

Besparingsopties koel- en vriesmeubelen

Ref.nr. 91-153
Dossiernr. 112325-22730
Datum april 1991
NP

Auteur(s)
Ir. S.M. van der Sluis

Trefwoord(en)
– koel- en vriesmeubelen
– detailhandel
– energiebesparing
– terugverdientijd
– besparingspotentieel
– modellering

Bestemd voor
Nederlandse Maatschappij voor Energie en Milieu BV
Laan van Westenenk 501
Postbus 503
7300 AM APELDOORN



Samenvatting

De doelstelling van het onderzoek 'besparingsopties koel- en vriesmeubelen' is het bepalen van de mogelijke energiebesparing bij koel- en vriesmeubelen door het toepassen van technische besparingsopties. Daarbij hoort een schatting van het besparingspotentieel in de periode 1990-2000.

Er wordt een berekeningsmethode gepresenteerd om het energieverbruik van koel- of vriesmeubelen te berekenen, welke gebaseerd is op optredende warmte- en energiestromen. Dit model wordt toegepast op 10 typen meubelen.

Met het model kan de invloed van besparingsopties worden berekend op het energieverbruik. Voor 15 technisch haalbare besparingsopties is deze berekening uitgevoerd. Op basis van een kosten/batenanalyse worden voor de 15 besparingsopties terugverdientijden uitgerekend.

Besparingsopties met een terugverdientijd van 3 jaar of korter worden als economisch haalbaar beschouwd. Onmiddellijke toepassing van alle haalbare besparingsopties op de Nederlandse voorraad koel- en vriesmeubelen resulteert in een besparing van ca. 34% op het elektriciteitsverbruik.

Met behulp van twee scenario's wordt voor het komende decennium (1990-2000) de optredende besparing berekend. De berekende besparing blijkt sterk afhankelijk te zijn van de specifieke vraag naar zuinige meubelen. Om tot een zo groot mogelijke besparing in het komende decennium te komen ligt het voor de hand deze vraag te stimuleren of te reguleren.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding	5
2	Keuze van de uitvoeringsvormen	7
2.1	Koel- en vriesmeubelen in Nederland	7
2.2	De hoofdcategorieën	7
2.3	De gekozen uitvoeringsvormen	7
3	Het model voor de schematisering van energiestromen	9
3.1	De geschematiseerde koelinstallatie	9
3.2	Het opgenomen elektrische vermogen	11
3.3	De door de verdamper af te voeren warmte	12
3.4	Het berekeningsmodel voor de geschematiseerde energiestromen	18
3.5	Invoer, parameters en variabelen	18
3.6	Betrouwbaarheid van de modellering	21
4	Toepassing van het model op de gekozen uitvoeringsvormen	23
4.1	Berekeningsresultaten per uitvoeringsvorm	23
4.2	Overzicht energieverbruik van de 10 uitvoeringsvormen	23
4.3	Warmtestromen in de 10 uitvoeringsvormen	24
4.4	Energiestromen van de 10 uitvoeringsvormen	25
5	Inventarisatie van besparingsopties; kosten/baten	27
5.1	Technisch haalbare besparingsopties	27
5.2	Verbetering van het luchtstromingspatroon	27
5.3	Het beperken van de luchtuitstroom bij het openen van de deur	29
5.4	Toepassing van een strokengordijn	30
5.5	Toepassing van een afschermende evenwijdige luchtstroom	31
5.6	Toepassing van afdekking 's nachts en in de weekeinden	32
5.7	Het toepassen van infrarood reflecterende beglazing	33
5.8	Het toepassen van retroreflecterende schermen	34
5.9	Het toepassen van warmtestraling absorberende beglazing	35
5.10	Het vergroten van de isolatiedikte	35
5.11	Besparen door een gunstigere oppervlakte/volume verhouding	36
5.12	Beperking van het ontdooivermogen	38
5.13	Het vergroten van het verdamperoppervlak	41
5.14	Verbetering van het ventilatorrendement	41
5.15	Vermindering van het verlichtingsvermogen	42
5.16	Centrale koelinstallaties versus stekkerklare meubelen	43
5.17	Het gebruik van stille versus geforceerde koeling	44

6	Toepassing van de besparingsopties per uitvoeringsvorm	46
6.1	Overzicht van de besparingsopties met gunstige terugverdiensijd	46
6.2	Combinatie van haalbare opties per uitvoeringsvorm	47
7	Energieverbruik in Nederland anno 1990	49
7.1	Schatting van het energieverbruik	49
7.2	Energieverbruik van een gemiddeld koel- of vriesmeubel	49
7.3	Berekening van het energieverbruik anno 1990	50
8	Energiebesparingspotentieel 1990-2000	52
8.1	Het economisch haalbare potentieel	52
8.2	Besparingspotentieel per optie en per uitvoeringsvorm	53
8.3	Energiebesparing in het komende decennium	54
9	Conclusies	59
10	Referenties	61
11	Verantwoording	

Bijlage A Het spreadsheet rekenmodel

Bijlage B Berekende energiestromen bij de gekozen uitvoeringsvormen

Bijlage C Berekening van de baten van de besparingsopties

1 Inleiding

In opdracht van de Nederlandse Maatschappij voor Energie en Milieu BV (NOVEM) is door het Instituut voor Milieu- en Energietechnologie TNO, afdeling Warmte- en Koudetechniek, een onderzoek verricht naar (energie)besparingsmogelijkheden bij koel- en vriesmeubelen in de detailhandel.

De NOVEM heeft een programma gestart genaamd 'Energiezuinige koel- en vriesmeubelen voor de detailhandel'. Het programma bestaat uit de volgende fasen:

- a. Inventarisatie van de huidige stand van zaken, aanwezige trends, en schatting van het verbruiksverloop over de periode 1990-2000 indien geen besparingen worden gerealiseerd.
- b. Inventarisatie van technische besparingsmogelijkheden. Schatting van het besparingspotentieel over de periode 1990-2000.
- c. Uitwerking van alternatieve uitvoeringsvormen van koel- en vriesmeubelen.
- d. In samenwerking met een branche-organisatie en/of grote winkelketen selecteren van de meest geëigende uitvoeringsvorm(en) en opzetten van een proefproject.
- e. In samenwerking met een (Nederlandse) fabrikant van deze meubelen het ontwerpen en produceren van de evaluatie-exemplaren voor het proefproject.
- f. Uitvoeren en begeleiden van de proef, gevolgd door rapportage en publikatie van de resultaten.

Onlangs verschenen de resultaten van onderdeel 'a' van het programma; de inventarisatie van de huidige stand van zaken. Deze resultaten zijn beschikbaar in het rapport 'Overzicht modellen en voorraden koel- en vriesmeubelen in Nederland' [Ref. 1]. Op basis van dit rapport kunnen de meest voorkomende modellen koel- en vriesmeubelen geselecteerd worden.

De doelstelling van het nu verrichtte onderzoek is het inventariseren van technisch haalbare besparingsopties, en het schatten van het energiebesparingspotentieel over de periode 1990-2000 (onderdeel 'b' van het programma).

Om het energieverbruik en het effect van de besparingsopties te bepalen, wordt een (spreadsheet) berekeningsmodel opgesteld. Het berekeningsmodel kan bovendien voor andere toepassingen worden benut, zoals het berekenen van het energieverbruik van koel- en vriesmeubelen in de ontwikkelingsfase. Ten behoeve van onderdeel 'c' van het NOVEM programma kan bijvoorbeeld het verbruik van een alternatieve uitvoeringsvorm worden berekend.

In een gebruikersvriendelijke uitvoering kan het berekeningsmodel worden geïntroduceerd in de koel- en vriesmeubelbouwbranche.

In hoofdstuk 2 worden de 10 geselecteerde modellen koel- en vriesmeubelen op basis van [Ref. 1] gegeven. Voor elk van deze modellen kiezen we een specifieke uitvoeringsvorm.

Om het effect van verschillende besparingsopties te kunnen kwantificeren, moeten de energiestromen die optreden in de koel- en vriesmeubelen geschematiseerd worden in een model. In hoofdstuk 3 wordt de werking van het berekeningsmodel beschreven.

In hoofdstuk 4 wordt het berekeningsmodel toegepast op de gekozen uitvoeringsvormen, om het energieverbruik te bepalen.

De technisch haalbare besparingsopties worden in hoofdstuk 5 beschreven, waarbij tevens een schatting van de kosten wordt gegeven. Ook berekenen we de te verwachten besparing (baten) per besparingsoptie, waarna kosten en baten kunnen worden afgewogen.

De opties met een positieve kosten/batenverhouding worden in hoofdstuk 6 gecombineerd, met als uitkomst de realistische besparingsopties per uitvoeringsvorm.

In hoofdstuk 7 wordt het energieverbruik anno 1990 van koel- en vriesmeubelen in de detailhandel berekend, op basis van het berekende verbruik per meubeltype en de aanwezige voorraad in Nederland [Ref. 1].

Vervolgens komt in hoofdstuk 8 het besparingspotentieel in de periode 1990-2000 aan de orde. Eerst wordt de maximaal mogelijke besparing (het potentieel) berekend. Daarna worden twee scenario's voor het komende decennium opgesteld, en de daarbij behorende besparingen berekend.

De conclusies worden gegeven in hoofdstuk 9.

2. Keuze van de uitvoeringsvormen

2.1 Koel- en vriesmeubelen in Nederland

In het 'Overzicht modellen en voorraden koel- en vriesmeubelen in Nederland' [Ref. 1] is op basis van een steekproef bepaald, hoeveel koel- en vriesmeubelen in de detailhandel aanwezig zijn. In het overzicht is de hoeveelheid koel- en vriesmeubelen opgesplitst naar type meubel. Een indeling naar toepassing geeft ons het volgende beeld:

- Diepvries meubelen 76.000 meter
- Koeling (zelfbediening) 93.000 meter
- Koeling (bediening) 145.000 meter

2.2 De hoofdcategorieën

In [Ref. 1] is ook aangegeven hoe we de koel- en vriesmeubelen kunnen indelen in een tiental hoofdcategorieën. Daarbij kan een hoofdcategorie meerdere typen meubelen omvatten, die qua constructie grote overeenkomst vertonen. De categorie 'diepvrieseilanden' bijvoorbeeld omvat smalle, brede en dubbelbrede eilanden, alsmede zogenaamde wandmeubelen.

In totaal gaat het om ca. 25 typen meubelen, die onderverdeeld zijn in 10 hoofdcategorieën.

2.3 De gekozen uitvoeringsvormen

Het doel van deze studie is onder meer het quantificeren van de energie die bespaard kan worden op de aanwezige koel- en vriesmeubelen (het besparingspotentieel). Om niet voor elk type meubel een aparte berekening nodig te maken, beperken we ons tot één type meubel per hoofdcategorie. Wanneer het type meubel vaststaat, kunnen nog meerdere uitvoeringsvormen worden gekozen (fabrikant, technische uitvoering, klimaat, etc). In deze studie maken we een keuze voor een bepaalde uitvoeringsvorm ten behoeve van de berekeningen.

De gekozen uitvoeringsvormen zijn gegeven in tabel 2.1.

Tabel 2.1 Gekozen uitvoeringsvormen koel- en vriesmeubelen

	Hoofdcategorie	Toepassing
1	Vrieseiland (breed)	diepvriesprodukten
2	Glasdeurkast	diepvriesprodukten
3	Vrieskist met deksel	diepvries - ijs
4	Roll-in meubel	zuivel
5	Open schappenkast	zuivel/vlees/groente
6	Koeleiland	verpakt vlees
7	Vleesvitrine	onverpakt vlees
8	Gesneden groente vitrine	gesneden groente
9	Gebaksvitrine	gebak/bonbons
10	Schappenkast banket	gebak/bonbons

Met betrekking tot de keuze voor een bepaalde uitvoeringsvorm binnen een hoofdcategorie is in eerste instantie getracht de meest voorkomende (modale) uitvoeringsvorm te kiezen. In de praktijk komt echter een veelheid aan uitvoeringsvormen voor, zowel met betrekking tot circulatie als klimaat, en is niet altijd bekend wat de modale uitvoeringsvorm is. Daarom hebben we, waar mogelijk, per hoofdcategorie een uitvoeringsvorm gekozen waarvan door TNO een testrapport is samengesteld. In een dergelijk testrapport zijn temperaturen en vermogens onder standaard testcondities gemeten.

Er is nog een veel dringender reden om te werken met de door TNO geteste meubelen. Deze reden is, dat de fabrikant in veel gevallen niet opgeeft wat het energieverbruik van zijn meubel is. En in de gevallen waar dit wel het geval is, vermeldt hij zelden wat de meetcondities waren (een meubel verbruikt aanzienlijk minder energie bij 18 °C omgevingstemperatuur dan bij 25 °C).

In hoofdstuk 7 zal beschouwd worden in hoeverre het energieverbruik (per meter lengte) van de door ons gekozen uitvoeringsvorm afwijkt van de gemiddelde waarde (voor het betreffende type). Hierbij wordt voor het energieverbruik van een meubeltype het verbruik bij de gemiddelde meubellengte genomen.

3 Het model voor de schematisering van de energiestromen

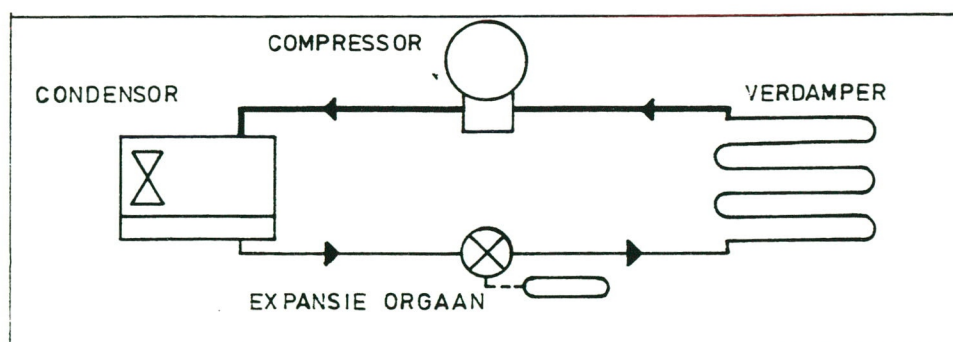
3.1 De geschematiseerde koelinstallatie

Bij een beschouwing over energiestromen in een koel- of vriesmeubel is enige kennis van de werking van koel- en vriesmeubelen onontbeerlijk. Omdat we werken met een geschematiseerde koelinstallatie, kan deze kennis voor de lezer tot een minimum beperkt worden.

Koel- en vriesmeubelen kunnen we onderscheiden in 'stekkerklare' en 'separate' meubelen. Stekkerklare meubelen hebben een intern – elektrisch aangedreven – koelsysteem. Separate meubelen moeten aan een extern opgestelde koelinstallatie aangesloten worden. Bij veel meubeltypen kan de gebruiker kiezen tussen een stekkerklare of separate uitvoering.

Het is niet de bedoeling van deze studie om de besparingen te bestuderen die gerealiseerd kunnen worden door het toepassen van technische verbeteringen aan de koelinstallatie. Vandaar dat we werken met een geschematiseerde koelinstallatie, die voor alle uitvoeringsvormen (zowel stekkerklaar als separaat) dezelfde eigenschappen vertoont.

Bij koel- en vriesmeubelen wordt vrijwel uitsluitend gebruik gemaakt van compressiekoelsystemen. Een dergelijk systeem bestaat in hoofdzaak uit vier componenten, die onderling verbonden zijn door leidingen waardoor een koudemiddel stroomt. Een schema hiervan vindt U in figuur 3.1.



Figuur 3.1 Schema van een compressiekoelsysteem

- In de **verdampers** stroomt vloeibaar koudemiddel naar binnen en verdampt onder opname van warmte uit de omgeving. De verdampers is dus de eigenlijke 'koeler', die altijd opgenomen is in het meubel.
- De **compressor** zuigt de ontstane damp af uit de verdampers en comprimeert deze tot een hogere druk. De temperatuur van de damp stijgt daarbij tot boven de omgevingstemperatuur.
- In de **condensor** condenseert de hete damp tot vloeistof, en staat daarbij warmte af aan de omgeving.

- In het **expansieorgaan** wordt het vloeibare koudemiddel van een hoog drukniveau naar een laag drukniveau gebracht, zonder toe- of afvoer van warmte. Hierdoor daalt de temperatuur van het koudemiddel.

We zien we dat we een bepaald vermogen P_c (Watt) aan de compressor moeten toevoeren om een hoeveelheid warmte Q_o (Watt) via de verdamper aan het meubel te kunnen onttrekken. Het rendement van dit proces wordt in de koudetechniek aangeduid met de term 'koudefactor' (symbool: ϵ). De netto koudefactor ϵ_n is het quotiënt van de gemiddelde hoeveelheid onttrokken warmte (koelcapaciteit) en het gemiddeld opgenomen elektrisch vermogen van de compressor:

$$\epsilon_n = Q_o(\text{gemiddeld}) / P_c(\text{gemiddeld})$$

Zowel Q_o als P_c worden uitgedrukt in Watt (of kiloWatt), zodat de koudefactor dimensieloos is ('een getal').

De theoretisch hoogst bereikbare koudefactor is de Carnot koudefactor ϵ_c , die als volgt is gedefinieerd:

$$\epsilon_c = T_o / (T_c - T_o)$$

waarbij T_o de temperatuur van de verdamper (K) is, en T_c de temperatuur van de condensor (K). In de praktijk vindt men voor koelcompressoren werkend onder normale condities een koudefactor ϵ_n die maximaal voldoet aan:

$$\epsilon_n = 0,6 \cdot \epsilon_c \cdot n(\text{el})$$

Hierin staat $n(\text{el})$ voor het rendement waarmee in de compressormotor het elektrisch vermogen wordt omgezet in aandrijfvermogen voor de compressie. Een gebruikelijke waarde voor het elektrisch rendement bij koel- en vriesmeubelcompressormotoren bedraagt $n(\text{el}) = 0,8$.

Bij een goede keuze van het koelsysteem, aansluitend op de behoeften van het koel- of vriesmeubel, kan dus maximaal een netto koudefactor worden gerealiseerd die wordt gegeven door:

$$\epsilon_n = 0,48 \cdot T_o / (T_c - T_o)$$

In de praktijk zal de netto koudefactor iets slechter zijn, zoals bijvoorbeeld blijkt uit documentatie van compressorfabrikanten. Daarom gebruiken we de volgende relatie:

$$\epsilon_n = 0,40 \cdot T_o / (T_c - T_o)$$

In de berekening van de energiestromen in de koel- en vriesmeubelen zullen we steeds met deze 'genormaliseerde' netto koudefactor werken.

Voor de validatie van praktijkmetingen was het echter soms nodig te werken met een lagere koudefactor. Dit is speciaal het geval bij 'stekkerklare' meubelen, die met een lagere netto koudefactor (en) werken dan centrale installaties.

3.2 Het opgenomen elektrische vermogen

In de voorgaande paragraaf hebben we het elektrische vermogen behandeld dat gemiddeld nodig is voor de aandrijving van de elektrische compressormotor. Naast de compressormotor treffen we veelal nog een aantal andere verbruikers van elektrische energie aan, die worden gebruikt voor het bedienen van het koel- of vriesmeubel.

In deze paragraaf treft U een opsomming aan van deze verbruikers.

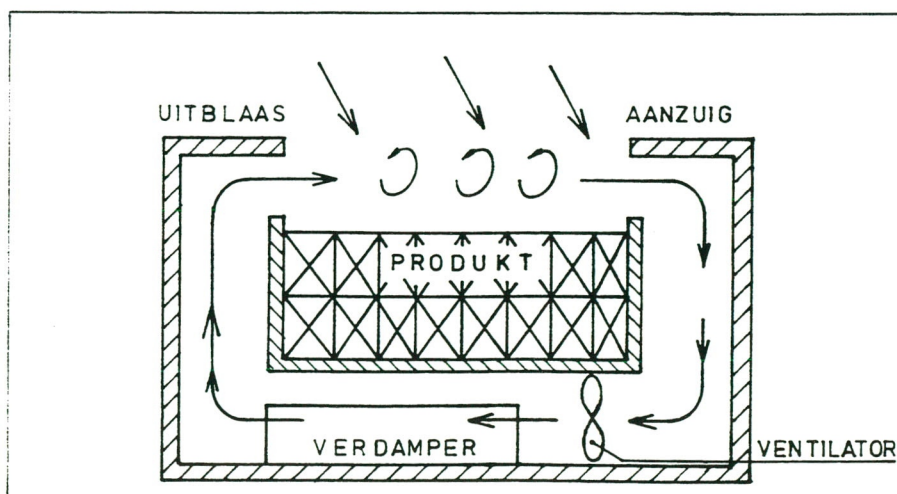
- a. **Ontdooi-inrichting.** Bij het koelen van vochtige lucht slaat waterdamp uit de lucht neer op de verdamper in de vorm van rijp. Er vormt zich een rijplaag die de werking van het koelsysteem nadelig beïnvloedt en dus geregeld verwijderd moet worden.

De rijplaag kan op verschillende manieren worden verwijderd:

- door heet gas door de verdamper te pompen;
- door de verdamper elektrisch te verwarmen;
- door de verdamper te omstromen met warme omgevingslucht.

De ontdooiing wordt met een tijd klok geschakeld (enkele malen per etmaal) of naar behoefte met een ontdooisensor. Het gemiddelde ontdooivermogen over 24 uur duiden we aan met P_o .

- b. **Verdamperventilator.** In het koel- of vriesmeubel wordt warmte van de produkten naar de verdamper (het koelelement) getransporteerd door circulatielucht (figuur 3.2). De luchtcirculatie ontstaat door natuurlijke convectie of door het toepassen van een ventilator. Het gemiddeld ventilatorvermogen duiden we aan met P_v .



Figuur 3.2 Indirecte koeling van produkten door middel van circulatielucht

- c. **Randverwarming.** Bij koel- en vriesmeubelen wordt soms een verwarmingselement in de rand van het meubel gebouwd, om te voorkomen dat de rand onprettig koud aanvoelt. Tegenwoordig wordt echter veelal van materialen gebruik gemaakt die van nature 'warm' aanvoelen. Het elektrische randverwarmingsvermogen duiden we aan met Pr .
- d. **Ruitverwarming.** Met name bij de koel- en vriesmeubelen die voorzien zijn van een glazen deur, wordt ruitverwarming toegepast om condensvorming te voorkomen. Aanduiding: P_g (index g voor glas).
- e. **Verlichting.** In veel meubelen wordt extra verlichting toegepast. In vrijwel alle gevallen betreft het (energiezuinige) verlichting met lagedruk kwik fluorescentiebuizen ('TL' lampen). Het over 24 uur gemiddelde elektrische vermogen duiden we aan met Pl .
- f. **Condensorventilator.** In sommige installaties wordt gebruik gemaakt van geforceerde koeling van de compressor of de condensor door middel van een ventilator. Omdat we in deze studie een geschematiseerde koelinstallatie beschouwen, laten we deze optie buiten beschouwing.
- g. **Overige verbruikers.** Naast de tot nu toe genoemde verbruikers, kunnen we nog meer elektrische apparatuur aantreffen, zoals bijvoorbeeld elektrische regelsystemen. Waar het benodigde vermogen voor deze extra verbruikers niet verwaarloosbaar klein is, wordt dit vermogen meebeschouwd en aangeduid met P_x .

Het totale (gemiddelde) elektrische verbruik Pe van het koel- of vriesmeubel is de som van alle hiervoor genoemde posten.

$$Pe = Pc + Po + Pv + Pr + Pg + Pl + Px$$

Pe = totaal elektrisch vermogen	Pc = compressorvermogen
Po = ontdooivermogen	Pv = ventilatorvermogen
Pr = randverwarmingsvermogen	P_g = ruitverwarmingsvermogen (glas)
Pl = verlichtingsvermogen	P_x = overig (extra) vermogen

3.3 De door de verdamper af te voeren warmte

Het doel van een koel- of vriesmeubel is het handhaven van een gewenste produkttemperatuur (lager dan de omgevingstemperatuur) van de erin uitgestalde produkten. (Dit lijkt misschien overbodig te zeggen, maar in de praktijk komt het wel voor dat meubelen worden gebruikt om warme produkten af te koelen, hetgeen uitdrukkelijk niet de bedoeling is.) In het ideale geval van een perfect geïsoleerde bewaarruimte hoeft in de meest voorkomende gevallen geen warmte te worden afgevoerd om de produkttemperatuur te handhaven (uitzonderingen zijn 'levende' produkten, zoals appels, die warmte produceren).

In de praktijk, en met name bij koel- en vriesmeubelen, worden de produkten voortdurend opgewarmd door warmte uit de omgeving. De koelinstallatie moet juist zoveel warmte onttrekken aan de produkten, dat deze inkomende warmtestromen worden gecompenseerd. De warmte wordt van de produkten naar de verdamper ('koeler') getransporteerd met circulerende lucht. Ook deze circulatielucht zal warmte opnemen uit de omgeving, welke eveneens afgevoerd dient te worden via de verdamper.

Tussen verdamper en circulerende lucht bestaat een temperatuurverschil, omdat de warmte uit de lucht nooit 'ideaal' door de verdamper kan worden afgevoerd. Het temperatuurverschil is afhankelijk van de over te dragen hoeveelheid warmte $\dot{Q}_0$, het oppervlak van de verdamper en de zogenaamde 'k-waarde' van de verdamper. Dit kunnen we beschrijven met de relatie:

$$\dot{Q}_0 = k_v \cdot A_v \cdot (T_{\text{circ}} - T_o)$$

k_v = k-waarde verdamper ($\text{W/m}^2\text{K}$)

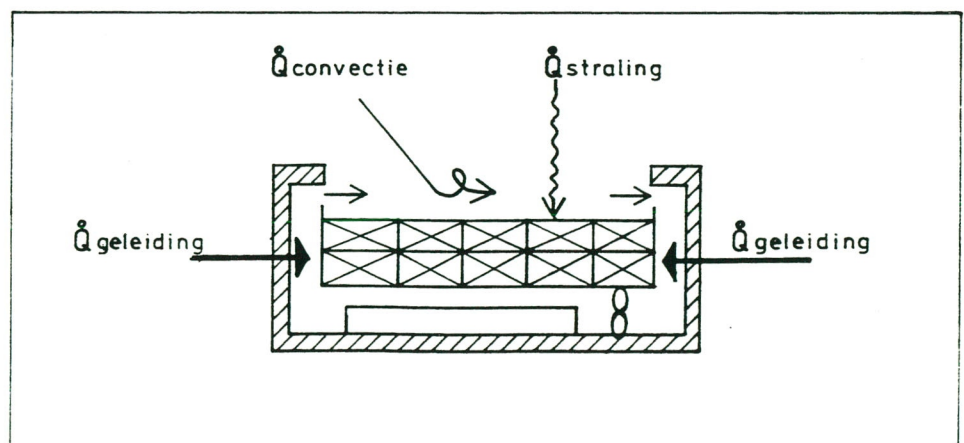
A_v = verdamperoppervlak (m^2)

T_{circ} = circulatieluchttemperatuur (K)

T_o = verdampertemperatuur (K)

De temperatuur van de circulatielucht is lager dan de temperatuur van de produkten. Het temperatuurverschil kunnen we vinden uit metingen. Dit geldt ook voor de temperatuuroptima van de circulatielucht tussen uitblaas- en aanzuigopening (zie figuur 3.2).

Voor een beschouwing over de energiestromen is het nuttig wanneer we de af te voeren warmtestroom $\dot{Q}_0$ (Watt) opsplitsen in verschillende posten. Deze verschillende posten behandelen we in deze paragraaf. Een overzicht vindt U in figuur 3.3.



Figuur 3.3 Inwandelnde warmtestromen uit de omgeving

- a. **Geleidingswarmtestroom.** De (in figuur 3.3 gearceerd weergegeven) buitenwand van het koel- of vriesmeubel wordt aan de buitenzijde omstroomd door de omgevingslucht, en aan de binnenzijde door de circulatielucht. Tengevolge van het temperatuurverschil tussen omgevingslucht (temperatuur T_o) en circulatielucht (temperatuur T_{circ}) ontstaat een warmtestroom door de buitenwand, die evenredig is aan het temperatuurverschil $T_o - T_{circ}$.

De grootte van deze warmtestroom wordt verder bepaald door de mate van isolatie van de wand, en de luchtsnelheden van omgevings- en circulatielucht. Dit beschrijven we met de k -waarde ('isolatiewaarde'), van de wand, uitgedrukt in Watt per vierkante meter per graad temperatuurverschil (W/m^2K). Deze geleidingswarmtestroom, $\dot{Q}_i$, is bovendien evenredig met het oppervlak A_i van de wand.

$$\dot{Q}_i = k_i \cdot A_i \cdot (T_o - T_{circ})$$

$\dot{Q}_i$ = geleidingswarmtestroom (Watt)
 k_i = k -waarde van de wand (W/m^2K)
 A_i = oppervlak van de wand (m^2)
 T_o = omgevingsluchttemperatuur (K)
 T_{circ} = circulatieluchttemperatuur (K)

In veel gevallen zal de constructie bestaan uit verschillende delen met een verschillende k -waarde. Ook is het mogelijk dat lokaal de omgevingstemperatuur of de circulatieluchttemperatuur afwijkt van de modale waarde. In deze gevallen kunnen we de geleidingswarmtestroom per deel berekenen, en vervolgens sommeren:

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_{i1} + \dot{Q}_{i2} + \dot{Q}_{i3} + \dots$$

Een speciaal geval is het gebruik van ruitverwarming in glazen deuren, dat ook in de vorige paragraaf al aan de orde kwam. De warmte van de ruitverwarmingselementen wordt deels afgestaan aan de omgeving en deels aan de circulatielucht. In dit geval is de bijdrage van de 'normale' geleidingswarmte door het glasoppervlak gelijk aan nul, maar kunnen we de bijdrage van de ruitverwarming als geleidingswarmtestroom door het glas beschouwen. De grootte van deze warmtestroom wordt gemiddeld over 24 uur (zoals alle warmtestromen), en is gelijk aan:

$$\dot{Q}_{i,glas} = F_g \cdot P_g$$

P_g = ruitverwarmingsvermogen, gemiddeld over 24 uur.
 F_g = fractie van ruitverwarmingsvermogen naar interieur.

Omdat de temperatuur van de circulatielucht lager is dan de temperatuur van de omgeving, zal het deel van de warmte dat naar binnen gericht is groter zijn dan het deel dat naar de omgeving stroomt. Derhalve is de fractie F groter dan 50%.

- b. **Stralingswarmtestroom.** Door het temperatuurverschil tussen het oppervlak van in de omgeving aanwezige objecten en het zichtbare produktoppervlak (T_p) ontstaat een stralingswarmtestroom $\dot{Q}_s$ gericht van de omgeving naar de produkten. De grootte van deze warmtestroom wordt bepaald door het temperatuurverschil, het zichtbare oppervlak en de emissiecoëfficiënten van produkt ϵ_p en omgeving ϵ_o (de mate waarin de oppervlakten reflecteren). In formulevorm:

$$\dot{Q}_s = f(\epsilon_o, \epsilon_p) \cdot C_s \cdot A_p \cdot \{ T_o^4 - T_p^4 \}$$

met

$$f(\epsilon_o, \epsilon_p) = \epsilon_o \cdot \epsilon_p / (\epsilon_o + \epsilon_p - \epsilon_o \cdot \epsilon_p)$$

$\dot{Q}_s$ = stralingswarmtestroom (Watt)

ϵ_o = emissiecoëfficiënt omgeving

ϵ_p = emissiecoëfficiënt produkt

C_s = stralingsconstante (56,7 nW/m²K)

A_p = zichtbaar produktoppervlak

T_o = omgevingstemperatuur (K)

T_p = produkt(oppervlakte)temperatuur (K)

- c. **Convectiewarmtestroom.** De koude circulatielucht die over de produkten stroomt, staat ter plaatse in direct contact met de (warmere) omgevingslucht – bij koel- en vriesmeubelen zonder afscheiding. Door het mengen van deze twee luchtstromen wordt warmte (en vocht) overgedragen uit de omgeving naar het meubel. Deze warmtestroom (aangeduid met $\dot{Q}_c$) is afhankelijk van het enthalpieverschil tussen omgevingslucht en circulatielucht, en van het stromingspatroon van de circulatielucht.

Voor de berekening gaan we uit van de door Recknagel [Ref. 2] afgeleide relatie voor uitbreiding van een niet isotherme luchtstraal uit een spleet. Deze relatie is verder uitgewerkt voor toepassing bij koel- en vriesmeubelen door H. Kok in het rapport 'Verbeterde beproeving van open gekoelde verkoopmeubelen' [Ref. 3]:

$$\dot{Q}_c = C \cdot f(L, d, b) \cdot v_u \cdot 1,3 \cdot \{ h_o - h_u \}$$

met

$$f(L, d, b) = L \cdot d \cdot \frac{1}{2} \cdot \{ 1 - \sqrt{5d/b} \}$$

$\dot{Q}_c$ = convectiewarmtestroom (Watt)

C = luchtgordijnfactor

L = lengte uitblaasopening van de circulatielucht (m)

d = hoogte uitblaasopening van de circulatielucht (m)

b = afstand tussen uitblaas- en aanzuigopening (m)

v_u = luchtsnelheid circulatielucht bij uitblaasopening (m/s)

h_o = enthalpie van de omgevingslucht (J/kg)

h_u = enthalpie van de circulatielucht bij de uitblaasopening (J/kg)

De bovengenoemde relatie is opgesteld voor volledig beladen meubelen. Het effect van gedeeltelijke belading is (vooralsnog) niet bekend.

Bij sommige meubelen wordt de gekoelde ruimte van de omgeving afgesloten, bijvoorbeeld door middel van een (glazen) deur. Het spreekt voor zich dat deze convectiewarmtestroom dan niet optreedt zolang de deur gesloten blijft, maar 'vervangen' wordt door een geleidingswarmtestroom door de deur. Alleen voor het percentage van de tijd dat de deur geopend is, moeten we de convectiewarmtestroom meebescheren. Hier kunnen we echter niet werken met een stabiele convectiewarmtestroom, omdat het openen van een deur een verstoring van de luchtstroom veroorzaakt. Bovendien wordt de circulatielucht ventilator op dat moment veelal uitgeschakeld.

Bij uitgeschakelde ventilator en volledig openslaande deur, gaan we ervan uit dat alle koude lucht in het geopende compartiment uit het meubel stroomt, en het compartiment wordt opgevuld met warme lucht. De optredende warmtestroom is dan afhankelijk van het luchtvolume van het geopende compartiment en het enthalpieverschil tussen circulatielucht en omgevingslucht. Als vermenigvuldigingsfactor moeten we de soortelijke massa van lucht ($1,3 \text{ kg/m}^3$) toevoegen.

$$\dot{Q}_c = F_p \cdot \{V_o - B_p/100 \cdot V\} / N \cdot 1,3 \cdot \{h_o - h_u\}$$

V_o = ledig volume (inclusief loze ruimte) (m^3)

V = laadvolume (m^3)

N = aantal afgesloten compartimenten

h_o = enthalpie omgevingslucht (J/kg)

h_u = enthalpie circulatielucht (J/kg)

F_p = uitstroombfactor koude lucht (zie volgende alinea)

B_p = beladingspercentage (%)

Wanneer de deuren zo worden geconstrueerd, dat niet alle koude lucht – die zwaarder is dan de omgevingslucht – 'naar beneden valt', kunnen we aan bovenstaande formule een factor F_p toevoegen. Deze factor geeft dan weer welk percentage van de koude lucht uit het compartiment zal stromen, wanneer de deur geopend wordt.

Bij koel- of vriesmeubelen waarbij de circulatieventilator niet automatisch wordt afgeschakeld bij het openen van een deur, zal naast de hierboven genoemde hoeveelheid lucht nog meer lucht uit het meubel stromen. Deze hoeveelheid kan worden gesteld op het debiet van de ventilator (m^3/hr) maal de tijd dat de deur geopend is (hr). Ook hier kunnen we een reductiefactor toepassen bij speciaal geconstrueerde deuren.

Vanzelfsprekend moeten we de geleidingswarmtestroom door de deur, die onder punt a) is genoemd, niet in rekening brengen over de tijd dat de deur geopend is.

- d. **Vermogenswarmtestroom.** Terugkijkend naar paragraaf 3.3 zien we dat een aantal elektrische verbruikers in het koel- of vriesmeubel aanwezig zijn. De opgenomen elektrische energie van deze gebruikers zal uiteindelijk voor een deel als warmte terechtkomen in het meubel. De ventilator bijvoorbeeld zet elektrische energie om in bewegingsenergie, maar deze bewegingsenergie wordt door wrijving weer omgezet in warmte die in het meubel wordt opgenomen. Voor elke elektrische verbruiker -in het meubel- hanteren we daarom een fractie F die aangeeft welk deel van de elektrische energie als warmte in het meubel terechtkomt. De fractie F is voor verbruikers die binnen het meubel zijn opgenomen 100%, omdat alle elektrische energie uiteindelijk wordt omgezet in warmte die moet worden afgevoerd. Dit geldt met name voor de verdamperventilator en de verlichting.
- De fractie van de ontdooiwarmte (F_o) die als schadelijke warmte moet worden afgevoerd wordt uitvoerig behandeld in bijlage C.11.
- De totale vermogenswarmtestroom $\dot{Q}_v$ kunnen we schrijven als:

$$\dot{Q}_v = F_o.P_o + F_v.P_v + F_r.P_r + F_l.P_l + F_x.P_x$$

- e. **Geïntroduceerde produktwarmtestroom.** Zoals reeds eerder opgemerkt, dienen de produkten op de gewenste produkttemperatuur ingebracht te worden in het koel- of vriesmeubel. In de praktijk komt het echter veelvuldig voor dat de produkten op een te hoge temperatuur worden ingebracht. Daarmee wordt een hoeveelheid energie in het systeem geïntroduceerd, die als produktwarmtestroom $\dot{Q}_p$ moet worden afgevoerd door de verdamper. De grootte van deze warmtestroom hangt af van de afwijking van de gewenste produkttemperatuur, de warmtecapaciteit van de produkten, en de hoeveelheid die per dag wordt ingebracht.

$$\dot{Q}_p = (dM / dt) \cdot C_p \cdot (T_p' - T_p)$$

$\dot{Q}_p$ = Produktwarmtestroom (Watt)

dM = Ingebrachte massa in tijdsduur dt (kg)

dt = tijdsduur (s)

C_p = soortelijke warmte van de produkten (J/kgK)

T_p' = Produkttemperatuur ingebrachte produkten (K)

T_p = gewenste produkttemperatuur in koel- of vriesmeubel (K)

In gevallen waar de temperatuur van de ingebrachte produkten ligt beneden de gewenste bewaartemperatuur, kan de produktwarmtestroom negatief zijn.

Naar aanleiding van de onder punten a t/m e genoemde bijdragen kunnen we de totale inkomende warmtestroom als volgt uitschrijven:

$$\dot{Q}_o = \dot{Q}_i + \dot{Q}_s + \dot{Q}_c + \dot{Q}_v + \dot{Q}_p$$

$\dot{Q}_o$ = totale (door verdamper af te voeren) inkomende warmtestroom (Watt)

$\dot{Q}_i$ = geleidingswarmtestroom

$\dot{Q}_s$ = stralingswarmtestroom

$\dot{Q}_c$ = convectiewarmtestroom

$\dot{Q}_v$ = vermogenswarmtestroom

$\dot{Q}_p$ = produktwarmtestroom

3.4 Het berekeningsmodel voor de geschematiseerde energiestromen

Op basis van de formules uit voorgaande paragrafen 3.1, 3.2 en 3.3 kunnen we een rekenmodel opstellen dat de geschematiseerde energiestromen berekent voor een willekeurig koel- of vriesmeubel. Daartoe moeten we een aantal (vaste) karakteristieken van het meubel opgeven, alsmede enkele variabelen zoals bijvoorbeeld de omgevingstemperatuur.

De te volgen werkwijze voor de berekening van het energieverbruik van een meubel is dan als volgt:

- 1) Geef de karakteristieken en de variabelen in.
- 2) Bereken de optredende warmtestromen.
- 3) Bereken met behulp van de koudefactor het benodigde compressorvermogen.
- 4) Tel hierbij op de overige vermogens van de verbruikers.
- 5) Resultaat = het energieverbruik van het meubel.
- 6) Voer alle optredende energiestromen (vermogens & warmtestromen) uit.

Deze berekeningswijze leent zich bij uitstek voor implementatie in een 'spreadsheet' programma. Bijkomende voordeel daarvan is de mogelijkheid om direct parameters of variabelen te kunnen variëren, wat van belang is wanneer we besparingsopties moeten doorrekenen. Een gedetailleerde beschrijving van het spreadsheet programma vindt U in bijlage A.

3.5 Invoer, parameters en variabelen

Voor elke uitvoeringsvorm van de koel- of vriesmeubelen zullen we een aantal parameters (meubelkarakteristieken) moeten opgeven, voordat de berekening kan worden uitgevoerd. In tabel 3.1 zijn de benodigde parameters vermeld; in hoofdstuk 3 zullen we deze parameters per uitvoeringsvorm invullen.

Tabel 3.1 Benodigde invoerparameters per uitvoeringsvorm

Symbool	Omschrijving	Eenheid
T _{produkt}	Gemiddelde produkttemperatuur (maximaal)	K
dT _{pc}	Temperatuurverschil circulatielucht - produkt	K
dT _{cu}	Temperatuurverschil circulatie gemiddeld - uitblaas	K
T _o	Temperatuur verdamper	K
dT _c	Temperatuur condensor ten opzichte van omgevingstemperatuur	K
V _u	Luchtsnelheid circulatielucht bij uitblaasopening	m/s
A _d	Zichtbaar produktoppervlak	m ²
A _v	Verdamperoppervlak	m ²
k _v	k-waarde verdamper	W/m ² K
A _i	Wandoppervlak buitenwand (eventueel per onderdeel)	m ²
x	ikte isolatiemateriaal in buitenwand (eventueel per onderdeel)	m
lambda	Warmtegeleidingscoëfficiënt isolatiemateriaal (evt. per onderdeel)	W/mK
V	Laadvolume	m ³
V _o	Ledig volume	m ³
N	Aantal (afgesloten) compartimenten	
F _p	Uitstroomfactor koude lucht bij opening deur	-
B _p	Belading (% van volume)	%
L	Lengte uitblaasopening van de circulatielucht	m
d	Hoogte van de uitblaasopening	m
b	Afstand tussen uitblaas- en aanzuigopening	m
C	Luchtgordijnfactor	-
P _o , F _o	Ontdooivermogen en fractie	W
P _v , F _v	Ventilatorvermogen en fractie	W
P _r , F _r	Randverwarmingsvermogen en fractie	W
P _l , F _l	Verlichtingsvermogen en fractie	W
P _x , F _x	Vermogen overige verbruikers en fractie	W
P _g , F _g	Ruitverwarmingsvermogen en fractie	W

Naast deze meubelkarakteristieken moeten we nog een aantal variabelen vastleggen betreffende de omgevingscondities en de gebruikscondities.

In principe kunnen we gebruik maken van de omgevingscondities zoals die worden voorgeschreven in de internationale ISO-standaard voor het beproeven van koel- en vriesmeubelen. De praktijkomstandigheden zijn doorgaans echter sterk afwijkend van deze beproevingsnorm. Omdat we geïnteresseerd zijn in praktijkverbruiken en besparingen in de praktijk, is het zinvol om aan de hand van eigen ervaring gemiddelde omgevingscondities op te stellen.

Er is gekozen voor de volgende omgevingscondities:

T _o = 18 °C	Omgevingstemperatuur
r.v. = 60%	Relatieve vochtigheid van de omgeving
V _o = 0,2 m/s	Luchtsnelheid omgevingslucht
ε _o = 0,9	emissiecoëfficiënt omgeving (plafond)
ε _p = 0,9	emissiecoëfficiënt produkten

Deze omgevingscondities staan voor dit onderzoek vast, maar kunnen in het spreadsheet rekenmodel wel worden gevarieerd ten behoeve van andere berekeningen. Er wordt nogmaals op gewezen dat alle condities gemiddelden voorstellen over een periode van 24 uur. Ook de berekende warmte- en energiestromen zijn gemiddelden over 24 uur.

De bewaarcondities waaraan de verschillende typen meubelen moeten voldoen voor het toekennen van een energiewijzer zijn vermeld in het Eindrapport Energiewijzer Bedrijfskoeling [Ref. 4]. Enkele belangrijke gegevens hieruit zijn vermeld in tabel 3.2.

In deze tabel zijn per categorie alleen de maximum toegestane temperaturen gegeven van de te bewaren van produkten, in sommige gevallen gecombineerd met een vereiste relatieve vochtigheid. Te bewaren produkten zijn in een tiental produktgroepen ingedeeld, waarbij elke produktgroep in één van de in deze tabel vermelde categorieën valt.

Tabel 3.2 Eisen aan produkttemperatuur en relatieve vochtigheid (r.v.)

Categorie		TP °C	r.v.
Vriesmeubelen	– extra lage temperatuur	-20 °C	-
	– normale diepvries	-15 °C	-
	– vriestemperatuur	-6 °C	-
Koelmeubelen	– extra lage temperatuur	4 °C	-
	– normale koeling	7 °C	-
	– lichte koeling	10 °C	-
Koelmeubelen	– extra lage temperatuur	4 °C	> 70%
	– normale koeling	7 °C	> 70%

In de berekeningen voor de verschillende meubeltypen zullen we de temperaturen hanteren die in deze tabel vermeld staan. Dit zijn weliswaar maximum temperaturen, maar in de praktijk blijken vooral vriesmeubelen veelal te werken op of zelfs boven deze maximum temperaturen [Ref. 5]. Voor wat betreft de overige gebruikscondities, zoals de gemiddelde temperatuur van ingebrachte produkten, en de fractie van de tijd dat bij glasdeurkasten de deuren geopend zijn, hanteren we schattingen. Deze gebruikscondities (variabelen) leggen we per uitvoeringsvorm vast.

In bijlage B wordt voor alle gekozen uitvoeringsvormen (genummerd 1 t/m 10) een overzicht van de gekozen meubelkarakteristieken gegeven, alsmede een overzicht van de optredende energiestromen berekend met het spreadsheet model.

3.6 Betrouwbaarheid van de modellering

De vraag dient zich aan wat de betrouwbaarheid is van de modellering zoals die tot nu toe is geschetst: het model moet gevalideerd worden.

Om het model te valideren moeten we het berekende energieverbruik vergelijken met het gemeten energieverbruik. Voor de uitvoeringsvormen 1 t/m 7 zijn uitgebreide meetgegevens beschikbaar. Deze meetgegevens zijn afkomstig uit TNO 'testrapporten' voor bepaalde uitvoeringsvormen van koel- en vriesmeubelen [Ref. 6...12].

In deze testrapporten is het energieverbruik van de meubelen gedetailleerd gemeten bij twee verschillende omgevingstemperaturen en standaard condities in een klimaatcel. Ook zijn de belangrijkste meubelkarakteristieken vastgelegd.

Het verbruik van verschillende elektrische verbruikers is gemeten over een periode van 24 uur, deze waarden worden gebruikt als invoergegevens voor de berekeningen.

Na het invoeren van alle gegevens uit het testrapport blijven nog een aantal meubelparameters onbepaald.

Voor de berekening van de stralingswarmtestroom en de isolatiewarmtestroom zijn geen aanvullende gegevens nodig, omdat deze gebaseerd zijn op bekende fysische relaties. Voor de convectiewarmtestroom en de vermogenswarmtestroom is dit niet het geval omdat deze berusten op experimentele relaties met nader te bepalen normeringsconstanten. De verschillende (niet berekenbare) factoren die bepalen welk deel van de geproduceerde warmte door het meubel moet worden afgevoerd (Fr , Fl en Fx) worden geschat op basis van de meubelgeometrie, en niet meer veranderd ten behoeve van de validatie.

De luchtgordijnfactor C , de netto koudefactor van de koelinstallatie ϵ , en in sommige gevallen de uitstroomsnelheid van de circulatielucht V_u kunnen binnen redelijke grenzen gekozen worden.

De netto koudefactor van de koelinstallatie moet op basis van ervaring worden gekozen. Voor separate meubelen moet een waarde van ca. 0.35 worden gekozen, voor stekkerklare meubelen een waarde van ca. 0.30.

De luchtgordijnfactor kan variëren van ca. 0.10 tot 1.00. Voor horizontale diepvries meubelen met een goed stromingspatroon geldt een lage waarde, voor meubelen met een verticale opening vinden we een hoge waarde.

De drie parameters C , ϵ en V_u worden zodanig gekozen dat een goede overeenstemming wordt bereikt met het gemeten energieverbruik. Voor één omgevingstemperatuur is de keuzevrijheid zodanig, dat altijd een goede overeenstemming kan worden bereikt. We maken daarom gebruik van de metingen bij twee verschillende condities, om het model te valideren.

De keuzes voor de parameters C, en en Vu zijn per meubeltype vermeld in bijlage B, waar ook de overige meubelkarakteristieken in zijn vermeld. De resultaten van de validatie zijn gegeven in tabel 3.3.

De afwijkingen van het berekende verbruik ten opzichte van het gemeten verbruik zijn in alle gevallen kleiner dan 5%. Hierbij dient opgemerkt te worden dat het steeds gaat om één specifieke uitvoeringsvorm, en dat dus niet 'het verbruik' van bijvoorbeeld een vrieseiland binnen 5% vastligt.

Tabel 3.3 Afwijking tussen gemeten en berekend energieverbruik

	Uitvoeringsvorm	Conditie	Afwijking (%) meting - model
1	Vrieseiland (breed)	18 °C	- 4.2
	"	25 °C	+ 3.9
2	Glasdeurkast	18 °C	+ 2.9
	"	25 °C	- 2.1
3	Vrieskist met deksel	glasdeksel	+ 0.5
	"	geïsoleerd	- 1.3
4	Roll-in meubel	18 °C	+ 0.8
	"	25 °C	+ 0.1
5	Open schappenkast	18 °C	- 0.1
	"	25 °C	+ 0.1
6	Koeleiland	25 °C	- 0.1
7	Vleesvitrine	randv. aan	+ 0.4
	"	randv. uit	- 1.0
8	Gesneden groente vitrine	-	
9	Gebaksvitrine	-	
10	Schappenkast banket	-	

Nadere validatie aan de hand van literatuurgegevens is vrijwel onmogelijk, omdat in de literatuur niet alle benodigde meubelkarakteristieken vermeld zijn die behoren bij de gemeten waarden. In sommige gevallen wordt zelfs niet vermeld bij welke omgevingscondities gemeten is.

In het rapport 'Energiezuinige vriesmeubelen voor de detailhandel' [Ref. 13] is een lijst opgenomen met door fabrikanten verstrekte gegevens over het koelvermogen van diepvrieseilanden en glasdeurkasten. Niet bekend is onder welke condities deze koelvermogens werden gemeten, en evenmin is bekend of het hier om netto of bruto koelvermogen gaat. De gegevens zijn daarom niet bruikbaar voor de validatie van het rekenmodel.

4 Toepassing van het model op de gekozen uitvoeringsvormen

4.1 Berekeningsresultaten per uitvoeringsvorm

De berekeningsresultaten per uitvoeringsvorm (in totaal 10 stuks) kunt U vinden in bijlage B. Er is voor gekozen deze resultaten naar de bijlagen te verplaatsen, omdat per berekening een aanzienlijke hoeveelheid gegevens vastgelegd moet worden (zowel invoergegevens als uitvoergegevens). In de volgende paragrafen worden de belangrijkste berekeningsresultaten gepresenteerd, en worden de resultaten voor de verschillende uitvoeringsvormen vergeleken.

4.2 Overzicht energieverbruik van de 10 uitvoeringsvormen

In tabel 4.1 is een overzicht gegeven van het energieverbruik en de verschillende specifieke energieverbruiken (per m³ laadvolume, per m² displayoppervlak en per m meubellengte) gegeven. Dit overzicht is gebaseerd op de berekeningen opgenomen in bijlage B. In deze bijlage zijn ook per meubel alle gebruikte karakteristieken, zoals laadvolume en display oppervlak, gegeven.

Tabel 4.1 Overzicht energieverbruik gekozen uitvoeringsvormen

	Uitvoeringsvorm	Lengte (m)	Energieverbruik			
			kWh/dag	W/m ³	W/m ²	W/m
1	Vrieseiland (breed)	2.47	20.7	1040	317	349
2	Glasdeurkast	1.39	22.4	1226	548	670
3	Vrieskist met deksel	1.32	3.7	338	243	117
4	Roll-in meubel	0.97	12.4	1035	281	534
5	Open schappenkast	2.50	19.0	603	248	316
6	Koeleiland	2.44	14.8	1406	306	253
7	Vleesvitrine	3.67	12.7	-	173	144
8	Gesneden groente vitrine	3.00	7.1	461	89	99
9	Gebaksvitrine	1.80	3.2	965	60	75
10	Schappenkast banket	1.39	4.6	958	113	138

Blijft U erop attent dat de berekende energieverbruiken betrekking hebben op de specifieke gekozen uitvoeringsvorm, zoals omschreven in bijlage B. Het energieverbruik kan dus in de praktijk, voor de gemiddelde uitvoeringsvorm, afwijken van de waarde uit de tabel.

Wanneer we de invloed van verschillende parameters op het energieverbruik berekenen, is dit feit geen belemmering. Wanneer we echter het (in Nederland) geïnstalleerde vermogen berekenen op basis van bijvoorbeeld de totale meubellengte, kunnen afwijkingen optreden. Daarom wordt in hoofdstuk 7 het energieverbruik nogmaals berekend voor dezelfde uitvoeringsvormen, maar nu bij een gemiddelde lengte van het meubel.

4.3 Warmtestromen in de 10 uitvoeringsvormen

Vooraf omdat we in de volgende hoofdstukken de mogelijkheden tot besparing willen onderzoeken, is het van belang te weten waar de grootste verliezen optreden. Onze inspanningen kunnen we dan in eerste instantie richten op de verkleining van de belangrijkste verliesposten. In deze paragraaf zullen we de inkomende warmtestroom opsplitsen in een aantal deelstromen, die in het spreadsheet model worden berekend. We gebruiken de volgende indeling:

$$\dot{Q}_o = \dot{Q}_i + \dot{Q}_s + \dot{Q}_c + \dot{Q}_o + \dot{Q}_v$$

$\dot{Q}_o$ = totale (door verdamper af te voeren) inkomende warmtestroom (Watt)

$\dot{Q}_i$ = geleidingswarmtestroom (warmtestroom door de wanden)

$\dot{Q}_s$ = stralingswarmtestroom

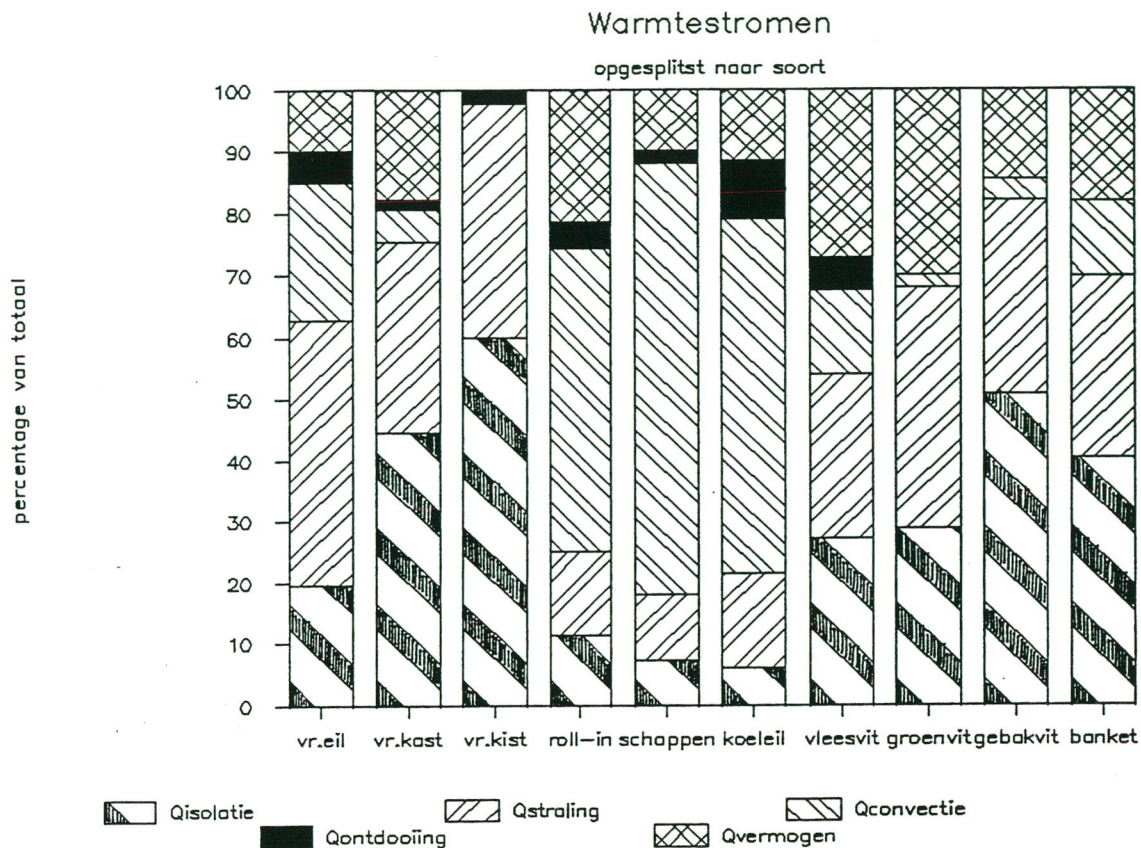
$\dot{Q}_c$ = convectiewarmtestroom (tengevolge van luchtuitwisseling)

$\dot{Q}_o$ = ontdooiwarmtestroom (overtollige warmte geleverd tijdens ontdooiing)

$\dot{Q}_v$ = vermogenswarmtestroom (afkomstig van elektrische apparatuur)

Alle warmtestromen zijn gemiddelden over 24 uur.

Het overzicht van de relatieve bijdrage van de verschillende warmtestromen voor de 10 uitvoeringsvormen is gegeven in figuur 4.1. Daarbij is de totale inkomende warmtestroom steeds op 100% gesteld.



Figuur 4.1 Relatieve bijdrage van verschillende warmtestromen

4.4 Energiestromen van de 10 uitvoeringsvormen

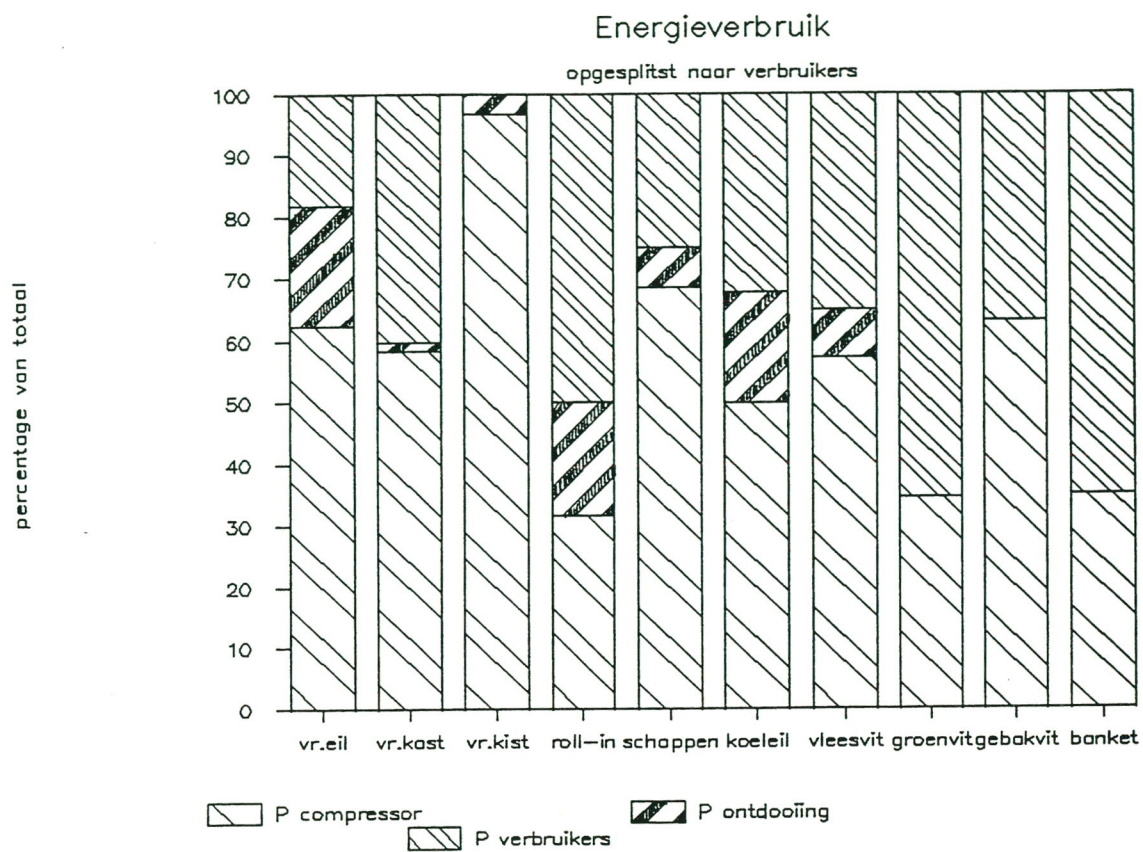
Na de beschouwing in de vorige paragraaf over de inkomende warmtestroom, is het ook nog nuttig om het energieverbruik op te splitsen in drie delen:

- Eén deel dat alleen voor de koeling wordt gebruikt (compressorvermogen)
- Eén deel dat voor het ontdooien wordt gebruikt
- Eén deel dat voor elektrische apparatuur wordt gebruikt.

We gebruiken dezelfde presentatiemethode als in de vorige paragraaf – het totale energieverbruik wordt op 100% gesteld.

Alle energiestromen zijn gemiddelden over 24 uur.

De resultaten vindt U in figuur 4.2. Er is een duidelijk verband tussen figuur 4.2 en figuur 4.1. Wanneer het verbruik van elektrische 'rand' apparatuur hoog is, is in figuur 4.1 de vermogenswarmtestroom tengevolge van de elektrische apparatuur ook relatief groot.



Figuur 4.2 Relatieve bijdragen van verschillende energiestromen

5 Inventarisatie van besparingsopties; kosten/baten

5.1 Technisch haalbare besparingsopties

In de inleiding is al vermeld dat wanneer we het hebben over besparingsopties, we ons beperken tot die opties die op dit moment (januari 1990) technisch realiseerbaar zijn. We beperken ons in dit onderzoek tot de besparingsopties die betrekking hebben op het meubel; besparingen op de koelinstallatie worden hier buiten beschouwing gelaten. Voorzover ons bekend, zijn de volgende opties mogelijk:

1. Verbeteren van het stromingspatroon van de circulatielucht.
2. Het beperken van de luchtuitstroom bij het openen van de deur.
3. Toepassing van een evenwijdige luchtstroom of een strokengordijn.
4. Het toepassen van nachtafdekking.
5. Toepassen van warmtestraling-reflecterende beglazing.
6. Toepassen van retro-reflecterende schermen.
7. Toepassen van warmtestraling-absorberende beglazing.
8. Het vergroten van de isolatiedikte.
9. Verandering van de oppervlakte/volume verhouding.
10. Beperking van het ontdooivermogen.
11. Verbetering koudefactor door grotere verdamper.
12. Verbeteren van het ventilatorrendement.
13. Energiezuinige verlichting.
14. Het gebruik van separate versus stekkerklare uitvoeringen.
15. Het gebruik van stille versus geforceerde koeling.

In de hierna volgende paragrafen kunt U vinden wat met de verschillende opties wordt bedoeld, en wat de meerkosten zijn bij het toepassen van de verschillende besparingsopties. In bijlage C zullen we de besparingen berekenen die met de verschillende opties gerealiseerd kunnen worden. De indeling van bijlage C is conform de indeling van dit hoofdstuk. Er is een elektriciteitsprijs gehanteerd van $f\ 0,15/\text{kWh}$, zoals die ook is gehanteerd in de SVEN-brochure 'Elektriciteits- en gasbesparing in de detailhandel' [Ref. 14].

5.2 Verbetering van het luchtstromingspatroon

In het algemeen blijkt (paragraaf 4.3) dat de verliezen tengevolge van de convectiewarmtestroom in veel open meubelen een grote, zo niet de grootste, bijdrage in het totaalverlies vormen. Dit is de reden waarom de beperking van de convectiewarmtestroom als eerste besparingsoptie wordt beschouwd. We kunnen de convectiewarmtestroom verminderen door verbetering van het luchtstromingspatroon.

De circulatielucht transporteert warmte van de produkten naar de verdamper, en speelt dus een cruciale rol in het koel- of vriesmeubel. De luchtcirculatie beïnvloedt het energie verbruik van het meubel dan ook op meer dan één manier. De volgende invloeden zijn in dit kader belangrijk:

- a. Door een verbeterde aanstroming van de verdamper kan het verschil tussen verdampertemperatuur en circulatieluchttemperatuur verminderd worden. Dit komt neer op een hogere verdampings-temperatuur, die via een verbeterde koudefactor resulteert in een lager energieverbruik.
- b. Door een verbeterd luchtstromingspatroon kan – bij meubelen zonder 'deur' – de opmenging van warme en koude lucht verminderd worden. Dit betekent een directe vermindering van de convectiewarmtestroom, zoals die in het model berekend wordt.
- c. Door een verbeterde luchtstroming kan het drukverlies door de circulatiekanalen verlaagd worden. Hierdoor kan het ventilator-vermogen lager gekozen worden. Dit werkt direct door in het vermogen van de 'verbruikers', maar bovendien in de door de verdamper af te voeren warmte.
- d. Door een verbeterde aanstroming van de produkten in het meubel, kan de warmte overdachtscoëfficiënt α vergroot worden. Bij een gelijkblijvende af te voeren warmtestroom $\dot{Q}$, kan dan het verschil tussen produkttemperatuur en circulatieluchttemperatuur verminderd worden omdat geldt:

$$\dot{Q} = a \cdot (T_{\text{produkt}} - T_{\text{circulatie}})$$

Bij gelijk blijvende produkttemperaturen betekent dit dat we een hogere circulatieluchttemperatuur kunnen toepassen. Een hogere circulatieluchttemperatuur komt op verschillende manieren tot uiting in een lager energieverbruik (via isolatiewarmtestroom, verbeterde koudefactor, en lagere ontdooibehoeft).

De kosten voor het verbeteren van het luchtstromingspatroon zijn hoofdzakelijk eenmalige onderzoekskosten, die verdeeld kunnen worden over een gehele te produceren serie. We kunnen hier denken aan berekeningen met een luchtstromingspakket (bijvoorbeeld 'PHOENICS' [Ref. 15]), maar ook aan beproevingen op laboratoriumschaal. De investeringskosten per geproduceerde eenheid zullen betrekkelijk laag zijn, daar het gaat om kleine constructieve aanpassingen (afronden van hoeken, aanpassen uitblaasrooster, etc.). Een ruwe schatting is dat de kosten per meter meubel ca. f 200,- zullen bedragen, indien we het hebben over een grotere serie (uitgaande van f 100,- onderzoekskosten en f 100,- aanpassingskosten per meubel).

In bijlage C (paragraaf C.2) zijn berekeningen uitgevoerd om de baten te bepalen die we kunnen realiseren door het verbeteren van het luchtstromingspatroon. De resultaten hiervan vindt U in onderstaande tabel. De vrieskist en de vleesvitrine (uitvoeringsvormen 3 en 7) ontbreken in de lijst, omdat hier geen geforceerde luchtstroom wordt toegepast. In de eerste kolom is de berekende besparing in kWh per dag gegeven, die vervolgens omgerekend is naar de energiebesparing (in guldens) per jaar. In de laatste kolom is de terugverdientijd gegeven (investering gedeeld door besparing per jaar).

Tabel 5.1 Terugverdientijd bij verbetering van het luchtstromingspatroon

Uitvoeringsvorm		Berekend effect 'stromingspatroon'			
		Baten kWh/dag	f/jr	Terugverdientijd (invest. f 200,-)	+/-
1	Vrieseiland (breed)	3.4	186	1,1 jaar	+
2	Glasdeurkast	1.5	82	2,4 jaar	+
4	Roll-in meubel	1.4	77	2,6 jaar	+
5	Open schappenkast	2.3	126	1,6 jaar	+
6	Koeleiland	2.2	120	1,7 jaar	+
8	Gesneden groente vitrine	0.2	11	18 jaar	-
9	Gebaksvitrine	0.2	11	18 jaar	-
10	Schappenkast banket	0.2	11	18 jaar	-

De laatste kolom in tabel 5.1 geeft een oordeel over de optie; bij een terugverdientijd korter dan 3 jaar is het oordeel positief, bij een langere terugverdientijd negatief.

5.3 Het beperken van de luchtuitstroom bij het openen van de deur

Bij koel- en vriesmeubelen waar deuren worden toegepast, kunnen we proberen de verliezen door uitstromende koude lucht te beperken. We moeten hier voor de verschillende uitvoeringsvormen verschillende strategieën toepassen.

Voor de glasdeurkast en de schappenkast banket (een schappenkast bij hogere temperatuur) compartimenteren we de deur in 4 delen. De extra kosten voor scharnieren, handvatten en bekabeling schatten we op f 150,-. Bij de vrieskist met deksel brengen we alleen intern een tussenschot aan, de opening bestaat reeds uit twee schuifpanelen. Geschatte kosten hiervoor zijn f 25,-.

De gesneden groentevitrine is voorzien van een aantal laden. We zullen bij elke lade een kunststof gordijn aanbrengen om uitstroom van koude lucht te verhinderen.

De gebaksvitrine is reeds ingedeeld in twee compartimenten. Om de verliezen hier verder te beperken, zullen we de twee compartimenten nogmaals opdelen. Er wordt al gewerkt met glazen schuifpanelen, zodat de meerkosten niet hoog zullen zijn. We schatten de meerkosten op ca. f 50,-.

In bijlage C.3 wordt de verwachte besparing beschreven en uitgewerkt. In deze paragraaf geven we alleen de resultaten in de vorm van meerinvestering, besparing en terugverdientijd (tabel 5.2). Er is wederom uitgegaan van een energieprijz van f0,15/kWh.

Tabel 5.2 Terugverdientijd bij het beperken van verliezen bij deuropening

Uitvoeringsvorm		Berekend effect 'deurverliezen'			
		Kosten (f)	Baten f/jr	Terugverdientijd	+/-
2	Glasdeurkast	150,-	60,-	2,5 jaar	+
3	Vrieskist met deksel	25,-	5,-	5 jaar	-
8	Gesneden groente vitrine	50,-	2,-	25 jaar	-
9	Gebaksvitrine	50,-	2,-	25 jaar	-
10	Schappenkast banket	150,-	11,-	14 jaar	-

Uit bovenstaande tabel blijkt dat het beperken van deurverliezen alleen voor de glasdeurkast (op diepvriestemperatuur) zinvol is. Het beperken van de verliezen is in dit geval bereikt door het compartimenteren van de inhoud in 4 compartimenten. Hierbij is elk compartiment voorzien van een 'eigen' deur. In de praktijk betekent dit een vastliggende indeling van de kast, hetgeen bij de afnemers op bezwaren stuit.

5.4 Toepassing van een strokengordijn

Het toepassen van een strokengordijn kan zinvol zijn bij meubelen met een verticale display, die niet voorzien zijn van een deur. Het gordijn dient in eerste instantie om de opmenging van koude en warme lucht te voorkomen (convectiewarmtestroom), maar kan als bijkomend effect hebben dat minder vocht het meubel binnentreedt, zodat er minder rijpvorming op de verdampers optreedt. (Minder rijpvorming betekent dat we minder ontdooivermogen nodig hebben).

We kunnen het strokengordijn toepassen bij het roll-in meubel, de open schappenkast, en eventueel voor de bedieningsopening van een vleesvitrine.

Een berekening van de baten van een strokengordijn wordt gegeven in bijlage C.4. De kosten van het strokengordijn bedragen ca. f 50,- per vierkante meter.

Tabel 5.3 Terugverdiëntijd van een strokengordijn

Uitvoeringsvorm		Berekend effect 'strokengordijn'			
		Kosten (f)	Baten f/jr	Terugverdiëntijd	+/-
4	Roll-in meubel	92,-	22,-	4 jaar	-
5	Open schappenkast	160,-	131,-	1,2 jaar	+
7	Vleesvitrine	75,-	33,-	2,3 jaar	+

Omdat het strokengordijn gezien wordt als een remmende factor op de zogenaamde 'impuls verkoop', verwachten we dat deze besparingsoptie op weerstand zal stuiten in de detailhandel sector. (Bij tankstations wordt het strokengordijn wel toegepast, omdat hier minder sprake is van impuls verkoop.) We zullen daarom deze optie niet verder meenemen, maar in plaats daarvan in de volgende paragraaf een afschermende evenwijdige luchtstroom beschouwen, die vrijwel hetzelfde effect heeft.

5.5 Toepassing van een afschermende evenwijdige luchtstroom

Een geforceerde (omgevings)luchtstroom buiten het meubel, die evenwijdig is aan de circulatieluchtstroom en een even grote snelheid heeft, kan dienen om de opmenging van warme en koude lucht te beperken. De opmenging tussen twee parallelle luchtstromen is kleiner dan tussen tegengestelde luchtstromen, of tussen een luchtstroom en stilstaande lucht.

Voor het verkrijgen van een evenwijdige luchtstroom is een separate ventilator benodigd. Bovendien moet het meubel enigszins anders worden gedimensioneerd, omdat deze luchtstroom vóór de display opening moet worden gecreëerd. De meerinvestering schatten we op ca. f 350,- (f 100,- voor de ventilator en f 250,- voor aanpassing van het meubel).

De baten worden worden overgenomen uit de berekening van de baten van het strokengordijn (bijlage C.4). De resultaten, uitgedrukt in een terugverdiëntijd, vindt U in onderstaande tabel 5.4.

Tabel 5.4 Terugverdiëntijd bij een geforceerde evenwijdige luchtstroom

Uitvoeringsvorm		Effect van een evenwijdige luchtstroom			
		Kosten (f)	Baten f/jr	Terugverdiëntijd	+/-
4	Roll-in meubel	350,-	22,-	16 jaar	-
5	Open schappenkast	350,-	131,-	2,7 jaar	+
7	Vleesvitrine	300,-	33,-	9 jaar	-

5.6 Toepassing van afdekking 's nachts en in de weekeinden

Nachtafdekking van het display-oppervlak (met folie of een isolatiedeken) tijdens de 'non-selling hours' wordt al veelvuldig toegepast. De nachtafdekking vormt meestal geen onderdeel van het meubel, maar kan als apart systeem aangeschaft worden. Integratie in het meubel – als een soort rolgordijn – biedt voordelen, maar is duurder dan de goedkope aparte systemen.

De werking van nachtafdekking als besparingsoptie is zeer voor de hand liggend. Het beperkt de instraling (stralingswarmtestroom), en bij systemen die niet voorzien zijn van een deur beperkt het bovendien de opmenging van koude en warme lucht (convectiewarmtestroom). Dit alles natuurlijk alleen tijdens de nacht- en weekenduren, die ca. 60% van de totale bedrijfstijd vormen.

Het voordeel van nachtafdekking is het meest evident bij meubelen die zijn voorzien van een (goed werkende) thermostaat. Indien geen thermostaat aanwezig is, is het effect van de lagere warmte-instroming een verlaging van de produkttemperaturen.

De besparingen van nachtafdekking, per vierkante meter af te dekken oppervlak, zijn berekend in bijlage C. 4. De kosten kunnen variëren naar gelang de uitvoeringsvorm. Enkele bedragen die door een fabrikant genoemd worden zijn:

- handbediende rolgordijnen, ca. f 100,-/m²
- gemotoriseerde rolgordijnen, ca. f 280,-/m²
- afdekplaten voor horizontale eilanden, ca. f 130,-/m²
- thermostatische regelaar: f 150,- tot f 290,-

We zullen in eerste instantie uitgaan van de goedkope (handbediende) systemen om tot een terugverdientijd te komen. Daarbij moeten de kosten van de regelaar gedeeld worden over het af te dekken oppervlak. Overigens garandeert de leverancier een terugverdientijd van 24 maanden voor toepassing bij vries- en koeleilanden.

N.B. Voor de berekening van de besparing tengevolge van deze optie is afgeweken van de algemeen gevolgde methode, waarin warmte- en energiestromen gemiddeld zijn over 24 uur. Speciaal voor dit geval is gerekend met een dag/nachtcyclus. Er is uitgegaan van een dagtemperatuur van 21 °C en een nachttemperatuur van 16 °C. Voor de elektriciteitsprijs is gerekend met een nachttarief van f 0,11 / kWh.

Tabel 5.5 Terugverdientijd van nachtafdekking systemen

Uitvoeringsvorm		Berekend effect 'nachtafdekking'			
		Kosten (f)/m ²	Baten (f)/jr.m ²	Terugverdientijd	+/-
1	Vrieseiland	185,-	92,-	2,0 jaar	+
2	Glasdeurkast	188,-	54,-	3,5 jaar	-
3	Vrieskist met deksel	364,-	38,-	10 jaar	-
4	Roll-in meubel	182,-	47,-	3,9 jaar	-
5	Open schappenkast	147,-	61,-	2,4 jaar	+
6	Koeleiland	205,-	78,-	2,6 jaar	+
7	Vleesvitrine	134,-	19,-	7 jaar	-
8	Gesneden groente vitrine	145,-	4,-	33 jaar	-
9	Gebaksvitrine	135,-	2,-	56 jaar	-
10	Schappenkast banket	155,-	4,-	35 jaar	-

Uit de tabel blijkt dat een aantal toepassingen een terugverdientijd onder 3 jaar hebben. Als twijfelgeval gelden de glasdeurkast en het roll-in meubel, omdat hier de investeringskosten bij zitten voor een thermostatische regelaar. Wanneer die reeds aanwezig is, bedraagt de terugverdientijd minder dan drie jaar.

In de praktijk wordt de aanwezige nachtafdekking veelal niet systematisch toegepast. Het is daarom sterk aan te bevelen automatische systemen te gebruiken, om de gewenste besparing ook werkelijk te realiseren.

5.7 Het toepassen van infrarood reflecterende beglazing

De stralingswarmtestroom die het koel- of vriesmeubel binnenvalt bestaat uit een breed spectrum van straling met uiteenlopende golflengten. Een deel van het spectrum omvat het zichtbare licht, dat nuttig is voor de zichtbaarheid van de produkten. Maar boven een bepaalde golflengte (750 nm) omvat het spectrum infrarode straling, die wel een bijdrage levert aan de warmtestroom, maar verder niet nuttig is.

Het is mogelijk folies te produceren die infrarode straling reflecteren en zichtbaar licht doorlaten. Door de TU Delft is een studie verricht naar dergelijke folies [Ref. 16], waarin een folie wordt beschreven dat ca. 50% van de warmte-inhoud van de straling reflecteert, maar zichtbaar licht doorlaat.

Dit gebeurt door een kunststof folie te coaten met zwaar gedoteerd halfgeleidermateriaal, zoals indium-oxide. De kosten van dit 'indium-oxide' folie worden geschat op f 70,-/m².

Bij gebruik van tin-oxide zullen de kosten lager zijn (ca f 16,-/m²), maar er wordt aan getwijfeld of de benodigde doteringsgraad haalbaar is met tinoxide. Daarom gaan we hier voorlopig uit van het indium-oxide folie.

De baten bij toepassing van een infrarood (IR) reflecterend folie worden berekend in bijlage C.6. De berekende terugverdiertijden vindt U in tabel 5.6. De terugverdiertijden voor glasdeurkast en vrieskist zijn kleiner dan 3 jaar. Het is bekend dat tenminste één producent zijn vrieskisten reeds uitvoert met infrarood reflecterende beglazing.

Tabel 5.6 Terugverdiertijd van infrarood reflecterende beglazing

	Uitvoeringsvorm	Berekend effect 'Infrarood reflectie'			
		Kosten (f/m ²)	Baten (f/jr.m ²)	Terugverdiertijd	+/-
2	Glasdeurkast	70,-	87,-	0,8 jaar	+
3	Vrieskist met deksel	70,-	60,-	1,2 jaar	+
7	Vleesvitrine	70,-	17,-	4 jaar	-
8	Gesneden groente vitrine	70,-	9,-	8 jaar	-
9	Gebaksvitrine	70,-	5,-	14 jaar	-
10	Schappenkast banket	70,-	9,-	8 jaar	-

5.8 Het toepassen van retro-reflecterende schermen

Bij koel- en vriesmeubelen die niet zijn voorzien van een glasdeur, is het niet mogelijk om infrarood straling te reflecteren met de methode uit de vorige paragraaf. TNO Warmte- en Koudetechniek is echter bezig met de ontwikkeling van een retroreflecterend folie. Dit folie kan op het plafond boven een koel- of vrieseiland worden aangebracht. Het folie reflecteert infrarood straling naar de bron, zodat minder straling het meubel binnentreedt. Met plaatvormige retroreflectoren is reeds een reductie in de invallende stralingswarmtestroom gemeten van 50% [Ref. 17]. Alhoewel het folie nog niet beschikbaar is, voeren we hier toch een berekening van de terugverdiertijd uit. De kosten van het folie zullen ca. f10,-/m² bedragen [Ref. 18], terwijl het folieoppervlak ongeveer 4 maal zo groot moet zijn als het display-oppervlak voor een optimaal rendement.

Tabel 5.7 Terugverdiertijd van retroreflecterende folie op plafond

	Uitvoeringsvorm	Berekend effect 'Retroreflectie'			
		Kosten (f)	Baten (f/jr)	Terugverdiertijd	+/-
1	Vrieseiland	109,-	183,-	0,6 jaar	+
6	Koeleiland	81,-	38,-	2,1 jaar	+

5.9 Het toepassen van warmtestraling absorberende beglazing

In de koel- en vriesmeubelen met glazen deur zien we steeds de toepassing van ruitverwarming om condensvorming aan de buitenkant, en rijpvorming aan de binnenkant van de deur te voorkomen. Het spreekt voor zich dat het gebruik van verwarming (met een vaak aanzienlijk vermogen) in een koel- of vriesmeubel niet bepaald gunstig is voor het energieverbruik.

Een elegante manier om het ruitverwarmingsvermogen te beperken is het toepassen van een stralingsabsorberende laag op de ruit. De bedoeling is om het infrarood deel van de invallende straling te absorberen, en om te zetten in warmte die direct als ruitverwarming dienst doet. Hiermee bezuinigen we op (elektrisch) ruitverwarmingsvermogen, en tegelijkertijd verminderen we de stralingswarmtestroom. Vanzelfsprekend moet het zichtbare deel van het spectrum ongehinderd het glas kunnen passeren, opdat de uitgestalde produkten goed zichtbaar blijven. De absorptie moet zowel aan de binnenzijde als aan de buitenzijde plaatsvinden, zodat we moeten werken met dubbelzijdig 'gecoat' glas. Er moet een berekening gemaakt worden over de mate van absorptie aan de buiten- en aan de binnenzijde, om tot een optimale verdeling te komen.

In afwachting van de kostenopgave van de fabrikant van gecoat glas, schatten we de meerkosten op ca. f 50,-/m².

De berekende terugverdientijden (zie ook bijlage C) vindt U in tabel 5.8.

Tabel 5.8 Terugverdientijd van infrarood absorberende beglazing

Uitvoeringsvorm		Berekend effect 'Infrarood absorptie'			
		Kosten (f/m ²)	Baten (f/jr.m ²)	Terugverdientijd	+/-
2	Glasdeurkast	50,-	148,-	0,3 jaar	+
3	Vrieskist met deksel	50,-	17,-	2,9 jaar	+
7	Vleesvitrine	50,-	34,-	1,5 jaar	+
8	Gesneden groente vitrine	50,-	13,-	4 jaar	-
9	Gebaksvitrine	50,-	10,-	5 jaar	-
10	Schappenkast banket	50,-	39,-	1,3 jaar	+

5.10 Het vergroten van de isolatiedikte

Op het eerste gezicht lijkt het vergroten van de isolatiedikte een eenvoudige methode om energie te besparen. We moeten echter niet vergeten dat we geïnteresseerd zijn in gunstige terugverdientijden, zodat de isolatiedikte de 'economisch optimale' isolatiedikte moet zijn. Deze zal afhangen van de energieprijzen. We kunnen bij de gekozen uitvoeringsvormen de gevoeligheid bestuderen door de isolatiedikte met bijvoorbeeld 20% te vergroten, en daarbij een terugverdientijd te berekenen op basis van de geschatte meerkosten. Geschatte meerkosten zijn f 10,-/m².cm.

Wel wijzen we erop dat een toename van de isolatiedikte óf een verkleining van de inhoud, óf een vergroting van het vloeroppervlak betekent, hetgeen in de praktijk op weerstanden kan stuiten.

Tabel 5.9 Terugverdiëntijd van 20% grotere isolatiedikte

Uitvoeringsvorm		Berekend effect 'Isolatiedikte + 20%'			
		Kosten (f/m ²)	Baten (f/jr.m ²)	Terugverdiëntijd	+/-
1	Vrieseiland	10,-	3,07	3,3 jaar	-
2	Glasdeurkast	10,-	3,95	2,5 jaar	+
3	Vrieskist met deksel	12,-	2,03	6 jaar	-
4	Roll-in meubel	6,-	0,44	14 jaar	-
5	Open schappenkast	10,-	0,49	20 jaar	-
6	Koeleiland	10,-	0,93	11 jaar	-
7	Vleesvitrine	7,-	1,15	6 jaar	-
8	Gesneden groente vitrine	10,-	0,33	30 jaar	-
9	Gebaksvitrine	10,-	0,33	30 jaar	-
10	Schappenkast banket	10,-	0,33	30 jaar	-

5.11 Besparen door een gunstigere oppervlakte/volume verhouding

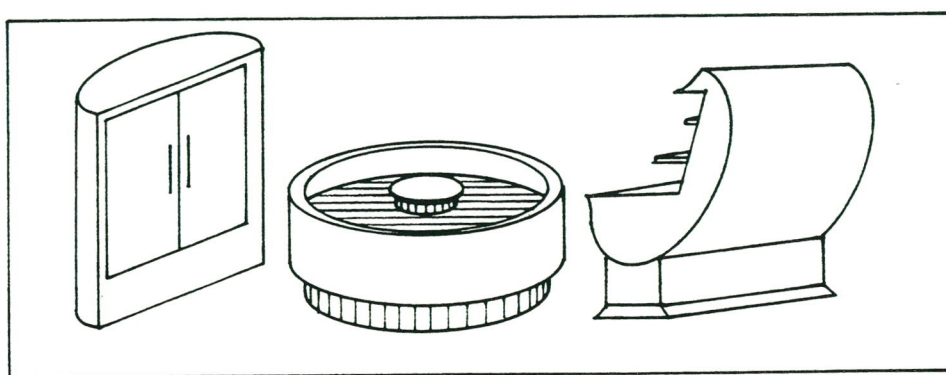
Omdat alle warmte-overdrachtprocessen zich aan een oppervlak voltrekken, kunnen we energie besparen door de oppervlakte/volume-verhouding te verlagen. In het algemeen is de exploitant van de koel- of vriesmeubelen echter geïnteresseerd in een zo groot mogelijk display-oppervlak.

Een manier om de oppervlakte/volumeverhouding te verkleinen, zonder de dimensies van het meubel echt te veranderen, is het vergroten van de lengte van het meubel. We kunnen het energieverbruik berekenen bij een twee keer zo lange uitvoering van het meubel. De besparing ten opzichte van twee aparte meubelen treedt op omdat er in plaats van 4 zijwanden slechts twee zijwanden nodig zijn.

We merken hier bovendien op dat de 'meerkosten' er in dit geval niet zijn; omdat in plaats van vier slechts twee zijwanden aanwezig zijn, en er dus twee wanden uitgespaard worden. We kunnen dus bij voorbaat stellen dat een zo lang mogelijk meubel altijd de voorkeur geniet boven meerdere aparte meubelen.

Een betere oppervlakte/volume verhouding kan ook bereikt worden door het meubel 'dieper' te maken. Hier dienen we echter rekening te houden met fundamentele gebruiksaspecten van de meubelen. een meubel mag natuurlijk niet zo diep zijn dat de consument de 'onderste' producten niet meer kan bereiken. Bovendien hebben we hier te maken met het gebruiksdoel: de meubelen dienen veelal niet voor opslag van de producten, maar juist voor de presentatie. We gaan er daarom van uit dat de huidige meubelen het gebruiksdoel optimaal tot uiting brengen, en zullen het 'dieper' maken van de meubelen hier niet verder beschouwen.

Een laatste benadering van een optimale oppervlakte/volume verhouding is het gebruik van cilindrische of veelhoekige meubelen. Bij gelijkblijvend presentatie-oppervlak en laadvolume, zullen we dan minder wandoppervlak nodig hebben (zodat de isolatiewarmtestroom relatief kleiner wordt). Bij meubelen 'met bediening', zoals het slagersmeubel (vleesvitrine) lijkt een cylindervorm moeilijk uitvoerbaar. De verkoper zou dan in het midden moeten staan, en een uitloop-doorgang moeten hebben (figuur 5.1). Dit levert echter geen verbetering van de oppervlakte/volumeverhouding. Voor de zelfbedieningsmeubelen zijn er wel perspectieven. De cilindrische meubelen hebben een 'revolutionair' uiterlijk (figuur 5.1).



Figuur 5.1. Cilindrische meubelvormen: links een cylindervormige glasdeurkast, in het midden een rond vries- of koeleiland, en rechts een cilindrisch verticaal meubel (open schappenkast).

Door de cylindervorm neemt het geïsoleerde wandoppervlak af, zodat de geleidingswarmtestroom afneemt. Het effect op het energieverbruik is echter gering (enkele procenten), terwijl de investeringskosten waarschijnlijk hoog zijn. Enerzijds kan worden bespaard op materiaalkosten, maar anderzijds is het werken met cilindrische vormen technisch moeilijker dan het werken met vlakke platen. De berekende energiebesparing vindt U in tabel 5.10.

Tabel 5.10 Besparing op energiekosten bij cilindervormige meubelen

Uitvoeringsvorm		Besparing door cilindervorm		
		Standaard opp. (m ²)	Cylindervorm opp. (m ²)	Besparing
1	Vrieseiland	8.21	7.62	20,-
2	Glasdeurkast	7.89	7.38	13,-
3	Vrieskist met deksel	3.56	3.02	8,-
5	Open schappenkast	13.11	9.26	14,-
6	Koeleiland	5.25	4.56	4,-
10	Schappenkast banket	7.89	7.38	1,-

5.12 Beperking van het ontdooivermogen

Bij koel- en vriesmeubelen vormt zich tijdens het gebruik een rijplaag op de verdamper, wanneer de verdampertemperatuur lager dan 0 °C is. Wanneer deze rijplaag in dikte toeneemt, wordt de te koelen luchtstroom gehinderd in de doorstroming, en bovendien neemt de warmte-overdracht van verdamper naar de circulatielucht doorgaans af. Daarom moet de verdamper ontdooit worden, wanneer zich een rijplaag heeft gevormd.

Het moge duidelijk zijn dat ontdooien en koelen niet samengaan, daarom is er sprake van een 'ontdooicyclus'. Deze ontdooicyclus treedt enkele malen per dag op, waarbij het inschakelen kan geschieden door middel van een tijd klok of door middel van een ontdooisensor. In het laatste geval wordt alleen ontdooit wanneer de noodzaak daartoe bestaat, hetgeen ook wel wordt aangeduid met de term 'defrost on demand'.

De duur van de ontdooicyclus kan ook weer worden bepaald door een tijd klok, of door middel van een sensor. In het eerste geval bedraagt de duur van de ontdooicyclus een vast ingestelde waarde (veelal 30 minuten). In het tweede geval wordt door middel van de sensor geconstateerd wanneer de verdamper 'ijsvrij' is, en vervolgens de ontdooicyclus beëindigd.

De ontdooisystemen die werken met een schakel klok, zijn zo afgeregeld dat de ontdooiing in alle voorkomende gevallen voldoende is. Dit betekent evenwel, dat in de meest voorkomende gevallen de ontdooiing te ruim bemeten is. Met andere woorden, er wordt te veel ontdooienergie toegevoerd.

Besparing is dus mogelijk met een goed functionerend 'defrost on demand' systeem.

De regeling van 'defrost on demand' systemen vindt plaats door middel van een rijpdetector. Daarnaast wordt echter de schakelklok gehandhaafd, als beveiliging tegen het slecht functioneren van de detector. Hieronder zijn de meest bekende rijpdetectiesystemen opgesomd, met een indicatie van de meerkosten.

- a) Temperatuurverschil van de circulatielucht over de verdamper. Wanneer de verdamper berijpt is, wordt de doorstroomopening kleiner en neemt het debiet van de circulatielucht af. Hierdoor ontstaat een groter temperatuurverschil.
- b) Drukverschil van de circulatielucht over de verdamper. Wanneer de doorstroomopening langs de verdamper kleiner wordt, neemt het drukverschil toe.
- c) Verschil tussen verdampingstemperatuur en circulatieluchttemperatuur. De warmte-overdracht van verdamper naar circulatielucht wordt bemoeilijkt door de rijplaag, waardoor het temperatuurverschil toeneemt.
- d) Piëzo elektrische opnemer. De oscillatiefrequentie van een piëzo elektrische opnemer verandert wanneer zich een rijplaag op de opnemer bevindt. Dit kan worden gedetecteerd met behulp van een elektronische schakeling.
- e) Infrarood diktemeting. De rijplaagdikte wordt direct gemeten met behulp van een infrarode lichtstraal.

We moeten hier helaas opmerken dat de prestatie van de genoemde systemen in de praktijk ofwel ontoereikend is, ofwel nog niet bekend is omdat het systeem nog niet wordt toegepast. Op het ogenblik wordt door TNO Warmte- en Koudetechniek een studie uitgevoerd naar de problemen met ontdooisensoren.

Deze studie wordt mede gefinancierd door de NOVEM.

Het ontdooien gebeurt in bestaande modellen met behulp van een elektrisch verwarmingselement. Ontdooien is ook mogelijk door gebruik te maken van 'persgas', wat betekent dat het hete persgas van de compressor direct door de verdamper wordt gestuurd. Ook is het mogelijk dat de ontdooiing wordt gerealiseerd door middel van het over de verdamper leiden van warme omgevingslucht.

Uit de literatuur zijn waarden bekend voor het ontdooirendement dat bereikt kan worden met een bepaalde ontdooimethode, bij een bepaalde verdampertemperatuur. Deze gegevens zijn weergegeven in tabel 5.11.

Tabel 5.11 Ontdooirendementen elektrische en heet gas ontdooiing

Wijze van ontdooien	To (°C)	no (%)	tijd, ca. (min)
Elektrisch	- 5	40 - 60	10 - 20
	-25	20 - 30	15 - 30
	-32	15 - 30	20 - 35
Heet gas	- 5	50 - 70	10
	-25	30 - 50	10 - 15
	-32	20 - 40	15 - 20

Duidelijk is dat persgasontdooiing een beter rendement heeft dan elektrische ontdooiing. Bovendien wordt de ontdooi-energie geleverd door de compressor, waarbij door het warmtepompeffect minder elektrische energie benodigd is.

Persgasontdooiing kan echter alleen worden toegepast indien er ruimte is om de koudemiddelvulling uit de verdamper tijdelijk op te slaan. Dus moeten we gebruik maken van een opslagvat of van meerdere verdamper. De meerkosten van persgasontdooiing zijn daarom voor kleine installaties (te) hoog. Persgasontdooiing wordt wel toegepast bij grote (industriële) koelinstallaties.

In tabel 5.12 zijn voor een elektrische ontdooiing met 'defrost on demand' de terugverdientijden gegeven, op basis van de besparingen berekend in bijlage C.11.

We gaan uit van de helft van de besparing die mogelijk is met 'ideale' defrost on demand, omdat de ontdooisensoren in de praktijk (nog?) niet de gewenste prestaties behalen.

Tabel 5.12 Besparing op de elektrische ontdooiing met ontdooisensor

Uitvoeringsvorm		Berekend effect 'defrost on demand'			
		Meerkosten (f)	Baten (f/jr)	Terugverdientijd	+/-
1	Vrieseiland	300,-	110,-	2,7 jaar	+
2	Glasdeurkast	300,-	11,-	27 jaar	-
3	Vrieskist met deksel	300,-	5,-	60 jaar	-
4	Roll-in meubel	300,-	52,-	6 jaar	-
5	Open schappenkast	300,-	27,-	11 jaar	-
6	Koeleiland	300,-	25,-	12 jaar	-
7	Vleesvitrine	300,-	33,-	9 jaar	-

5.13 Het vergroten van het verdamperoppervlak

Door vergroting van het verdamperoppervlak zal het temperatuurverschil tussen circulatielucht en koelmiddel verkleinen, omdat het temperatuurverschil omgekeerd evenredig is met het oppervlak. Bovendien zal de luchtvochtigheid van de circulatielucht iets stijgen, wat echter een minimaal effect heeft op het energieverbruik. Door de hogere verdampingstemperatuur wordt de koudefactor van de installatie hoger, zodat voor hetzelfde koelvermogen minder compressorenergie benodigd is. Dit leidt tot een energiebesparing. De optredende besparing berekenen we in bijlage C. 12, de resultaten zijn gegeven in tabel 5.13. Wanneer stellen de prijs van de reeds aanwezige verdamper op f 500,- per kilowatt koelcapaciteit. Een vergroting van het verdamperoppervlak met 25% betekent dat de verdamperkosten ook ruwweg met 25% zullen toenemen. De meerinvestering zal dus afhangen van de koelcapaciteit (de koelcapaciteit van de installatie vindt U terug in bijlage C.12).

Tabel 5.13 Terugverdiëntijd van een 25% grotere verdamper

Uitvoeringsvorm		Berekend effect 'verdampervergroting'			
		Kosten (f)	Baten (f/jaar)	Terugverdiëntijd	+/-
1	Vrieseiland	100,-	36,-	2,8 jaar	+
2	Glasdeurkast	86,-	59,-	1,5 jaar	+
3	Vrieskist met deksel	30,-	4,-	8 jaar	-
4	Roll-in meubel	58,-	30,-	1,9 jaar	+
5	Open schappenkast	219,-	48,-	5 jaar	-
6	Koeleiland	97,-	27,-	4 jaar	-
7	Vleesvitrine	84,-	43,-	2,0 jaar	+
8	Gesneden groente vitrine	51,-	4,-	12 jaar	-
9	Gebaksvitrine	43,-	4,-	11 jaar	-
10	Schappenkast banket	34,-	3,-	10 jaar	-

5.14 Verbetering van het ventilatorrendement

De verdamperventilator dient om de lucht in het meubel te laten circuleren. Daartoe moeten we elektrisch vermogen aan de ventilator toevoeren. Maar dit elektrisch vermogen (omgezet in weerstandswarmte of wrijvingswarmte) moeten we vervolgens ook weer door de verdamper afvoeren. Dit kost ons dus 'dubbel' energie, zodat een besparing op het ventilatorvermogen – ook volgens de berekeningen – een zeer gunstig effect op het energieverbruik heeft. De besparing is uitgerekend in bijlage C.14.

Besparing is mogelijk door het toepassen van hoog rendement ventilatoren. We schatten de meerkosten van een HR ventilator op f 3,- per Watt standaard ventilatorvermogen.

Tabel 5.14 Terugverdientijden voor hoog rendement ventilatoren

Uitvoeringsvorm		Berekend effect 'HR ventilator'			
		Kosten (f)	Baten (f/jaar)	Terugverdientijd	+/-
1	Vrieseiland	219,-	88,-	2,5 jaar	+
2	Glasdeurkast	270,-	124,-	2,2 jaar	+
4	Roll-in meubel	174,-	57,-	3,1 jaar	-
5	Open schappenkast	231,-	71,-	3,3 jaar	-
6	Koeleiland	240,-	79,-	3,0 jaar	+
8	Gesneden groente vitrine	75,-	21,-	3,6 jaar	-
9	Gebaksvitrine	75,-	21,-	3,6 jaar	-
10	Schappenkast banket	75,-	21,-	3,6 jaar	-

5.15 Vermindering van het verlichtingsvermogen

Vermindering van het verlichtingsvermogen werkt op dezelfde manier door in het energieverbruik als vermindering van het ventilatorvermogen. Immers, de vrijgekomen warmte (99% van de elektrische energie) moet ook hier door de koelinstallatie worden afgevoerd. Als voorwaarde nemen we aan dat de lichtsterkte (in lumen) niet mag veranderen, om kwalitatief vergelijkbare situaties te behouden.

Een eerste idee is om de geproduceerde warmte uit het meubel te houden. Dit is mogelijk door de fluorescentiebuis in een plexiglas koker onder te brengen. De plexiglas koker staat aan beide uiteinden in verbinding met de omgeving, zodat de warmte van de fluorescentiebuis direct naar de omgeving kan stromen. Bij berekening blijkt echter dat op deze manier meer warmte (door de buiswand via geleiding) het meubel binnenkomt, dan wanneer de lichtbron niet afgeschermd is.

Een andere oplossing is het toepassen van 'hoogrendement' verlichting. Het is bekend dat de meest toegepaste fluorescentiebuis (kleurnummer 33) juist de laagste opbrengst (specifieke lichtstroom, lumen per Watt) heeft. Door het toepassen van een fluorescentiebuis met een hogere specifieke lichtstroom, kan dezelfde hoeveelheid licht met minder vermogen worden geproduceerd. De investeringskosten zijn hierbij gering. (ca. f 10,- per 25 W. fluorescentiebuis). De terugverdientijden zijn gegeven in tabel 5.15.

Tabel 5.15 Terugverdientijden bij toepassing van verlichting met een hogere specifieke lichtstroom

Uitvoeringsvorm		Berekend effect 'HR ventilator'			
		Kosten (f)	Baten (f/jaar)	Terugverdientijd	+/-
2	Glasdeurkast	10,-	14,-	0,7 jaar	+
4	Roll-in meubel	10,-	11,-	0,9 jaar	+
5	Open schappenkast	40,-	33,-	1,2 jaar	+
7	Vleesvitrine	60,-	53,-	1,1 jaar	+
8	Gesneden groente vitrine	60,-	43,-	1,4 jaar	+
10	Schappenkast banket	10,-	8,-	1,2 jaar	+

5.16 Centrale koelinstallaties versus stekkerklare meubelen

De netto koudefactor en bepaalt de verhouding tussen geleverd koelvermogen en benodigde elektrische energie. Installaties met een hoge koudefactor zijn efficiënter dan installaties met een lage koudefactor. Kleinere compressoren, zoals die worden toegepast in stekkerklare meubelen, hebben veelal een lagere koudefactor dan grote centrale koelinstallaties. Het effect hiervan valt echter niet in het kader van dit onderzoek, omdat hier alleen besparingen op het meubel worden beschouwd.

Een ander effect dat bij stekkerklare meubelen wel optreedt, en bij separate meubelen niet, is de opwarming van de omgevingslucht door de warmte die wordt afgestaan door de condensor. Dit kan betekenen dat de geleidingswarmtestroom voor een bepaalde wand groter is, wanneer de omgevingstemperatuur lokaal hoger is.

Hierdoor zal het verbruik van een stekkerklaar meubel altijd iets hoger zijn dan van een vergelijkbaar separaat meubel. Het berekende meerverbruik is vermeld in tabel 5.16.

De meerinvestering voor een centrale koelinstallatie is moeilijk te bepalen. Wanneer het gaat om een nieuw winkelontwerp, met een aantal koel- en vriesmeubelen, is het goed denkbaar dat een centrale koelinstallatie goedkoper is dan een aantal stekkerklare meubelen. Een en ander hangt vooral af van het aantal meubelen dat op de centrale installatie wordt aangesloten. Bij een klein aantal meubelen zal een centrale installatie juist duurder uitvallen.

Om bovenstaande redenen (meerinvestering onbekend) kunnen we niet de terugverdientijden berekenen voor een centrale installatie. Wel kunnen we het verschil in verbruik berekenen tussen een stekkerklaar meubel, en een meubel dat is aangesloten op een centrale installatie.

Het verschil in verbruik, dat is gegeven in tabel 5.16, heeft uitsluitend betrekking op het meerverbruik tengevolge van de iets hogere omgevingstemperatuur. Het effect van de lagere koudefactor bij stekkerklare installaties is hier niet vermeld. De meerkosten tengevolge van de lagere koudefactor zijn een orde groter (ca f 50,- tot f 100,-), maar vallen niet in het kader van dit onderzoek.

Tabel 5.16 Meerverbruik van stekkerklare uitvoeringsvorm van het meubel

Uitvoeringsvorm		Stekkerklaar vs. centrale installatie		
		centraal	stekkerklaar	verschil
1	Vrieseiland	20.7	20.9	10,-
2	Glasdeurkast	22.1	22.4	16,-
3	Vrieskist met deksel	3.7	3.8	7,-
4	Roll-in meubel	12.4	12.6	9,-
5	Open schappenkast	19.0	19.2	12,-
6	Koeleiland	14.8	14.9	4,-
7	Vleesvitrine	12.7	13.3	31,-
8	Gesneden groente vitrine	7.1	7.3	9,-
9	Gebaksvitrine	3.2	3.5	13,-
10	Schappenkast banket	4.5	4.6	4,-

5.17 Het gebruik van stille versus geforceerde koeling

In de meeste meubelen die in dit onderzoek werden beschouwd, is geforceerde koeling toegepast. Dit betekent dat de circulatielucht met een ventilator wordt gecirculeerd, waarbij uitblaassnelheden in de orde van 0,5 m/s tot 1,5 m/s gebruikelijk zijn.

Bij twee van de beschouwde meubelen (vrieskist en vleesvitrine) wordt gewerkt met stille koeling, waarbij natuurlijke convectie zorgt voor een zeer langzame circulatie van lucht langs de koeler.

Stille koeling is energiezuiniger dan geforceerde koeling. De redenen zijn dat er geen ventilatorvermogen nodig is, en dat de opmenging van warme en koude lucht drastisch wordt beperkt door de geringe lichtsnelheid.

Onder leiding van professor dr. ing. L. Váhl is in de jaren '80 onderzoek verricht naar de temperatuur- en energiehuishouding bij diepvriesmeubelen met natuurlijke luchtcirculatie. Binnenkort zullen de resultaten van dat onderzoek in een vaktijdschrift verschijnen.

Uit deze onderzoeken is gebleken dat het bij diepvriesmeubelen niet mogelijk is om met natuurlijke luchtcirculatie de gewenste temperatuur in het diepvriesmeubel te handhaven. Ook door het toepassen van een centrale schoorsteen of van dwarsstroomventilatoren onder in het meubel werd de gewenste temperatuur ($-18\text{ }^{\circ}\text{C}$) niet gehaald.

Wel werd bij vriesmeubelen met geforceerde koeling en een combinatie van verschillende besparingsopties een energieverbruik gemeten van $2,98\text{ kWh/dag}$ per meter, wat ca. 60% lager is dan het energieverbruik van het door ons beschouwde meubel. De gebruikte combinatie van opties was:

- een stralingsreflectiescherm
- een tweede luchtkoeler
- nachtafdekking
- verbeterd stromingspatroon door een andere vormgeving van het uitblaasrooster
- verhoging van het koelvermogen.

De combinatie reflectiescherm-nachtafdekking-verbeterd stromingspatroon zal in het volgende hoofdstuk terugkomen als een economisch haalbare combinatie van besparingsopties.

6 Toepassing van de besparingsopties per uitvoeringsvorm

6.1 Overzicht van de besparingsopties met gunstige terugverdientijd

In hoofdstuk 5 hebben we voor een aantal besparingsopties de terugverdientijden berekend voor de tien uitvoeringsvormen van koel- en vriesmeubelen. Alle opties die bij een bepaalde uitvoeringsvorm een gunstige terugverdientijd hebben, zijn in de tabellen van hoofdstuk 5 voorzien van een '+' teken. Deze opties zullen we 'haalbare opties' noemen.

We kunnen nu een 'besparingsoptie-uitvoeringsvorm matrix' opstellen, waarin we alleen de haalbare opties plaatsen. Deze matrix, met daarin de procentuele energiebesparing, vindt U in tabel 6.1.

Tabel 6.1 Energiebesparingsmatrix (besparing in %)

Optie	Meubel uitvoeringsvorm									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	16	7	.	11	12	15	.	.	.	.
2	.	5	.	.	.	.	.	.	.	.
3	.	.	.	.	12	.	.	.	.	.
4	30	10	.	18	25	26	.	.	.	.
5	.	12	19	.	.	.	.	.	.	.
6	16	.	.	.	.	5	.	.	.	.
7	.	21	5	.	.	.	14	.	.	25
8	.	3	.	.	.	.	.	.	.	.
9	2	1	4	.	1	½	.	.	.	½
10	9	.	.	.	.	.	.	.	.	.
11	3	5	.	4	.	.	6	.	.	.
12	8	10	.	.	.	10	.	.	.	.
13	.	1	.	2	3	.	8	11	.	3

Optie 1 : verbeterd stromingspatroon.	Meubel 1 : vrieseiland
Optie 2 : beperkt deuropeningsverlies.	Meubel 2 : glasdeurkast
Optie 3 : evenwijdige luchtstroom.	Meubel 3 : vrieskist
Optie 4 : nachtafdekking.	Meubel 4 : roll-in
Optie 5 : IR reflecterende beglazing.	Meubel 5 : schappenkast
Optie 6 : retroreflecterend folie.	Meubel 6 : koeleiland
Optie 7 : IR absorberende beglazing.	Meubel 7 : vleesvitrine
Optie 8 : vergroten isolatiedikte.	Meubel 8 : groentevitrine
Optie 9 : cilindrische uitvoering.	Meubel 9 : gebakvitrine
Optie 10: beperking ontdooivermogen.	Meubel 10: banketkast
Optie 11: vergroting verdamper.	
Optie 12: hoog rendement ventilator.	
Optie 13: hoog rendement verlichting.	

N.B.: We hebben in paragraaf 3.10 gezien dat één lang meubel in alle gevallen voordeliger is dan een aantal korte meubelen. Deze optie is niet in de matrix opgenomen, maar geldt altijd.

6.2 Combinatie van haalbare opties per uitvoeringsvorm

Hoe groot is de maximale energiebesparing voor een uitvoeringsvorm?

Om de maximaal haalbare energiebesparing – per uitvoeringsvorm – te berekenen, kunnen we niet zonder meer alle haalbare opties toepassen. De oorzaak is dat wanneer we één optie toepassen, het energieverbruik daalt, en het effect van een volgende optie daardoor wordt beperkt.

Dit kan ertoe leiden dat van deze 'volgende' optie de terugverdientijd boven de grens van 3 jaar komt te liggen.

We zullen dus met één optie moeten beginnen, en voor elke volgende optie opnieuw de terugverdientijd moeten berekenen. De volgorde waarin we dit doen wordt bepaald door de doelstelling: zoveel mogelijk energie besparen.

Voor alle tien de uitvoeringsvormen is een haalbare combinatie van besparingsopties berekend, die een zo groot mogelijke energiebesparing oplevert. De resultaten vindt U in tabel 6.2.

Tabel 5.16 Besparingsopties toegepast in combinatie met elkaar

Uitvoeringsvorm		Haalbare combinatie van opties	
		Haalbare opties (nrs)	Gecombineerde besparing (%)
1	Vrieseiland	1, 4, 6, 9	45
2	Glasdeurkast	2, 7, 9, 11, 12, 13	40
3	Vrieskist met deksel	5, 9	23
4	Roll-in meubel	4, 13	18
5	Open schappenkast	1, 4, 9, 13	37
6	Koeleiland	1, 4, 9	36
7	Vleesvitrine	7, 11, 13	28
8	Gesneden groente vitrine	13	11
9	Gebaksvitrine	-	-
10	Schappenkast banket	7, 9, 13	29

Optie 1 : verbeterd stromingspatroon.

Optie 2 : beperkt deuropeningsverlies.

Optie 4 : nachtafdekking.

Optie 5 : IR reflecterende beglazing.

Optie 6 : retroreflecterend folie.

Optie 7 : IR absorberende beglazing

Optie 9 : cilindrische uitvoering.

Optie 11 : vergroting verdamper.

Optie 12 : hoog rendement ventilator.

Optie 13 : hoog rendement verlichting.

Uit bovenstaande tabel kunnen we de maximale energiebesparing aflezen die economisch rendabel is bij een bepaalde uitvoeringsvorm. Opvallend is dat bij de gebaksvitrine geen verbetering mogelijk is. de reden hiervoor is eenvoudig dat geen enkele investering terugverdiend kan worden bij het lage energieverbruik (3,2 kWh/dag).

Bij de vriesmeubelen kan een aanzienlijk vermogen bespaard worden (bij de glasdeurkast 40% en bij het vrieseiland 45%). Hier zijn de besparingen veelal groot ten opzichte van de investering.

7 Energieverbruik in Nederland anno 1990

7.1 Schatting van het energieverbruik

In het in het rapport 'Overzicht modellen en voorraden koel- en vriesmeubelen in Nederland' [Ref. 1] is een schatting gemaakt van het totaal energieverbruik van koel- en vriesmeubelen in Nederland. Op basis van een ruwe schatting van het energieverbruik en een inventarisatie van de totale meubellengte in Nederland, werd een totaal energieverbruik gevonden van 1757 MWh per dag.

7.2 Energieverbruik van een gemiddeld koel- of vriesmeubel

We kunnen nu deze schatting nauwkeuriger uitvoeren op basis van het berekende energieverbruik van de koel- en vriesmeubelen. We moeten in dit geval werken met de **gemiddelde** uitvoeringsvorm, en niet met de gekozen uitvoeringsvorm zoals we die tot nu toe hebben gebruikt. Het verschil tussen gemiddelde en gekozen uitvoeringsvorm betreft voornamelijk de lengte van het meubel. Hiervoor wordt gecorrigeerd. Voor de overige verschillen (bijvoorbeeld afwijkende elektrische vermogens van verbruikers, andere oppervlakte/volume verhoudingen, glasopstanden etc.) wordt niet gecorrigeerd.

De gemiddelde meubellengte voor de verschillende typen koel- en vriesmeubelen is berekend aan de hand van informatie die reeds eerder was verzameld. Voor elk type meubel is gezocht naar de winkelsoort, waar het meubel het meest wordt aangetroffen. Voor deze winkelsoort is de gemiddelde lengte van de aangetroffen meubelen geschat. De gemiddelde lengte is vervolgens ingevoerd in het spreadsheet rekenmodel, om het bijbehorende energieverbruik te berekenen. De resultaten vindt U in tabel 7.1.

Tabel 7.1 Gemiddelde energieverbruik koel- en vriesmeubelen

	Uitvoeringsvorm	Gemiddeld verbruik per meter lengte (kWh/dag.m)
1	Vrieseiland	8.24
2	Glasdeurkast	15.58
3	Vrieskist met deksel	2.77
4	Roll-in meubel	11.56
5	Open schappenkast	7.45
6	Koeleiland	6.07
7	Vleesvitrine	3.46
8	Gesneden groente vitrine	2.36
9	Gebaksvitrine	1.78
10	Schappenkast banket	3.29

In vergelijking met de ruwe schattingen uit het rapport 'Overzicht modellen en voorraden koel- en vriesmeubelen in Nederland', zijn de waarden voor de zelfbedieningsmeubelen iets hoger, maar voor de verkoopmeubelen juist iets lager.

7.3 Berekening van het energieverbruik anno 1990

Op basis van de bekende voorraad koel- en vriesmeubelen in Nederland kan met het berekende energieverbruik per meubeltype (tabel 7.1) het totale energieverbruik worden berekend van koel- en vriesmeubelen in de detailhandel.

We doen dit geheel analoog aan de gevolgde werkwijze bij de ruwe schatting. De resultaten zijn gegeven in tabel 7.2.

Tabel 7.2 Berekend totaal energieverbruik in de detailhandel

Type	Verbruik [kWh/dag.m]	Voorraad [km]	Totaalverbruik [MWh/dag]
Diepvries			
vrieseiland smal	6.51	41	267
breed	8.24	16	132
kist met deksel	2.77	12	33
glasdeurkast	15.58	7	109
Koeling (zelfbediening)			
koeleiland	6.07	14	85
roll-in zuivel	11.56	9	104
schappenkast (open)	7.45	77	574
Koeling (bediening)			
vitruines — vlees	3.46	82	284
— groente	2.36	10	24
— gebak	1.78	9	16
— overig	2.53	27	68
schappenkast met deur	3.29	10	33
Totaal		314	1728

De berekende waarden hebben betrekking op de specifieke uitvoeringsvormen waaraan het model is gevalideerd. Om tot gemiddelde verbruiken te komen, zijn alle uitvoeringsvormen geschaald naar de gemiddelde meubellengte voor het betreffende type, zoals die wordt aangetroffen in de detailhandel.

De spreiding in energieverbruik van koel- en vriesmeubelen is groot. Uit de studie van Columbus [Ref. 13] bleek bij een serie van 21 vrieseilanden het gemiddelde verbruik 2.35 kWh/m^3 te zijn, met een standaarddeviatie van 0.91 kWh/m^3 . Ook bij de overige meubelen is de spreiding in energieverbruik naar verwachting groot.

Het berekende totaalverbruik (1728 MWh/dag) wijkt minder dan 2% af van de ruwe schatting die is gegeven in [Ref. 1].

Op jaarbasis bedraagt het berekende elektriciteitsverbruik 630 GWh.

8 Energiebesparingspotentieel 1990-2000

8.1 Het economisch haalbare potentieel

De term 'potentieel' houdt een 'potentie' oftewel mogelijkheid in. De mogelijke energiebesparing is aan geen andere grens gebonden dan de huidige haalbare besparingsopties. Dit potentieel kunnen we eenvoudig berekenen door voor elke uitvoeringsvorm de economisch haalbare besparing toe te passen (zoals die is berekend in paragraaf 8.2). Deze handelwijze is uitgewerkt in tabel 8.1.

Tabel 8.1 Besparingspotentieel bij een terugverdientijd van 3 jaar

Type	Normaal verbruik [MWh/dag]	Minimaal verbruik [MWh/dag]	Besparings- potentieel [MWh/dag]
Diepvries			
vrieseiland smal	267	147	120
breed	132	73	59
kist met deksel	33	26	7
glasdeurkast	109	65	44
Koeling (zelfbediening)			
koeleiland	85	54	31
roll-in zuivel	104	85	19
schappenkast (open)	574	361	213
Koeling (bediening)			
vitruines			
— vlees	284	204	80
— groente	24	21	3
— gebak	16	16	0
— overig	68	60	8
schappenkast met deur	33	23	10
Totaal	1728	1136	593

Het besparingspotentieel bedraagt 593 MWh per dag, oftewel 34% van het huidige verbruik. Wanneer we dit verbruik terugrekenen naar continu – gemiddeld – vermogen, vinden we een vermogen van 24,7 MW (MegaWatt).

Per meubeltype gezien varieert het besparingspotentieel aanzienlijk. De open schappenkast biedt het grootste potentieel (213 MWh/dag). De oorzaak is dat de procentuele besparing per meubel hoog is, en ook de voorraad zeer groot is (77 km).

We kunnen de meubelen indelen in koelmeubelen en vriesmeubelen, en voor elke groep het besparingspotentieel berekenen. Dan blijkt dat van het totale besparingspotentieel 39% afkomstig is van vriesmeubelen, en 61% afkomstig is van koelmeubelen.

Alhoewel de maximaal haalbare besparing per meubel kleiner is bij koelmeubelen dan bij vriesmeubelen, is het besparingspotentieel groter vanwege de grotere voorraad.

8.2 Besparingspotentieel per optie en per uitvoeringsvorm

In de vorige paragraaf is uitgegaan van de economisch haalbare energiebesparing per uitvoeringsvorm. Dit betekent dat we per uitvoeringsvorm een combinatie van besparingsopties toepassen. We kunnen echter ook voor elke haalbare optie apart het besparingspotentieel uitrekenen. We gaan hierbij uit van de 'energiebesparingsmatrix' uit tabel 8.1, die we omzetten in een 'besparingspotentiële matrix'.

Tabel 8.2 Besparingspotentiële matrix (potentieel in MWh/dag). Vermeld zijn opties met een terugverdientijd kleiner dan 3 jaar

	Meubel uitvoeringsvorm										
Optie	1	2	3	4	5	6	7	8	10	som	
1	64	8	.	11	69	13	.	.	.	165	
2	.	5	.	.	.	.	.	.	.	5	
3	.	.	.	.	69	.	.	.	.	69	
4	120	11	.	19	144	22	.	.	.	316	
5	.	13	6	.	.	.	.	.	.	19	
6	64	.	.	.	.	4	.	.	.	68	
7	.	23	2	.	.	.	40	.	8	73	
8	.	3	.	.	.	.	.	.	.	3	
9	8	1	1	.	6	½	.	.	¼	17	
10	36	.	.	.	.	.	.	.	.	36	
11	12	5	.	4	.	.	17	.	.	38	
12	32	11	.	.	.	9	.	.	.	52	
13	.	1	.	2	17	.	23	3	1	47	

Optie 1 : verbeterd stromingspatroon.

Optie 2 : beperkt deuropeningsverlies.

Optie 3 : evenwijdige luchtstroom.

Optie 4 : nachtafdekking.

Optie 5 : IR reflecterende beglazing.

Optie 6 : retroreflecterend folie.

Optie 7 : IR absorberende beglazing.

Optie 8 : vergroten isolatiedikte.

Optie 9 : cilindrische uitvoering.

Optie 10: beperking ontdooivermogen.

Optie 11: vergroting verdamper.

Optie 12: hoog rendement ventilator.

Optie 13: hoog rendement verlichting.

Meubel 1 : vrieseiland

Meubel 2 : glasdeurkast

Meubel 3 : vrieskist

Meubel 4 : roll-in

Meubel 5 : schappenkast

Meubel 6 : koeleiland

Meubel 7 : vleesvitrine

Meubel 8 : groentevitrine

Meubel 9 : gebakvitrine

Meubel 10: banketkast

Uit de matrix blijkt dat het (absoluut gezien) grootste besparingspotentieel wordt verkregen door toepassing van nachtafdekking bij open schappenkasten. Ook wanneer we alle meubeltypen gezamenlijk beschouwen, volgt dat de optie 'nachtafdekking' het grootste besparingspotentieel biedt. Wel moeten we opmerken dat nachtafdekking met name zinvol is wanneer automatische systemen worden gebruikt. Dit omdat bij handbediende systemen het effect te zeer afhankelijk is van menselijk handelen.

Verder valt op dat meubel 9, de gebakvitrine, geheel ontbreekt. Geen enkele besparingsoptie levert hier, absoluut gezien, voldoende besparing op om de investeringskosten te kunnen dekken.

8.3 Energiebesparing in het komende decennium

In de voorgaande paragrafen zijn de besparingspotentiën uitgerekend, uitsluitend op basis van technisch en economisch haalbare besparingsopties. Wanneer we een verwachting willen uitspreken over de besparing in het komende decennium (1990-2000), moet ook 'de markt' beschouwd worden.

In essentie hebben we te maken met een evenwicht tussen vraag en aanbod.

a) Het aanbod.

We kunnen het aanbod van koel- en vriesmeubelen onderverdelen in 'standaard' meubelen en energiezuinige meubelen. Onder standaard meubelen verstaan we dan bijvoorbeeld de in deze studie gekozen uitvoeringsvormen, zonder besparingsopties.

De energiezuinige meubelen zijn meubelen die voorzien zijn van één of meer besparingsopties, en veelal meer kosten dan de standaard meubelen. Daarnaast kunnen we ook de 'energiebesparingsappendages' zoals bijvoorbeeld nachtafdekkingsystemen tot het aanbod rekenen.

Het aanbod zal in de komende tien jaar van samenstelling veranderen.

Het aandeel van de energiezuinige meubelen in het aanbod ondervindt een 'opwaartse kracht' door onder andere overheidsstimulering of regelgeving en bij stijgende energieprijzen. Dalende energieprijzen zorgen voor een 'neerwaartse kracht'. Vanzelfsprekend is in de Europese situatie ook de vraag bepalend voor het aanbod.

b) De vraag.

De grootte van de vraag naar koel- en vriesmeubelen kunnen we inschatten wanneer we deze splitsen in twee delen: een vervangingsvraag en een 'groei'vraag. De vervangingsvraag wordt bepaald door de huidige voorraad en de levensduur, de groeivraag zal gelijke tred houden met de groei van de economie in het algemeen.

Het moeilijkste punt is de samenstelling van de 'vraagzijde': welk deel van de vraag zal energiezuinige meubelen betreffen? Er zal natuurlijk enig verband zijn met het aanbod aan energiezuinige meubelen, maar daarnaast spelen vele andere factoren een rol. Zeer belangrijke factoren in dit verband zijn de verkoopaspecten (zoals uiterlijk en display oppervlak) en de aanschafprijs. Het is bekend dat de aanschafprijs vaak los wordt gezien van de exploitatiekosten, hetgeen het hanteren van 'terugverdiertijden' bemoeilijkt.

De vraag wordt onderverdeeld in een vraag naar zuinige meubelen en een vraag naar standaard meubelen. De vraag naar meubelen, waarbij het energieaspect geen rol speelt (ongedifferentieerde vraag), wordt gesplitst in een deel zuinige meubelen en een deel standaard meubelen, op basis van het aanbod.

Het is duidelijk dat we op basis van bovenstaande beschouwingen niet tot een concrete waarde kunnen komen over de te verwachten energiebesparing in het komende decennium. Wel kunnen we een aantal vereenvoudigingen en veronderstellingen opstellen om tot een scenario te komen. Vervolgens berekenen we voor twee uiteenlopende scenario's de bijbehorende besparingen.

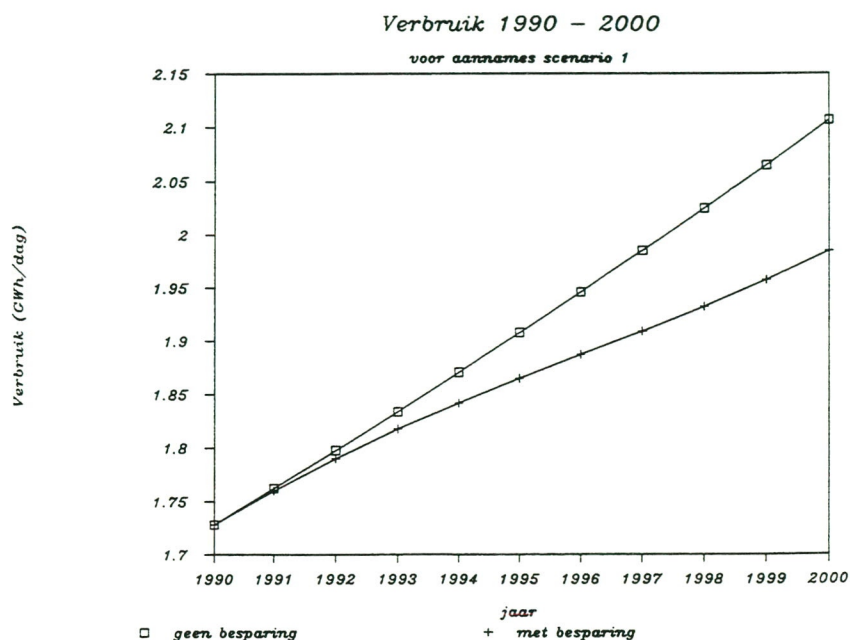
In scenario 1 veronderstellen we de volgende ontwikkelingen:

- het verbruik van alle meubelen uit de periode vóór 1990 is gelijk aan de in dit onderzoek berekende standaardverbruiken;
- levensduur koel- en vriesmeubelen 12 jaar (inclusief het tweedehands circuit);
- groei van de voorraad met 1.0% per jaar;
- de vraag, onderverdeeld in segmenten, ontwikkelt zich als volgt:

	1990	1991	1992	1993	1994 e.v.
1) vraag naar standaardmeubelen	40%	35%	30%	25%	25%
2) vraag naar zuinige meubelen	10%	15%	20%	25%	25%
3) ongedifferentieerde vraag	50%	50%	50%	50%	50%

- het aandeel van de zuinige meubelen in het aanbod volgt de vraag;
- de grootte van de besparing bij de energiezuinige meubelen wordt gesteld op 5% in 1990. Vervolgens loopt deze besparing op met 4% per jaar tot een maximum van 33% in 1996, waarna de besparing 33% blijft bedragen.

Dit eerste scenario veronderstelt een geringe interesse voor het energieverbruik van de koel- en vriesmeubelen, wat zich uit in een de vraag naar zuinige meubelen die zich stabiliseert op 25% van de totale vraag. Met dit scenario kan het verloop van de voorraad koel- en vriesmeubelen gevolgd worden in de loop der jaren, waarbij de voorraad onderverdeeld is in standaard- en energiezuinige meubelen. Het bijbehorende energieverbruik van de totale voorraad vindt U in figuur 8.1. Hierin is ter vergelijking de ontwikkeling aangegeven bij gelijkblijvend energieverbruik, welke overeenkomt met de voorraadontwikkeling.



Figuur 8.1 Ontwikkeling van het energieverbruik in de periode 1990-2000 van koel- en vriesmeubelen in scenario 1

Aan het eind van de berekende periode bestaat de voorraad koel- en vriesmeubelen in scenario 1 uit 87 km 'zuinige meubelen' en 296 km 'standaard' meubelen. De voorraad zuinige meubelen heeft een variërend besparingspercentage, dat afhankelijk van het jaar van aanschaf ligt tussen 5% en 33%.

De besparing in het jaar 2000 bedraagt in scenario 1 ca. 5,8% ten opzichte van een voorraad met alleen standaard meubelen.

Deze besparing komt overeen met 122 MWh per dag, oftewel een gemiddelde continu besparing van 5,1 MegaWatt.

In scenario 2 veronderstellen we de volgende ontwikkelingen:

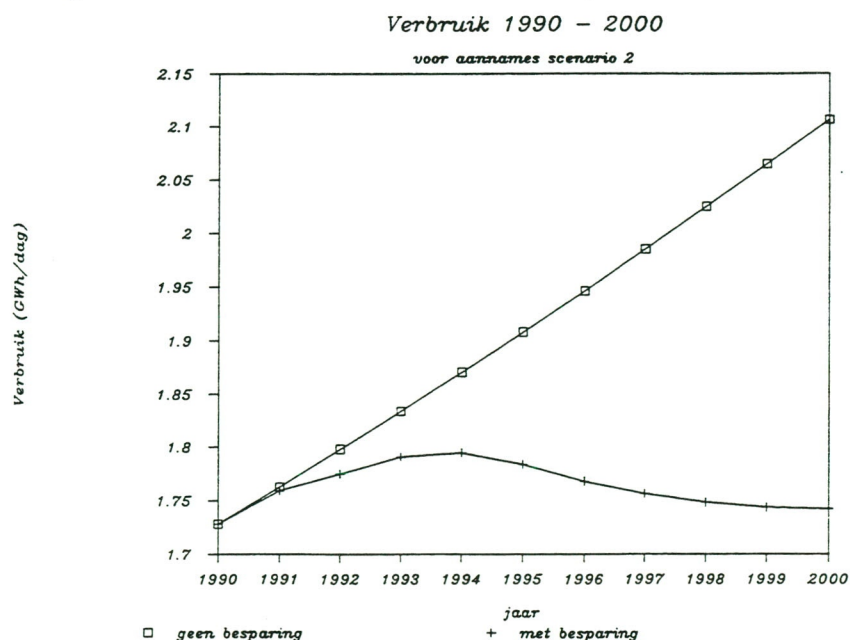
- het verbruik van alle meubelen uit de periode vóór 1990 is gelijk aan de in dit onderzoek berekende standaardverbruiken;
- levensduur koel- en vriesmeubelen 12 jaar (inclusief het tweedehands circuit);
- groei van de voorraad met 1.0% per jaar;
- de vraag, onderverdeeld in segmenten, ontwikkelt zich als volgt:

	1990	1991	1992	1993	1994 e.v.
1) vraag naar standaardmeubelen	40%	30%	20%	10%	0%
2) vraag naar zuinige meubelen	10%	25%	30%	40%	50%
3) ongedifferentieerde vraag	50%	50%	50%	50%	50%

- het aandeel van de zuinige meubelen in het aanbod volgt de vraag;
- de grootte van de besparing bij de energiezuinige meubelen wordt gesteld op 5% in 1990. Vervolgens loopt deze besparing op met 5% per jaar tot een maximum van 35% in 1996, waarna de besparing 35% blijft bedragen.

Dit tweede scenario veronderstelt een grote interesse voor het energieverbruik van de koel- en vriesmeubelen, wat zich uit in een de vraag naar zuinige meubelen die zich stabiliseert op 50% van de totale vraag. Omdat op dat moment de vraag naar standaard meubelen tot nul gereduceerd is, betekent dit dat het aanbod van zuinige meubelen doorstijgt naar 100% (omdat het aanbod de vraag volgt).

Ook met dit scenario kan het verloop van de voorraad koel- en vriesmeubelen gevolgd worden in de loop der jaren. Het bijbehorende energieverbruik van de totale voorraad vindt U in figuur 8.2.



Figuur 8.2 Ontwikkeling van het energieverbruik in de periode 1990-2000 van koel- en vriesmeubelen in scenario 12

Aan het eind van de berekende periode bestaat de voorraad koel- en vriesmeubelen in scenario 2 uit 218 km 'zuinige meubelen' en 164 km 'standaard' meubelen. De voorraad zuinige meubelen heeft een variërend besparingspercentage, dat afhankelijk van het jaar van aanschaf ligt tussen 5% en 35%.

De besparing in het jaar 2000 bedraagt in scenario 2 ca. 17,3% ten opzichte van een voorraad met alleen standaard meubelen.

Deze besparing komt overeen met 364 MWh per dag, oftewel een gemiddelde continu besparing van 15,2 MegaWatt.

Deze besparing neemt nog toe in de volgende jaren tot uiteindelijk de gehele oude voorraad vervangen is, en het potentieel volledig is 'aangeboord'. Dan zal de besparing ca. 35% bedragen ten opzichte van een voorraad met alleen standaard meubelen.

We zien dat in scenario 2 in het jaar 2000 ca. drie maal zoveel energie wordt bespaard als in scenario 1. Ondanks het feit dat de scenario's geen toekomstvoorspellingen zijn, wordt toch duidelijk welk effect een grotere aandacht voor zuinige meubelen kan hebben op het verbruik in het komende decennium. We kunnen stellen dat het actief introduceren van zuinige meubelen zinvol is. De weg waarlangs dat moet gebeuren staat nog open. We kunnen denken aan het stimuleren van de vraag naar zuinige meubelen, aan een convenant met fabrikanten en importeurs of aan wettelijke maatregelen in het kader van de Wet Energiebesparing Toestellen.

9 Conclusies

De resultaten van het onderzoek 'besparingsopties koel- en vriesmeubelen' zijn tweeledig:

- Er is een spreadsheet rekenmodel ontwikkeld waarmee het energieverbruik en de besparingsmogelijkheden voor verschillende typen koel- en vriesmeubelen kunnen worden berekend. Het model is gevalideerd aan de hand van een aantal meubeltesten uitgevoerd door TNO.
- Verschillende besparingsopties zijn per meubeltype gekwantificeerd en het besparingspotentieel in de periode 1990-2000 is berekend.

Het spreadsheet rekenmodel kan ook in de toekomst worden ingezet om voor verschillende typen en uitvoeringsvormen van koel- en vriesmeubelen het energieverbruik te berekenen, of tot een economische keuze te komen van energiebesparingsopties.

Bovendien kan het energieverbruik al in het ontwerpstadium van een nieuw meubel berekend worden.

De mogelijkheden tot besparing zijn in kaart gebracht. De energiebesparing is voor elke combinatie van besparingsoptie-meubeltype uitgezet in een matrix.

Haalbare besparingsopties (met een terugverdientijd van 3 jaar of korter) resulteren in energiebesparingen van ½% tot 30% afhankelijk van het meubeltype en de optie. De optie met de grootste besparingsmogelijkheden is het toepassen van nachtafdekking. Bij deze optie is het aan te bevelen automatische nachtafdekkingssystemen te gebruiken, om de gewenste besparing ook werkelijk te realiseren.

De maximaal haalbare combinatie van besparingsopties (met een terugverdientijd kleiner dan drie jaar) levert voor verschillende meubeltypen uiteenlopende besparingspercentages.

Bij de glasdeurkast en het vrieseiland kan nog 40 tot 45% worden bespaard. Bij de gebaksvitrine vinden we geen haalbare besparingsopties.

Op de totale voorraad koel- en vriesmeubelen in Nederland kan bij toepassing van alle haalbare besparingsopties ca. 34% energie worden bespaard (bij een terugverdientijd kleiner dan drie jaar). Bij het huidige verbruik komt dat overeen met 593 MWh per dag oftewel een continu gemiddeld vermogen van ca. 25 MegaWatt.

Twee scenario's voor de introductie van zuinige koel- en vriesmeubelen laten zien dat de bereikte besparing in het jaar 2000 sterk afhankelijk is van de vraag naar zuinige meubelen. Wanneer de vraag gestimuleerd wordt, kan een drie maal grotere besparing worden bereikt dan wanneer dit wordt nagelaten.

Het ligt dus voor de hand de vraag naar zuinige meubelen te stimuleren, hetzij door voorlichting, hetzij door convenanten of wettelijke maatregelen (bijvoorbeeld in het kader van de Wet Energiebesparing toestellen).

10 Referenties

- [1] *Overzicht modellen en voorraden koel- en vriesmeubelen in Nederland.*
Vermeulen, P.E.J. en van Laar, G.
MT-TNO rapport 91-009 (1991).
- [2] *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik.*
Recknagel-Sprenger.
R. Oldenbourg Verlag GMBH, München (1979).
- [3] *Verbeterde beproeving van open gekoelde verkoopmeubelen.*
Kok, H.J.G.
MT-TNO rapport 81-012251 (1981).
- [4] *Eindrapport Energiewijzer Bedrijfskoeling.*
Kok, H.J.G. en van Laar, G.
MT-TNO rapport 85-061 (1985).
- [5] *Proefproject energiewijzer bedrijfskoeling.*
Kok, H.J.G. en van Laar, G.
MT-TNO rapport 87-105 (1987).
- [6] *Test en eindrapport van 12 diepvriesmeubelen.*
Kok, H.J.G. en van Laar, G.
MT-TNO rapporten 87-03701 t/m 87-03712 (1987).
- [7] *Testrapport beproeving van het verkoopmeubel '---' volgens de ISO normen 1992 I t/m VI en het beproevingsvoorschrift energiewijzer bedrijfskoeling.*
Kok, H.J.G. en van Laar, G.
MT-TNO rapport 85-010127 (1985).
- [8] *Technische documentatie vrieskisten met schuifdeksel.*
GRAM Nederland B.V.
Documentatieblad 8.75.10 NL.
- [9] *Testrapport beproeving van het verkoopmeubel '---' volgens de ISO normen 1992 I t/m VI en het beproevingsvoorschrift energiewijzer bedrijfskoeling.*
Kok, H.J.G. en van Laar, G.
MT-TNO rapport 85-010126 (1985).
- [10] *Report Testing of the display cabinet for wrapped fresh meat; '---'.*
Kok, H.J.G. en van Laar, G.
MT-TNO rapport 85-02384 (1985).

-
- [11] *Testrapport beproeving van het verkoopmeubel '---' volgens de ISO normen 1992 I t/m VI en het beproevingsvoorschrift energiewijzer bedrijfskoeling.*
Kok, H.J.G. en van Laar, G.
MT-TNO rapport 85-010124 (1985).
- [12] *Testrapport beproeving van het verkoopmeubel '---' aan de hand van ISO normen 1992 I t/m VI.*
Kok, H.J.G. en van Laar, G.
MT-TNO rapport 81-015132 (1981).
- [13] *Energiezuinige vriesmeubelen voor de detailhandel.*
Stokhuyzen, M.F. en Stenfert Kroese, W.H.
Columbus Engineering, De Bilt (1991).
- [14] *Elektriciteits- en gasbesparing in de detailhandel.*
Stichting Voorlichting energiebesparing Nederland (SVEN).
SVEN brochure EBO 0333, (1989).
- [15] *The PHOENICS beginner's guide.*
Rosten, H.I. and Spalding, D.B.
CHAM TR/100, London (1987).
- [16] *Ontwerp van een spectraal selectief folie voor het gebruik in kassen.*
Smits, M.E.
TU Delft, laboratorium voor chemische technologie (1985).
- [17] *Kwantificering van energiebesparing middels retroreflecterende schermen boven een vriesmeubel.*
Sluis, S.M. van der.
MT-TNO rapport 90-418 (1990).
- [18] *Retro Reflective Foils.*
Sluis, S.M. van der, ter Kuile, W.M. en Bouws, T.
MT-TNO report 90-438 (1990).

11 Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever

NOVEM

Nederlandse Maatschappij voor Energie en Milieu

Postbus 503

7300 AM Apeldoorn

Namen en functies van de medewerkers

Ir. S.M. van der Sluis

Wetenschappelijk Researchmedewerker

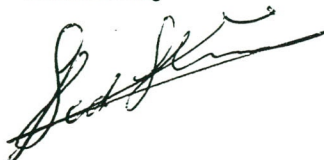
Namen van instellingen waaraan een deel van het onderzoek is uitbesteed

-

Datum waarop, of tijdsbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad

januari 1991 - april 1991

Ondertekening



Ir. S.M van der Sluis
projectleider

Goedgekeurd door



Ir. P.E.J. Vermeulen
werkgroep leider koudetechniek

Bijlage A Het spreadsheet rekenmodel

A.1 Inleiding

Voor 10 typen koel- en vriesmeubelen zijn spreadsheet programma's gemaakt, om (per type) de optredende warmte- en energiestromen te kunnen berekenen. Met behulp van de energiestromen kan vervolgens het energieverbruik van het meubel worden berekend. De fysische achtergronden en relaties zijn beschreven in hoofdstuk 2. In deze bijlage zullen we voor één meubeltype (vrieseiland) het spreadsheet rekenprogramma in detail beschrijven.

Het spreadsheet programma dat is gebruikt voor dit onderzoek, is opgebouwd met het "Symphony" softwarepakket van de Lotus Development Corporation. Het spreadsheet programma kan zonder problemen gebruikt worden onder het "Lotus" spreadsheetprogramma. Dankzij de mogelijkheid van een standaard spreadsheet format uitvoer (DIF format), kan het programma ook worden gebruikt onder andere spreadsheet programma's.

We maken bij de beschrijving gebruik van een "spreadsheet notatie". Het wezenlijke van een "spreadsheet" is dat het bestaat uit een aantal cellen. In elk van deze cellen kan óf een waarde, óf een formule staan.

Bijvoorbeeld:

in "cel a" staat de waarde 10

in "cel b" staat de waarde 4,2

in "cel c" staat de formule {cel a * cel b + 100}

De uitkomst van "cel c" is in dit geval 142. Deze uitkomst kan weer worden gebruikt in een volgende berekening.

In de beschrijving zullen we per cel een omschrijving en de formule geven. Celaanduidingen zijn gegeven als "cxxx", waarin xxx een celnummer is. Wanneer in de cel een waarde staat die opgegeven dient te worden (invoer), zullen we de omschrijving geven, en de celinhoud weergeven met "...". De verschillende invoer - waarden zijn te vinden in bijlage B.

Het spreadsheet rekenmodel is ingedeeld in vier delen, te weten:

- een invoerdeel voor omgevings- en gebruikscondities.
- een invoerdeel voor de meubelkarakterisering.
- een deel waar berekeningen worden uitgevoerd.
- een deel waar de resultaten worden gepresenteerd.

Deze indeling zullen we bij de beschrijving terugzien.

A.2 Spreadsheet rekenmodel "Besparingsopties koel- en vriesmeubelen"

Deel 1 Invoervariabelen

Cel 8: Omgevingstemperatuur (°C)	: ...
Cel 9: Relatieve vochtigheid (%)	: ...
Cel 10: Luchtsnelheid (m/s)	: ...
Cel 12: Enthalpie omgevingslucht (J/kg)	: ...
Cel 13: Vochtgehalte omgevingslucht (g/kg)	: ...
Cel 15: Emissiecoëfficiënt plafond	: ...
Cel 16: Emissiecoëfficiënt lading	: ...

Deel 2 Meubelparameters

Cel 31: Gemiddelde produkt temperatuur (°C)	: ...
Cel 32: Temperatuurverschil produkt-circulatielucht (°C)	: ...
Cel 33: Circulatielucht temperatuur (°C)	: c31-c32
Cel 34: Temperatuur verdamper (koudemiddelzijdig) (°C)	: c33-(c103/c35)
Cel 35: K-waarde * oppervlak van verdamper (W/°C)	: ...
Cel 36: Temperatuurverschil circulatielucht-uitblaas (°C)	: ...
Cel 37: Temperatuur uitblaaslucht (°C)	: c33-c36
Cel 38: Temperatuurverschil condensor-omgevingslucht (°C)	: ...
Cel 39: Relatieve vochtigheid uitblaaslucht (%)	: ...
Cel 40: Snelheid uitgeblazen lucht (m/s)	: ...
Cel 42: Enthalpie uitgeblazen lucht (J/kg)	: c77
Cel 43: Vochtgehalte uitgeblazen lucht (g/kg)	: c76
Cel 45: Laadvolume (m ³)	: ...
Cel 46: Display oppervlak (m ²)	: ...
Cel 47: Geïsoleerd oppervlak (m ²)	: ...
Cel 48: Isolatie dikte (m)	: ...
Cel 49: Warmtegeleidingscoëfficiënt isolatie (W/mK)	: ...
Cel 50: Lengte meubel (uitwendig) (m)	: ...
Cel 51: Hoogte uitblaasopening (m)	: ...
Cel 52: Afstand tussen uitblaas- en aanzuigopening (m)	: ...
Cel 53: Luchtgordijn opmengingsfactor C	: ...
Cel 55: Gemiddeld ontdooivermogen over 24 uur (W)	: ...
Cel 56: Gemiddeld ventilatorvermogen over 24 uur (W)	: ...
Cel 57: Gemiddeld verlichtingsvermogen over 24 uur (W)	: ...
Cel 58: Gemiddeld randverwarmingsvermogen over 24 uur (W)	: ...
Cel 59: Overig vermogen, gemiddeld over 24 uur (W)	: ...

Cel 60: Q/P factor ontdooiing (Fo) (%)	: $\frac{1}{4} \cdot (100 - c82)$
Cel 61: Q/P factor ventilator (Fv) (%)	: ...
Cel 62: Q/P factor verlichting (Fl) (%)	: ...
Cel 63: Q/P factor randverwarming (Fr) (%)	: ...
Cel 64: Q/P factor overige verbruikers (Fx) (%)	: ...

Deel 3 Tussenberekeningen

a) Berekening ontdooirendement

Cel 75: Waterdampdruk uitgeblazen lucht (Pa):	$401.66 \cdot 10^3 \cdot (1.0243 \cdot c37/30 + 0.1819 \cdot (1 - (c37/30)^2)) \cdot c39/100$
Cel 76: Absolute vochtigheid uitgeblazen lucht (g/kg):	$622 \cdot c75 / (101325 - c75)$
Cel 77: Enthalpie uitgeblazen lucht (J/kg):	$1005 \cdot c37 + c76 \cdot (2500.6 + 1.85 \cdot c37)$
Cel 79: Luchtinfiltratie uit omgeving naar meubel (kg/dag):	$c91 / (c12 - c77) \cdot 24 \cdot 3600$
Cel 80: Maximale rijpafzetting (kg/dag):	$(c13 - c76) \cdot c79 / 1000$
Cel 81: Nuttig ontdooiervermogen (W):	$c80 \cdot (2 \cdot (0 - c34) + 333.4) \cdot 1000 / (24 \cdot 3600)$
Cel 82: Ontdooirendement (%):	$c81 / c55 \cdot 100$

b) Berekening inkomende warmtestromen uit de omgeving

Cel 84: Warmteoverdrachtscoëfficiënt wand - omgevingslucht (W/m ² K):	$c10 \cdot 3.9 + 5.8$
Cel 85: Warmteoverdrachtscoëfficiënt wand - circulatielucht (W/m ² K):	$c40 \cdot 3.9 + 5.8$
Cel 86: K-waarde van de geïsoleerde wand (W/m ² K):	$1 / (1/c84 + c48/c49 + 1/c85)$
Cel 87: Warmtestroom door geïsoleerde wand (W):	$c86 \cdot c47 \cdot (c8 - c33)$
Cel 89: Stralingswarmtestroom van plafond naar lading (W):	$5.67 \cdot c46 / (1/c15 + 1/c16 - 1) \cdot ((c8/100 + 2.73)^4 - (c31/100 + 2.73)^4)$
Cel 91: Convectiewarmtestroom door opmenging (W):	$c53 \cdot (1 - V(5 \cdot c51/c52)) / 2 \cdot c50 \cdot c51 \cdot c40 \cdot 1.3 \cdot (c12 - c42)$

c) Berekening overige inkomende warmtestromen (verbruikers/produkten)

Cel 93: Schadelijke ontdooiwarmte (W)	: $c55 \cdot c60 / 100$
Cel 94: Ventilator warmte (W)	: $c56 \cdot c61 / 100$
Cel 95: Warmte verlichting (W)	: $c57 \cdot c62 / 100$
Cel 96: Warmte randverwarming (W)	: $c58 \cdot c63 / 100$
Cel 97: Warmte overige verbruikers (W)	: $c59 \cdot c64 / 100$
Cel 99: Som warmte van verbruikers (W)	: $\text{sommatie}(c93..c97)$
Cel 101: Warmte van ingebrachte produkten	: ...

d) Berekening van het benodigde compressorvermogen

Cel 103: Benodigde koelcapaciteit (W)	: $c87 + c89 + c91 + c99 + c101$
Cel 105: Carnot koudefactor	: $(c34 + 273)/(c8 + c38 - c34)$
Cel 106: Netto koudefactor	: $c105 * 0.4$
Cel 108: Benodigd compressorvermogen (W)	: $c103/c106$

Deel 4 Energiestromen en energieverbruik

Cel 114: Q/dt isolatie (W)	: c87
Cel 115: Q/dt straling (W)	: c89
Cel 116: Q/dt convectie (W)	: c91
Cel 117: Q/dt verbruikers (W)	: c99
Cel 118: Q/dt ingebrachte producten (W)	: c101
Cel 120: Benodigde koelcapaciteit (W)	: c103
Cel 122: Benodigd compressorvermogen (W)	: c108
Cel 123: Compressorverbruik (kWh/dag)	: $(c122/1000)*24$
Cel 125: Elektrisch ontdooivermogen (W)	: c55
Cel 126: Elektrisch ventilatorvermogen (W)	: c56
Cel 127: Elektrisch verlichtingsvermogen (W)	: c57
Cel 128: Elektrisch randverwarmingsvermogen (W)	: c58
Cel 129: Overig elektrisch vermogen (W)	: c59
Cel 131: Elektrisch verbruik (W), gemiddeld	: $c122 + \text{som}(c125..c129)$
Cel 132: Elektrisch verbruik per dag (kWh/24hr)	: $(c131/1000)*24$
Cel 134: Verbruik per m ³ laadvolume (W/m ³)	: $c131/c45$
Cel 135: Verbruik per m ² display oppervlak (W/m ²)	: $c131/c46$
Cel 136: Verbruik per m meubellengte (W/m)	: $c131/c50$

Bijlage B Berekende energiestromen bij de gekozen uitvoeringsvormen

B.1 Vrieseiland (breed)

Producten : diepvriesprodukten

Techniek : geforceerde koeling/separate compressor/elektrische ontdooiing

Gegevens : TNO testrapport

Tabel B.1a Specificaties van gekozen uitvoeringsvorm vrieseiland

Produkt temperatuur	Tprodukt	[°C]	-15.0
Circulatielucht temp	Tcirc	[°C]	-22.8
Verdamper Temperatuur	To	[°C]	-35.7
Verdamper $Q_o/(T_c - T_o) =$	kv.Av	[W/°C]	62
Temperatuur uitblaas	Tcu	[°C]	-24.2
Vershil condensor-omgeving	dTc	[°C]	10
R.V. uitblaas	RVu	[%]	70
Uitblaassnelheid	Vu	[m/s]	1.30
Laadvolume	V	[m ³]	0.830
Display oppervlak	Ad	[m ²]	2.72
Geïsoleerd oppervlak	Ai	[m ²]	8.61
Isolatiedikte	x	[m]	0.050
Lambda isolatie	Lambda	[W/mK]	0.025
Lengte meubel	L	[m]	2.47
hoogte uitblaasopening	d	[m]	0.020
Afstand uitblaas-aanzuig	b	[m]	1.115
Luchtgordijn factor	C	[-]	0.10
Ontdooivermogen	Po	[W]	167
Ventilatorvermogen	Pv	[W]	73
Verlichtingsvermogen	Pl	[W]	0
Randverwarmingsvermogen	Pr	[W]	85
Overig vermogen	Px	[W]	0
Q/P factor ontdooiing	Fo	[%]	23.7
Q/P factor ventilator	Fv	[%]	100
Q/P factor verlichting	Fl	[%]	0
Q/P factor randverw	Fr	[%]	10
Q/P factor overig	Fx	[%]	0

Opmerkingen:

ontdooiklok + ontdooibeeindigingsthermostaat (16 °C)

koudefactor 0.40 * εcarnot

Tabel B.1b Energiestromen en verbruik van het beschouwde vrieseiland

Carnot koudefactor	eta.c		3.72
Netto koudefactor	eta	[-]	1.49
Q/dt isolatie	Qi	[W]	157
Q/dt straling	Qs	[W]	346
Q/dt convector	Qc	[W]	179
Q/dt verbruikers		[W]	121
Q/dt ingebrachte producten		[W]	0
Benodigde koelcapaciteit		[W]	802
Compressorvermogen	Pc(el)	[W]	538
Compressorverbruik	[kWh/dag]	12.9	
Ontdooivermogen	Po	[W]	167
Ventilatorvermogen	Pv	[W]	73
Verlichtingsvermogen	Pl	[W]	0
Randverwarmingsvermogen	Pr	[W]	85
Overig vermogen	Px	[W]	0
Elektrisch verbruik	P	[W]	863
El.verbruik/24hr	E	[kWh/dag]	20.7
Verbruik/Laadvolume	Psv	[W/m ³]	1040
Verbruik/disp.oppervlak	Pso	[W/m ²]	317
Verbruik/meubellengte	Psi	[W/m]	349

B.2 Glasdeur vrieskast

Producten : diepvriesprodukten

Techniek : geforceerde koeling/stekkerklare versie/elektrische ontdooiing

Gegevens : TNO testrapport

Tabel B.2a Specificaties van gekozen uitvoeringsvorm glasdeurkast

Produkt Temperatuur	Tprodukt	[°C]	-15.0
Circulatielucht temperatuur	Tcirc	[°C]	-21.0
Verdamper Temperatuur	To	[°C]	-44.0
Verdamper $Q_o/(T_c - T_o) =$	kv.Av	[W/°C]	30
Verschil condensor-omgeving	dTc	[°C]	10
R.V. uitblaas	RVu	[%]	70
Uitblaassnelheid	Vu	[m/s]	0.40
Laadvolume	V	[m³]	0.760
Inhoud (leeg)	Vpl	[m³]	1.17
aantal compartimenten	Nc	[-]	1
Display oppervlak	Ad	[m²]	1.70
Oppervlak achterwand	Ai.1	[m²]	2.46
Oppervlak zij/onder	Ai.2	[m²]	4.68
Opp. voor geïsoleerd	Ai.3	[m²]	0.75
Isolatiedikte	x(1,2,3)	[m]	0.050
Lambda isolatie	Lambda	[W/mK]	0.025
Glasoppervlak	Ai.4	[m²]	1.70
Lengte meubel	L	[m]	1.39
Ruitverwarmingsvermogen	Pg	[W]	230
Lekbakverwarming	Pb	[W]	30
Ontdooivermogen	Po	[W]	14
Ventilatorvermogen	Pv	[W]	90
Verlichtingsvermogen	Pl	[W]	25
Q/P factor ontdooiing	Fo	[%]	86
Q/P factor ventilator	Fv	[%]	100
Q/P factor lekbakverw.	Fb	[%]	0
Q/P factor verlichting	Fl	[%]	100
Q/P ruitverwarming	Fg	[%]	75

Opmerkingen:

Ontdooiklok + ontdooi beëindigingsthermostaat

Deuropeningen per 24 uur	[-]	100
Openingstijd per opening	[s]	30
Belading (% laadvolume)	[%]	100

Condensorventilatorvermogen niet meegerekend

Koudefactor 0.4 * ϵ_{carnot}

Tabel B.2b Energiestromen en verbruik van de beschouwde glasdeurkast

Carnot koudefactor	eta.c		3.18
Netto koudefactor	eta	[-]	1.27
Q/dt isolatie	Qi	[W]	312
Q/dt straling	Qs	[W]	216
Q/dt convectie	Qc	[W]	36
Q/dt verbruikers		[W]	127
Q/dt ingebrachte produkten		[W]	0
Benodigde koelcapaciteit	[W]	691	
Compressorvermogen	Pc(el)	[W]	543
Compressorverbruik [kWh/dag] 13.0			
Ontdooivermogen	Po	[W]	14
Lekbakverw.vermogen	Pb	[W]	30
Ventilatorvermogen	Pv	[W]	90
Verlichtingsvermogen	Pl	[W]	25
Ruitverwarmingsvermogen	Pr	[W]	230
Elektrisch verbruik	P	[W]	932
El.verbruik/24hr	E	[kWh/dag]	22.4
Verbruik/Laadvolume	Psv	[W/m ³]	1226
Verbruik/disp.oppervlak	Pso	[W/m ²]	548
Verbruik/meubellengte	Psi	[W/m]	670

B.3 Vrieskist met glazen schuifdeksel

Produkten : diepvriesprodukten - ijs

Techniek : stille circulatie/stekkerklaar/elektrische ontdooiing

Gegevens : documentatie van fabrikant

Tabel B.3a Specificaties van gekozen uitvoeringsvorm vrieskist

Produkt temperatuur	Tprodukt	[°C]	-20.0
Circulatielucht temperatuur	Tcirc	[°C]	-27
Verdamper temperatuur	To	[°C]	-31.8
Verdamper $Q_o/(T_c - T_o) =$	kv.Av	[W/°C]	50
Temperatuur uitblaas	Tcu	[°C]	-27.0
Verskil condensor-omgeving	dTc	[°C]	10
R.V. uitblaas	RVu	[%]	70
Luchtverversing/opening	LO	[%]	25
Laadvolume	V	[m ³]	0.399
Bruto volume	Vb	[m ³]	0.429
"Display" oppervlak	Ad	[m ²]	0.64
Dikte display oppervlak	x.d	[m]	0.008
Lambda display oppervlak	Lambda.d	[W/mK]	1.16
Openingsoppervlak	Ado	[m ²]	0.32
Geïsoleerd oppervlak	Ai	[m ²]	3.56
Isolatie dikte	x	[m]	0.060
lambda isolatie	Lambda	[W/mK]	0.025
Lengte meubel	L	[m]	1.32
Ontdooivermogen	Po	[W]	5.00
Overig vermogen	Px	[W]	0
Q/P factor ontdooiing	Fo	[%]	99.3
Q/P factor overig	Fx	[%]	0

Opmerkingen:

Ontdooiingswijze is onbekend, aanname elektrisch.

Aangenomen is dat per opening 25 % van alle aanwezige koude lucht vervangen wordt door omgevingslucht.

Openingen per 24 uur	[-]	100
Openingstijd per opening	[s]	30
Belading (% laadvolume)	[%]	100

Koudefactor 0.4 * ϵ_{carnot}

Tabel B.3b Energiestromen en verbruik van de beschouwde vrieskist

Carnot koudefactor	eta.c		4.03
Netto koudefactor	eta	[-]	1.61
Q/dt isolatie	Qi	[W]	145
Q/dt straling	Qs	[W]	91
Q/dt convectie	Qc	[W]	0.7
Q/dt verbruikers		[W]	5.0
Benodigde koelcapaciteit		[W]	242
Compressorvermogen	Pc(el)	[W]	150
Compressorverbruik		[kWh/dag]	3.6
Ontdooivermogen	Po	[W]	5
Overig vermogen	Px	[W]	0
Elektrisch verbruik	P	[W]	155
Elektrisch verbruik/24hr	E	[kWh/dag]	3.7
Verbruik/Laadvolume	Psv	[W/m ³]	388
Verbruik/display oppervlak	Pso	[W/m ²]	243
Verbruik/meubellengte	Psl	[W/m]	117

B.4 Roll-in zuivelmeubel

Produkten : zuivelprodukten

Techniek : geforceerde koeling/stekkerklaar/elektrische ontdooiing

Gegevens : TNO testrapport

Tabel B.4a Specificaties van gekozen uitvoeringsvorm roll-in meubel

Produkt temperatuur	Tprodukt	[°C]	10.0
Circulatielucht temperatuur	Tcirc	[°C]	7.6
Verdamper temperatuur	To	[°C]	-8.3
Verdamper $Q_o/(T_c - T_o) =$	kv.Av	[W/°C]	30
Temperatuur uitblaas	Tcu	[°C]	5.7
Verschil condensor-omgeving	dTc	[°C]	10
R.V. uitblaas	RVu	[%]	70
Uitblaassnelheid	Vu	[m/s]	1.10
Laadvolume	V	[m³]	0.500
Display oppervlak	Ad	[m²]	1.84
Geïsoleerd oppervlak	Ai	[m²]	7.48
Isolatie dikte	x	[m]	0.030
Lambda isolatie	Lambda	[W/mK]	0.025
Lengte meubel	L	[m]	0.97
Hoogte uitblaasopening	d	[m]	0.050
Afstand uitblaas-aanzuig	b	[m]	1.100
Luchtgordijn factor	C	[-]	0.60
Ontdooivermogen	Po	[W]	95
Ventilatorvermogen	Pv	[W]	58
Verlichtingsvermogen	Pl	[W]	27
Randverwarmingsvermogen	Pr	[W]	174
Q/P factor ontdooiing	Fo	[%]	21.4
Q/P factor ventilator	Fv	[%]	100
Q/P factor verlichting	Fl	[%]	100
Q/P factor randverwarming	Fr	[%]	10

Opmerkingen:

Ontdooiklok + ontdooitimer (6 * 25 min)

Koudefactor = 0.4 * ϵ_{carnot}

condensorventilatorvermogen niet meegerekend

Tabel B.4b Energiestromen en verbruik van het beschouwde roll-in meubel

Carnot koudefactor	eta.c		7.29
Netto koudefactor	eta	[-]	2.92
Q/dt isolatie	Qi	[W]	54
Q/dt straling	Qs	[W]	65
Q/dt convector	Qc	[W]	236
Q/dt verbruikers		[W]	123
Q/dt ingebrachte producten		[W]	0
Benodigde koelcapaciteit		[W]	477
Compressorvermogen	Pc(el)	[W]	164
Compressorverbruik		[kWh/dag]	3.9
Ontdooivermogen	Po	[W]	95
Ventilatorvermogen	Pv	[W]	58
Verlichtingsvermogen	Pl	[W]	27
Randverwarmingsvermogen	Pr	[W]	174
Overig vermogen	Px	[W]	0
Elektrisch verbruik	P	[W]	518
Elektrisch verbruik/24hr	E	[kWh/dag]	12.4
Verbruik/Laadvolume	Psv	[W/m ³]	1035
Verbruik/disp.oppervlak	Pso	[W/m ²]	281
Verbruik/meubellengte	Psl	[W/m]	534

B.5 Open schappenkast

Produkten : zuivel/vlees/groente (verpakt)

Techniek : geforceerde koeling/separaat/elektrische ontdooiing

Gegevens : TNO testrapport

Tabel B.5a Specificaties van gekozen uitvoeringsvorm open schappenkast

Produkt temperatuur	Tprodukt	[°C]	4.0
Circulatielucht temperatuur	Tcirc	[°C]	4.0
Verdamper temperatuur	To	[°C]	-4.8
Verdamper $Q_o/(T_c - T_o) =$	kv.Av	[W/°C]	200
Temperatuur uitblaas	Tcu	[°C]	2.0
Verschil condensor-omgeving	dTc	[°C]	10
R.V. uitblaas	RVu	[%]	95
Uitblaassnelheid	Vu	[m/s]	1.50
Laadvolume	V	[m³]	1.310
Display oppervlak	Ad	[m²]	3.19
Geïsoleerd oppervlak	Ai	[m²]	13.11
Isolatie dikte	x	[m]	0.050
Lambda isolatie	Lambda	[W/mK]	0.025
Glasoppervlak	Ag	[m²]	1.000
Dikte glas	x.g	[m]	0.08
Lambda glas	Lambda.g	[W/mK]	1.16
Lengte meubel	L	[m]	2.50
Hoogte uitblaasopening	d	[m]	0.050
Afstand uitblaas-aanzuig	b	[m]	1.250
Luchtgordijn factor	C	[-]	0.73
Ontdooivermogen	Po	[W]	52
Ventilatorvermogen	Pv	[W]	77
Verlichtingsvermogen	Pl	[W]	96
Randverwarmingsvermogen	Pr	[W]	25
Overig vermogen	Px	[W]	0
Q/P factor ontdooiing	Fo	[%]	71.6
Q/P factor ventilator	Fv	[%]	100
Q/P factor verlichting	Fl	[%]	100
Q/P factor randverw	Fr	[%]	10
Q/P factor overig	Fx	[%]	0

Opmerkingen:

Ontdooiklok + ontdooitimer (3 * 25 min)

koudefactor = 0.4 * ϵ_{carnot}

condensorventilatorvermogen niet meegerekend

Tabel B.5b Energiestromen en verbruik van de beschouwde schappenkast

Carnot koudefactor	eta.c		8.17
Netto koudefactor	eta	[-]	3.27
Q/dt isolatie	Qi	[W]	128
Q/dt straling	Qs	[W]	190
Q/dt convector	Qc	[W]	1234
Q/dt verbruikers		[W]	213
Q/dt ingebrachte prod.		[W]	0
Benodigde koelcapaciteit		[W]	1764
Compressorvermogen	Pc(el)	[W]	540
Compressorverbruik		[kWh/dag]	13.0
Ontdooivermogen	Po	[W]	52
Ventilatorvermogen	Pv	[W]	77
Verlichtingsvermogen	Pl	[W]	96
Randverwarmingsvermogen	Pr	[W]	25
Overig vermogen	Px	[W]	0
Elektrisch verbruik	P	[W]	790
El.verbruik/24hr	E	[kWh/dag]	19.0
Verbruik/Laadvolume	Psv	[W/m ³]	603
Verbruik/display oppervlak	Pso	[W/m ²]	248
Verbruik/meubellengte	Psi	[W/m]	316

B.6 Koeleiland

Produkten : verpakte verse vleeswaren

Techniek : geforceerde koeling/separaat/elektrische ontdooiing

Gegevens : TNO rapport 81-012251. "Verbeterde beproeving van open gekoelde verkoopmeubelen" door H Kok

Tabel B.6a Specificaties van gekozen uitvoeringsvorm koeleiland

Produkt temperatuur	Tprodukt	[°C]	4.0
Circulatielucht temperatuur	Tcirc	[°C]	-2.5
Verdamper temperatuur	To	[°C]	-12.9
Verdamper	Qo/(Tc-To)	=	kv.Av
	[W/°C]	75	
Temperatuur uitblaas	Tcu	[°C]	-5.5
Verschil condensor-omgeving	dTc	[°C]	10
R.V. uitblaas	RVu	[%]	70
Uitblaassnelheid	Vu	[m/s]	0.60
Laadvolume	V	[m³]	0.439
Display oppervlak	Ad	[m²]	2.02
Geïsoleerd oppervlak	Ai	[m²]	5.25
Isolatie dikte	x	[m]	0.050
Lambda isolatie	Lambda	[W/mK]	0.025
Lengte meubel	L	[m]	2.44
Hoogte uitblaasopening	d	[m]	0.050
Afstand uitblaas-aanzuig	b	[m]	0.800
Luchtgordijn factor	C	[-]	0.55
Ontdooivermogen	Po	[W]	110
Ventilatorvermogen	Pv	[W]	80
Randverwarmingsvermogen	Pr	[W]	120
Overig vermogen	Px	[W]	0
Q/P factor ontdooiing	Fo	[%]	66
Q/P factor ventilator	Fv	[%]	100
Q/P factor randverw	Fr	[%]	10

Opmerkingen:

Ontdooiklok + ontdooitimer (30 min)

koudefactor = 0.4 * ϵ carnot

condensorventilatorvermogen niet meegerekend

Tabel B.6b Energiestromen en verbruik van het beschouwde koeleiland

Carnot koudefactor	eta.c	6.36	
Netto koudefactor	eta	[-]	2.54
Q/dt isolatie	Qi	[W]	47
Q/dt straling	Qs	[W]	120
Q/dt convector	Qc	[W]	449
Q/dt verbruikers		[W]	164
Q/dt ingebrachte produkten		[W]	0
Benodigde koelcapaciteit		[W]	781
Compressorvermogen	Pc(el)	[W]	307
Compressorverbruik		[kWh/dag]	7.4
Ontdooivermogen	Po	[W]	110
Ventilatorvermogen	Pv	[W]	80
Randverwarmingsvermogen	Pr	[W]	120
Overig vermogen	Px	[W]	0
Elektrisch verbruik	P	[W]	617
Elektrischverbruik/24hr	E	[kWh/dag]	14.8
Verbruik/Laadvolume	Psv	[W/m ³]	1406
Verbruik/disp.oppervlak	Pso	[W/m ²]	306
Verbruik/meubellengte	Psi	[W/m]	253

B.7 Vleesvitrine ("slagersmeubel")

Produkten : onverpakte verse vleeswaren

Techniek : stille koeling/separaat/elektrische ontdooiing

Gegevens : TNO testrapport

Tabel B.7a Specificaties van gekozen uitvoeringsvorm vleesvitrine

Produkt temperatuur	Tprodukt	[°C]	4.0
Circulatielucht temperatuur	Tcirc	[°C]	1.9
Verdamper temperatuur	To	[°C]	-17.5
Verdamper $Q_o/(T_c - T_o) =$	kv.Av	[W/°C]	35
Temperatuur uitblaas	Tcu	[°C]	5.2
Temperatuur ruit	Tr	[°C]	6.5
Verschil condensor-omgeving	dTc	[°C]	10
R.V. uitblaas	RVu	[%]	70
Uitblaassnelheid	Vu	[m/s]	0.15
Laadvolume	V	[m ³]	-
Display oppervlak	Ad	[m ²]	3.06
Geïsoleerd oppervlak	Ai	[m ²]	10.02
Isolatie dikte	x	[m]	0.035
Lambda isolatie	Lambda	[W/mK]	0.025
Glasoppervlak	Ag	[m ²]	2.930
Dikte glas	x.g	[m]	0.08
Lambda glas	Lambda.g	[W/mK]	1.16
Lengte meubel	L	[m]	3.67
Openingsoppervlak	Ao	[m ²]	1.50
Hoogte uitblaasopening	d	[m]	0.050
Afstand uitblaas-aanzuig	b	[m]	0.420
Luchtgordijn factor	C	[-]	1.00
Ontdooivermogen	Po	[W]	41
Ventilatorvermogen	Pv	[W]	0
Verlichtingsvermogen	Pl	[W]	140
Randverwarmingsvermogen	Pr	[W]	46
Overig vermogen	Px	[W]	0
Q/P factor ontdooiing	Fo	[%]	86.2
Q/P factor ventilator	Fv	[%]	0
Q/P factor verlichting	Fl	[%]	100
Q/P factor randverw	Fr	[%]	100
Q/P factor overig	Fx	[%]	0

Opmerkingen:

Ontdooiklok + "Klixon" beëindigingschakelaar (2 * 10 min)

Koudefactor = 0.4 * ϵ_{carnot}

Condensorventilatorvermogen niet meegerekend

Tabel B.7b Energiestromen en verbruik van de beschouwde vleesvitrine

Carnot koudefactor	eta.c		5.61
Netto koudefactor	eta	[-]	2.25
Q/dt isolatie	Qi	[W]	184
Q/dt straling	Qs	[W]	182
Q/dt convector	Qc	[W]	92
Q/dt verbruikers	[W]	221	
Q/dt ingebrachte producten		[W]	0
Benodigde koelcapaciteit		[W]	679
Compressorvermogen	Pc(el)	[W]	302
Compressorverbruik		[kWh/dag]	7.3
Ontdooivermogen	Po	[W]	41
Ventilatorvermogen	Pv	[W]	0
Verlichtingsvermogen	Pl	[W]	140
Randverwarmingsvermogen	Pr	[W]	46
Overig vermogen	Px	[W]	0
Elektrisch verbruik	P	[W]	529
Elektrisch verbruik/24hr	E	[kWh/dag]	12.7
Verbruik/Laadvolume	Psv	[W/m ³]	-
Verbruik/display oppervlak	Pso	[W/m ²]	173
Verbruik/meubellengte	Psl	[W/m]	144

B.8 Gesneden groente vitrine

Produkten : onverpakte gesneden groenten

Techniek : licht geforceerde koeling/separaat/geen ontdooiing

Gegevens : schatting

Tabel B.8a. Specificaties van de gekozen uitvoeringsvorm van de gesneden groentevitrine

Produkt temperatuur	Tprodukt	[°C]	7.0
Circulatielucht temperatuur	Tcirc	[°C]	5.0
Verdamper temperatuur	To	[°C]	0.9
Verdamper $Q_o/(T_c - T_o) =$	kv.Av	[W/°C]	100
Temperatuur uitblaas	Tcu	[°C]	4.0
Temperatuur ruit	Tr	[°C]	5.0
Verschil condensor-omgeving	dTc	[°C]	10
R.V. uitblaas	RVu	[%]	70
Uitblaassnelheid	Vu	[m/s]	0.30
Laadvolume	V	[m ³]	0.642
Oppervlak lade - omgeving	Al	[m ²]	0.525
Display oppervlak	Ad	[m ²]	3.32
Geïsoleerd oppervlak	Ai	[m ²]	8.41
Isolatiedikte	x	[m]	0.050
Lambda isolatie	Lambda	[W/mK]	0.025
Glasoppervlak	Ag	[m ²]	3.318
Dikte glas	x.g	[m]	0.1
Lambda (dubbel) glas	Lambda.g	[W/mK]	0.3
Lengte meubel	L	[m]	3.00
Uitstroom/opening	Vuit	[m ³]	0.0450
Ontdooivermogen	Po	[W]	0
Ventilatorvermogen	Pv	[W]	25
Verlichtingsvermogen	Pl	[W]	144
Randverwarmingsvermogen	Pr	[W]	25
Overig vermogen	Px	[W]	0
Q/P factor ventilator	Fv	[%]	100
Q/P factor verlichting	Fl	[%]	50
Q/P factor randverw	Fr	[%]	100
Q/P factor overig	Fx	[%]	0

Opmerkingen:

- Geen ontdooiing omdat verdampertemperatuur boven 0 °C blijft.
Koudefactor = $0.4 \cdot \epsilon_{\text{carnot}}$
- Het meubel is geheel dicht, er wordt gewerkt met schuifladen voor het gekoelde produkt. Voor de modellering is gekozen voor een bepaalde hoeveelheid lucht die per opening uitstroomt, plus een term die de opwarming van de geopende lade door omgevingslucht verdisconteert.
- 500 lade-openingen per dag à 30 seconden.

Tabel B.8b Energiestromen en verbruik van de beschouwde gesneden groente vitrine

Carnot koudefactor	eta.c		10.10
Netto koudefactor	eta	[-]	4.04
Q/dt isolatie	Qi	[W]	116
Q/dt straling	Qs	[W]	158
Q/dt convector	Qc	[W]	8
Q/dt verbruikers		[W]	122
Q/dt ingebrachte producten		[W]	0
Benodigde koelcapaciteit		[W]	411
Compressorvermogen	Pc(el)	[W]	102
Compressorverbruik		[kWh/dag]	2.4
Ontdooivermogen	Po	[W]	0
Ventilatorvermogen	Pv	[W]	25
Verlichtingsvermogen	Pl	[W]	144
Randverwarmingsvermogen	Pr	[W]	25
Overig vermogen	Px	[W]	0
Elektrisch verbruik	P	[W]	296
El.verbruik/24hr	E	[kWh/dag]	7.1
Verbruik/Laadvolume	Psv	[W/m ³]	461
Verbruik/disp.oppervlak	Pso	[W/m ²]	89
Verbruik/meubellengte	Psl	[W/m]	99

B.9 Gebaksvitrine

Producten : (onverpakt) gebak/bonbons

Techniek : licht geforceerde koeling/separaat/geen ontdooiing

Gegevens : schatting

Tabel B.9a Specificaties van de gekozen uitvoeringsvorm van de gebaksvitrine

Produkt temperatuur	Tprodukt	[°C]	7.0
Circulatielucht temperatuur	Tcirc	[°C]	5.0
Verdamper temperatuur	To	[°C]	0.7
Verdamper $Q_o/(T_c - T_o) =$	kv.Av	[W/°C]	80
Temperatuur ruit	Truit	[°C]	5.0
Verschil condensor-omg.	dTc	[°C]	10
R.V. uitblaas	RVu	[%]	70
Uitblaassnelheid	Vu	[m/s]	0.30
Laadvolume	V	[m ³]	0.140
Inhoud (leeg)	Vpl	[m ³]	0.826
Aantal compartimenten	Nc	[-]	2
Display oppervlak	Ad	[m ²]	2.25
Oppervlak geïsoleerde wand	Ai	[m ²]	3.42
Isolatie dikte	x	[m]	0.050
lambda isolatie	Lambda	[W/mK]	0.025
Glasoppervlak	Ai.4	[m ²]	4.30
Dikte glas	x.4	[m]	0.08
Lambda glas	lambda4	[W/mK]	1.16
Lengte meubel	L	[m]	1.80
Ruitverwarmingsvermogen	Pg	[W]	25
Ventilatorvermogen	Pv	[W]	25
Verlichtingsvermogen	Pl	[W]	0
Overig vermogen	Px	[W]	0
Q/P factor ventilator	Fv	[%]	100
Q/P factor overig	Fx	[%]	0
Q/P ruitverwarming		[%]	100

Opmerkingen:

- Geen ontdooiing omdat verdampertemperatuur boven 0 °C blijft.
Koudefactor = $0.4 * \epsilon_{\text{carnot}}$
- De gebaksvitrine is voorzien van (glazen) schuifdeuren aan de bedieningszijde.

Deuropeningen/24hr	N	[-]	100
Openingstijd/opening		[s]	30
Belading (% laadvolume)		[%]	100

Tabel B.9b Energiestromen en verbruik van de beschouwde gebaksvitrine

Carnot koudefactor	eta.c		10.04
Netto koudefactor	eta	[-]	4.02
Q/dt isolatie	Qi	[W]	173
Q/dt straling	Qs	[W]	107
Q/dt convector	Qc	[W]	12
Q/dt verbruikers		[W]	50
Q/dt ingebrachte prod.		[W]	0
Benodigde koelcapaciteit		[W]	341
Compressorvermogen	Pc(el)	[W]	85
Compressorverbruik		[kWh/dag]	2.0
Ventilatorvermogen	Pv	[W]	25
Ruitverwarmingsvermogen	Pr	[W]	2
Overig vermogen	Px	[W]	0
Elektrisch verbruik	P	[W]	135
El.verbruik/24hr	E	[kWh/dag]	3.2
Verbruik/Laadvolume	Psv	[W/m ³]	965
Verbruik/disp.oppervlak	Pso	[W/m ²]	60
Verbruik/meubellengte	Psi	[W/m]	75

B.10 Schappenkast banket

Producten : (onverpakt) gebak/bonbons

Techniek : licht geforceerde koeling/separaat/geen ontdooiing

Gegevens : schatting

Tabel B.10a Specificaties van de schappenkast voor banket

Produkt temperatuur	Tprodukt	[°C]	7.0
Circulatielucht temperatuur	Tcirc	[°C]	5.0
Verdamper temperatuur	To	[°C]	1.3
Verdamper $Q_o/(T_c - T_o) =$	kv.Av	[W/°C]	75
Verschil condensor-omgeving	dTc	[°C]	10
R.V. uitblaas	RVu	[%]	70
Uitblaassnelheid	Vu	[m/s]	0.30
Laadvolume	V	[m ³]	0.200
Inhoud (leeg)	Vpl	[m ³]	1.17
Aantal compartimenten	Nc	[-]	1
Display oppervlak	Ad	[m ²]	1.70
Oppervlak achterwand	Ai.1	[m ²]	2.46
Isolatie dikte	x.1	[m]	0.050
Lambda isolatie	Lambda1	[W/mK]	0.025
Oppervlak zij/onder	Ai.2	[m ²]	4.68
Isolatie dikte	x.2	[m]	0.050
Lambda isolatie	Lambda2	[W/mK]	0.025
Oppervlakte voor geïsoleerd	Ai.3	[m ²]	0.75
Isolatie dikte	x.3	[m]	0.050
Lambda isolatie	Lambda3	[W/mK]	0.025
Glasoppervlak	Ai.4	[m ²]	1.70
Dikte glas	x.4	[m]	
Lambda glas	lambda4	[W/mK]	
Lengte meubel	L	[m]	1.39
Ruitverwarmingsvermogen	Pg	[W]	75
Ventilatorvermogen	Pv	[W]	25
Verlichtingsvermogen	Pl	[W]	25
Overig vermogen	Px	[W]	0
Q/P factor ventilator	Fv	[%]	100
Q/P factor verlichting	Fl	[%]	100
Q/P factor overig	Fx	[%]	0
Q/P ruitverwarming		[%]	75

Opmerkingen:

- Geen ontdooiing omdat verdampertemperatuur boven 0 °C blijft.
koudefactor = $0.4 * \epsilon_{\text{carnot}}$
- De schappenkast banket is qua uitvoering exact hetzelfde als de glasdeurkast (paragraaf B.2), maar wordt bedreven bij een hogere temperatuur (+ 7 °C).

Tabel B.10b Energiestromen en verbruik van de schappenkast voor banket

Carnot koudefactor	eta.c		10.29
Netto koudefactor	eta	[-]	4.12
Q/dt isolatie	Qi	[W]	110
Q/dt straling	Qs	[W]	81
Q/dt convectie	Qc	[W]	33
Q/dt verbruikers		[W]	50
Q/dt ingebrachte producten		[W]	0
Benodigde koelcapaciteit		[W]	274
Compressorvermogen	Pc(el)	[W]	67
Compressorverbruik		[kWh/dag]	1.6
Ventilatorvermogen	Pv	[W]	25
Verlichtingsvermogen	Pl	[W]	25
Ruitverwarmingsvermogen	Pr	[W]	75
Overig vermogen	Px	[W]	0
Elektrisch verbruik	P	[W]	192
El.verbruik/24hr	E	[kWh/dag]	4.6
Verbruik/Laadvolume	Psv	[W/m ³]	958
Verbruik/disp.oppervlak	Pso	[W/m ²]	113
Verbruik/meubellengte	Psi	[W/m]	138

Bijlage C Berekening van de baten van de besparingsopties

C.1 Methodiek

In de hierna volgende paragrafen berekenen we de concrete besparing in kWh/jaar die de besparingsopties uit het vorige hoofdstuk opleveren. We doen dit voor alle besparingsopties, telkens toegepast op alle meubelen waar de optie mogelijk is.

U dient erop attent te zijn, dat deze besparingen gerelateerd zijn aan een niet verder geoptimaliseerd meubel. Wanneer meerdere besparingsopties worden geïmplementeerd, neemt de besparing per optie doorgaans af.

C.2 Verbetering van het luchtstromingspatroon

In paragraaf 4.2 hebben we reeds de effecten op het energie verbruik vermeld tengevolge van een verbeterd luchtstromingspatroon:

- a. Verkleining temperatuurverschil tussen verdamper en circulatielucht.
- b. Directe vermindering van de convectiewarmtestroom door opmenging.
- c. Lager ventilatorvermogen benodigd door minder drukverlies.
- d. Verkleining temperatuurverschil tussen produkt en circulatielucht.

Verbetering van het luchtstromingspatroon kan worden bereikt door berekening met een stromingsmodel, of door beproevingen. Dergelijke berekeningen/beproevingen kunnen slechts – economisch – worden gerealiseerd bij grotere series, en passen niet in het kader van dit onderzoek. Daarom zullen we hier de besparingen berekenen op basis van enkele aannames:

- a. We kunnen het temperatuurverschil tussen verdamper en circulatielucht met 10% verkleinen door een betere omstroming van de verdamper.
- b. De opmenging tussen koude circulatielucht en warme omgevingslucht kan met 10% verminderd worden. (In volgende paragrafen zal deze opmenging ook met andere methoden, zoals luchtgordijnen, beperkt worden).
- c. Het drukverschil over het circulatiecircuit kunnen we met 10% verlagen door een lagere stromingsweerstand. Dit betekent dat we 10% kunnen besparen op het ventilatorvermogen (bij dezelfde circulatiesnelheid).
- d. We kunnen het temperatuurverschil tussen produkt en circulatielucht met 25% verkleinen door de produkten beter aan te stromen.

Tabel C.1 Besparing door verbetering van het stromingspatroon

Uitvoeringsvorm		Standaard verbruik	Besparing	
			kWh	%
	kWh/dag			
1 Vrieseiland (breed)	20.7	3.4	16	
2 Glasdeurkast	22.4	1.5	7	
4 Roll-in meubel	12.4	1.4	11	
5 Open schappenkast	19.0	2.3	12	
6 Koeleiland	14.8	2.2	15	
8 Gesneden groente vitrine	7.1	0.2	3	
9 Gebaksvitrine	3.2	0.2	6	
10 Schappenkast banket	4.6	0.2	3	

C.3 Het beperken van de luchtuitstroom bij het openen van de deur

Het beperken van de uitstroomverliezen bij deuropening kan veelal bereikt worden door de inhoud van het meubel en de deuren te compartimenteren. Het rekenmodel is hierop voorbereid, omdat het mogelijk is het aantal compartimenten als invoerparameter op te geven. Daarbij moeten we erop letten dat de "openingstijd" van het meubel met eenzelfde factor afneemt, omdat telkens slechts een deel van het meubel geopend is. Dit is vooral van belang bij de glasdeurkast, waar de ruitverwarming uitgeschakeld is wanneer de deur geopend is.

Als bijkomend effect mogen we het ontdooivermogen lager kiezen. De ontdooi-behoefte is namelijk gerelateerd aan de hoeveelheid vochtige lucht die het meubel binnentreedt. We mogen dus het ontdooivermogen delen door het aantal compartimenten, om toch eenzelfde ontdooirendement te behouden (hierover meer in één van de volgende paragrafen).

De gesneden groentevitrine is niet voorzien van deuren, maar van laden. In en boven een lade bevindt zich een luchtvolume dat bij opening naar buiten 'valt'. In het model is een uitstroomfactor 'F' gehanteerd, waarin wordt verdisconteerd dat door de zuigende beweging meer lucht naar buiten stroomt dan alleen het luchtvolume boven de lade. Door het aanbrengen van een 'gordijn' kan het uitstromende luchtvolume worden verkleind, wat we kunnen berekenen door de uitstroomfactor kleiner te kiezen.

Tabel C.2 Besparing door verkleining van de openingsverliezen

Uitvoeringsvorm		Standaard verbruik	Besparing	
			kWh	%
		kWh/dag		
1	Vrieseiland (breed)	20.7	3.4	16
2	Glasdeurkast	22.4	1.5	7
4	Roll-in meubel	12.4	1.4	11
5	Open schappenkast	19.0	2.3	12
6	Koeleiland	14.8	2.2	15
8	Gesneden groente vitrine	7.1	0.2	3
9	Gebaksvitrine	3.2	0.2	6
10	Schappenkast banket	4.6	0.2	3

C.4 Toepassing van een strokengordijn of een evenwijdige luchtstroming

Om te berekenen wat het effect is van de toepassing van een evenwijdige luchtstroming, moeten we in principe een luchtstromingsmodel gebruiken. Om echter een indruk te krijgen van de besparing, kunnen we ook de in het spreadsheet model gebruikte 'luchtgordijnfactor' aanpassen. De luchtgordijnfactor geeft de mate van opmenging tussen koude en warme lucht weer. Bij een goed werkende evenwijdige luchtstroming moet het mogelijk zijn de opmenging met de helft te reduceren, wat we eenvoudig kunnen modelleren door de luchtgordijnfactor met 50% te verkleinen.

Omdat door de kleinere luchtuitwisseling minder vochtige lucht het meubel binnentreedt, kunnen we ook het ontdooivermogen met 50% reduceren (bij een gelijkblijvend ontdooirendement).

Tenslotte moeten we nog het extra geïnstalleerde ventilatorvermogen meetellen bij het energieverbruik (dit kan bij de post overig vermogen, P_x). Hierbij hoeven we echter niet een deel van het ventilatorvermogen weer af te voeren via de verdamper, zodat de Q/P factor (F_x) op nul gesteld mag worden.

Voor het ventilatorvermogen nemen we 50 Watt per m^2 openingsoppervlak als richtwaarde. Alleen bij de vleesvitrine kunnen we volstaan met een lagere waarde (25 Watt/ m^2), omdat hier de circulatie door natuurlijke convectie wordt veroorzaakt.

Wanneer we deze uitgangspunten doorrekenen met het spreadsheet model, vinden we besparingen zoals vermeld in tabel C.3.

Tabel C.3 Besparing door toepassing van een evenwijdige luchtstroming

Uitvoeringsvorm		Standaard verbruik	Besparing	
			kWh	%
4	Roll-in meubel	12.4	0.4	3
5	Open schappenkast	19.0	2.4	12
7	Vleesvitrine	12.7	0,6	5

C.5 Besparing door nachtafdekking

Het effect op het energieverbruik van de toepassing van nachtafdekking kunnen we eenvoudig berekenen met het spreadsheet model. Het betreft namelijk allereerst een reductie van de stralingswarmtestroom. Daarnaast treedt bij modellen zonder 'deur' een reductie van de convectiewarmtestroom op, en daarmee samenhangend een reductie van het ontdooivermogen.

We berekenen de besparing uitgaande van de nachttemperatuur. De temperatuur die we tot nu toe hanteerden (18 °C) is een gemiddelde over dag en nacht. Wanneer we een temperatuurverschil dag-nacht van 5 °C veronderstellen, betekent dit een dagtemperatuur van 21 °C en een nachttemperatuur van 16 °C. We zijn hier uitgegaan van een cyclus van 10 daguren en 14 nachturen.

Allereerst schatten we het percentage van de tijd dat de nachtafdekking niet wordt gebruikt. Dit zijn de winkeluren per week, inclusief de zaterdag en de koopavond, neerkomend op ca. 56 uur. Daarnaast zijn er nog een aantal beladingsuren (ca. 6) en een half uur vóór en na winkeltijd waarin de nachtafdekking moet worden aangebracht (ook ca 6 uren). Daarmee komen we op 68 uur per week. Dit betekent dat de nachtafdekking 60% van de totale bedrijfstijd is aangebracht.

De werking van de nachtafdekking zal nooit ideaal zijn (de straling wordt bijvoorbeeld niet tot nul gereduceerd), vandaar dat we een rendement zullen aannemen van 0,8 voor zowel stralings- als convectiewarmtestroom. We bereken het energieverbruik met nachtafdekking (Q_s en eventueel Q_c en het ontdooivermogen reduceren met 80%). Neem vervolgens 60% van het berekende verbruik (kWh/dag) met nachtafdekking, en tel daarbij op 40% van het standaardverbruik. Dit levert het gemiddeld verbruik met nachtafdekking. De berekende resultaten vindt U in tabel C.4. Hierin is ook het af te dekken oppervlak vermeld, en de besparing per m² afdekking.

Tabel C.4 Besparing door toepassing van nachtafdekking

Uitvoeringsvorm		Standaard verbruik	Besparing			
			kWh/dag	kWh	%	m ² kWh/m ²
1	Vrieseiland (breed)	20.7	6.2	30	2.72	2.3
2	Glasdeurkast	22.4	2.3	10	1.70	1.3
3	Vrieskist met deksel	3.7	0.6	16	0.64	0.9
4	Roll-in meubel	12.4	2.2	18	1.84	1.2
5	Open schappenkast	19.0	4.8	25	3.19	1.5
6	Koeleiland	14.8	3.9	26	2.02	1.9
7	Vleesvitrine	12.7	2.1	16	4.43	0.5
8	Gesneden groente vitrine	7.1	0.4	5	3.32	0.1
9	Gebaksvitrine	3.2	0.3	8	4.30	0.1
10	Schappenkast banket	4.6	0.2	4	1.70	0.1

C.6 Besparing door toepassing van infrarood reflecterende beglazing

In paragraaf 4.6 is reeds aangeduid dat met een indium-oxide folie 50% van de instralende warmte gereflecteerd kan worden. In het spreadsheet model kunnen we het effect hiervan vrij eenvoudig berekenen, door de stralingswarmtestroom te halveren. Uiteraard doen we dit alleen voor modellen die zijn voorzien van glasoppervlak. Bij de vleesvitrine moeten we er rekening mee houden dat 2/3 van de instraling plaatsvindt door het glasoppervlak, en 1/3 door de bedieningsopening.

Tabel C.5 Besparing door toepassen van infrarood reflecterende beglazing

Uitvoeringsvorm		Standaard verbruik	Besparing			
			kWh/dag	kWh	%	m ² kWh/m ²
2	Glasdeurkast	22.4	2.7	12	1.70	1.6
3	Vrieskist met deksel	3.7	0.7	19	0.64	1.1
7	Vleesvitrine	12.7	0.9	7	2.93	0.3
8	Gesneden groente vitrine	7.1	0.5	8	3.32	0.2
9	Gebaksvitrine	3.2	0.4	11	4.30	0.1
10	Schappenkast banket	4.6	0.3	6	1.70	0.2

C.7 Retroreflecterende folies

De opbrengst van retroreflecterende folies, toegepast bij horizontale meubelen zonder deur, kunnen we op precies dezelfde wijze berekenen als de opbrengst van infrarood reflecterende beglazing (voorgaande paragraaf).

De resultaten vindt U in tabel C.6

Tabel C.6 Besparing door toepassen van retroreflecterend folie

	Uitvoeringsvorm	Standaard verbruik	Besparing		
			kWh/dag	kWh	% displayopp.
1	Vrieseiland	20.7	3.3	16	2.72 m ²
6	Koeleiland	14.8	0.7	5	2.02 m ²

C.8 Stralingsabsorberende beglazing

Bij de berekening van de besparing door middel van stralingsabsorberende beglazing gaan we uit van absorptie van maximaal 50% van de stralingsenergie (alleen het infrarode deel van het spectrum).

Deze geabsorbeerde warmtestroom brengen we in mindering op het toegepaste elektrische ruitverwarmingsvermogen, P_g (Watt). Indien de geabsorbeerde warmtestroom kleiner is dan het ruitverwarmingsvermogen, zullen we dus elektrische ruitverwarming overhouden met een lager vermogen. Indien de geabsorbeerde warmtestroom groter is, kan de ruitverwarming achterwege worden gelaten.

Voor de berekening met het spreadsheet model kunnen we eenvoudig de helft van Q_s aftrekken van P_g . Wanneer dit een negatief resultaat oplevert, stellen we P_g op nul. De stralingswarmtestroom zelf verminderen we niet, omdat deze (in de vorm van geabsorbeerde warmte) toch weer in het meubel terecht komt. (Hierbij verwaarlozen we de geabsorbeerde warmte die aan de buitenzijde van de ruit aan de omgeving wordt afgestaan).

De op deze wijze berekende resultaten vindt U in tabel C.7, waarbij zowel de absolute besparing als de besparing per m² glasoppervlak zijn gegeven.

Tabel C.7 Besparing door toepassen van infrarood absorberende beglazing

Uitvoeringsvorm		Standaard verbruik	Besparing			
			kWh/dag	kWh	%	m ² kWh/m ²
2	Glasdeurkast	22.4	4.6	21	1.70	2.7
3	Vrieskist met deksel	3.7	0.2	5	0.64	0.3
7	Vleesvitrine	12.7	1.8	14	2.93	0.6
8	Gesneden groente vitrine	7.1	0.8	11	3.32	0.2
9	Gebaksvitrine	3.2	0.8	24	4.30	0.2
10	Schappenkast banket	4.6	1.2	25	1.70	0.7

C.9 Verandering van de isolatiedikte

De berekeningswijze voor een verandering van de isolatiedikte hoeft geen betoog; omdat de isolatiedikte een invoerparameter is, kunnen we de gewijzigde waarde direct opgeven.

Tabel C.8 geeft de energiebesparing per m² voor een 20% grotere isolatiedikte. Ook de aanwezige isolatiedikte is in de tabel vermeld.

Tabel C.8 Besparing door vergroting van de isolatiedikte met 20%

Uitvoeringsvorm		Isolatie- dikte (cm)		Besparing			
		aanw.	nieuw	kWh	%	m ²	Wh/m ²
1	Vrieseiland (breed)	5	6	0.48	2.3	8.61	56
2	Glasdeurkast	5	6	0.57	2.6	7.89	72
3	Vrieskist met deksel	6	7.2	0.13	3.5	3.56	37
4	Roll-in meubel	3	3.6	0.06	0.5	7.48	8
5	Open schappenkast	5	6	0.12	0.6	13.11	9
6	Koeleiland	5	6	0.09	0.6	5.25	17
7	Vleesvitrine	3.5	4.2	0.21	1.7	10.02	21
8	Gesneden groente vitrine	5	6	0.05	0.7	8.41	6
9	Gebaksvitrine	5	6	0.02	0.6	3.42	6
10	Schappenkast banket	5	6	0.05	1.2	8.61	6

C.10 Berekening energiebesparing bij cilindrische meubelen

Het berekenen van de energiebesparing door het toepassen van cilindrische meubelvormen met het spreadsheet rekenmodel is zeer eenvoudig. Eén van de invoerparameters is het geïsoleerde oppervlak; dit oppervlak is voor een cilindrisch meubel kleiner. Door dit oppervlak te veranderen verschijnt direct de bijbehorende energiebesparing.

Het berekenen van de 'nieuwe' oppervlakken, bij cilindrische vormen, is iets moeilijker. We gaan er ten eerste van uit dat het presentatie-oppervlak gelijk moet blijven, en daarbij stellen we als tweede eis dat het meubelvolume gelijk moet blijven. Deze eisen stellen we omdat de meubelen qua eigenschappen voor de exploitant gelijk moeten blijven, om een vergelijking mogelijk te maken.

Voor de eilanden is de berekening geen probleem. we berekenen hier het 'rechthoekige' oppervlak en stellen dat gelijk aan $\pi \cdot r^2$ (r is de straal van het meubel). Als we de hoogte van het meubel handhaven, zal ook het volume gelijk blijven.

Voor de glasdeurkast en de schappenkast gaan we uit van de presentatie opening, die we constant houden. Daarop passen we een 'afgeplatte' cylinder zodanig dat het meubelvolume gelijk blijft. In tabel C.9 vindt U de berekende cylinderstralen en de oppervlakten, alsmede de besparing.

Tabel C.9 Besparing door toepassing van cylindervormige meubelen

	Uitvoeringsvorm	Geïsoleerd opp. (m ²)		Cylinder straal r (m)	Berekende besparing	
		stand.	cyl.		kWh/dag	%
1	Vrieseiland (breed)	8.61	7.62	0.95	0.36	1.8
2	Glasdeurkast	7.89	7.38	0.69	0.23	1.0
3	Vrieskist met deksel	3.56	3.02	0.49	0.15	3.9
5	Open schappenkast	13.11	9.26	0.79	0.26	1.4
6	Koeleiland	5.25	4.56	0.80	0.08	0.5
10	Schappenkast banket	7.89	7.38	0.69	0.02	0.4

C.11 Beperking van het ontdooivermogen

Het belangrijkste doel van het ontdooien is het omzetten van de rijp die zich op de verdamper heeft gevormd in water (dit water wordt dan vervolgens in een lekbak opgevangen). De minimum energie die voor dit doel benodigd is, kunnen we beschrijven met:

$$Eo(min) = Mr \cdot \{cp \cdot (0 - To) + r\}$$

Eo = minimaal benodigde ontdooienergie (J)

Mr = massa rijp (kg)

cp = soortelijke warmte rijp (J/kg. °C)

To = verdamper temperatuur (= temperatuur rijp) (°C)

r = smeltwarmte (J/kg)

De massa van de gevormde rijp, per 24 uur, kunnen we schatten met behulp van de bekende hoeveelheid in het meubel infiltrerende lucht (deze hoeveelheid kan worden berekend uit de convectieve warmtestroom).

$$Mr = Qc \cdot 24 \text{ uur} \cdot (xa - xu) / (ha - hu)$$

xa = absolute vochtigheid omgevingslucht (kg/kg)

xu = absolute vochtigheid uitblaaslucht (kg/kg)

ha = enthalpie omgevingslucht (J/kg)

hu = enthalpie uitblaaslucht (J/kg)

Wanneer we de benodigde ontdooienergie betrekken op een periode van 24 uur, kunnen we het gemiddeld benodigde ontdooivermogen $Po(\text{min})$ berekenen.

Doorgaans wordt echter meer energie gebruikt voor het ontdooien, omdat ook de verdamper zelf wordt opgewarmd, de omringende lucht wordt opgewarmd, en de temperatuur van het smeltwater veelal hoger is dan exact 0 °C. Dit wordt samengevat in een zogenaamd ontdooirendement, no .

$$no = \{Po(\text{min}) / Po\} \cdot 100\%$$

no = ontdooirendement (%)

Po = gemiddeld ontdooivermogen over 24 uur (W)

Het toevoeren van een ontdooivermogen groter dan het minimaal benodigde ontdooivermogen (het teveel wordt schadelijk ontdooivermogen genoemd) werkt 'dubbel' door in de energierekening:

- Het ontdooivermogen moet in de vorm van (elektrische) energie worden toegevoerd.
- Het schadelijk ontdooivermogen moet worden afgevoerd. Een deel van de schadelijke ontdooiwarmte zal (d.m.v ventilatie) worden afgevoerd naar de omgevingslucht. Het is echter niet te voorkomen dat het resterende deel wordt opgenomen door de het meubel en de zich daarin bevindende produkten. Dit deel moet na de ontdooicyclus weer worden afgevoerd door de koelinstallatie. Geschat wordt dat maximaal ca. 75% van de schadelijke ontdooiwarmte wordt afgevoerd naar de omgeving bij goede ventilatie.

Het is van belang na het beëindigen van de ontdooicyclus de verdamper 'droog te blazen' met behulp van de ventilator. Hiermee kan restwarmte worden afgevoerd, en bovendien wordt voorkomen dat een resterend waterlaagje direct weer aanvriest bij inschakelen van de koeling.

De mogelijke besparing kunnen we nu berekenen in twee stappen:

- 1) Berekening van de besparing door toepassing van de aanwezige ontdooiing, met maximaal mogelijke ontdooirendement (optimale 'defrost on demand').
- 2) Berekening van de besparing door toepassing van een beter type ontdooiing (persgas in plaats van elektrisch), alsmede optimale 'defrost on demand'.

Hierbij berekenen we het opgenomen elektrische vermogen door het ontdooivermogen te delen door de koudefactor (warmtepomp).

De berekende besparingen, absoluut en procentueel, vindt U in tabel C.10.

Tabel C.10 Besparing door verbeterde ontdooiing

- kolom regeling: optimale 'defrost on demand' bij elektrische ontdooiing, ontdooirendement cf. tabel 4.10
- kolom persgas: optimale 'defrost on demand' bij persgas ontdooiing, ontdooirendement cf. tabel 4.10

Uitvoeringsvorm		Standaard verbruik	Besparing			
			regeling		persgas	
		kWh/dag	kWh	%	m ²	kWh/m ²
1	Vrieseiland (breed)	20.7	4.0	19	4.4	21
2	Glasdeurkast	22.4	0.4	2	0.5	2
3	Vrieskist met deksel	3.7	0.2	5	0.2	5
4	Roll-in meubel	12.4	1.9	15	2.4	19
5	Open schappenkast	19.0	1.0	5	1.4	7
6	Koeleiland	14.8	0.9	6	2.8	19
7	Vleesvitrine	12.7	1.2	9	1.4	11

Verbetering van de ontdooi inrichting kan 2 tot 21% energie besparen, afhankelijk van de uitvoeringsvorm c.q. het type meubel.

De 'baten' van besparing op ontdooiing zijn gerelateerd aan de absolute besparing in kWh/dag, welke varieert van 0,2 tot 4,4 kWh/dag.

De bedragen in tabel C.10 zijn berekend op basis van een ideale 'defrost on demand' regeling. In de praktijk is dit (nog) niet realiseerbaar. We zullen hier rekening mee houden, door te stellen dat de werkelijke besparing ongeveer de helft bedraagt van de besparing uit tabel C.10.

C.12 Vergroting van het verdamperoppervlak

De effecten van vergroting van het verdamperoppervlak kunnen we eenvoudig doorrekenen door de invoerparameter 'kA' te vermenigvuldigen met een constante factor (1,25 voor 25% meer verdamperoppervlak). Wanneer we ook de vochtigheid van de uitgeblazen lucht verhogen (van 70 naar 80%) vinden we direct het 'nieuwe' energieverbruik. In onderstaande tabel zijn de berekende waarden gegeven, met daarbij de benodigde koelcapaciteit. De koelcapaciteit gebruiken we in paragraaf 4.12 om de kosten van de verdamper(vergroting) te berekenen.

Tabel C.11 Besparing door vergroting van het verdamperoppervlak met 25%

Uitvoeringsvorm		Benodigde koelcapaciteit	Besparing	
		Watt	kWh	%
1	Vrieseiland (breed)	800	0.66	3.2
2	Glasdeurkast	690	1.07	4.8
3	Vrieskist met deksel	240	0.07	1.9
4	Roll-in meubel	460	0.55	4.4
5	Open schappenkast	1750	0.87	4.6
6	Koeleiland	775	0.50	3.3
7	Vleesvitrine	675	0.78	6.2
8	Gesneden groente vitrine	410	0.08	1.2
9	Gebaksvitrine	340	0.07	2.3
10	Schappenkast banket	270	0.06	1.3

C.13 Toepassen van hoog rendement ventilatoren

De berekening van de energiebesparing bij toepassing van een HR ventilator is simpel: we vermenigvuldigen het ventilatorvermogen P_v (een invoer parameter) met een constante factor. Bij een besparing van 50% vermenigvuldigen we dus met $\frac{1}{2}$. De vermogensfactor F_v blijft gelijk, want alle toegevoerde vermogen moet nog steeds worden weggekoeld. De berekende besparing vindt U in tabel C.12.

Tabel C.12 Energiebesparing door toepassing van een HR ventilator

	Uitvoeringsvorm	Standaard ventilatorvermogen	Besparing	
		Watt	kWh/dag	%
1	Vrieseiland (breed)	73	1.66	8
2	Glasdeurkast	90	2.26	10
4	Roll-in meubel	58	1.05	8
5	Open schappenkast	77	1.29	7
6	Koeleiland	80	1.44	10
8	Gesneden groente vitrine	25	0.39	5
9	Gebaksvitrine	25	0.39	12
10	Schappenkast banket	25	0.38	8

C.14 Toepassen van verlichting met hogere specifieke lichtstroom

We berekenen het effect van een vermindering van het verlichtingsvermogen met 20% op het energieverbruik. Hiertoe vermenigvuldigen we de (invoer parameter) Pl met 0,8. De vermogensfactor Fl blijft constant, want alle geproduceerde warmte moet nog steeds door de koelinstallatie worden afgevoerd. de resultaten zijn gegeven in tabel C.13.

Tabel C.13 Energiebesparing door toepassing verlichting met een hogere specifieke lichtstroom

	Uitvoeringsvorm	Standaard verlichting	Besparing	
		Watt	kWh/dag	%
2	Glasdeurkast	25	0.26	1.1
4	Roll-in meubel	27	0.20	1.6
5	Open schappenkast	96	0.60	3.2
7	Vleesvitrine	140	0.97	7.6
8	Gesneden groente vitrine	144	0.79	11
10	Schappenkast banket	25	0.15	3.3

C.15 Stekkerklare meubelen versus centrale koelinstallatie

We berekenen het energieverbruik bij een iets grotere geleidingswarmtestroom, overeenkomend met een temperatuurverhoging van 2,5 °C van de omgevingslucht (gemiddeld over alle wandoppervlakken). De resultaten van deze berekening zijn vermeld in tabel C.14.

Tabel C.14 Meerverbruik van stekkerklare meubelen ten gevolge van lokale verhoging van de omgevingstemperatuur

	Uitvoeringsvorm	Standaard verbruik	Meerverbruik
		kWh/dag	kWh
1	Vrieseiland (breed)	20.7	0.19
2	Glasdeurkast	22.4	0.29
3	Vrieskist met deksel	3.7	0.13
4	Roll-in meubel	12.4	0.16
5	Open schappenkast	19.0	0.22
6	Koeleiland	14.8	0.07
7	Vleesvitrine	12.7	0.56
8	Gesneden groente vitrine	7.1	0.16
9	Gebaksvitrine	3.2	0.24
10	Schappenkast banket	4.6	0.07