

Energiezuinig schoolgebouw in een geluidsbelaste omgeving

Ing. J.T.H. Straatman*



*Proefproject Hogeschool voor Economische Studies Rotterdam
Energy efficient building in a noisy environment*

Samenvatting

Eisen aan de geluidswering van gevels van scholen kunnen gebalanceerde ventilatie noodzakelijk maken. Bijkomend voordeel is dat mechanische ventilatie de binnenmilieukwaliteit continu garandeert. Het is nadelig dat de luchtbehandelingsinstallatie de elektriciteitsrekening verhoogt. Het energiegebruik voor verwarming van ventilatielucht kan daarentegen aanzienlijk worden beperkt door mechanische ventilatie uit te breiden met warmteterugwinning. Het elektriciteitsverbruik voor verlichting is te verminderen door na elke les de kunstverlichting uit te schakelen en door verlichtingsarmaturen buiten bedrijf te stellen bij voldoende daglicht. Dit artikel vat de belangrijkste conclusies samen van een proef van energiezuinig bouwen van de Hogeschool voor Economische Studies (HES) te Rotterdam.

Summary

The acoustic requirements of school-facade, can necessitate a balanced mechanical ventilation. An advantage of mechanical ventilation is that the inside environmental quality can be continually guaranteed. One disadvantage however is that the air handling installation increases the electricity costs. The energy used for heating the ventilation air can be reduced by including a heat recovery unit within the mechanical ventilation system. The electricity usage due to lighting can be reduced by switching the artificial lighting off after each lesson and by eliminating certain lighting by sufficient natural light. This article is a summary of the most important conclusions of an experiment of the energy efficient building of the Hoge school voor Economische Studies (HES) in Rotterdam.

Inleiding

In 1985 is de Hogeschool voor Economische Studies (HES) te Rotterdam opgeleverd. De HES is een school in een geluidsbelaste omgeving en is een proef van energiezuinig bouwen.

Het gebouw en de installaties (ontwerp 1984) wijken aanzienlijk af van gebruikelijke schoolgebouwen. De geluidsbelasting van de buitengevel is te hoog om daarin openingen voor natuurlijke ventilatie aan te kunnen brengen. Daarom is een mechanisch ventilatiesysteem geïnstalleerd. Dit zorgt tevens voor ruimteverwarming, zodat een traditionele radiatorenverwarmingsinstallatie overbodig is.

In het gebouw zijn enkele energiezuinige concepten toegepast, zoals:

- warmteterugwinning uit ventilatielucht;
- periodieke uitschakeling van de verlichting;
- uitschakeling van verlichting bij voldoende daglicht;
- een installatiebeheersysteem.

Uiteraard is het gebouw goed geïsoleerd en luchtdicht gebouwd.

In opdracht van de Nederlandse Maatschappij voor Energie en Milieu (NOVEM) te Sittard en Apeldoorn is de werking van de installaties in relatie tot het gebouw geëvalueerd door b.v. Adviesbureau Huygen Rotterdam [1]. Dit artikel vat de belangrijkste conclusies van de evaluatie samen. Achtereenvolgens komen de achtergronden van het experiment, het ontwerp van gebouw en installaties, de investeringen en de resultaten van de evaluatie aan de orde.

Achtergrond experiment

Conventionele schoolgebouwen zijn voorzien van radiatorenverwarming en natuurlijke ventilatie door middel van te openen ramen. De verwarmingssystemen voldoen in het algemeen goed. Dit geldt niet altijd voor natuurlijke ventilatie. Het inbrengen van ongeveer 600 m³ verse en koele buitenlucht per uur (20 m³ per uur per persoon) gaat soms gepaard met tocht- en geluidklachten. Het gevolg daarvan is dat de ventilatievoorzieningen geheel of gedeeltelijk gesloten blijven en er te weinig wordt geventileerd. Vanuit hygiënisch oogpunt is dit niet wenselijk. Een beter ontwerp van de natuurlijke ventilatievoorzieningen kan een oplossing zijn, bijvoorbeeld hoog in de gevel geplaatste, naar binnen slaande klepramen. Indien een gebouw is geprojecteerd in een geluidsbelaste omgeving moeten voorzieningen worden getroffen om geluidsoverlast in het gebouw binnen de perken te houden. Het is dan noodzakelijk de natuurlijke ventilatievoorzieningen te voorzien van geluidwering.

Gezien de grote hoeveelheid ventilatielucht die nodig is voor schoollokalen, is natuurlijke ventilatie dan praktisch niet aantrekkelijk, zowel uit overwegingen van kosten als vanwege technische uitvoerbaarheid. Mechanische ventilatie is een alternatief.

Mechanische ventilatie biedt tevens de mogelijkheid om warmte terug te winnen uit de af te voeren ventilatielucht. Met de teruggewonnen warmte kan de toevoerlucht worden voorverwarmd. Het energiegebruik voor ventilatie vermindert daardoor aanzienlijk.

De HES ligt aan de Maasboulevard te Rotterdam, een drukke verkeersader vanaf het centrum van de stad naar de Van Brienoordbrug. De geluidsbelasting van de zuidgevel is hoog. Daarom is een 'dichte' gevel toegepast zonder te openen ramen. Een luchtbehandelingssysteem met warmteterugwinning zorgt voor ventilatie.

Behalve warmteterugwinning uit ventilatielucht zijn nog twee energiezuinige concepten beproefd, namelijk automatische periodieke uitschakeling van de verlichting en gedeeltelijke uitschake-

* NOVEM WDC Consulting B.V.

ling van de verlichting, afhankelijk van het daglichtniveau. Met beide wordt beoogd te voorkomen dat verlichting langdurig onnodig in bedrijf is. Bij de daglichtschakeling komt daarbij dat het verlichtingsniveau in een lokaal dan gelijkmatiger is.

Ontwerp
Gebouwontwerp

Het gebouw, met een vloeroppervlakte van ongeveer 6.600 m², is bedoeld voor 1.000 studenten. De werkelijke bezetting is overigens ongeveer 1.200 studenten en 400 studenten in een dependance. Inmiddels is een tweede gebouw in aanbouw.

Naast collegezalen voor 70 tot 140 studenten zijn er leslokalen, werkgroep ruimten, spreekkamers en kantoorruimten. Door de beperkte capaciteit is gezocht naar een zo groot mogelijke benutting van het gebouw voor onderwijs en begeleiding. Daarom is het gebruikelijke gangensysteem vervangen door studieruimten tussen gevelvertrekken.

Het gebouw bestaat uit drie verdiepingen. Figuur 1 geeft een indruk van het gebouw*. Figuur 2 toont plattegronden van de drie verdiepingen en een gevelaanzicht.

In tabel 1 zijn enkele basisgegevens opgenomen. Het grondplan is globaal 92 bij 23 meter en een hoogte van 11 meter. In verband met de korte bouw tijd is gekozen voor zoveel mogelijk geprefabriceerde onderdelen. De vloeren, het dak, de gevelelementen en de binnenuit zijn voor montage in de fabriek vervaardigd. De gevelelementen bestaan uit een sandwichconstructie van glasvezelgewapend beton met daartussen PIR-schuim.

Het schoolgebouw is zeer goed geïsoleerd. Behalve aan thermische isolatie is extra aandacht besteed aan de luchtdichtheid. De ramen op het zuiden zijn voorzien van automatisch bediende zonwering.

Luchtbehandeling en verwarming

De luchtbehandelingsinstallatie is een gecombineerde installatie voor ventilatie en verwarming. Figuur 3 geeft de installatie schematisch weer. Centraal wordt verse buitenlucht voorbehandeld. De buitenlucht wordt in de luchtbehandelingskast gefilterd, opgewarmd door een warmtewiel en voorverwarmd tot een basistemperatuur. De lucht wordt vervolgens naar de verschillende ruim-

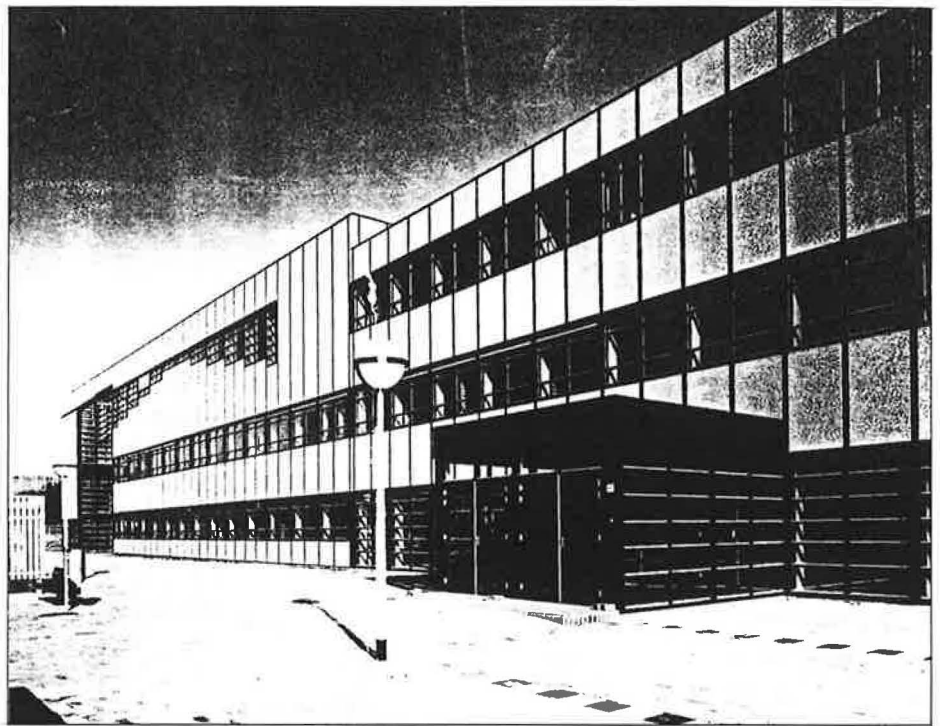


Fig. 1 De Hogeschool voor Economische Studies te Rotterdam, gevelaanzicht

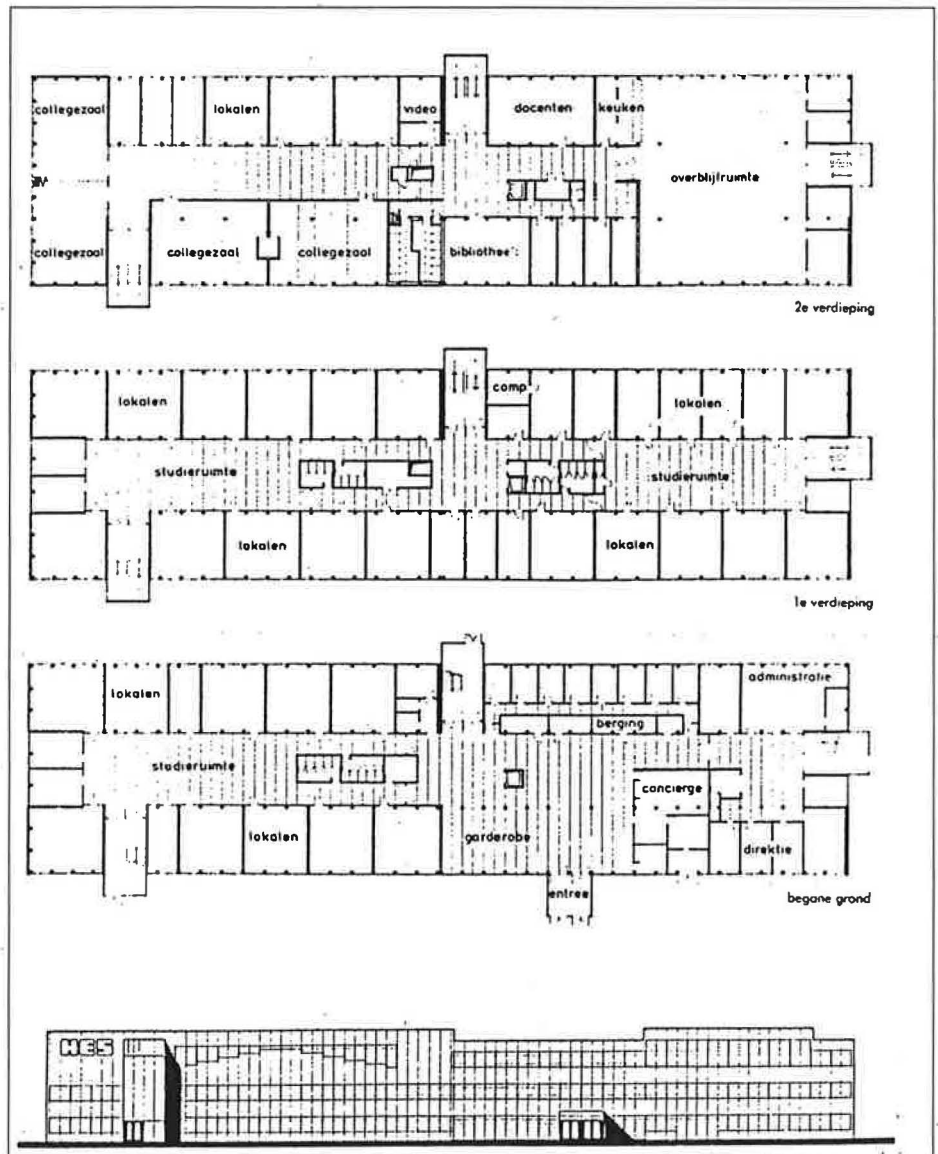


Fig. 2 Plattegronden en voorgevel

* Bron: Veldhoen Raalte.

ten getransporteerd. Per ruimte wordt de lucht naar behoefte naverwarmd. De toevoerroosters zijn hoog in de tegenover de buitengevels gelegen binnenwanden gesitueerd. De luchtbehandelingsinstallatie is niet voorzien van recirculatie, koeling of bevochtiging. Onder de ramen zijn ook geen radiatoren aangebracht.

De energie in de afvoerlucht uit de vertrekken ('voelbare warmte') wordt teruggewonnen door middel van een warmtewiel en overgedragen aan de toevoerlucht. De energiebehoefte voor verwarming van ventilatielucht tot de basistemperatuur vermindert daardoor met ongeveer 85%.

Wanneer de lokalen in bedrijfstijd niet bezet zijn worden ze op een basistemperatuur (T_{onbezet}) verwarmd. Bij bezetting wordt de temperatuur verhoogd tot het gewenste niveau (T_{bezet}). In een klokprogramma zijn de tijdvakken vastgelegd waarin de lokalen zijn bezet.

Buiten bedrijfstijd is de luchtbehandelingsinstallatie uitgeschakeld, behoudens vorstgevaar of nachtventilatie. Nachtventilatie en meerinvesteringen komen verderop aan de orde.

Regeling

Voor regeling en sturing van de installaties voor verwarming, ventilatie, verlichting en zonwering zorgt een installatiebeheersysteem. De schoolbeheerder kan een beperkt aantal parameters zelf instellen, zoals bedrijfstijden. De instelpunten van binnentemperatuur, ventilatie en verlichting liggen in de software vast. Hierdoor kunnen gebruikers de installatie in principe niet ontregelen. Daar staat tegenover dat mogelijkheden om de instellingen aan te passen aan wensen van gebruikers beperkt zijn. De huidige installatiebeheersystemen zijn verder ontwikkeld en aanzienlijk verfijnd.* Vooral de gebruikersvriendelijkheid is verbeterd.

Het verloop van de gewenste temperatuur gedurende het opwarmen van het schoolgebouw is afgestemd op het specifieke installatieconcept. De lokalen worden verwarmd met behulp van het luchtbehandelingssysteem. Lucht wordt toegevoerd via hooggeplaatste roosters in binnenwanden aan de gangzijde van de lokalen. Het toevoeren van warme lucht langs het plafond kan leiden tot een sterke verticale temperatuurstratifi-

omschrijving	inhoud m^3	oppervlak m^2	warmtedoorgangscoëfficiënt U in W/m^2K
gebouw-oppervlakte	bruto 23.000	omhullend 8.050	
vloer		6.600	0,50
gevel: niet-transparant		2.500	0,25
glas		1.250	3,30
dak		2.100	0,40

Tabel 1 Basisgegevens van de Hogeschool voor Economische Studies

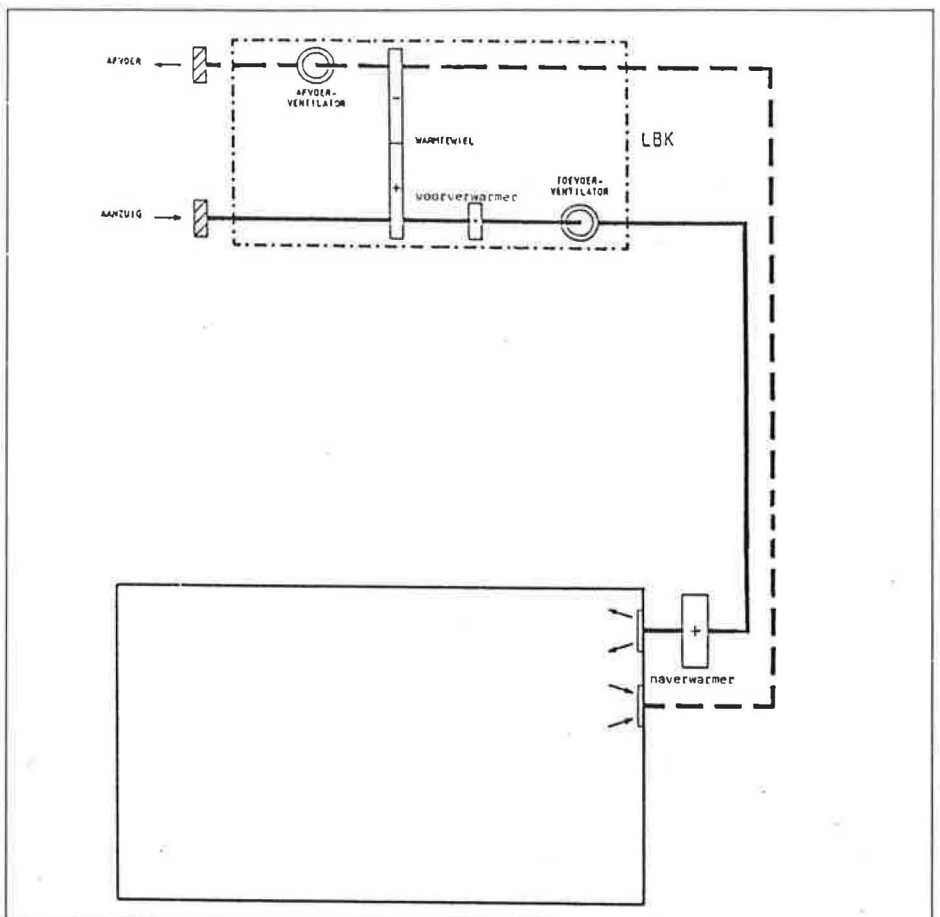


Fig. 3 Schema van de luchtbehandelingsinstallatie

catie. Daarbij kan de temperatuur van de luchtlag bij het plafond veel hoger zijn dan de luchtlag bij de vloer. Temperatuurverschillen hebben een nadelige invloed op de behaaglijkheid. Om stratificatie te voorkomen moet de lucht in de lokalen circuleren voordat de toevoerlucht wordt verwarmd.

Het opstookpatroon bestaat uit twee fasen:

— gedurende het begin van het opstoken is de toegevoerde lucht slechts weinig warmer dan de vertrekvlucht (T_{onbezet}). De lokale naverwarmers blijven dan buiten bedrijf. Gedurende deze beginperiode wordt de aanvankelijk stilstaande lucht in de vertrekken in circulatie gebracht;

— indien de vertrekken volgens het klokprogramma van de school bezet zijn, zorgen lokale naverwarmers ervoor dat het vertrek snel tot de gewenste temperatuur (T_{bezet}) wordt verwarmd door de toevoerluchttemperatuur te verhogen.

In figuur 4 is het typische temperatuurspatroon van toevoerlucht en vertrekvlucht weergegeven. Figuur 5 geeft een beeld van het gemeten temperatuurspatroon.

Nachtventilatie

Het binnenklimaat van een gebouw kan grofweg in twee perioden worden gesplitst: de winter en de zomer. Gedurende de winterperiode moet het ge-

* Bij NOVEM is de brochure 'Het geautomatiseerde schoolgebouw' verkrijgbaar.

bouw in het algemeen worden verwarmd. De interne warmtelast en zonstraling leveren dan een bijdrage aan verwarming.

In de zomer kan de verwarmingsinstallatie worden uitgeschakeld. De binnentemperatuur is dan de resultante van een evenwicht tussen in- en uitgaande energiestromen. Vooral in de zomer, maar ook in voor- en najaar, kunnen zich situaties voordoen waarbij de binnentemperatuur te hoog oploopt als gevolg van interne warmtelast en zonstraling. Een binnentemperatuur van ongeveer 26°C of hoger wordt in het algemeen als onbehaaglijk ervaren [ISO 7730-1984].

De temperatuur van de buitenlucht verloopt gemiddeld volgens een dagpatroon, met in de late nacht het laagste niveau en rond de middag het hoogste niveau. Daarnaast volgt de buitentemperatuur een langere termijnpatroon met een stijgende of dalende trend van de gemiddelde temperatuur over een dag. In verband met de hoge binnentemperaturen is de stijgende trend gedurende perioden van meerdere dagen van belang.

Onder zomerse omstandigheden zal de binnentemperatuur in de loop van een dag geleidelijk oplopen door stijging van de buitentemperatuur en door de interne warmtelast. De gebouwconstructie zal de stijging van de binnentemperatuur afzwakken door het accumuleren van warmte. In de loop van de nacht staat de gebouwconstructie de geaccumuleerde warmte weer af aan de binnenlucht.

's Nachts daalt de buitentemperatuur waardoor het gebouw in principe af kan koelen. Indien de buitentemperatuur echter relatief hoog blijft (stijgende trend van de gemiddelde buitentemperatuur) zal de in de gebouwmassa opgeslagen energie 's nachts niet geheel door transmissie kunnen worden afgevoerd. Elke volgende dag begint de opwarming van het gebouw dan op een iets hoger temperaturniveau. In enkele dagen stijgt de binnentemperatuur geleidelijk tot een ongewenst hoog niveau.

Om de afkoeling te vergroten kan de luchtbehandelingsinstallatie 's nachts in bedrijf worden gesteld. De relatief koele buitenlucht wordt weer afgevoerd na opwarming door interne bronnen, waarvan de gebouwconstructie er één is. Bij een binnentemperatuur 's nachts van ten minste 23°C en een buitentemperatuur van maximaal 19,5°C is de koelcapaciteit van de ventilatielucht zo groot

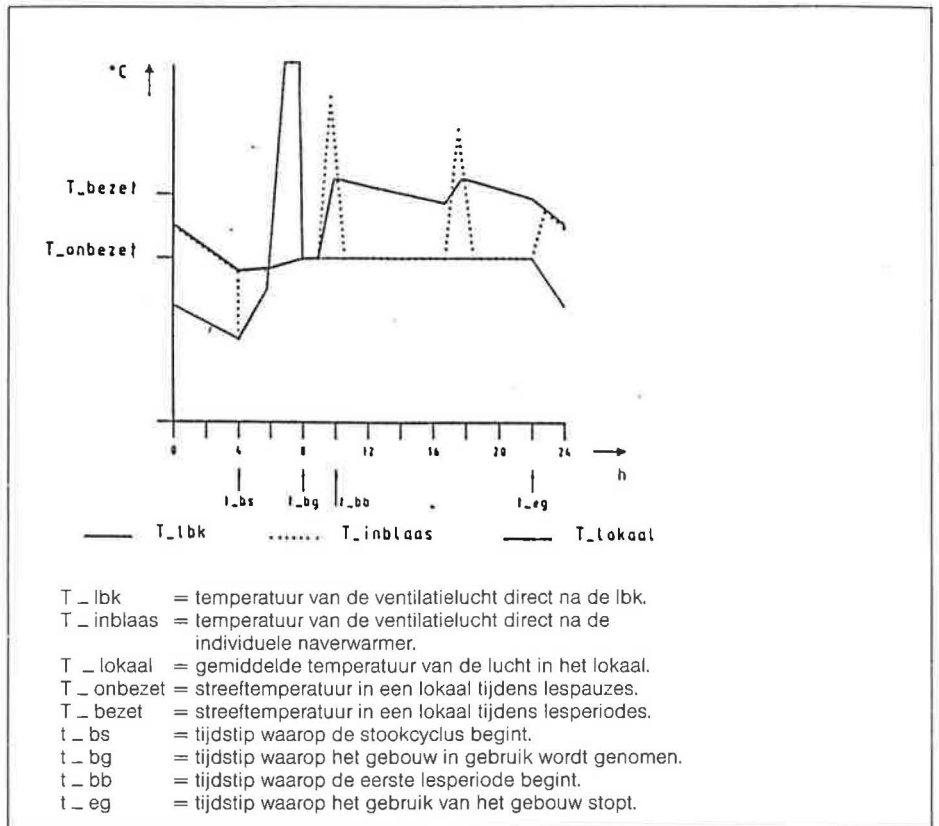


Fig. 4 Gewenst temperatuurpatroon

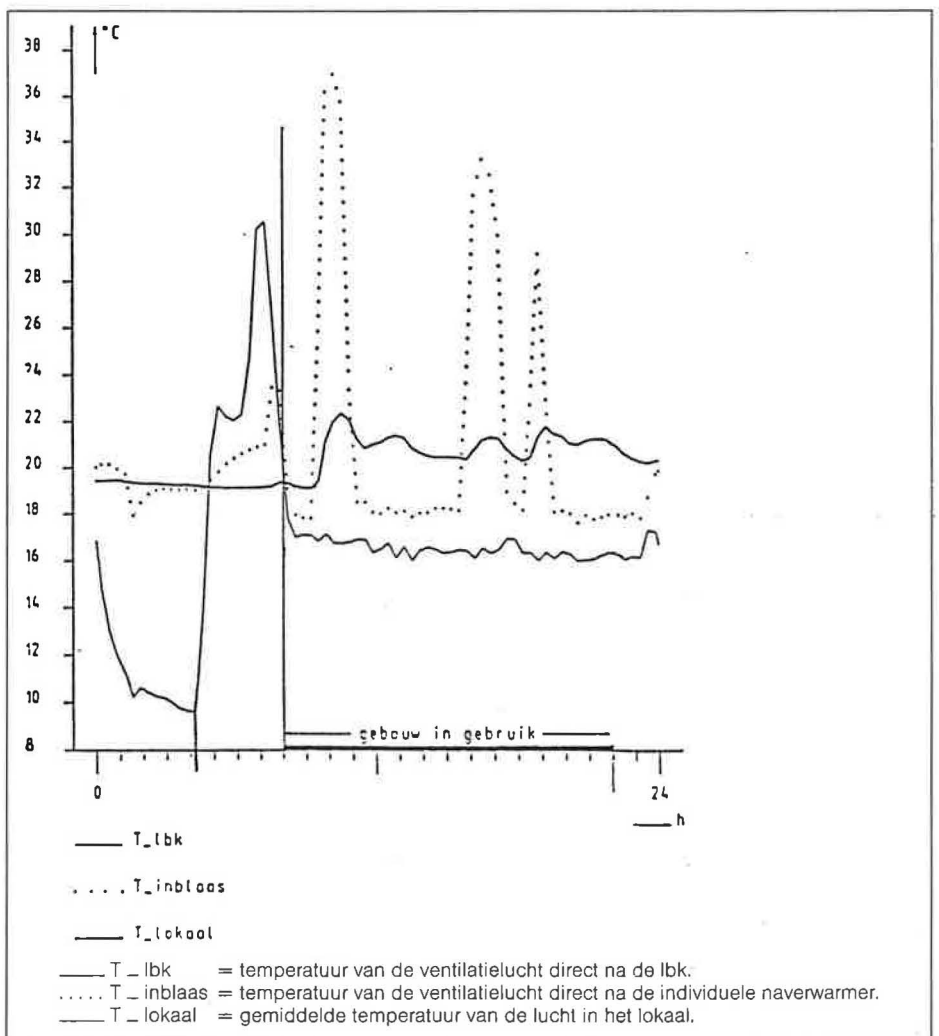


Fig. 5 Gemeten temperatuurpatroon

dat het zinvol is om de luchtbehandeling (ventilatie) 's nachts in bedrijf te stellen.

Verlichting

De verlichtingsarmaturen van de HES zijn van het normale type. Uit vooronderzoek bleek namelijk dat bij toepassing van minder dan acht armaturen, maar met een hoger rendement, de lichtverdeling, bij de gegeven vertrekgeometrie, te ongelijkmatig is. De besturing van de verlichting is energiezuinig ontworpen. Indien het niveau van het daglicht voldoende is, worden verlichtingsarmaturen uitgeschakeld. Daarnaast schakelt een regeling de verlichting automatisch periodiek uit. De daglichtschakeling en de periodieke uitschakeling zorgen ervoor dat de kunstverlichting niet onnodig aan is. Overdag zorgt het daglicht vaak voor een voldoende verlichtingsniveau nabij de gevel. De armaturen bij de gevel kunnen dan worden uitgeschakeld. Het aantal uit te schakelen armaturen is afhankelijk van het daglichtniveau. Uitgaande van de situatie waarbij alle acht armaturen aan zijn, worden bij toenevend daglichtniveau in vier stappen steeds twee armaturen uitgeschakeld. De dichtst bij de ramen geplaatste armaturen worden uiteraard het eerste uitgeschakeld.

In de ruimten die niet continu in gebruik zijn, wordt de verlichting periodiek uitgeschakeld. In theorie lokalen gebeurt dit bijvoorbeeld na ieder lesblok. Mocht de ruimte op het moment dat de verlichting uitgeschakeld wordt toch in gebruik zijn, dan kan de gebruiker deze weer inschakelen. Zodoende wordt voorkomen dat verlichting lang onnodig in bedrijf is.

Evaluatie gebouw en installaties

In de periode vanaf oplevering van de HES tot de zomer van 1989 is de werking van de installaties in relatie tot het gebouw geëvalueerd. In een conventioneel gebouwde scholengemeenschap te Vlaardingen met ongeveer dezelfde afmetingen en compactheid als de HES zijn ook metingen verricht. De mate van isolatie van deze conventionele school is minder dan van de HES. Globaal bezien is de warmteweerstand van de buitenschil ongeveer twee keer zo klein als van de HES en is er enkele beglazing.

Deze conventionele school dient als vergelijkingsbasis voor de bevindingen met betrekking tot de HES.

De evaluatie is als volgt gefaseerd:

- fase 1: algemene metingen tot half juni 1987;
- fase 2a: energiemetingen winter 1987/1988 en lente 1988. Deze metingen vormden de basis voor vergelijking met een conventionele school. Aan het einde van deze fase zijn bouwkundige wijzigingen aangebracht: de isolatie en de luchtdichtheid van de gevel is verbeterd en er zijn te openen ramen aangebracht;
- fase 2b: winter 1988/1989 en lente 1989: vergelijking van energiemetingen HES in fase 2b met die in fase 2a; daarnaast is op basis van metingen in mei en juni de behaaglijkheid onder zomerse condities beoordeeld.

De onderzoeksresultaten worden beschreven in dezelfde volgorde als de bespreking van het ontwerp van gebouw en installaties. De bespreking van de installaties valt uiteen in:

- binnentemperatuur 's winters;
- binnentemperatuur 's zomers';
- warmteterugwinning;
- regeling;
- verlichting;
- gebruikerservaring;
- exploitatiekosten.

Op het energiegebruik wordt verderop in dit artikel ingegaan.

Gebouwontwerp

De kwaliteitseisen die gesteld zijn aan isolatie en luchtdichtheid van de buitenschil zijn hoog door het ontbreken van verwarming nabij de buitenschil. Zoals eerder besproken voert de luchtbehandelingsinstallatie lucht toe via roosters in de binnenwand aan de gangzijde van de lokalen.

Isolatie en luchtdichtheid van de buitenschil zijn beoordeeld aan de hand van thermografisch onderzoek. De resultaten van dat onderzoek waren aanleiding om aan de buitenschil grondige verbeteringen aan te brengen. In dit project is aangetoond dat niet alleen een doeltreffende detaillering, maar ook een adequate uitvoering essentieel zijn voor een goed gebouw.

In het oorspronkelijke gebouwontwerp was de buitengevel gesloten. Het gebouw is aanvankelijk ook volgens dit ontwerp gebouwd. In de zomer van 1988 zijn te openen ramen aangebracht. Eventuele geluidsoverlast wordt op de koop toe genomen.

Binnentemperatuur 's winters

In het algemeen blijkt het gemeten opstookpatroon overeen te komen met het ontwerp (figuren 4 en 5).

Hoog toevoeren van lucht via roosters in de binnenwand aan de gangzijde van de lokalen, zonder verwarming nabij de buitengevel is kritisch voor de behaaglijkheid. Uit metingen van binnentemperaturen op verschillende lokaties in lesruimten van zowel de conventionele school als van de HES is inzicht verkregen in temperatuursgradiënten en temperatuursvariaties. De binnentemperatuur is gemeten op lokaties hoog en laag bij de gevel en in het midden van de lokalen.

In de HES is de verticale temperatuursgradiënt maximaal 2,5 Kelvin per meter in bedrijfstijd. Vergeleken met een in de adviespraktijk gebruikelijke richtlijn van 1 Kelvin per meter is dit hoog. De temperatuur laag bij de gevel is gemiddeld 2 en maximaal 4 Kelvin lager dan in het midden van het lokaal. De belangrijkste oorzaak voor de temperatuursverschillen is het afwisselend inblazen van warme en koele lucht. Gedurende het toevoeren van warme lucht wordt een laag warme lucht gevormd tegen het plafond. Deze laag lost zich op als koele lucht wordt ingeblazen.

De horizontale en verticale temperatuursverschillen in de conventionele school zijn gering. De radiatoren voor de gevel zorgen voor een homogene binnentemperatuur.

Het verschil tussen minimum en maximum temperatuur in één bedrijfsperiode is in de HES maximaal 2 tot 2,5 Kelvin. In de conventionele school is dit verschil maximaal 4,5 Kelvin. Een verklaring voor de grotere temperatuursvariaties in de conventionele school moet gezocht worden in het ventilatiegedrag. De ramen worden geopend bij een relatief hoge binnentemperatuur (ongeveer 23°C), waarna de temperatuur door verhoogde ventilatie snel daalt. In de HES voorziet de luchtbehandeling in een continue ventilatie, waardoor de binnentemperatuur minder oploopt.

De hiervoor besproken metingen hebben betrekking op lesruimten. Uit aanvullende metingen blijkt dat sommige ongunstig gelegen kantoorm ruimten op de begane grond niet voldoende worden opgewarmd. Behalve met opwarmcapaciteit blijken koudeklachten in deze kantoorm ruimten te maken te hebben met een ongunstige luchtstroming, mede door de situering van meubilair.

Door MT-TNO is op verzoek van de Centrale Directie van de HES onderzoek gedaan naar de werking van het luchtbehandelingssysteem. Uit dit onderzoek blijkt dat het alleen hoog toe-

voeren van verwarmde lucht tot temperatuurstratificatie leidt. De warme lucht botst hoog tegen het raam, waardoor in de winter de koudeval wordt versterkt. Op ongeveer 1,5 meter hoogte buigt de verticaal naar beneden gerichte lichtstraal vanaf het raam het vertrek in. De temperatuur van een luchtlaag van 1 tot 1,5 meter boven de vloer blijft te laag. Ook is de luchtsnelheid op sommige plaatsen tot twee keer zo groot als de toegestane 0,2 meter per seconde. Door MT-TNO is voorgesteld een voorzetrooster toe te passen waarmee een deel van de toegevoerde lucht naar de vloer kan worden geblazen. Dit rooster is uiteindelijk toch niet toegepast.

Binnentemperatuur 's zomers

Om na te gaan of er in het gebouw sprake kan zijn van een te hoge binnentemperatuur is een temperatuuroverschrijdingsberekening gemaakt. Deze berekeningen is uitgevoerd met gestandaardiseerde invoergegevens van het buitenklimaat.

De resultaten van de temperatuuroverschrijdingsberekeningen zijn te toetsen aan richtlijnen van de Rijksgebouwendienst uit 1979 [rapport 116.1/B]. In gebouwen met te openen ramen mag de binnentemperatuur gedurende maximaal 5% van de bedrijfstijd (132 uren per jaar) hoger zijn dan 25°C en gedurende maximaal 0,5 tot 1% van de bedrijfstijd (20 uren) hoger dan 28°C. Voor geheel gesloten gevels is tegenwoordig het aanbevolen aantal overschrijdingsuren aanzienlijk kleiner (respectievelijk 2 à 3% en 0%). De resultaten van de berekeningen staan in tabel 2.

Met topkoeling voldoet het binnenklimaat aan de richtlijnen. Het energiegebruik en de exploitatiekosten zouden met topkoeling wel aanzienlijk stijgen. Omdat topkoeling buiten het kader van dit onderzoek viel is daaraan verder geen aandacht besteed.

Door in de zomer 's nachts het gebouw te ventileren met relatief koude buitenlucht kan de overdag in de bouwconstructie opgeslagen warmte worden afgevoerd. Uit de berekeningen blijkt dat met alleen nachtventilatie het aantal uren dat de binnentemperatuur hoger is dan 25°C veel groter is dan wenselijk volgens de richtlijnen. De binnentemperatuur is zelden hoger dan 28°C. In de praktijk kan het aantal overschrijdingsuren overigens meevallen indien de school niet volledig bezet is. Voor het voorjaar is het effect van nachtventilatie op de temperatuuroverschrijding berekend. Globaal gezien

blijkt het aantal overschrijdingsuren te verdubbelen indien nachtventilatie achterwege wordt gelaten. Nachtventilatie blijkt dus een forse bijdrage te leveren aan het beperken van oververhitting. Volgens de metingen koelt het gebouw 's nachts 0,25 tot 0,50 K extra af. Het geleidelijk stijgen van de gemiddelde binnentemperatuur gedurende een warme periode kan daardoor worden beperkt.

De nachtventilatie werd bij de HES ingeschakeld bij een buitentemperatuur van tenminste 19,5°C en een binnentemperatuur hoger dan 23°C. Bij een onjuiste afstelling van de criteria voor het inschakelen van nachtventilatie kan het voorkomen dat 's nachts wordt geventileerd, terwijl vervolgens 's morgens moet worden verwarmd. Dit is niet de bedoeling.

Het buitenklimaat in de zomer wijkt sterk af van dat in de winter. Het lijkt daarom zinvol voor de winter andere regelcriteria te kiezen dan voor de zomer. Door instelpunten (setpoints) specifiek af te stemmen op het seizoen kan worden voorkomen dat de nachtventilatie 's winters te snel wordt ingeschakeld, of 's zomers pas als de bouwconstructie al flink is opgewarmd.

Het controleren van de werking van een dergelijke regeling na oplevering blijkt noodzakelijk.

Het aantal overschrijdingsuren voor de conventionele school is niet berekend. Ook de metingen van de temperatuurverschrijding zijn hier beperkt. Toch lijkt het niet al te gewaagd te veronderstellen dat het binnenklimaat in geïsoleerde scholen met natuurlijke ventilatie onder zomerse omstandigheden niet aan de richtlijnen van de R.G.D. zal voldoen.

Warmteterugwinning

De opbrengst van het warmtewiel is buitengewoon gunstig. Het energiegebruik voor verwarming van ventilatie-lucht tot de basistemperatuur is ongeveer gelijk aan 1200 GJ, daarvan wordt 85% gedekt door het warmtewiel. In de winter- en lenteperiode van het tweede jaar is het warmtewiel door een technische storing gedurende 5 maan-

den buiten bedrijf geweest. Daardoor werd theoretisch een opbrengst van 585 GJ gemist.

De storingsmelder signaleerde de werking van de motor, echter niet de snaarbreek. Bij het ontwerpen van storingsmelding moet er naar worden gestreefd zoveel mogelijk primaire, in plaats van secundaire parameters te meten. Voor warmteterugwinning is dat bijvoorbeeld het temperatuurverschil over de warmtewisselaar.

Regeling

In de meetperiode zijn enkele onvolkomenheden van het installatiebeheersysteem aan het licht gekomen. Sommige instellingen bleken niet optimaal te zijn. Het toegepaste beheersysteem behoort tot de eerste generatie. Inmiddels zijn er systemen op de markt die aanmerkelijk gebruiksvriendelijker zijn.

Verlichting

Het experimentele deel van de verlichtingsinstallatie bestaat uit de daglichtschakeling en de periodieke uitschakeling van de verlichting. Beide energiebesparingsopties komen achtereenvolgens aan de orde.

De regeling van de daglichtbenutting interacteert met de automatisch bediende zonwering. De zonwering gaat automatisch naar beneden bij een bepaalde zoninstraling. De verlichting wordt dan echter ingeschakeld. Het uitschakelen van de verlichting bij voldoende daglicht wordt voorkomen door het neerlaten van de zonwering. Voor op het zuiden georiënteerde lokalen, zoals bij de HES, is de energiebesparing door de regeling voor daglichtbenutting daardoor vermoedelijk geringer dan voor lokalen die op andere windrichtingen georiënteerd zijn.

De metingen tonen aan dat de daglichtregeling ervoor zorgt dat de verlichtingssterkte gelijkmatiger is dan met alle armaturen aan. In de overgangszone van daglicht naar kunstlicht is de verlichtingssterkte op een enkele plaats soms te laag.

De periodieke uitschakeling van de verlichting aan het einde van lesblokken heeft goed gefunctioneerd.

	Binnentemperatuur hoger dan °C	
	25°C	28°C
toegestane overschrijding in uren	132	20
berekende overschrijding met nachtventilatie	407	78
berekende overschrijding met topkoeling	116	0

Tabel 2 Aantal uren per jaar (exclusief zomervakantie) dat de binnentemperatuur te hoog is

Gebruikerservaringen

De waardering van de gebruikers voor de behaaglijkheid in het gebouw is niet altijd even positief. Naar hun mening is het in leslokalen die op het zuiden zijn geïntendeerd veel te warm en benauwd als het mooi weer is. Naar aanleiding daarvan zijn in 1988, ondanks de hoge geluidsbelasting, te openen ramen aangebracht in de zuidgevel.

Indien het buiten koud is, blijven kleine kantoorruimten op het noorden te koud. Men vindt dan vooral de temperatuur vlak bij de vloer te laag.

Mede naar aanleiding van koudeklachten is thermografisch onderzoek naar de kwaliteit van isolatie en luchtdichtheid uitgevoerd. Dit onderzoek gaf aanleiding aanvullende maatregelen te treffen. Volgens de gebruikers hebben de te openen ramen en de verbetering van isolatie en luchtdichtheid de behaaglijkheid enigszins verhoogd. Toch zijn niet alle klachten opgelost en bestaat er behoefte aan mechanische koeling.

De verlichtingsbesturing met periodieke uitschakeling en daglichtbenutting wordt over het algemeen geaccepteerd. Alleen bij het gebruik van een overhead-projector kan de variërende lichtopbrengst aanleiding geven tot veelvuldig schakelen van de verlichting. Gebruikers vinden dit irritant.

Stichtings- en exploitatiekosten

De stichtingskosten van de Hogeschool voor Economische Studies zijn te toetsen aan de daarvoor geldende normen van het Ministerie van Onderwijs en Wetenschappen. De begrote stichtingskosten bedroegen ruim 9,9 miljoen gulden en waren ongeveer f 920.000 hoger dan toegestaan volgens de norm (inclusief B.T.W.). Deze hogere stichtingskosten werden toch door het Ministerie geaccepteerd, mede omdat de HES in een gebied staat met een hoge geluidsbelasting.

De stichtingskosten van de HES bedra-

Omschrijving	gemiddelde elektriciteitsverbruik over twee jaar kWh	relatief t.o.v. totale elektriciteitsverbruik %	verschil verbruik eerste en tweede jaar t.o.v. gemiddelde ¹⁾
verlichting	43.400	10	+ - 1%
luchtbehandeling	165.300	40	- + 8%
warmwaterboilers	9.800	2	- +36%
reproductie	3.700	1	- + 7%
overige apparatuur ²⁾	195.800	47	-+13%
Totaal	418.600	100%	- +10%

¹⁾ + - : eerste jaar hoger, tweede jaar lager dan gemiddeld
 - + : eerste jaar lager, twee jaar hoger dan gemiddeld
²⁾ waaronder een elektrische keuken voor de kantine en elektrische verwarming van een noodgebouw

Tabel 4 Elektriciteitsverbruik van de HES in kWh per jaar

gen f 1.460 per m² bruto vloeroppervlakte. Ter vergelijking, de R.G.D. gaat uit van circa f 1.600 per m² voor middelgrote gebouwen.

De meerinvestering voor de luchtbehandelingsinstallatie bedraagt f 400.000, waarvan f 50.000 voor warmteterugwinning. De meerinvestering voor daglicht- en periodieke schakeling is f 35.000.

De totale exploitatiekosten van het schoolgebouw bedroegen in 1988 ruim f 400.000, waarvan 40% voor schoonmaken, 32% voor bouwkundig en installatietechnisch onderhoud en 28% voor energie. In tabel 3 zijn de exploitatiekosten gesplitst.

Voor het vergelijken van de exploitatiekosten zijn niet direkt referenties beschikbaar. Enerzijds kunnen we de exploitatiekosten toetsen aan richtbedragen van de Rijksgebouwendienst (R.G.D.) voor kantoorgebouwen van vergelijkbare grootte, maar met iets duurdere installaties. De totale exploitatiekosten van de HES zijn ongeveer gelijk aan de richtbedragen van de R.G.D. De kosten voor het onderhoud zijn ongeveer even hoog, voor energie in de HES iets lager en voor schoonmaken iets hoger dan de richtbedragen. Anderzijds kunnen we opmerken dat

de kosten voor werktuigkundig onderhoud in traditioneel gebouwde scholen voor een groot deel wegvallen.

Evaluatie van het energiegebruik

Het energiegebruik bestaat uit brandstof en elektriciteit. De HES is aangesloten op het stadsverwarmingsnet voor ruimteverwarming. Er wordt elektriciteit gebruikt voor warmwaterbereiding, verlichting, apparatuur en hulpenergie voor de luchtbehandeling. Gedurende een deel van de beproevingsperiode is ook elektriciteit gebruikt voor verwarming van een noodgebouw.

In de conventionele school wordt aardgas verbruikt voor ruimteverwarming. Eén m³ aardgas is gelijk gesteld met 23,74 megajoule.

Electriciteitsverbruik van de HES

Tabel 4 geeft een overzicht van het elektriciteitsverbruik van de HES. De posten verlichting, luchtbehandeling, boilers en reproductie zijn apart gemeten. Overige apparatuur, waaronder de noodbouw, is een restpost.

Uit tabel 4 is af te leiden dat het elektriciteitsverbruik in het tweede jaar met 20% is gestegen ten opzichte van het eerste jaar. Overige apparatuur en luchtbehandeling is de grootste meerverbruiker. Het totale gemiddelde elektriciteitsverbruik bedraagt 63 kWh per m² bruto vloeroppervlakte. Het deel voor verlichting is 7 kWh per m².

Electriciteitsverbruik voor verlichting

Het elektriciteitsverbruik van de conventionele school bedroeg in het eerste jaar 41.310 kWh. Dit verbruik is vooral voor verlichting. Daarnaast verbruiken de pomp en regeling van de verwarmingsinstallatie enige elektriciteit. Voor het vergelijken van het elektriciteitsverbruik voor verlichting van de HES met dat van de conventionele school is gecorrigeerd voor het geïnstalleerd vermogen en de bedrijfstijden.

kostenpost	deelkosten	totale kosten
Onderhoudskosten	bouwkundig onderhoud	21%
	elektrotechnisch onderhoud	4%
	werktuigkundig onderhoud	7%
		32%
Energiekosten	electriciteitsverbruik	20%
	stadsverwarming	8%
Schoonmaakkosten		28%
Schoonmaakkosten		40%
Exploitatiekosten in 1988		> f 400.000

Tabel 3 Exploitatiekosten in 1988 (inclusief B.T.W.)

De bedrijfstijd van de HES is 30% langer en het geïnstalleerd vermogen 7% lager. Hieruit resulteert een correctiefactor voor de conventionele school van 1,27. Het gecorrigeerde elektriciteitsverbruik van de conventionele school bedraagt 52.600 kWh (8 kWh per m²).

Het elektriciteitsverbruik voor verlichting van de HES is gelijk aan 43.400 kWh ten opzichte van 52.600 kWh voor de conventionele school. Dit is een besparing van 9.200 kWh ofwel 17%.

De energiebesparende lichtscheming bestaat uit twee aspecten, namelijk het uitschakelen van de kunstverlichting na afloop van de lesblokken en uit het schakelen van verlichting afhankelijk van het daglichtniveau.

De mogelijke elektriciteitsbesparing door periodiek automatisch uitschakelen van de kunstverlichting in lokalen die niet in gebruik zijn is afhankelijk van de bezettingsgraad van lokalen en het schakelgedrag van gebruikers. De bezettingsgraad van de HES is zeer hoog. Het aantal lokalen dat gedurende lesblokken niet wordt gebruikt en waar de verlichting in principe nodeloos zou kunnen zijn ingeschakeld is daardoor gering. De energiebesparing door periodieke schakeling is in de HES dus relatief laag, namelijk 3 tot 5%.

Het effect van de daglichtschakeling is gemeten door een deel van de lokalen die zijn georiënteerd op het zuiden met de hand te bedienen en een ander deel automatisch. De besparing die daaruit kan worden afgeleid bedraagt 9 tot 13%. Dit is aanzienlijk lager dan de voorspelde 35%. Een mogelijk oorzaak hiervan is de overbrugging van de automatische bediening indien de buitenzonwering is neergelaten. Een sluitende verklaring is niet gevonden.

Verlichting maakt 10% uit van het totale elektriciteitsverbruik van de HES. Op het eerste oog kan verlichting daarom slechts een bescheiden bijdrage leveren aan elektriciteitsbesparing. In conventionele scholen is verlichting echter in het algemeen tenminste 60% van het totale elektriciteitsverbruik.

Elektriciteitsverbruik voor de luchtbehandeling

De luchtbehandelingsinstallatie verbruikt 40% van de elektriciteit. In traditionele schoolgebouwen, zoals de conventionele school, ontbreekt deze post vrijwel geheel. Voor de opwekking van 1 kWh_e is ongeveer 10 MJ primaire energie nodig. Het elektriciteitsverbruik van de luchtbehandeling komt overeen

met ruim 1.500 GJ primaire energie. De elektriciteits-efficiëntie van de luchtbehandelingsinstallatie is niet onderzocht. Gezien het relatief hoge elektriciteitsverbruik verdient het aanbeveling om na te gaan of verdere optimalisatie van dergelijke installaties mogelijk is. De volgende aspecten spelen een rol:

- het rendement van de combinatie ventilator-motor;
- overdimensionering van de ventilatoren;
- de weerstand van de constant-volumeregelaars;
- de weerstand in het luchtdistributiesysteem.

Overig elektriciteitsverbruik

Voor overige apparatuur wordt het meeste elektriciteit verbruikt, namelijk 47%. De belangrijkste verbruikersgroepen zijn de elektrische keukens van het overblijflokaal en computers. In het tweede jaar van meting is deze post met ongeveer 30% toegenomen ten opzichte van het eerste jaar. In die periode is het aantal computers sterk uitgebreid. Bovendien is een elektrisch verwarmd noodgebouw in gebruik genomen. Het elektrisch verwarmen van gebouwen is in Nederland niet voor de hand liggend. Aangezien noodgebouwen vaak gedurende vele jaren in bedrijf zijn, is het gewenst ook voor dergelijke gebouwen stil te staan bij de energetische consequenties van de keuze van het verwarmingssysteem. Afgezien van de elektrische energie voor het verwarmen van het noodgebouw is het duidelijk dat het nader analyseren van het elektriciteitsverbruik voor overige apparatuur gewenst is. Hier wordt dat verder achterwege gelaten.

Verwarming

Het energiegebruik voor verwarming (stadsverwarming) is apart gemeten voor de luchtbehandelingskast en voor de naverwarmers in de lokalen. Het gaat hier om registraties van energiemeters. In tabel 5 zijn de verbruiken samengevat. Het gemiddelde gebruik is 170 MJ per m² bruto vloeroppervlakte

(circa 7 m³ aardgasequivalenten per m²).

In het eerste jaar zijn ook metingen uitgevoerd in de conventionele school. Om de verbruiken te mogen vergelijken moet voor de volgende aspecten gecorrigeerd worden:

- de conventionele school heeft een gymzaal met een verbruik van 391 GJ;
- omhullende oppervlakte van de HES is 20% groter dan van conventionele school;
- de temperatuurtijd (graaduren) van de HES is 4% hoger.

Het gemeten verbruik van de conventionele school is in het eerste jaar gelijk aan 1.396 GJ (ongeveer 53.000 m³ aardgas). Dit is 210 MJ per m² bruto vloeroppervlakte (9 m³ aardgasequivalenten per m²).

Het gecorrigeerde energiegebruik voor verwarming van de HES is gelijk aan 1.005 GJ. Het energiegebruik van de HES is in het eerste jaar 250 GJ (20%) lager dan van de conventionele school. Voor naverwarming van lokalen is in het tweede jaar 998-787 = 211 GJ meer energie gebruikt, ondanks maatregelen ter verbetering van de gevels. Dit meerverbruik (ruim 20% ten opzichte van het totaalverbruik) kan wellicht worden toegeschreven aan het openen van ramen.

In de hiervoor genoemde getallen is geen rekening gehouden met verschillen in ventilatie. De HES wordt overdag geventileerd met een ventilatievoud van 3. In natuurlijk geventileerde scholen is dit meestal lager, bijvoorbeeld 1 à 2. Dit is te laag volgens de normen. Voor het verwarmen van ventilatielucht is ruim 450 GJ nodig per stap verhoging van het ventilatievoud.

Warmtebalans

Aan de hand van metingen is de warmtebalans van de HES gereconstrueerd. Uit de warmtebalans van enkele weken kan worden afgeleid dat het infiltratievoud maximaal gelijk is aan 0,1 à 0,2.

Omschrijving verbruik	verbruik eerste jaar GJ	verbruik tweede jaar GJ	verbruik tweede jaar gecorrigeerd ¹⁾ GJ
naverwarmers l.b.k.	218	799	214
naverwarmers lokalen	787	998	998
Totaal	1.005	1.797	1.212

¹⁾ correctie storing warmtewiel: de verloren opbrengst van de w.t.w. is 585 GJ; 799 minus 585 is gecorrigeerd 214 GJ

Tabel 5 Warmteverbruik van HES in GJ per jaar

Overigens moet worden opgemerkt dat berekening van warmtebalansen voor korte perioden van ongeveer een week tot relatief onnauwkeurige resultaten kan leiden.

Voor de eerste meetperiode (fase 2a) is een warmtebalans opgesteld, die ten dele op metingen berust en ten dele op schattingen.

Verliezen:	
transmissie	1.450 GJ
infiltratie (ventilatievoud 0,15)	250 GJ
mech. ventilatie (ventilatievoud 3)	1.200 GJ
Totaal verliezen	2.900 GJ
Bronnen:	
personen (1000 personen)	600 GJ
verlichting (78% is nuttig)	100 GJ
zon (ZTA = 0,3; zonwering)	100 GJ
overige bronnen, zoals apparatuur	P.M.
warmtewiel	1.000 GJ
Totaal bronnen	1.800 GJ
Naverwarming	1.100 GJ

Tabel 6 Warmtebalans van de HES

Volgens de warmtebalans is er 1.100 GJ nodig voor naverwarming. De metingen wijzen uit dat in werkelijkheid 1.005 GJ benodigd is. Het verschil kan worden veroorzaakt door een te lage schatting van het aantal personen of een te hoge schatting van het infiltratievoud. Een andere factor zijn overige energiebronnen, zoals elektriciteitsverbruik voor warmwater, reproductie en overige apparatuur. Het totaal van deze bronnen is gelijk aan ruim 330.000 kWh_e (bijna 1.200 GJ). Voor het sluiten van de balans behoeft slechts een klein deel hiervan benut te worden voor ruimteverwarming.

Conclusies

De Hogeschool voor Economische Studies is primair uitgevoerd met een dichte zuidgevel in verband met geluidsbelasting. Het daardoor noodzakelijke mechanisch ventilatiesysteem maakte het mogelijk om op eenvoudige wijze energie te besparen door middel van warmteterugwinning. Het warmtewiel wint uit afvoerlucht 85% van de energie terug die nodig is om ventilatielucht te verwarmen tot de basistemperatuur. Als toevoeging op mechanische ventilatie is warmteterugwinning zeer rendabel. De terugverdientijd is ongeveer 3 jaar. De ervaringen met het combineren van mechanische ventilatie en verwarming zijn niet onverdeeld gunstig. Gebleken is dat niet zonder meer kan worden volstaan met het hoog toevoeren van lucht vanuit de binnenwand aan de gangzijde. De temperatuurverschillen in de ruimten van de HES zijn groter dan wenselijk. Het luchtbehandelingssysteem zorgt continu voor voldoende ventilatie. In dit opzicht onderscheidt de HES zich gunstig van natuurlijk geventileerde scholen, die doorgaans vaak minder worden geventileerd dan uit hygiënisch oogpunt gewenst is. Nachtventilatie draagt aanzienlijk bij

aan het beperken van oververhitting. Toch kan in het voorjaar oververhitting niet worden voorkomen. Alleen met topkoeling is oververhitting te vermijden. De beperkte budgetten voor de investeringen laten topkoeling echter doorgaans niet toe. Hier moet worden opgemerkt dat ook in scholen met natuurlijke ventilatie de binnentemperatuur in de zomer en in het voor- en najaar vaak te hoog is.

Het automatisch uitschakelen van kunstverlichting na afloop van lesblokken blijkt goed te bevallen. Door de hoge bezettingsgraad is de energiebesparing relatief gering: 2 tot 5%. De schakeling voor optimale benutting van daglicht blijkt te interacteren met de automatisch bediende zonwering. Indien het daglichtniveau hoog genoeg is om (een deel van) de kunstverlichting uit te schakelen, sluit de zonwering. De kunstverlichting moet dan weer worden ingeschakeld. De besparing is 9 tot 13%, terwijl 35% werd verwacht. Voor de besparingsprognose is aangenomen dat gebruikers de verlichting in conventionele scholen de gehele dag in bedrijf laten. Misschien is deze verwachting ten aanzien van het gebruikersgedrag te pessimistisch.

Van het totale elektriciteitsverbruik van 418.000 kWh van de HES (63 kWh/m²) gebruikt de verlichting 10%, de luchtbehandeling 40% en overige apparatuur 50%. In de conventionele school wordt elektriciteit (52.600 kWh; 7 kWh/m²) vrijwel alleen gebruikt voor verlichting. De elektriciteitsbesparing op kunstverlichting door de periodieke- en daglichtschakeling is 10 tot 15%. De terugverdientijd van de verlichtingsschakeling is ongeveer 19 jaar.

Het energiegebruik voor verwarming is in de HES 1.100 GJ per jaar (170 MJ of 7 m³ per m²). Dit is ongeveer 250 GJ la-

ger dan in de conventionele school. Deze besparing komt overeen met 20%.

Besluit

Inmiddels heeft de ervaring met de HES geleid tot verbetering van het installatieconcept. Dit is toegepast in de IVO-MAVO te Rotterdam. Ook hier wordt lucht toegevoerd door een rooster in de binnenwand aan de gangzijde van de lokalen. De toevoerroosters induceren echter ongeveer 50% vertrekklucht. De luchtkubus in de lokalen wordt daarvoor zes keer per uur gecirculeerd. Vooruitlopend op de evaluatie van de metingen in de IVO-MAVO is het vermeldenswaardig dat er geen klachten zijn van gebruikers over het binnenklimaat.

Literatuur

- [1] 'Evaluatie HES Rotterdam', ir. J.A. Boon en ir. R.M. Lampe, b.v. Adviesbureau Huygen Rotterdam, rapport 4456 nummer 1 tot en met 9, Rotterdam 1984-1990.
- [2] 'Binnenklimaatcondities in leslokalen van nieuwe schoolgebouwen', Rijksgebouwendienst, rapport E116.1/B, 1979.
- [3] 'Werking van het verwarmings- en ventilatiesysteem in de Hogeschool voor Economische Studies', M.G. Dubbeld, J.M. Koppers, MT-TNO, rapport R88/435, Delft 1988.