

# Ontwerp van gezonde en energie-efficiënte schoolgebouwen

Gedurende de laatste tien jaar hebben verlaging van het energiegebruik en verbetering van het binnenmilieu van scholen veel aandacht gekregen. Het Frisse Scholen programma heeft hierbij een belangrijke rol gespeeld. Het Programma van Eisen Frisse Scholen wordt toegepast bij de meeste nieuwe schoolgebouwen. Het biedt drie kwaliteitsklassen (A, B en C) voor de verschillende onderwerpen: energie, thermisch comfort, binnenluchtkwaliteit, visueel comfort en akoestisch comfort. Wanneer gestreefd wordt naar een hoge kwaliteit (klasse A) voor alle onderwerpen, leiden de verschillende factoren voor de kwaliteit van het binnenmilieu en energiegebruik vaak tot conflicterende keuzes. In dit artikel worden de gekozen oplossingen bij twee praktijkvoorbeelden, een recent ontworpen en gebouwde basisschool en een ontwerp voor een middelbare school, geëvalueerd.

C. (Chrit) Cox, K. (Kees) Kalkman, A. (Anke) Gevers-Wijffelaars, Nelissen ingenieursbureau b.v., Eindhoven

Voorbeelden van conflicterende keuzes bij het streven naar een hoge kwaliteit (klasse A) voor alle onderwerpen zijn:

- daglicht versus energiegebruik en thermisch comfort;
- akoestische kwaliteit (nagalmtijd) versus thermische massa (thermisch comfort, energiegebruik);
- binnenluchtkwaliteit (ventilatie) versus geluid;
- binnenluchtkwaliteit versus energiegebruik wanneer natuurlijke toevoer wordt toegepast;
- binnenluchtkwaliteit (ventilatievoud) en thermisch comfort.

Hierbij dient bedacht te worden dat klasse A voor energie overeenkomt met een energiege-

bruik dat 50% lager is in vergelijking met het maximaal toelaatbare energiegebruik volgens het Bouwbesluit.

Benadrukt wordt dat behalve de technische keuzes, in veel gevallen het beschikbare budget een zeer belangrijke factor in het ontwerpproces is. Daarnaast leiden ook andere factoren tot suboptimale keuzes uit het oogpunt van binnenmilieukwaliteit en energiegebruik.

Voorbeelden hiervan zijn esthetische/architectonische keuzes of bijvoorbeeld de keus om geen buitenzonwering op de begane grond toe te passen om veiligheidsredenen.

Op basis van twee case studies zijn verschillende ontwerp oplossingen geëvalueerd, gericht op laag energiegebruik en goed binnenmilieu. Voor de geselecteerde gebouwen worden de vereiste en behaalde prestaties voor

de verschillende parameters besproken en hiervoor gekozen maatregelen toegelicht.

### ■ BREDE SCHOOL HOUTHAVEN

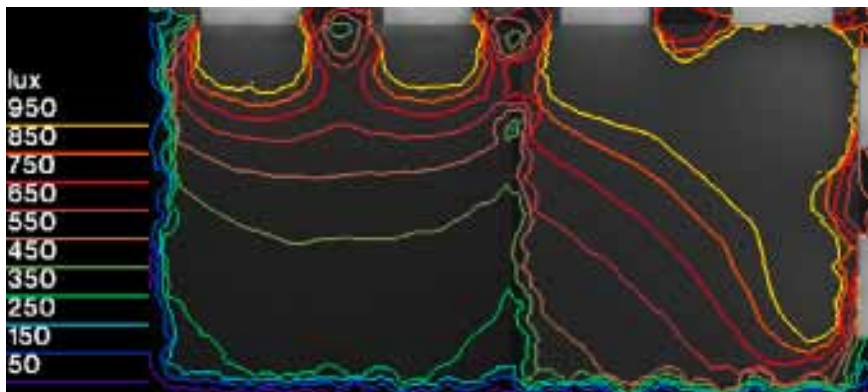
De Brede School Houthaven, ontworpen door architectenbureau Marlies Rohmer, is een multifunctioneel gebouw met een vloeroppervlak van 6.500 m<sup>2</sup>, waarin zich twee basisscholen, een kinderdagverblijf, een gymzaal, een wijkcentrum en bedrijfsruimte bevinden. De opdrachtgever wilde voor de scholen een binnenklimaat realiseren conform Klasse A van het Programma van Eisen Frisse Scholen 2010. Daarnaast moest de Brede school volgens de gemeente Amsterdam klimaatneutraal zijn. Dit betekent dat het gebouwgebonden energiegebruik duurzaam dient te worden opgewekt. De belangrijkste eisen waaraan

voldaan diende te worden, zijn:

- gebouwgebonden energiegebruik is nul;
- een warmteweerstand van de begane grondvloer, gevel en dak van minimaal 5,0 (m<sup>2</sup>.K)/W
- verwarming door hernieuwbare bronnen;
- koeling (vereist voor het vervullen van thermische eisen) door een warmte/koude-opslagsysteem of een systeem met vergelijkbare efficiëntie;
- vraaggestuurde ventilatie, met behulp van een variabelvolumesysteem gebaseerd op de CO<sub>2</sub>-concentratie in elke ruimte;
- maximale CO<sub>2</sub>-concentratie in het klaslokaal 800 ppm, overeenkomend met een ventilatie-debiet van 12 l/s per persoon;
- minimaal vier te openen ramen met een minimum oppervlak van 4 m<sup>2</sup>; minstens 50% in het bovenste deel van de ramen;
- operationele temperaturen in de zomer (gedurende minimaal 90% van de gebruikstijd): maximaal 22°C als de buitentemperatuur lager is dan 20°C, maximaal 2°C boven de buitentemperatuur als de buitentemperatuur hoger is dan 20°C, met een maximum van 27°C;
- Draught Rate maximaal 10%;
- nagalmtijd van 0,6 – 0,8 s in klaslokalen (ingericht);
- gemiddelde daglichtfactor van 8% in het midden van de klaslokalen.

Verwarming en koeling voor de Brede School Houthaven wordt verkregen door stadsverwarming en -koeling. Ventilatie vindt plaats met een gebalanceerde mechanisch ventilatiesysteem met warmte-terugwinning (roterende warmtewisselaar, efficiëntie 85%). De ventilatie-debieten zijn in overeenstemming met de eisen, waarbij, in verband met energiebesparing, gekozen is voor vraaggestuurde ventilatie. Dit betekent wel dat de luchtkwaliteit altijd op de grenswaarde zal zitten, waardoor in situaties waarbij een lokaal niet volledig bezet is, sprake zal zijn van een lagere binnenluchtkwaliteit in vergelijking met de situatie waarin continu met het maximale debiet wordt geventileerd.

Zowel voor het beperken van de koelcapaciteit als om architectonische redenen is geen verlaagd plafond toegepast. Op deze manier wordt de thermische capaciteit van de vloer/het plafond gebruikt. Ondanks de relatief hoge isolatiewaarde en het gebruik van buitenzonwering zijn aanvullend 750 m<sup>2</sup> fotovoltaïsche cellen nodig om een energieneutraal gebouw te realiseren. Dit vraagt een zeer grote financiële investering. Hier staan natuurlijk wel lagere exploitatielasten voor de gebruiker tegenover. In de ontwerppraktijk worden dergelijke keuzes echter niet altijd op basis van Total Cost of



-Figuur 1- Verlichtingssterktes ten gevolge van daglichttoetreding; links klaslokaal met één gevel; rechts klaslokaal met twee gevels; verlichtingssterkte vrije veld 10.000 lux; een daglichtfactor van 8% komt dan overeen met 800 lux.



-Figuur 2- Impressie van de Brede School Houthaven (Architectenbureau Marlies Rohmer)

Ownership genomen.

Het energiegebruik wordt nadelig beïnvloed door het vereiste hoge ventilatie-debiet om te voldoen aan 800 ppm CO<sub>2</sub> en de grote ramen die noodzakelijk zijn voor het behalen van de vereiste daglichtfactor. Deze 800 ppm CO<sub>2</sub> is 150 ppm lager dan de 950 ppm in het huidige Bouwbesluit. Dit vraagt 37,5% meer ventilatie. Berekeningen voor de daglichtfactor, uitgevoerd met het programma Radiance, lieten zien dat voor een daglichtfactor van 8% ramen in minstens twee gevels benodigd zijn (zie figuur 1). Dit zorgt voor relatief hoge transmissieverliezen van het gebouw, ook al is de U-waarde van het glas (1,1 W/(m<sup>2</sup>.K), de laagste waarde die thans behaald kan worden met dubbele beglazing. Op deze wijze wordt het transmissieverlies via het glas zoveel mogelijk beperkt.

Door de grote invloed van de ventilatie op het energiegebruik leidt een verdere verhoging van de isolatiewaarden niet tot een significante

reductie van het energiegebruik.

De eisen aan de energieprestatie voor gebouwen zijn aangescherpt per 1 januari 2015. Het maximaal toegestane energiegebruik voor schoolgebouwen (volgens de standaard berekening) wordt ongeveer gehalveerd. De toegestane energieprestatie volgens het Bouwbesluit van januari 2015 benadert daarmee het categorie A niveau in het 'Frisse Scholen' programma (versie 2012). Dit zal resulteren in verdergaande maatregelen in toekomstige schoolgebouwen en een significante toename van bouwkosten.

Omdat er geen verlaagde plafonds worden gebruikt, zijn aanvullende maatregelen nodig voor het bereiken van een acceptabele nagalmtijd. Hiervoor zijn akoestische wandpanelen en baffles onder het plafond gekozen. Om tocht ten gevolge van de inblaaslucht te vermijden moeten de baffles zorgvuldig worden gepositioneerd ten opzichte van de inblaasroosters.

Figuur 2 toont een afbeelding van het gebouw. De zonneschermen bedekken het bovenste deel van de ramen niet, zodat daglicht toe kan treden wanneer de zonneschermen zijn neergelaten. Het bovenste deel van de ramen is te openen waardoor ventilatielucht door de open ramen niet voorverwarmd wordt door de zonneschermen.

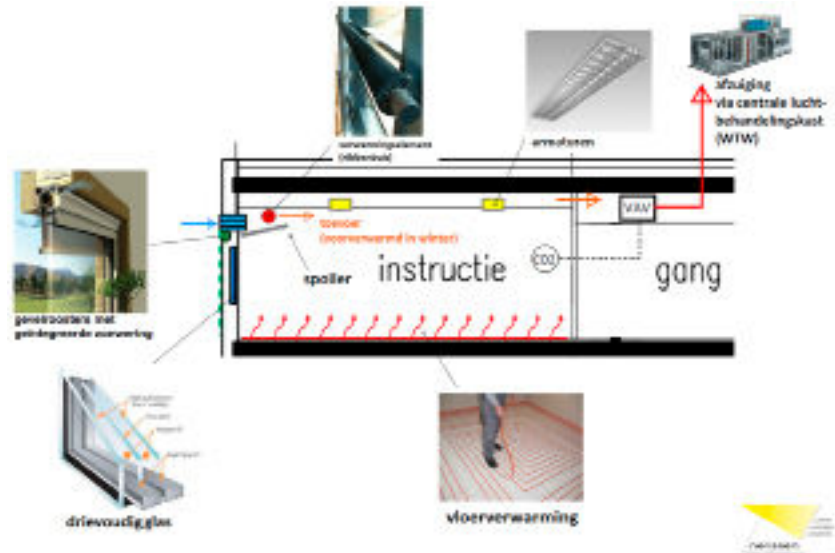
Hoewel deze keuze voordelig is voor de waarneming van daglicht, leidt dit tot een hogere thermische belasting en daarmee ook tot een hogere koelcapaciteit en een hoger energiegebruik voor koeling. Daarnaast is er een kans op verblinding op het bord in de klas, vooral in de lokalen met ramen in twee gevels.

## ■ MERLET COLLEGE CUIJK

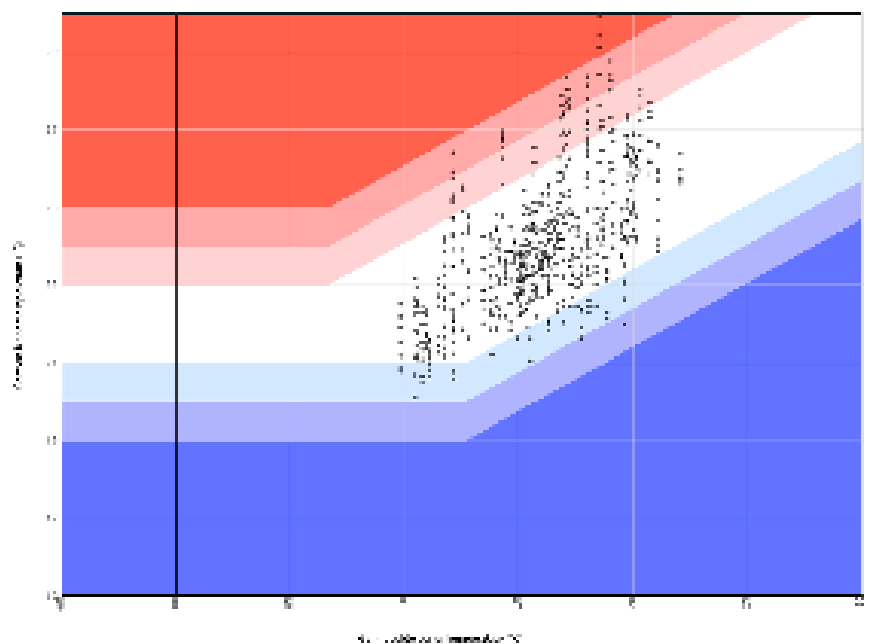
Momenteel wordt gewerkt aan een ontwerp voor een nieuw schoolgebouw (10.000 m<sup>2</sup> vloeroppervlak) voor het Merlet college in Cuijk. Het doel is om een low-tech gebouw te ontwerpen dat aan de vereiste voorwaarden voldoet door het gebruik van bouwkundige maatregelen en alleen wanneer nodig wordt aangevuld met installatietechnische maatregelen. Het gebouw, ontworpen door Ector Hoogstad, wordt gekenmerkt door:

- warmteweerstand: dak  $\geq 8,0$  (m<sup>2</sup>.K)/W, gevel  $\geq 6,0$  (m<sup>2</sup>.K)/W, begane grondvloer  $\geq 6,0$  (m<sup>2</sup>.K/W);
- U-waarde beglazing in de gevel: driefoudig glas, U-waarde  $< 1,0$  W/m<sup>2</sup>.K (raam, inclusief kozijn);
- een erg goede luchtdichtheid van de gebouwschil ( $q_{v,10} = 0,15$  l/s per m<sup>2</sup>);
- energie-efficiënte verlichting (LED), vraaggestuurd (aanwezigheidsdetectie) en daglichtgestuurd;
- lagetemperatuurverwarming (vloerverwarming) en hogetemperatuurkoeling, op basis een warmtepomp, met grondwater of eventueel Maaswater als bron;
- natuurlijke toevoer, mechanische afzuiging (klaslokalen), vraaggestuurd.

De ventilatie van de ruimten aan de gevel wordt gerealiseerd via natuurlijke toevoer door zelfregelende roosters in de gevel. Wanneer nodig wordt de lucht voorverwarmd om tochtproblemen te voorkomen. Hiervoor wordt een convector geïntegreerd in de toevoervoorziening. Vanuit het oogpunt van luchtkwaliteit kan stofafzetting op de convector een risico vormen. De toevoervoorziening wordt voorzien van een spoiler om een tochtvrije luchttoevoer naar de ruimte te realiseren. De klaslokalen hebben een mechanisch afzuigstelsel. Buiten het stookseizoen kan het gebouw aanvullend worden geventileerd door middel van te openen ramen in de gevel en in het dak. De binnenruimten zijn voorzien van een geba-



-Figuur 3- Klimaatconcept van een klaslokaal in het Merlet college



-Figuur 4- Resultaten voor de berekening van binnentemperaturen met VABI Elements, optie 2e, zie ook tabel 1. De operationele temperatuur is het gemiddelde van de lucht- en stralingstemperatuur (bepaald door de oppervlaktetemperatuur van de omhullingen en eventuele stralingsbronnen), gewogen met de respectievelijke warmte-overdrachtscoëfficiënten. De lopende gemiddelde buitentemperatuur is een gewogen gemiddelde buitentemperatuur waarbij de buitentemperatuur gedurende meerdere voorgaande dagen wordt meegenomen met een weegfactor, zie ISSO publicatie 74 Thermische behaaglijkheid.

lanceerd ventilatiesysteem. De warmte van de afvoerlucht van de ruimten langs de gevel wordt ook gebruikt voor het voorverwarmen van de toevoerlucht voor binnenruimten. In figuur 3 is het klimaatconcept samengevat. Voor dit passief gebouwt ontwerp is een analyse gemaakt van de benodigde maatregelen om klasse B voor het thermisch comfort conform het Programma van Eisen Frisse Scholen te behalen. Met behulp van VABI Elements 1.5.0 is een voorspelling gemaakt van de uurlijkse waarden van de operationele temperatuur. De operationele temperatuur in de zomer moet gedurende ten minste 95% van de tijd voldoen

aan de volgende eis:  $0,33 \cdot$  lopende gemiddelde buitentemperatuur  $+ 18,8 \pm 3^\circ\text{C}$  (EN 15251, bijlage A2, cat. II).

De berekeningen zijn uitgevoerd voor een klaslokaal met 57 m<sup>2</sup> vloeroppervlak, met een zuidgevel met 30% glas en externe zonwering. De ruimte is bezet met 30 leerlingen en één leraar. Met betrekking tot de interne warmtelast door computers zijn twee scenario's doorgerekend. In het eerste scenario wordt geen gebruik gemaakt van laptops en is uitgegaan van een interne warmtelast van 70 W/m<sup>2</sup>; Voor het tweede scenario is uitgegaan van één laptop per student, resulterend in een interne

optie	voldoet aan de eisen
1a - natuurlijke toevoer, mechanische afzuiging, vloerverwarming, geen ventilatie door te openen ramen, geen nachtventilatie	nee
2a - natuurlijke toevoer, mechanische afzuiging, vloerverwarming, geen ventilatie door te openen ramen, geen nachtventilatie; hoge interne warmtelast	nee
1b - natuurlijke toevoer, mechanische afzuiging, vloerverwarming, overdag ventilatie door te openen ramen (1.440 m <sup>3</sup> /uur)	nee
2b - natuurlijke toevoer, mechanische afzuiging, vloerverwarming, overdag ventilatie door te openen ramen (1.440 m <sup>3</sup> /uur); hoge interne warmtelast	nee
1c - natuurlijke toevoer, mechanische afzuiging, vloerverwarming, nachtventilatie (1.380 m <sup>3</sup> /uur)	ja
2c - natuurlijke toevoer, mechanische afzuiging, vloerverwarming, nachtventilatie (1.380 m <sup>3</sup> /uur); hoge interne warmtelast	nee
1d - natuurlijke toevoer, mechanische afzuiging, vloerverwarming, geen ventilatie door te openen ramen, geen nachtventilatie, vloerkoeling	nee
2d - natuurlijke toevoer, mechanische afzuiging, vloerverwarming, geen ventilatie door te openen ramen, geen nachtventilatie, vloerkoeling; hoge interne warmtelast	nee
1e - natuurlijke toevoer, mechanische afzuiging, vloerverwarming, overdag ventilatie door te openen ramen (1.440 m <sup>3</sup> /uur); nachtventilatie (1.380 m <sup>3</sup> /uur)	ja
2e - natuurlijke toevoer, mechanische afzuiging, vloerverwarming, overdag ventilatie door te openen ramen (1.440 m <sup>3</sup> /uur); nachtventilatie (1.380 m <sup>3</sup> /uur); hoge interne warmtelast	ja

-Tabel 1- Resultaten voor de berekening van binnentemperaturen voor verschillende (combinaties van) maatregelen

warmtelast van 90 W/m<sup>2</sup>. Figuur 4 toont een voorbeeld van de berekende resultaten van het lokaal met de hoge interne warmtelast en ventilatie door te openen ramen gecombineerd met nachtventilatie.

Uit de resultaten (tabel 1) kan worden geconcludeerd dat met het klimaatconcept, zoals hiervoor beschreven, voor een klaslokaal met een gemiddelde warmtelast van 70 W/m<sup>2</sup> aan de eisen uit het Programma van Eisen Frisse Scholen klasse B kan worden voldaan. Wanneer de interne warmtelast hoger is, is aanvullende ventilatie via te openen ramen nodig om aan de temperatuureisen te voldoen. Ventilatie via te openen ramen verhoogt echter de kans op tocht. Dit kan gebouwgebruikers ertoe aanzetten om ramen te sluiten, wat resulteert in hogere, onacceptabele temperaturen. Een juist gebruik van low-tech voorzieningen, zoals handbediende zonnenschermen en goed ontworpen te openen ramen, is essentieel. De gebruiker heeft een grote invloed op de klimaatomstandigheden en moet zorgvuldig worden geïnstrueerd om de beschikbare maatregelen op de juiste manier te gebruiken.

## CONCLUSIES

Uit de in dit artikel besproken praktijkvoorbeelden blijkt dat bij het ontwerpen van gezonde en energie-efficiënte schoolgebouwen compromissen moeten worden gesloten met betrekking tot het kwaliteitsniveau van de

verschillende aspecten in het Programma van Eisen Frisse Scholen. Een optimale score voor alle aspecten is onmogelijk.

Met zeer strenge eisen voor het thermisch comfort wordt, met name in de zomer, actieve koeling onvermijdelijk, ondanks het relatief milde Nederlandse klimaat. Het gebruik van hernieuwbare bronnen voor verwarming en koeling, bijvoorbeeld een warmte/koudeopslag in combinatie met een warmtepomp, zal leiden tot hoge investeringskosten. Dit wordt gecompenseerd door lagere kosten voor energiegebruik tijdens de levenscyclus van een gebouw. Een levenscyclusanalyse is echter nog niet standaard bij het ontwerpen van schoolgebouwen. Met minder strenge eisen voor binnentemperaturen, in combinatie met de relatief milde klimaatomstandigheden in Nederland, is het mogelijk mechanische koeling te vermijden en natuurlijke toevoer toe te passen. Om tocht te voorkomen moet de luchtinlaat zorgvuldig worden ontworpen. Het is daarbij nodig om de inkomende lucht voor te verwarmen in de winter. Om de te openen ramen te kunnen gebruiken voor aanvullende ventilatie is eveneens een goed ontwerp vereist.

Met een hoge interne belasting, bijvoorbeeld als gevolg van toenemend computergebruik in klaslokalen, is aanvullende ventilatie door middel van te openen ramen of roosters noodzakelijk. Dit leidt tot een verhoogd risico op

tocht. Ventilatie via te openen ramen is alleen mogelijk wanneer de buitenluchtkwaliteit en het geluidniveau buiten acceptabel zijn. Het is noodzakelijk om gebruikers zorgvuldig te instrueren wanneer een dergelijke maatregel wordt toegepast. In de dagelijkse ontwerp-praktijk speelt het beschikbare budget een belangrijke, en vaak ook doorslaggevende rol bij de keuze van het kwaliteitsniveau. Ook de esthetische/architectonische keuzes spelen een belangrijke rol bij het ontwerpen van een gebouw. Dit kan leiden tot suboptimale keuzes uit het oogpunt van energiegebruik en binnenmilieukwaliteit.

De vraag is hoe de prestaties van verschillende aspecten geëvalueerd en vergeleken kunnen worden. Weegt een grotere daglichttoetreding op tegen hogere binnentemperaturen en/of hoger energiegebruik? Is het gerechtvaardigd om minder akoestische absorptie toe te passen ten gunste van een hogere thermische warmtecapaciteit, met een lagere binnentemperaturen en/of lager energiegebruik voor koeling tot gevolg?

Een integrale evaluatie van verschillende energie- en gezondheidsparameters zou een waardevolle tool zijn. Het is echter de vraag of zo'n tool op korte termijn beschikbaar is. In de tussentijd dient met gezond verstand en goede samenwerking in een ontwerpsteam een evenwichtig, duurzaam ontwerp te worden gemaakt.