

3. ENERGIEPRESTATIE

3.1 Bouwbesluit

Volgens het Bouwbesluit moeten gebouwen aan energiezuinigheidseisen voldoen. Deze eisen hebben sinds 1995 de vorm van een energieprestatie-eis, weergegeven als energieprestatie-coëfficiënt (EPC). Een gebouw moet een bepaalde EPC hebben en de gebouwschil een zekere luchtdichtheid en warmteweerstand. In de volgende paragrafen is aangegeven waar het bij de energieprestatie-eisen in hoofdlijnen om gaat. Meer details zijn in NEN-normen en praktijkrichtlijnen (NPR) en op de websites van het NNI en de Novem te vinden.

3.2 Energieprestatie-eisen

De energieprestatie-eisen uit het Bouwbesluit hebben betrekking op de energie voor verwarming, ventilatie, verlichting, koeling en bevochtiging van een gebouw en de productie van warm tapwater, rekening houdend met het rendement van de installaties. De energieprestatiecoëfficiënt (EPC) wordt bepaald door het energiegebruik op een gestandaardiseerde wijze te berekenen en te vergelijken met het energiegebruik van een energiezuinig gebouw. Voor woningen is de berekening beschreven in NEN 5128 [27], voor utiliteitsgebouwen in NEN 2916 [28]. Toelichtingen zijn te vinden in NPR 5129 (EPW) [29] en NPR 2917 (EPU) [30].

De EPC is een maat voor de totale hoeveelheid fossiele brandstof (primaire energie) die een gebouw nodig heeft. De EPC mag een op grond van het Bouwbesluit vastgestelde waarde niet overschrijden, anders wordt geen bouwvergunning afgegeven. De energieprestatie-eis is een beleidsinstrument, bedoeld om het energiegebruik van gebouwen te beperken. Het is beslist geen ontwerphulpmiddel waarmee - bijvoorbeeld - het werkelijke benodigde vermogen voor koeling of ventilatie kan worden bepaald omdat geen rekening wordt gehouden met het gebruikersgedrag. Evenmin wordt rekening gehouden met behaaglijkheid. Zo kan een woning die is voorzien van HR-glas aan de EPC-eis voldoen terwijl het in die zelfde woning zomers onaangenaam warm kan worden, bijvoorbeeld door het ontbreken van (niet verplichte) zonwering.

De energieprestatie-normen verschenen in 1994 voor het eerst en werden in 1995 aangevuld. In 1998 volgde een belangrijke herziening waarbij hogere rendementen van energieopwekking en verschillende installatiesystemen werden aangegeven. Verder werden energieopslag in de bodem, PV cellen, absorptiekoelmachines, aanwezigheidsdetectie voor de verlichting en afzuiging van armaturen als energiebesparingstechnieken genoemd en gewaardeerd. Tabel 3.1 geeft een overzicht van de energieprestatie-eisen zoals die in 1995, 2000 en 2003 van kracht waren.

Tabel 3.1 Energieprestatie-eisen woningen en utiliteitsgebouwen

Gebouwfunctie	1995	2000	2003
Woningen	1,4	1,0	1,0
Kantoor	1,9	1,6	1,5
Onderwijs	1,5	1,5	1,4
Logies	2,4	2,1	1,9
Cel	2,3	2,2	1,9
Horeca	2,2	1,9	vervallen, zie "Bijeenkomst"
Winkel	3,6	3,5	3,4
Bijeenkomst	3,4	2,4	2,2
Sport	2,8	2,2	1,8
Gezondheidszorg niet klinisch	2,0	1,8	1,5
Gezondheidszorg klinisch	4,7	3,8	3,6

3.3 Woningen en woongebouwen

Voor de berekening van de energieprestatie van woningen (EPW) moet eerst worden vastgesteld welke verwarmde ruimten *binnen* en welke onverwarmde ruimten *buiten* de thermische begrenzing van de woning vallen. Vervolgens moeten van de verwarmde ruimten of zones de gebruiksoppervlakten worden bepaald en de volgende energie- en *deel*-energieposten worden berekend.

De energiepost VERWARMING, bestaande uit de deelposten:

- warmtetransmissie
- zontoetreding
- interne warmtewinst
- ventilatie
- infiltratie
- warmteverlies tussen zones
- opwekkingsrendement verwarmingsinstallatie
- systeemrendement verwarmingsinstallatie
- waakvlam
- pompen (ketel)
- ventilatoren (ketel)
- elektronica (ketel)
- zonnecollectoren

WARMTAPWATER:

- leidinglengte bad/douche
- leidinglengte aanrecht
- lengte circulatieleiding
- installatierendement/
- zonnecollectoren

VENTILATOREN:

- ventilatiesysteem of vermogen en regeling ventilatoren

VERLICHTING:

- forfaitair vermogen per m² gebruiksoppervlakte van verwarmde zones

Hieraan kunnen nog de energieposten KOELING en BEVOCHTIGING worden toegevoegd. Voor de berekening hiervan verwijst de EPW naar NEN 2916 (utiliteitsgebouwen).

Het voert hier te ver om alle formules en rendementen te bespreken waarmee de deel-energieposten volgens de EPW moeten worden berekend. De opsomming laat zien dat de meeste energieposten betrekking hebben op installaties. Bouwkundige ontwerpkeuzen die tot een relatief hoog energiegebruik - en daardoor hoge EPC - leiden, waren in 1995 meestal nog wel te compenseren door installatiesystemen toe te passen met een hoog rendement. In 2000 (EPC 1,0 i.p.v. 1,4) werd dit al veel moeilijker.

3.4 Utiliteitsgebouwen

Door de grote diversiteit aan gebouwfuncties en soorten klimatiseringssystemen is de energieprestatie-berekening van utiliteitsgebouwen aanzienlijk complexer dan die van woningen. Hiertegenover staat dat het werkelijke energiegebruik beter is te benaderen. Dit heeft, mits het verbruik lager is dan de forfaitaire waarde, een verlagend effect op de EPC en dat is gunstig. Voor utiliteitsgebouwen worden per gebouwfunctie aparte eisen gesteld, zie tabel 3.1. Bij toepassing van verschillende klimatiseringssystemen en binnentemperaturen moeten aparte "energiesectoren" worden onderscheiden. De procesgang bij de berekening van de energieprestatie is in hoofdlijnen dan als volgt.



Voorbeeld van een energiezuinig ontwerp, het ING-hoofdkantoor in Amsterdam
- Figuur 3.1

1. Verdeel gebouw in gebouwfuncties (kantoor-, onderwijs-, horecagebouw etc.)
2. Verdeel gebouw in energiesectoren (per gebouwfunctie of delen daarvan)
3. Bepaal energiegebruik van diverse posten (verwarming, warm tapwater, ventilatie etc.)
4. Weging (verliesoppervlakte, ventilatie en koeling)
5. Stel EPC vast

Bij diverse energieposten is het mogelijk om een eenvoudige of een uitgebreide berekening te maken. Bij de eenvoudige berekening worden forfaitaire waarden gebruikt. Deze zijn relatief hoog en resulteren in een hoge en - daardoor - ongunstige EPC. Bij de uitgebreide berekening kunnen werkelijke waarden worden ingevoerd. Deze waarden moeten toetsbaar en handhaafbaar zijn zodat het hoofdzakelijk bouwfysische en installatietechnische eigenschappen betreft. Hierdoor is de invloed van computers, gebouwbeheersystemen, nachtventilatie en ingestelde nachttemperatuur - net als het gebruikersgedrag - niet als variabele in de norm terug te vinden.

Voor utiliteitsgebouwen bestaan geen vuistregels waarmee simpel is aan te geven hoe aan wettelijke energieprestatie-eisen is te voldoen. Novem-publicaties met voorbeelden van woningen [31] en van kantoren, scholen en winkels [32] kunnen enig inzicht verschaffen. De praktijk laat zien dat het minder eenvoudig is om utiliteitsgebouwen aan de energieprestatie-eis te laten voldoen dan woningen. Vooral kleine utiliteitsgebouwen kunnen moeilijk voldoen door de verhouding tussen gebruiksoppervlakte en geveloppervlakte die niet adequaat in de norm is verdisconteerd.

Gevels met een hoge transparantie hebben veel invloed op de energieprestatie en geven vaak een (te) hoge EPC. Daarmee beperkt het Bouwbesluit de mogelijkheden tot zeer transparante bouw. Dit neemt niet weg dat er wel mogelijkheden zijn. Zie bijvoorbeeld de hoofdzetel voor de ING-bank in Amsterdam, figuur 3.1. Dit zeer transparante gebouw voldoet aan de tijdens de bouwvergunningaanvraag geldende reeds hoge energieprestatie-eis door toepassing van installaties die met name het energiegebruik sterk beperken. De belangrijkste hiervan worden in de paragraaf 3.5 toegelicht.

Omdat de EPC op het gebouw als geheel betrekking heeft, kunnen transparante gebouwdelen worden gecompenseerd met minder transparante delen. Het bestemmen van ruimten achter transparante gevels tot ruimten waaraan geen temperatuureisen worden gesteld, zoals serres, geeft nog meer mogelijkheden. Verder zijn er compenserende maatregelen in de vorm van installaties met een hoog opwekkings- en systeemrendement, zoals stadsverwarming (warmte/kracht-koppeling), hoogfrequent verlichtingssystemen met bepaalde schakelingen e.d. Ook is veel mogelijk door gebruik te maken van lange termijn warmte- en koudeopslag in de bodem.

Installatiesystemen met een hoog opwekkings- en systeemrendement en HR-glas kosten meer dan traditionele installaties en "normaal" isolerend glas. De energieprijzen zijn anno 2004 nog steeds zo laag dat de baten van een lager energiegebruik niet opwegen tegen de hogere investeringskosten van genoemde systemen en beglazing. Dat betekent dat transparant bouwen duur is.

ISSO geeft een publicatie uit waarmee voor kantoorgebouwen de effecten zijn na te gaan van verschillende bouwkundige, bouwfysische en installatietechnische ontwerpkeuzen op zowel de energieprestatie als op het thermisch comfort [24]. Voor de publicatie werden berekeningen gemaakt met verschillende glaspercentages, typen zonwering, accumulerende massa's, oriëntaties en interne warmtebelastingen. Voor de klimaatinstallaties werden verschillende systemen met verschillende rendementen genomen. De publicatie is bedoeld om in de beginfase van het gebouwontwerp snel een oordeel te kunnen geven over de energieprestatie en het te verwachten comfort.

Om **kantoren** aan energieprestatie-eis van **1,5** te laten voldoen zijn meerdere maatregelen nodig:

- bij mechanische luchttoevoer is warmteterugwinning noodzakelijk
- R_c van $3,0 \text{ m}^2\text{K/W}$ (maatregel uit het Nationaal Pakket Duurzaam Bouwen Utiliteitsbouw!)
- beter isolerende glassoorten (HR⁺⁺)
- bij HR en HR⁺ moet het glaspercentage in de gevel worden beperkt
- energie-efficiënt verlichtingssysteem met daglichtafhankelijke regeling, regelmatig automatisch uitschakelen van de verlichting ("veegschakeling") en aanwezigheidsdetectie
- hoog opwekkingsrendement voor verwarming
- installatiesysteem met hoog rendement, zie de voorbeelden in tabel 3.2

Tabel 3.2 Energieprestatie kantoor 5000 m^2 *) met verschillende installatiesystemen

Installatiesysteem	Ventilatievoud (h^{-1})	EPC
radiatoren met mechanische afvoer	2 - 3	1,44
radiatoren met mechanische luchttoevoer en -afvoer	3	1,34
idem + warmteterugwinning	4	1,38
radiatoren met beperkte koeling ("topkoeling")	2	1,62
idem + warmteterugwinning	3	1,48
	4	1,51
radiatoren en variabel debiet systeem	4	1,51
idem + warmteterugwinning	5	1,57
	6	1,63
4-pijps inductiesysteem met warmteterugwinning	2	1,54
	3	1,57

*) uitgangspunt: gevel $R_c=2,5 \text{ m}^2\text{K/W}$ en 35% HR-glas, zeer energie-efficiënte verlichting

Meer gegevens zijn te vinden op de web-site van het NNI: www.nni.nl/sectoren/bouw, met o.a. een demonstratie van de rekenprogramma's NPR 5129 en NPR 2917. De site www.epn.novem.nl besteedt aandacht aan theoretische achtergronden, berekeningen, kosten, voorbeelden en effecten van maatregelen en combinaties van maatregelen. Deze site biedt de mogelijkheid tot downloaden van EPC rekenprogramma's. Op de Novem-site zijn eveneens voorbeelden te vinden van hoe voor verschillende gebouwbestemmingen aan de energieprestatie-eisen kan worden voldaan.

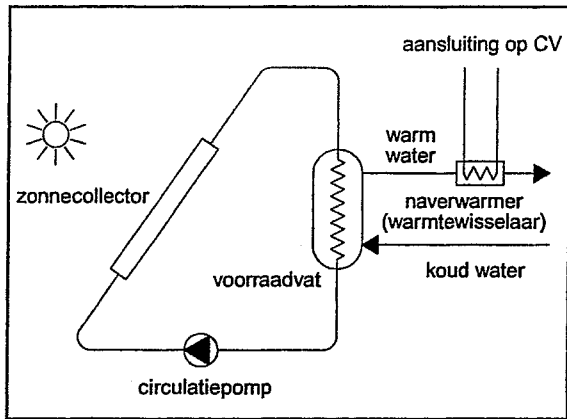
In de volgende paragrafen worden de belangrijkste energiebesparingstechnieken besproken waarbij gebruik wordt gemaakt van installaties.

3.5 Energiebesparende technieken

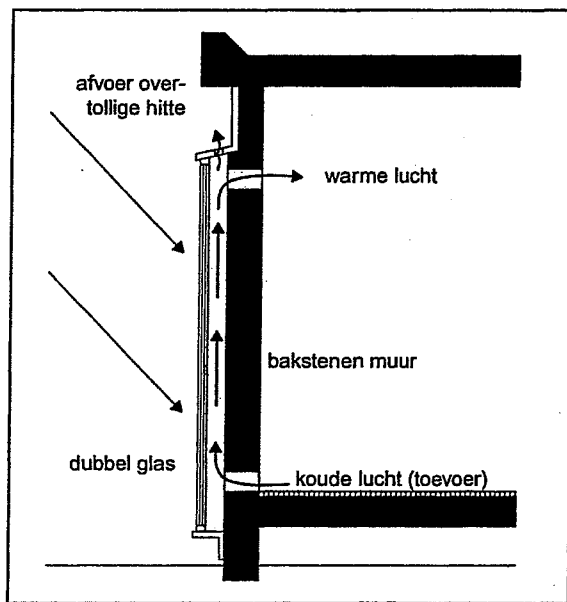
3.5.1 Warmte/kracht-koppeling

Met "warmte/kracht-koppeling" bedoelen we dat de productie van warmte voor verwarming en kracht voor het opwekken van elektrische stroom aan elkaar zijn gekoppeld. Door deze koppeling ontstaan energiecentrales met een zeer hoog energetisch rendement. Bij elektriciteitscentrales is de productie van elektriciteit het hoofddoel. De afvalwarmte van de stoomturbines of gasmotoren die de generatoren aandrijven wordt gebruikt voor de productie van heet water of - via het absorptieproces - gekoeld water.

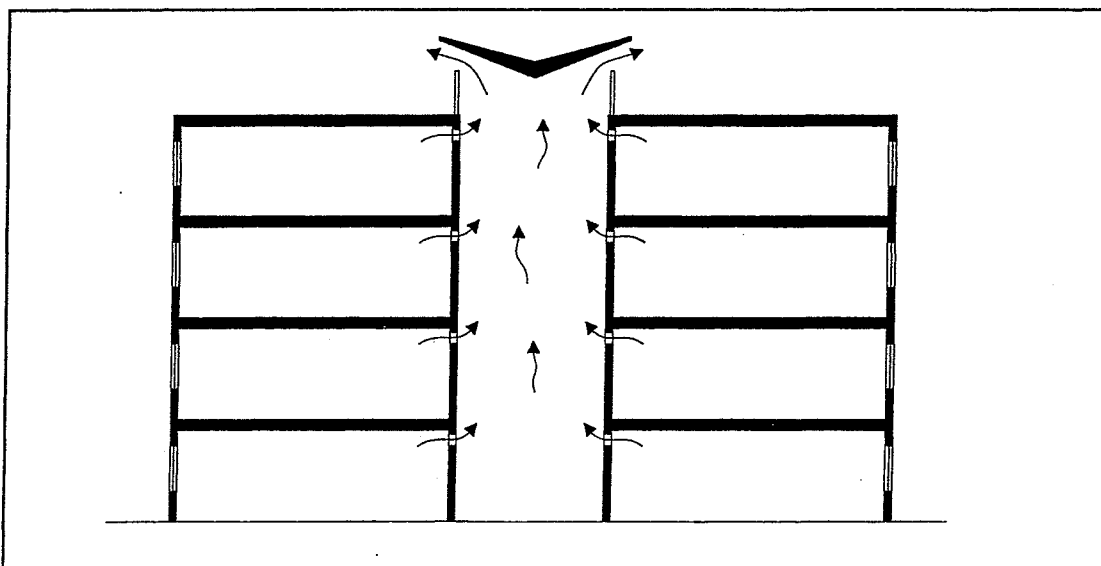
De ontwikkeling van stadsverwarming, als grootschalige toepassing van warmte/kracht-koppeling, verloopt traag omdat het economische rendement laag is. De kosten voor de aanleg en het onderhoud van transportleidingen, pompstations en decentrale warmtecentrales (voor opvang van pieken in de warmtevraag) zijn zo hoog dat stadsverwarming anno 2004 niet kan concurreren met individuele aardgasgestookte ketels. Dat weerhoudt energiebedrijven ervan om op eigen initiatief stadsverwarmingsprojecten te ontwikkelen. Meestal zijn het door de centrale overheid gesubsidieerde projecten waarbij de aanleg van de infrastructuur in de ontwikkeling van nieuwe wijken of bij stadsvernieuwing wordt meegenomen. Als stadsverwarming aanwezig is dwingt het energie-



Zonnecollector/boiler - Figuur 3.2



Trombewand - Figuur 3.3



Principe werking zonneshoorsteen - Figuur 3.4

bedrijf meestal tot het aansluiten hierop en weigert gaslevering. Door het hoge energetische rendement is aansluiting op stadsverwarming gunstig voor de energieprestatie van woningen en utiliteitsgebouwen [29][30].

Enige jaren geleden was de toepassing van warmte/kracht-koppeling op het schaalniveau van bedrijven en instellingen interessant als de behoefte aan warmte en elektriciteit elkaar ongeveer in evenwicht hielden, zoals bij ziekenhuizen en glastuinbouwbedrijven. Met de energiebedrijven werden contracten afgesloten waardoor bij een grotere behoefte aan warmte het overschot aan elektrische energie aan het elektriciteitsnet kon worden terug geleverd. Liberalisatie van de energiemarkt heeft hierin verandering gebracht. Energiebedrijven kopen hun energie in waar deze het goedkoopst is en ze zijn niet bereid om voor terug geleverde elektrische energie van warmte/kracht-centrales meer te betalen. Hierdoor zijn de met aardgas gestookte kleinschalige warmte/kracht-centrales niet meer rendabel.

3.5.2 Zonne-energie

De meest eenvoudige manier om zonne-energie voor klimaatregeling te gebruiken is toepassing van ramen op het zuiden. Dat geldt zeker voor woningen. Kantoren hebben een hogere interne warmtebelasting waardoor ze vaker een warmteoverschot hebben dan een warmtebehoefte. Een warmteoverschot betekent dat moet worden gekoeld en dat zontoetreding via ramen op het zuiden op dat moment niet wenselijk is. Goed regelbare klimaatgevels in combinatie met lange termijn opslag van in de spouw geabsorbeerde warmte (zie paragraaf 3.5.4) kan de balans laten doorslaan in het voordeel van grote ramen op het zuiden. Zonne-energie is ook te gebruiken om gebouwen te koelen (zie paragraaf 3.5.4).

Op een horizontaal vlak valt jaarlijks ca. 1000 kWh/m² aan zonne-energie en op een schuin naar het zuiden gericht vlak (hellingshoek 30 tot 40°) ca. 1140 kWh/m². **Zonnecellen**, ook wel fotovoltaïsche of PV-cellen genoemd, zetten - afhankelijk van het kristaltype waaruit ze zijn opgebouwd - 8 tot 18% van de zonne-energie om in elektrische stroom. Deze stroom is voor verschillende doeleinden te gebruiken zoals voor de aandrijving van ventilatoren, pompen of warmtepompen.

Zonnecollectoren absorberen zonnestraling, zetten die om in warmte en dragen die over aan water of lucht. Hiervoor stroomt water of lucht door buizen die zijn gehecht aan een metalen plaat met een warmteabsorberende laag. De afmeting van de plaat bepaalt de absorberende oppervlakte van de collector. Om warmteafgifte aan de buitenlucht te beperken is de collector met een glas of transparante kunststof afgedekt. Het in de collector verwarmde water dient meestal als warm tapwater dat, op momenten dat het niet direct wordt gebruikt, in een voorraadvat wordt bewaard (zie figuur 3.2). De combinatie van zonnecollector en voorraadvat noemen we "zonneboiler". Het rendement van zo'n systeem, dat wil zeggen het deel van de opvallende zonne-energie dat nuttig wordt gebruikt, is gemiddeld 25%. Als het water voor tapwater wordt gebruikt moet de temperatuur ten minste 60 °C zijn om de groei van legionellabacteriën in het systeem tegen te gaan. Daarvoor kan na-verwarming nodig zijn. Hiervoor gebruikt men meestal de warmte van een centrale verwarmingsinstallatie en soms een elektrisch verwarmingselement.

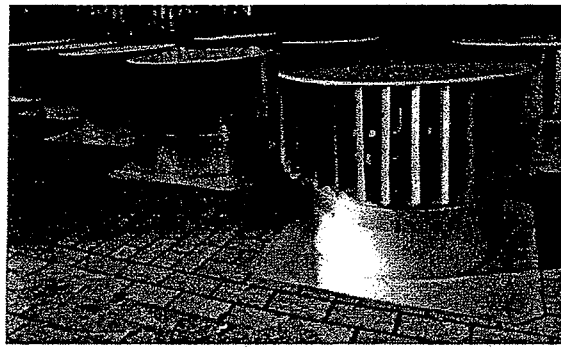
Zonneboilers hebben geen betekenis voor de klimaatregeling van gebouwen. Zonnecollectoren zijn wel voor ruimteverwarming te gebruiken, bijvoorbeeld met lucht als transportmedium. Een "Trombewand" is zo'n toepassing (zie figuur 3.3). Een ander voorbeeld is een zonneshoorsteen waarmee onderdruk in een gebouw wordt gecreëerd en het effect van natuurlijke ventilatie wordt versterkt (zie figuur 3.4).

3.5.3 Windenergie

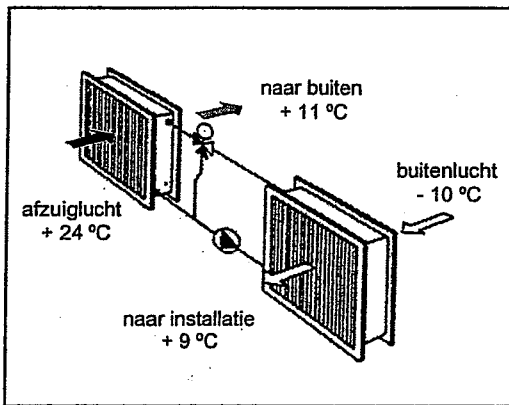
Bij windenergie denk je al gauw aan windturbines voor de productie van elektrische stroom. Toepassing hiervan in de gebouwde omgeving is niet gebruikelijk maar wel denkbaar omdat bij gebouwen door windstuwung hogere windsnelheden ontstaan waardoor 20 tot 30% meer energie aan de wind is te onttrekken dan op gelijke hoogte in open terrein. Bij een gemiddelde windsnelheid van 5 m/s hebben windturbines een vermogen van ca. 75 W per m² door de rotor bestreken oppervlakte en een jaarlijkse opbrengst van ca. 250 kWh/m². Omdat de windsnelheden bij de kust het hoogst zijn is de opbrengst daar ook het hoogst. Windturbines hebben geen directe betekenis voor de klimaatregeling van gebouwen, windenergie op zich heeft dat wel. Hoewel de wind door



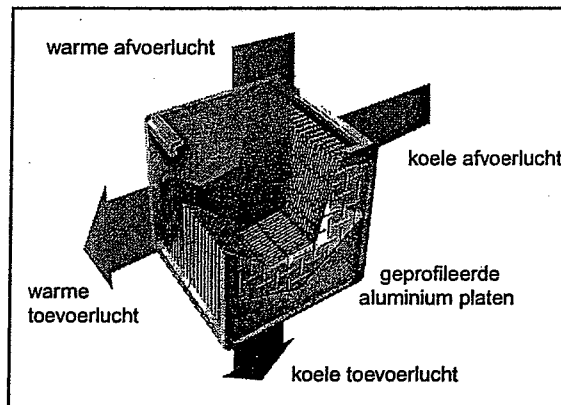
Windvaan of "gek" - Figuur 3.5



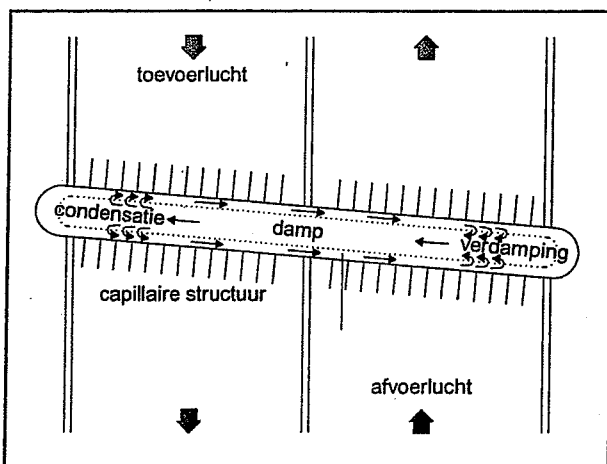
Windrichting ongevoelige kap - Figuur 3.6



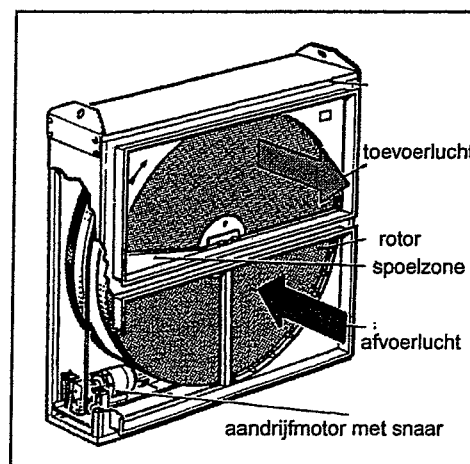
Voorbeeld van een twin coil-systeem - Figuur 3.7



Platenwarmtewisselaar - Figuur 3.8



Verdampings-condensatiepijp of "heat-pipe" - Figuur 3.9



Roterende warmtewisselaar of warmtewiel - Figuur 3.10

variatie in snelheid en richting niet erg betrouwbaar is als ontwerpparameter is het een belangrijke drijvende kracht bij natuurlijke ventilatie en natuurlijke koeling. De betrouwbaarheid is ten dele te verbeteren door natuurlijke ventilatie ongevoeliger te maken voor de windrichting. Dat kan met een op het dak geplaatste ventilatiekap die is voorzien van een windvaan (ook wel "gek" genoemd) die de afvoeropening steeds van de wind afkeert waardoor altijd onderdruk in het ventilatiekanaal ontstaat (figuur 3.5). Iets minder effectief is een voor de windrichting ongevoelige ventilatiekap (zie figuur 3.6).

3.5.4 Warmteterugwinning

Terugwinning van warmte uit de afvoerlucht van gebouwen wordt steeds meer toegepast. Het is een economisch haalbare methode om het energiegebruik te beperken, zowel bij verwarming als bij koeling van gebouwen. Er zijn verschillende systemen met uiteenlopende rendementen en diverse voor- en nadelen.

Het *twee batterijen* of "twin-coil"-systeem bestaat uit een warmtewisselaar in het luchtafvoerkanal en een warmtewisselaar in het toevoerkanal. De warmtewisselaars zijn door leidingen - met daarin water - met elkaar verbonden, een pomp zorgt voor de circulatie van het water (zie figuur 3.7). Heeft de afvoerlucht een hogere temperatuur dan de buitenlucht dan neemt het water aan de afvoerszijde warmte op en staat die aan de aanvoerszijde weer af. Is de afvoerlucht koeler dan de buitenlucht dan werkt het andersom. Het rendement van dit systeem ligt tussen 40 en 60%, dat wil zeggen dat deze percentages van het verschil in warmte-inhoud ("enthalpie") van beide luchtstromen wordt overgedragen. Voordeel van dit systeem is de eenvoudige inbouw.

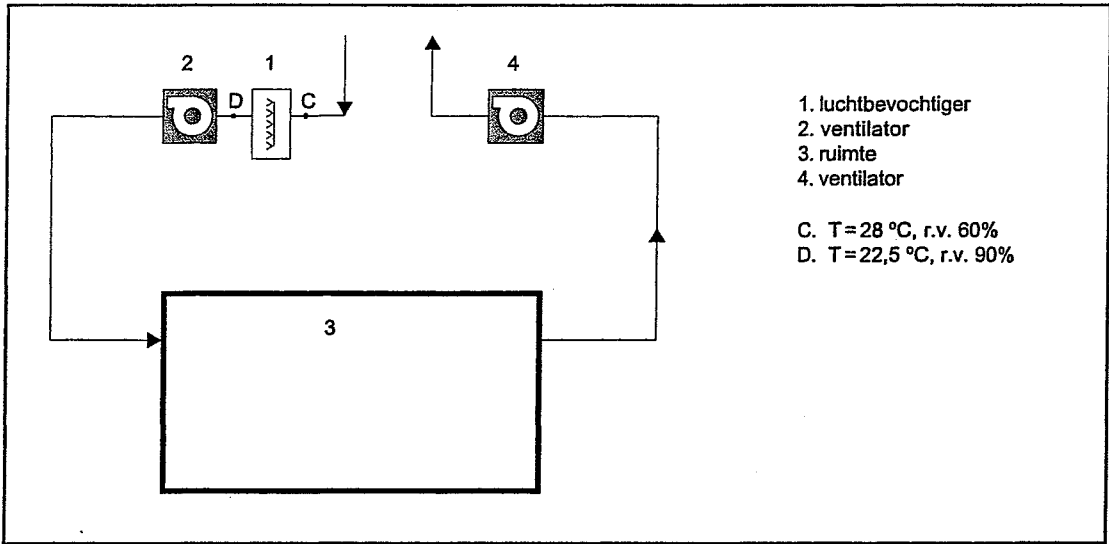
In de *platenwarmtewisselaar* stromen de afvoer- en toevoerlucht, gescheiden door dunne metalen platen, in kruis- of tegenstroom langs elkaar (zie figuur 3.8). Het rendement ligt tussen 40 en 70%. Voordeel van dit systeem is de lage prijs en het ontbreken van bewegende delen. Nadeel is dat voor inbouw de beide luchtstromen (afvoer- en toevoerkanal) bij elkaar moeten zijn gebracht.

Bij de *verdampings-condensatiepijp* ("heat pipe") bevinden zich in een buis een aantal dunne buisjes (zie figuur 3.9). Een deel van de - schuinliggende - buis bevindt zich in de afvoerlucht, het andere deel in de toevoerlucht. Een koelmiddel in de dunne buisjes zorgt voor opname en afgifte van warmte door verdamping en condensatie. Gecondenseerd koelmiddel stroomt door capillaire werking tegen de zwaartekracht in omhoog. Het rendement van het systeem is 40 à 65%. Voordeel van het systeem is het ontbreken van bewegende delen. Nadeel is dat voor inbouw de beide luchtstromen (afvoer- en toevoerkanal) bij elkaar moeten zijn gebracht.

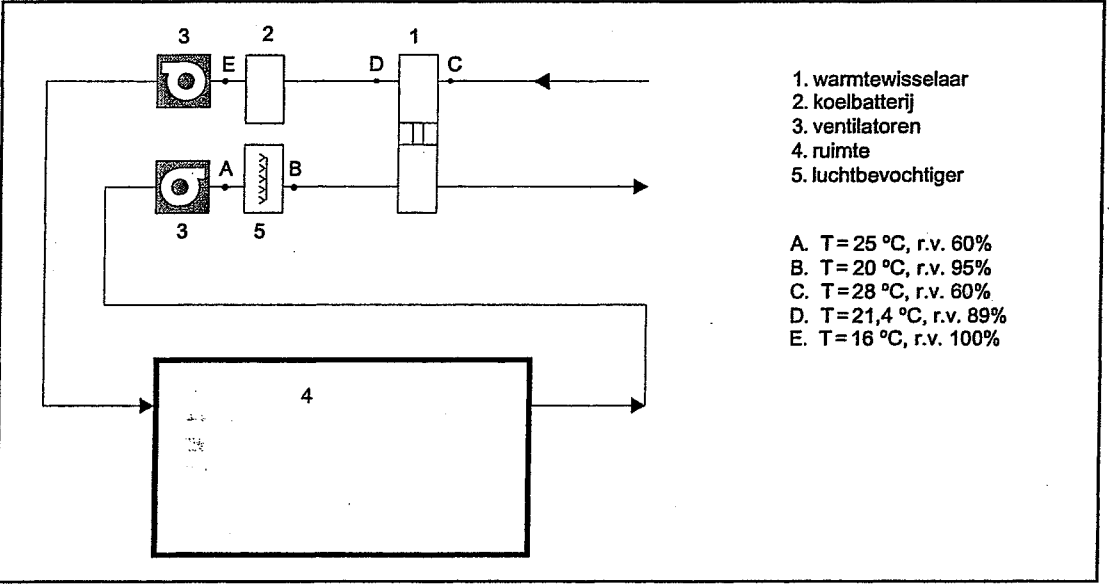
De *roterende warmtewisselaar* ("warmtewiel" of "heat wheel") bestaat uit een ronde schijf-vormige massa met daarin, dwars op de rotatierichting, vele kleine doorstroomkanaaltjes die tezamen een groot contactoppervlak vormen (zie figuur 3.10). De draaiende beweging zorgt ervoor dat de massa achtereenvolgens in de afvoer- en de toevoerstream komt. Tussen beide stromen zit een spoelzone die moet voorkomen dat gasvormige verontreinigingen worden overgedragen. Als de massa uit vochtadsorberend materiaal bestaat wordt naast warmte ook waterdamp overgedragen. We spreken dan over een "regeneratieve" warmtewisselaar als onderscheid met de hiervoor besproken "recuperatieve" warmtewisselaars, waarmee alleen "voelbare" warmte wordt overgedragen. Omdat met damp ook verdampingswarmte ("latente" warmte) wordt overgedragen heeft dit systeem het hoogste rendement van alle hier genoemde systemen, namelijk maximaal 80 à 85%. Het hoge rendement is een voordeel. Nadelen van roterende warmtewisselaars zijn de grote afmetingen van het apparaat en het bij elkaar moeten brengen van de luchttoevoer- en afvoer. Een extra nadeel van de vochtoverdragende uitvoering is dat de in water oplosbare reukstoffen eveneens worden overgedragen. Een variant op het roterende systeem is een apparaat waarbij een kantelklep zorgt voor het wisselend aanwezig zijn van de massa in de toevoer- en afvoerstream.

3.5.5 Adiabatistische koeling

"Adiabatistisch" betekent dat geen warmte wordt toe- of afgevoerd. Bij adiabatistische koeling wordt water in de lucht gebracht door verneveling met sproeikoppen of door de lucht door een "lucht-wasser" te laten stromen. Een luchtwasser bestaat uit lamellen of luchtdoorlatende vezels ("mat-



Processchema directe adiabatische koeling - Figuur 3.11



Processchema indirecte adiabatische koeling - Figuur 3.12

ten") waarover water wordt gespreid. Het water verdampt en onttrekt daarbij warmte aan de lucht waardoor de temperatuur van de lucht daalt. We spreken daarom ook wel over "verdampingskoeling". Een nadeel van deze vorm van koeling kan zijn dat de luchtvochtigheid toeneemt. "

Bij luchtbehandeling kan de aangezogen buitenlucht *direct* of *indirect* adiabatisch worden gekoeld. Het directe proces (zie schema figuur 3.11) is minder populair door het risico van "luchtbevochtigerskoorts" [9] en de lagere energetische effectiviteit. Bij indirecte adiabatische koeling wordt de afvoerlucht bevochtigd en met deze lucht en een warmtewisselaar vervolgens de van buiten aangezogen lucht gekoeld (zie schema figuur 3.12). Met het indirecte adiabatische koelproces zijn besparingen op de koelenergie te bereiken van 25% en meer. In paragraaf 4.7.2 wordt dit koelproces uitgelegd aan de hand van een Mollier-diagram.

Adiabatische koeling is te combineren met luchtdroging en wordt "*Desiccative Evaporative Cooling*" genoemd. Kenmerkend voor dit proces is dat zowel de van buiten aangezogen lucht als de afvoerlucht wordt bevochtigd. Door verwarming wordt de relatieve vochtigheid van de afvoerlucht verlaagd waarna met deze lucht en een regeneratieve warmtewisselaar de van buiten aangezogen lucht wordt gedroogd. In deze gedroogde lucht kan meer water verdampen zodat met deze lucht dieper is te koelen. Voor verwarming van de afvoerlucht wordt afvalwarmte of zonnwarmte ("Solar Assisted Desiccative Evaporative Cooling") gebruikt. In paragraaf 4.7.3 wordt dit koelproces toegelicht aan de hand van een Mollier-diagram.

3.5.6 Koelen met koeltorens

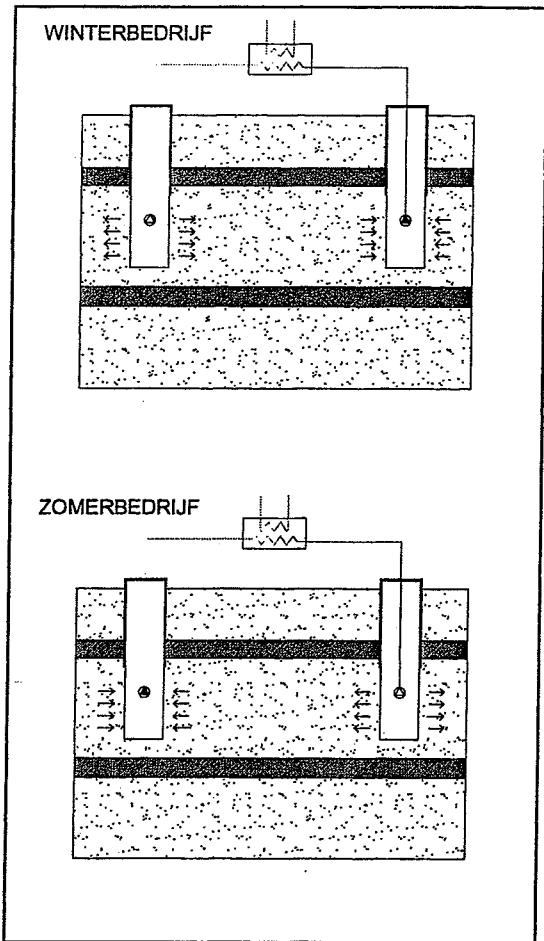
Met koeltorens is water op een "natuurlijke" wijze te koelen tot een temperatuur die beneden de buitentemperatuur ligt. Deze temperatuur, die de "psychrometrisch natte luchttemperatuur" van de buitenlucht benadert, is weliswaar niet zo laag als de temperatuur die met een koelmachine is te bereiken maar vaak laag genoeg om er een gebouw mee te kunnen koelen. Met koeltorenwater kunnen de warmtewisselaars van luchtbehandelingskasten, ventilatorconvectoren en inductie-units worden gevoed. Ook is het mogelijk om koelplafonds met koeltorenwater te voeden. Zie paragraaf 4.4.2.4 voor toelichting op de werking van koeltorens.

3.5.7 Lange termijn warmteopslag

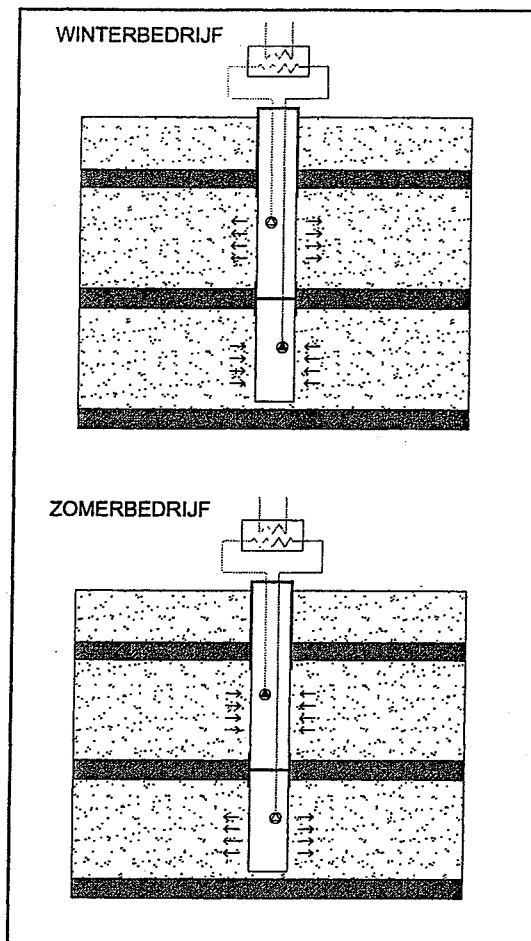
Met lange termijn opslag kunnen gebouwen in de zomer worden gekoeld met "koude uit de winter" en in de winter worden verwarmd met "warmte uit de zomer". Een aquifer dient voor opslag van koude en warmte. Een aquifer is een waterhoudende zandlaag in de bodem die door klei- of leemlagen van andere zandlagen is gescheiden. Voorwaarde is dat het water in de zandlaag stilstaat. Dergelijke lagen liggen op diepten van 50 tot 100 meter onder het maaiveld. In Nederland is de bodemtemperatuur een meter onder het maaiveld ca. 10°C en neemt per 100 meter ongeveer 3°C toe.

In de aquifer bevinden de "warme" en de "koude" bron zich op enige afstand van elkaar, zie figuur 3.13. Ook worden wel bronnen in twee boven elkaar liggende zandlagen aangebracht, zie figuur 3.14. Een bron is een buis waarvan het onderste deel is geperforeerd. In de buis bevindt zich een pomp waarmee het water omhoog wordt gevoerd. Via de zelfde buis kan ook water worden teruggevoerd. Bij lage buitentemperaturen wordt water aan de "warme" bron onttrokken, door gebruik afgekoeld en naar de "koude" bron teruggevoerd. Bij hoge buitentemperaturen werkt het andersom. Omdat het diepe grondwater niet in contact mag komen met (chemisch en bacteriologisch) verontreinigd water uit de bovengrondse installatie, moeten de watercircuits door een warmtewisselaar zijn gescheiden. De scheiding is ook nodig om te voorkomen dat zuurstof in het diepe grondwater komt waardoor in het water opgeloste mineralen en zouten uitvlokken en de perforatie kunnen verstopen.

Bij lage buitentemperaturen is de temperatuur van de "warme" bron te laag om er direct mee te kunnen verwarmen. De warmte uit het water is dan te benutten met een warmtepomp (zie paragraaf 3.5.5). Het water uit de "koude" bron kan een zodanig lage temperatuur hebben dat het direct voor koeling is te gebruiken, bijvoorbeeld met koelplafonds. De koude is ook indirect te gebruiken namelijk als koelwater voor een koelmachine.



Aquifer met twee bronnen in dezelfde watervoerende laag
- Figuur 3.13



Aquifer met bronnen in twee boven elkaar liggende lagen
- Figuur 3.14

Een andere systeem waarbij gebruik wordt gemaakt van het warmteaccumulerende vermogen van de bodem is "aardtunnel ventilatie". Via een (kunststof) buizenstelsel dat op een diepte van enige meters onder het maaiveld ligt wordt buitenlucht aangezogen. Bij lage temperaturen warmt de van buiten aangezogen lucht in de buizen op en bij hoge buitentemperaturen koelt de lucht in de buizen af. Het effect is niet constant en afhankelijk van de buitentemperatuur, de diepte waarop de buizen liggen, de aanwezigheid van grondwater en de snelheid waarmee het grondwater stroomt. Veel stroming komt vooral voor bij ondiep grondwater in de nabijheid van oppervlaktewater.

De mogelijkheden van lange termijn warmteopslag zijn, onder andere in samenhang met bebouwingsdichtheid en de diepte en de stroming van het grondwater, niet overal gelijk. Per toepassing is onderzoek nodig naar wat plaatselijk mogelijk is en naar het te verwachten effect. Eenvoudige ontwerp- of rekenregels zijn niet te geven. Het eerder aangehaalde voorbeeld van de ING-bank, zie figuur 3.1, toont aan dat lange termijn warmteopslag het mogelijk maakt om zeer transparante gebouwen te realiseren die aan strenge energieprestatie-eisen voldoen.

3.5.8 Warmtepompen

Een warmtepomp is een apparaat waarmee warmte van een laag temperatuurniveau naar een hoog temperatuurniveau wordt getransporteerd. Het werkingsprincipe is gelijk aan dat van een koelmachine. Net als koelmachines werken warmtepompen volgens het absorptieprincipe of het compressieprincipe. Paragraaf 4.4.2.2 beschrijft beide principes. Bij warmtepompen is de verdampert het element waarmee warmte wordt onttrokken aan buitenlucht of aan grond- of oppervlaktewater en de condensor het element waarmee warmte uit het proces vrijkomt voor nuttig gebruik.

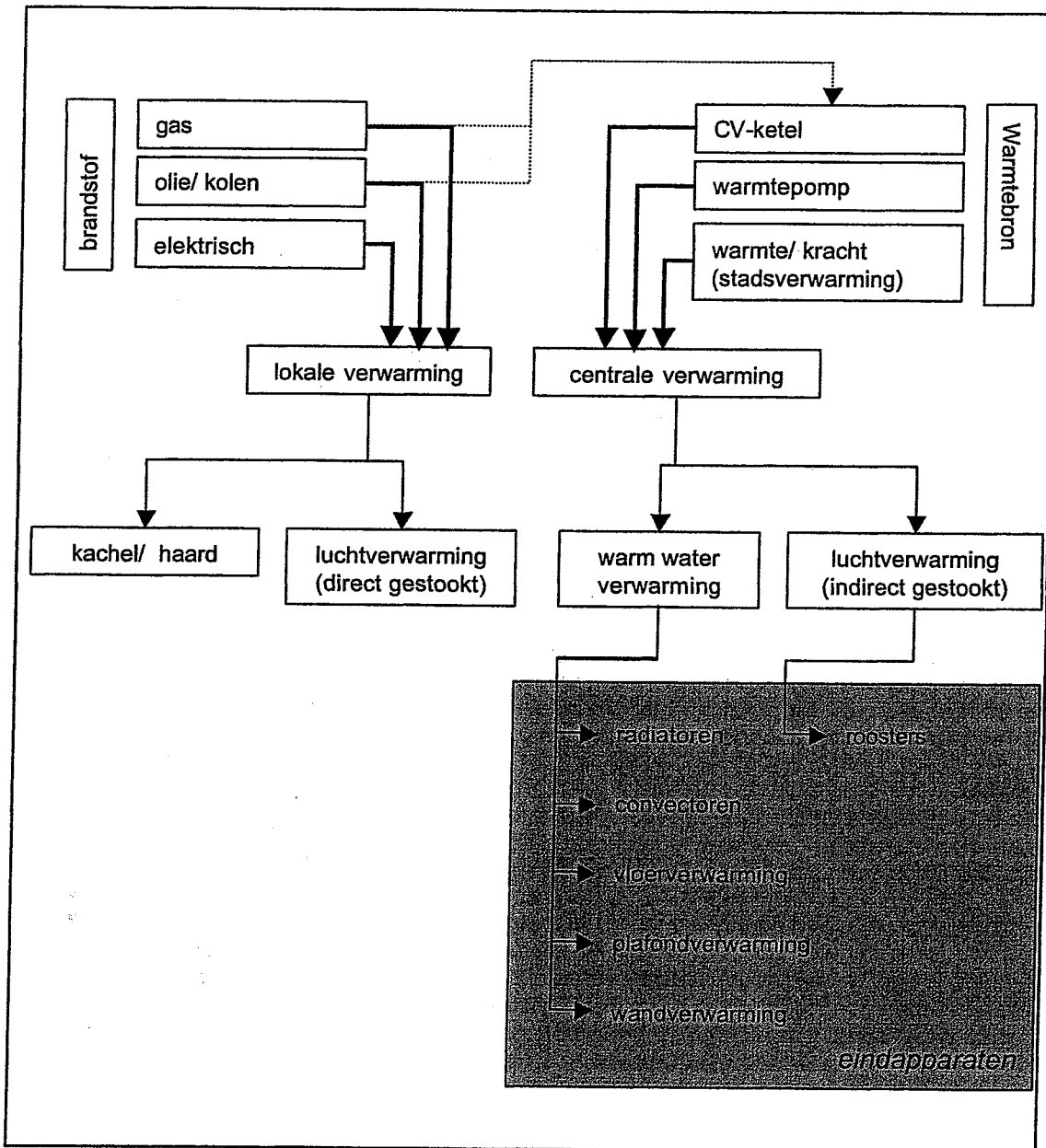
De prestatie van warmtepompen wordt aangegeven met de "Coëfficiënt of Performance"-factor. Deze COP-factor geeft bij compressie-warmtepompen de verhouding weer tussen de afgegeven warmte en het door de compressor opgenomen mechanische vermogen. De COP is afhankelijk van de belasting en heeft een waarde tussen 1 en 5. De gemiddelde COP is bij gemiddelde belasting ongeveer 3,9.

Het totale rendement, betrokken op de hoeveelheid brandstof, wordt bij een elektrisch aangedreven warmtepomp bepaald door de COP, het rendement van de aandrijving (elektromotor $\eta_{motor} \approx 0,95$) en het rendement van de productie en het transport van elektriciteit ($\eta_{elektr.bedr} \approx 0,4$). Voor een gemiddelde warmtepomp is dit:

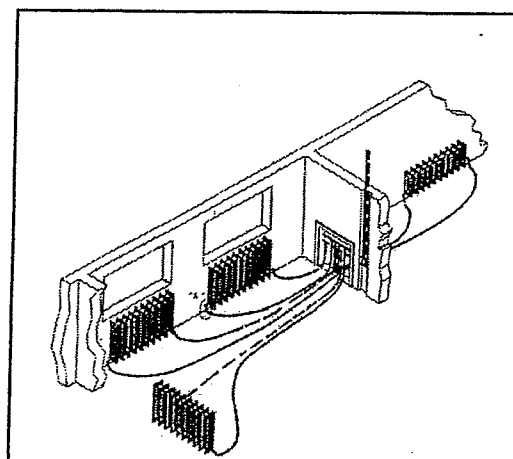
$$\eta_{warmtepomp} = COP \times \eta_{motor} \times \eta_{elektr.bedr} \approx 3,9 \times 0,95 \times 0,4 = 1,48$$

Bij directe aandrijving van de warmtepomp door een gasmotor of dieselmotor is het rendement respectievelijk ca. 1,6 en 1,7. Het rendement van een absorptiewarmtepomp is 1,3.

Met een aardgasgestookte hoogrendement verwarmingsketel (HR-ketel) is een gebruiksrendement van 0,9 haalbaar. Kijkend naar de benodigde hoeveelheid fossiele brandstof heeft een warmtepomp een 45 tot 90% hoger rendement dan een HR-ketel.



Overzichtsschema verwarmingssystemen - Figuur 4.1



Radiatorleidingen in dekvloer - Figuur 4.2