

WARMTETERUGWINNING IN SCHOLEN OF PASSIEF KOELEN?

Mechanische ventilatie met warmteterugwinning (WTW) levert volgens de in deze studie gehanteerde uitgangspunten in bestaande schoolgebouwen een relatief kleine besparing op. Bij nieuwbouw kan WTW op scholen zelfs voor een verhoging van de energiekosten zorgen, afhankelijk van de benodigde ventilatorenergie. In de steeds beter geïsoleerde scholen wordt koeling steeds belangrijker. Daarnaast zijn fijn stof reducerende maatregelen van belang om de gezondheid te verbeteren. De focus op de ontwikkeling van nieuwe systemen voor schoolklimatisering zou hierop moeten zijn gericht.



ir. P. (Piet) Jacobs,
TNO, Delft



ing. W. (Wim) Kornaat,
TNO, Delft

ACHTERGROND

Afgelopen jaren is aan scholen een groot aantal maatregelen gesubsidieerd om het binnenklimaat en tegelijkertijd de energiezuinigheid van bestaande schoolgebouwen te verbeteren. Mede in het kader van de bestrijding van de economische crisis is hieraan in 2009 en 2010 in totaal 165 miljoen euro besteed. Voor bijvoorbeeld het plaatsen van mechanische ventilatiesystemen werd per lokaal een subsidie verstrekt van € 7.500,-. Bij deze subsidie werd als eis gesteld dat het ventilatiesysteem met warmteterugwinning (WTW) moest worden uitgevoerd.

In juni 2013 zijn de maatregelen geëvalueerd [1] middels een enquête naar de tevredenheid bij de eindgebruikers. Bij het plaatsen van HR-glas, dakisolatie, HR-ketels en thermostatische kranen was in de meeste gevallen sprake van een goede technische en functionele kwaliteit. Bij het plaatsen van HF-armaturen, mechanische ventilatiesystemen en CO₂-sensoren daarentegen werd de kwaliteit als matig tot slecht beoordeeld. Het mechanische luchtsysteem was niet altijd goed geïnstalleerd, aangebracht of afgesteld, waardoor 45% van de in de basisscholen gemonteerde luchtbehandelingssystemen als niet goed of helemaal niet functionerend werd beoordeeld. Bij het voortgezet onderwijs werd 29% van de luchtbehandelingssystemen als niet goed beoordeeld. Ook werd aangegeven dat het energiegebruik bij toepassing van ventilatie met WTW veel hoger was dan vooraf was verwacht. Bij de andere maatregelen, zoals het toepassen van dakisolatie, het vervangen van conventionele ketels door HR-ketels en het vervangen van enkel glas door HR-glas, was men in het algemeen wel tevreden.

In dit artikel wordt een aantal energiebesparende maatregelen voor scholen bij vier verschillende isolatieniveaus doorgerekend. Vervolgens wordt geanalyseerd waarom bepaalde maatregelen vanuit energetisch oogpunt en het oogpunt van energiekosten goed scoren. Hierbij wordt ook het thermisch comfort meegenomen.

UITGANGSPUNTEN SIMULATIESTUDIE

Om de maatregelpakketten door te rekenen is een referentielokaal met gebruiksprofiel gekozen dat representatief is voor veel basisscholen. De vloeroppervlakte bedraagt 50 m² (klaslokaal 7 bij 7 m), met daarin 25 leerlingen en één docent. De lestijden zijn van 8:30 tot en met 12:00 h en 13:30 tot en met 15:30 h. Op woensdag wordt alleen 's morgens tot 12.30 h lesgegeven. 's Ochtends en 's middags is er een kwartier pauze. Hierdoor is de bezetting 23,75 uur per week. Per jaar zijn de kinderen en de leerkracht twaalf weken met vakantie. De verwarming en de verlichting zijn ingeschakeld tussen 7:30 en 16:30 h. Op woensdag is dit tot 13:30 h. De warmtelast ten gevolge van verlichting is 15 W/m². Het elektriciteitsgebruik voor verlichting is niet in de energiekosten meegenomen. De instelwaarde voor de verwarming is 21°C met een nachtverlaging van 15°C. De mechanische ventilatie is alleen bij aanwezigheid van de leerlingen ingeschakeld (capaciteit 150 dm³/s).

De klas ligt tussen twee andere lokalen in. De ene kant is aan de gevel gelegen, de andere kant aan een gang. De gang is 2,5 m breed. Wat betreft warmteverlies wordt de gang aan het lokaal toegerekend. De school omvat twee verdiepingen. Het beschouwde lokaal is op de eerste etage gelegen onder een plat dak. Het lokaal is 3 m hoog. De gevel is op het zuiden georiënteerd en bevat 66% glas (14 m²). Wat betreft zonwering zijn de simulaties vereenvoudigd door aan te nemen dat zonwering continue 50% van de zonwarmtelast reduceert.

Voor het thermisch comfort wordt aangenomen dat het klaslokaal aan de criteria voor ISSO 89 klasse A [2] voldoet:

- $T_{\text{binnen}} > 20^{\circ}\text{C}$,
- $T_{\text{buiten}} < 20^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{binnen}} < 22^{\circ}\text{C}$
- $T_{\text{buiten}} > 20^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{binnen}} < T_{\text{buiten}} + 2^{\circ}\text{C}$
(maximaal 27°C)

Om in scholen aan deze grenswaarden te kunnen voldoen is actieve of passieve koeling noodzakelijk. In de praktijk is echter meestal geen actieve koeling aanwezig in basis-scholen. Om ten allen tijde aan de grenswaarden te voldoen en zo een eerlijke vergelijking voor de onderzochte situaties te maken, is aangenomen dat actieve koeling aanwezig is met een Coefficient of Performance (COP) van 3. Dit is conform de conventies van de energieprestatienorm. In het model is aangenomen dat de WTW is voorzien van een 100% bypass. Deze bypass wordt geopend indien: $T_{\text{binnen}} > T_{\text{setpoint}} + 0.5 \text{ K}$ (dus te warm). Met behulp van het dynamische simulatiemodel TRNSYS is het energiegebruik doorgerekend bij vier isolatieniveaus (zie tabel 1) van het klaslokaal en de volgende maatregelen:

- natuurlijke toevoer met mechanische afvoer of mechanische ventilatie met warmteterugwinning (WTW)
- koelsysteem (airco of passieve koeling)
- keteltype VR (rendement 76%) of HR (rendement 93%)

In de simulaties is uitgegaan van vraaggestuurde ventilatiesystemen op basis van aanwezigheid. Om het effect van vraagsturing op het energiegebruik na te gaan zijn twee aanvullende simulaties zonder vraagsturing uitgevoerd. Aangenomen is dat de ventilatieduur hierdoor toe-

neemt van 23,75 tot 42 uur per week. Voor de energiekosten zijn de volgende indicatieve tarieven aangenomen: gas 0,50 €/m³ en elektriciteit 0,20 €/kWh. Voor een aanzienlijk aantal scholen gelden soms lagere tarieven voor grootverbruikers. Het energiegebruik voor de ventilatoren van de balansventilatie met WTW is bepaald op basis van een specifiek ventilatorenergiegebruik van 2 kW/(m³/s). Voor de natuurlijke toevoer met mechanische afzuiging is gerekend met een specifiek ventilatorenergiegebruik van 0,25 kW/(m³/s). Voor natuurlijke koeling (nacht of spui-ventilatie) is een elektriciteitsgebruik van 100 kWh per jaar geschat, op basis van een lage druk ventilatiesysteem. De primaire energie (E_{prim}) is volgens NEN 2916 (2004) bepaald met een factor 0,39 voor het rendement van de elektriciteitsvoorziening (opwekking- en netverliezen).

ENERGIEGEBRUIK

Tabel 1 geeft een overzicht van het jaarlijkse energiegebruik en de energiekosten per lokaal voor de beschouwde isolatieniveaus, in combinatie met de drie aanvullende maatregelen.

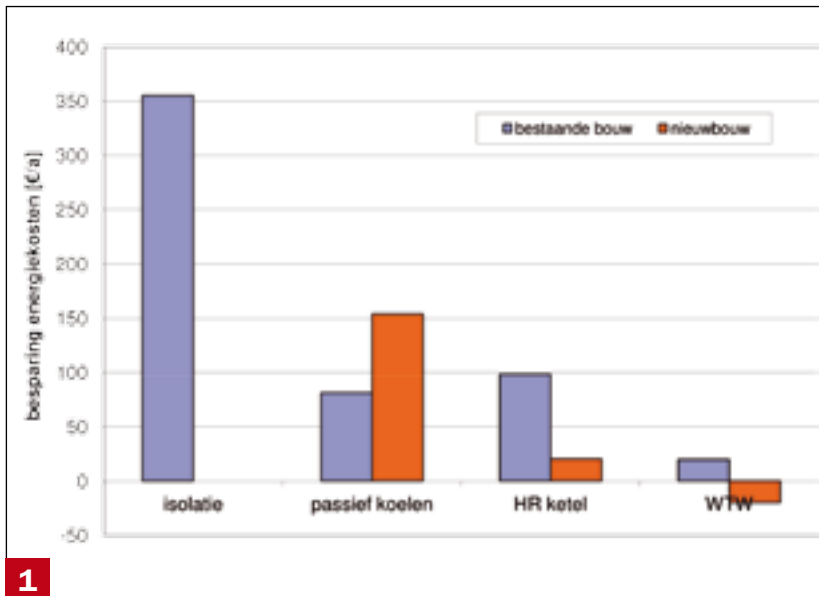
De eerste variant, isolatieklasse 1 met actieve koeling en een VR-ketel, representeert het energiegebruik in een

Tabel 1: Overzicht van de simulatieresultaten

isolatieniveau			installatietechnische aanpassingen			gas ⁽¹⁾	elektra ⁽²⁾	kosten	E_{prim}
glas	dak	gevel	wtw [%]	koeling	ketel	[m ³]	[kWh]	[€]	[MJ]
isolatieklasse 1									
enkel	4 cm	0 cm	0	actief	VR	1077	506	640	39144
		(steens)	0	actief	HR	880	506	541	32843
			80	actief	VR	929	777	620	36906
			0	passief	VR	1077	100	559	35397
isolatieklasse 2									
dubbel	8 cm	4 cm	0	actief	VR	444	707	363	20736
			0	actief	HR	363	707	323	18138
			80	actief	VR	328	991	362	19644
			0	passief	VR	444	100	242	15134
isolatieklasse 3									
HR ⁺⁺	8 cm	4 cm	0	actief	VR	317	787	316	17414
			0	actief	HR	259	787	287	15559
			80	actief	VR	218	1079	325	16925
			0	passief	VR	317	100	179	11068
isolatieklasse 4									
HR ⁺⁺	16 cm	12 cm	0	actief	VR	222	870	285	15122
			0	actief	HR	181	870	265	13825
			80	actief	VR	141	1171	305	15310
			0	passief	VR	222	100	131	8015

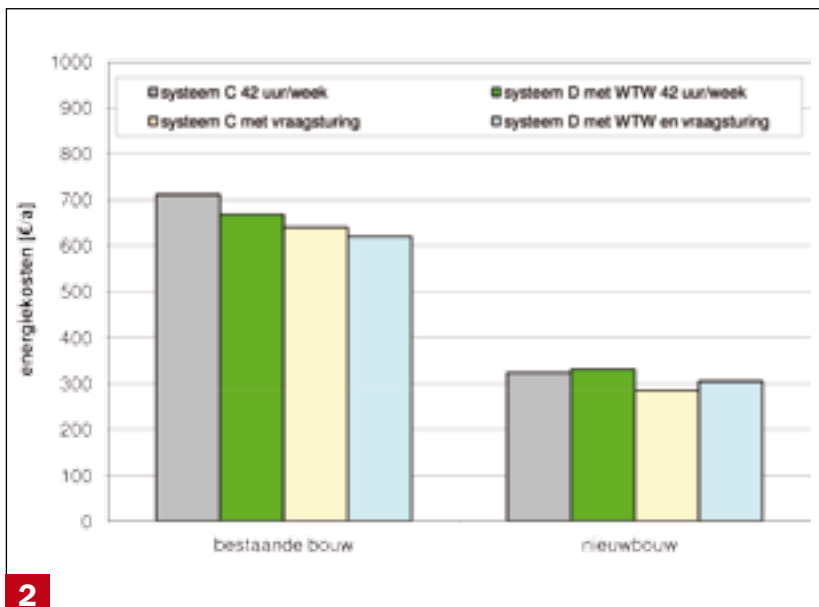
¹ ruimteverwarming

² koeling en ventilatorenergie



1

Jaarlijkse besparing op energiekosten van de beschouwde maatregelen per lokaal, bij bestaande bouw (isolatieklasse 1) en nieuwbouw (isolatieklasse 4)



2

Effect van vraagsturing op basis van aanwezigheid van leerlingen voor natuurlijke toevoer met mechanische afvoer (systeem C) en gebalanceerde ventilatie met warmteterugwinning (systeem D) op de energiekosten bij bestaande bouw (isolatieklasse 1) en nieuwbouw (isolatieklasse 4)

bestaande, nog niet gerenoveerde school. Zelfs in deze variant blijkt actieve koeling noodzakelijk te zijn om aan de eisen voor het thermisch comfort te kunnen voldoen. De tabel laat duidelijk zien dat wat betreft gasgebruik de grootste slag met het aanbrengen van isolatie wordt gemaakt. Dit blijkt uit het verschil tussen isolatieklasse 1 en isolatieklasse 4. Dit is ook in figuur 1 uitgezet. Isolatieklasse 1 staat model voor bestaande bouw en isolatieklasse 4 zou als zeer goed geïsoleerde nieuwbouw kunnen worden gezien.

Van de installatietechnische maatregelen levert passieve (natuurlijke) koeling de grootste besparing op in energiekosten. Deze besparing neemt bij betere bouwkundige isolatie toe. Van belang bij passieve koeling zijn voldoende thermische bouwmassa met een zo groot mogelijk

contactoppervlak, voldoende ventilatiecapaciteit en een goed luchtdistributiesysteem, waarmee deze lucht tochtvrij kan worden ingeblazen. Tevens is het aan te bevelen om de (spui)ventilatie automatisch te sturen op de binnen- en de buitentemperatuur, zodat de passieve koeling optimaal kan worden benut. Een HR-ketel levert in de bestaande bouw een grote besparing. Warmteterugwinning (WTW) op de ventilatielucht levert de kleinste besparing op. In goed geïsoleerde nieuwbouw scholen blijkt WTW zelfs een negatieve besparing op te kunnen leveren: het kost dan geld. Dit kan worden verklaard doordat teruggewonnen warmte (te) beperkt effectief kan worden benut (alleen bij lage buitentemperaturen en weinig of geen zon). Dit komt door de goede isolatie en omdat er overdag, als er wordt geventileerd, een hoge warmtelast is van de kinderen en eventuele zon op de grote glasvlakken. De energiebesparing voor verwarming die de teruggewonnen warmte oplevert, wordt teniet gedaan omdat gedurende het hele jaar de twee ventilatoren van het gebalanceerde ventilatiesysteem draaien, dus ook als de warmteterugwinfunctie niet nodig is. Dat zorgt voor extra elektriciteitsgebruik, bij 40 weken van 24 uur bedraagt het energiegebruik 285 kWh per lokaal.

De resultaten van het effect van vraagsturing van de ventilatiestroom zijn in figuur 2 weergegeven. Uit de resultaten blijkt dat vraagsturing voor een verlaging van de energiekosten zorgt, waarbij het effect in de bestaande bouw (isolatieklasse 1) groter is dan bij nieuwbouw. Dit is een gevolg van de verhouding van de grootte van de warmte winst- en verliesposten.

ANALYSE ENERGIEBESPARING MAATREGELEN

Isolatie blijkt in de huidige studie de grootste energiebesparing op te leveren. Vraagsturing op het ventilatiesysteem op basis van het aantal leerlingen om de luchtkwaliteit te handhaven heeft een relatief beperkt effect, omdat zonder vraagsturing al uitgegaan is van een redelijk goede afstemming met aanwezigheid. Vraagsturing van het ventilatiesysteem waarbij ook passieve koeling wordt meegenomen, levert een grotere energiebesparing op; dit is met name in goed geïsoleerde nieuwbouw scholen het geval. Daarnaast zal dit, indien geen actieve koeling aanwezig is, het thermisch comfort in de zomer en in het voor- en naseizoen verbeteren. Uit onderzoek [3] blijkt dat 42% van de leraren het thermische comfort in de zomerperiode als onvoldoende beoordeelt. De luchtkwaliteit in het stookseizoen wordt door 'slechts' 32% van de docenten als onvoldoende beoordeeld. Blijkbaar ervaren meer leerkrachten de oververhitting als een probleem dan de luchtkwaliteit. Er zijn ook indicaties [4], dat het effect van oververhitting op de leerprestaties groter is dan het effect van slechte luchtkwaliteit. Reden te meer om te pleiten voor vraagsturing, waarin zowel het luchtkwaliteit probleem als het oververhittingsprobleem gelijktijdig worden opgelost. Daarnaast is een goede automatische aansturing van de zonwering van groot belang, omdat deze de warmtelast sterk reduceert; het effect hiervan is in deze studie niet beoordeeld.

Op basis van de uitgevoerde simulaties kan worden geconstateerd dat voor zowel bestaande als nieuwe scholen lage druk systemen, zoals natuurlijke toevoer met

mechanische afvoer (systeem C) of mechanische toevoer met natuurlijke afvoer (systeem B), in combinatie met vraagsturing wat betreft energiekosten een alternatief vormen voor gebalanceerde ventilatie met WTW (systeem D). Wat betreft thermisch comfort is voor het stookseizoen, maar ook in het voor en najaar, een tochtvrije toevoer een belangrijk aandachtspunt. Toepassing van de vuistregel dat de ventilatievoorzieningen tenminste 180 cm boven de vloer dienen te worden geplaatst, volstaat niet [5].

Opmerkelijk is de uitkomst dat toepassing van mechanische ventilatie met warmteterugwinning (WTW) in nieuwbouw scholen geen energiebesparing oplevert, maar juist extra energiekosten met zich meebrengt. Dit komt door het relatief hoge elektriciteitsgebruik van de huidige systemen en de relatief hoge interne warmtelast in scholen in combinatie met de goede isolatie, waardoor de gasbesparing beperkt is. Toepassing voor mechanische ventilatie met warmteterugwinning (WTW) levert in de bestaande bouw bij toepassing van de uitgangspunten in deze studie een bescheiden energiebesparing op. Indien voor toepassing van WTW wordt gekozen, verdient het aanbeveling om in de tender het elektriciteitsgebruik voor het totale systeem, inclusief leidingnet en luchtfilters, op te vragen en contractueel vast te laten leggen, zodat er een selectie voor een zo zuinig mogelijk systeem kan plaatsvinden. Het elektriciteitsgebruik zal namelijk niet alleen door de luchtbehandelingskast worden bepaald. Ook de doorlaat en lengte van de kanalen en het aantal bochten of andere appendages is van belang en dit bepaalt ook of aan de wettelijke geluidseis van 35 dB in het lokaal, of een lagere eis indien dit in het Programma van Eisen contractueel is vastgelegd, kan worden voldaan. Na oplevering dient het elektriciteitsgebruik en het geluid te worden getoetst aan de gegarandeerde waarde. Daarnaast is een goede werking van de bypass van belang om oververhitting of energiegebruik voor koeling te vermijden.

Vergelijking van de besparingen met de vergoedingen van de impulsregeling uit 2009 en 2010 laat zien, dat de subsidie niet voor alle maatregelen goed aansluit op de werkelijke besparingen en ook niet alle zinvolle maatregelen subsidieerde. Er werd een relatief grote subsidie gegeven op WTW, terwijl deze in werkelijkheid slechts een relatief kleine besparing zal opleveren. Daarentegen werd geen subsidie verleend op een ventilatiesysteem waarmee passief kan worden gekoeld, terwijl hiermee het thermisch comfort sterk kan worden verbeterd. Ook werd er geen subsidie verleend op vraaggestuurde ventilatiesystemen, terwijl er wel subsidie is verleend op een CO₂-indicator die aan de wand kan worden gehangen. Het zou veel beter zijn als deze CO₂-indicator ook wordt gebruikt om

de mate van ventilatie automatisch te regelen. Daarnaast zou voor een werkelijk integrale benadering ook de concentratie fijn stof moeten worden aangepakt. Uit recent onderzoek [6, 7] blijkt dat de fijn stof concentratie in klaslokalen tot ruim een factor vijf hoger is dan buiten.

CONCLUSIES EN VERVOLG

Uit het onderzoek kan worden geconcludeerd dat het aanbrengen van isolerende maatregelen het energiegebruik van bestaande scholen fors terugbrengt. Door deze isolatie en de hoge interne warmtelast neemt de koelvraag toe. Als eerste stap kan zonwering worden toegepast om de temperatuur binnen de perken te houden. Vervolgens kan passief koelen het comfort verbeteren en gelijktijdig de koelbehoefte reduceren. Belangrijk hierbij is dat de zonwering en de ventilatie goed samenwerken met het verwarmingssysteem. Hiervoor dienen robuuste en eenvoudig aan te sturen regelsystemen te worden ontwikkeld. Wellicht kunnen de relatief hoge luchtdebieten die voor passieve of actieve koeling noodzakelijk zijn, ook worden gebruikt om fijn stof weg te filteren. Dergelijk geïntegreerde verwarmings-, ventilatie- en filtratie en zonweringsystemen zijn nog maar beperkt beschikbaar op de markt. Hier ligt een uitdaging bij de systeemontwikkelaars.

Dit onderzoek werd mogelijk gemaakt met financiële ondersteuning door de gemeente Rotterdam. ■

BRONNEN

- [1] Berdowski Z., Eshuis PH., Evaluatie regelingen verbetering energiezuinigheid en binnenklimaat PO en VO, beschikbaar via www.rijksoverheid.nl, 11 juni 2011
- [2] ISSO 89 Binnenklimaat scholen, blz 32, juli 2008
- [3] VROM, Samenvattende rapportage, Onderzoek naar de kwaliteit van het binnenmilieu in basisscholen, beschikbaar via www.rijksoverheid.nl/publicaties, januari 2008
- [4] Wargocki, P., Wyon D.P., Matysiak B., Irgens S., The effect of classroom temperature and outdoor supply rate on the performance of school work by children, Indoor Air: Proceedings of the 10th international conference on indoor air quality and climate, Beijing, China, p. 368 – 372, 2005
- [5] Jacobs P., Knoll B., Phaff H., Luchtverversing en temperatuurbeheersing in scholen, Tochtvrije natuurlijke toevoer in klaslokalen vanaf 180 cm hoogte?, Bouwfysica 4, 2009
- [6] Scheepers PT.J. et al., Effecten van luchtbehandeling en vloerafwerking op de luchtkwaliteit in een basisschool – een haalbaarheidsstudie, UMC St Radboud, februari 2013
- [7] Comfort parameters and particulate matter (PM₁₀ and PM_{2,5}) in school classrooms and outdoor air, Aerosol and Air Quality Research, 13, 1521 – 1535, 2013