

COMPUTERPROGRAMMA VOOR DE BEPALING  
VAN ENERGIEGEBRUIK EN EXPLOITATIE-  
KOSTEN VAN KETELINSTALLATIES.

(SAMENVATTING)

door

A.J. Meijnen



postbus 342  
7300 AH apeldoorn

bezoekadres  
laan van westenenk 501

telex 36395 tnoap  
telefoon 055 - 77 33 44

Ref.nr. : 85-01247  
Dossiernr. : 8725-50086/800  
Datum : maart 1985  
P

Trefwoorden:  
ketelinstallatie  
computerprogramma  
energiegebruik  
kosten

„Niets uit deze uitgave mag worden  
vermenigvuldigd en/of openbaar  
gemaakt door middel van druk, foto-  
copie, microfilm of op welke andere  
wijze dan ook, zonder voorafgaande  
toestemming van TNO.”

Indien dit rapport in opdracht werd  
uitgebracht, wordt voor de rechten  
en verplichtingen van opdracht-  
gever en opdrachtnemer verwezen  
naar de „Algemene Voorwaarden  
voor Onderzoeks- en ontwikke-  
lingsopdrachten aan TNO, 1979”  
dan wel de desbetreffende terzake  
tussen partijen gesloten overeen-  
komst.

Onderzoek gefinancierd door:

- EEG (S, R&D Programma  
Energy Conservation)  
Contract nr. EEA-1-001-N
- MVROM.
- TNO



## VOORWOORD

Het voorliggende rapport is in feite een samenvatting van het eindrapport van het zogenaamde Ketelkeuzeproject, dat tussen 1 februari 1982 en 31 december 1984 door TNO-MT werd uitgevoerd [1].

Deze samenvatting bevat zoveel mogelijk informatie uit het genoemde eindrapport, zij het dan in zeer beknopte vorm.

Het is bedoeld om de lezer een indruk te geven van de inhoud en de wijze van uitvoering van het project. Bovendien worden de belangrijkste resultaten gepresenteerd.

Apeldoorn, februari 1985.



INHOUD	<u>Pag.</u>
SAMENVATTING	5
1. INLEIDING	6
2. MOTIVATIE	7
3. SYSTEEMGRENS	8
4. BASISGEGEVENS EN RELATIES	9
4.1 Inleiding	9
4.2 Theoretische relaties	9
5. COMPUTERPROGRAMMA	19
5.1 Inleiding	19
5.2 Werkwijze van het computerprogramma	19
5.3 Invoer	20
5.4 Uitvoer	20
6. METINGEN	24
6.1 Inleiding	24
6.2 Ketelininstallatie	24
6.3 Opzet van de metingen	24
6.4 Effectmetingen	26
6.5 Verificatiemetingen	32
7. STILSTANDSVERLIES EN SCHAKELFREQUENTIE	33
7.1 Inleiding	33
7.2 Correctieformule van Van der Heeden	33
7.3 Invloed van ketelcircuit	33
7.4 Nieuwe correctiemethode	33
8. VERIFICATIE VAN HET KETELKEUZEPROGRAMMA	36
8.1 Inleiding	36
8.2 Invoergegevens voor berekeningen	36
8.3 Resultaten	36
8.4 Vergelijk met alternatieve methoden	39

9.	BEREKENINGEN	40
9.1	Inleiding	40
9.2	Warmtevraag en omgevingstemperatuur	40
9.3	Gegevens ketelinstallatie	41
9.4	Evaluatie nieuwe ketelinstallaties	41
9.5	Evaluatie energiebesparende maatregelen	42
9.6	Slotopmerkingen	43
10.	CONCLUSIES	44
11.	NOMENCLATUUR	46
12.	REFERENTIES	47

Bijlage 1: Gegevens ten behoeve van berekeningen.

## SAMENVATTING

Dit rapport beschrijft uitvoering en resultaten van het Ketelkeuzeproject. Het doel daarvan was een computerprogramma te ontwikkelen voor de berekening van brandstofverbruik en exploitatiekosten van ketelinstallaties voor gebouwverwarming. Allereerst worden de motivatie voor het project en de systeemgrens van het ontwikkelde computerprogramma gegeven. Daarna volgt een beschrijving van de relaties tussen de diverse relevante variabelen, die een rol spelen bij de bepaling van energiegebruik en kostenanalyse. Het programma dat op basis van deze relaties is ontwikkeld, het zogenaamde Ketelkeuzeprogramma, biedt de mogelijkheid om uiteenlopende ketelinstallaties op deze punten te analyseren. Daarvoor is het nodig dat uurlijks opeenvolgende gegevens betreffende gebouw-warmtevraag en omgevingstemperatuur beschikbaar zijn, alsmede de nodige installatiegegevens.

In een bestaande ketelinstallatie is een uitgebreid meetprogramma uitgevoerd. Die metingen hadden in de eerste plaats ten doel om de eigenschappen van deze installatie te bepalen. Dit resulteerde ondermeer in een nieuwe visie op het gebruik van stilstandsverliescijfers en een nieuwe correctiemethode voor stilstandsverliezen. Daarnaast werden metingen uitgevoerd ter verificatie van het Ketelkeuzeprogramma. Hierbij werden een aantal metingen met het computerprogramma gesimuleerd, waarna de resultaten van metingen en berekeningen werden vergeleken. De overeenstemming tussen beide is goed.

Naast een vergelijking van het Ketelkeuzeprogramma met andere, bestaande energieverbruiksberekeningen, worden diverse voorbeelden van berekeningen met het Ketelkeuzeprogramma gepresenteerd.

Het rapport wordt besloten met een aantal conclusies.

## 1. INLEIDING

Een manier om het gebruik van fossiele brandstoffen te beperken, is een vermindering van het energiegebruik ten behoeve van ruimteverwarming. Zo'n beperking kan worden bereikt door maatregelen aan zowel de warmtevraag-kant als aan de warmtelevering-kant.

Het onderhavige rapport is gericht op energiebesparing bij warmteopwekking, toegespitst op die vorm van warmteopwekking waarbij warmwater-ketels worden gebruikt.

Uit de vakliteratuur blijkt dat samenstelling en regeling van een ketelinstallatie een grote invloed hebben op het gebruiksrendement en daarmee op het brandstofverbruik. In dezelfde studies worden dan ook verschillen tot 20% genoemd. Deze resultaten benadrukken de noodzaak om een ketelinstallatie-ontwerp vooraf te analyseren op het punt van energiegebruik. Dit geldt dan zowel voor nieuwe installaties als voor aanvullende maatregelen in bestaande installaties.

Het in dit rapport beschreven Ketelkeuzeprogramma biedt de mogelijkheid om een dergelijke analyse voor uiteenlopende ketelinstallaties uit te voeren. Dit kan dan plaatsvinden in relatief korte tijd en met grote nauwkeurigheid. Voorwaarde is dat uurlijkse, sequentiële gegevens betreffende gebouwwarmtevraag en omgevingstemperatuur aanwezig zijn, alsmede diverse installatiegegevens.



## 2. MOTIVATIE

De overwegingen die aan de ontwikkeling van het Ketelkeuzeprogramma ten grondslag hebben gelegen zijn:

- het programma moet de mogelijkheid bieden om uiteenlopende ketelinstallaties snel met elkaar te kunnen vergelijken t.a.v. gedrag, energieverbruik en kosten;
- het programma dient aan te sluiten op de uitkomsten van computerprogramma's voor berekening van de dynamische gebouwwarmtevraag [2];
- de uitkomsten van het programma dienen zo realistisch en accuraat mogelijk te zijn en getoetst aan de praktijk.

### 3. SYSTEEMGRENS

De netto warmtevraag "aan" een ketelinstallatie is de resultante van onafhankelijke (klimaat, interne belasting, gebouw-eigenschappen) en gecontroleerde invloeden (stookbedrijf).

Het verschil tussen warmtetoevoer (brandstof) en warmte-afgifte in de installatie wordt veroorzaakt door "verliezen" als gevolg van componenteigenschappen en installatiebedrijf.

Figuur 2 laat de voor het Ketelkeuzeprogramma geldende systeemgrens zien; informatie "passeert" deze grens in de vorm van programma-invoergegevens.

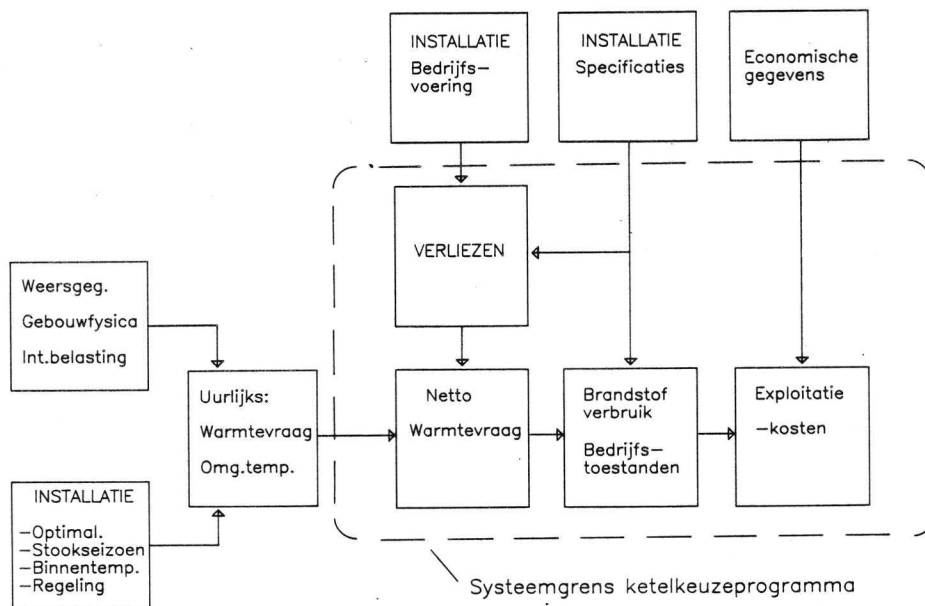


Fig.1 Systeemgrens van het Ketelkeuzeprogramma.

## 4. BASISGEGEVENS EN RELATIES

### 4.1 Inleiding

Om gedrag, brandstofverbruik en exploitatiekosten van een installatie te kunnen berekenen, is een theoretisch model noodzakelijk. Daarin worden relaties tussen diverse relevante variabelen beschreven, alsmede een aantal basisgegevens vastgelegd. In dit hoofdstuk wordt daarvan een beknopte beschrijving gegeven.

### 4.2 Theoretische relaties

#### 4.2.1 Vollastrendement

In het Ketelkeuzeprogramma wordt uitgegaan van het directe (of waterzijdige) rendement van een ketel<sup>1)</sup>, gedefinieerd als de verhouding tussen de hoeveelheid warmte door het water opgenomen en de warmtehoeveelheid toegevoerd in de vorm van brandstof, tijdens continue bedrijf.

Het directe rendement van een ketel is in het Ketelkeuzeprogramma afhankelijk van

- de ketelwatertemperatuur
- het keteltype (b.v. HR, VR en CR ketels)
- de branderregeling (aan/uit, hoog/laag, modulerend)

Hiervoor worden diverse polynomen gebruikt, waarvan de coëfficiënten moeten worden ingevoerd.

#### 4.2.2 Stilstandsverliezen

Bij schakelend bedrijf van een ketel vindt er gedurende de "uit"-perioden warmteafgifte plaats naar de omgeving. Dit vormt een warmteverlies dat in de "aan"-periode weer moet worden goedgeemaakt; we spreken van stilstandsverlies. Deze verliezen kunnen worden onderscheiden in transmissie- en ventilatieverliezen.

Produktinformatie en literatuurgegevens bevatten veelal cijfers over stilstandsverliezen, welke zijn gebaseerd op stilstandsverliesmetingen volgens de Dittrich-methode [DIN 4702,sect.3].

---

1) Gebaseerd op de bovenwaarde van de brandstof.

Figuur 2 geeft een indruk van het stilstandsverlies voor diverse groepen ketels [1].

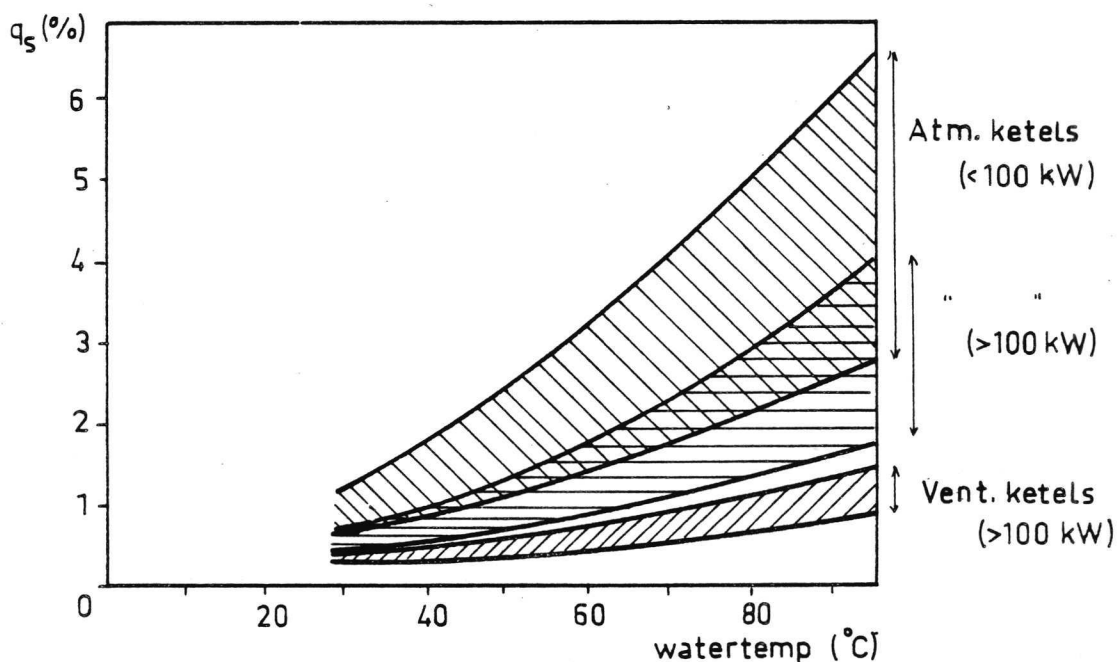


Fig.2 Stilstandsverliescoëfficiënt als functie van ketelwatertemperatuur; literatuurgegevens.

Stilstandsverliezen zijn ketelwatertemperatuur-afhankelijk; daarnaast zijn er nog een aantal andere invloeden, t.w.:

- de toepassing van een rookgasklep,
- het keteltype (atmosferisch, ventilatorketels),
- het toepassen van een rookgaskoeler/condensor,
- de schakelfrequentie en de lengte van de "uit"-periode.

Voor de eerste drie gevallen, bevat het Ketelkeuzeprogramma drie polynomen, waarvan de coëfficiënten kunnen worden ingevoerd, plus een correctie ten behoeve van het voorspoelen bij ventilatorketels. In het laatste geval wordt het ventilatieverlies tijdens de berekeningen bepaald op grond van de berekende "uit"-periode. De invloed van de "uit"-periode op het ventilatiedeel van het stilstandsverlies wordt geïllustreerd in fig.3. In hoofdstuk 7

wordt de methode beschreven waarmee in het Ketelkeuzeprogramma stilstandsverlies-coëfficiënt en schakelfrequentie worden gekoppeld.

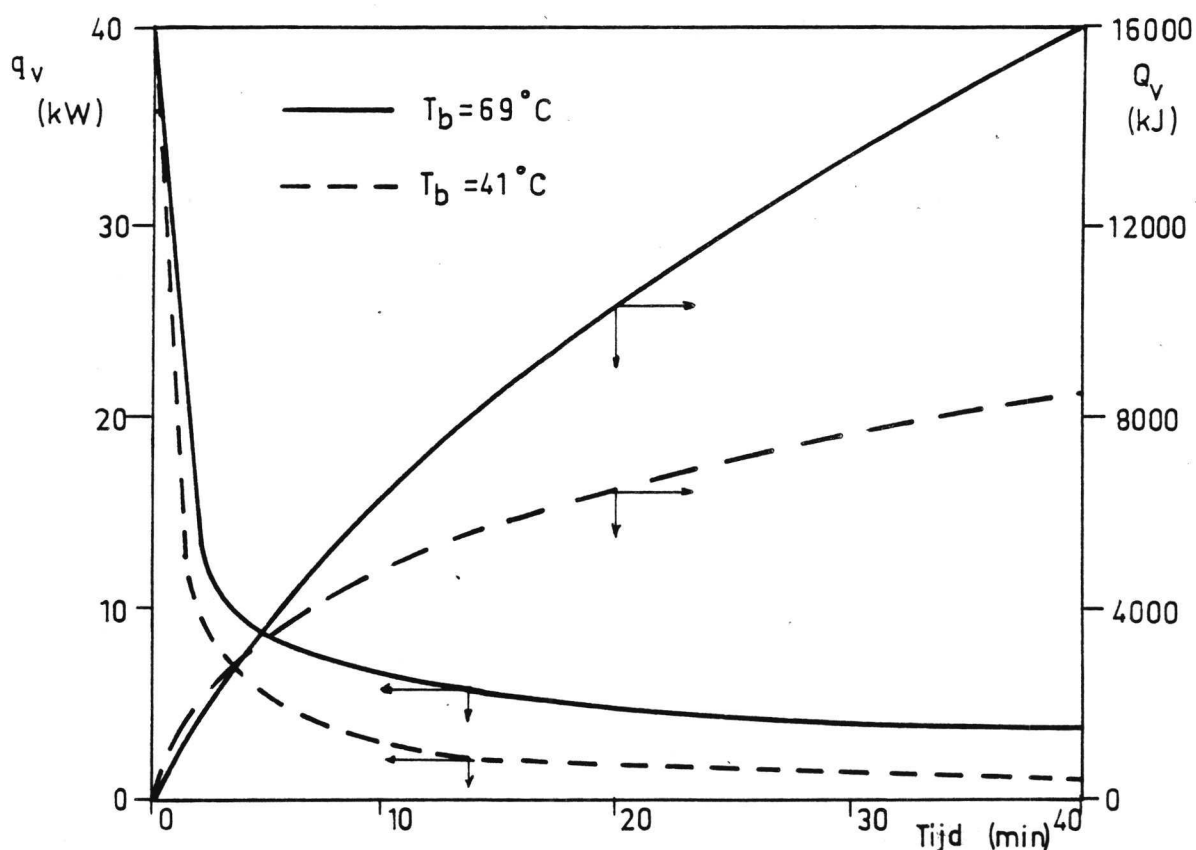


Fig. 3 Momentaan en geaccumuleerd ventilatieverlies als functie van de lengte van de "uit"-periode.

#### 4.2.3. Schakelfrequentie

De "aan"-, "uit"- en cyclustijden van de schakelende ketel worden in het Ketelkeuzeprogramma gebaseerd op de installatieconstante C (zie 4.2.17) en de benuttingsgraad B (zie 4.2.8). Dit geschiedt als volgt:

- lengte van "uit"-tijd  $\tau_{\text{on}} = \frac{C}{1-B}$  (s)
- lengte van "aan"-tijd  $\tau_{\text{off}} = \frac{C}{B}$  (s)
- cyclus tijd  $\tau_c = \frac{C}{B(1-B)}$  (s)
- schakelfrequentie  $f = 3600/\tau_c$  ( $\text{h}^{-1}$ )

#### 4.2.4 Ontsteking

In het Ketelkeuzeprogramma zijn 3 ontstekingsopties opgenomen, t.w.:

- waakvlam,
- direct elektrisch,
- elektrisch + aansteekbrander.

In het eerste geval dient de waakvlambelasting te worden opgegeven; in de andere gevallen wordt het energieverbruik van de ontsteking verwaarloosbaar klein geacht.

#### 4.2.5 Ventilatoren

Ventilatoren in ketels kunnen enerzijds dienen voor het instandhouden van de trek en anderzijds voor de aanvoer van verbrandingslucht. Het energieverbruik van de aanwezige ventilatoren wordt in het Ketelkeuzeprogramma berekend, zowel voor de startfase (de spoeltijd kan worden ingevoerd), als voor het normale bedrijf (op basis van "aan"-tijd).

#### 4.2.6 Brander- en keteltype

Hoewel het Ketelkeuzeprogramma onderscheid maakt tussen ventilator en atmosferische ketels, kunnen verschillen in ketelconstructie (leden, vlampijp, etc.) niet expliciet worden ingevoerd. Overigens heeft het programma alleen betrekking op warm-c.q. heetwaterketels en niet op stoomketels.

#### 4.2.7 Branderregeling

Er bestaan drie opties voor de branderregeling:

##### 1.) Aan-Uit

De ketel werkt op vollast gedurende de "aan"-tijd.

##### 2.) Hoog-Laag

Of de brander tijdens de "aan"-periode op Laag-, dan wel Hoog-stand werkt, is afhankelijk van de "momentane" ketelwatertemperatuur (uurgemiddelde in het programma) en de instelling van de Hoog/Laag thermostaat (dit laatste is een invoergegeven). Boven het thermostaatsetpoint is er Laag-stand-bedrijf, daar beneden Hoogstand. Mocht in geval van

Laagstand-bedrijf niet aan de warmtevraag voldaan kunnen worden, dan wordt in het programma de Hoogstand toegepast. Overigens kan in het Ketelkeuzeprogramma per uur slechts één van beide branderstanden worden toegepast (afgezien van brander "uit").

### 3) Modulerend

Boven een bepaalde drempelbelasting, wordt de branderbelasting geregeld op basis van het verschil tussen gewenste en actuele ketelwatertemperatuur. De brander is dan continue in bedrijf, terwijl onder deze drempel het branderbedrijf schakelend zal zijn. In het Ketelkeuzeprogramma kunnen beide situaties worden gesimuleerd, doordat deze drempelbelasting wordt ingevoerd.

#### 4.2.8 Benuttingsgraad

Onder benuttingsgraad wordt verstaan de verhouding tussen de per uur door de ketel(-installatie) afgestane hoeveelheid nuttige warmte ( $\cong$  warmtevraag) en de maximaal mogelijke warmteafgifte ( $\cong$  vollast warmteafgifte). Beide worden afgeleid uit invoergevens.

#### 4.2.9 Ketelwatertemperatuur

Voor de regeling van de ketelwatertemperatuur worden drie opties gegeven:

- 1) Constant; d.w.z. dat de ketelwatertemperatuur ongeacht warmtevraag en buitentemperatuur voortdurend op een ingestelde waarde wordt gehouden.
- 2) Weersafhankelijk; de ketelwatertemperatuur wordt geregeld in relatie tot de buitentemperatuur, deze "stooklijn" kan worden ingevoerd.  
Bij deze regeling kunnen tevens nachtverlaging en minimumtemperatuurbegrenzing worden toegepast. Voor de nachtverlaging worden dan de stooklijn en de tijdsperiode ingevoerd.

- 3) Variabel; deze regeling wordt in hoofdzaak bij kleine ketels toegepast. Er bestaat een relatie tussen de omgevingstemperatuur en de optredende watertemperatuur [3], welke in de vorm van een stooklijn kan worden ingevoerd.

#### 4.2.10 Ketelschakeling

Voor het in volgorde schakelen van ketels bestaan de volgende mogelijkheden (zie ook tabel 1):

- 1) Casade schakeling; de warmtevraag wordt in eerste instantie gedekt door de leidende ketel. Ingeval van capaciteitstekort, wordt de tweede ketel ingeschakeld, de eerste ketel blijft continue in bedrijf.
- 2) Omkeerschakeling; hierbij worden de ketels zodanig geschakeld dat de warmtevraag steeds wordt gedekt met minimaal (ketel-) vermogen.
- 3) Parallel schakeling; de ketels in de installatie schakelen geheel gelijktijdig (als één ketel).

#### 4.2.11 Waterwaarde

De waterwaarde  $W$  van een verwarmingssysteem is gedefinieerd als de totale massa (water en metaal) van het systeem, uitgedrukt in kg  $H_2O$ , volgens de relatie:

$$W = M_w + M_m * \frac{C_m}{C_w}$$

De waterwaarde is van belang voor het bepalen van de installatieconstante.

#### 4.2.12 Installatieconstante

De installatieconstante  $C$  is gedefinieerd als de tijd (s), waarin een ketel met vollastrendement  $\eta_b$  en maximumbelasting  $L$  de installatie  $\Delta T$  graden in temperatuur kan verhogen.

In formulevorm:

$$C = \frac{C_w * W * \Delta T}{L * \eta_b}$$

In het Ketelkeuzeprogramma wordt  $C$  berekend op basis van het aantal ketels dat in bedrijf cq. standby is.



A		Cascade schakeling:					
		$P_D \leq P_1$	$P_1 < P_D \leq P_1 + P_2$	$P_1 + P_2 < P_D \leq P_1 + P_2 + P_3$			
Ketel	1	C → F	F	F			
"	2	0	C → F	F			
"	3	0	0	C → F			
B		Omkeerschakeling:					
		$0 < P_D \leq P_1$	$P_1 < P_D \leq P_2$	$P_2 < P_D \leq P_3$	$P_3 < P_D \leq P_3 + P_1$	$P_3 + P_1 \leq P_D < P_3 + P_2$	$P_3 + P_2 < P_D \leq P_3 + P_2 + P_1$
Ketel	1	C → F	0	0	C → F	F	C → F
"	2	0	C → F	0	0	C → F	F
"	3	0	0	C → F	F	F	F
C		Parallel schakeling:					
		$P_D \leq P_1$	$P_1 < P_D \leq P_2 + P_1$	$P_1 + P_2 < P_D \leq P_3 + P_2 + P_1$			
Ketel	1	C	C	C → F			
"	2	C	C	C → F			
"	3	C	C	C → F			

Tabel 1: Ketelschakeling in geval van Aan-Uit geregelde brander

$P_n$  = maximum vermogen (ketel n)

$P_D$  = systeem warmtevraag

0 = uit

C = schakelend bedrijf

F = vollast.

#### 4.2.13 Smoorkleppen

Een "standby" ketel waarover water circuleert zal als een convector/radiator warmte afgeven aan de omgeving. Deze verliezen, die ook optreden bij schakelend bedrijf van de ketel (lage frequentie), worden voor een deel voorkomen door waterzijdig afschakelen m.b.v. smoorkleppen.

Daar deze warmteverliezen in relatie staan tot de stilstandsverliescoëfficiënt van de ketel, wordt in het Ketelkeuzeprogramma het toepassen van smoorkleppen vertaald in een correctie op de stilstandsverliezen.

#### 4.2.14 Afkoelen en opwarmen van de installatie

- Is een ketel langer dan een uur buiten bedrijf, dan wordt het dalen van de watertemperatuur per uur berekend.
- Indien een ketel, volgens de simulatie, in een bepaald uur in bedrijf moet zijn, dan worden de ketelwatertemperaturen van dat en het voorgaande uur met elkaar vergeleken. Daaruit blijkt dan of er extra vermogen nodig is (temperatuurverhoging) of dat er een warmteoverschot is (temperatuurverlaging). Dit warmte-tekort cq. overschot wordt verrekend met de actuele gebouw-warmtevraag.

#### 4.2.15 Gebruiksrendement

Het gebruiksrendement van een ketel is de verhouding tussen de afgegeven hoeveelheid nuttige warmte en de toegevoerde warmte (brandstof), beide in dezelfde periode. Indien de ketel continue in bedrijf is, is het gebruiksrendement gelijk aan het directe rendement (zie 4.2.1). Bij schakelend bedrijf, waarbij de ketel ook de stilstandsverliezen moet dekken (4.2.2), zijn beide niet aan elkaar gelijk. De volgende relatie tussen gebruiks- en direct-rendement wordt toegepast [4]:

$$\eta_u = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{B} - 1\right) * q_s} * \eta_b$$

In het Ketelkeuzeprogramma wordt het gebruiksrendement per uur berekend, uitgaande van momentane benuttingsgraad en direct rendement en van het gecorrigeerd stilstandsverlies (hoofstuk 7).

#### 4.2.16 Brandstofverbruik

Het uurlijkse brandstofverbruik wordt per ketel berekend volgens:

$$\phi_f = \frac{P_{\max} * B * 3600}{H_f * \eta_u}$$

Het energieverbruik van elektrische componenten wordt uitgedrukt in equivalente brandstofeenheden, waarbij 33% omzettingsrendement wordt toegepast.

#### 4.2.17 Contante waarde methode

Omdat de exploitatiekosten van een installatie van groot belang zijn, kunnen deze in het Ketelkeuzeprogramma worden geëvalueerd op basis van de contante waarde methode. Bij deze wijze van economische analyse worden alle kosten, die gedurende een bepaalde periode met het aanschaffen en bedienen van een installatie zijn gemoeid, teruggerekend naar hun contante waarde op één tijdstip, bijv. het ogenblik van aanschaf cq. oplevering [5].

Voor het berekenen van deze netto contante waarde dienen de volgende gegevens te worden ingevoerd:

- |                            |                             |
|----------------------------|-----------------------------|
| - investering              | - onderhoudskosten (1°jaar) |
| - nominale rente           | - inflatiepercentage        |
| - aflossingstermijn        | - belasting reductie        |
| - brandstofkosten (1°jaar) | - technische levensduur     |
| - stijging brandstofprijs  |                             |

De diverse percentages worden als constant aangenomen gedurende de beschouwde periode. Tussentijdse her-investeringen kunnen niet worden geëvalueerd.

#### 4.2.18 Aanvullende maatregel en terugverdientijd

Bij een energiebesparende maatregel in een installatie is het

noodzakelijk een kosten/baten-analyse te maken, waarbij met name de terugverdientijd en de netto contante waarde van de maatregel belangrijk zijn. Figuur 4 laat de relatie zien tussen netto contante waarde en terugverdientijd. Voor de berekening van beide grootheden dienen, naast de economische gegevens van de te evalueren installatie, de volgende gegevens van de huidige (of referentie) installatie te worden ingevoerd:

- investering
- onderhouds- en reparatiekosten
- jaarlijkse brandstofverbruik.

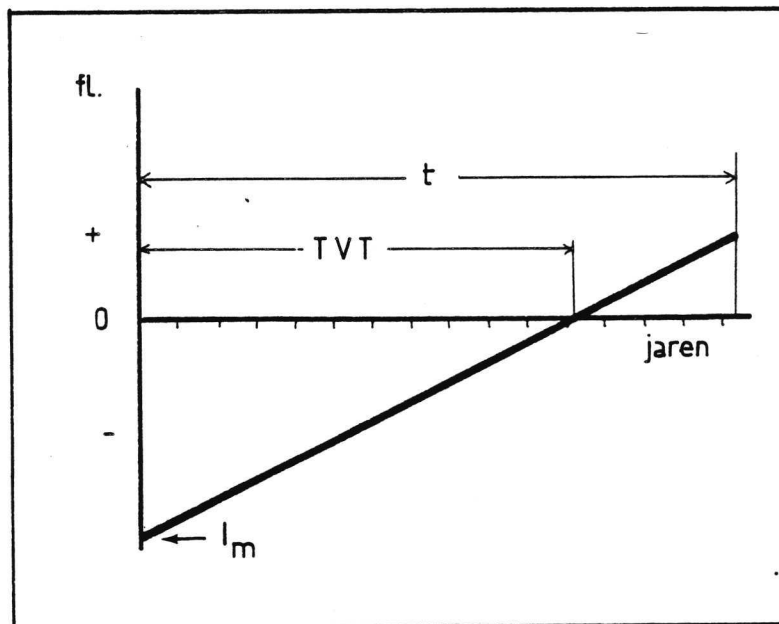


Fig.9 Netto contante waarde van exploitatiekosten en terugverdientijd

#### 4.2.19 Basisgegevens

- Warmteverdelings- en afgifterendementen (90-98%) worden in het Ketelkeuzeprogramma niet meegenomen. Er wordt verondersteld dat de werking van het warmteverdeel- en afgiftesysteem, impliciet in de uurlijkse warmtevraag verwerkt zit.
- De volgende (bovenste) verbrandingswaarden worden toegepast:

Aardgas	35170	$\text{kJ/m}^3_n$	
HBO I	46100	kJ/kg	(no.2 oil)
Stookolie "400"	43200	kJ/kg	(no.6 oil)

## 5. COMPUTERPROGRAMMA

5.1 Inleiding

Op basis van de relaties beschreven in het voorgaande hoofdstuk is het computerprogramma ontwikkeld. In dit hoofdstuk worden werkwijze, in- en uitvoer van het programma behandeld.

5.2 Werkwijze van het computerprogramma

De werkwijze van enig reken-programma kan alleen worden beschreven aan de hand van een stroomdiagram. Daar voor zo'n beschrijving hier te weinig ruimte is, wordt het principe van de berekeningsvolgorde van het Ketelkeuzeprogramma geïllustreerd in figuur 5.

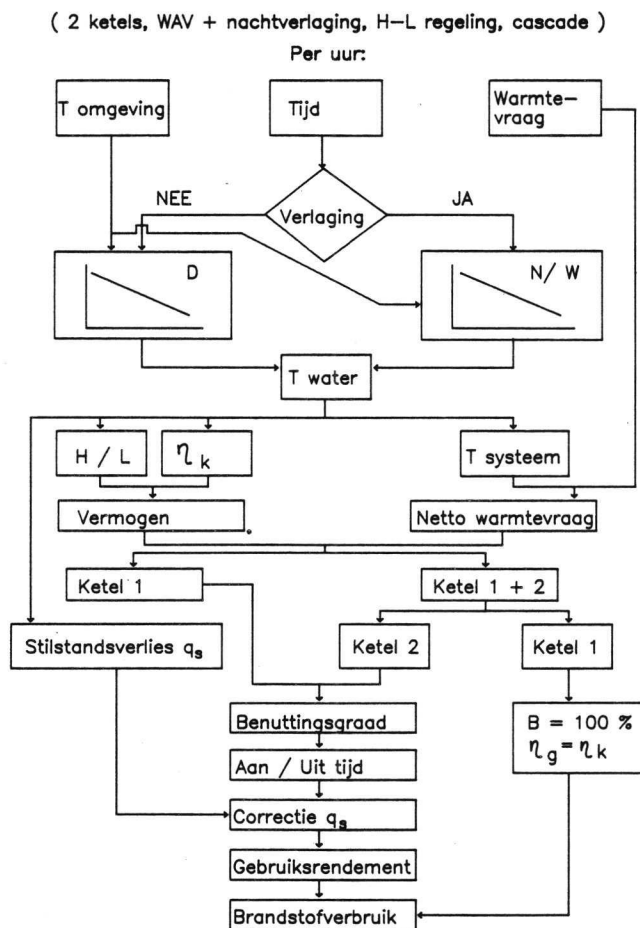


Fig.5 Voorbeeld van de rekenprocedure;  
(uurlijkse berekening van het brandstofverbruik).

### 5.3 Invoer

Gelet op de doelstellingen van het Ketelkeuzeprogramma, dient de programma-invoer zodanig te zijn, dat een zo groot mogelijk aantal verschillende ketelininstallaties kan worden geanalyseerd. Er is daartoe een invoerprocedure ontwikkeld, waarbij alle mogelijke variabelen worden aangegeven, en waarmee de gewenste ketelininstallatie wordt ingevoerd door alleen aan die variabelen een waarde toe te kennen, die relevant zijn voor deze ketelininstallatie. Het invoeren van gegevens geschiedt via een beeldscherm; figuur 6 geeft een indruk van de "invulformulieren" die daarbij worden toegepast.

Gegevens betreffende uurlijkse warmtevraag en gemiddelde omgevingstemperatuur dienen beschikbaar te zijn (tape, file) en worden per uur door het programma ingelezen.

### 5.4 Uitvoer

De resultaten van de berekening met het Ketelkeuzeprogramma omvatten de volgende informatie:

1. samenvatting van invoergegevens;
2. uurlijkse gegevens, betreffende installatiegedrag (zie figuur 7);
3. gegevens op jaarbasis, betreffende installatiegedrag en kosten/baten (zie figuur 8).

INSTALLATIE + BEDRIJFSVOERING GEGEVENS (n.v.t.= 0 of blanco)

AANTAL KETELS:

WATERCIRCUIT:

primair :waterw.(kg):  w.o.coef.(W/m<sup>2</sup>.K):  opp.(m<sup>2</sup>):   
 secundair:waterw.(kg):  binnentemp.(C):

WATERZIJDIGE AFSCHAKELING KETELS :  (ja of ne)

KETELHUISTEMPERATUUR (C):  KETELTHERMOSTAATDIFFERENTIE (C):

REGELING (gem.)KETELWATERTEMPERATUUR

constant :Tbdes(C):   
 weersafh. norm./dag:Tbdes(C):  Th1(C):  Tambdes(C):  Tbmin(C):   
 min.watertemp. begrenzing (C):   
 wk.end/nacht:Tbdes(C):  Th1(C):  Tambdes(C):  Tbmin(C):   
 nachtbedrijf, tijdstip:aanvang(h):  einde (h):  (hele uren)  
 variabel :Tbdes(C):  Th1(C):  Tambdes(C):

BRANDSTOF CODE :  (1=gas, 2=olie2, 3=olie6)

KETELSCHAKELING:  (1=voorkeur, 2=omkeer, 3=parallel)

-druk op  ENTER om door te gaan

GEGEVENS PER KETEL

(n.v.t.= 0 of blanco)

KETELNO.:

WATERW.(kg) :

W.O.CDEF.(W/m<sup>2</sup>.K) :

OPP.KETEL(m<sup>2</sup>) :

BRANDER: Pvent.(kW):  voorspoeltijd(s):

ONTSTEKINGSCODE:  (1=permanent, 2=elektrisch, 3=elek.+ontst.brander)

vol.str.permanente brander(m<sup>3</sup>/s):

BRANDERREGELING code (slechts 1 van 3 onderstaande regels invullen)

aan/uit :  (1)

hoog/laag :  (2) Plbel. (%):  Th/1(C):

modulerend:  (3) Pthrbel. (%):

BELASTING KETEL : maximaal(kW):  nominaal(kW):

SOORT KETEL (slechts 1 van 3 onderstaande regels invullen)

standaard :A0:	<input type="text"/>	A1:	<input checked="" type="checkbox"/>	A2:	<input type="text"/>	A3:	<input type="text"/>	(Fst)
economizer :A0:	<input checked="" type="checkbox"/>	A1:	<input type="text"/>	A2:	<input type="text"/>	A3:	<input type="text"/>	(Feco) Pf(kW): <input type="text"/>
rookgasklep:A0:	<input type="text"/>	A1:	<input checked="" type="checkbox"/>	A2:	<input type="text"/>	A3:	<input type="text"/>	(Frgk)
WA.RENDEMENT :C0:	<input type="text"/>	C1:	<input type="text"/>	C2:	<input type="text"/>	C3:	<input type="text"/>	(Fhe)(CO alt. invul.)
WA.REND.l/thr:C0:	<input type="text"/>	C1:	<input type="text"/>	C2:	<input type="text"/>	C3:	<input type="text"/>	(Fhe)(CO alt. invul.)
WA.REND.modu. B0:	<input type="text"/>	B1:	<input type="text"/>	B2:	<input type="text"/>	B3:	<input type="text"/>	(F(rel.bel))

-druk op  ENTER om door te gaan

KOSTEN/BATEN GEGEVENS:

BESCHOUWDE SYSTEEM

REFERENTIESYSTEEM

(n.v.t.=0 of blanco)

PRIJS BRANDSTOF EERSTE JAAR (F1/M<sup>3</sup> of kg):

INVESTERING (F1):

NOMINALE RENTE (-):

AFLOSSINGSTERMIJN (j):

PERCENTAGE ENERGIEPRIJSSTIJGING (-):

ONDERHOUDS EN REPARATIEKOSTEN 1e JAAR (F1):

INFLATIEPERCENTAGE (-):

TECHNISCHE LEVENSDUUR (j):

BELASTINGVOORDEEL (-):

BRANDSTOFVERBRUIK (kg of m<sup>3</sup>):

-druk op  ENTER om door te gaan

Fig.6 Invoer-"formulier" Ketelkeuzeprogramma.

VOLGNR. UUR [-]	WARMTE VRAAG [kW]	BUIJEN TEMP. [C]	WATERTEMPERATUUR			BENUTTINGSGRAAD			LANG/THRESH.STAND			REGELENDE KETEL(S) aantijd [s]	BRANDSTOF- VERBRUIK [m <sup>3</sup> ,kg]	GEBRUIKS- RENDMENT [%]
			ketel1 [C]	ketel2 [C]	ketel3 [C]	ketel1 [-]	ketel2 [-]	ketel3 [-]	ketel1 [-]	ketel2 [-]	ketel3 [-]			
433	364,8	-2	79,6	24,0	0,0	,980	0,000	0,000	0	0	0	3534,4	10630,8	76,61
434	370,0	0,0	80,0	23,4	0,0	,994	0,000	0,000	0	0	0	3585,4	10680,3	76,60
435	377,8	-3	80,7	80,7	0,0	1,000	,015	0,000	0	0	0	2001,5	10757,7	50,06
436	385,6	-6	81,3	81,3	0,0	1,000	,037	0,000	0	0	0	333,8	10812,1	72,76
437	390,8	-8	81,8	81,8	0,0	1,000	,051	0,000	0	0	0	368,8	10866,9	73,09
438	398,6	-1,1	82,4	82,4	0,0	1,000	,072	0,000	0	0	0	380,7	10921,9	74,33
439	403,8	-1,3	82,9	82,9	0,0	1,000	,086	0,000	0	0	0	425,5	10977,5	74,46
440	403,6	-1,4	83,1	83,1	0,0	1,000	,086	0,000	0	0	0	417,2	11033,0	74,57
441	379,6	-4	80,9	80,9	0,0	1,000	,020	0,000	0	0	0	65,6	11083,7	76,87
442	346,0	1,0	77,8	80,9	0,0	,929	0,000	0,000	0	0	0	3294,8	11129,2	77,95
443	324,4	1,9	75,8	71,9	0,0	,870	0,000	0,000	0	0	0	3115,5	11172,3	77,29
444	326,8	1,8	76,0	64,2	0,0	,876	0,000	0,000	0	0	0	3173,3	11216,1	76,44
445	343,6	1,1	77,6	57,7	0,0	,922	0,000	0,000	0	0	0	3345,0	11262,3	76,25
446	353,2	,7	78,5	52,1	0,0	,948	0,000	0,000	0	0	0	3428,0	11309,7	76,48
447	353,2	,7	78,5	47,4	0,0	,948	0,000	0,000	0	0	0	3414,0	11356,9	76,79
448	350,8	,8	78,2	43,4	0,0	,942	0,000	0,000	0	0	0	3387,1	11403,7	76,88
449	372,4	-1,1	80,2	80,2	0,0	1,000	,001	0,000	0	0	0	350,8	11458,3	69,36
450	396,4	-1,1	82,4	82,4	0,0	1,000	,066	0,000	0	0	0	491,2	11514,8	71,32
451	424,6	-2,1	84,6	84,6	0,0	1,000	,143	0,000	0	0	0	681,6	11573,9	73,61
452	448,0	-3,0	86,6	86,6	0,0	1,000	,207	0,000	0	0	0	901,6	11636,1	73,87
453	474,0	-4,0	88,8	88,8	0,0	1,000	,279	0,000	0	0	0	1157,8	11701,9	73,95
454	497,4	-4,9	90,8	90,8	0,0	1,000	,343	0,000	0	0	0	1376,6	11770,7	74,19
455	513,0	-5,5	92,1	92,1	0,0	1,000	,386	0,000	0	0	0	1509,3	11841,3	74,53
456	518,2	-5,7	92,5	92,5	0,0	1,000	,400	0,000	0	0	0	1536,9	11912,2	74,88
457	528,6	-6,1	93,4	93,4	0,0	1,000	,429	0,000	0	0	0	1647,7	11984,7	74,77
458	549,4	-6,9	95,2	95,2	0,0	1,000	,486	0,000	0	0	0	1868,9	12060,3	74,57
459	570,2	-7,7	96,9	96,9	0,0	1,000	,544	0,000	0	0	0	2067,8	12138,6	74,68
460	585,8	-8,3	98,3	98,3	0,0	1,000	,587	0,000	0	0	0	2206,1	12218,9	74,89
461	604,0	-9,0	99,8	99,8	0,0	1,000	,637	0,000	0	0	0	2385,7	12301,6	74,90
462	619,6	-9,6	101,1	101,1	0,0	1,000	,681	0,000	0	0	0	2529,7	12386,3	75,03
463	632,6	-10,1	102,2	102,2	0,0	1,000	,717	0,000	0	0	0	2648,9	12472,6	75,14
464	619,6	-10,4	102,9	102,9	0,0	1,000	,682	0,000	0	0	0	2518,5	12557,1	75,17
465	583,6	-8,9	99,6	99,6	0,0	1,000	,582	0,000	0	0	0	2075,0	12635,6	76,33
466	518,8	-6,2	93,6	93,6	0,0	1,000	,402	0,000	0	0	0	1383,7	12704,4	77,27
467	487,6	-4,9	90,8	90,8	0,0	1,000	,316	0,000	0	0	0	1159,6	12770,2	76,04
468	502,0	-5,5	92,1	92,1	0,0	1,000	,356	0,000	0	0	0	1406,3	12839,4	74,43
469	526,0	-6,5	94,3	94,3	0,0	1,000	,422	0,000	0	0	0	1659,1	12912,0	74,24
470	526,0	-6,5	94,3	94,3	0,0	1,000	,422	0,000	0	0	0	1603,5	12983,9	75,03
471	497,2	-5,3	91,7	91,7	0,0	1,000	,343	0,000	0	0	0	1258,4	13051,1	75,96
472	466,0	-4,0	88,8	88,8	0,0	1,000	,257	0,000	0	0	0	948,9	13113,9	76,04
473	487,6	-4,9	90,8	90,8	0,0	1,000	,316	0,000	0	0	0	1284,9	13181,4	74,09
474	506,8	-5,7	92,5	92,5	0,0	1,000	,369	0,000	0	0	0	1463,7	13251,4	74,29
475	536,4	-6,4	94,1	94,1	0,0	1,000	,450	0,000	0	0	0	1739,0	13325,2	74,57
476	554,6	-7,1	95,6	95,6	0,0	1,000	,501	0,000	0	0	0	1913,1	13401,3	74,67
477	572,8	-7,8	97,2	97,2	0,0	1,000	,551	0,000	0	0	0	2087,2	13479,9	74,76
478	588,4	-8,4	98,5	98,5	0,0	1,000	,594	0,000	0	0	0	2231,0	13560,5	74,90
479	596,2	-8,7	99,1	99,1	0,0	1,000	,616	0,000	0	0	0	2289,4	13641,9	75,14
480	585,8	-8,3	98,3	98,3	0,0	1,000	,587	0,000	0	0	0	2151,8	13721,3	75,60

Fig.7 Uitvoer van uurlijkse resultaten van het  
Ketelkeuzeprogramma (voorbeeld)



OP JAARBASIS: (omrekeningsfaktor van verkort referentiejaar :  $3*13*7/(3*14) = 6.5$ )

TOTALE WARMTEVRAAG GEBOUW	[GJ]	4912.46
BRANDSTOFVERBRUIK I	[m <sup>3</sup> of kg]	206161.
INSTALLATIE		0.00000
ELECTRISCH (vent.), equivalent		206161.
TOTAAL		
JAAR-GEBRUIKSRENDEMENT	[%]	67.89
TOTALE AANTIID : ketel 1	[uur]	2010.07
ketel 2	[uur]	0.00
ketel 3	[uur]	0.00
NETTO CONTANTE WAARDE (F1.)=	[f1.]	.217172E+07
NETTO CONTANTE WAARDE MAATREGEEL	[f1.]	14141.6
TERUGVERDIENTIID	[jaar]	2.59

Fig.8 Berekeningsresultaten (op jaarbasis) van het  
Ketelkeuzeprogramma (voorbeeld)



## 6. METINGEN

### 6.1 Inleiding

Er is een uitgebreid meetprogramma uitgevoerd in een bestaande ketelinstallatie, met het doel:

- het onderzoeken en vastleggen van de eigenschappen van deze installatie (effectmetingen);
- het onderzoek van het gedrag van deze installatie onder geconditioneerde omstandigheden, met het doel het Ketelkeuzeprogramma te verifiëren (verificatiemetingen).

In dit hoofdstuk worden korte beschrijvingen gegeven van de ketelinstallatie en van de opzet, uitvoering en resultaten van de verschillende metingen.

### 6.2 Ketelinstallatie

De metingen werden verricht aan de ketelinstallatie van de Verzekeringskamer te Apeldoorn.

Deze ketelinstallatie bestaat uit twee atmosferische ketels met hoog/laag geregelde branders (elk 480/370 kW belasting). Het warmte-afgifte-systeem bestaat uit 5 groepen. Aanvoer-watertemperatuur van ketels en groepen zijn weersafhankelijk geregeld (90/70 systeem). Beide ketels hebben een gestuurde smoorklep in de retourleiding, die geopend is gedurende normaal bedrijf. Ketel 2 werd in de loop van het onderzoek voorzien van een rookgasklep.

### 6.3 Opzet van de metingen

In figuur 9 worden ketelinstallatie en instrumentatie schematisch weergegeven.

De meetgegevens worden binnengehaald d.m.v. een automatisch data-acquisitiesysteem met gegevens-opslag op tape.

Uit deze meetgegevens worden vervolgens diverse relevante grootheden afgeleid m.b.v. speciaal ontwikkelde dataverwerkingspro-

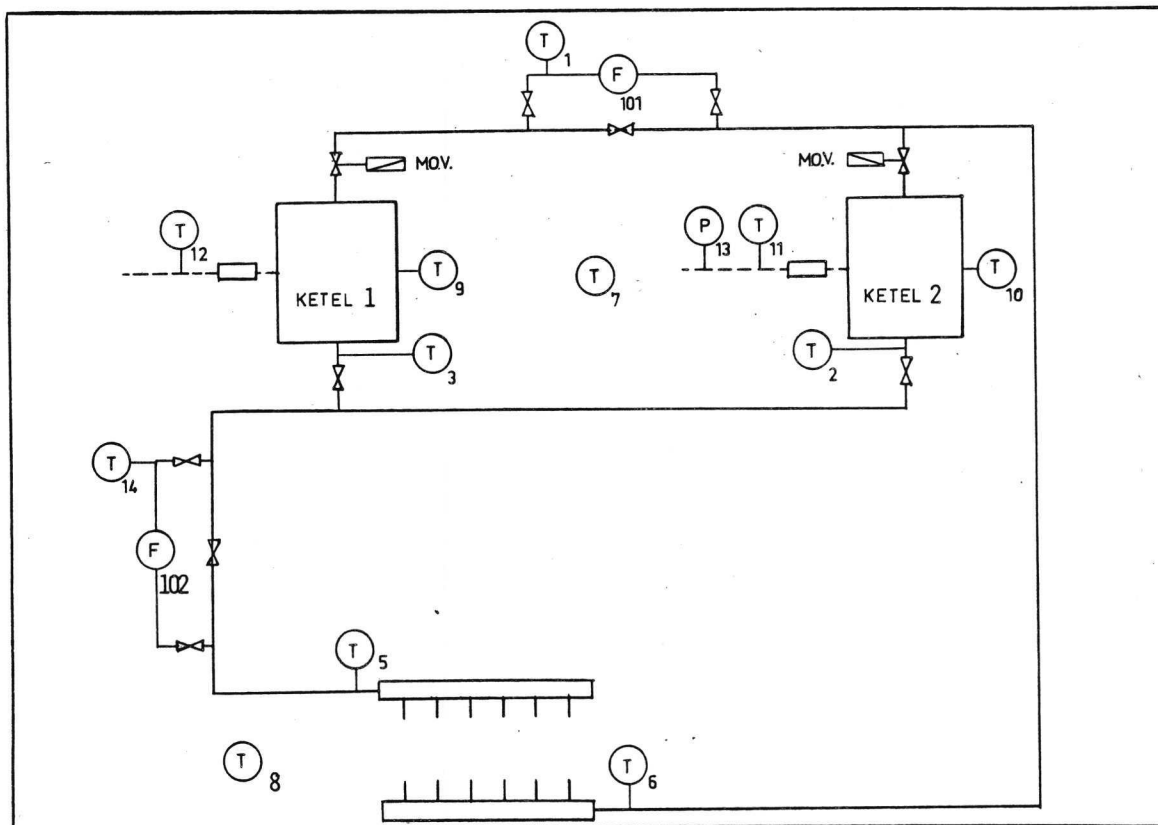


Fig.9 Ketelinstallatie en instrumentatie (schematisch)

gramma's:

- gemiddelde ketelwatertemperatuur,
- verschil aanvoer- en retourtemperatuur,
- gasverbruik (in  $\text{m}^3$ ),
- warmteafgifte per ketel; warmteafgifte aan gebouw,
- schakeltijden van de branders,
- etc.

In welke vorm de resultaten van de dataverwerking worden gepresenteerd, hangt af van de aard van de meting (stilstandsverlies meting, duurmeting).

De meetnauwkeurigheid die bij het experimentele onderzoek werd behaald, bedroeg gemiddeld  $\pm 1.5\%$ .

6.4 Effectmetingen6.4.1 Vollastrendementen

Van de ketels is het directe en indirecte rendement bepaald voor vollastbedrijf en bij verschillende watertemperaturen. Het indirecte rendement werd bepaald op basis van rookgasanalyse. Het directe rendement werd berekend op basis van de resultaten van een aantal duurmetingen. De resultaten van deze rendementsbepalingen zijn weergegeven in figuur 10.

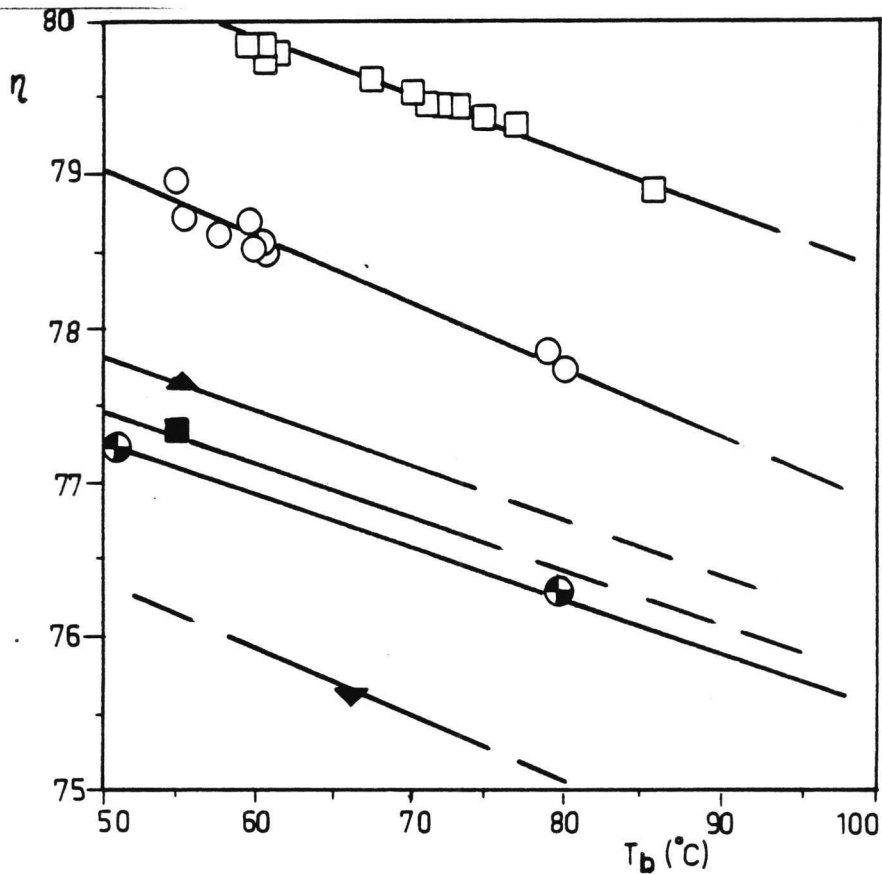


Fig. 10 : Vollastrendementen van ketels 1 & 2

ketel 1 :  $\square$  = indirect; Hoog;  $CO_2 = 9,2\%$

$\circ$  = indirect; Laag;  $CO_2 = 7\%$

$\blacksquare$  = direct; Hoog;

ketel 2:  $\blacktriangle$  = direct; Hoog;

$\blacktriangle$  = direct; Laag

$\oplus$  = Produktinformatie

#### 6.4.2 Afkoelcurve

Van ketel 1 is de afkoelcurve bepaald, bij watercirculatie over het primaire circuit. Uit deze curve blijkt de tijdconstante voor afkoeling (van ketel + primair circuit) ca. 6 uur te bedragen.

#### 6.4.3 Stilstandsverliesmetingen

De stilstandsverliesmetingen in de Verzekeringskamer werden enigszins afwijkend van de normale procedure uitgevoerd:

- meetperiode 24 tot 36 uren, i.v.m. de beschikbare tijd
- watercirculatie ook via ketelcircuit.

De eerste afwijking heeft geen significante invloed op de resultaten, de tweede des te meer.

Tabel 2 geeft een overzicht van de resultaten van de stilstandsverliezen, welke onder verschillende condities werden uitgevoerd.

Fig. 11 geeft een grafische weergave van de resultaten.

Uit de meetresultaten kan het volgende worden afgeleid:

- a) Circulatie over het ketelcircuit betekent een beduidend hoger stilstandsverlies als gevolg van het toegenomen warmteafgevend oppervlak; in de praktijk moet dan ook worden gerekend met hogere cijfers voor het stilstandsverlies dan geldend voor de ketel; isolatie van het circuit en stoppen van de watercirculatie is nuttig.
- b) Het effect van waterzijdige afschakeling van niet in bedrijf zijnde ketels reduceert het stilstandsverlies van de installatie.
- c) Toepassing van een rookgasklep reduceert het stilstandsverlies van de ketel; het effect is relatief kleiner ingeval er circulatie over het ketelcircuit plaats vindt.

Tabel 2 Overzicht van de resultaten van de stilstandsverliesmetingen

Meet	Datum	Ketel	Brander stand	RGK	Water-temp. °C	Ketel-huis temp. °C	Meet-periode min	Brandst.verbruik $\frac{m^3}{h}$	Bedrijfs-tijd min	Stilstandsverlies coëfficiënt $q_s$			Schakel-frequent. $h^{-1}$	Cyclus - periode min.
										ongecorr. %	gebas.op actuele bel. %	gebas.op vollast %		
A	8-9. 1.83	1	High	-	33.7	11.3	1580	15.86	21.3	1.24	0.76	0.76	0.23	261
B	14-16. 1.83	1	High	-	61.0	14.9	2434	65.83	90.0	3.33	2.96	2.96	0.64	94
C	21-23. 1.83	1	Low	-	86.8	15.2	2372	129.33	226.5	8.86	8.27	6.27	1.47	41
D <sup>2)</sup>	28-30. 1.83	1	"	-	86.3	18.9	2494	169.90	302.8	11.08	10.90	8.26	1.86	32
E	17-19. 3.83	1	"	-	61.9	16.3	2360	66.45	117.5	4.58	4.21	3.19	0.74	81
F	4-6. 11.83	2	"	+	59.1	16.9	2370	48.30	82.5	3.27	3.03	2.28	0.51	118
G	25-27. 11.83	2	"	+	85.5	23.6	2402	92.08	162.1	6.15	6.51	4.90	1.03	59

1) Correctie naar 20 °C ketelhuistemperatuur.

2) Ketel 2 is niet waterzijdig afgeschakeld.

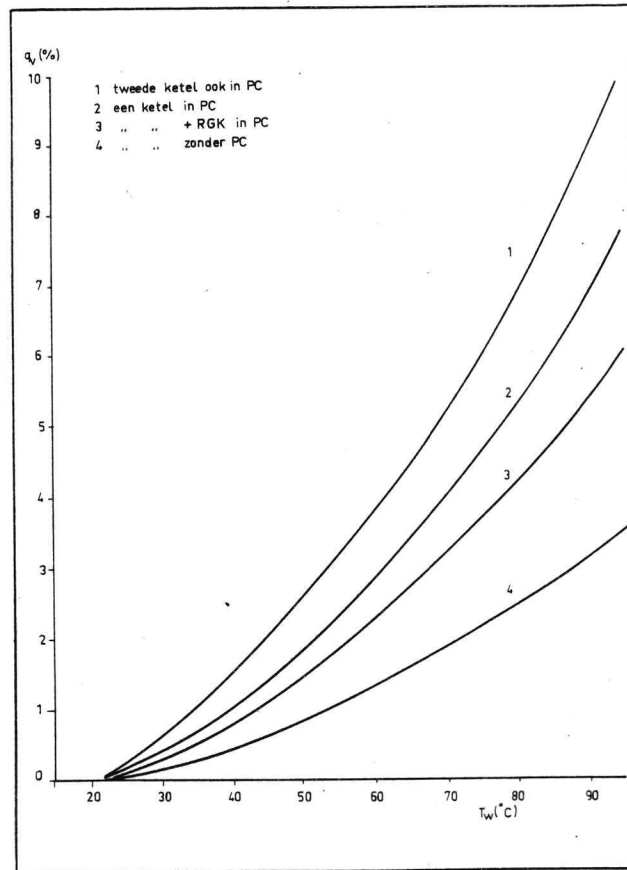


Fig.11 Gemeten stilstandsverliezen  
(gecorr. naar 20 °C ketelhuistemperatuur)

Een en ander is samengevat in tabel 3, waarbij tevens het effect op het gebruiksrendement is berekend (zie 4.2.15).

	$q_s$	$\eta_u$
ketel	100	100
ketel + RGK	30	103
ketel + PC	200	96
ketel + RGK + PC	160	98
ketel + PC + 2° ketel "in"	260	94

Tabel 3: Effect van installatie uitvoering op  $q_s$  en  $\eta_u$   
( $B = 33\%$ ,  $T_b = 70^\circ\text{C}$ ).



#### 6.4.4 Ventilatieverliesmetingen

Dat deel van de stilstandsverliezen van een ketel waarbij warmteafgifte plaatsvindt aan de door de ketel stromende lucht, worden de ventilatieverliezen genoemd.

Deze ventilatieverliezen kunnen worden gemeten met de zgn. Helium-tracer-methode. Hierbij wordt bij de ketelafvoer de He-concentratie gemeten en vergeleken met de Helium toevoer bij de luchtinlaat. Op grond van de daaruit afgeleide luchthoeveelheid en van temperatuurmetingen, kan dan de momentaan optredende warmteafgifte aan de lucht worden berekend.

De ventilatieverliesmetingen zijn uitgevoerd bij twee ketelwater temperaturen en met en zonder rookgasklep.

In figuur 12 worden de meetresultaten weergegeven

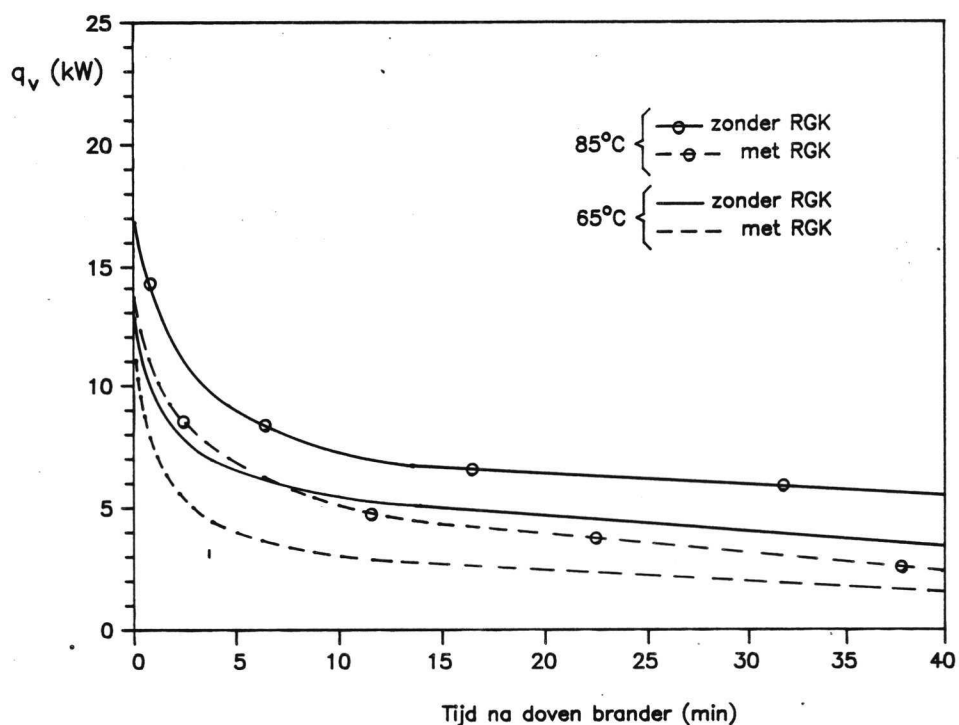


Fig.12 Resultaten ventilatieverliesmetingen

Het ventilatieverlies dat na het stoppen van de brander optreedt, is tevens afhankelijk van de lengte van de uitperiode. In figuur 13 is aangegeven hoe de totale ventilatieverliescoëfficiënt afneemt met de lengte van de "uit"-periode.

Uit de meetresultaten blijkt dat het effect van ketelwatertemperatuur en rookgasklep op het ventilatieverlies significant is (zie ook 6.4.3).

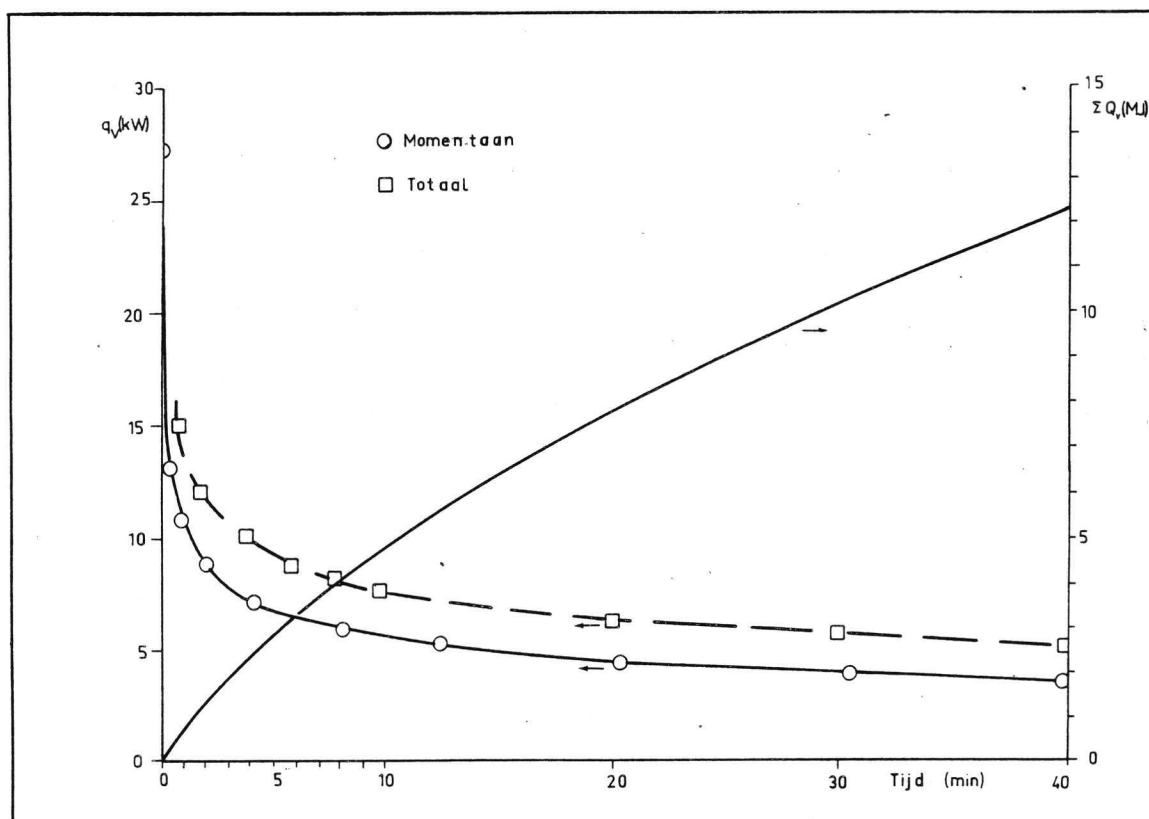


Fig. 13 Momentane en totale ventilatieverlies coëfficiënt en geaccumuleerd warmteverlies.

#### 6.4.5 Duurmetingen

Aan de ketelinstallatie in de Verzekeringkamer zijn enkele metingen uitgevoerd waarbij de installatie werd 'gevolgd' gedurende 5 tot 10 dagen. Hieronder volgen enkele uitkomsten van deze duurmetingen.

- Op basis van de duurmetingen kon het datareductie-programma worden ontwikkeld, ten behoeve van de verificatiemetingen.
- Het gedrag van de ketelinstallatie kon worden geanalyseerd aan de hand van plots.
- De relatie tussen gebouwwarmtevraag en omgevingstemperatuur is bepaald; zowel dynamisch als statisch. Uit dit laatste kon worden afgeleid dat de gebouwwarmtevraag bij  $-12^{\circ}\text{C}$  omgevingstemperatuur ca. 600 kW bedraagt.

- Ten gevolge van de dynamica van warmtevraag en -afgifte treden er grote variaties op in gebruiksrendement, bepaald op uur-basis. Bij een grotere tijdsperiode nemen deze variaties af.

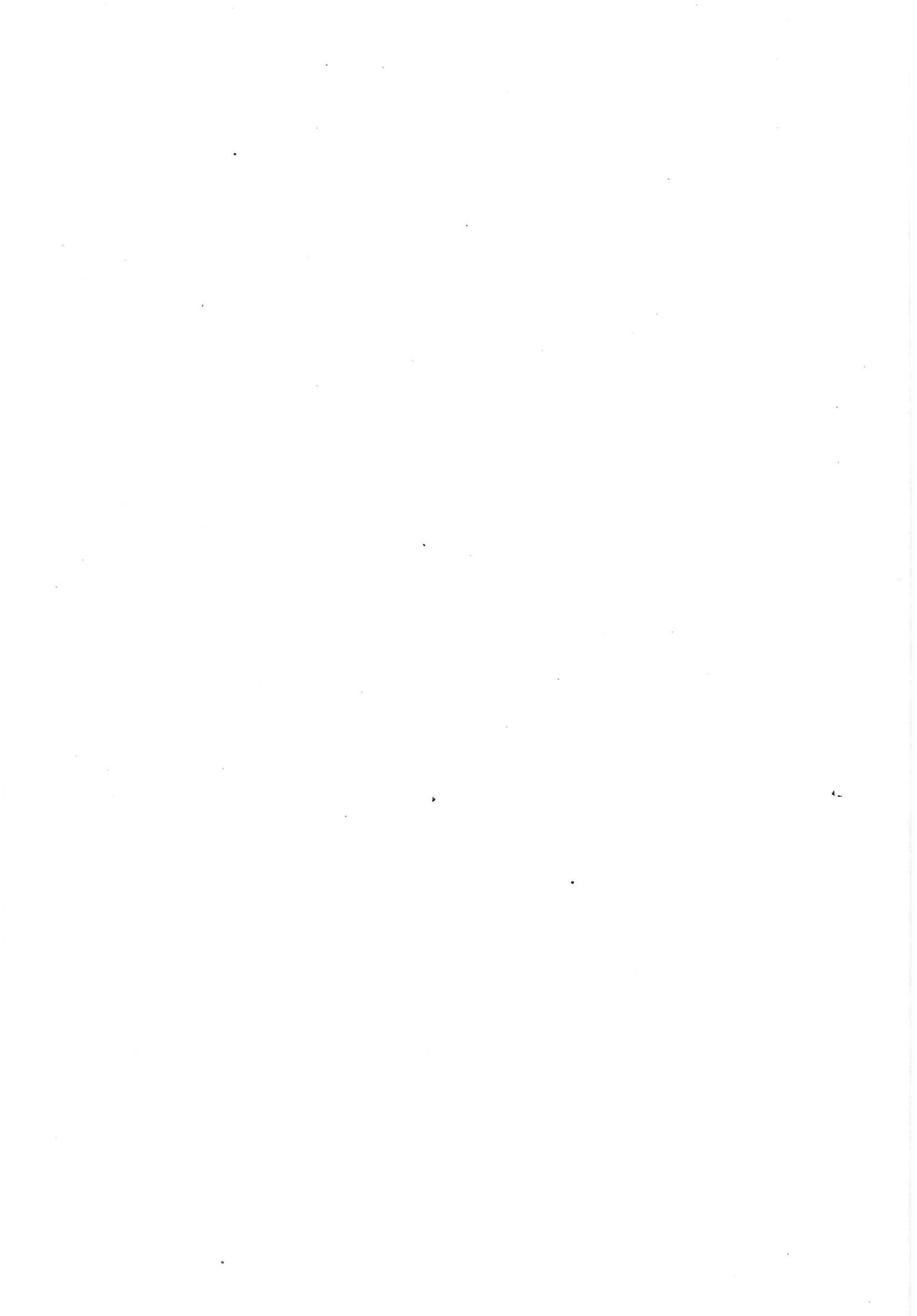
## 6.5 Verificatiemetingen

Ten behoeve van de verificatie van het Ketelkeuzeprogramma werd een drietal metingen uitgevoerd. Een overzicht hiervan wordt gegeven in tabel 4; alle metingen werden uitgevoerd met 1 ketel waterzijdig afgeschakeld.

De metingen leverden gegevens op m.b.t. installatiegedrag, brandstofverbruik, gebouwwarmtevraag en omgevingstemperatuur. De uurlijkse waarden van de laatste twee grootheden zijn afzonderlijk opgeslagen, om naderhand als invoergegeven voor berekening met het Ketelkeuzeprogramma te dienen. In hoofdstuk 8 worden de belangrijkste resultaten van de verificatie genoemd bij de vergelijking tussen meting en simulatie.

Meting	Temperatuurregeling	Branderregeling	Duur
A	Constant (70°C)	Aan - uit	65 uur
B	Weersafhankelijk	Aan - uit	75 uur
C	Weersafhankelijk	Hoog-laag	77 uur

Tabel 4 : Installatie uitvoeringen bij verificatiemetingen



## 7. STILSTANDSVERLIES EN SCHAKELFREQUENTIE

### 7.1 Inleiding

Uit hetgeen in hoofdstuk 4 en 6 is gezegd, kan worden afgeleid, dat de via de normale procedure verkregen stilstandsverliezen in de praktijk moeten worden gecorrigeerd, in verband met het schakelend bedrijf van de ketel.

In dit hoofdstuk wordt de correctiemethode, die hiertoe in het Ketelprogramma is opgenomen, gepresenteerd.

### 7.2 Correctieformule van Van der Heeden

In de literatuur is tot nu toe slechts één methode voor de correctie van het stilstandsverlies, in verband met schakelend bedrijf van de ketel, bekend [3]:

$$q_c = 0.4 * q_s + 0.7 + \sqrt{\frac{B}{C}}$$

Deze formule is gebaseerd op resultaten van onderzoek aan kleine huishoudelijke CV-ketels.

### 7.3 Invloed van ketelcircuit

In hoofdstuk 6 is aangetoond dat door aanwezigheid van het ketelcircuit het transmissie aandeel in het stilstandsverlies toeneemt. Toepassing van deze resultaten op bovenstaande formule resulteert in:

$$q_c = 0.75 * q_s + 0.7 * \sqrt{\frac{B}{C}}$$

### 7.4 Nieuwe correctie methode

Uit de verkregen meetresultaten kan worden afgeleid dat  $q_v$  en  $\tau_{off}$  als volgt samenhangen (zie fig. 13):

$$q_v = a * \tau_{off}^b$$

Hierin is de waarde van  $b$  afhankelijk van de aanwezigheid van een

rookgasklep<sup>1)</sup> en wordt a bepaald op basis van de resultaten van de (ketel-)stilstandsverliesmeting ( $q_s$  en duur van "uit"-periodes  $\tau_{mc}$ ).

Uitgaande van de in 7.3 gegeven uitdrukking, kan de volgende correctieformule worden afgeleid:

$$\begin{aligned} q_c &= q_v + q_t \\ &= a * \tau_{off}^b + 0.75 * q_s \\ &= \frac{0.25 * q_s}{\tau_{mc}^b} * \tau_{off}^b + 0.75 * q_s \end{aligned}$$

waaruit volgt:

$$q_c = q_s * \left[ 0.25 * \left( \frac{C}{B * \tau_{mc}} \right)^b + 0.75 \right]$$

Figuur 14 geeft een indruk van de duur van de "uit"-periodes bij de stilstandsverliesmetingen in de Verzekeringkamer.

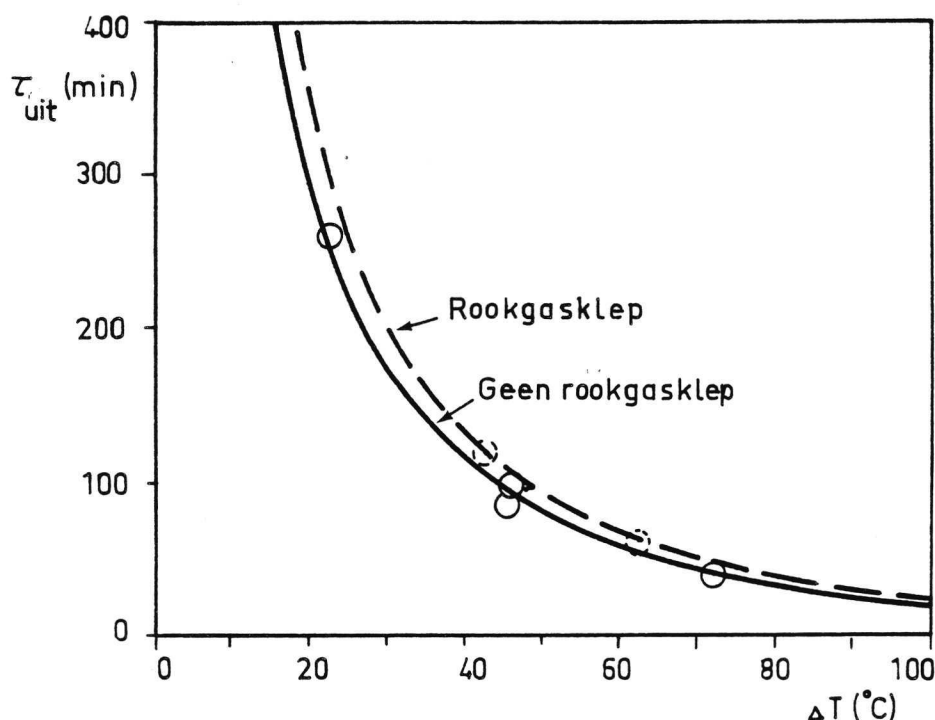


Fig.14 Lengte van "uit"-periodes als functie van temperatuurverschil ketelwater-ketelhuis (zie tabel2).

1)  $b = -0.27$ , indien geen RGK aanwezig.

$b = -0.35$ , indien wel RGK aanwezig.

In figuur 15 zijn Van der Heeden's methode en de nieuwe correctieformule met elkaar vergeleken. Daaruit blijkt duidelijk dat de eerstgenoemde methode tamelijk ongevoelig is voor het gegeven stilstandsverlies  $q_s$ .

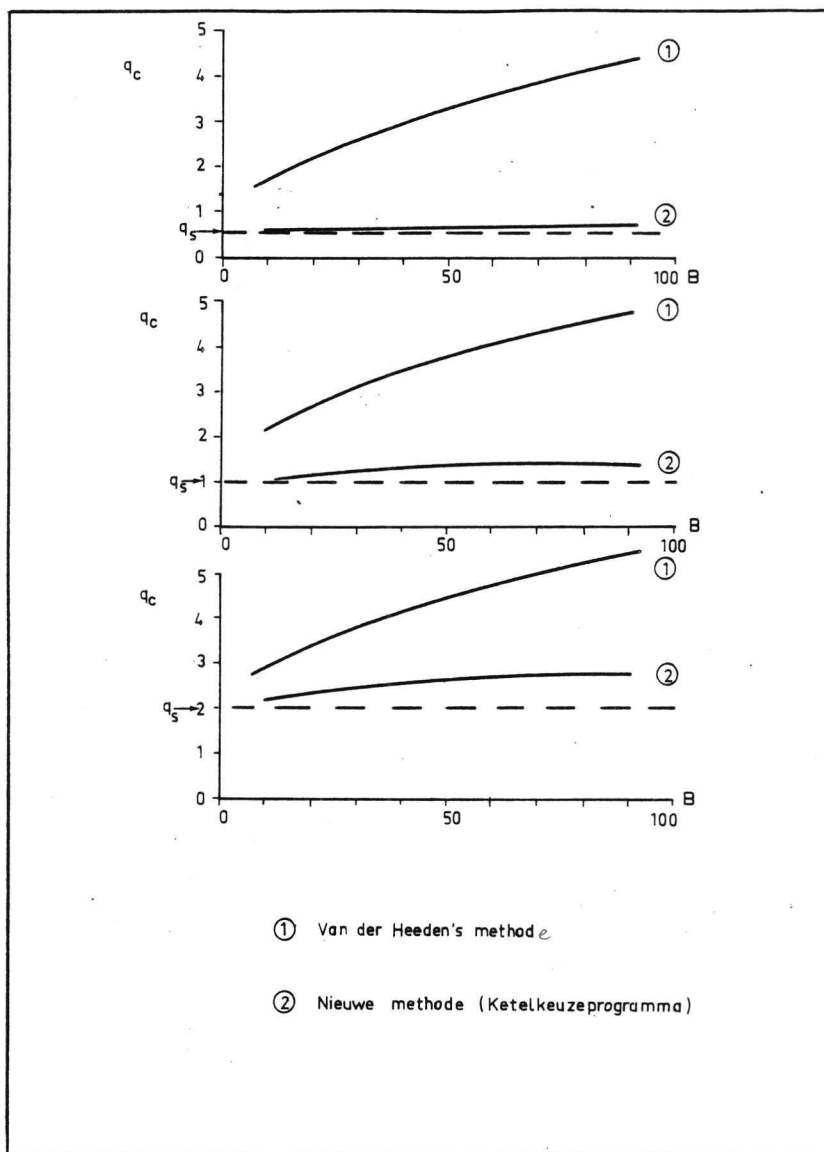


Fig. 15: Correctie van het stilstandsverlies volgens twee methoden ( $C = 100$  s,  $\tau_{mc} = 3600$  s).





## 8. VERIFICATIE VAN HET KETELKEUZEPROGRAMMA

### 8.1 Inleiding

Het opstellen van berekeningsmethoden voor de bepaling van gebruiksrendement en brandstofverbruik van ketelinstallaties is geen nieuwe activiteit. Niet eerder echter werden deze methoden getoetst aan de praktijk. Verificatie met praktijkexperimenten behoorde wel tot de doelstellingen van het ketelkeuze-project. In dit hoofdstuk worden de resultaten van deze verificatie gegeven.

### 8.2 Invoergegevens voor de berekeningen

Naast de uurlijkse (gemeten) gegevens betreffende gebouwwarmtevraag en omgevingstemperatuur, zijn de diverse installatiegegevens ingevoerd. Figuur 16 geeft hiervan een impressie in geval van meting C, bij A & B treden slechts lichte veranderingen op (zie tabel 5).

### 8.3 Resultaten

#### 8.3.1 Installatiegedrag

Op een aantal punten is het, met het Ketelkeuzeprogramma gesimuleerde, installatiegedrag vergeleken met het werkelijke gedrag. Van deze grootheden is voor één dag van meting C een plot gemaakt van uurlijkse waarden: figuur 17. Uit deze figuur blijkt direct de nauwe overeenstemming tussen praktijk en theorie.

INSTALLATIE + BEDRIJFSVOERING GEGEVENS (n.v.t. = 0 of blanco)

AANTAL KETELS:

WATERCIRCUIT:

primaair :waterw.(kg):  w.o.coef.(W/m<sup>2</sup>.K):  opp.(m<sup>2</sup>):   
 secundair:waterw.(kg):  binnentemp.(C):

WATERZIJDIGE AFSCHAKELING KETELS :  (ja of ne)

KETELHUISTEMPERATUUR (C):  KETELTHERMOSTAATDIFFERENTIE (C):

REGELING (gem.)KETELWATERTEMPERATUUR

constant :Tbdes(C):   
 weersafh. norm./dag:Tbdes(C):  Thl(C):  Tambdes(C):  Tbmin(C):   
 min.watertemp. begrenzing (C):   
 wk.end/nacht:Tbdes(C):  Thl(C):  Tambdes(C):  Tbmin(C):   
 nachtbedrijf, tijdstip:aanvang(h):  einde (h):  (hele uren)  
 variabel :Tbdes(C):  Thl(C):  Tambdes(C):

BRANDSTOF CODE :  (1=gas, 2=olie2, 3=olie6)

KETELSCHAKELING:  (1=voorkeur, 2=omkeer, 3=parallel)

-druk op  om door te gaan

GEGEVENS PER KETEL

(n.v.t. = 0 of blanco)

KETELNO.:

WATERW.(kg) :

W.O.COEF.(W/m<sup>2</sup>.K) :

OPP.KETEL(m<sup>2</sup>) :

BRANDER: Pvent.(kW):  voorspoeltijd(s):

ONTSTEKINGSCODE:  (1=permanent, 2=elektrisch, 3=elek.+ontst.brander)

vol.str.permanente brander(m<sup>3</sup>/s):

BRANDERREGELING code (slechts 1 van 3 onderstaande regels invullen)

aan/uit :  (1)

hoog/laag :  (2) Plbel. (%):  Th/1(C):

modulerend:  (3) Pthrbel.(%):

BELASTING KETEL : maximaal(kW):  nominaal(kW):

SOORT KETEL (slechts 1 van 3 onderstaande regels invullen)

standaard	:AO:	<input type="text"/>	A1:	<input type="text"/>	A2:	<input type="text"/>	A3:	<input type="text"/>	(Fst)
economizer	:AO:	<input type="text"/>	A1:	<input type="text"/>	A2:	<input type="text"/>	A3:	<input type="text"/>	(Feco) Pf(kW): <input type="text"/>
rookgasklep	:AO:	<input type="text" value="-5.3E-3"/>	A1:	<input type="text" value="1.09E-4"/>	A2:	<input type="text" value="4.75E-6"/>	A3:	<input type="text" value="0.8E-8"/>	(Frgk)
WA.RENDEMENT	:CO:	<input type="text" value="7955"/>	C1:	<input type="text" value="-37E-3"/>	C2:	<input type="text"/>	C3:	<input type="text"/>	(Fhe)(CO alt. invul.)
WA.REND.1/thr	:CO:	<input type="text" value="77"/>	C1:	<input type="text" value="-37E-3"/>	C2:	<input type="text"/>	C3:	<input type="text"/>	(Fhe)(CO alt. invul.)
WA.REND.modu.	:BO:	<input type="text"/>	B1:	<input type="text"/>	B2:	<input type="text"/>	B3:	<input type="text"/>	(F(rel.bel))

-druk op  om door te gaan

KOSTEN/BATEN GEGEVENS:

BESCHOUWDE SYSTEEM

REFERENTIESYSTEEM

(n.v.t.=0 of blanco)

PRIJS BRANDSTOF EERSTE JAAR (F1/M<sup>3</sup> of kg):

INVESTERING (F1):

NOMINALE RENTE (-):

AFLOSSINGSTERMIJN (j):

PERCENTAGE ENERGIEPRIJSSTIJGING (-):

ONDERHOUDS EN REPARATIEKOSTEN 1e JAAR (F1):

INFLATIEPERCENTAGE (-):

TECHNISCHE LEVENSDUUR (j):

BELASTINGVOORDEEL (-):

BRANDSTOFVERBRUIK (kg of m<sup>3</sup>):

-druk op  om door te gaan

Fig.16 Invoer van installatiegegevens t.b.v.  
 programmaverificatie (meting C).

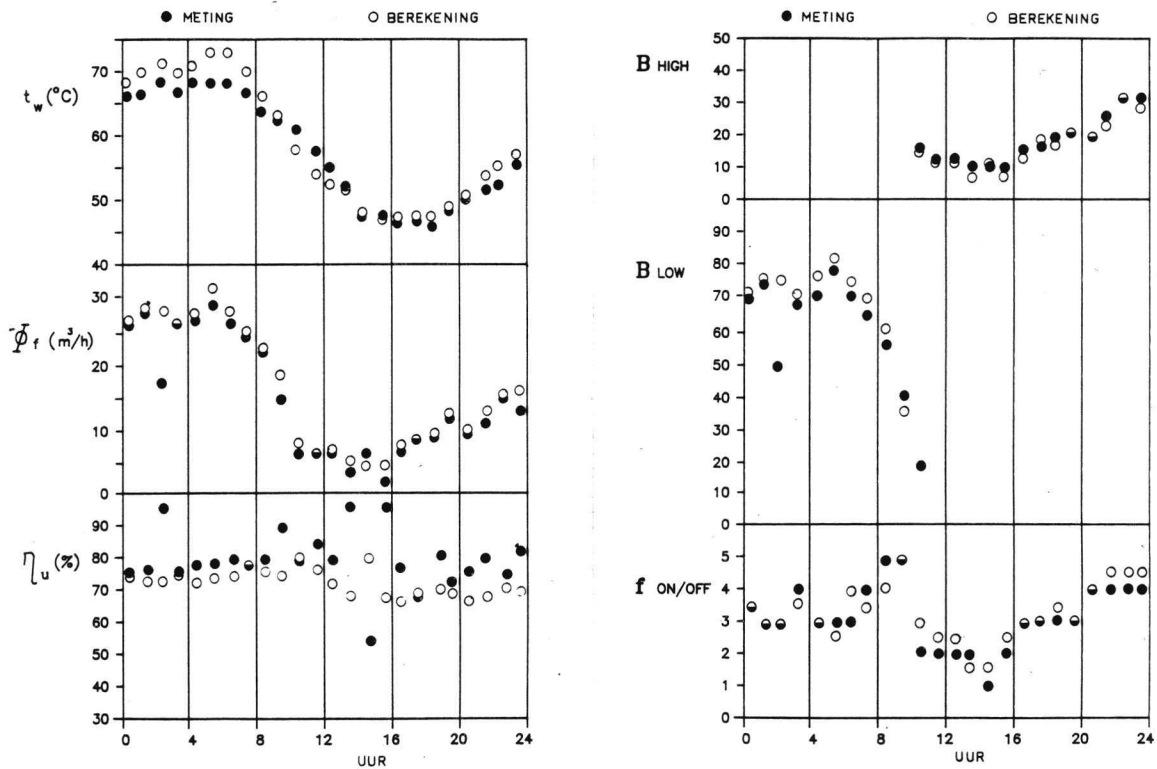


Fig.17 Vergelijking van gemeten en berekende grootheden

### 8.3.2. Brandstofverbruik

Belangrijker wellicht dan het installatiegedrag is, voor de evaluatie van ketelinstallaties, het brandstofverbruik. Tabel 6 geeft een overzicht van de resultaten op dit punt. Ook nu mag worden gesteld dat werkelijk (M) en berekend (C) brandstofverbruik zeer dicht bij elkaar liggen.

			A	B	C
	Gem. watertemperatuur	°C	70	60	57
	Afgegeven warmte	MJ	35541	18738	27644
	Benuttingsgraad	%	41	19	36
M	Brandstofverbruik	m <sup>3</sup> <sub>n</sub>	1392	743	1022
	Gebruiksefficiëntie	%	72.5	71.7	76.9
C	Brandstofverbruik	m <sup>3</sup> <sub>n</sub>	1393	748	1079
	Gebruiksefficiëntie	%	72.5	71.2	72.8
	Afwijking (C-M)	%	+ 0.1	+ 0.7	+ 5.7

Tabel 4 : Overzicht werkelijke en berekende brandstofverbruiken

8.4 Vergelijking met alternatieve methoden

Teneinde de positie van het Ketelkeuzeprogramma te bepalen ten opzichte van andere methoden van energieverbruiksberkening, zijn de resultaten van de verificatiemetingen ook nagerekend met enkele alternatieve methoden. Daar deze energieverbruiksberkeningen alle zijn gebaseerd op eenzelfde principe, wordt in tabel 5 slechts één methode vermeld, die van Dittrich [4]. De uitkomsten van tabel 7 zijn erg duidelijk, waarbij moet worden aangekend dat de alternatieve methoden sterk beïnvloed worden door de keuze van de nominale gebouw-warmtevraag (hier 600 kW, zie 6.4.5).

Methode	T <sub>b</sub> °C	Q <sub>geb</sub> kwh	Vollast		Benutt. graad		q <sub>s</sub>		η <sub>u</sub> %	Brandst. verbr. m <sup>3</sup> <sub>n</sub>	Meer verbr. %
			H	L	H	L	-	corr			
			hr	hr	%	%	%	%			
Meting A	70	9873	28	-	41	-	-	-	72.6	1392	-
Ketelkeuze	70	9873	28	-	41	-	-	-	72.5	1393	0.1
Dittrich	70	15906	44	-	68	-	3.2	-	76.1	2139	53.7
Meting B	60	5205	16	-	19	-	-	-	71.7	743	-
Ketelkeuze	60	5205	16	-	19	-	-	-	71.2	748	0.7
Dittrich	60	10026	28	-	37	-	2.3	-	74.6	1376	85.2
Meting C	57	7679	12	-	34	-	-	-	76.9	1022	-
Ketelkeuze	57	7679	12	-	34	-	-	-	72.8	1079	5.7
Dittrich	57	13656	-	49	-	63	2.1	-	76.6	1887	84.6

Tabel 7 Vergelijking van meetresultaten en resultaten van twee berekeningsmethoden.

## 9. BEREKENINGEN

9.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden enkele voorbeelden gegeven van berekeningen met het Ketelkeuzeprogramma. De berekeningen illustreren de variatie in ketelininstallaties welke met het programma kunnen worden geanalyseerd. De berekeningen betreffen de evaluatie van nieuwe ketelininstallaties en van energiebesparende maatregelen in bestaande installaties.

9.2 Warmtevraag en omgevingstemperatuur

Op basis van de resultaten van de duurmetingen (6.4.5) is een eenduidige relatie tussen gebouwwarmtevraag en buitentemperatuur bepaald, welke goed bleek te voldoen (zie fig.18). Uitgaande van het buitentemperatuurverloop volgens het Verkorte Referentiejaar voor Buitencondities werd daarna een warmtevraagpatroon berekend. De ontstane combinatie van omgevingstemperatuur en warmtevraag werd gebruikt als programma-invoer.

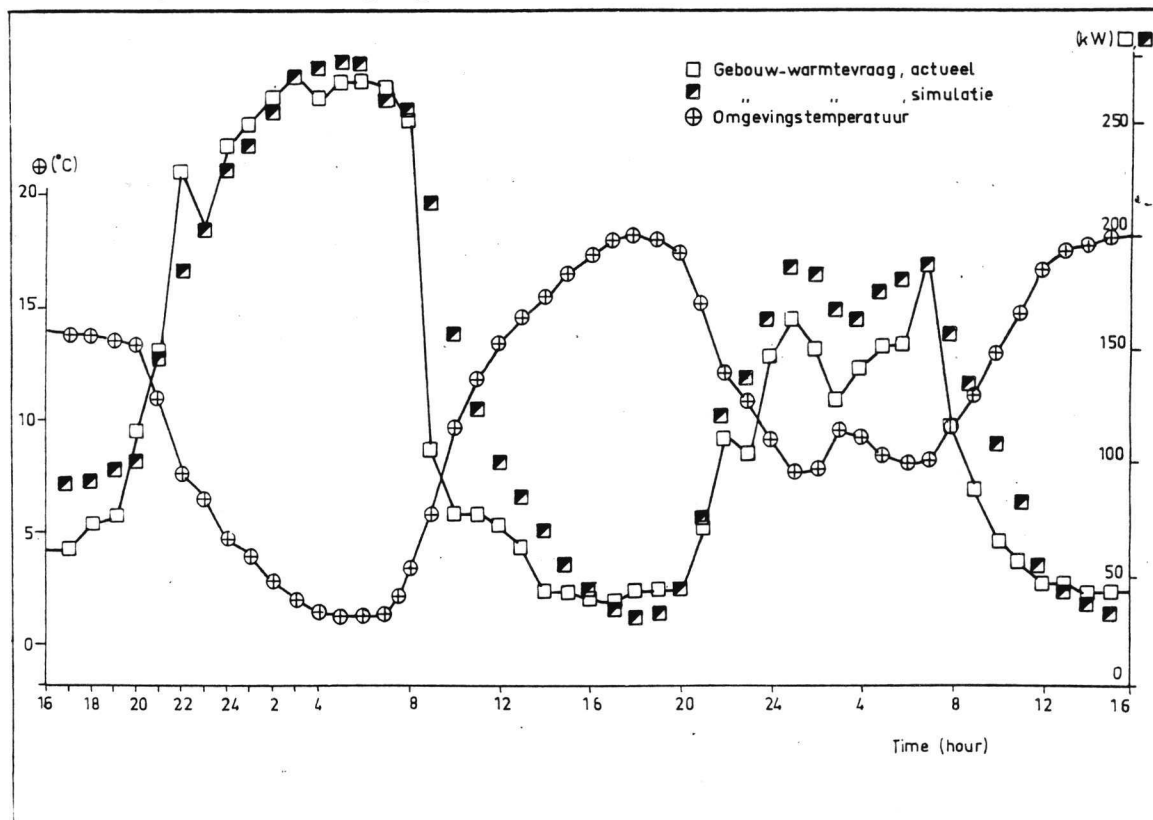


Fig. 18 Verloop van werkelijke en gesimuleerde warmtevraag (Verzekeringskamer).

### 9.3 Gegevens ketelinstallatie

Economische gegevens en installatie-eigenschappen welke bij de hier beschreven berekeningen zijn toegepast, staan vermeld in Bijlage 1.

### 9.4 Evaluatie nieuwe ketelinstallaties

De resultaten van de berekeningen betreffende nieuwe ketelinstallaties zijn samengevat in figuur 19.

KETELS	VERDELING	SCHAKELING	BRANDER	RENDEMENT	T-REGELING	OVERIGE	BRANDSTOF VERBRUIK (%)	NETTO CONTANTE WAARDE VAN EXPLOITATIE KOSTEN (%)
3	20 30 50	O	A	C	W	-	100	100
2	50 50	V	A	C	C	-	91	92
2	50 50	V	H	C	C	-	90	92
1	-	-	A	C	W	150	90	95
1	-	-	A	C	W	-	89	91
2	50 50	V	A	C	W	-	88	90
2	50 50	V	H	C	W	-	87	90
3	33 33 33	V	A	C	W	-	87	88
3	20 30 50	O	A	C	W	SK	87	93
2	50 50	V	M	C	W	-	80	87
2	80 20	V	M A	C	W	-	80	92
2	50 50	V	A	H C	W	-	77	95
2	80 20	V	A	H C	W	-	76	92

Figuur 19 : Overzicht van berekeningsresultaten met het Ketelkeuzeprogramma (nieuwe installaties).

O = omkeervolgorde, V = volgorde

A = aan-uit, H = hoog-laag, M = modulerend

C = conventioneel rend., H = hoogrendement

W = weersafhankelijk, C = constant-hoog

"150" = 50 % overgedimensioneerd

SK = smoorkleppen, waterzijdige afschakeling

9.5 Evaluatie van energiebesparende maatregelen

Bij de evaluatie van energiebesparende maatregelen werd onderscheid gemaakt tussen installaties met 1,2 en 3 ketels. De oorspronkelijke installaties (referentie) hebben een conventioneel rendement en worden hoog gestookt. De resultaten van de berekeningen zijn samengevat in figuur 20.

MAATREGEL	BRANDSTOF VERBRUIK (%)	TERUGVERDIEN TIJD ( jaren )
REFERENTIE (209174 M3)	100	-
+ RGK	99	2.6
+ WAV	95	0.4
+ WAV + RGK	93	> 15
+ WAV + ECO	79	1.7
<b>1</b>		
REFERENTIE (220351 M3)	100	-
+ 1 RGK	99	4.4
+ 2 RGK	97	2.1
+ WAV	90	0.3
+ WAV + 1 RGK	90	0.6
+ 1 RGK + 2 SK	89	0.5
+ WAV & NV	88	0.3
+ WAV + RGK + 2 SK + 1 ECO	75	1.3
+ WAV + 2 SK + 2 ECO	74	2.0
+ WAV + Opt.	45	0.1
+ WAV + 2 RGK + 2 SK + Opt.	40	0.3
<b>2</b>		
REFERENTIE (226661 M3)	100	-
+ RGK	99	6.0
+ RGK + 3 SK	85	0.7
<b>3</b>		

Fig. 20 Overzicht van berekeningsresultaten met het Ketelkeuzeprogramma (energiebesparende maatregelen)

RGK = rookgasklep

WAV = weersafhankelijke voorregeling

ECO = economizer, rookgascondensor

SK = smookkleppen, waterzijdige afschakeling

OPT = optimalisatie (dag-/nacht-/weekendbedrijf).

## 9.6 Slotopmerkingen

De bovenstaande voorbeelden tonen aan dat het Ketelkeuzeprogramma een groot aantal verschillende ketelinstallaties kan simuleren. De waarde van de resultaten wordt echter voor een groot deel bepaald door de juistheid van de invoergegevens. Bij reële projecten is nauwgezetheid bij het vaststellen van de in te voeren gegevens van groot belang. Voorgaande berekeningen laten tevens een groot besparingspotentieel zien, te bereiken door juiste keuze van de ketelinstallatie.



## 10. CONCLUSIES

De belangrijkste conclusies uit het ketelkeuzeproject worden hieronder gegeven.

1. De doelstelling van het ketelkeuzeproject, namelijk het ontwikkelen en testen van een computerprogramma ten behoeve van de berekening van energiegebruik en exploitatiekosten van ketelinstallaties, is bereikt.
2. Toepassing van het Ketelkeuzeprogramma in de praktijk kan leiden tot besparingen in energiegebruik tot 25%. De werkelijke besparing is afhankelijk van de uiteindelijke keuze van de ketelinstallatie.
3. Indien de juiste invoergegevens aanwezig zijn, biedt het Ketelkeuzeprogramma de mogelijkheid tot een snelle en nauwkeurige evaluatie van energiegebruik en exploitatiekosten van de beschouwde installatie.
4. Ten behoeve van de berekeningen dienen uurlijkse opeenvolgende gegevens betreffende buitentemperatuur en gebouwwarmtevraag aanwezig te zijn.
5. Uit metingen aan een bestaande installatie is gebleken dat:
  - de aanwezigheid van een ketelcircuit leidt tot een verdubbeling van het stilstandsverlies, in vergelijking tot produkt-informatie;
  - waterzijdige afschakeling een daling van het stilstandsverlies van de installatie van ca. 25% tot gevolg heeft;
  - het effect van een rookgasklep sterk teruggebracht wordt door de aanwezigheid van het ketelcircuit als gevolg van het relatief kleinere ventilatieverlies.
6. Een nieuwe, meer realistische methode is ontwikkeld voor de correctie van stilstandsverliezen als gevolg van schakelend bedrijf van de ketel.

7. Het Ketelkeuzeprogramma simuleert het installatiegedrag vrij goed; optredende verschillen vinden hun oorsprong voornamelijk in dynamische effecten.
8. De simulatie van het werkelijke optredend brandstofverbruik door het Ketelkeuzeprogramma geschiedt vrij nauwkeurig; de afwijking bedraagt maximaal 6%. De nauwkeurigheid van het theoretisch berekende brandstofverbruik, t.b.v. onderlinge vergelijking van installaties, bedraagt ca. 1%
9. In hoge mate bepalend voor de absolute waarde van het brandstofverbruik, berekend met het Ketelkeuzeprogramma, is het gebruik van uurlijkse gegevens betreffende buitentemperatuur en gebouw-warmtevraag.
10. Bij het projecteren van nieuwe ketelinstallaties kunnen verschillen in energiegebruik en exploitatiekosten worden opgespoord met het Ketelkeuzeprogramma.
11. Bij de analyse vooraf van energiebesparende maatregelen kunnen energiebesparing en terugverdientijd van de maatregel worden berekend met het Ketelkeuzeprogramma.

11. NOMENCLATUUR

a	= constante	
B	= benuttingsgraad	-,%
b	= constante	-
C	= installatieconstante	s
$C_m$	= soortelijke warmte van metaal	kJ/kgK
$C_w$	= soortelijke warmte van water	kJ/kgK
f	= schakelfrequentie	h-1
$H_f$	= bovenste verbrandingswaarde van brandstof	kJ/m <sup>3</sup> (kg)
$I_m$	= (meer)investering	fl.
L	= ketelbelasting	kW
$m_m$	= massa van systeem (metaal)	kg
$m_w$	= massa van systeem (water)	kg
$P_{max}$	= maximum ketelvermogen	kW
PC	= primair circuit	
$Q_{geb}$	= gebouw warmtevraag	kWh
$q_c$	= stilstandsverlies coëfficiënt, gecorrigeerd	-,%
$q_s$	= stilstandsverlies coëfficiënt, opgave	-,%
$q_t$	= transmissieverlies coëfficiënt	-,%
$q_v$	= ventilatieverlies coëfficiënt	-,%
$\eta_b$	= ketel vollast rendement	-,%
$\eta_u$	= gebruiksrendement	-,%
$\tau_c$	= cyclusduur	s
$\tau_{on}$	= lengte van brander "aan" periode	s
$\tau_{off(uit)}$	= lengte van brander "uit"-periode	s
$\tau_{MC}$	= lengte van brander "uit"-periode bij stilstandsverliesmeting	s
$\phi_f$	= brandstofverbruik	m <sup>3</sup> /kg

## 12. REFERENTIES

- [1] : "Development of a computer model for the selection of boiler plants from the view-point of a low energy consumption".  
Final Report  
A.J. Meijnen  
TNO Division of Technology for Society; februari 1985.
- [2] : "System simulation Buildings"  
Proc. Intern. Conf. Liège (Belgium), 6-8 December, 1982  
EEC XII/425/83-EN
- [3] : "Het gebruiksrendement van CV-ketels"  
D.J. van der Heeden, Verwarming & Ventilatie, febr. 1977, no.2.
- [4] : "Zum Jahresnutzungsgrad von Einkesselanlagen"  
A. Dittrich; HLH 33 (1982), nr.1, Januar.
- [5] : "Kosten en baten van energiebesparende projecten en de inflatie"  
J.F. van der Horst, Verwarming en Ventilatie, juni 1977, nr.6

Bijlage 1

Aanvullende gegevens t.b.v. berekeningen

- Installation

\* Watervalue-----: 700 kg  
 \*  $\alpha$ -----: 8 W/m<sup>2</sup>K  
 \* Area-----: 40 m<sup>2</sup>  
 \* Boilerhouse temperature-----: 20 °C  
 \* Thermostat deviation-----: 10 °C  
 \* Fuel-----: natural gas

- Boilers(s) (atmospheric)

\*  $\alpha$ -----: 10 w/m<sup>2</sup>K  
 \* Watervalue (W) \ Area (A)-----:

	W (kg)	A (m <sup>2</sup> )
1250 kW boiler	2000	24
1000 kW "	1700	20
500 kW "	700	12
330 kW "	600	8

\* Temperature control-----:

- constant 80 °C  
 - weatherdep. 80 → 30 °C on -10 → 20 °C ambient  
 - night setback 70 → 20 °C " " " "

\* Oversize-----: 20%

\* Burnercontrol, HIGH-LOW-----: 100-40%; 60 °C

MODULATING-----: 100-30%.

\* Standstill-losses-----:

standard:  $q_s = .125 E-2 + .154E-3 * T_b - .29E-5 * T_b^2 + .37E-7 * T_b^3$

economizer:  $q_s = -.35E-2 + 3.67E-4 * T_b - 7.8E-6 * T_b^2 + 6.2E-8 * T_b^3$

FGV:  $q_s = -.53E-2 + .169E-3 * T_b + .475E-5 * T_b^2 + .80E-8 * T_b^3$ .

\* Full-load efficiency-----:

standard :  $\eta_b = .78 - .33E-3 * T_b$

low/threshold:  $\eta_b = .77 - .33E-3 * T_b$

modulating:  $\eta_b = .777 + .394 * L - .725 * L^2 + .365 * L^3$ .

\* Costs

Primary circuit-----	:	f	25000
Boiler 1250 kW-----	:		55000
1000 kW-----	:		50000
500 kW-----	:		25000
300 kW-----	:		15000
Economizer-----	:		15000
Flue Gas Valve 1 boiler-----	:		5000
2 boilers-----	:		9000
3 boilers-----	:		12000
Butterfly valve 1 boiler-----	:		1500
2 boilers-----	:		2500
Weatherdependent control. 1 boiler-----	:		3000
2 boilers-----	:		5000
3 boilers-----	:		6000
Optimization-----	:		5000

