,t} - 2 \cdot T_{I,t}) \\ & + Q_{VARME} \\ & - (UA)_I \cdot (T_{I,t} - T_{omg}) \cdot dt \end{aligned}$$

Varmelegemet er i modellen placeret i det nederste lag i beholderen, hvorfor "QVARME" er 0 i de øvrige lag.

Når beholderen er under opvarmning efter en tapning, simuleres dette ved, at hvert enkelt lag tilføres en effekt vægtet i forhold til temperaturdifferensen op til beholderens driftstemperatur. Herved tages der hensyn til konvektionsstrømme i vandet under opvarmning.

Når beholderen har nået sin driftstemperatur, tilføres den nødvendige effekt til dækning af varmetabet kontinuert. Programmet opererer således med en ideel termostat.

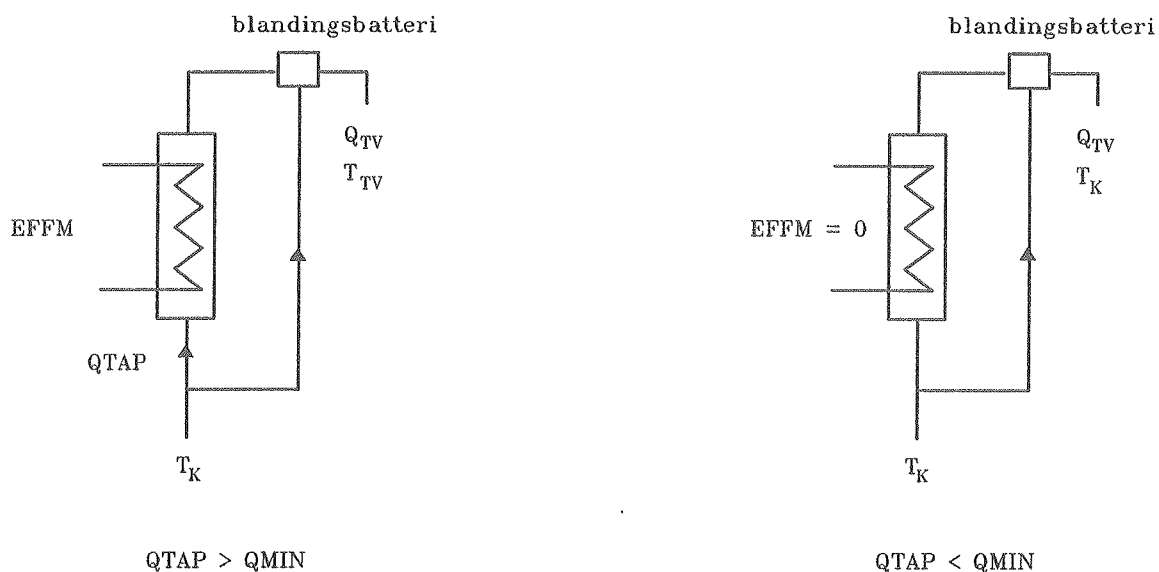


V_I :	vandvolumen i lag nr. I [m^3]
ρ :	vandets massefylde [kg/m^3]
C_p :	vandets varmekapacitet [J/kgK]
dt :	tidsskridt i beregningen [s]
$T_{I,t}$:	temperatur i lag nr. I til tiden t [$^{\circ}\text{C}$]
Q_{opbl} :	vandmængde der udveksles mellem to nabolag [m^3]
$QTAP$:	volumenstrøm under tapning [m^3/s]
$QVARME$:	tilført energi til nederste lag [J]
$(UA)_I$:	varmetabskoefficient for lag nr. I [W/K]
T_{omg} :	lufttemperatur omkring lageret [$^{\circ}\text{C}$]

Figur 2.1.1 Model for funktion af varmtvandsbeholder

2.2 Model for gennemstrømningsvandvarmer

Gennemstrømningsvandvarmeren er i programmet simuleret ved modellen vist i figur 2.2.1.



- E_{FFM}:** effekt afsat i vandvarmer [W]
Q_{TAP}: volumenstrøm gennem varmelegeme under tapning [m³/s]
Q_{TV}: tappet volumenstrøm ved given temperatur [m³/s]
T_{TV}: tappetemperatur [°C]
T_K: koldtvandstemperatur [°C]
Q_{MIN}: minimal volumenstrøm gennem vandvarmer, hvor tørkogningssikring ikke afbryder strømmen [m³/s]

Figur 2.2.1 Model for gennemstrømningsvandvarmer

Hvis den tappede mængde er mindre end en vis minimumstrømning, tilføres der ingen energi til vandet. Er tapningen større end denne grænse, tilføres vandet en vis procentdel af den afsatte effekt, idet der er et tab ved varmeoverføringen mellem el-varmeren og vandet.

2.3 Model for fordelingsledninger

Fordelingsledningerne opdeles i delstrækninger med en længde på 0,1 m. Inden for hver delstrækning antages temperaturen af vandet at have en fælles værdi. Beregning af vandtemperaturerne foretages for hvert rørstykke mellem to knudepunkter ved anvendelse af flg. udtryk:

$$T_i = T_{i,gl} - T_{omg} \cdot \exp\left(\frac{-U A_{rør} \cdot \tau}{A_i \cdot \rho \cdot C_p}\right) + T_{omg} \quad [^{\circ}C]$$

hvor	T_i :	ny temperatur i delstrækning i [$^{\circ}\text{C}$]
	$T_{i,gl}$:	gammel temperatur i delstrækning i [$^{\circ}\text{C}$]
	T_{omg} :	omgivelsernes temperatur [$^{\circ}\text{C}$]
	$UA_{rør}$:	varmetabskoefficient for røret [W/K]
	τ :	den tid, som vandet i den i 'te delstrækning har befundet sig i røret siden sidste beregning [s]
	A_i :	delstrækningens indvendige tværsnitsareal [m^2]
	ρ :	vandets massefylde [kg/m^3]
	C_p :	vandets varmekapacitet [J/kgK]

τ er enten lig med tidsskridtet dt eller beregnes ud fra rørdimension, volumenstrøm og delstrækningens afstand fra begyndelsespunktet for den aktuelle rørstrækning.

Det totale rørtab beregnes af:

$$E_{rør,tot} = \sum_i DL_i \cdot A_i \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_{ny,i} - T_{gl,i}) / dt \quad [W]$$

hvor	$E_{rør,tot}$:	det totale rørtab [W]
	DL_i :	længde af delstrækning i [m]
	A_i :	delstrækningens indvendige tværsnitsareal [m^2]
	ρ :	vandets massefylde [kg/m^3]
	C_p :	vandets varmekapacitet [J/kgK]
	$T_{ny,i}$:	vandtemperatur i delstrækning i til tiden = t [$^{\circ}\text{C}$]
	$T_{gl,i}$:	vandtemperatur i delstrækning i til tiden = $t-dt$ [$^{\circ}\text{C}$]

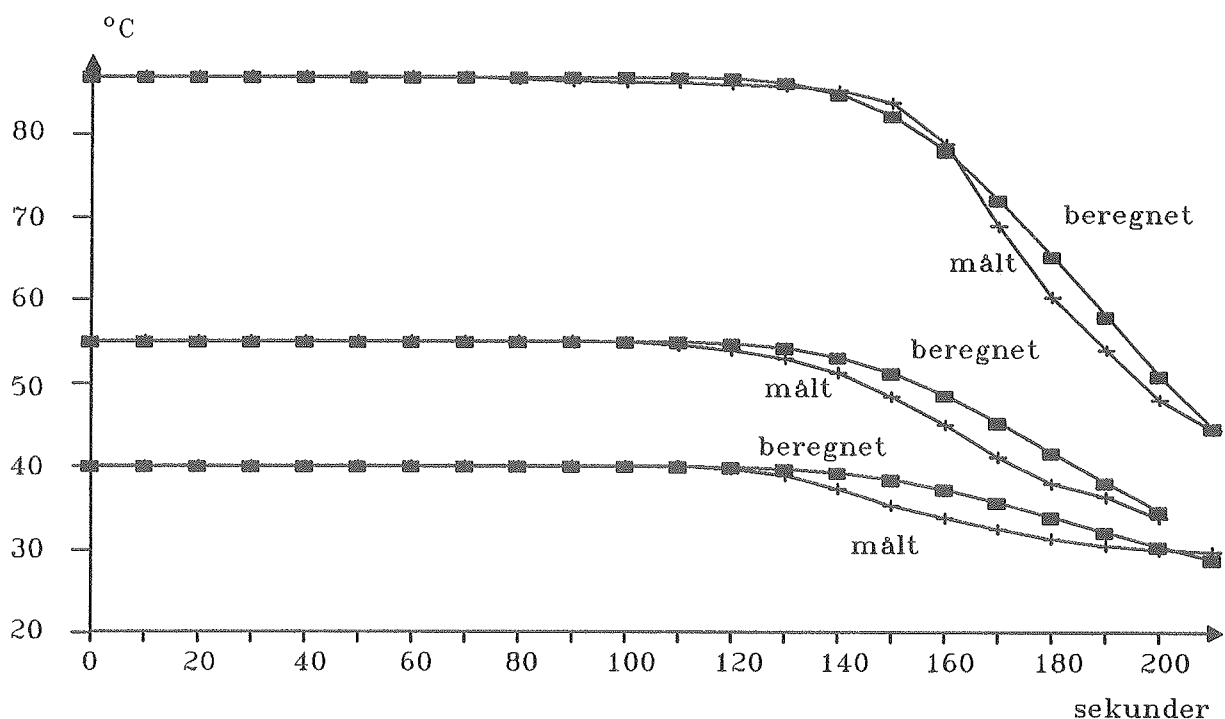
Tappetemperaturen ved de enkelte tappsteder findes som middel af temperaturerne af de delstrækninger, der indgår i den tappede vandmængde i tidsskridtet dt .

3. KARAKTERISTISKE STØRRELSER FOR VANDVARMERNE OG GENERERING AF INDDATA TIL PROGRAMMET

De karakteristiske størrelser for vandvarmerne er de, der beskriver beholdernes ydelse og termiske virkemåde.

3.1 10 liters el-beholdervandvarmer

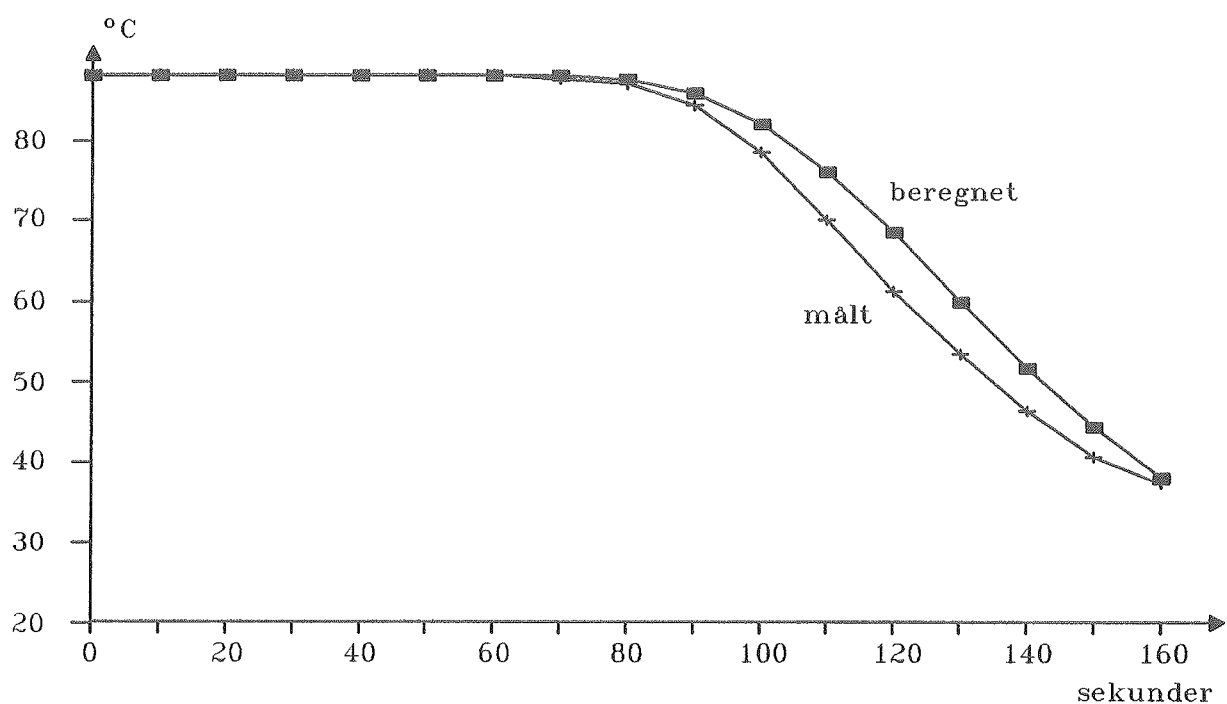
Vandvolumenet er målt til 10,2 liter, og varmetabskoefficienten er eksperimentelt fundet til 0,38 W/K. Den indfyrede effekt er 2 kW. Opblandingsprocenten er fundet ud fra lagerets toptemperatur og koldtvandstemperaturen under tapning. De målte størrelser er sammenlignet med EDB-beregninger, hvor opblandingsprocenten er varieret, indtil der var en rimelig overensstemmelse. Opblandingskonstantens afhængighed af tappehastighed og beholdertemperatur er bestemt ud fra tappeforsøg under varierende forhold. Figur 3.1.1 viser de målte og de beregnede temperaturer ved en tapning på 0,052 l/s med lagertemperaturer på henholdsvis 87°C, 55°C og 41°C. Beregningerne har vist, at man kan anse opblandingsprocenten for uafhængig af temperaturen med en værdi på 30%.



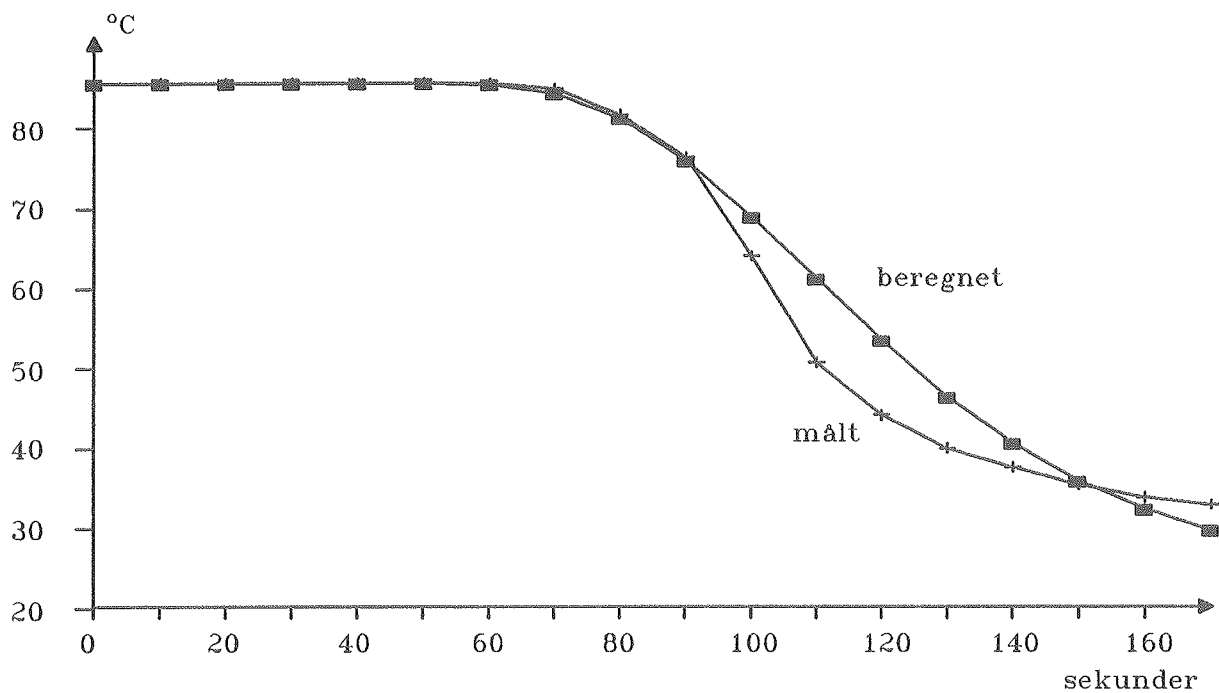
Figur 3.1.1 Målte og beregnede temperaturer i lagerets top under tapning på ca. 0,05 l/s
Koldtvandstemperatur = 15,5°C
Opblandingsprocent = 30%

Der er ikke fuld overensstemmelse mellem de beregnede og de målte temperaturer, hvilket må tilskrives programmets simple opbygning samt problemer med varierende vandtryk og dermed varierende volumenstrøm.

Derudover er der udført tappeforsøg med to andre volumenstrømme, dels 0,07 l/s og dels 0,08 l/s. Ud fra disse forsøg findes opblandingsprocenten til henholdsvis 35% og 40%. De målte og de beregnede temperaturer er vist i figur 3.1.2 og 3.1.3.



Figur 3.1.2 Målte og beregnede temperaturer i lagerets top under tapning på ca. 0,07 l/s
 Koldt vandstemperatur = 16,6°C
 Opblandingsprocent = 35%



Figur 3.1.3 Målte og beregnede temperaturer i lagerets top under tapning på ca. 0,08 l/s
 Koldt vandstemperatur = 18,6°C
 Opblandingsprocent = 40%

Forskellen mellem målte og beregnede temperaturer genfindes i ovenstående temperaturer. Betydningen heraf er minimal ved beregning af energiforbruget men får betydning ved optimering af vandvarmernes driftstemperatur, så normens krav netop kan overholdes.

3.2 Gennemstrømningsvandvarmer

Vandtemperaturen efter opvarmning i gennemstrømningsvandvarmeren afhænger af tappehastigheden og varmeoverføringskoefficienten mellem varmelegemet og vandet. Vandvarmeren er afprøvet ved en ydelse på henholdsvis 21 kW og 10,5 kW. Tappeforsøg har givet flg. sammenhæng mellem tappetemperatur og tappehastighed (tabel 3.2.1-2).

Tabel 3.2.1 Sammenhæng mellem tappehastighed og tappetemperatur gennem 21 kW gennemstrømningsvandvarmer

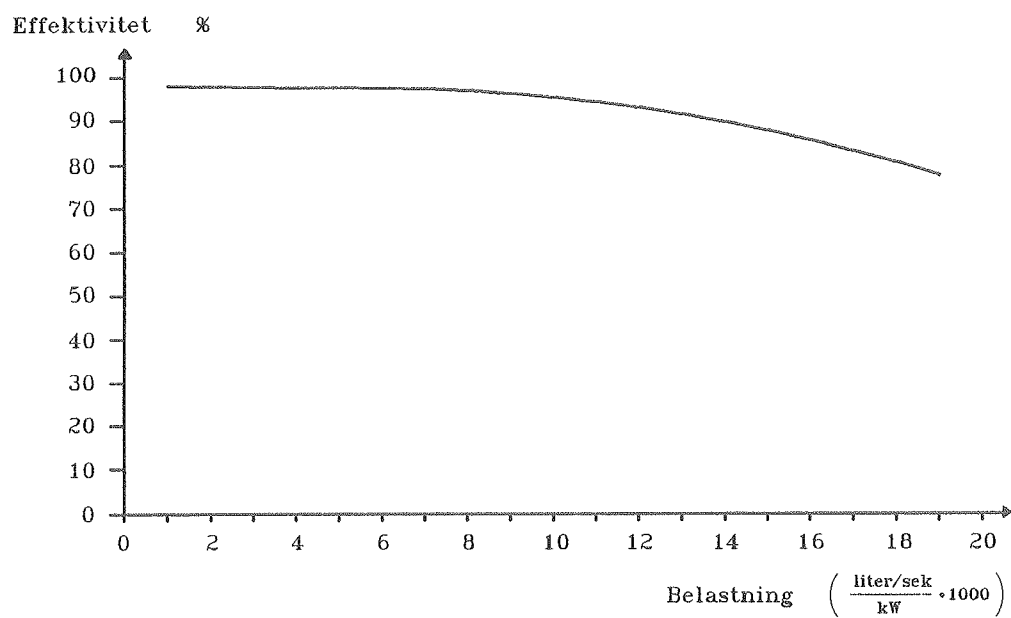
Tappehastighed Q	Tappetemp. T_{TV}	Koldtvandstemp. T_K	Optaget energi $\frac{Q \cdot 4180 \cdot (T_{TV} - T_K) \cdot 100}{21000W}$
l/s	°C	°C	%
0,092	69,5	16,4	97,3
0,123	55,1	15,1	97,9
0,178	43,4	15,7	98,1

Den indkøbte vandvarmer er dels forsynet med en temperatursikring, der udkobler det ene af de tre varmelegemer, hvis temperaturen stiger til ca. 65-70°C og dels med en tørkogningssikring, der afbryder el-tilførslen ved en vandstrøm mindre end ca. 0,09 l/s. Dette er årsagen til, at der ikke er målt på mindre vandstrømme.

Tabel 3.2.2 Sammenhæng mellem tappehastighed og tappetemperatur gennem 10,5 kW gennemstrømningsvandvarmer

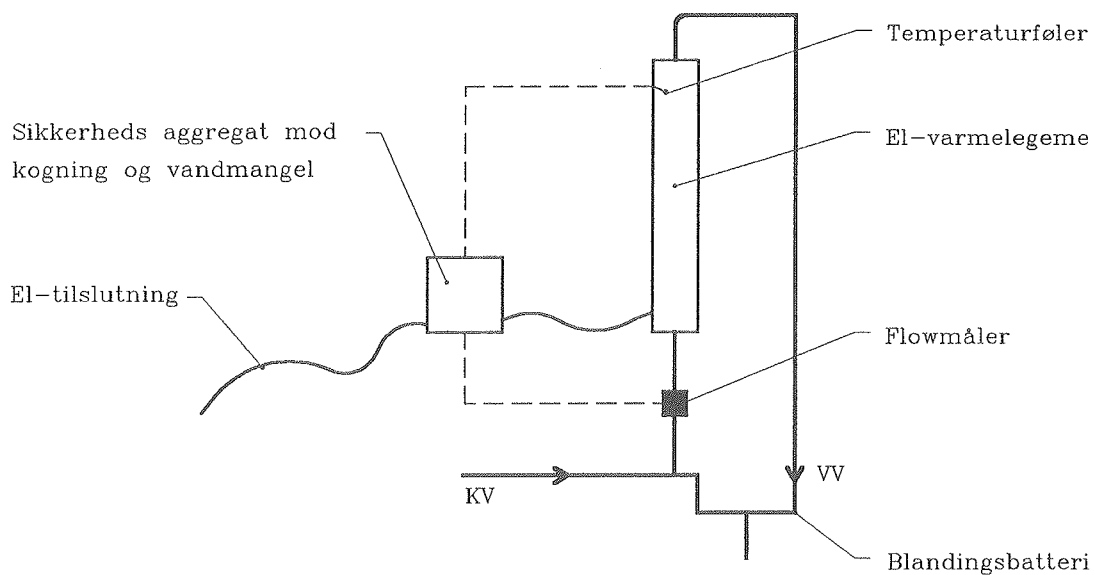
Tappehastighed Q	Tappetemp. T_{TV}	Koldtvandstemp. T_K	Optaget energi $\frac{Q \cdot 4180 \cdot (T_{TV} - T_K) \cdot 100}{10500W}$
l/s	°C	°C	%
0,095	30,1	5,1	94,6
0,165	17,6	4,5	86,2

Figur 3.2.1 viser sammenhængen mellem den overførte effekt og (tappehastighed/installeret effekt).



Figur 3.2.1 Effektivitet af gennemstrømningsvandvarmer som funktion af belastningen

Principskitse af gennemstrømningsvandvarmeren er vist på figur 3.2.2.



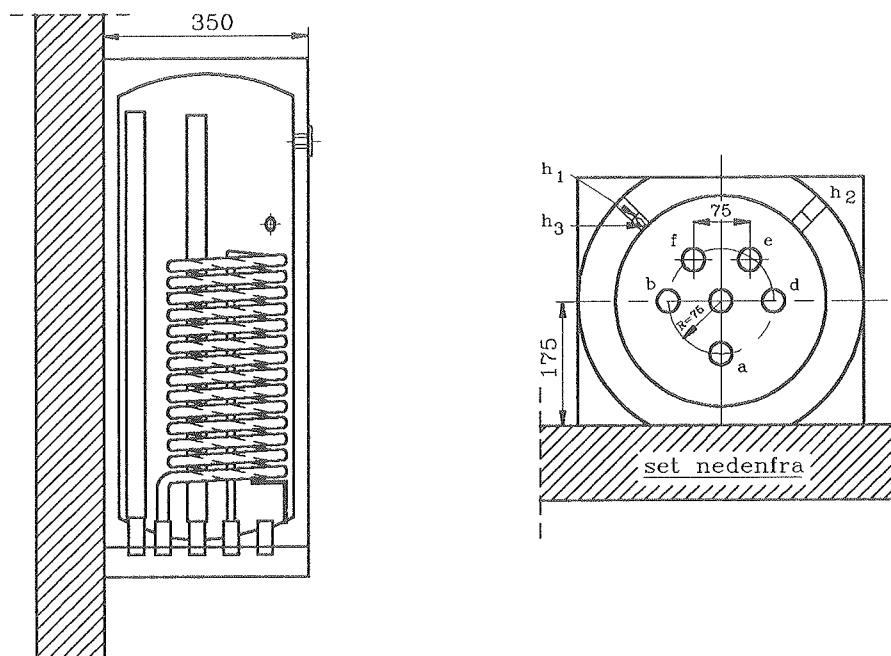
Figur 3.2.2 Gennemstrømningsvandvarmer fra METRO

3.3 60 l central varmtvandsbeholder

Varmtvandsbeholderens varmetabskoefficient er ved tidligere forsøg fundet til 0,87 W/K [2].

Ud fra enkelte tappeforsøg er opblandingsprocenten fundet til 10%.

Skitse af varmtvandsbeholderen er vist på figur 3.3.1.



Figur 3.3.1 VVB60 varmtvandsbeholder fra HS-kedler, TARM

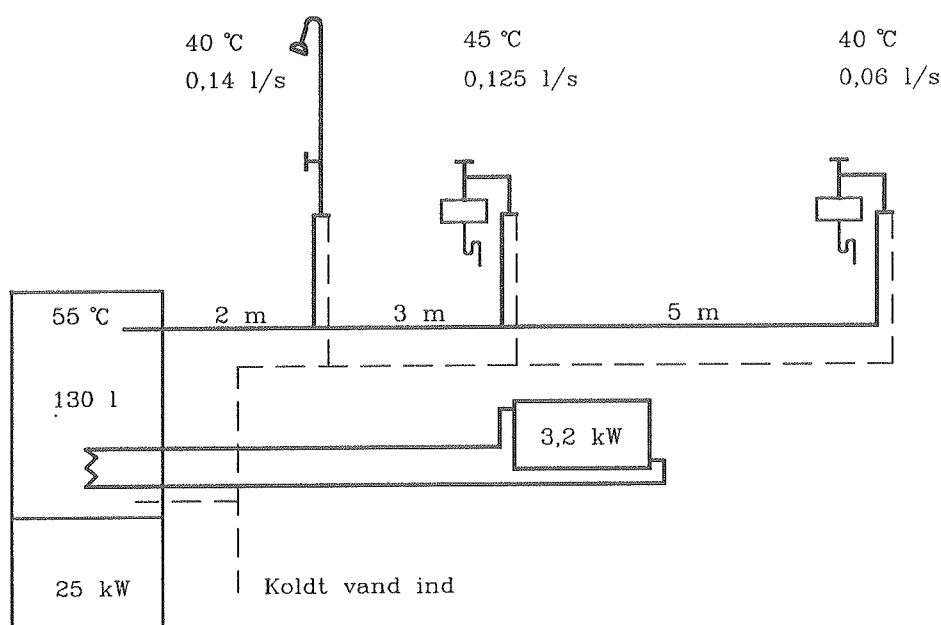
4. SIMULERING AF TRADITIONELLE BRUGSVANDSANLÆG I DIMENSIONERINGSTILSTANDEN

Brugsvandsopvarmning udformes traditionelt som en del af en central fyringsenhed, der leverer varme dels til huset og dels til varmt brugsvand. Den installerede effekt skal således kunne dække begge behov. Et centralt oliefyrsanlæg til et enfamiliehus har typisk en maksimal effekt på 25-30 kW. Ved installering i lavenergihuse vil fyret imidlertid selv i dimensioneringstilstanden kun skulle yde en brøkdel af maksimaleffekten, hvilket kan betyde en forringelse af effektiviteten med op til 30% [2].

4.1 Referenceanlæg

Figur 4.1.1 viser en skematisk fremstilling af det valgte referenceanlæg.

Rørene er 3/4" rør med en 3 cm isoleringskappe, hvilket giver en varmetabskoefficient på 0,18 W/K pr. meter rør. Den samlede rørlængde er 10 meter. Fordelt på rørstrækningen er placeret 3 tappesteder: 1 bruser, 1 køkkenvask og 1 håndvask. De tre tappesteder sidder i serie henholdsvis 2 m, 5 m og 10 m fra centralbeholderen. Olie/gasfyret har en maksimal effekt på 25 kW, og der regnes med en fyringseffektivitet på 90%. Det totale tab fra den centrale enhed må ikke overstige 1,5% af den maksimale effekt, hvoraf den største tilladelige varmetabskoefficient for den centrale kedel findes til 7,5 W/K (se afsnit 8.3). Det dimensionerende varmetab for bygningen er 3,2 kW (se afsnit 8.2).



Figur 4.1.1 Skematisk opbygning af referenceanlæg

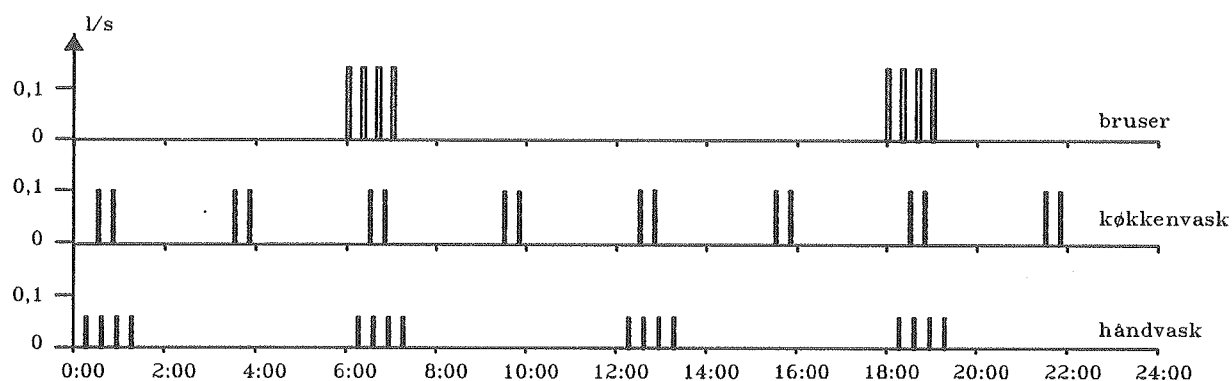
Ovenstående anlæg er simuleret gennem et døgn, hvor normens krav [1] til tappeprogram er opfyldt (se tabel 4.1.1).

Tabel 4.1.1 Tapninger og tappeprogrammer ved varmtvandstappedsteder i helårsboliger

Data for tappested	Symbol	Enhed	Tappested			
			Badekar	Bruser	Køkkenvask	Håndvask
Mindste vandstrøm	$Q_{\min}$	l/s	0,21	0,14	0,10	0,06
Passende temperatur	T_r	°C	40	40	45	40
Forudsat varmtvandsmængde	V	l	125	42	15	10
Tappetid for én tapning	τ	s	600	300	150	180
Antal tapninger			2	4	2	4
Tappeinterval = tid ml. start af to tapninger	τ_i	min.	30	20	20	20
Tappeperiode = tid ml. gentagelse af tappeprogram	τ_p	h	12	12	3	6

Det totale varmtvandsforbrug i det dimensionerende døgn er for referenceanlægget 496 l ved 40°C plus 240 l ved 45°C.

Tapningerne er fordelt som angivet i figur 4.1.2, koldt vandstemperaturen er 10°C.



Figur 4.1.2 Tappeprogram anvendt ved simulering, når normens krav anvendes

Der er i disse beregninger valgt at anvende et tappeprogram, der tager hensyn til alle tappestederne på trods af normens vejledning for anlæg uden badekar, men med brusere:

"(3.2.2.2 Vandvarmere for flere tappesteder i en helårsbolig)

vejledning: Vandvarmere, der forsyner flere tappesteder i samme helårsbolig, bør have en ydelse, der hver 12. time kan tilfredsstille et af følgende tappeprogrammer:

:

:

:

:

For installationer uden badekar

4 brusebade.

2 tapninger til køkkenvask.

Badene regnes at foregå med de i tabel 4.1.1 angivne tapninger og tappeintervaller mv.

Tapning til køkkenvask regnes at foregå uafhængigt af tapning til brusebad med det i tabel 4.1.1 angivne tappeprogram.

Såfremt vandvarmeren kun forsyner tappesteder i samme rum, opstilles et tappeprogram under hensyntagen til rummets benyttelse. Normalt kan det forudsættes, at der kun foregår tapning ved ét sted af gangen. "

Hovedresultatet af simuleringen fremgår af tabel 4.1.2.

Tabel 4.1.2 Resultat fra simulering af referenceanlæg, når normens krav opfyldes
 $T_{\text{koldt vand}} = 10^{\circ}\text{C}$

Anlægs- udformning	Lager- temperatur	Rør- længde	Tab		Tappet vand	Total
			Beholder	Rør		
-	$^{\circ}\text{C}$	m	kWh/døgn	kWh/døgn	kWh/døgn	kWh/døgn
Reference	55	10	6,30	1,09	27,47	34,86

4.2 Længden af fordelingsledningerne

I indledningen fremgår det, at alle fordelingsledninger er trukket inden for klimaskærmen, hvorved varmetabet fra rørene kommer huset til gode. I et lavenergihus vil der en stor del af året ikke være et opvarmningsbehov, hvorved varmetabet fra rørene ikke kan udnyttes, men tværtimod vil resultere i uønskede overtemperaturer.

Rørtabene afhænger af vandtemperaturen og rørenes længde. I referencehuset er lagertemperaturen fastholdt på 55°C . Resultaterne af en række simuleringer med varierende rørlængde er gengivet i tabel 4.2.1.

Tabel 4.2.1 Simuleringer med forskellige rørlængder
 $T_{\text{koldt vand}} = 10^{\circ}\text{C}$, cirkulation = 0 l/s

Anlægs- udformning	Lager- temperatur	Rør- længde	Tab		Tappet vand	Total
			Beholder	Rør		
-	$^{\circ}\text{C}$	m	kWh/døgn	kWh/døgn	kWh/døgn	kWh/døgn
Reference	55	10	6,30	1,09	27,47	34,86
Rør 0	55	0	6,30	0	27,47	33,77
Rør 5	55	5	6,30	0,50	27,47	34,27
Rør 15	55	15	6,30	1,66	27,47	35,43

Ved lange rørstrækninger kan det være nødvendigt at lave en cirkulation af varmt vand i fordelingsledningen for at undgå vandspild ved tappesteder langt fra varmtvandsbeholderen. Normen [2] angiver således, at der skal være varmt vand i tappestedet senest 10 sekunder efter, at der er åbnet. I praksis betyder det, at ved rørstrækninger over ca. 5 m fra varmtvandsbeholder til tappested, skal der installeres cirkulation. I ovenstående tabel er der ikke taget hensyn til dette forhold, idet ønsket er at vise rørtabet som funktion af ledningslængden. Cirkulationens betydning analyseres i næste afsnit.

Tabel 4.2.1 viser, at rørtabet øges med ca. 0,5 kWh/døgn, når rørlængden øges med 5 meter.

4.3 Cirkulation af brugsvand

I forrige afsnit er nævnt, at det ofte er påkrævet at udføre brugsvandsanlægget med cirkulation for at undgå unødigt vandspild. Er ledningslængden mellem varmtvandsbeholder og tappested større end 5 m vil det være tilfældet.

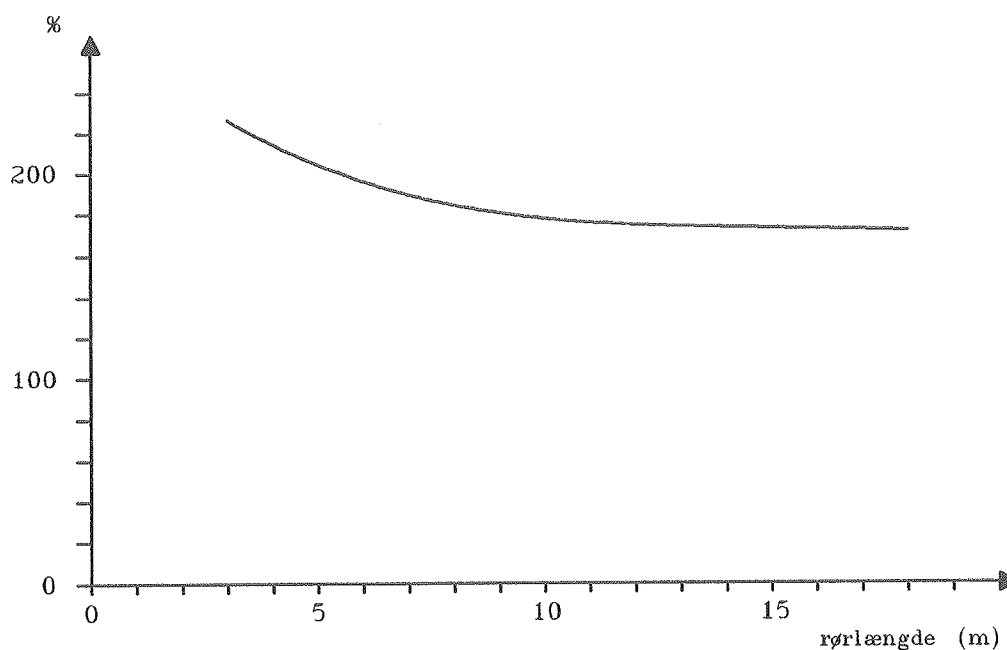
Kravet om cirkulation medfører en fordobling af rørlængden og en væsentlig forøgelse af rørtabet, idet også middelvandtemperaturen i rørstrækningen øges. Derimod vil den forbrugte vandmængde falde. Forholdet er belyst gennem en række simuleringer med forskellige rørlængder og en cirkulation på 0,11 l/s svarende til en vandhastighed på 3 m/s i 3/4" rør. Resultatet af beregningerne er vist i tabel 4.3.1.

Tabel 4.3.1 Simuleringer med en cirkulation på 0,11 l/s og forskellige rørlængder
 $T_{\text{koldt vand}} = 10^{\circ}\text{C}$

Anlægs- udformning	Lager- temperatur	Cirku- lation	Tab		Tappet vand	Total
			Beholder	Rør		
-	$^{\circ}\text{C}$	l/s	kWh/døgn	kWh/døgn	kWh/døgn	kWh/døgn
Reference	55	0	6,30	1,09	27,47	34,86
Cirk. 5	55	0,11	6,30	1,52	27,47	35,29
Cirk. 10	55	0,11	6,30	3,02	27,47	36,79
Cirk. 15	55	0,11	6,30	4,53	27,47	38,30

I ovenstående tabel svarer en rørlængde på 10 m til en faktisk rørlængde på 20 m, idet cirkulationsledningen antages at have samme længde som fordelingsledningen.

Sammenholdes tabel 4.2.1 og tabel 4.3.1 fremgår det, at indførelsen af cirkulation øger rørtabet med ca. 0,2 kWh/døgn pr. meter fordelingsledning (ekskl. cirkulationsledning). Dette forhold (en tredobling af tabet) er vist i figur 4.3.1.



Figur 4.3.1 Procentvis forøgelse af rørtabet ved indførelse af cirkulation, som funktion af fordelingsledningens længde

Ved cirkulation fordobles rørlængden, men dette betyder kun er forøgelse af rørtabet med ca. 100%. Resten skyldes, at rørenes middeltemperatur også øges.

5. OPTIMERET CENTRALT ANLÆG

5.1 Kriterier for optimering

Ved optimering af et centralt anlæg skal man finde en kombination af installeret effekt, lagervolumen, lagertemperatur og rørføring, der resulterer i så lille et energiforbrug som muligt. En minimering af lagervolumen og lagertemperatur vil mindske varmetabet fra lageret og fordelingsledningerne, men det vil øge kravet til den installerede effekt. En forøgelse af effekten medfører generelt set en forøgelse af kedeltabet. Ændringer i rørføringen i forhold til referenceanlægget med en opsplitning af strækningen i flere små strenge, vil kunne reducere vandforbruget ved det fjerneste tæppested samt ophæve kravet om cirkulation.

I det følgende tænkes referenceanlægget anvendt, og der søges en optimering af fyringsenheden. I vandinstallationsnormen er det strengeste krav til brugsvandsopvarmningen, at man skal kunne tappe 52 l vand ved 40°C og 15 l vand ved 45°C fordelt over 5 minutter. Denne tapning skal kunne gentages hvert 20'ende minut. Hvis opvarmningen i lageret foregår ideelt, vil den mindste effekt, der er tilstrækkelig, kunne beregnes af:

$$E = \frac{V_{tap} \rho C_p (T_L - T_K)}{(V/V_{tap}) \cdot \tau} \quad [kW]$$

hvor	E	:	nødvendig effekt [kW]
	V_{tap}	:	tappet vandmængde fra lager [l]
	C_p	:	vands varmekapacitet = 4,180 kJ/kgK
	ρ	:	vands massefylde = 1 kg/l
	T_L	:	lagerets driftstemperatur [°C]
	T_K	:	det kolde vands tilgangstemperatur [°C]
	V	:	lagerets volumen [l]
	τ	:	tidsperiode mellem to tapninger [s]

Den tappede vandmængde med temperaturen T_L beregnes som:

$$V_{tap} = \frac{41}{T_L} \cdot 52 + \frac{46}{T_L} \cdot 15 \quad [l]$$

idet der lægges en grad på normens krav til tappetemperaturen til dækning af rørtabet. Ud fra ovenstående formler er der beregnet 9 kombinationer af lagerstørrelser og lagertemperaturer.

Tabel 5.1.1 Nødvendig effekt til brugsvandsopvarmning i referenceanlægget, som funktion af lagertemperatur, lagerstørrelse og koldtvandstemperatur

Lagervolumen	Lagertemperatur	Tappet vandmængde	Nødvendig effekt	
l	°C	l	kW	
			$T_K=10^{\circ}\text{C}$	$T_K=2^{\circ}\text{C}$
60	46	61,3	7,9	9,6
100	46	61,3	4,7	5,8
150	46	61,3	3,1	3,8
60	55	50,5	6,7	7,8
100	55	50,5	4,0	4,7
150	55	50,5	2,7	3,1
60	65	43,4	6,0	6,9
100	65	43,4	3,6	4,1
150	65	43,4	2,4	2,8

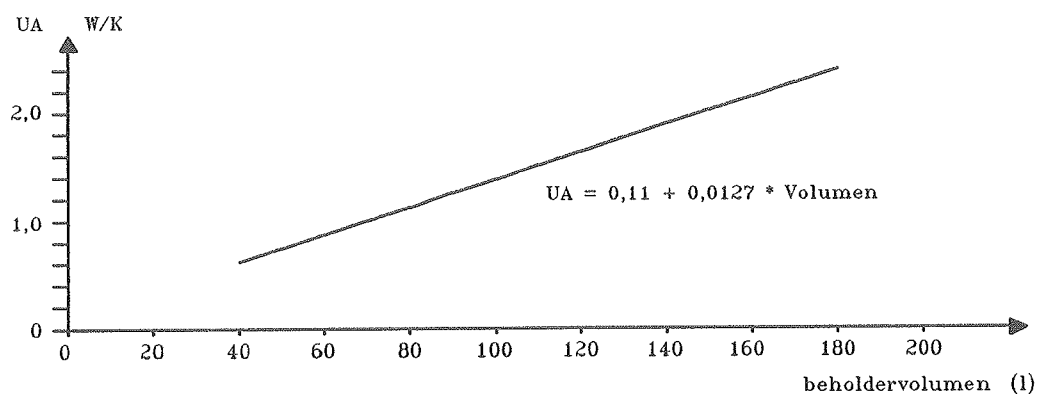
Den nødvendige effekt beregnet ud fra en koldtvandstemperatur på 2°C er ca. 15% større end ved anvendelse af normens værdi på 10°C . Koldtvandstemperaturens årsvariation behandles nærmere i afsnit 8.4.

Den energimæssigt bedste løsning er den kombination af kedel og beholder, der resulterer i det laveste samlede varmetab. Kedelens varmetab beregnes som angivet i [3], idet der regnes med 90% i fyringseffektivitet.

$$UA_{kedel} = \frac{E \cdot 0,015}{45} \cdot 0,9 \quad [W/K]$$

hvor E: den maksimale kedeffect

Varmetabet fra varmtvandsbeholderen findes af figur 5.1.1.



Figur 5.1.1 Varmetabskoefficienten for varmtvandsbeholder som funktion af volumen (ikke generel)

Med 20°C som omgivende temperatur bliver det samlede varmetab:

$$E_{tot} = \left[\frac{E \cdot 0,015}{45} \cdot 0,9 + 0,11 + 0,0127 \cdot V \right] (T_L - 20) \quad [W]$$

Anvendes denne formel på tallene fra tabel 5.1.1, findes følgende skøn over varmetabene.

Tabel 5.1.2 Skønnet varmetab fra kedel + varmtvandsbeholder som funktion af maksimal kedelydelse, lagerstørrelse og lagertemperatur, når omgivelsernes temperatur er 20°C

Lagervolumen	Lagertemperatur	Kedeleffekt	Samlet varmetab
l	°C	W	W
60	46	9600	98
100	46	5800	81
150	46	3800	82
60	55	7800	112
100	55	4700	98
150	55	3100	103
60	65	6900	132
100	65	4100	117
150	65	2800	128

Det fremgår af ovenstående tabel, at den optimale kombination af kedel og varmtvandsbeholder er en 5,8 kW kedel med 100 l varmtvandsbeholder. Dette er under forudsætning af, at kedlen er konstrueret til denne maksimalydelse og derfor opfylder lovkravet om et maksimalt tab på 1,5% af maksimalydelsen. Tabellen viser endvidere, at der under alle omstændigheder bør køres med så lav en vandtemperatur som muligt.

En anden mulighed er at anvende gennemstrømningsvandvarmer, hvorved varmetabet fra varmtvandsbeholderen elimineres. Den installerede effekt bliver imidlertid på ca. 45 kW, hvilket synes urimelig stor.

En af de mindste kedler på markedet har en maksimaleffekt på 8 kW (Junkers, MINI 8), hvorfor denne kedelstørrelse er anvendt i de efterfølgende simuleringer. Det dimensionerende varmetab for et 100-130 m² lavenergihus er ca. 3-4 kW (se afsnit 8.2), hvilket betyder, at kedlen med en passende styring (varmtvandsprioritering) også kan klare husets varmebehov. Der er endvidere anvendt en 60 l varmtvandsbeholder med en lidt højere lagertemperatur end angivet i tabel 5.1.2.

5.2 Døgnenergiforbrug og besparelse i forhold til referenceanlægget

Det kontrolleres ved hjælp af simuleringsprogrammet, om det optimerede anlæg kan opfylde normens krav, idet valget af effekt og lagerstørrelse er baseret på forenkledte beregninger. Samtidig findes døgnenergiforbruget, der, ved sammenligning med referenceanlægget, kan vise den opnåede energibesparelse. Resultaterne er vist i tabel 5.2.1, dels for et anlæg uden og et anlæg med cirkulation. Varmetabskoefficienten for en kedelunit (8 kW) med indbygget 60 l varmtvandsbeholder må højst være 2,4 W/K. Adskilles kedel og varmtvandsbeholder, må kedeltabet stadig være 2,4 W/K, hvorved det samlede varmetab bliver 3,3 W/K med førnævnte beholder VBF60. Beregningerne udføres med sidstnævnte værdi, idet langt de fleste nye kedeltyper anvender denne opdeling. Der regnes endvidere med samme temperatur i kedel og varmtvandsbeholder.

Tabel 5.2.1 Resultater af simulering for referenceanlæg og optimeret centralt anlæg
 $T_{\text{koldt vand}} = 10^{\circ}\text{C}$, rørlængde = 10 m

Anlægs- udformning	Lager- temperatur	Cirku- lation	Tab		Tappet vand	Total
			Beholder	Rør		
	$^{\circ}\text{C}$	l/s	kWh/døgn	kWh/døgn	kWh/døgn	kWh/døgn
Reference	55	0	6,30	1,09	27,47	34,70
Opt. 46	46	0	2,06	0,77	27,47	30,30*
Opt. 55	55	0	2,77	0,95	27,47	31,19
Opt. 65	65	0	3,56	1,20	27,47	32,23
Opt. 46-C	46	0,11	2,06	2,24	27,47	31,77

* Anlægsudformningen kan ikke opfylde kravet til tappetemperaturer inden for den foreskrevne tappemængde og tid, [1].

Simuleringerne viser, at der opnås en reduktion af varmetabet fra beholderen på ca. 56% ved at vælge en lille velisoleret enhed under samme driftsbetingelser. Ved yderligere at sænke lagertemperaturen fra 55°C til 46°C kan kedeltabet reduceres med 67% og rørtabet med 29% ifht. referenceanlægget. Hermed reduceres det samlede varmetab med 62%. Simuleringerne viser også, at det ved en lagertemperatur på 46°C i det optimerede anlæg uden cirkulation ikke er muligt at tappe den givne vandmængde med den givne temperatur uden vandspild (lade vandet løbe til det er varmt nok).

Indføres derimod cirkulation af det varme brugsvand, kan temperaturen i lageret sænkes til 46°C men på bekostning af et større rørtab. På trods af dette vil der alligevel være en reduktion af varmetabet på ca. 42% ifht. referenceanlægget.

Det optimale anlæg skal findes blandt dem uden cirkulation. Det er derfor nødvendigt at undersøge anlæg "Opt. 46" nærmere ved en simulering, hvor der tages hensyn til vandspildet. Dette er gjort ved at øge tappetiden, hvor der er behov for det. Resultatet er vist i nedenstående tabel 5.2.2.

Tabel 5.2.2 Resultater af simulering under hensyntagen til vandspild for et anlæg med 60 l central beholder
 $T_{\text{koldt vand}} = 10^{\circ}\text{C}$, cirkulation = 0, rørlængde = 10 m

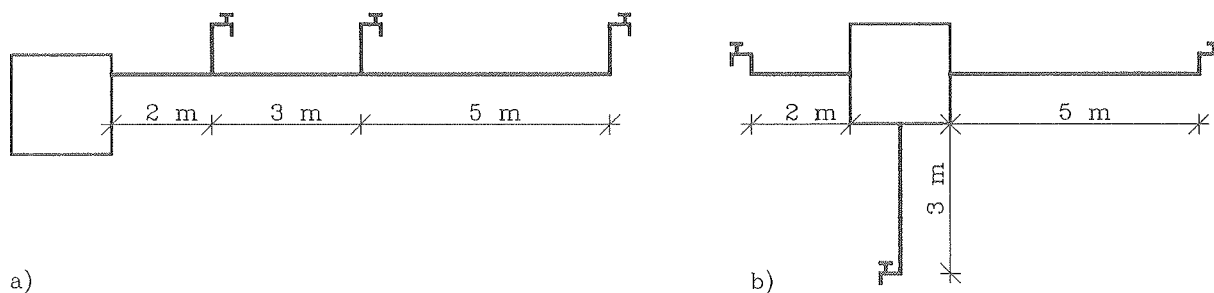
Anlægs- udformning	Lager temperatur	Tab			Tappet vand	Total
		Vandspild	Beholder	Rør		
	$^{\circ}\text{C}$	kWh/døgn	kWh/døgn	kWh/døgn	kWh/døgn	kWh/døgn
Reference	55	0	6,30	1,09	27,47	34,86
Opt. 46	46	0	2,06	0,77	27,47	30,30
Med spild	46	0,16	2,06	0,77	27,47	30,46
Opt. 49	49	0	2,30	0,78	27,47	30,55

Ovenstående tabel viser tillige resultatet af en simulering, hvor lagertemperaturen er justeret, så vandspild netop undgås.

Den optimale løsning for et centralt anlæg, der skal kunne opfylde normens krav til tappemængde og tappetemperatur, kan opbygges af en 60 l velisoleret beholder, hvor lagertemperaturen justeres efter rørtabet, således at vandspild undgås. En lidt lavere lagertemperatur vil i nogle tilfælde være en smule mere energi-økonomisk, hvilket skal opvejes mod merprisen for vand og hensynet til de svindende vandressourcer.

En begrænsning af rørlængden vil dels reducere rørtabet men vil også betyde, at det er muligt at sænke lagerets temperatur og dermed varmetabet fra dette. Varmtvandsbeholderen sluttes til en kedel med en ydelse på 8-9 kW.

Valget af rørføring/forgrening og dermed hele husets planløsning (placering af køkken og bad i forhold til fyrrum) har ligeledes stor betydning for rørtabet selv ved konstant rørlængde. De hidtidige beregninger er udført på et anlæg, hvor tappestederne er placeret på én lang fordelingsledning. Alternativt kunne tappestederne være fordelt omkring centralenheden. De to systemer er vist i figur 5.2.1.



Figur 5.2.1 10 m fordelingsledning som én streng (a) og som tre strenge (b)

Ved at ændre rørføringen som antydnet i figur 5.2.1 kan det centrale anlæg optimeres yderligere. Resultatet af simuleringen er vist i tabel 5.2.3.

Tabel 5.2.3 Resultater af simulering med ændret rørføring (3 strenge)
60 l central beholder
 $T_{\text{koldt vand}} = 10^{\circ}\text{C}$, ingen cirkulation, rørlængde = 10 m

Anlægs- udformning	Lager- temperatur °C	Tab		Tappet vand kWh/døgn	Total kWh/døgn
		Beholder kWh/døgn	Rør kWh/døgn		
Opt. 49	49	2,30	0,78	27,47	30,55
Optrør	46	2,06	0,57	27,47	30,10

Simuleringerne viser en reduktion af rørtabet på 27% ved at ændre rørføringen som skitseret i fig. 5.2.1, samt en reduktion af kedeltabet på ca. 10%. Samlet falder tabet med 15%.

6. DECENTRALE BRUGSVANDSANLÆG

I de foregående afsnit er der set på centrale anlæg, som er knyttet tæt til rumopvarmningen. En anden strategi er at opvarme brugsvandet, dér hvor det skal anvendes, dvs. ved badet, køkkenvasken og håndvasken. Håndvask og bad kan eventuelt forsynes med varmt vand fra en fælles vandvarmer, idet temperaturniveauet er det samme for begge tappesteder. Der skal dog tages forbehold for afstanden mellem tappestederne af hensyn til rørtabet. Fordelen er, at der kun skal trækkes koldtandsrør frem til de enkelte rum, samt at eventuelle varmetab bliver fordelt i huset, så risikoen for uønskede overtemperaturer mindskes. Det vil også være muligt at have en differentieret brugsvandstemperatur afhængig af tappestedets anvendelse. Decentrale vandvarmere kan enten være gennemstrømningsvandvarmere, der kræver en relativ stor installeret effekt eller små beholdervandvarmere med en noget mindre installeret effekt men med et tomgangstab pga. varmetabet fra beholderen. Idet der anvendes de samme tappesteder og det samme tappeprogram som tidligere, er der udført en række simuleringer med forskellige decentrale anlægsudformninger.

6.1 Alle tappesteder forsynet med gennemstrømningsvandvarmere

Normens krav til tappehastigheder og tappetemperaturer medfører, at der til en bruser skal installeres en effekt på 21 kW, til en køkkenvask 15 kW og til en håndvask 9 kW, hvorved den totale effekt er 45 kW. Hvis bad og håndvask i dette tilfælde skulle anvende en fælles vandvarmer kræves en gennemstrømningsvandvarmer med en effekt på 30 kW. Da vandvarmerne er udført med tørkogningssikring, der afbryder strømmen ved for lille vandstrøm, vil en enkelt tapning ved håndvasken ikke kunne aktivere varmelegemet. Der er derfor ikke udført beregninger med fælles gennemstrømningsvandvarmer for bad og håndvask. De nævnte effektstørrelser svarer til de tre typer gennemstrømningsvandvarmere i Metro's katalog. Resultatet af simuleringen er vist i tabel 6.1.1.

Tabel 6.1.1 Simulerede energiforbrug for referenceanlæg og decentralt anlæg med gennemstrømningsvandvarmere
 $T_{\text{koldt vand}} = 10^{\circ}\text{C}$

Anlægs- udformning	Lager- temperatur	Rør- længde	Tab		Tappet vand	Total
			Kedel	Rør		
	$^{\circ}\text{C}$	m	kWh/døgn	kWh/døgn	kWh/døgn	kWh/døgn
Reference	55	10	6,30	1,09	27,47	34,86
Gn.strøm	-	10	0,56	0	27,47	28,03

Ved simuleringen er effektiviteten af vandvarmerne sat til 98%, jvf. fig. 3.2.1.

I forhold til referenceanlægget opnås en energibesparelse på ca. 20%. Anlægsomkostninger ved de forskellige anlæg bliver behandlet i et senere kapitel.

6.2 Alle tappesteder forsynet med beholdervandvarmere

Valg af beholdervandvarmer til det enkelte tappested (eller kombination af tappesteder) er en opvejning af ønsket om minimale beholderstørrelser og lagertemperaturer mod et ønske om så lille installeret effekt som muligt. Desuden skal der tages stilling til el-installationen (230V eller 380V).

Princippet for valg af lagerstørrelse som funktion af lagertemperatur og tappehastighed er omtalt i kapitel 5.1.

Til belysning af energiforbrugets afhængighed af anlægsudformningen er der foretaget en række simuleringer med varierende lagertemperaturer, beholderstørrelser og installerede effekter. De enkelte tappesteder er uafhængige af hinanden, hvorfor en optimering af det samlede anlæg kan udføres ved at optimere de enkelte tapsteders vandvarmere. I tilfældet (bruser + håndvask) er der dels udført en beregning med samtidig tapning og dels en beregning, hvor tapningerne ligger forskudt for hinanden. Simuleringsresultaterne er vist i tabel 6.2.1, idet der kun er medtaget dem, der kan opfylde normkravene [1]. Forudsætningerne for beregningerne er vist i tabel 6.2.2.

Tabel 6.2.1 Resultat af simulering med decentrale beholdervandvarmere

Tappested	Lagervolumen	Lagertemp.	Effekt	Spænding	Energiforbrug
	l	°C	kW	V	kWh
Bruser	55	58	3,6	380	12,28
	110	54	2,0	230	12,43
Køkkenvask	15	55	2,0	230	9,99
	30	48	2,0	230	10,02
Håndvask	10	50	2,0	230	6,05
	15	42	2,0	230	6,02
Håndvask + bruser	110	54	3,6	230	18,50

Det energimæssigt rigtige valg af vandvarmerstørrelse og temperaturniveau er afhængig af tappemængde, tappetemperatur og tappemønster, hvilket fremgår af ovenstående tabel. For tappested med bruser er den bedste løsning et relativt lille lager (55 l) med høj temperatur (58°C) og stor effekt (3,6 kW, 380 V). Til køkkenvasken er det ligeledes en lille beholder med relativ høj temperatur, som er den mest effektive. Derimod gælder det for håndvasken, at det er bedre at vælge en lidt større beholder (15 l) med lavere temperatur frem for den mindre beholder (10 l). Anvendes en fælles vandvarmer til håndvask og bruser kræves pga. muligheden for samtidig

tapning en stor beholder på 110 l med en lagertemperatur på 54°C og 3,6 kW installeret effekt. Energiforbruget ses at stige med 0,2 kWh/døgn sammenlignet med summen af de optimale løsninger for bruser og håndvask. En fælles vandvarmer vil ud over et øget varmetab sandsynligvis resultere i en forøget rørføring og dermed større omkostninger. Der er i ovenstående simuleringer kun anvendt lagerstørrelser, som kan fås på markedet. Endvidere er der ikke valgt lagertemperaturer over 65°C af hensyn til risikoen for skoldning.

Forskellen i de beregnede energiforbrug inden for hvert tappested er små, hvilket skyldes de velisolerede beholdere og det store vandforbrug (varmetabet er forsvindende set i forhold til energiforbruget til opvarmning af vandet).

Tabel 6.2.2 Forudsætninger anvendt i simuleringerne

Lagervolumen	Varmetabskoefficient	Opblanding
l	W/K	%
10	0,38	30
15	0,42	25
30	0,56	20
55	0,82	10
110	1,36	5

7. OPSUMMERING AF RESULTATER FRA SIMULERINGER I DIMENSIONERINGSSITUATIONEN

7.1 Centrale anlæg

Den samlede rørstrækning skal gøres så kort som mulig, og det bør tilstræbes, at tappestederne placeres omkring den centrale enhed, således at rørlængden fra hvert tappested til den centrale beholder minimeres. Dermed reduceres den vandmængde i rørene, som berøres af én tapning.

Cirkulation af varmt brugsvand skal undgås, idet rørtabet ellers tredobles.

Lagertemperaturen og lagerstørrelsen skal optimeres, så det mindst mulige varmetab forekommer. Et lille lager med høj temperatur kan godt have et mindre varmetab end et stort lager med en lavere temperatur, pga. forskel i overfladearealet. Optimeringen skal også tage hensyn til rørtabet, der afhænger af lagertemperaturen.

Resultatet af de udførte simuleringer kan samles til to ligninger til bestemmelse af det totale varmetab fra brugsvandsanlæg i dimensioneringstilstanden.

Anlæg uden cirkulation, én streng:

$$Q_{TAB} = (UA)_L \cdot (T_L - T_o) \cdot 0,024 + 0,003 \cdot (T_L - T_{omg}) \cdot L_{rør} \quad [kWh/døgn]$$

Anlæg med cirkulation, én streng:

$$Q_{TAB} = (UA)_L \cdot (T_L - T_o) \cdot 0,024 + 0,0086 \cdot (T_L - T_{omg}) \cdot L_{rør} \quad [kWh/døgn]$$

hvor	Q_{TAB}	:	samlet varmetab fra beholder og rør [kWh/døgn]
	$(UA)_L$	:	lagerets varmetabskoefficient [W/K]
	T_L	:	lagerets driftstemperatur [°C]
	T_{omg}	:	omgivelsernes temperatur [°C]
	$L_{rør}$	:	samlet rørlængde, ekskl. cirkulation [m]

Simuleringerne viser, at et optimalt centralt anlæg, der netop kan opfylde normkravene, kan opbygges af en 60 l velisoleret beholder med en driftstemperatur på 47-49°C, afhængig af fordelingen af den samlede rørlængde på 10 meter. Beholderen er tilsluttet en effektiv fyringsenhed på 8 kW (gas eller olie).

7.2 Decentrale anlæg

Gennemstrømningsvandvarmere er den mest effektive opvarmningsform, men der kræves ca. 45 kW installeret effekt.

Anvendes små el-vandvarmere til hvert tappested, skal kombinationen af lagerstørrelse og temperatur optimeres jvf. afsnit 7.1.

Simuleringerne har vist, at et optimeret decentralt anlæg består af flg. komponenter:

Bruser - 55 l beholder, lagertemperatur = 58°C
Køkken - 15 l beholder, lagertemperatur = 55°C
Håndvask - 15 l beholder, lagertemperatur = 42°C

Anvendelse af én fælles vandvarmer for håndvask og bruser medfører en forøgelse af varmetabet pga. stort lagervolumen (110 l) og høj temperatur (54°C) til dækning af samtidig tapning ved tappestederne.

Yderligere skal bemærkes, at for decentrale anlæg gælder, at de gør det ufordelagtigt at installere et solvarmeanlæg til opvarmning af brugsvandet om sommeren, idet der så skal føres varmtvandsrør frem til de enkelte tappesteder.

8. ÅRLIGT ENERGIFORBRUG OG EFFEKTIVITET

De tidligere beregninger er udført i overensstemmelse med kravene opstillet i DS439, Dansk Ingeniørforenings Norm for vandinstallationer [1]. Det daglige vandforbrug ved disse beregninger er ca. dobbelt så stort som det gennemsnitlige vandforbrug for en familie på fire personer (SBI-rapport 148, "Beregning af energiforbrug i småhuse" [4]).

I dette kapitel opstilles et mere realistisk tappemønster, der svarer til et døgnforbrug af varmt vand på ca. 240 l, hvilket svarer til en fire personers husstand. I [5] er angivet et middeldøgnforbrug på 105 l/døgn (variation 70-270 l/døgn) baseret på målinger fra 240 enfamiliehuse. Der er ikke angivet, hvor mange personer der i gennemsnit er pr. husstand, men for 18 huse i Tåstrup er fundet et middeldøgnforbrug på 162 l/døgn med et gennemsnit på 3,47 personer pr. hus. Det kan således diskuteres, hvorvidt et døgnforbrug på 240 l er realistisk, men som det også fremgår af [5], er der en meget stor spredning i vandforbruget. Valget af 240 l/døgn er foretaget dels ud fra SBI-rapport 148 og dels ud fra ønsket om at "være på den sikre side". Derudover beregnes det årlige energiforbrug til brugsvandsopvarmning for forskellige anlægsudformninger installeret i et tænkt lavenergihus.

Effektiviteten af de forskellige anlæg beregnes på månedsbasis, idet det undersøges, om varmetab fra rør og beholdere kommer huset til gode eller resulterer i overtemperaturer.

8.1 Tappeprogram for 4 personers husstand

Ifølge SBI-rapport 148 kan man regne med, at energiforbruget til varmtvandsforbruget er personafhængigt og udgør:

$$Q_v = p \cdot 900, \quad p = \text{antal personer} \quad [kWh/dr]$$

En husstand med 4 personer vil således have et årsforbrug på ca. 3600 kWh. Regnes med en gennemsnitlig temperatur på brugsvandet på 42°C og en gennemsnitlig koldt vandstemperatur på 10°C, findes varmtvandsforbruget til ca. 265 l/døgn. Døgnenergiforbruget fordeles på fire brusebade à 42 l ved 40°C, 4 gange 15 l ved køkkenvasken med temperaturen 45°C og 4 gange 10 l ved håndvasken med temperaturen 40°C. Tapningen ved håndvasken opfylder normkravet til tappet vandmængde pr. tapning, men et mere realistisk tappemønster er fx 20 tapninger à 2 l (vask af hænder) ved max. 40°C. Betydningen af tappemønstret for energiforbruget er anskueliggjort ved beregning af energiforbruget for de to tappeprogrammer. Tappeprogrammet med 4 tapninger ved håndvasken er vist i tabel 8.1.1. Tappeprogrammet med 20 tapninger ved håndvasken adskiller sig fra tabel 8.1.1 ved 2 l tapning hver time fra kl. 4⁰⁰ til kl. 23⁰⁰ inkl.

Tabel 8.1.1 Tappeprogram for 4 personers husholdning, normmæssig vandmængde pr. tapning ved håndvask

Tidspunkt	Bruser		Køkkenvask		Håndvask	
	Vandm.	Temp.	Vandm.	Temp.	Vandm.	Temp.
	l	°C	l	°C	l	°C
600-605	42	40	-	-	-	-
620-625	42	40	-	-	-	-
625-628	-	-	-	-	10	40
640-645	42	40	-	-	-	-
700-705	42	40	-	-	-	-
705-708	-	-	-	-	10	40
730-732	-	-	15	45	-	-
1300-1302	-	-	15	45	-	-
2000-2002	-	-	15	45	-	-
2020-2022	-	-	15	45	-	-
2200-2203	-	-	-	-	10	40
2220-2223	-	-	-	-	10	40

8.2 Beskrivelse af lavenergihusmodel

Vurderingen af tomgangstabet og dermed effektiviteten af brugsvandsopvarmningen kræver et kendskab til husets energibalance. Der er derfor opstillet følgende model af et lavenergihus:

Boligareal	120 m ²
Glasareal mod nord	2 m ²
Glasareal mod øst	2 m ²
Glasareal mod syd	10 m ²
Glasareal mod vest	4 m ²
Rudernes transmittans	60%
Dimensionerende varmetab	3,2 kW
Varmetabskoefficient	100 W/K

Varme- og ventilationstabet findes på månedsbasis ud fra tabel 8.2.1 [4], idet der regnes med en middel indetemperatur på 20°C.

Tabel 8.2.1 Månedsmiddelværdier for udetemperatur (15 års data) og differens mellem inde- og udetemperatur, timetal og gradtimetal/1000 ved indetemperaturer på 19, 20 og 21°C

Måned	Udetem- peratur T_u	Differens $T_i - T_u$ i °C ved indetemperatur T_i :			Time- antal N	$(T_i - T_u) \cdot N / 1000$ ved indetemperatur T_i :		
	°C	19°C	20°C	21°C		19°C	20°C	21°C
Januar	-1,0	20,0	21,0	22,0	744	14,88	15,62	16,37
Februar	-0,5	19,5	20,5	21,5	672	13,10	13,78	14,45
Marts	1,9	17,1	18,1	19,1	744	12,72	13,47	14,21
April	5,9	13,1	14,1	15,1	720	9,43	10,15	10,87
Maj	10,9	8,1	9,1	10,1	744	6,03	6,77	7,51
Juni	15,2	3,8	4,8	5,8	720	2,74	3,46	4,18
Juli	16,1	2,9	3,9	4,9	744	2,16	2,90	3,65
August	15,9	3,1	4,1	5,1	744	2,31	3,05	3,79
September	12,9	6,1	7,1	8,1	720	4,39	5,11	5,83
Oktober	8,9	10,1	11,1	12,1	744	7,51	8,26	9,00
November	4,5	14,5	15,5	16,5	720	10,44	11,16	11,88
December	0,8	18,2	19,2	20,2	744	13,54	14,28	15,03

Solindfaldet beregnes ud fra tabel 8.2.2 [4], idet der regnes med 10% reduktion pga. skygger og yderligere 25% reduktion pga. specialruderne.

Tabel 8.2.2 Solindstråling i årets måneder [kWh/m²]. Referencerude uden afskærmning og med fri horisont

Måned	Lodret vindue mod:					45° skråt vindue mod:					Vandret vindue
	S	SV SØ	V Ø	NV NØ	N	S	SV SØ	V Ø	NV NØ	N	
Januar	29	20	8	4	4	25	19	9	5	5	8
Februar	40	30	16	8	8	40	23	19	11	10	18
Marts	62	54	35	20	16	73	65	46	27	21	46
April	65	66	54	35	25	94	89	73	50	34	77
Maj	69	76	72	52	37	116	114	101	77	56	110
Juni	69	80	82	62	45	126	125	116	93	73	128
Juli	65	73	71	55	42	110	110	101	82	65	110
August	69	72	62	43	31	104	100	85	62	44	91
September	68	61	43	26	21	84	77	58	37	28	60
Oktober	51	40	23	12	11	54	46	30	17	15	29
November	30	22	9	5	5	28	22	11	7	7	10
December	25	17	6	3	3	21	16	7	4	4	6

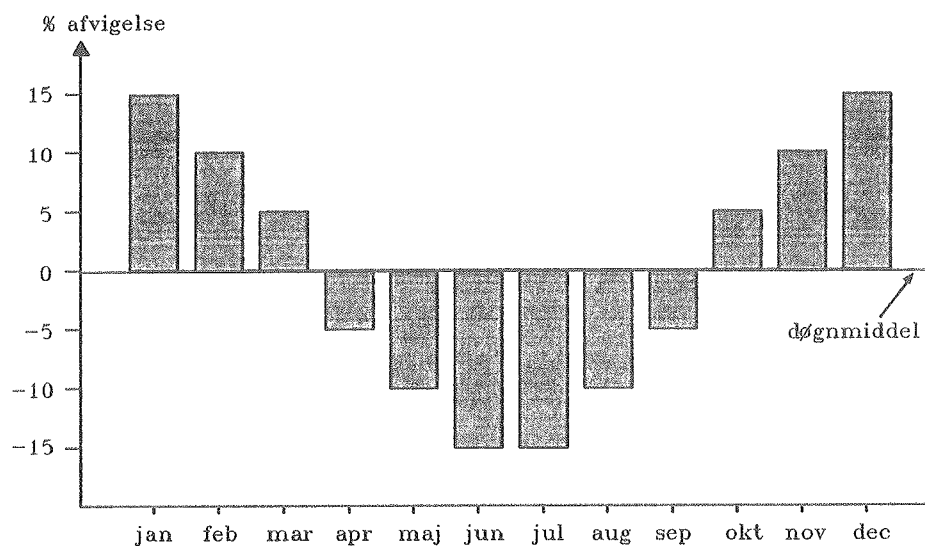
Derudover er der et internt varmetilskud fra forbrug af elektricitet og varme fra personer. I SBI-rapport 148 [4] er følgende erfaringstal angivet:

Varmer fra 4 personer: $Q_{\text{pers}} = 4 \cdot 640 \text{ kWh/år} = 2560 \text{ kWh/år}$

Varmer fra el: $Q_{\text{el}} = 2400 + 4 \cdot 320 \text{ kWh/år} = 3680 \text{ kWh/år}$

Derudover kommer varmetabet fra brugsvandsinstallationen, der findes ud fra simulering af de forskellige anlægstyper.

Fordelingen af det interne varmetilskud over året er ikke jævn, idet forbrug til lys etc. er større om vinteren, ligesom husets beboere opholder sig mere indendørs. Erfaringsmæssigt er fordelingen som angivet i fig. 8.2.1.



Figur 8.2.1 Fordeling af det interne varmetilskud over året

Energibalancen uden hensyn til brugsvandsopvarmningen kan nu opstilles (tabel 8.2.3).

Tabel 8.2.3 Energibalance for det skitserede lavenergihus med 4 personer uden hensyn til brugsvandsopvarmning

Måned	Varmetab	Solindfald	Intern varme	Netto tab
	Q_T	Q_S	Q_I	$Q_T - Q_S - Q_I$
	kWh	kWh	kWh	kWh
Januar	1562	234	609	719
Februar	1378	346	527	505
Marts	1347	582	556	209
April	1015	691	487	-163
Maj	677	807	477	-607
Juni	346	859	436	-949
Juli	290	783	450	-943
August	305	759	477	-931
September	511	662	487	-638
Oktober	826	452	556	-182
November	1116	246	564	306
December	1428	197	609	622
Årligt	10801	6618	6235	

I kolonne "Netto tab" indikerer et minus, at der er overskud af varme, dvs. at energiforbruget til rumopvarmning er nul.

8.3 Tomgangstab og anlægseffektivitet

Tomgangstabet er den del af den indfyrede energimængde, der ikke afsættes i radiatorer eller tappes som varmt vand. Tomgangstabet for en central fyringsenhed kan opdeles i to bidrag: 1) fyringstab og 2) en del af varmetabet fra kedel, varmtvandsbeholder og rørsystem.

Fyringstabet hidrører fra ufuldstændig forbrænding samt den varme forbrændingsluft, der ledes ud gennem skorstenen. Forholdet mellem disse tab og den indfyrede energimængde er for nyere velholdte anlæg ca. 10% svarende til en fyringseffektivitet på 90%.

Anlægseffektiviteten udtrykkes som forholdet mellem den nyttiggjorte energi og den indfyrede energimængde. I stilstandsperioder vil skorstensvirkningen kunne resultere i et uforholdsmæssigt stort luftskifte i fyrrummet gennem fyrets forbrændingskammer, hvilket resulterer i et urimeligt stort varmetab fra kedlen. Hensigtsmæssig udformning af lufttilførsel og afkast (balanceret aftræk) eller brug af spjæld, der lukker, når fyret slukker, vil gøre dette tab betydningsløst. Dette forhold kan illustreres med måleresultater fra Energiministeriets Lavenergihusprojekt i Hjortekær, hvor der er fundet følgende effektiviteter, idet varmetabet fra kedlen er indregnet [6].

Tabel 8.3.1 Kedeleffektivitet for to fyringsenheder, målt i hus D og hus F i Hjortekær, i en vinterperiode

System	hus D: balanceret aftræk	hus F: gasfyr med vågeblus
Kedeleffektivitet	90%	64%

Kedlen i hus D er af den såkaldte unit-type, hvor varmtvandsbeholder og kedel er bygget sammen. I hus F er kedlen en separat enhed med en ekstern varmtvandsbeholder. I begge tilfælde starter fyret, når temperaturen i varmtvandsbeholderen/kedlen er faldet til en given temperatur, ofte 60-65°C ved oliefyring. I kedelunit'en hidrører næsten hele varmetabet fra vandlageret, medens der for den adskilte løsning i hus F både er et varmetab fra kedel og varmtvandsbeholder.

I forbindelse med et eksamensprojekt [2] og nærværende projekt er der udført en række målinger på en flaskegaskedel fra HS Kedler i Tarm, type Apollo 50 V electronic. Kedlen er forsynet med balanceret aftræk og elektronisk tænding, dvs. at der ikke, som i mange kedeltyper, er et tab under stilstand pga. et vågeblus. Varmtvandsbeholderen på 60 l, der er beskrevet tidligere, er placeret som en separat enhed lige ved siden af kedlen.

Kedlens maksimaleffekt er opgivet til 14,7 kW.

Lovens krav til gaskedler er, at tomgangstabet ikke må overstige 1,5% af maksimaleffekten under følgende forhold [3]:

Rumtemperatur = 20°C
 Kedeltemperatur = 65°C
 Differens på driftstermostat = 6 K
 Undertryk i fyrboks = 10 Pa

Tomgangstabet for kedlen under prøvning (ingen rørforbindelser) består af skorstenstab under fyrets drift samt varmetab fra kedlen. Varmetabet kan da findes ud fra kendskab til kedlens fyringseffektivitet. Denne vil for de fleste nye kedler ligge på ca. 90%.

Dermed kan varmetabskoefficienten for kedlen findes af:

$$UA_{kedel} = \frac{E_{\max} \cdot 0,015}{(65 - 20)} \cdot 0,9 \quad [W/K]$$

Anvendes denne formel for den beskrevne kedeltype, findes varmetabskoefficienten til 4,4 W/K. Målingerne viste et varmetab på 4,6 W/K, hvilket viser, at beregningsmetoden i dette tilfælde er fornuftig.

Under simuleringerne fandtes den optimale centrale løsning at bestå af en 8 kW kedel og en 60 l varmtvandsbeholder. Fyringseffektiviteten sættes i det følgende til 90%, hvorved kedlens varmetab bliver 2,4 W/K.

Er brugsvandsanlægget baseret på el-vandvarmere reduceres skorstenstabet i forbindelse med brugsvandsopvarmning til nul.

Der skelnes derfor mellem disse to tilfælde, når anlægseffektiviteten skal beregnes.

Idet følgende betegnelser anvendes findes den ikke nyttiggjorte del af tomgangstabet for en central fyringsenhed med en fyringseffektivitet på $\eta_F = 90\%$, samt anlægseffektiviteten η_A af:

Q_{VVT} : Energiindhold i tappet varmt vand + tab fra brugsvandsanlæg
 Q_T : Varmetab fra huset
 Q_S : Solindfald
 Q_I : Internt varmetilskud ekskl. tab fra brugsvandsanlæg
 Q_{VT} : Tab fra brugsvandsanlæg
 Q_{TOM} : Reelt tomgangstab under hensyn til udnyttelse af varmetabet fra brugsvandsanlægget
 Q_{NET} : $Q_T - Q_S - Q_I - Q_{VT}$

Hvis $Q_{NET} > 0$:

$$Q_{TOM} = \left(\frac{1}{0,9} - 1 \right) \cdot (Q_{VVT} + Q_{NET})$$

$$\eta_A = \frac{Q_{VVT} + Q_{NET}}{Q_{VVT} + Q_{NET} + Q_{TOM}} \cdot 100\%$$

Hvis $Q_{NET} < 0$ og $Q_{VT} > -Q_{NET}$:

$$Q_{TOM} = \left(\frac{1}{0,9} - 1 \right) \cdot (Q_{VVT} + Q_{NET})$$

$$\eta_A = \frac{Q_{VVT} + Q_{NET}}{\frac{1}{0,9} \cdot Q_{VVT} \cdot 100\%}$$

Hvis $Q_{NET} < 0$ og $Q_{VT} < -Q_{NET}$:

$$Q_{TOM} = \left(\frac{1}{0,9} - 1 \right) \cdot Q_{VVT} + Q_{VT}$$

$$\eta_A = \frac{Q_{VVT} - Q_{VT}}{Q_{VVT} - Q_{VT} + Q_{TOM}} \cdot 100\%$$

Anvendes elektrisk opvarmning, er fyringseffektiviteten 100%, hvorved tomgangstabet for brugsvandsopvarmningen findes af:

Hvis $Q_{NET} > 0$:

$$Q_{TOM} = 0$$

$$\eta_A = 100\%$$

Hvis $Q_{NET} < 0$ og $Q_{VT} > -Q_{NET}$:

$$Q_{TOM} = Q_{VVT} + Q_{NET}$$

$$\eta_A = \frac{Q_{VVT} + Q_{NET}}{Q_{VVT}} \cdot 100\%$$

Hvis $Q_{NET} < 0$ og $Q_{VT} < -Q_{NET}$:

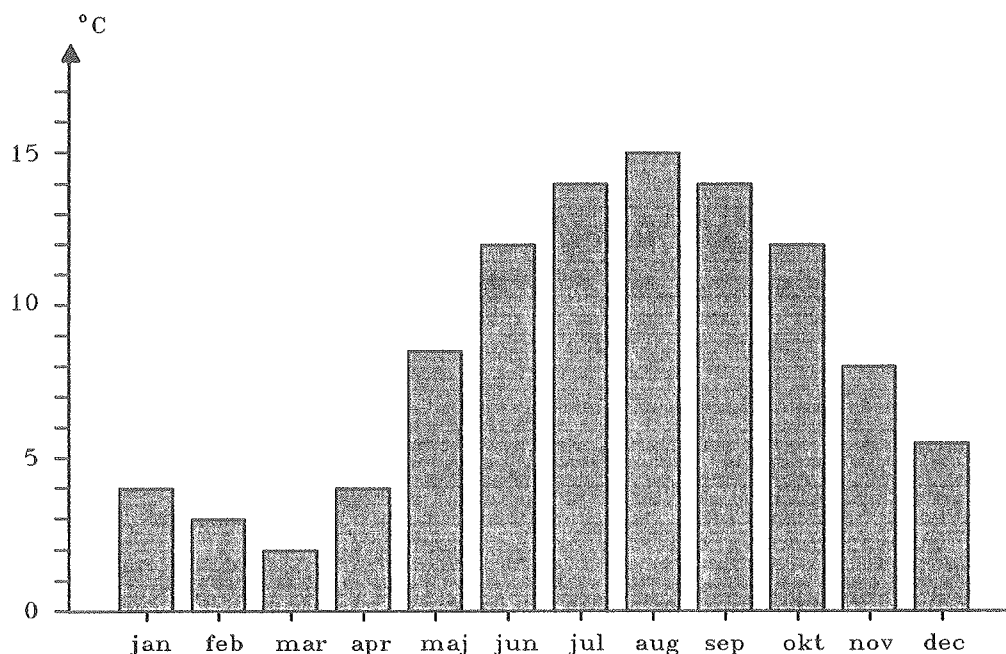
$$Q_{TOM} = Q_{VT}$$

$$\eta_A = \frac{Q_{VVT} - Q_{VT}}{Q_{VVT}} \cdot 100\%$$

8.4 Gas- og oliefyret brugsvandsopvarmning

I de følgende beregninger anvendes nettotabene fra sidste kolonne i tabel 8.2.3 som udgangspunkt, idet disse størrelser er fælles for alle anlæg. Desuden tages der hensyn til koldtvands-temperaturens variation over året.

I tidligere projekter er det fundet, at koldtvandstemperaturen over året varierer mellem 2°C og 15°C (figur 8.4.1), [12]. I Hjortekær-lavenergihusprojekterne er der endda målt temperaturer op til 18°C i sommerhalvåret.



Figur 8.4.1 Koldtvandstemperaturens variation over året [12]

Denne variation vil medføre en variation i energiforbruget på $\pm 15\%$ i forhold til referencelanlægget.

Døgnenergiforbruget for de udvalgte anlæg, når de to "realistiske" tappeprogrammer anvendes, er vist i tabel 8.4.1 og tabel 8.4.2.

Tabel 8.4.1 Døgnenergiforbruget for anlæg til brugsvandsopvarmning under realistisk tappeprogram med normmæssig tappet vandmængde pr. tapning ved håndvasken

Anlægs- udformning	Lager- temperatur	Rør- længde	Tab		Tappet vand	Total
			Kedel	Rør		
-	°C	m	kWh/døgn	kWh/døgn	kWh/døgn	kWh/døgn
Reference	55	10	6,30	0,49	9,70	16,49
Optimeret	49	10	2,30	0,42	9,70	12,42
Optim. + cirk.	46	10	2,06	2,24	9,70	14,00
El-beholder	-	10	1,40	0	9,70	11,10
El-gn.str.	-	10	0,20	0	9,70	9,90

Tabel 8.4.2 Døgnenergiforbruget for anlæg til brugsvandsopvarmning under realistisk tappeprogram med 20 tapninger à 2 l ved håndvasken

Anlægs- udformning	Lager- temp.	Rør- længde	Tab			Tappet vand	Total
			Kedel	Rør	Vand- spild		
-	°C	m	kWh/døgn	kWh/døgn	kWh/døgn	kWh/døgn	kWh/døgn
Reference	55	10	6,30	1,02	0,19	9,70	17,21
Optimeret	49	10	2,30	0,85	1,04	9,70	13,89
Optim. + cirk.	46	10	2,06	2,24	0	9,70	14,00
El-beholder	-	10	1,40	0	0	9,70	11,10
El-gn.str.	-	10	0,20	0	0	9,70	9,90

Det fremgår af tabel 8.4.1 og 8.4.2, at et ændret tappemønster for tapning ved håndvasken øger energiforbruget med 0,6-0,7 kWh/døgn for centrale anlæg uden cirkulation. Dette skyldes dels et forøget rørtab og dels et tab benævnt "vandspild", der fremkommer, fordi den ønskede temperatur ikke kan tappes inden for det foreskrevne tidsinterval. Det er således nødvendigt at lade vandet løbe indtil en passende temperatur er opnået. Dette forhold er selvfølgelig afhængig af rørlængden mellem det centrale lager og tappestedet. I ovenstående eksempel ligger håndvasken længst væk fra centrallageret og er således det værst tænkelige tilfælde.

Sammenlignes de totale tab ved de to tappeprogrammer øges tabet med ca. 10% for referenceanlægget og ca. 54% for det optimerede anlæg, når tapningen ved håndvasken består af 2 liters tapninger hver time.

Ovenstående forholds betydning for anlægseffektiviteten på årsbasis er vist i de efterfølgende tabeller.

Referenceanlæg, 4 tapninger ved håndvask à 10 liter:

Anlægget er opbygget af en 25 kW fyringsenhed, 130 l varmtvandsbeholder med lagertemperatur på 55°C, 3 tappesteder, 10 m rør i én streng.

Tabel 8.4.3 Anlægseffektivitetens fordeling over året for referenceanlæg med 4 tapninger à 10 l ved håndvask

Måned	Netto varmetab (hus) Fra tabel 8.2.3	Q_{VVT}	Q_{VT}	Q_{NET}	Q_{TOM}	Effektivitet η_A
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	%
Januar	719	548	210	509	117	90
Februar	505	504	190	315	91	90
Marts	209	567	210	0	65	90
April	-163	530	204	-366	263	55
Maj	-607	504	210	-816	266	52
Juni	-949	455	204	-1152	254	50
Juli	-943	450	210	-1152	261	48
August	-931	441	210	-1140	259	47
September	-638	436	204	-841	252	48
Oktober	-182	470	210	-391	263	50
November	306	492	204	102	66	90
December	622	533	210	412	105	90
Årligt		5930	2476		2262	72

Det fremgår af ovenstående tabel, at anlæggets effektivitet falder fra 90% til ca. 50%, når der ikke er brug for rumopvarmning. Det betyder, at der i perioden april-oktober er et uudnytteligt tab på 1818 kWh ud af et årligt tab på 2262 kWh.

I [7] er der for et tilsvarende anlæg beregnet en årsnyttevirkning på 85%, men med et 4 gange større varmebehov end anvendt i dette projekt. Årsnyttevirkningen er her fundet til 72%.

I tabel 8.4.4 er anlægseffektiviteten beregnet for referenceanlægget, når der tappes 20 gange 2 l ved håndvasken. Det vandspild, som er indregnet i tabet fra brugsvandsanlægget (Q_{VT}), tilfører ikke huset nogen varme og skal derfor ikke medregnes, når nettovarmebehovet for huset beregnes. Kolonnen benævnt Q_{NET} beregnes derfor som:

$$Q_{\text{NET}} = \text{kolonne 2} - (Q_{\text{VT}} - Q_{\text{vspild}})$$

hvor kolonne 2: husets netto varmetab (fra tabel 8.2.3)
 Q_{vspild} : tab på grund af vandspild

Tabel 8.4.4 Anlægseffektivitetens fordeling over året for referenceanlæg med 20 tapninger à 2 l ved håndvask

Måned	Netto varmetab (hus) Fra tabel 8.2.3	Q_{VVT}	Q_{VT}	Q_{NET}	Q_{TOM}	Effektivitet η_A
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	%
Januar	719	570	233	492	118	90
Februar	505	524	210	300	92	90
Marts	209	590	233	-17	90	87
April	-163	552	225	-381	286	53
Maj	-607	526	233	-833	291	50
Juni	-949	476	225	-1167	278	47
Juli	-943	473	233	-1169	286	46
August	-931	463	233	-1157	284	45
September	-638	457	225	-856	276	47
Oktober	-182	492	233	-408	288	47
November	306	514	225	87	67	90
December	622	556	233	395	106	90
Årligt		6193	2741		2462	70

Det bemærkes, at anlægseffektiviteten falder fra ca. 50% til ca. 45% i sommermånederne pga. det ændrede tappeprogram. Det samlede tab øges med ca. 200 kWh/år.

Optimeret anlæg uden cirkulation:

Anlægget består af 8 kW fyringsenhed, 60 l varmtvandsbeholder med lagertemperatur på 49°C, 3 tappesteder, 10 m rør i én streng.

Tabel 8.4.5 Anlægseffektivitetens fordeling over året for optimeret anlæg uden cirkulation med 4 tapninger à 10 l ved håndvask

Måned	Netto varmetab (hus) Fra tabel 8.2.3	Q_{VVT}	Q_{VT}	Q_{NET}	Q_{TOM}	Effektivitet η_A
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	%
Januar	719	422	84	635	117	90
Februar	505	390	76	429	91	90
Marts	209	441	84	125	63	90
April	-163	408	82	-244	127	72
Maj	-607	378	84	-690	126	70
Juni	-949	333	82	-1030	119	68
Juli	-943	324	84	-1026	120	67
August	-931	314	84	-1014	119	66
September	-638	314	82	-719	116	67
Oktober	-182	344	84	-265	123	68
November	306	370	82	224	66	90
December	622	407	84	538	105	90
Årligt		4445	992		1292	82

Valg af en mindre kedel og dermed mindre varmetab samt tilpasning af lagertemperaturen bevirker, at effektiviteten uden for fyringssæsonen øges med 20%. Dette betyder en besparelse på 970 kWh/år i forhold til referenceanlægget.

I tabel 8.4.6 er anlægseffektiviteten vist for det optimerede anlæg uden cirkulation, når der tappes 20 gange à 2 l ved håndvasken. Beregningerne er foretaget som for tabel 8.4.4.

Tabel 8.4.6 Anlægseffektivitetens fordeling over året for optimeret anlæg uden cirkulation, når der tappes 20 gange à 2 l ved håndvask

Måned	Netto varmetab (hus) Fra tabel 8.2.3	Q _{VVT}	Q _{VT}	Q _{NET}	Q _{TOM}	Effektivitet η_A
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	%
Januar	719	467	130	621	121	90
Februar	505	431	117	417	94	90
Marts	209	487	130	111	66	90
April	-163	452	126	-257	176	65
Maj	-607	423	130	-704	177	62
Juni	-949	377	126	-1043	168	60
Juli	-943	370	130	-1040	171	58
August	-931	360	130	-1028	170	58
September	-638	358	126	-732	165	58
Oktober	-182	389	130	-279	173	60
November	306	414	126	211	69	90
December	622	453	130	524	109	90
Årligt		4981	1531		1659	78

Det samlede energiforbrug til brugsvandsopvarmning øges med 536 kWh for det optimerede anlæg, når der tappes 20 gange à 2 l ved håndvasken i stedet for 4 gange à 10 l. For referencelanlægget blev energiforbruget øget med 263 kWh. Disse tal viser, at jo lavere temperatur i varmtvandsbeholderen jo større følsomhed over for ændrede tappemønstre, idet mange små forbrug ved et tappested øger vandspildet betydeligt.

Optimeret anlæg med cirkulation:

Anlægget er opbygget som før, men med cirkulation af varmt brugsvand (0,11 l/s), og lager-temperatur = 46°C, 4 tapninger ved håndvasken. I dette tilfælde er der ingen forskel på energiforbruget ved 4 tapninger og 20 tapninger ved håndvasken. Beregningsresultaterne er vist i tabel 8.4.7.

Tabel 8.4.7 Anlægseffektivitetens variation over året for optimeret anlæg med cirkulation

Måned	Netto varmetab (hus) Fra tabel 8.2.3	Q _{VVT}	Q _{VT}	Q _{NET}	Q _{TOM}	Effektivitet η_A
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	%
Januar	719	471	133	586	117	90
Februar	505	434	120	385	91	90
Marts	209	490	133	76	63	90
April	-163	456	129	-291	180	65
Maj	-607	427	133	-739	181	62
Juni	-949	380	129	-1077	171	59
Juli	-943	373	133	-1075	175	58
August	-931	363	133	-1063	174	57
September	-638	361	129	-766	169	58
Oktober	-182	393	133	-314	177	59
November	306	418	129	177	66	90
December	622	456	133	489	105	90
Årligt		5022	1567		1669	78

Indføres cirkulation af det varme brugsvand kan lagertemperaturen sænkes 3 K, men varmetabet fra rørføringen øges. Det betyder, at effektiviteten uden for fyringssæsonen falder til ca. 60%, hvilket imidlertid stadig er bedre end for referenceanlægget. Cirkulation udføres normalt ved længere rørstrækninger, hvorved nyttevirkningen vil falde yderligere. Tænkes rørlængden fra fyringsenhed til fjerneste tæppested fordoblet til 20 m vil effektiviteten falde til ca. 50% uden for fyringssæsonen.

8.5 Decentrale anlæg med el-vandvarmere

Decentralt anlæg med beholdervandvarmere:

Anlægget er opbygget af tre beholdere: 1) 55 l med lagertemperatur på 58°C, effekt = 3,6 kW; 2) 15 l med lagertemperatur på 55°C, effekt = 2 kW og 3) 15 l med lagertemperatur på 42°C, effekt = 2 kW. I dette tilfælde vil tappemønstret heller ikke påvirke tabet ved brugsvandsopvarmningen.

Tabel 8.5.1 Anlægseffektivitetens variation over året for decentralt anlæg med beholdervandvarmere

Måned	Netto varmetab (hus) Fra tabel 8.2.3	Q_{VVT}	Q_{VT}	Q_{NET}	Q_{TOM}	Effektivitet η_A
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	%
Januar	719	381	43	676	0	100
Februar	505	353	39	466	0	100
Marts	209	400	43	166	0	100
April	-163	369	42	-204	42	89
Maj	-607	337	43	-649	43	87
Juni	-949	293	42	-990	42	86
Juli	-943	283	43	-985	43	85
August	-931	273	43	-973	43	84
September	-638	274	42	-679	42	85
Oktober	-182	303	43	-224	43	86
November	306	331	42	264	0	100
December	622	366	43	579	0	100
Årligt		3963	508		298	92

Effektiviteten uden for fyringssæsonen er ca. 85%, hvilket resulterer i en besparelse i forhold til referenceanlægget på 1520 kWh og i forhold til det optimerede anlæg på 552 kWh, når der er 4 tapninger ved håndvasken. De tilsvarende tal, når der sammenlignes med 20 tapninger ved håndvasken, er hhv. 1691 kWh og 902 kWh. Effektiviteten er uafhængig af tappestedernes placering i forhold til hinanden.

Decentralt anlæg med gennemstrømningsvandvarmere:

Anlægget består af tre vandvarmere på henholdsvis 21 kW, 15 kW og 9 kW.

Tabel 8.5.2 Anlægseffektivitetens variation over året for decentralt anlæg med gennemstrømningsvandvarmere

Måned	Netto varmetab (hus) Fra tabel 8.2.3	Q_{VVT}	Q_{VT}	Q_{NET}	Q_{TOM}	Effektivitet η_A
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	%
Janur	719	344	6	713	0	100
Februar	505	319	6	499	0	100
Marts	209	363	6	203	0	100
April	-163	333	6	-168	6	98
Maj	-607	300	6	-612	6	98
Juni	-949	257	6	-954	6	98
Juli	-943	246	6	-948	6	97
August	-931	236	6	-936	6	97
September	-638	238	6	-643	6	97
Oktober	-182	266	6	-187	6	98
November	306	295	6	300	0	100
December	622	329	6	616	0	100
Årligt		3526	72		42	99

Effektiviteten er næsten 100% hele året, idet vandindholdet i vandvarmeren er meget lille, og næsten hele den afsatte effekt overføres til vandet. Det årlige tab er 42 kWh.

8.6 Energimæssig sammenligning af anlæg til brugsvandsopvarmning

En sammenligning af energiforbruget til brugsvandsopvarmning vanskeliggøres af, at den decentrale udformning er frigjort fra rumopvarmningen, hvilket ikke er tilfældet for de centrale anlæg. Der er derfor anvendt følgende metode. Energiforbruget beregnes som energiindholdet i det tappede vand divideret med den beregnede effektivitet for anlægget.

$$Q = \frac{Q_{VVT} - Q_{VT}}{\eta_A}$$

I nedenstående tabel 8.6.1 er energiforbruget angivet for de forskellige anlægsudformninger sammen med prisen for energien (olie/gas: 0,45 kr/kWh, el: 0,91 kr/kWh, december 1991).

Tabel 8.6.1 Energimæssig og driftsøkonomisk sammenligning af brugsvandsanlæg

Anlæg	Opvarmnings- middel	Energi- forbrug	Energi- udgift	Energi- besparelse	Udgifts- besparelse
-	-	kWh/år	kr./år	kWh/år/	kr./år
Reference 4 tapn. ved håndvask	olie/gas	5455	2455	0	0
Reference 20 tapn. ved håndvask	olie/gas	5628	2533	-173	-78
Optimeret 4 tapn. ved håndvask	olie/gas	4477	2015	978	440
Optimeret 20 tapn. ved håndvask	olie/gas	4833	2175	622	280
Optimeret med cirkulation	olie/gas	4862	2188	593	267
Decentral beholder	el	3750	3413	1705	-958
Decentral gennemstrømning	el	3408	3101	2047	-646

Resultatet i tabel 8.6.1 viser, at der kan spares op til ca. 2000 kWh/år ved at anvende elektriske gennemstrømningsvandvarmere i stedet for et traditionelt brugsvandsanlæg. Tages der imidlertid hensyn til prisen på den anvendte energikilde vil ovenstående ændring af anlægget betyde en forøgelse af varmeregningen på ca. 650 kr/år. Det kan således ikke betale sig at basere sin brugsvandsopvarmning på el-vandvarmere, når der ses på driftsudgiften alene. Dette forhold kan også ses af energiprisen på energikilderne: olie/gas: 0,45 kr/kWh, el: 0,91 kr/kWh. Sættes disse tal i forhold til hinanden fremgår det, at energiforbruget til el-opvarmning skal være omkring det halve af det, der bruges ved olie/gas opvarmning, hvis der regnes med, at olie/gasfyrets fyringseffektivitet er 90%.

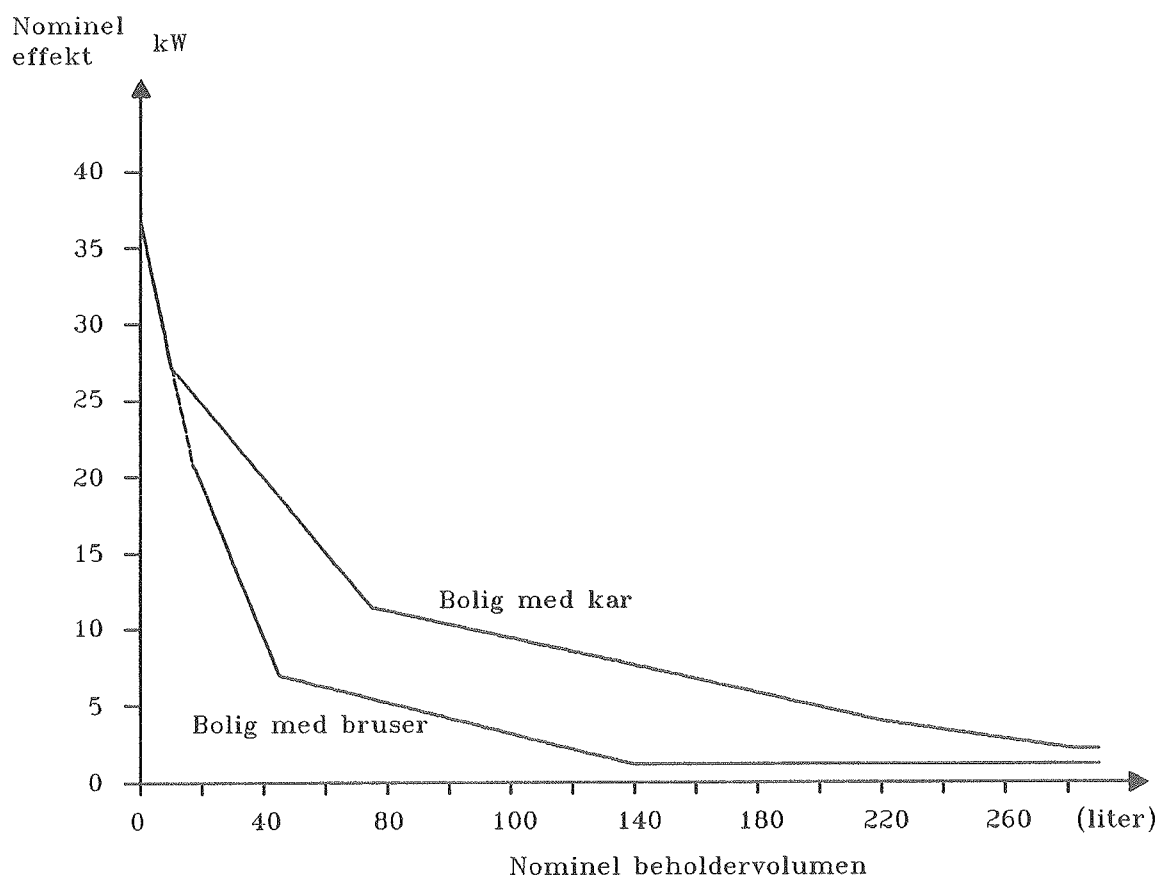
Betragtes tabellerne 8.4.3-8.4.6 og 8.5.1-8.5.2 fremgår det, at der ved den mest effektive brugsvandsopvarmning (el-gennemstrømningsvandvarmere), ikke forekommer nogen måneder, hvor energiforbruget halveres i forhold til referenceanlægget. Det vil sige, at brug af el-vandvarmere i sommermånederne heller ikke er rentabelt.

Den økonomisk optimale brugsvandsopvarmning opnås ved at vælge en kedel med en maksimaleffekt på ca. 8 kW og en 60 l varmtvandsbeholder. I et lavenergihus vil denne løsning med varmtvandsprioriteret styring også sagtens kunne dække husets varmebehov.

9. Diskussion af vandnormens krav

Vandnormens krav til tappehastighed og temperatur stiller visse krav til den installerede effekt. I forbindelse med lavenergihusbyggeri vil effektkravet fra brugsvandsopvarmningen være langt større end kravet fra rumopvarmningen. Eksempelvis er minimeffekten til brugsvandsopvarmning for et centralt anlæg med beholder i dette projekt fundet til 8 kW, og hvis der anvendes gennemstrømningsvandvarmer er effektkravet ca. 45 kW. Dette kan sammenlignes med det dimensionerende varmetab på 3-4 kW for et 100-130 m² lavenergihus.

I [8] er der fundet følgende sammenhæng mellem beholdervolumen og installeret effekt i dimensioneringssituationen (fig. 9.1).

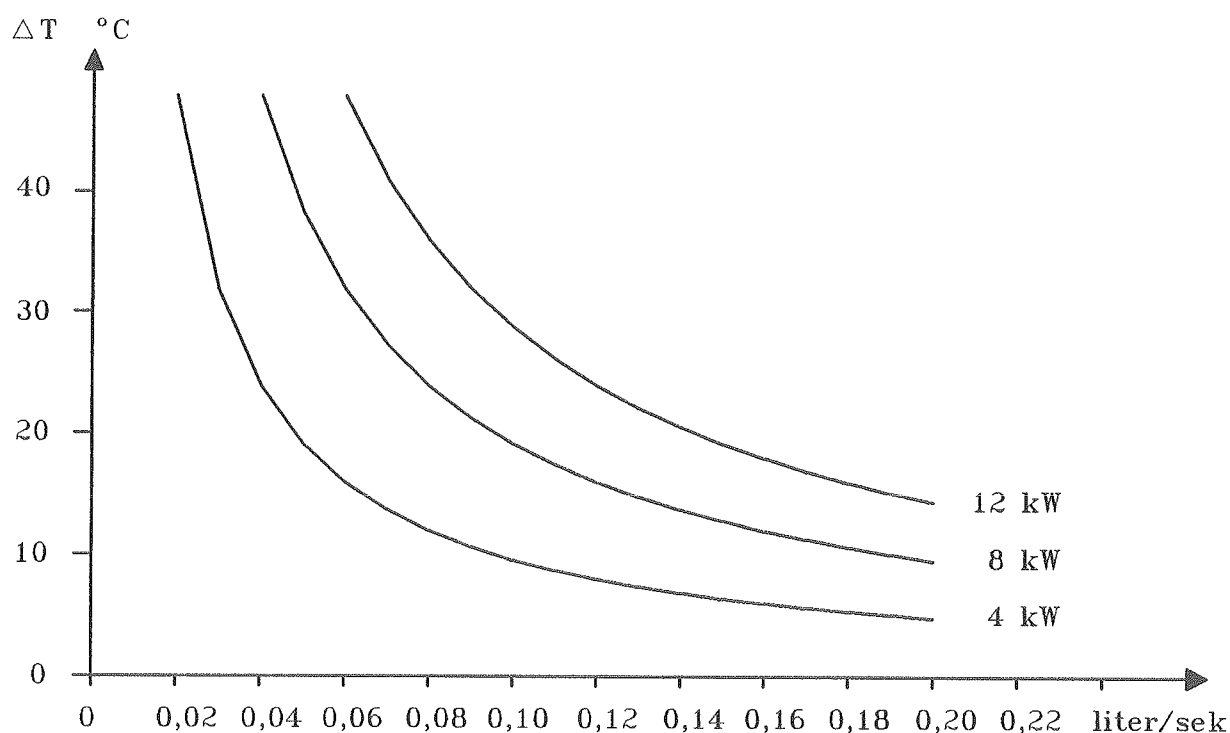


Figur 9.1 Nødvendig varmeoverføring og beholdervolumen til dækning af dimensionerende tappeprogram i helårsboliger forudsat 15% tillæg pga. kalkudfældning og 85% effektivt volumen med koldtvandstemperatur 10°C og varmtvandstemperatur 45°C

Det vil være ønskeligt, at effektkravet til rumopvarmning og til brugsvandsopvarmning er omtrent ens, idet der herved opnås den mest økonomiske drift.

I det følgende undersøges de komfortmæssige konsekvenser, når maksimaleffekten varieres.

Figur 9.2 viser sammenhængen mellem tappehastighed og opvarmning, hvis gennemstrømningsprincippet anvendes. Det fremgår af figuren, at volumenstrømmen ved 4 kW maksimaleffekt skal være under 0,03 l/s for at opnå en tappetemperatur over 40°C ($\Delta T + 10^\circ\text{C}$). Ved 8 kW er den øvre grænse for volumenstrømmen 0,06 l/s, hvilket vil være acceptabelt i køkken og håndvask. Det skal i dette tilfælde forudsættes, at der ikke tappes begge steder samtidigt. For tappested med bruser vil denne vandstrøm imidlertid næppe være tilstrækkelig. En leverandør af vandbesparende brusearmatur reklamerer dog med, at der kan opnås god bruseeffekt ved en vandstrøm på kun 0,033 l/s, hvilket imidlertid vurderes for optimistisk af en undersøgelse foretaget af PlanEnergi [9]. Derimod vil en god bruseeffekt kunne opnås med en vandstrøm på 0,066 l/s.



Figur 9.2 Temperaturstigning ved anvendelse af gennemstrømningsvandvarmer som funktion af volumenstrøm og effekt

Øges effekten til 12 kW, vil det være muligt at tage et brusebad med en volumenstrøm på ca. 0,08 l/s, hvilket, med et vandbesparende brusehoved, vil være fuldt ud acceptabelt.

Forringelsen af komforten vil da bestå i, at der ikke må tappes fra andre tappesteder, medens der tages bad. Accepteres dette, kan brugsvandsinstallationen udføres med en 12 kW kedel, uden varmtvandsbeholder.

Der vil da kun være et kedeltab på ca. 3,6 W/K, beregnet ud fra lovkravet til kedlers maksimaltab på 1,5% af maksimalydelsen. En stor del af dette tab skyldes, at kedlen holdes opvarmet

på sin driftstemperatur, også når der ikke er noget varmebehov. Hvis kedlen/fyret kun tænder, når der er et opvarmningsbehov, vil tabet reduceres til ca. 11 % af opvarmningsbehovet svarende til en fyringseffektivitet på 90%:

$$kedeltab = \frac{Q_{NET} + Q_{VVT}}{0,9}, \quad Q_{NET} > 0$$

Hvis Q_{NET} er mindre end 0 bliver kedeltabet lig tabet pga. fyringseffektiviteten. Hertil skal lægges rørtabet, idet dette ikke kan nyttiggøres i huset, for at finde det totale tab.

Ovenstående vil kræve en mere avanceret styring end normalt, idet cirkulationspumpen skal styres fra rumopvarmningssystemets termostater. En realisering af ovenstående vil resultere i følgende energiforbrug fordelt over året, idet der regnes med, at rørtabet svarer til det, der er fundet for referenceanlægget:

Tabel 9.1 Energiforbrug fordelt over året, beregnet ud fra anlægget beskrevet ovenfor

Måned	Netto varmetab (hus) Fra tabel 8.2.3	Q_{VVT}	Q_{VT}	Q_{NET}	Q_{TOM}	Effektivitet η_A
	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	%
Januar	719	353	15	704	117	90
Februar	505	327	14	491	91	90
Marts	209	372	15	194	63	90
April	-163	341	15	-177	53	86
Maj	-607	309	15	-621	49	86
Juni	-949	266	15	-963	44	85
Juli	-943	255	15	-957	44	85
August	-931	245	15	-945	42	84
September	-638	247	15	-652	42	85
Oktober	-182	275	15	-196	46	85
November	306	303	15	291	66	90
December	622	338	15	607	105	90
Årligt		3631	179		762	88

Tabellen viser, at effektiviteten uden for fyringssæsonen er ca. 85%, hvilket er ca. 20% bedre end for det optimerede anlæg med 60 liter varmtvandsbeholder. Energibesparelsen i forhold til dette er ca. 520 kWh/år.

Anlæg med varmtvandsbeholder kan ikke optimeres yderligere, selvom der indføres den restriktion, at der ikke må tappes fra flere tappesteder samtidigt. Dette skyldes, at det næsten er lige

meget, om beholderen tømmes i løbet af fem minutter (3 samtidige tapninger fra henholdsvis bruser, køkken- og håndvask) eller i løbet af 10 minutter (tapninger lige efter hinanden), idet normens krav om maksimalt 20 minutter mellem hvert bad er fornuftig.

10. Økonomi

En total økonomisk vurdering af de forskellige anlæg må tage hensyn til installationsprisen og forventningen til den fremtidige prisudvikling. I SBI-anvisning 132 [10] er beskrevet en metode til beregning af fremtidige udgifter og besparelsers værdi på investeringstidspunktet, "Nuværdimetoden".

Installationsprisen for de forskellige anlæg er hentet fra [11] og forespørgsler hos forskellige fabrikanter og er angivet i nedenstående tabel 10.1.

Tabel 10.1 Overslag over anlægsprisen for forskellige udformninger af brugsvandsanlæg

Anlægs-udformning	Central olie/gas kedel med 130 l beholder	Central gaskedel (8kW) 60 l beholder	Central gaskedel (12 kW) gn.strøm	Decentrale elektriske beholdervand-varmere	Decentrale elektriske gennemstrømningsvandvarme.
Vandvarmer	21780	17365	20600	5870	5800
Varmtvandsrør (10m)	2048	2048	2048	0	0
Koldtvandsrør (10m)	1769	1769	1769	1769	1769
El-installation	187	187	187	1714	4020
Total (kr.)	25784	21369	24604	9353	11589

Nuværdimetoden anvendes på de fem anlæg med følgende indgangsværdier:

Pris pr. kWh ved olie og gas:	0,45 kr.
Pris pr. kWh ved el:	0,91 kr.
Løbende udgifter:	
olie/gas *	0 kr.
el-vandvarmere *	0 kr.
Forventet økonomisk levetid	20 år
Nominel kalkulationsrente	12%
Skatteprocent for renteindtægter	55%
Forventet prisstigningstakt på energi	5%
Forventet prisstigningstakt på løbende udgifter	5%

* (al service, eftersyn etc. henføres til rumopvarmningen).

Nuværdimetoden anvendes til at finde den samlede udgift til brugsvandsopvarmning over de næste 20 år henregnet til nutidspriser. Resultatet er vist i nedenstående tabel:

Tabel 10.2 Samlet pris for varmt brugsvand i 20 år frem i tiden henregnet til 1991 kr.

Anlægsud- formning	Central olie/gaskedel med 130 l beholder	Central gaskedel (8kW) 60 l beholder	Central gaskedel (12 kW) gn.strøm	Decentrale elektriske beholdervand- varmere	Decentrale elektriske gennemstrøm- ningsvandvarm.
Akkumule- ret udgift	69775	57380	58364	79438	81504

Tabellen viser, at den totalt set privatøkonomisk bedste løsning er den centrale gaskedel med 60 l varmtvandsbeholder.

El-vandvarmere er på grund af el-prisen udelukket som et økonomisk alternativ. I ovenstående tabel burde kolonnerne for el-vandvarmerne ydermere tillægges en del af udgiften til installation af rumopvarmningen, idet kedelprisen er indregnet i de første tre kolonner.

11. Konklusion

Kravene til tappemængde og tappetemperatur for forskellige tappesteder er anført i Dansk Ingeniørforenings Norm for Vandinstallationer, DS439, og resulterer i et dagligt varmtvandsforbrug på 496 l ved 40°C plus 240 l ved 45°C for en installation med en bruser, en køkkenvask og en håndvask.

En normal 4 personers husstand bruger maksimalt 208 l vand ved 40°C plus 60 l ved 45°C. I gennemsnit anvendes ca. 160 l/døgn ved en gennemsnitstemperatur på 45°C [5]. Anvendelse af normens krav kan således ikke anvendes til beregning af energiforbruget til varmt brugsvand.

Dimensioneringen af brugsvandsanlægget skal imidlertid foretages ud fra normkravene, hvilket i nogle tilfælde kan føre til en overdimensionering.

I dimensioneringssituationen er der fundet følgende fordeling af tabene for forskellige anlæg med ovennævnte tre tappesteder på én streng (uden cirkulation):

- Traditionelt anlæg 25 kW oliefyr, 130 l varmtvandsbeholder ved 55°C, 10 m isoleret fordelingsledning:
Tab fra kedel + beholder = 6,3 kWh/døgn
Tab fra rør = 1,1 kWh/døgn
- Optimeret anlæg 8 kW gaskedel, 60 l varmtvandsbeholder ved 49°C, 10 m isoleret fordelingsledning:
Tab fra kedel + beholder = 2,3 kWh/døgn
Tab fra rør = 0,8 kWh/døgn
- Decentralt anlæg med el-vandvarmere: (55 l, 58°C, 3,6 kW) + (15 l, 55°C, 2 kW) + (15 l, 42°C, 2 kW):
Tab fra beholdere = 1,3 kWh/døgn
Tab fra rør = 0 kWh/døgn
- Decentralt anlæg med el-gennemstrømningsvandvarmere på 21 kW + 15 kW + 9 kW:
Tab fra vandvarmere = 0,6 kWh/døgn
Tab fra rør = 0 kWh/døgn

Et decentralt anlæg med elektriske gennemstrømningsvandvarmere er den energioekonomisk bedste løsning.

Rørtabet er afhængig af rørlængden, antal tapninger og vandtemperaturen. For fast tappemønster er rørtabet ca. 3 Wh/(meter rør)/(temperaturforskel mellem lager og rørenes omgivelser) i dimensioneringssituationen, uden cirkulation. Tappestederne ligger i forlængelse af hinanden (serieforbundet).

Indføres cirkulation i ovenstående anlægsudformning øges rørtabet til 8,6 Wh/mK.

Fordeles de 10 meter rør på tre strenge, reduceres rørtabet til ca. 2 Wh/mK, uden cirkulation.

Tab fra varmtvandsbeholder og kedel reduceres næsten ikke, når vandforbruget ændres.

Rørtabet for anlæg uden cirkulation halveres, når varmtvandsforbruget reduceres med 64%, svarende til forskellen mellem dimensioneringssituationen og det reelle forbrug for en 4 personers husstand.

Det totale energiforbrug er afhængig af tappemønstret, idet mange små tapninger i stedet for få og store øger rørtabet og ofte resulterer i et vandspild pga., at man må lade vandet løbe, indtil den rette temperatur opnås.

Energiforbruget til brugsvandsopvarmning til en 4 personers husstand ved reelt forbrug er:

- Optimeret centralt anlæg (gas)	4480-4840 kWh/år
- El-gennemstrømningsvandvarmere	3410 kWh/år

Med en olie/gas-pris på 0,45 kr/kWh og en el-pris på 0,91 kr/kWh er anvendelsen af el-opvarmning af vand ikke rentabel. Dette er heller ikke tilfældet, når der tages hensyn til installationsprisen.

Sammenfattende kan det konkluderes, at den energimæssigt optimale løsning er anvendelse af decentrale elektriske gennemstrømningsvandvarmere. Tages der hensyn til el-værkernes virkningsgrad, vil energiregnskabet imidlertid ændres kraftigt afhængig af, om værkets overskudsvarme udnyttes eller ej.

Den privatøkonomisk bedste løsning er derimod et lille 8 kW gasfyr med en 60 l velisoleret varmtvandsbeholder.

Der bør ved projektering af huse lægges stor vægt på at samle alle rum med forbrug af varmt vand omkring den varmeproducerende enhed, dels for at imødegå kravet om cirkulation, og dels for at minimere rørlængden.

Cirkulation af varmt brugsvand bør så vidt muligt undgås.

Der bør lægges stor vægt på anvendelse af vandbesparende armaturer, da energiforbruget til brugsvandsopvarmning er direkte relateret til den tappede vandmængde. Et mindre effektbehov pga. mindre volumenstrømme vil imidlertid også kunne fremme anvendelse og udvikling af endnu mindre og energieffektive fyringsenheder.

Med fremkomsten af små gasfyrede kedler er man kommet et langt skridt mod en effektiv udnyttelse af energien, også i lavenergihuse. En mere effektiv isolering af kedler vil kunne halvere kedeltabet og dermed, på landsplan, betyde en væsentlig energibesparelse og nedsættelse af forureningen. For den enkelte forbruger vil det reducere overophedningsproblemet i fyrrummet (og tilstødende rum) i sommerperioden samt nedsætte energiudgiften.

12. Litteraturfortegnelse

Referencer

- [1] Dansk Ingeniørforenings Norm for Vandinstallationer. Dansk Standard, DS439, 1. udg. 1978.
- [2] Tomgangstab, F. Ravn. Eksamensprojekt. Laboratoriet for Varmeisolering, marts 1987.
- [3] Prøvestande for små gaskedler, S. Gundtoft, O. Paulsen. Teknologisk Institut, Jysk Teknologisk 1985.
- [4] Beregning af energiforbrug i småhuse, K. Johnsen, A. Nielsen. SBI-rapport 148. Statens Byggeforskningsinstitut, Hørsholm 1984.
- [5] Varmtvandsforbrug i boliger. Målinger af vand- og energiforbrugets størrelse og fordeling, H. Lawaetz, Teknologisk Institut, Varme- og Installationsteknik, Tåstrup, 1985.
- [6] 6 Lavenenergihuse i Hjortekær. Effektiviteter og tomgangstab for varme- og brugsvandsanlæg. N.H. Rasmussen, B. Saxhof. Meddelelse nr. 152. Laboratoriet for Varmeisolering. DTH, juni 1984.
- [7] Energiforbruget til vandopvarmning. Målinger og beregninger af energiforbruget til fremstilling af varmt vand i boliger, Teknologisk Institut, Varme- og Installationsteknik, Tåstrup, 1985.
- [8] Lavtemperatur og varmt brugsvand, H. Lawaetz, Teknologisk Institut, Varme- og Installationsteknik, Tåstrup, 1985.
- [9] Reduktion af boligernes vandforbrug og spildevandsafledning, PlanEnergi Midtjylland, 1990.
- [10] Økonomisk vurdering af energibesparende foranstaltninger, K. Johnsen, M. Kvetny, H.S. Andersen. SBI-anvisning 132. Statens Byggeforskningsinstitut, Hørsholm 1985.
- [11] V&S Priser - Husbygning 87. V&S Byggedata A/S, 2700 Brønshøj.
- [12] European Simplified Methods for Active Solar System Design, B. Bourges, Kluwer Academic Publishers, 1991.

Yderligere litteratur:

- [13] Heat Transfer, D.R. Pitts, L.E. Sissom, Schaum's Outline Series, McGraw-Hill Book Company, 1977.
- [14] Bygningsreglement for småhuse, BR-S 85. Byggestyrelsen, København 1985.

LavEnergi Publikationer fra Laboratoriet for Varmeisolering, DTH

Laboratoriets meddelelsseserie forhandles gennem Byggecentrums Boghandel.

- 1 Bolet, B., Rasmussen, N.H. & Korsgaard, V.: Ressourcebesparende kassettebyggesystem til lavenergi huse. LfV, Meddelelse nr. 197, december 1988.
- 2 Byberg, M.R.: Fremtidens lavenergi huse, XII Nordiske VVS Kongres i København, VVS Vision 82, 2/6-4/6 1982, Særtryk, LfV, Rapport nr. 82-26, juni 1982.
- 3 Byberg, M.R.: Do Conservation Houses Require Sophisticated Technical Installations?, LfV, Meddelelse nr. 127, november 1982.
- 4 Byberg, M.R.: Forbedret bearbejdning af måledata fra nyt lavenergi hus, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150 (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 125-133, maj 1984.
- 5 Byberg, M.R., Djurtoft, R.G. & Saxhof, B.: 6 Lavenergi huse i Hjortekær, Kort beskrivelse af husene, LfV, Meddelelse nr. 83, maj 1979.

Byberg, M.R., Djurtoft, R.G. & Saxhof, B.: 6 Low-Energy Houses at Hjortekær - Description of the Houses, LfV, Meddelelse nr. 83, maj 1979.

Byberg, M.R., Djurtoft, R.G. & Saxhof, B.: 6 Niedrigenergiehäuser in Hjortekær, Dänemark - Kurze Beschreibung der Häuser, LfV, Meddelelse nr. 83, maj 1979.
- 6 Byberg, M.R. & Saxhof, B.: 6 Lavenergi huse i Hjortekær, Konstruktioner - arbejdsudførelse og erfaringer, LfV, Meddelelse nr. 120, november 1982.
- 7 Djurtoft, R.G.: Monitoring Energy Conservation Houses, ENERGEX 82, LfV, Rapport nr. 82-28, juni 1982.
- 8 Djurtoft, R.G.: Beregning og måling af mekanisk luftskifte i lavenergieksperimenthuset, LfV, Rapport nr. 82-65, december 1982.
- 9 Djurtoft, R.G.: Nordiske retningslinier for evaluering af byggeeksperimenter - Er noget sådant muligt?, Utvärdering av Experimentbyggnadsprojekt inom Energiområdet, Nordiskt Expertseminarium 6/9-7/9 1983 i Esbo, Finland, Særtryk, LfV, oktober 1983.
- 10 Djurtoft, R.G.: Tidskonstanter for huse, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150 (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 40-56, maj 1984.
- 11 Djurtoft, R.G.: Tidskonstantens betydning for husets energiforbrug, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150 (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 73-82, maj 1984.
- 12 Djurtoft, R.G.: Must Energy Conservation Houses be Designed for Maximum Utilization of Solar Heat Gain?, CLIMA 2000 Copenhagen 1985, Volume 5, pp. 167-173.

- 13 Engelund Poulsen, K.: Isolerende vinduesskodder, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150 (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 83-90, maj 1984.
- 14 Engelund Thomsen, K.: IEA Task 13 Summary Report of the Technology: Solar heating systems for domestic hot water, LfV, august 1991.
- 15 Engelund Thomsen, K.: IEA Task 13 Summary Report of the Technology: Energy Efficient Lights and Appliances, LfV, september 1991.
- 16 Engelund Thomsen, K.: Kuldebroers indflydelse på bygningers varmetab, LfV, Meddelelse nr. 225, november 1991.
- 17 Engelund Thomsen, K. & Schultz, J.M.: Målinger og beregninger af solindfald gennem glaspartier under hensyntagen til skyggende genstande for lavenergihus G i Hjortekær, LfV, Rapport nr. 87-24, december 1987.
- 18 Engelund Thomsen, K., Wittchen, K.B., Saxhof, B. & Lundgaard, B.: Design Summaries and Drawings for Two Danish IEA Task XIII Houses, paper til IEA Task XIII Fourth Experts' Meeting, Toronto 1991, LfV, februar 1991.
- 19 Engelund Thomsen, K., Wittchen, K.B., Saxhof, B. & Lundgaard, B.: Parametric Studies for Two Danish IEA Task XIII Houses, paper til IEA Task XIII Fourth Experts' Meeting, Toronto 1991, LfV, februar 1991.
- 20 Gullev, J.: Lavenergihus i Hjortekær, Byggeindustrien nr. 1, 1979, pp. 9-15.
- 21 Huusom, J. & Lund Madsen, T.: The Thermal Indoor Climate in six Low Energy Houses, 7th International Congress of Heating and Air Conditioning, "CLIMA-2000", Budapest 1980, Off-print, LfV, 1980.
- 22 Korsgaard, V., Byberg, M.R. & Hendriksen, P.: Experiences and Results from 2 Years Monitoring of the Energy Balance for Six Solar Assisted Low Energy Houses in Denmark, Solar 83 Conference, Palma de Mallorca 2/10-6/10 1983, Off-print, LfV, oktober 1983.
- 23 Kristensen, P.E.: Performance of Hjortekær House D and F - Internal report within the Performance Monitoring Group, LfV, Rapport nr. 83-48, december 1983.
- 24 Rasmussen, N.H.: En analyse af energibesparelser i etageejendom fra 1940 - foranstaltningernes energi- og pengeøkonomiske konsekvenser, LfV, Meddelelse nr. 111, juli 1981.
- 25 Rasmussen, N.H.: Trykprøvning af seks lavenergihus i Hjortekær, LfV, Rapport nr. 82-69, december 1982.
- 26 Rasmussen, N.H.: Simultaneous Testing of Small Heat Pumps Under Actual Climate Conditions, CLIMA 2000 Copenhagen 1985, Volume 6, pp. 147-153.
- 27 Rasmussen, N.H. & Saxhof, B.: Experimental Low-Energy House at the Technical University of Denmark, description of a system for simultaneous testing of heating systems for conservation houses under actual climate conditions, LfV, Meddelelse nr. 128, november 1982.

- 28 Rasmussen, N.H. & Saxhof, B.: 6 Lavenergihuse i Hjortekær, Effektiviteter og tomgangstab for varme- og brugsvandsanlæg, LfV, Meddelelse nr. 152, juni 1984.
- 29 Saxhof, B.: Transmissionskoefficienter og dimensionerende varmetab for seks lavenergihuse i Hjortekær, LfV, Rapport nr. 82-11, juni 1982.
- 30 Saxhof, B.: Varmetabsramme og isoleringsgrad for seks lavenergihuse i Hjortekær, LfV, Rapport nr. 82-12, juni 1982.
- 31 Saxhof, B.: Skøn over følsomhed af målte og beregnede transmissionstab for seks lavenergihuse i Hjortekær, LfV, Rapport nr. 82-56, oktober 1982.
- 32 Saxhof, B.: External Insulating Shutters in Energy Conservation Houses, LfV, Meddelelse nr. 129, november 1982.
- 33 Saxhof, B.: Målesystemer for seks lavenergihuse i Hjortekær: Vejrstation, LfV, Rapport nr. 83-5, april 1983.
- 34 Saxhof, B.: Målesystemer for seks lavenergihuse i Hjortekær: Måling af rum- og jordtemperaturer, LfV, Rapport nr. 83-15, september 1983.
- 35 Saxhof, B.: Målesystemer for seks lavenergihuse i Hjortekær: Målinger i varme- og ventilationsanlæg m.v., LfV, Rapport nr. 83-16, september 1983.
- 36 Saxhof, B.: Skitse til målesystem til lavenergihus G i Hjortekær, LfV, Rapport nr. 83-27, oktober 1983.
- 37 Saxhof, B.: Opstilling af nettoenergiregnskab efter BES-metoden for Lavenergihus G i Hjortekær (skitseprojekt), LfV, Rapport nr. 83-47, december 1983.
- 38 Saxhof, B.: Utilsigtede varmetab fra installationer i lavenergihuse, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150 (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 91-102, maj 1984 (optrykt i VVS nr. 9, september 1985, pp. 17-21).
- 39 Saxhof, B.: Installationers betydning for klimaskærmens lufttæthed, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150 (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 103-115, maj 1984.
- 40 Saxhof, B.: The Seventh Low-Energy House at Hjortekær, Denmark, CLIMA 2000 Copenhagen 1985, Volume 5, pp. 255-262.
- 41 Saxhof, B.: Efficient Heating and Domestic Hot Water Systems: A Must for Low-Energy Houses, CLIMA 2000 Copenhagen 1985, Volume 5, pp. 319-324.
- 42 Saxhof, B.: A Second Generation Low-Energy House at Hjortekær, Denmark, Building Physics in the Nordic Countries, Symposium i Lund august 1987, Off-print, LfV, Rapport nr. 87-8, 1987.

- 43 Saxhof, B.: Low-Energy Houses, 1st International Symposium on Energy Savings - Focussing on electricity savings, Copenhagen 1/9-4/9 1987, Off-print, LfV, Rapport nr. 87-21, september 1987.
- 44 Saxhof, B.: Summary on new materials, components and system concepts - Denmark, Monograph Part 2, IEA Workshop on Advanced Solar Building Design and Analysis, Watsonville, California, February 3-6 1988, LfV, januar 1988.
- 45 Saxhof, B.: Designing Detailed Monitoring Programmes (Questions and some Answers), Off-print af paper til IEA Workshop: Field Monitoring - For a Purpose, Göteborg 2-5 april 1990, LfV, marts 1990.
- 46 Saxhof, B.: Field Monitoring - For A Purpose. IEA Task 13 Summary Report, LfV, august 1991.
- 47 Saxhof, B.: The Thermal Envelope - An Integrated Part of the Heating System? Science and Technology at the Service of Architecture. 2nd European Conference on Architecture (SECA). Paris 1989, LfV, Meddelelse nr. 222, oktober 1991.
- 48 Saxhof, B., Djurtoft, R.G., Byberg, M.R. & Aasbjerg Nielsen, A.: Six Low-Energy Houses at Hjortekær, Denmark, Description of the Houses and Presentation of Energy Measurements during the first Winter, 7th International Congress of Heating and Air Conditioning, "CLIMA-2000", Budapest 1980, Off-print, LfV, 1980.
- 49 Saxhof, B. & Engelund Poulsen, K.: Foundations for Energy Conservation Houses, LfV, Meddelelse nr. 130, november 1982.
- 50 Saxhof, B. & Engelund Poulsen, K.: Projektering af lavenergihus G i Hjortekær: Analyse af en række fundamentskonstruktioner, LfV, Rapport nr. 83-45, december 1983.
- 51 Saxhof, B. & Engelund Poulsen, K.: Projektering af lavenergihus G i Hjortekær: Analyse af varmebehov, LfV, Rapport nr. 83-46, december 1983.
- 52 Saxhof, B., Engelund Thomsen, K. & Wittchen, K.B.: Parametric Studies and Monitoring Results from a Danish 2nd Generation Low-Energy House Project, Off-print af paper til CIB W67 Workshop: Low-Energy-Buildings 2nd generation, Heidenheim 31 May-1 June, 1990, LfV, maj 1990.
- 53 Saxhof, B., Engelund Thomsen, K. & Wittchen, K.B.: IEA Task 13 Summary Report of the Technology: Heating Systems, LfV, september 1991.
- 54 Saxhof, B., Schultz, J.M. & Wittchen, K.B.: From the Zero Energy House to the 1st and 2nd Generation Houses at Hjortekær, Denmark, LfV, Meddelelse nr. 200, december 1988.
- 55 Saxhof, B. & Wittchen, K.B.: Om Energiministeriets lavenergihusprojekter, specielt Hus G i Hjortekær, et 2.-generations lavenergihus, Supplerende materiale til Energiministeriets plakat-vandreudstilling, LfV, 1986.

- 56 Saxhof, B. & Wittchen, K.B.: Project Monitor: Low Energy House G, Hjortekaer, Denmark, Commission of the European Communities, Nr. 41, Februar 1989.
- 57 Saxhof, B. & Wittchen, K.B.: A Second Generation Low-Energy House at Hjortekær, Denmark, i Example houses from the Participating Countries, IEA SH&CS Task XIII Working Document, (Proceedings from the 1st Workshop, Hinterzarten, Vesttyskland, 30 januar-1 februar 1989), EMPA, Dübendorf, Schweiz, Off-print, LfV, november 1989.
- 58 Saxhof, B. & Wittchen, K.B.: Draft Monitoring System for the Danish IEA Task 13 Houses, paper til IEA Task XIII Fifth Experts' Meeting, Monitoring Workshop, Kandersteg, Schweiz 1991, LfV, september 1991.
- 59 Saxhof, B. & Aasbjerg Nielsen, A.: Insulation and Air Tightness of six Low-Energy Houses at Hjortekær, Denmark, LfV, Meddelelse nr. 121, november 1982.

Kongresbidraget, som dannede grundlaget for Meddelelse nr. 121, er udgivet på engelsk og fransk i Building Research & Practice, May/June 1983, pp. 142-153.
- 60 Schultz, J.M.: Analysis of Insulating Window Shutters, Building Physics in the Nordic Countries, Symposium i Lund august 1987, Off-print, LfV, Rapport nr. 87-9, 1987.
- 61 Schultz, J.M.: Generelt edb-program til beregning af skyggearealer på plane flader, LfV, Rapport nr. 87-26, december 1987.
- 62 Schultz, J.M. & Engelund Thomsen, K.: Thermal Analysis of Window Design, Off-print af paper til symposiet: Building Physics in the Nordic Countries, Trondheim 20-22 august 1990, LfV, juni 1990.
- 63 Schultz, J.M.: Isolerende skodder, LfV, Meddelelse nr. 202, december 1990.
- 64 Wittchen, K.B.: Air-Supply in Airtight, Highly Insulated Buildings, Building Physics in the Nordic Countries, Symposium i Lund august 1987, Off-print, LfV, Rapport nr. 87-10, 1987.
- 65 Wittchen, K.B.: Friskluftforsyning til tætte, velisolerede huse, LfV, Meddelelse nr. 192, december 1988.
- 66 Wittchen, K.B.: IEA Task 13 Summary Report of the Technology: Comfort control of heating systems, LfV, august 1991.
- 67 Wittchen, K.B.: Simulation Technology set: Multi-Layered Glazing - IEA task XIII Advanced Solar Low-Energy Buildings, LfV, Rapport nr. 91-25, december 1991.
- 68 Wittchen, K.B. & Saxhof, B.: Dimensioning Heating Systems for Low-Energy Buildings, Considering the Influence of Fluctuating Temperatures, Off-print af paper til symposiet: Building Physics in the Nordic Countries, Trondheim 20-22 august 1990, LfV, juni 1990.
- 69 Wittchen, K.B. & Saxhof, B.: Monitoring Advanced Solar Low-Energy Houses - Introduction for Discussion, paper til IEA Task XIII Fifth Experts' Meeting, Monitoring Workshop, Kandersteg, Schweiz 1991, LfV, september 1991.

- 70 Zachariassen, H.: H&S lavenergihus i Hjortekær, Arkitekten nr. 17, 1982, pp. B5-B8.
- 71 Aasbjerg Nielsen, A.: Energy Consumption in Buildings, Regression Models, Six Low-Energy Houses at Hjortekær, LfV, Rapport nr. 82-68, december 1982.
- 72 Aasbjerg Nielsen, A.: To økonomiprogrammer til TI-59, LfV, Rapport nr. 83-9, maj 1983.
- 73 Aasbjerg Nielsen, A.: En dynamisk test-metode til bestemmelse af småhuses termiske respons, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150 (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 57-72, maj 1984.
- 74 Aasbjerg Nielsen, A.: A Dynamic Test Method for the Energy Consumption of Small Houses, CLIMA 2000 Copenhagen 1985, Volume 2, pp. 533-541.
- 75 Aasbjerg Nielsen, A.: Dynamisk trykprøvning - En infrasonisk metode til måling af småhuses tæthed, LfV, Rapport nr. 87-1, 1987.
- 76 Aasbjerg Nielsen, A., Byberg, M.R., Djurtoft, R.G. & Saxhof, B.: 6 Lavenergi huse i Hjortekær - Statusrapport 1, LfV, Meddelelse nr. 84, juni 1979.
- 77 Aasbjerg Nielsen, A. & Kjær Nielsen, B.: A Dynamic Test Method for the Thermal Performance of Small Houses, ACEEE Summer Study, Santa Cruz 1984, LfV, Rapport nr. 84-19, juli 1984.
- 78 2.-generations lavenergihus i Hjortekær, folder, LfV, 1984.

Findes også på engelsk: A Second-Generation Low-Energy House at Hjortekær.

Yderligere oplysninger kan fås ved henvendelse til:

Laboratoriet for Varmeisolering
Danmarks Tekniske Højskole
Bygning 118, DK-2800 Lyngby
Telefon (+45) 45 93 44 77
Fax (+45) 45 93 17 55