

Laan van Westenenk 501
Postbus 342
7300 AH Apeldoorn

www.mep.tno.nl

T 055 549 34 93
F 055 549 32 01
info@mep.tno.nl

TNO-rapport

R 2002/084

**E'pro en WPSim –
Model en implementatie WPSim
onder Windows**

Datum	februari 2002
Auteurs	J. van Wolferen H. Bekkering
Projectnummer	29729
Trefwoorden	Warmtepomp WPSim E'pro
Bestemd voor	Novem t.a.v. Ing. C.M. van Geet Postbus 8242 3503 RE Utrecht

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, 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 opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst. Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

Inhoudsopgave

1 Inleiding — 3

Inhoudsopgave

Samenvatting.....	2
1. Inleiding.....	4
2. Specificaties.....	6
2.1 Doelstelling	6
2.2 Systeembeschrijving	6
2.3 Modeluitvoer	6
2.4 Modelinvoer	6
2.5 Eisen aan de methode.....	7
3. Model CV-functie warmtepomp.....	8
3.1 Uitwerking warmtepompsystemen.....	8
3.2 Onderdelen warmtepompsysteem	9
3.3 Model warmtepomp	9
3.4 Model bedrijfscondities afgiftezijde.....	12
3.5 De warmtebron.....	20
3.6 Jaarprestaties	22
4. Implementatie model	23
4.1 Algemene structuur	23
4.2 Interface structuur	23
4.3 Hoofdstructuur berekeningen	24
4.4 Structuur berekening bedrijfscondities.....	25
4.5 Structuur berekening prestaties warmtepomp	26
5. Conclusies en aanbevelingen.....	28
6. Literatuur	29
7. Verantwoording.....	30
Bijlage 1 Voorbeelden model carnotfactor	
Bijlage 2 Overzicht parameters en variabelen model cv-functie warmtepomp	

1. Inleiding

In opdracht van Novem is een opdracht uitgevoerd met als doelstelling de inpassing van WPSIM in E'pro met als doel de berekening van de COP en het energiegebruik van warmtepompen op jaarbasis, afhankelijk van de gekozen warmtepomp en de inpassing hiervan.

Het doel van E'pro is in verschillende fases van een project op gebiedsniveau inzicht te geven in de te verwachten energieprestatie, emissie en energiekosten, afhankelijk van de gekozen energie-infrastructuur [1, 2]. Hierdoor wordt een integrale vergelijking van diverse opties mogelijk. Het programma E'pro is door Damen Consultants ontwikkeld. Momenteel wordt het programma omgezet naar Windows '98. De schil en de bestanden van het programma zijn geïmplementeerd in ACCESS; de berekeningen worden uitgevoerd in EXCEL en VBA.

Op dit moment zijn warmtepompen via forfaitaire waarden op jaarbasis in E'pro gemodelleerd. Het betreft hier drie toepassingen: ruimteverwarming, tapwaterbereiding en centrale warmteopwekking t.b.v. warmtedistributie. Gezien de gevoeligheid van warmtepompen voor de inpassing is een meer gedetailleerde modellering gewenst. Het niveau van detaillering dient aan te sluiten bij de huidige werkwijze van E'pro.

Binnen TNO-MEP is een methode ontwikkeld om de COP van warmtepompen op jaarbasis te bepalen, o.a. t.b.v. de EPN. Deze methode is geïmplementeerd onder DOS in het programma WPSim [3]. Het betreft hier de toepassing voor ruimteverwarming maar het warmtepompmodel kan ook als basis gebruikt worden voor indirecte warmtapwaterbereiding en warmtedistributie. Het programma wordt omgezet naar Windows '95. De schil en de berekeningen worden geïmplementeerd in Visual Basic; de bestanden in ACCESS.

Zowel E'pro als WPSim voeren de energieberekeningen op maandbasis uit (in WPSim kan overigens ook op kortere tijdbasis gerekend worden). WPSim bevat twee modellen: voor de berekening van de bedrijfscondities en voor het bepalen van de COP voor gegeven bedrijfscondities. Met het eerste model worden per maand de bedrijfscondities bepaald waaronder de warmtepomp werkt, zowel aan de bron- als de afgiftezijde. Deze condities worden bepaald door o.a. de (maandelijkse) warmtevraag, het ontwerpvermogen en de ontwerptemperaturen, het type regeling, het gebruik van de radiatoren en de toepassing van nachtverlaging. In combinatie met het model voor de warmtepomp kan zo de COP per maand en jaar worden bepaald.

De inpassing van WPSim in E'pro t.b.v. de verwarmingsfunctie verloopt als volgt. In de invoerschermen worden, bij keuze van een warmtepomp, waar nodig extra vragen gesteld. De berekeningen worden in VBA geïmplementeerd in de EXCEL

rekenkern. Via een beperkt aantal berekeningen wordt de implementatie getest door deze te vergelijken met WPSim.

Het hier gegeven model van de warmtepomp voor de cv-functie is in grote lijnen gelijk aan het model van de DOS-versie. Dit model is echter uitgebreid met o.a. een optioneel cv-buffervat dat zowel parallel aan of in serie met de warmtepomp kan worden ingepast. Tevens is een aantal bugs uit het model verwijderd. De inpassing van het warmtepompmodel t.b.v. de tapfunctie en of de warmtedistributie is niet uitgewerkt.

Gedetailleerde werkwijze:

1. Omzetten rekenkern van fortran naar visual basic (TNO).
2. Implementeren rekenkern in VBA onder EXCEL, inclusief aanmaken in- en uitvoervelden in EXCEL (Damen).
3. Opstellen lijst van invoerparameters t.b.v. implementatie in E'pro, uitgesplitst naar toestelgegevens, installatieontwerp en gebruikersgedrag (TNO).
4. Implementeren aanvullende invoer in ACCESS en uitwisseling tussen ACCESS en EXCEL bij uitvoeren berekeningen (Damen).
5. Testen implementatie (TNO & Damen).
6. Verzorgen documentatie en rapportage (TNO & Damen).

In dit rapport worden de specificatie, modellering en implementatie van het model van de warmtepomp en de bedrijfscondities gegeven. Als bijlage is de lijst van parameters en variabelen van WPSim gegeven.

2. Specificaties

2.1 Doelstelling

De doelstelling van het te ontwikkelen model is de bepaling van de COP van een warmtepompsysteem voor de cv-functie.

2.2 Systeembeschrijving

De methode dient geschikt te zijn voor de volgende warmtepompsystemen:

- elektrische compressiewarmtepompen, waarvan de prestaties direct volgen uit de resultaten van genormeerde metingen; de warmtepompen worden aan/uit geregeld;
- uiteenlopende typen warmtebron; met name: bodemwarmtewisselaars, grondwater en buitenlucht;
- cv-afgiftesystemen op basis van cv-water bij uiteenlopende ontwerptemperatureniveaus, ontwerpafgiftevermogens en regelingen;
- cv-afgiftesystemen zonder en met parallel geplaatste cv-buffer plus extra cv-pomp;
- monovalente systemen (geen bijstook).

2.3 Modeluitvoer

Er worden 3 verschillende COP's onderscheiden:

COP_{wp}	COP van de separate warmtepomp
$COP_{wp+bron}$	COP_{wp} inclusief hulpenergiegebruik t.b.v. de warmtebron (correspondeert met de definitie van de COP in NEN 5128 [7])
$COP_{systeem}$	$COP_{wp+bron}$ incl. hulpenergiegebruik bufferpomp en warmteverlies buffer

Het WP-systeem gebruikt hulpenergie t.b.v. bronpomp of -ventilator, bufferpomp en/of transportpomp afgiftesysteem.

2.4 Modelinvoer

Voor de modelinvoer wordt van de beschikbaarheid van de volgende gegevens uitgegaan:

- warmtepomp - gegevens van COP en vermogens bij verschillende bedrijfscondities, zoals verkregen uit o.a. beproevingen conform NEN/EN 255;
- warmteafgiftesysteem - in de regel slechts globale gegevens omtrent installatieontwerp en -bedrijf, zoals ontwerpvermogen en -temperaturen, type regeling,

- jaarlijkse warmtevraag, radiatorgebruik en toepassing nachtverlaging door bewoner;
- warmtebron - type.

2.5 Eisen aan de methode

De te ontwikkelen methode dient aan te sluiten bij uitgangspunten in de EPN.

De nauwkeurigheid van de methode dient vergelijkbaar te zijn met die van laboratoriummetingen.

Bij het opzetten van de bepalingsmethode zijn de belangrijkste overwegingen (toegespitst op verwarming):

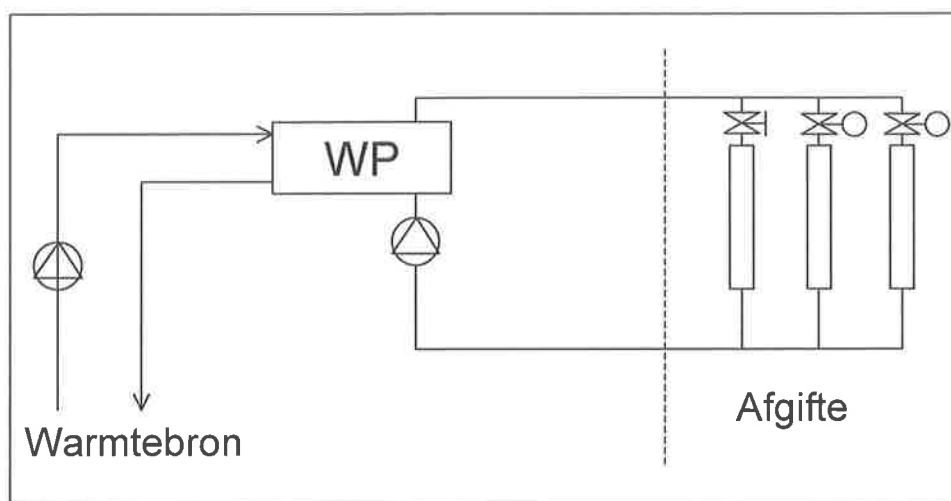
- het gegeven dat de prestaties van een warmtepomp sterk afhangen van de temperatuurniveaus van warmtebron en warmteafgifte;
- dat de meeste warmtebronnen geen (bij benadering) constant temperatuurniveau hebben;
- dat de meeste afgiftesystemen geen (bij benadering) constant temperatuurniveau hebben;
- er tot op heden geen nederlandse of europese normen zijn voor het bepalen van de verdeling van bedrijfstoestanden (warmtevraag - temperatuur) van afgiftesystemen over een jaar;
- er tot op heden geen nederlandse of europese norm is waarin een 'gemiddelde' of 'referentie' bedrijfstoestand is vastgelegd voor één of meer afgiftesystemen;
- in het 'EU - Boiler Annual Efficiency' project een methode is ontwikkeld en geïmplementeerd (maar niet gevalideerd) waarmee op basis van graaddagen, installatie- en regelparameters de bedrijfstoestanden worden bepaald [4, 5].

Voor het bepalen van het opwekkingsrendement voor verwarmingsinstallaties wordt daarom aangesloten bij de in het SAVE programma ontwikkelde methode om het jaargebruiksrendement van ketels te bepalen [4].

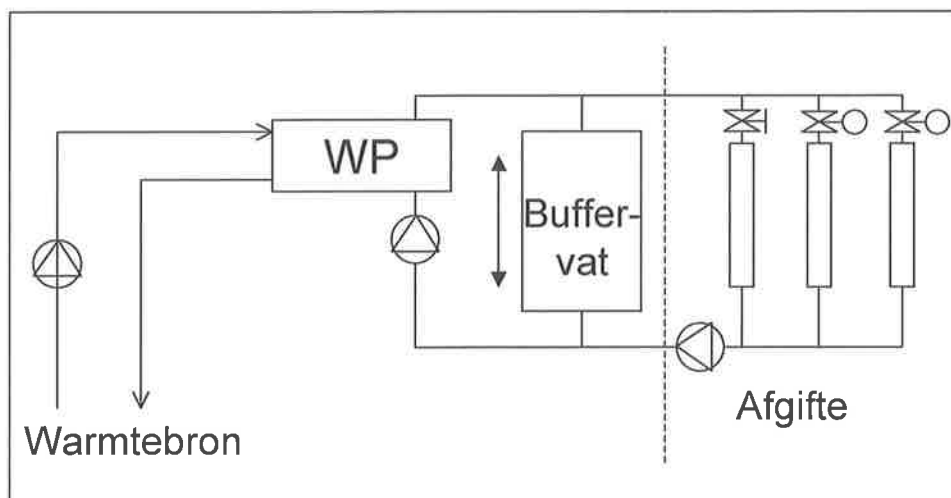
3. Model CV-functie warmtepomp

3.1 Uitwerking warmtepompsystemen

In de volgende figuren zijn de te modelleren warmtepompsystemen schematisch weergegeven.



Figuur 1. Schema van een warmtepomp zonder buffer.



Figuur 2. Schema van een warmtepomp met buffer in parallelstelling.

3.2 Onderdelen warmtepompsysteem

Voor het berekenen van het jaargebruiksrendement van huishoudelijke cv-ketels is het computerprogramma BoilSim ontwikkeld [4]. Het model hiervan bestaat in essentie uit twee onderdelen:

- Een deellastmodel voor ketels, waarmee het gebruiksrendement bij gegeven bedrijfscondities wordt berekend.
- Een model voor het bepalen van de gemiddelde bedrijfscondities over gegeven perioden. De bedrijfscondities worden beschreven door de warmtevraag, de aanvoer- en retourtemperatuur, het cv-debiet over de ketel, de temperatuur in de opstellingsruimte en de schakelfrequentie van de ketel.

Voor de berekening van de COP op jaarbasis van warmtepompen wordt dezelfde methodiek gevolgd. Hieronder wordt deze uitgewerkt voor de volgende drie onderdelen:

- het warmtepomp-model;
- het model voor de bedrijfscondities aan de afgiftezijde;
- het model voor de warmtebron.

3.3 Model warmtepomp

Voor het model van de COP van de warmtepomp in deellast worden hieronder de relevante aspecten beschreven. Tot slot worden de gevraagde bedrijfscondities samengevat.

Terminologie en definities

De COP van een warmtepomp is als volgt gedefinieerd:

$$COP = P_c / P_a \quad (3.1)$$

Voor de vermogens geldt de volgende relatie (zonder omgevingsverliezen)

$$P_c = P_v + P_a \quad (3.2)$$

Met		
COP	Coefficient of performance	-
P_c	Condensorvermogen (bronzijde)	W
P_v	Verdampervermogen (afgiftezijde)	W
P_a	Aandrijfvermogen	W

COP in vollast

De COP van een warmtepomp wordt bij gegeven constante bedrijfscondities met de volgende polynoom beschreven:

$$COP = c_0 + c_1 * T_{br} + c_2 * (T_{br})^2 + c_3 * T_{cv} + c_4 * (T_{cv})^2 + c_5 * T_{br} * T_{cv} \quad (3.3)$$

Waarin:

c_0 t/m c_5	constanten	-
T_{br} ,	brontemperatuur (verdamperzijde)	°C
T_{cv}	temperatuur cv-water (condensorzijde)	°C

Voor de bron- en afgiftemperatuur kan zowel de ingaande als uitgaande temperatuur worden gebruikt. Uit theoretische overwegingen en beproevingen blijkt dat bij gebruik van de ingaande temperatuur tevens het betreffende debiet van invloed is op de prestaties. Bij gebruik van de uitgaande temperatuur is dit slechts een bescheiden effect. Voor de modellering worden beide benaderingen toegepast, met de aantekening dat bij gebruik van polynomen op ingaande temperaturen een installatie met constante debieten aan bron- en afgiftezijde vereist zijn.

Op de TNO-proefstand kan voor verschillende meetcondities de COP van de betreffende warmtepomp worden bepaald. Dit is in het kader van de warmtepomp competitie voor een groot aantal warmtepompen uitgevoerd. Op basis van de gemeten waarden kunnen de gewenste polynoomconstanten worden bepaald.

De Europese norm NEN/EN 255 schrijft drie metingen voor. Hiermee kan uitsluitend een vereenvoudigde, lineaire vorm van de polynoom worden afgeleid:

$$COP = c_0 + c_1 * T_{br} + c_3 * T_{cv} \quad (3.4)$$

In sommige situaties zijn er echter te weinig gegevens beschikbaar voor het hierboven geschetste model. Dan kan gebruik worden gemaakt van een eenvoudig model, dat gebruik maakt van de theoretische formule voor de COP, gecorrigeerd met de carnotfactor. In formule:

$$COP = f_c * T_a / (T_a - T_{br,uit}) [-] \quad (3.5)$$

Met:

f_c	Carnotfactor	[-]
T_a	Aanvoertemperatuur	[K]
$T_{br,uit}$	Uitgaande brontemperatuur	[K]

Dit model heeft als uitgangspunten:

- constant elektrisch vermogen;
- constante carnotfactor.

Voor een specifieke warmtepomp wordt voor ieder werkpunt waarvan de gegevens bekend zijn de carnotfactor bepaald. Vervolgens wordt hiervan het gemiddelde genomen voor de berekening van het rendement op andere werkpunten. Op deze wijze kan zelfs als slechts voor één werkpunt de gegevens bekend zijn een werkbare formule voor de COP worden gevonden.

In bijlage 1 is voor drie warmtepompen het resultaat van dit model gegeven. Daaruit blijkt dat een spreiding van 10 % in de waarde van de carnotfactor optreedt. Dit geeft een indruk van de onnauwkeurigheid die ontstaat bij gebruik van dit model. Het opgenomen elektrisch vermogen van de warmtepomp vertoont een spreiding tot 30%.

Vollastvermogens

Uit beproevingen is gebleken dat geen van de drie vermogens (verdamp-, condens- of aandrijfvermogen) constant is bij uiteenlopende bedrijfscondities. Daarom is er voor gekozen ook deze vermogens als functie van de bedrijfstemperaturen in een polynoom te geven van dezelfde vorm als voor de COP. Indien een klein aantal meetgegevens beschikbaar is wordt analoog aan de COP de gereduceerde polynoom toegepast. In het model kan naar keus een polynoom voor het aandrijfvermogen of het afgiftevermogen worden toegepast. Als de COP en één der drie vermogens bekend is volgende de andere twee vermogens uit de eerder gegeven formules.

Stilstandsverliezen

Uit alle tot op heden uitgevoerde metingen zijn geen stilstandsverliezen van warmtepompen gebleken.

Start-/stopverliezen

Uit alle tot op heden uitgevoerde metingen aan elektrische warmtepompen zijn geen start- en stopverliezen gebleken. Het aantal schakelingen van de warmtepomp is dus niet relevant.

Het is zeker niet uit te sluiten dat thermisch gedreven warmtepompen wel significante start-/stopverliezen vertonen.

Hulpenergie

Door zowel de bronpomp of -ventilator als de pomp(en) aan de afgiftezijde wordt elektriciteit gebruikt. In de regel wordt de bronpomp of -ventilator uitgeschakeld als de warmtepomp uitgeschakeld is. Dit geldt eveneens voor de pomp aan de afgiftezijde. In beide gevallen kan een nadraaitijd toegepast worden.

Het gemiddelde vermogen van de pomp of ventilator wordt als volgt bepaald.

Bij een gegeven cyclustijd τ_c en aantijd τ_{aan} van de WP wordt de aantijd van de pomp of ventilator $\tau_{px,aan}$ bepaald. Hierbij worden de volgende regels gevolgd:

- Als geen pomp/ventilatorschakeling wordt toegepast geldt: $\tau_{px,aan} = \tau_c$.
- Als de uittijd $\tau_{uit} \leq \text{nadraaitijd}_x$ geldt: $\tau_{px,aan} = \tau_c$.
- In de andere gevallen geldt: $\tau_{px,aan} = \tau_{aan} + \text{nadraaitijd}_x$.

Hiermee vinden we voor het gemiddeld vermogen:

$$P_{in,px} = P_{el,px} * \tau_{px,aan} / \tau_c \quad (3.6)$$

Met:

$P_{in,px}$	Gemiddeld vermogen pomp/ventilator x	W
$P_{el,px}$	Nominaal vermogen pomp/ventilator x	W
$\tau_{px,aan}$	Aantijd pomp/ventilator x per schakelcyclus	sec
τ_c	Cyclustijd WP-schakeling	sec

Bij toepassing van een buffervat in parallelstelling wordt tevens een distributie-pomp toegepast. Deze kan op twee manieren worden geregeld:

- aan/uit door de kamerthermostaat;
- toerengeregeld, zodat een constant drukverschil over aanvoer en retour wordt verzorgd.

Enigszins vooruitlopend op het model voor de bedrijfscondities voor de afgiftezijde kan gesteld worden dat de eerste optie leidt tot een inzet van de pomp volgens de verhouding van gevraagd vermogen en beschikbaar vermogen. In formule leidt dit tot het volgende gemiddelde pompvermogen:

$$P_{in,pc2} = P_{el,pc2} * P_{out} / \min(P_n, \gamma * P_{sys,nom}) \quad (3.7)$$

Relevante bedrijfscondities

De relevante bedrijfscondities over een periode zijn dus:

- de gevraagde warmte gedurende de bedrijfstijd;
- de gemiddelde bedrijfstemperaturen en het debiet aan bron- en afgiftezijde;

3.4 Model bedrijfscondities afgiftezijde

Een ideaal model voor de bedrijfscondities aan de afgiftezijde is volledig dynamisch, waarbij de temperaturen en het schakelend gedrag van de installatie op basis van b.v. een minuut of minder worden berekend. Dergelijke modellen zijn beschikbaar maar zijn ongeschikt voor de snelle berekening van de COP op jaarbasis.

Een goede benadering zijn modellen waarbij op uurbasis de gemiddelde bedrijfstoestand wordt bepaald. Nu zijn er volop modellen om de uurlijkse warmtevraag

van een woning te bepalen, en met enige nabewerking kunnen de hierbij optredende watertemperaturen berekend worden. Het probleem is dat ook voor deze modellen voor iedere nieuwe woning, installatie of gebruikersgedrag de berekening van de warmtevraag opnieuw moet worden uitgevoerd.

De hier gevolgde methode is erop gericht om op basis van eenvoudig te bepalen ontwerpgegevens en gegevens over de bedrijfswijze (gebruikersgedrag) de bedrijfscondities zo nauwkeurig mogelijk te bepalen. De invoerparameters zijn [5, 6]:

Parameter	Betekenis	Eenheden invoer / intern
Q_{ann}	Jaarlijkse warmtevraag	MJ / J
--	Klimaatgegevens (buitentemperaturen of graaddagen per maand)	--
$P_{sys,nom}$	Ontwerpafgiftevermogen	kW / W
γ_{nom}	Gebruikt aandeel afgiftevermogen	% / -
$T_{flow,nom}$, $T_{ret,nom}$	Ontwerp aanvoer- en retourtemperaturen	°C
$T_{in,nom}$	Ontwerp binnentemperatuur	°C
--	Afgiftesystemen	Opties: – radiatoren – convectoren
--	Distributiesysteem	Opties: – direct doorstroomd – met cv-buffervat in parallel-opstelling – direct doorstroomd met cv-buffervat in serie *
$K_{v,vat}$	Verliesfactor cv-buffervat	W/K *
$P_{el,pc2}$	Vermogen distributiepomp cv	W *
--	Regeling toestel	Opties (als direct): – kamerthermostaat – stooklijn Opties (als buffervat parallel): – stooklijn op vat, kamerthermostaat op distributiepomp – stooklijn op vat, toerengeregelde distributiepomp *
$T_{a,max}$ $T_{a,min}$	Ontwerptemperaturen aanvoertemperatuur t.b.v. stooklijn	°C
$T_{bu,nom}$ $T_{bu,max}$	Ontwerptemperaturen buitentemperatuur t.b.v. stooklijn	°C
--	Toepassing nachtverlaging	Opties: ja of nee
L_2	Duur nachtverlaging	h
dT	Nachtverlaging	°C
--	Opstellingsruimte	Opties: – verwarmde zolder – verwarmde keuken – onverwarmd

* Niet geïmplementeerd in DOS-versie WPSim; wel geïmplementeerd in WINDOWS-versie.

De globale volgorde in de berekening is:

- verdelen van de jaarlijkse warmtevraag over de perioden naar rato van graaddagen;
- verdelen van de warmtevraag van een periode over een dag-, nacht- en aanwarmperiode bij toepassing van nachtverlaging; tevens bepalen van de duur van de aanwarmperiode;
- bepalen van de bedrijfstemperaturen en debieten per (deel)periode.

Een complicatie is dat hierbij de verliezen van een eventueel cv-buffervat dienen te worden bepaald en meegenomen.

Hieronder wordt de berekening stap voor stap gevolgd.

Verdelen jaarlijkse warmtevraag

- Voor de verdeling van de jaarlijkse warmtevraag wordt gebruik gemaakt van de graaddagenmethode. De graaddagen kunnen op drie manieren worden ingevoerd:
- graaddagen per gem. buitentemperatuur;
- graaddagen per maand;
- gem. buitentemperatuur per maand.

In het laatste geval dient tevens de referentietemperatuur te worden opgegeven, waarna alsnog de graaddagen berekend worden volgens de formule:

$$D_{gi} = D_i * (T_{in,ref} - T_{bu}) \quad (3.8)$$

Met:

D_{gi}	Graaddagen per periode i	°C
D_i	Aantal dagen per periode i	-
$T_{in,ref}$	Referentiebinnentemperatuur	°C
T_{bu}	Gem. buitentemperatuur in periode i	°C

Per periode i wordt nu de warmtevraag Q_i berekend volgens:

$$Q_i = Q_{ann} * D_{gi} / TDG \quad (3.9)$$

Met:

Q_i	Warmtevraag per periode i	MJ
Q_{ann}	Jaarlijkse warmtevraag	MJ
D_{gi}	Graaddagen per periode i	°C
TDG	Graaddagen per jaar	°C

De gemiddelde warmtevraag P_i wordt hiermee:

$$P_i = Q_i / (D_i * 24 * 3600) [W] \quad (3.10)$$

Buitentemperatuur

Indien uitgegaan wordt van graaddagen op maandbasis zijn de buitentemperaturen T_{bu} niet expliciet bekend. Bij toepassing van een stooklijn is de buitentemperatuur echter vereist. Deze worden als volgt afgeleid uit de graaddagen:

$$T_{bu} = T_{in,ref} - D_{gi} / D_i \quad (3.11)$$

In perioden waarin de temperatuur constant onder de referentietemperatuur ligt is dit een juiste benadering van de gemiddelde buitentemperatuur. In perioden met afwisselend koude en warme dagen (boven de referentietemperatuur) wordt gemiddeld een te lage buitentemperatuur berekend. Voor de dagen waarop daadwerkelijk verwarming vereist is ligt de berekende buitentemperatuur echter te hoog.

Temperatuur opstellingsruimte

Deze temperatuur is vereist indien een cv-buffervat wordt toegepast. Hiervoor wordt de volgende benadering toegepast:

- verwarmde zolder $T_{in,b} = 15 \text{ °C}$
- verwarmde keuken $T_{in,b} = 18 \text{ °C}$
- onverwarmde ruimte $T_{in,b} = 20 * (T_{bu,nom} - T_{bu}) / (T_{bu,nom} - 20) \text{ °C}$

Warmteverlies cv-buffervat in parallelstelling

Bij toepassing van een cv-buffervat in parallelstelling wordt een stooklijn toegepast, gestuurd door een temperatuurvoeler in het vat. De vatverliezen worden bepaald door de gewenste stooklijntemperatuur, dus door de momentane buitentemperatuur. Tevens worden de verliezen bepaald door de temperatuur van de opstellingsruimte. Er wordt van uitgegaan dat de warmtepomp en het buffervat in dezelfde ruimte staan. De verliezen worden opgeteld bij de hiervoor berekende warmtevraag. In formule:

$$T_a = T_{a,min} + (T_{a,max} - T_{a,min}) * (T_{bu} - T_{bu,max}) / (T_{bu,nom} - T_{bu,max}) \text{ [°C]} \quad (3.12)$$

waarbij: $T_{a,min} \leq T_a \leq T_{a,max}$

De vatverliezen worden hiermee:

$$P_{vat,v} = K_{v,vat} * (T_a - T_{in,b}) \text{ [W]} \quad (3.13)$$

Warmteverlies cv-buffervat in serie-opstelling

Bij toepassing van een cv-buffervat in serieopstelling is de retourtemperatuur bepalend voor de vatverliezen. De verliezen worden opgeteld bij de hiervoor berekende warmtevraag. In formule:

$$P_{vat,v} = K_{v,vat} * (T_r - T_{in,b}) [W] \quad (3.14)$$

Gemiddelde warmtevraag en benuttingsgraad

Bij toepassing van een cv-buffervat wordt het verlies hiervan opgeteld bij P_i .

$$P_{li} = P_i + P_{vat,v} [W] \quad (3.15)$$

De benuttingsgraad B_i van het systeem bedraagt nu:

$$B_i = P_{li} / P_{nom} [-] \quad (3.16)$$

Hierbij is P_{nom} het *minimum* van het momentane maximum warmtepompvermogen $P_{out,max}$ en het nominale radiator vermogen $P_{sys,nom}$, ofwel het maximaal effectief beschikbaar afgiftevermogen. Als b.v. het warmtepompvermogen kleiner is dan het radiatorvermogen dan is P_{nom} het warmtepompvermogen.

In de regel wordt gebruik gemaakt van een gereduceerd beschikbaar radiatorvermogen. Aangenomen wordt dat de bewoner de mogelijkheid heeft een deel van zijn radiatorvermogen normaal niet te gebruiken (b.v. afgesloten radiatoren in slaapkamers). Het beschikbaar radiatorvermogen bedraagt:

$$P_{sys} = P_{sys,nom} * \gamma_{nom} \quad (3.17)$$

In de volgende bijzondere situatie wordt van een hoger radiatorvermogen uitgegaan (deze bewerking is aangepast t.o.v. de DOS versie van WPSim):

Indien in zekere periode de benuttingsgraad B_i boven het gebruikt aandeel afgiftevermogen (γ_{nom}) ligt wordt de waarde van γ verhoogd zodat $\gamma = P_i / P_{sys,nom}$, met als begrenzing $\gamma \leq 1$. De achterliggende gedachte is dat bij een dergelijk hoge warmtevraag de bewoner zijn radiatoren meer gebruikt dan in minder koude perioden.

Hiervan wordt een melding gemaakt in de uitvoer.

Indien de benuttingsgraad B_i boven de 1 ligt kan in deze periode niet in de gehele warmtevraag worden voorzien. Dit wordt niet in andere perioden gecompenseerd en de totaal geleverde warmte kan in deze situaties lager uitvallen dan de gevraagde warmte. Ook hiervan wordt een melding gemaakt in de uitvoer.

Als voor toepassing van nachtverlaging is gekozen wordt deze niet toegepast in beide bovengenoemde situaties.

Nachtverlaging

Bij toepassing van nachtverlaging wordt uitgegaan van de verdeling van alle gehele dagen in een periode in drie dagdelen:

1	dagperiode	gewone warmtelevering
2	nachtperiode	geen warmtelevering, ketel uit
3	aanwarmperiode	maximale warmtelevering door systeem, begrensd door het gebruikte aandeel afgiftevermogen γ .

Per dagdeel j dienen de volgende variabelen bekend te zijn:

L_j	Lengte periode j ($j=1,2,3$)	h
P_j	Warmtevraag	W
B_j	Benuttingsgraad	-

Per periode zijn de volgende variabelen bekend:

- L_2 (invoergegeven)
- $P_2 = 0$, $B_2 = 0$ (stooklijn 's nachts uitgeschakeld)
- $P_3 = \min(\gamma * P_{\text{sys,nom}}, P_{\text{nom}})$, $B_3 = P_3 / P_{\text{nom}}$

Omdat de stooklijn 's nachts is uitgeschakeld treden dan geen vatverliezen op. P_{li} en B_i worden herberekend volgens:

$$P_{li} = P_i + P_{\text{vat,v}} * (24 - L_2) / 24 [W] \quad (3.18)$$

$$B_i = P_{li} / P_{\text{nom}} [-] \quad (3.19)$$

De volgende variabelen dienen nu te worden bepaald:

- L_1
- L_3
- P_1 , B_1

Nu gelden de volgende formules:

$$L_1 + L_2 + L_3 = 24 [h] \quad (3.20)$$

$$L_1 * P_1 + L_2 * P_2 + L_3 * P_3 = 24 * P_i [Wh] \quad (3.21)$$

$$B_1 = P_1 / P_{\text{nom}} \quad (3.22)$$

Uit de literatuur is de volgende benadering van de duur van de aanwarmperiode bekend:

$$L_3 = \frac{\{(24 - L_2) * A * c1 + L_2 * c2 * P_3 * (2 * B_3 - 3 * B_i)\}}{\{A * c1 + L_2 * P_3 * (2 * B_3 - 3 * B_i)\}} \quad (3.23)$$

De constanten A, c1 en c2 hebben de volgende waarden:

A	700		
Nachtverlaging dT [K]	2	3	4
c1	5.2699789	11.315958	20.055183
c2	-0.028717	-0.105994	-0.082691

Met L_3 kan nu L_1 worden gevonden. Vervolgens kunnen P_1 en B_1 worden bepaald. Hiermee is de duur en warmtevraag voor ieder dagdeel bekend.

Watertemperaturen en debieten

Voor de berekening van de watertemperaturen en debieten per (deel)periode is nu de volgende invoer beschikbaar:

Warmtevraag [W]	P_{out}	= P_{li} of P_j
Benuttingsgraad systeem [-]	B_{sys}	= B_i of B_j
Duur (deel)periode	LD	= $D_i * 24$ of $D_i * L_j$

Bij de berekening van de watertemperaturen per periode wordt van de volgende radiatorvergelijking uitgegaan:

$$P_{sys} = k * (T_{rad} - T_{in})^n [W] \quad (3.24)$$

$$T_{rad} = (T_a + T_r) / 2 [^{\circ}C] \quad (3.25)$$

$$P_{sys} = \rho_w * c_{pw} * q_v * (T_a - T_r) [W] \quad (3.26)$$

Met:

P_{sys}	radiatorvermogen	W
k	radiatorconstante	
n	macht in radiator v.g.l. radiatoren: n=1.25 convectoren: n=1.35	-
T_{rad}	gemiddelde radiatortemperatuur	$^{\circ}C$
T_{in}	binnentemperatuur	$^{\circ}C$
T_a	aanvoertemperatuur	$^{\circ}C$
T_r	retourtemperatuur	$^{\circ}C$
ρ_w	soortelijke massa water	kg/m^3
c_{pw}	soortelijke warmte water	$J/kg.K$
q_v	volumedebiet water	m^3/s

Voor de gegeven nominale condities kunnen k_{nom} en $q_{v,nom}$ worden bepaald:

$$k_{nom} = P_{sys,nom} / (T_{rad,nom} - T_{in,nom})^n \quad (3.27)$$

$$q_{v,nom} = P_{sys,nom} / \{\rho_w * c_{pw} * (T_{a,nom} - T_{r,nom})\} [m^3/s] \quad (3.28)$$

Het gebruikte aandeel afgiftevermogen γ reduceert de radiatorconstante k tot de waarde:

$$k = \gamma * k_{nom} \quad (3.29)$$

Bij toepassing van een kamerthermostaat stelt zich automatisch een watertemperatuur in waarbij de radiatoren het gevraagde vermogen kunnen leveren.

Voor een gevraagd vermogen P_{out} en nominaal debiet $q_{v,nom}$ kan nu worden afgeleid:

$$T_a = T_{in} + (P_{out} / k)^{1/n} + P_{out} / (2 * q_{v,nom} * \rho_w * c_{pw}) \quad (3.30)$$

$$T_r = T_a - P_{out} / (\rho_w * c_{pw} * q_v) \quad (3.31)$$

Voor een gevraagd vermogen P_{out} en variabel debiet q_v volgt:

$$q_v = q_{v,nom} * P_{out} / P_{sys,nom} \quad (3.32)$$

$$T_a - T_r = T_{a,nom} - T_{r,nom} \quad (3.33)$$

$$T_a = T_{in} + (P_{out} / k)^{1/n} + (T_{a,nom} - T_{r,nom}) / 2 \quad (3.34)$$

$$T_r = T_a - (T_{a,nom} - T_{r,nom}) \quad (3.35)$$

Voor beide vormen van debietregeling wordt gecontroleerd of de aanvoertemperatuur T_a niet boven de nominale waarde komt. Indien dat het geval is wordt eerst de waarde van γ verhoogd en berekend of het systeem dan aan de vraag kan voldoen. Indien dat het geval is worden opnieuw de bedrijfstemperaturen berekend. Indien het systeem niet aan de warmtevraag kan voldoen wordt de afgifte voor de ontwerpsituatie berekend. In de rest van de warmtevraag kan niet worden voorzien.

Bij toepassing van een stooklijn wordt de aanvoertemperatuur bepaald door de buitentemperatuur:

$$T_a = T_{a,min} + (T_{a,max} - T_{a,min}) * (T_{bu} - T_{bu,max}) / (T_{bu,nom} - T_{bu,max}) [^{\circ}C] \quad (3.36)$$

waarbij: $T_{a,min} \leq T_a \leq T_{a,max}$

Om te beoordelen of deze temperatuur voldoende hoog is om de gevraagde warmte te leveren wordt T_a vergeleken met de T_a berekend volgens formule 3.30. Indien de gevraagde T_a boven de stooklijnwaarde ligt wordt eerst de γ verhoogd tot 1. Als dit niet afdoende is wordt alsnog T_a verhoogd tot de gevraagde waarde.

In het oorspronkelijke DOS programma werd standaard uitgegaan van een variabele debietregeling over de warmtepomp. In de praktijk zal in veel gevallen een stooklijnregeling gecombineerd worden met een constant, nominaal debiet over de warmtepomp, mits ingeschakeld.

Bij toepassing van een constant debiet volgt voor de retourtemperatuur:

$$T_r = T_a - P_{out} / (\rho_w * c_{pw} * q_{v,nom}) \quad (3.37)$$

Bij toepassing van een variabel debiet volgt voor de retourtemperatuur:

$$T_r = \{T_{in} + (P_{out} / k)^{1/n}\} * 2 - T_a \quad (3.38)$$

Als $T_r < T_{in}$ volgt $T_r = T_{in}$

Waarna het debiet wordt berekend volgens:

$$q_v = P_{out} / (\rho_w * c_{pw} * (T_a - T_r)) \quad (3.39)$$

3.5 De warmtebron

Dit model beperkt zich tot bronnen die in de woningbouw voor ruimteverwarming het meest (zullen) worden toegepast, namelijk grondwater, buitenlucht en bodem (verticale bodemwarmtewisselaar, zonder directe expansie).

De volgende warmtebronnen zijn mogelijk:

- restwarmte;
- oppervlaktewater;
- grondwater;
- bodem;
- buitenlucht;
- energiedak.

Als brontemperaturen wordt het volgende gehanteerd:

- grondwater: 10°C;
- buitenlucht: conform de buitentemperatuur van het referentiejaar;
- verticale bodemwisselaar: een gemiddelde jaartemperatuur van 5°C en de volgende verdeling:

maand	brontemp.(°C)
januari	1
februari	0
maart	1
april	3
mei	5
juni	7
juli	7
augustus	10
september	9
oktober	7
november	5
december	3

Uit [8] blijkt dat de temperatuur van het grondwater relatief constant is: 10 - 12°C. De temperatuur van de buitenlucht varieert uiteraard gedurende het jaar, maar is bij de keuze van een (referentie)jaar bekend of kan worden afgeleid uit de graaddagen. Bij toepassing van een verticale bodemwarmtewisselaar spelen naast het klimaat nog andere zaken een rol, zoals leggingdiepte, dimensionering en configuratie van de warmtewisselaar, de warmteonttrekking aan de bodem, wel of geen stroming van grondwater, bodemgesteldheid, etc. Het verloop van de brontemperatuur bij een verticale bodemwisselaar gedurende een (referentie)jaar is niet eenduidig. Ook is geen "standaardverloop" voorhanden. In de meest optimale situatie zal de brontemperatuur gelijk zijn aan de bodemtemperatuur. Op grote diepte (>8m) is dat 10 - 12°C, hetzelfde als voor grondwater. Voor geringere diepten heeft het ongestoorde temperatuurverloop van de bodem een sinusvorm, met een dal in februari en een top in augustus.

Uit praktijkmetingen [8] is gebleken dat de temperatuur van de brine aan de verdamperingang een zelfde verloop heeft, waarbij de temperatuur varieert tussen 2°C en 10°C. Andere metingen geven aan dat de brinetemperatuur tot -3°C kan dalen. Op basis van bovenstaande en van gesprekken met deskundigen is besloten een gemiddelde brontemperatuur van 5°C per jaar te hanteren met een sinusvormig verloop over het jaar.

Met aanvullende berekeningen kan de gevoeligheid van de brontemperatuur op de COP worden bepaald en is wellicht een aanpassing mogelijk of gewenst.

3.6 Jaarprestaties

Van de volgende energiestromen worden de jaartotalen bepaald:

Q_{ann}	Netto warmtevraag	MJ
$Q_{val,v}$	Warmteverliezen cv-buffervat	MJ
$Q_{ann,tot}$	Bruto warmtevraag	MJ
Q_{outl}	Nuttige warmteafgifte WP	MJ
$Q_{outl,g}$	Nuttige warmteafgifte WP + cv-pomp	MJ
Q_{in}	Aandrijfenergie WP	MJ
$Q_{in,pv}$	Elektrisch verbruik bronpomp/ventilator	MJ
$Q_{in,pc}$	Elektrisch verbruik cvpomp	MJ
$Q_{in,tot}$	Totaal elektrisch verbruik	MJ

Hiermee worden de volgende COP's op jaarbasis, aangeduid als SPF, bepaald.

SPF_{wp}	SPF van de separate warmtepomp
$SPF_{wp+bron}$	SPFPwp inclusief hulpenergiegebruik t.b.v. de warmtebron
$SPF_{systeem}$	SPFwp+bron incl. hulpenergiegebruik bufferpomp en warmteverlies buffer

In formule:

$$SPF_{wp} = Q_{outl} / Q_{in} [-] \quad (3.40)$$

$$SPF_{wp+bron} = Q_{outl} / (Q_{in} + Q_{in,pv}) [-] \quad (3.41)$$

$$SPF_{systeem} = Q_{ann} / Q_{in,tot} [-] \quad (3.42)$$

4. Implementatie model

4.1 Algemene structuur

Het hiervoor beschreven model is geïmplementeerd in WPSim. De oorspronkelijke DOS-versie is in grote lijnen gelijk aan BoilSim [4, 5, 6]. Van BoilSim is nu een versie ontwikkeld onder Windows [9]. De Windows versie van WPSim is uit deze nieuwe versie van BoilSim ontwikkeld.

In de DOS versie zijn de volgende software gereedschappen gebruikt:

- bestanden Dbase 3
- rekenkern Fortran
- schil Clipper

Voor de Windows-versie wordt de volgende software gebruikt:

- bestanden MS Access
- rekenkern & schil MS Visual Basic

4.2 Interface structuur

Het interface bestaat uit twee hoofdmenus (voor de Windows versie):

- project;
- gegevens.

In de opties onder het oorspronkelijke hoofdmenu 'systeem' is nu op andere wijze voorzien.

Het projectmenu bevat de volgende opties:

- Project beheer.
Om een project georiënteerde werkwijze mogelijk te maken kunnen één of meer projecten worden geopend. Alle gegevens worden in één bestandsstructuur opgeslagen maar de projectgerelateerde gegevens zijn uitsluitend binnen een project beschikbaar.
Projecten kunnen in hun geheel worden gekopieerd en verwijderd. Voor het gebruik van de andere opties van het projectmenu dient eerst een project te worden geselecteerd. Alle andere opties van het projectmenu hebben alleen betrekking op het geselecteerde project.
- Installatie ontwerp en bedrijf.
Onder deze optie kunnen meerdere types installatie ontwerp en bedrijf worden gedefinieerd en opgeslagen onder hun eigen naam.
- Specificatie berekeningen en presentatie resultaten.
Onder deze optie kunnen één of meer berekeningen worden gespecificeerd door de keuze van een warmtepomp, installatieontwerp en bedrijf en warmte-

bron. Vervolgens kunnen de gewenste berekeningen worden uitgevoerd. Ook de resultaten van de berekeningen worden hier gepresenteerd. Het betreft zowel de globale resultaten als de resultaten van de berekeningen per (deel)periode, die in een afzonderlijk bestand worden opgeslagen en getoond kunnen worden.

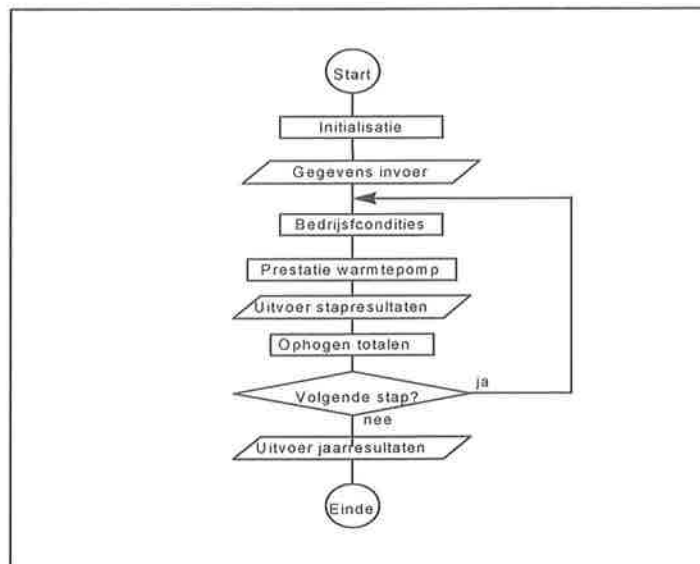
Het gegevensmenu bevat de volgende opties:

- Fabrikanten.
Terwille van het eenduidig gebruik van fabrikantnamen kunnen hier deze namen in een bestand worden ingevoerd.
- Warmtepompgegevens.
Onder deze optie kunnen de warmtepompgegevens in een tabel worden opgeslagen. In een gekoppelde tabel kunnen de testresultaten worden opgeslagen. Na de markering van drie testresultaten kunnen de gegevens van de vereenvoudigde polynoom (1^e orde voor bron- en afgiftetemperatuur) bepaald worden en in het bestand worden opgeslagen.
- Klimaat gegevens.
Onder deze optie kunnen de klimaatgegevens op uiteenlopende wijzen worden opgeslagen.
- Landen.
Terwille van het eenduidig gebruik van landennamen kunnen hier deze namen in een bestand worden ingevoerd.
- Warmtebron (deze optie was oorspronkelijk opgenomen als projectoptie).
Onder deze optie kunnen één of meer typen warmtebron worden gedefinieerd en opgeslagen onder hun eigen naam.

Al deze opties bevatten standaard functies voor o.a. het kopiëren, verwijderen, printen en aanpassen van de ingevoerde gegevens.

4.3 Hoofdstructuur berekeningen

De hoofdstructuur van de berekeningen is hieronder weergegeven.



Figuur 3. Hoofdstructuur berekeningen.

Hieronder wordt de structuur van de berekening van de bedrijfscondities en de prestaties van de warmtepomp verder uitgewerkt.

4.4 Structuur berekening bedrijfscondities

Start berekening bedrijfscondities

Als graaddagen methode dan:

Inlezen en zonodig berekenen graaddagen gegevens. Berekenen totaal aantal graaddagen TDG.

Startpunt berekening voor nieuwe periode.

– Als graaddagen methode dan:

Inlezen gegevens graaddagen per periode: D_{gi} en D_i . Zonodig berekenen buitentemperatuur T_{bu} .

Als alle gegevens ingelezen zijn wordt de berekening beëindigd.

Bepaal ingaande brontemperatuur $T_{evap,in}$.

Bepaal maximum warmtepompvermogen $P_{out,max1}$ als functie van brontemperatuur.

Bepaal $P_{nom} = \min(P_{sys,nom}, P_{out,max1})$.

Bereken gemiddelde warmtevraag Q_i , P_i .

Bereken temperatuur opstellingsruimte $T_{in,b}$.

Bereken vatverliezen $P_{vat,v}$.

Bereken warmtevraag P_{li} en benuttingsgraad B_i .

Bepaal $\gamma = \gamma_{nom}$. Eventueel ophogen γ als $B_i > \gamma$.

Bepaal of nachtverlaging wordt toegepast ($J_{max} = 3$) of niet ($J_{max} = 1$).

Als nachtverlaging wordt toegepast bepaal dan L_j , P_j , B_j .

Voer uit voor deze periode (zonder nachtverlaging) of voor iedere deelperiode (met nachtverlaging):

- Als graaddagen methode dan:
Bepaal P_{out} , B_{sys} , L_d .
- Als regeling d.m.v. kamerthermostaat dan:
- Als constant debiet dan:
Bereken T_a , T_r en q_v volgens formules 3.29/30.
- Als variabel debiet dan:
Bereken T_a , T_r en q_v volgens formules 3.31/33/34.
Controle en eventuele correctie T_a , T_r en γ .
- Als regeling d.m.v. stooklijn dan:
- Als constant debiet dan:
Bereken T_a , T_r en q_v volgens formules 3.35/36.
- Als variabel debiet dan:
Bereken T_a , T_r en q_v volgens formules 3.35/37/38.
Controle en eventuele correctie.
- Bereken temperatuur opstellingsruimte WP: $T_{in,b}$.
Bepaal ingaande brontemperatuur $T_{evap,in}$.

Als invoer bedrijfscondities uit bestand
Inlezen bedrijfscondities uit bestand.

Bereken prestaties warmtepomp.
Nabewerking resultaten.
Uitvoer stapresultaten naar bestand.
Ophogen totalen

Einde berekening per (deel)periode.
Volgende periode.

4.5 Structuur berekening prestaties warmtepomp

Start berekening prestaties warmtepomp

Startwaarden voor τ_c , τ_{aan} , τ_{uit} , $T_{evap,uit}$, $T_{evap,uit2}$.

Start iteratielus.

- Ophogen teller iteratielus
- Bereken COP_{wp} , $P_{in,max}$ en $P_{uit,max}$ voor gegeven temperaturen.
- Bereken aantal en gem. vermogen cv-pomp.
- Bereken aantal en gem. vermogen bron-pomp of -ventilator.
- Bereken benuttingsgraad I van WP.
- Bereken aandrijfvermogen.

Bereken COP's

Bereken verdampervermogen.

Bereken uitgaande verdampertemperatuur

Bereken aantal schakelingen WP , τ_c , τ_{aan} en τ_{uit}

Als convergentie onvoldoende herhaal berekening -> start iteratielus

Criterium: verschil tussen vorige en nieuwe COP < 0.0001 en verschil P_{outI} met P_{out} > 5 W; tot maximaal 50 iteratiestappen.

5. Conclusies en aanbevelingen

Conclusies:

- Met WPSim kunnen de jaarprestaties van warmtepompen zonder bijstook, met of zonder buffervat, worden berekend. Hierbij wordt tevens het hulpenergieverbruik berekend.
- Hiervoor kunnen modellen voor warmtepompen met uiteenlopende nauwkeurigheid worden gebruikt, op basis van gemeten prestaties.
- Hierbij wordt een eenvoudig graaddagenmodel gebruikt voor het verdelen van de warmtevraag en een radiatormodel plus optioneel een stooklijn voor het bepalen van de gemiddelde afgiftetemperaturen van de warmtepomp. Als alternatief kan een gedetailleerd bedrijfscondities-vraagpatroon worden aangeboden via een excel-file.
- Hierbij is een aantal opties beschikbaar voor de warmtebron.

Aanbevelingen:

- Uitbreiden WPSim met model voor gecombineerde tapwatervoorziening.
- Uitbreiden WPSim met optie voor bijstook (elektrisch/gas).

6. Literatuur

- [1] Handreiking gebruik - STEP modelversie
Damen Consultants, Arnhem, 4 maart 1997
- [2] Structuurmodel stedelijk energieconcept
Damen Consultants
- [3] Gelijkwaardigheidsverklaring opwekkingsrendement warmtepompen t.b.v. de
Energie prestatie norm
J. van Wolferen
TNO-MEP, Apeldoorn, februari 1999
- [4] Jaargebruiksrendement van ketels
Hans van Wolferen en Martin Koot
TVVL-magazine 8/96
- [5] SAVE project Annual efficiency calculation method for domestic boilers
Technical report work package 8: Translation of boiler environment into boiler
operating conditions
Martin Koot, Gastec, 1995
- [6] SAVE project Annual efficiency calculation method for domestic boilers
Technical report work package 9: Development of computer program BoilSim
- final version
Hans van Wolferen, Ian Woodrow, TNO, 1996
- [7] NEN 5128, Energieprestatie van woningen en woongebouwen -
bepalingsmethode
NNI, Delft, 1994
- [8] Investigation into a complete earth to water heat pump system in a single
family dwelling focusing on the application of a vertical subsoil heat exchanger
(TNO-MT-85-04531)
Ir. J.W.J. Bouma, Ing. A.D. Koppenol, Ing. J.F. van der Horst
TNO, Apeldoorn, 1985
- [9] SAVE Project Estimation of energy savings by replacement of fuel oil and gas
boilers - Contract no DG XVII/4.1031/Z/72/96-072
WP5: Model implementation
Hans van Wolferen, Henk Bekkering
TNO-MEP, Apeldoorn, June 1999

7. Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever:

Novem
t.a.v. Ing. C.M. van Geet
Postbus 8242
3503 RE Utrecht

Namen en functies van de projectmedewerkers:

J. van Wolferen
H. Bekkering

Namen van instellingen waaraan een deel van het onderzoek is uitbesteed:

n.v.t.

Datum waarop, of tijdsbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad:

december 1998 - 2000

Ondertekening:

Goedgekeurd door:

J. van Wolferen
projectleider

Ir. S.M. van der Sluis
afdelingshoofd

Bijlage 1 Voorbeelden model carnotfactor

Hieronder worden enige voorbeelden gegeven van de resultaten die bereikt worden bij toepassing van het warmtepompmodel met carnotfactor.

Voorbeeld A.

Variabele	Beproeving		
	W10/35	W10/50	Gemiddelde
P_{in} [kW]	1.1	1.4	
COP [-]	6.4	3.9	
T_a [K]	$273 + 35 = 308$	$273 + 50 = 323$	
$T_{br,in}$ [K]	$273 + 10 = 283$	$273 + 10 = 283$	
ΔT_{br} [K]	3	3	
$T_{br,uit}$ [K]	280	280	
f_c [-]	0.58	0.52	0.55

Voorbeeld B.

Variabele	Beproeving		
	W10/35	W10/50	Gemiddelde
P_{in} [kW]	1.6	1.8	
COP [-]	6.2	3.8	
T_a [K]	$273 + 35 = 308$	$273 + 50 = 323$	
$T_{br,in}$ [K]	$273 + 10 = 283$	$273 + 10 = 283$	
ΔT_{br} [K]	3	3	
$T_{br,uit}$ [K]	280	280	
f_c [-]	0.56	0.51	0.53

Voorbeeld C.

Variabele	Beproeving		
	W10/35	W10/50	Gemiddelde
P_{in} [kW]	2.1	2.7	
COP [-]	5.3	3.9	
T_a [K]	$273 + 35 = 308$	$273 + 50 = 323$	
$T_{br,in}$ [K]	$273 + 10 = 283$	$273 + 10 = 283$	
ΔT_{br} [K]	3	3	
$T_{br,uit}$ [K]	280	280	
f_c [-]	0.48	0.52	0.50

Bijlage 2 Overzicht parameters en variabelen model cv-functie warmtepomp

Betekenis	Eenheden in-voer/ uitvoer & intern of opties	Parameter (rapport)	Parameter (code)	Rand-voorwaarden / waarde
Algemene parameters				
Soortelijke massa water	kg/m ³	ρ_w	Row	1000
Soortelijke warmte water	J/kg.K	c_{pw}	Cpw	4190
Soortelijke massa lucht	kg/m ³	ρ_l	Rol	1.2
Soortelijke warmte lucht	J/kg.K	c_{pl}	Cpl	1000
Warmtepomp gegevens				
Fabrikant	Naam uit bestand "fabrikanten"	-	Hp_Manufact	
Naam	Tekst	-	Hp_Name	
Functies (alleen verwarming geïmplementeerd)	Opties: verwarming warmtapwaterbereiding verwarming en warmtapwaterbereiding	-	Hp_Functions 1 2 3	
Aandrijving (nog niet in gebruik)	Opties: elektrisch gas	-	Hp_Fuel 1 2	
Warmtebron	Opties: lucht water bodem	-	HeatSource 1 2 3	
Regeling (alleen aan/uit geïmplementeerd)	Opties: aan/uit modulerend		PowerControl 1 2	
Nominaal vermogen aandrijving	kW & W		P_In_Nom	>0
Nominaal vermogen	kW & W		P_Out_Nom	>0
Nominale COP	-		Cop_Nom	>0
Nominale verdampertemperatuur	°C		T_Evap_Nom	-
Nominale condensortemperatuur	°C		T_Cond_Nom	>0, < 100
Minimaal aandrijfvermogen	kW & W		P_In_Min	>0
Nominaal cv-debiet	l/h & m ³ /s		Qv_C_nom	>0
Nominaal brondebiet	l/h & m ³ /s		Qv_E_Nom	>0
Maximale condensortemperatuur	°C		T_Cond_Max	>0
Minimale condensortemperatuur	°C		T_Cond_Min	>0
Maximale verdampertemperatuur	°C		T_Evap_Max	>0
Minimale verdampertem-	°C		T_Evap_Min	-

Betekenis	Eenheden in-voer/ uitvoer & intern of opties	Parameter (rapport)	Parameter (code)	Rand-voorwaarden / waarde
Algemene parameters				
peratuur				
Type polynomen	Opties: COP/Pcond (Tin) COP/Pa(Tin) COP/Pcond (Tuit) COP/Pa(Tuit) Carnot factor	-	Type_Poly: 1 2 3 4 5	
Coefficient polynoom COP C0 ... C5	*	c0...c5	C0 .. C5	-
Coëfficiënt polynoom vermogen P0 ... P5	*	p0...p5	P0 ... P5	-
Carnot factor	-	C0	C0	-
Aandrijfvermogen	KW	P0	P0	> 0
Vermogen pomp/ ventilator verdamperzijde	W	P _{el,pv}	Pe1_Pe1	>=0
Nadraaitijd pomp/ ventilator verdamperzijde	sec	τ _{pv}	T_Pe1	>=0
Vermogen CV-pomp	W	P _{el,pc1}	Pe1_Pc1	>=0
Nadraaitijd CV-pomp	sec	τ _{pc1}	T_Pc1	>=0
Parameterstatus (geen vrije invoer)	Opties: gegevens compleet; polynomen volgens invoer gegevens compleet; polynomen berekend uit meetgegevens gegevens incompleet		Hp_Param_Status 1 2 3	
Warmtepomp prestatie gegevens				
Ingaande temp. bron	°C		T_Evap_M-Input (i)	-
Uitgaande temp. bron	°C		T_Evap_M-Output (i)	-
Retourtemperatuur	°C		T_Cond_M-Input (i)	>0
Aanvoertemperatuur	°C		T_Cond_M-Output (i)	>0
Aandrijfvermogen	W		Pa_M(i)	>0
Condensorvermogen	W		Pc_M(i)	>0
COP (wordt berekend)	-		Cop_M(i)	
Carnot factor	-		Carnot factor	-
Bronvermogen (wordt berekend)	W		Pe_M(i)	
Gebruik in berekening polynoomconstanten	Opties: ja/nee		Poly_In(i): 1 / 2	
Fabrikant gegevens				
Fabrikanten	Tekst			
Landen gegevens				
Landen	Tekst			
Referentietemperatuur (t.b.v. graaddagenberekening)	°C	T _{in,ref}	T_In_Ref	>0
Klimaatgegevens				

Betekenis	Eenheden in- voer/ uitvoer & intern of opties	Parameter (rapport)	Parameter (code)	Rand- voor- waarden / waarde
Algemene parameters				
Land				
Stad/gebied				
Type gegevens	Opties: Graaddagen per gem buitentemp Graaddagen per maand Gem buitentemp per maand		Climate_Type 1 2 3	
Temperatuur afhankelijke klimaatgegevens				
Buitentemperatuur	°C	T_{bu}	T_{Out}	
Aantal dagen	-	D_i	D_I	≥ 0
Graaddagen	°C	D_{gi}	Dg_I	≥ 0
Tijdafhankelijke klimaatgegevens				
Januari	°C		$X_I(1)$	
...	°C		$X_I(i)$	
December	°C		$X_I(12)$	
Hoogte	m		Altitude_Nom	
Gegevens warmtebronnen				
Naam bron	Tekst		Name_Source	
Soort bron	Opties: buitenlucht bronwater bodemwarmte		Type_Source 1 2 3	
Temperatuur bronwater	°C		T_{S0}	
Temperatuur bodemwarmte	°C		$T_{S(1:12)}$	
Parameters installatieontwerp en bedrijf				
Type bedrijfscondities	Opties: graaddagen invoer uit databa- se		Method_Oc 1 2	
Jaarlijkse warmtevraag	MJ & J	Q_{ann}	Q_{Ann}	
Klimaatgegevens land	Opties: Landen waarvoor klimaatgegevens beschikbaar zijn	--	Country	
Stad of gebied	Opties: Stad/gebied voor geselecteerde land.	--	City	
Ontwerpafgiftevermogen	kW & W	$P_{sys,nom}$	P_{Sys_Nom}	> 0
Effectief afgiftevermogen	% & -	γ_{nom}	Γ_{Nom}	$0 \leq x \leq 1$ 00
Afgiftesysteem	Opties: radiatoren convectoren	--	xxx 1 2	
Ontwerptemperaturen	°C, °C	$T_{flow,nom}, T_{ret,nom}$	$T_{Flow_Nom},$ T_{Ret_Nom}	$20 < x < 99;$ $x > y$

Betekenis	Eenheden in-voer/ uitvoer & intern of opties	Parameter (rapport)	Parameter (code)	Rand-voorwaarden / waarde
Algemene parameters				
Ontwerp binnentemperatuur	°C	T _{in,nom}	T_In_Nom	10<x<30
Distributiesysteem	Opties: direct door- stroomd cv-buffervat in parallel-opstelling cv-buffervat in serieopstelling		Distri 1 2 3	
Verliesfactor cv-buffervat	W/K	K _{v,vat}	Kv_Vessel	>=0
Vermogen distributiepomp cv	W	P _{el,pc2}	Pch_P2	>=0
Regeling toestel	Opties (direct): kamerthermo- staat stooklijn	--	Heat_Control 1 2	
	Opties (cv-buffer parallel): stooklijn op vat, kamerthermo- staat op distribu- tiepomp stooklijn op vat, toerengeregelde distributiepomp		Heat_Control: 3 4	
Ontwerptemperaturen aan-voertemperatuur t.b.v. stook-lijn	°C	T _{a,max} T _{a,min}	T_Flow_Max T_Flow_Min	>0 >0
Ontwerptemperaturen bui-tentemperatuur t.b.v. stook-lijn	°C	T _{bu,nom} T _{bu,max}	T_Out_Nom T_Out_Max	>-99 >0
Debietregeling	Opties: constant variabel		Flow_Control 0 1	
Opstellingsruimte	Opties: verwarmde zolder verwarmde keu- ken onverwarmd		T_Inb_I 0 1 2	
Nachtverlaging	Opties: ja nee	--	Night_SetBack 1 0	
Duur nachtverlaging	h	L ₂	L2	7. 8 of 9
Temperatuurverlaging	°C	dT	Delta_T	2, 3 of 4
Afgeleide parameters installatieontwerp en bedrijf				
Macht in radiator v.g.l.	-	n	N_Rad radiatoren: n=1,25 convectoren: n=1,35	
Warmte accumulerend oppervlak		A	A_Abs	

Betekenis	Eenheden in-voer/ uitvoer & intern of opties	Parameter (rapport)	Parameter (code)	Rand-voorwaarden / waarde
Algemene parameters				
Constante c1 in berekening aanwarmtijd		c1	Ch1	
Constante c2 in berekening aanwarmtijd		c2	Ch2	
Radiatorconstante		k _{nom}	K _{nom}	
Nominaal debiet	m ³ /s	q _{v, nom}	Qv_Nom	
M_Nom			M_Nom	
Berekening instructies en resultaten				
Toestel	Opties: alle warmtepompen			
Warmtebron	Opties: alle warmtebronnen			
Installatieontwerp en bedrijf	Opties: alle IOB in dit project			
Netto warmtevraag	MJ	Q _{ann}	Q_Ann	
Warmteverlies cv-buffervat	MJ	Q _{vat, v}	Q_Vessel	
Bruto warmtevraag	MJ	Q _{ann, tot}	Q_Out_Ann	
Nuttige warmte wp	MJ	Q _{out1}	Q_Out1_Ann	
Nuttige warmte WP + cv-pomp	MJ	Q _{out1, g}	Q_Out1_G_Ann	
Aandrijfenergie WP	MJ	Q _{in}	Q_In_Ann	
Elektrisch verbruik bron-pomp/ventilator	kWh	Q _{in, pv}	Q_In_Pe	
Elektrisch verbruik cv-pomp(en)	kWh	Q _{in, pc}	Q_In_Pc	
Totaal elektrisch verbruik	kWh	Q _{in, tot}	Q_In_Tot	
COP warmtepomp	-	SPF _{wp}	Spf_Hp	
COP wp + bronpomp	-	SPF _{wp+bron}	Spf_Hp_E	
COP systeem	-	SPF _{systeem}	Spf_Sys	
Resultaten per bedrijfsconditie				
Stap	-		Step	
Periodenr.	-	J	i (=1, 2 of 3)	
Duur (deel)periode	h		Ld	
Retourtemperatuur	°C	T _r	T_Ret	
Aanvoerttemperatuur	°C	T _a	T_Flow	
Cv-debiet	l/h / m ³ /s	q _v	Qv	
Ingaande temperatuur bron	°C	T _{br, in}	T_Evap_In	
Uitgaande temperatuur bron	°C	T _{br, uit}	T_Evap_Out	
Bron-debiet	l/h / m ³ /s	q _v	Qv_Evap	
Temperatuur opstellings-ruimte	°C	T _{in, b}	T_Inb	
Netto warmtevraag	W		P_Out0	
Warmteverlies cv-buffervat	W	P _{vat, v}	P_Vessel	
Bruto warmtevraag	W		P_Out	
Nuttige warmte wp	W		P_Out1	
Nuttige warmte wp + cv-pomp	W		P_Out1_G	
Aandrijfenergie WP	W		P_In	

Betekenis	Eenheden in-voer/ uitvoer & intern of opties	Parameter (rapport)	Parameter (code)	Rand-voorwaarden / waarde
Algemene parameters				
Elektrisch verbruik bron-pomp/ventilator	W	$P_{in,pv}$	P_{In_Pe}	
Elektrisch verbruik cv-pomp(en)	W	$P_{in,pc}$	P_{In_Pc}	
COP warmtepomp	-	COP_{wp}	Cop_Hp	
COP wp + bronpomp	-	$COP_{wp+bron}$	Cop_Hp_E	
COP systeem	-	$COP_{systeem}$	Cop_Sys	
Benuttingsgraad	% & -		I_Value	
Totale aantijd	h		T_On_Tot	
Totale uittijd	h		T_Off_Tot	
Variabelen				
Aantal dagen per maand	-		$D_M(1:12)$	
Invoer uit tabel klimaatgegevens per maand	*		$X_I(1:12)$	
Buitentemperatuur per maand	°C	$T_{bu,i}$	$T_Out_I(1:12)$	
Totaal aantal dagen	°C	TD	Td	
Totaal aantal graaddagen	°C	TDG	Tdg	
Max. graaddagen/periode	°C		Dg_Max	
Nominale hoogte	m		Altitude_Nom	
Maandteller	-		JM	
Buitentemperatuur	°C	T_{bu}	T_Out	
Aantal dagen	-	D_i	D_I	
Graaddagen	°C	D_{gi}	Dg_I	
Maximaal afgiftevermogen WP	W		P_Out_Max	
Maximaal aandrijfvermogen	W		P_In_Max	
Hulpvar. Temp.	°C		T_H	
Nominaal beschikbaar vermogen	W	P_{nom}	P_N	
Warmtevraag per periode	MJ	Q_i	Q_I	
Vermogen per periode	W	P_i	P_I	
Benuttingsgraad systeem per periode	-	B_i	B_I	
Effectief afgiftevermogen	-	γ	Gamma	
Aantal deelperioden per periode	-		$J_Max (=1 \text{ of } 3)$	
Lengte deelperiode	h	L_i	$L_I(1:3)$	
Vermogen per deelperiode	W	P_i	$P_Ic(1:3)$	
Benuttingsgraad per deelperiode	-	B_i	$B_Ic(1:3)$	
Momentane benuttingsgraad systeem	-		B_Sys	
Radiatorvermogen	W	P_{sys}	P_Sys	?
Gemiddelde radiatortemperatuur	°C	T_{rad}	T_Rad	?
Binnentemperatuur	°C	T_{in}	T_In	?
Stapteller iteratie	-		lis	

Betekenis	Eenheden in- voer/ uitvoer & intern of opties	Parameter (rapport)	Parameter (code)	Rand- voor- waarden / waarde
Algemene parameters				
COP wp vorige rekenstap	-		Cop_Hp_Old	
Verdampertemperatuur vorige rekenstap	°C		T_Evap_Out2	
Gemiddelde uitgaande ver- dampertemperatuur	°C		T_Evap_Out_M	
Cyclustijd WP	sec		T_C	
Aantijd per cyclus	sec		T_On	
Uittijd per cyclus	sec		T_Off	
Aantijd afgiftepomp per cyclus	sec		T_Pc1_On	
Aantijd bronpomp/ ventilator per cyclus	sec		T_Pe1_On	
Schakelcycli	c/s		N_S	

