

Vraaggestuurde ventilatie met wtw en grondwarmte

Dit artikel beschrijft de resultaten van het eerste half jaar monitoring van een nulwoning in Groenlo. Het ventilatiesysteem in de woning is vraaggestuurd met warmteterugwinning, in combinatie met het gebruik van grondwarmte in de vorm van een grondbuis. De resultaten tonen aan dat het ventilatiesysteem een gezond en comfortabel binnenklimaat creëert op energiezuinige wijze.

Ir. B. (Bart) Cremers, adviseur Kenniscentrum, Zehnder Group Nederland

DE WONING

De woning, zoals weergegeven in figuur 1, is gebouwd volgens de normen van passief bouwen en bewoond vanaf juli 2010. Het huis heeft een compacte, goed geïsoleerde gevel met zuid georiënteerde ramen met drievoudige beglazing. Zonnecellen en zonneboilers op het dak zorgen voor de productie van elektriciteit en warm water tijdens zonnige dagen. Een warmtepomp met een verticale bron zorgt voor verwarming en koeling via een afgiftesysteem in de vloer. Details van het huis zijn gegeven in [1] en [2].

HET VENTILATIESYSTEEM

Een warmteterugwintoestel (WHR960, kortweg wtw-unit) brengt verse lucht in de woning en voert lucht uit de woning af naar buiten. De warmte van de retourlucht wordt gebruikt voor het opwarmen van de verse lucht op een energiezuinige manier. De meest gebruikte ventilatiehoeveelheid is 160 m³/h. Voor een huis met een volume van 840 m³ betekent dit een ventilatievoud van ongeveer 0,2 h⁻¹. De verse lucht wordt naar de afzonderlijke ruimten gebracht door zeven separate ronde kunststof luchtkanalen (ComfoTube). Vier daarvan leiden naar laag-inducerende roosters vlak boven de vloer van de slaapkamers (ouders, kind en gasten) en naar een werk-kamer, alle op de begane grond. De rest leidt naar de woonkamer op de eerste verdieping.

De retourlucht komt uit de woonkamer, de zolder, de badkamer en de toiletten via zeven retourkanalen (ComfoTube). Zowel de toevoer als de retour worden verdeeld en verzameld via geluiddempers (ComfoWell); één in de retourlucht en twee in de toevoerlucht. De keuken wordt geventileerd door een afzonderlijke wtw-unit (WHR930). De werking hiervan is niet bijgehouden.

De handmatig ingestelde ventilatiehoeveelheid (normaal stand 1; 160 m³/h) wordt automatisch verhoogd door vraagsturing op basis van vier afzonderlijke CO₂-sensoren in de woonkamer en de slaapkamers (ouders, kind en gasten). Wanneer één van de CO₂-waarden boven een ingestelde grenswaarde komt, dan zorgt een stuursignaal naar de wtw-unit voor verhoging van de hoeveelheid verse lucht. Een grondbuis, voorzien van filter, zorgt voor de grondwarmte (aanzuig van de grondbuis is te zien in figuur 1). De grondbuis is 50 m lang, 200 mm in diameter en ligt op een gemiddelde diepte van 2,5 m. De grondbuis ligt op afschot in de grond om eventueel water af te voeren. Tussen de grondbuis en de wtw-unit bevindt zich een luchtklep. De wtw-unit regelt de stand van deze luchtklep, zodat verse lucht ofwel direct van buiten wordt aangezogen via de noordgevel ofwel via de grondbuis.

GEGEVENSVERZAMELING

De relevante parameters van het ventilatiesysteem zijn verzameld met een interval

van één minuut door een aan de Wtw-unit verbonden laptop. De bewoner heeft de verzamelde gegevens en eventueel commentaar wekelijks verzonden. Daarna zijn de gegevens omgewerkt tot uurgemiddelden, waarna ze geanalyseerd zijn in de vorm van zogenaamde 'carpet-plots', duurgrafieken, correlatiegrafieken en staafdiagrammen. Dit artikel beschrijft de resultaten van de geanalyseerde periode van februari 2011 tot september 2011.

COMFORTABELE CO₂-WAARDEN

Het comfort van het binnenklimaat is vastgesteld aan de hand van gemeten CO₂-waarden in de ouderslaapkamer (twee ouders), de kinderslaapkamer en de logeerkamer. De ingestelde grenswaarden voor de vraagsturing zijn 800 ppm voor de woonkamer en 1.000 ppm voor de slaapkamers. Volgens verwachting vertonen de uurgemiddelde CO₂-waarden een verhoging bij aanwezigheid van personen in de kamers. Als voorbeeld worden de CO₂-waarden in de kinderkamer getoond voor de periode februari tot mei 2011. Over dag zijn de CO₂-waarden vergelijkbaar met de natuurlijke CO₂-waarde van de buitenlucht van 400 ppm en 's nachts zijn de waarden 800 tot 1000 ppm. Zodra de grenswaarde van 1.000 ppm wordt bereikt, wordt de ventilatiehoeveelheid verhoogd zodat de CO₂-waarden vastgehouden worden op een gezond en comfortabel niveau.

835	817	742	733	725	772	770	690	565	573	565	610	610	660	687	637	622	607	630	737	785	765	
762	815	798	723	737	777	770	545	513	485	528	548	545	508	532	587	575	537	507	570	800	828	765
784	737	715	673	713	679	670	560	550	550	550	550	550	550	550	550	550	550	550	550	550	550	550
832	835	822	843	853	898	893	822	647	633	615	565	575	608	563	560	532	528	518	608	795	828	793
832	773	817	818	780	805	688	617	608	573	563	562	557	525	513	502	500	500	540	562	755	872	963
574	897	908	935	807	866	753	650	712	695	680	683	693	731	698	620	630	610	640	620	620	620	620
570	558	570	552	543	523	522	505	495	488	475	480	472	467	467	467	467	467	467	467	467	467	
4837	4823	4823	4823	4823	4823	4823	4823	4823	4823	4823	4823	4823	4823	4823	4823	4823	4823	4823	4823	4823	4823	
785	765	777	773	740	715	567	553	513	507	520	543	548	502	500	507	563	610	603	606	606	606	
808	855	818	815	797	773	720	600	575	560	558	558	552	543	527	615	560	572	618	620	578	508	
616	840	871	910	920	877	883	868	807	788	673	617	625	643	625	643	625	643	625	643	625	643	
962	978	943	965	947	953	915	927	773	728	768	718	793	702	712	775	827	770	793	797	992	810	
795	728	900	690	690	795	625	590	528	545	565	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	
828	843	827	803	797	828	625	598	600	565	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	
832	818	833	855	822	827	790	613	580	573	568	558	555	545	545	545	545	545	545	545	545	545	
601	812	880	860	869	873	821	647	563	555	557	557	557	557	557	557	557	557	557	557	557	557	
838	817	825	873	885	867	872	830	792	790	790	790	790	790	790	790	790	790	790	790	790	790	
820	823	867	835	858	868	825	743	618	618	618	618	618	618	618	618	618	618	618	618	618	618	
782	757	758	735	718	758	660	567	577	683	688	643	625	625	588	570	567	620	640	783	863	797	
765	735	773	773	797	803	738	617	603	587	568	570	568	548	545	535	533	533	533	533	533	533	
813	813	778	790	792	832	813	683	608	608	608	608	608	608	608	608	608	608	608	608	608	608	
835	825	792	785	785	802	683	605	580	570	567	580	560	548	537	535	542	562	578	783	865	895	
915	990	995	822	787	807	605	587	577	510	560	568	587	580	567	617	692	682	680	703	827	825	
782	722	707	707	657	668	693	537	537	502	485	465	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	
428	442	448	458	447	450	447	458	478	442	437	438	440	428	418	410	405	405	405	405	405	405	
428	442	448	458	447	450	447	458	478	442	437	438	440	428	418	410	405	405	405	405	405	405	
843	840	805	827	792	798	708	618	605	605	572	552	538	518	503	470	468	458	438	425	438	488	
778	813	818	807	822	863	612	571	618	618	618	618	618	618	618	618	618	618	618	618	618	618	
777	720	713	693	730	742	623	517	515	448	458	433	442	500	563	537	535	513	565	593	783	810	
747	715	707	685	637	632	597	555	522	458	478	467	462	462	462	462	462	462	462	462	462	462	
832	830	778	808	822	848	612	570	620	620	620	620	620	620	620	620	620	620	620	620	620	620	
758	775	790	758	725	738	643	562	535	492	480	477	478	458	462	462	462	462	462	462	462	462	
752	773	758	743	735	747	607	562	530	488	465	460	425	500	480	463	435	555	550	590	625	687	
800	808	895	910	913	913	862	790	612	602	598	590	542	538	517	517	517	517	517	517	517	517	
917	963	947	955	942	913	953	982	713	613	613	613	613	613	613	613	613	613	613	613	613	613	
895	880	893	865	868	898	885	775	625	572	565	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	
1027	937	953	964	955	940	848	762	635	593	592	560	548	523	485	477	477	477	477	477	477	477	
960	920	882	938	938	960	677	622	570	545	550	522	498	508	448	412	400	438	438	438	438	438	
855	822	882	888	875	898	680	603	555	543	517	498	467	437	417	417	417	417	417	417	417	417	
835	815	813	773	818	810	652	680	473	410	415	422	458	447	437	410	400	410	447	463	683	758	
773	765	788	765	747	762	700	630	618	608	592	613	617	557	552	503	477	463	498	520	610	718	
765	805	800	745	755	805	790	805	618	618	618	618	618	618	618	618	618	618	618	618	618	618	
957	968	985	925	873	863	812	718	572	443	408	418	433	422	408	515	572	518	518	518	518	518	
810	788	827	830	803	815	730	622	570	558	545	518	508	500	468	463	433	405	523	700	812	838	
832	786	795	781	790	786	728	622	612	583	565	552	472	378	548	490	477	468	490	500	760	832	
777	813	797	785	780	780	665	550	507	477	473	453	453	430	400	402	402	402	402	402	402	402	
779	735	740	777	753	745	643	538	505	473	490	458	458	438	473	511	488	507	472	482	522	795	
803	773	773	782	780	822	650	607	713	773	713	713	713	713	713	713	713	713	713	713	713	713	
800	803	897	857	877	803	795	730	757	647	607	710	645	628	623	560	533	497	533	735	798	905	
857	857	838	820	860	842	742	613	483	483	483	483	483	483	483	483	483	483	483	483	483	483	
805	820	760	748	725	733	640	540	490	480	465	462	432	415	403	408	400	403	413	400	692	732	
793	802	800	830	798	802	738	592	547	515	490	468	455	458	512	500	542	502	477	492	757	808	
857	868	848	810	800	775	688	613	518	487	467	453	457	467	467	467	467	467	467	467	467	467	
813	880	863	842	780	823	665	593	550	527	515	485	457	442	475	917	847	490	475	443	565	743	
922	887	848	868	805	818	680	493	428	403	400	410	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	
827	768	752	777	780	780	782	780	683	652	612	448	408	402	412	412	412	412	412	412	412	412	
978	982	1022	992	995	965	917	785	638	482	473	463	442	452	445	428	418	408	405	455	740	820	
808	832	852	808	737	737	595	578	512	487	493	497	473	472	462	447	447	440	438	483	635	777	
800	848	808	750	743	647	550	520	498	468	468	468	468	468	468	468	468	468	468	468	468	468	
845	808	917	918	963	938	768	695	608	557	535	533	537	540	548	535	520	528	558	675	875	867	
852	868	997	917	950	947	762	708	642	605	582	553	552	548	557	512	492	488	485	545	745	888	
603	612	603	603	603	603	603	603	603	603	603	603	603	603	603	603	603	603	603	603	603	603	
868	920	938	847	950	982	987	903	867	708	625	438	422	417	425	483	488	437	447	423	587	720	
584	582	593	603	613	617	570	537	487	487	487	487	487	487	487	487	487	487	487	487	487	487	
610	615	598	600	582	593	517	455	430	425	403	455	458	427	417	408	403	418	418	418	418	418	
757	720	685	720	715	672	632	590	530	488	455	425	400	460	462	440	434	400	400	400	400	400	
582	582	582	582	582	582	582	582	582	582	582	582	582	582	582	582	582	582	582	582	582	582	
465	480	502	495	502	503	487	467	443	432	430	435	437	440	430	482	490	465	455	4			

(bij de uitgang van de grondbuis) tussen de 12 en 17°C ligt voor buitentemperaturen tussen 16 en 33°C. Voor milde buitentemperaturen tussen 10 en 16°C wordt de luchtklep gesloten, zodat de uitwisseling met de grond uitgeschakeld wordt; verse lucht wordt nu direct via de noordgevel aangezogen in plaats van via de grondbuis.

De voordelen van de uitwisseling met de grond zijn als volgt. 's Winters zorgt dit voor vorstvrije werking van de wtw-unit zonder gebruik te hoeven maken van een elektrische voorverwarmer. 's Zomers wordt de verse lucht gekoeld tot onder de binnentemperatuur, zodat vrije koeling gedurende de hele zomer ingezet kan worden in plaats van slechts gedurende koude zomernachten. Het verhoogde elektriciteitsverbruik van de ventilatoren om de lucht door de grondbuis te laten stromen is verwaarloosbaar (toerental moet met 2% worden verhoogd).

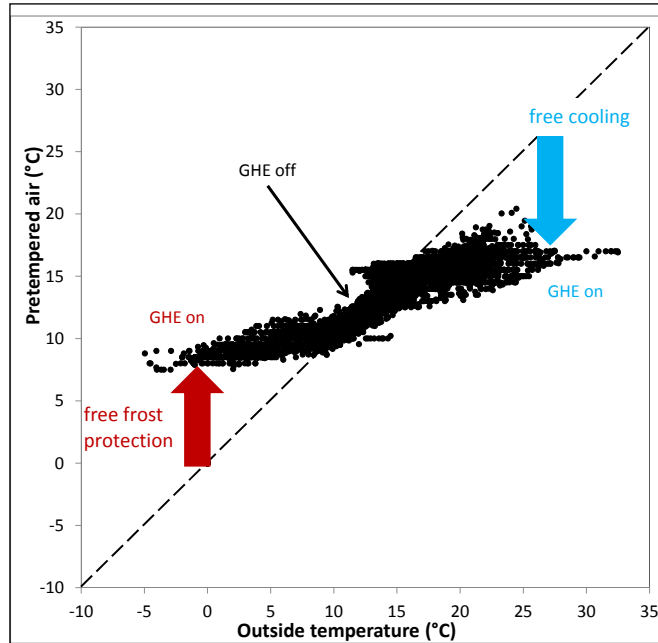
's Winters wordt de (voorverwarmde) verse lucht op efficiënte wijze verder opgewarmd in de warmtewisselaar van de wtw-unit. Figuur 5 toont dat verse lucht toegevoerd wordt in de woonkamer en de slaapkamers met een comfortabele temperatuur van 18°C, zelfs bij lage buitentemperaturen in de winter. Zonder warmteterugwinning zou de toevoer van lucht met een temperatuur gelijk aan de buitentemperatuur resulteren in tochtverschijnselen. Voor buitentemperaturen boven 13°C wordt de warmteterugwinning uitgeschakeld wanneer koeling gewenst en voorhanden is. Dit gebeurt wanneer aan de volgende voorwaarden voldaan is:

- actuele binnentemperatuur is boven de ingestelde comforttemperatuur (hier: 21°C);
- actuele (eventueel voorgekoelde) verse luchttemperatuur is lager dan de actuele binnentemperatuur.

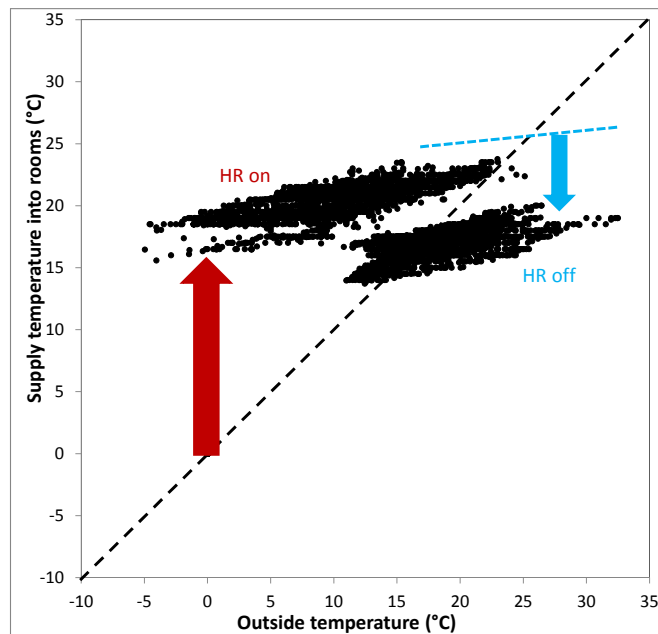
Warmteterugwinning wordt uitgeschakeld in de wtw-unit door de retourlucht om de warmtewisselaar heen te leiden. Verse lucht komt daardoor direct (zonder warmteterugwinning) de leefruimten binnen. Dit resulteert in vrije koeling van de woning omdat de toevoertemperatuur altijd lager is dan de binnentemperatuur. De praktijkgegevens tonen aan dat de toevoertemperatuur onder de 20°C blijft. Door de relatief lage ventilatiehoeveelheid (160 m³/h) kan deze vrije koeling qua vermogen niet vergeleken worden met airconditioningsystemen, maar het werkt wel comfort verhogend en het verlaagt de koellast van de woning.

ENERGIEZUINIGE VENTILATIE

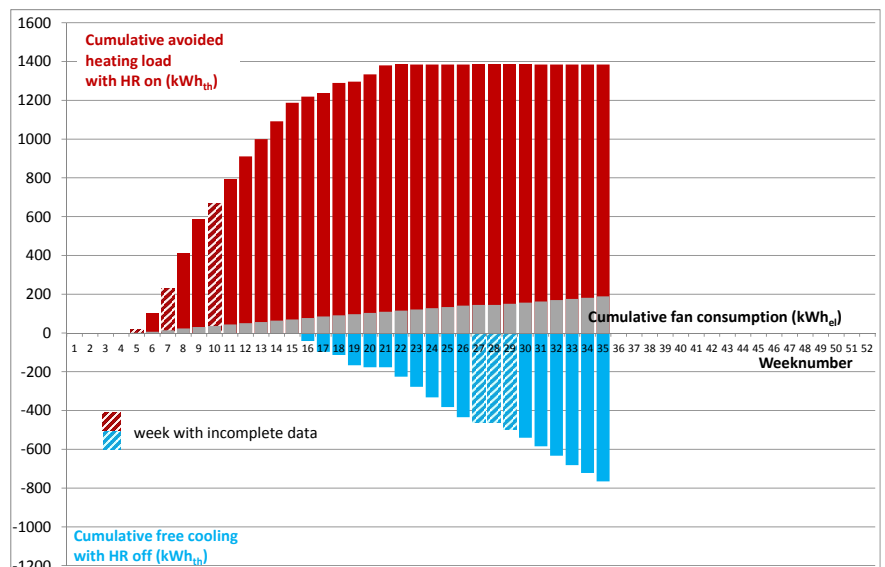
De voordelen van ventilatie met warmteterugwinning met gebruik van grondwarmte worden uitgelegd aan de hand van vermeden



-Figuur 4- Uurgemiddelde waarden van de verse lucht die de woning binnentreedt. Uitwisseling met de grond (GHE on) zorgt 's winters voor een vorstvrije werking van de wtw-unit (zonder gebruik van een elektrische voorverwarmer) en 's zomers voor langdurige vrije koeling. Bij milde buitentemperaturen wordt de verse lucht direct aangezogen via de noordgevel (GHE off).



-Figuur 5- Uurgemiddelde waarden van de toevoertemperatuur die naar de leefruimten toegaat met en zonder warmteterugwinning (hr-on, hr-off). De vermeden verwarming wordt aangegeven door een rode pijl en de vrije koeling ten opzichte van de binnentemperatuur wordt aangegeven met een blauwe pijl.



-Figuur 6- Cumulatieve vermeden verwarming (rood), cumulatieve vrije koeling (blauw) en cumulatief elektriciteitsverbruik door de ventilatoren (grijs) gedurende de rapportageperiode.

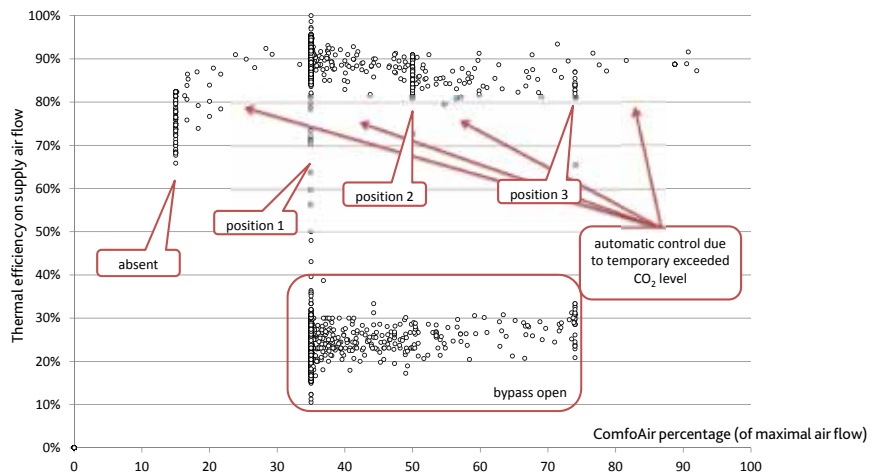
verwarming en vrije koeling. Dankzij warmteterugwinning door de wtw-unit hoeft het centrale verwarmingssysteem de koude buitenlucht niet te verwarmen naar de gewenste binnentemperatuur (vermeden verwarming, zie rode pijl in figuur 5). De hoeveelheid vermeden verwarming wordt berekend met de ventilatiehoeveelheid en het verschil tussen toevoertemperatuur en binnentemperatuur. Zonder warmteterugwinning geeft de vrije koeling aan dat de binnenlucht gekoeld wordt door de binnenkomende (lagere) toevoertemperatuur (zie blauwe pijl in figuur 5). De hoeveelheid vrije koeling wordt berekend met de ventilatiehoeveelheid en het verschil tussen binnentemperatuur en toevoertemperatuur. Figuur 6 geeft de cumulatieve vermeden verwarming en vrije koeling per week aan gedurende de rapportageperiode. In de koude periode tot week 22 is energie bespaard door de warmteterugwinning. Vanaf week 16 is vrije koeling toegepast (2011 had een opmerkelijk vroeg en warm voorjaar). Het energetisch voordeel is bereikt met slechts het elektrisch verbruik van de ventilatoren in de wtw-unit. Deze verbruiken slechts 33 W bij 160 m³/h dankzij het flexibele luchtverdeelstelsel met lage weerstand.

Tabel 1 geeft totaalwaarden voor de rapportageperiode van februari tot september 2011 en een schatting voor een volledig jaar gebaseerd op extrapolatie van de verzamelde gegevens. Een schatting van de jaarlijkse werkingsgraad API ('annual performance indicator') voor het verwarmings- en koelseizoen is berekend uit de verhouding tussen jaarlijkse energieopbrengst en elektriciteitsverbruik van de ventilatoren. De waargenomen API voor de vermeden verwarming komt goed overeen met de verwachte API van 11 voor een warmteterugwinstelsysteem in een vergelijkbaar winterklimaat in Milaan, Italië uit [3].

■ THERMISCH RENDEMENT WTW

Het thermisch rendement is gedefinieerd als de verhouding tussen de opwarming van de verse lucht en de maximaal haalbare opwarming $(T_{\text{toevoer}} - T_{\text{verse lucht}}) / (T_{\text{retour}} - T_{\text{verse lucht}})$. Wanneer uitwisseling van grondwarmte gebruikt wordt, dan stelt de verse luchttemperatuur in deze formule de voorverwarmde of voorgekoelde lucht voor.

Het thermisch rendement van een wtw-unit is afhankelijk van vele factoren, waarvan de



-Figuur 7- Thermisch rendement van de wtw-unit als functie van het ventilatorpercentage (van het maximale ventilatorpercentage)

ventilatiehoeveelheid en de massabalans tussen toevoer- en retourlucht de belangrijkste zijn. Figuur 7 toont het rendement in de praktijk als functie van het ventilatorpercentage. De wtw-unit staat voornamelijk in stand 1 (ventilatorpercentage 35%). De standen 2 en 3 en 'afwezig' zijn ook waar te nemen. Tusseliggende ventilatorpercentages komen voor wanneer de CO₂-vraagsturing het ventilatorpercentage geleidelijk omhoog voert. Met open bypass (warmteterugwinning uitgeschakeld) is het gemiddelde ongewenste thermisch rendement 24%. Dit rendement zou in het ideale geval 0% moeten zijn, maar de ventilatoren warmen de verse lucht iets op (ongeveer 2°C), ondanks het gebruik van energiezuinige gelijkstroomventilatoren. Bij gebruik van wisselstroomventilatoren zou het thermisch rendement nog hoger uitvallen. Met gesloten bypass (warmteterugwinning ingeschakeld) wordt het optimale rendement bereikt voor de meest gebruikte stand 1 (160 m³/h). Het rendement is lager bij de stand 'afwezig', waarschijnlijk door onbalans in de luchtstromen bij deze lage hoeveelheden. Voor hogere ventilatorstanden zakt het thermisch rendement, doordat de lucht zó snel door de warmtewisselaar stroomt dat het eindige uitwisselingsoppervlak merkbaar wordt. Het waargenomen gemiddelde thermische rendement met gesloten bypass ligt op 89%. Deze waarde is hoog, rekening houdend met het feit dat toevoer- en retourluchtstroom niet perfect in balans zijn. De bewoner heeft de wtw-unit ingeregeld met een luchthoeveelheid die lager is in de retour dan in de toevoer. Gedetailleerde meting van luchthoeveelheden liet een onbalans van 6% zien. Wanneer wiskundig gecorrigeerd wordt voor deze onbalans, dan wordt een rendement bereikt

van $89\% / (100\% - 6\%) = 95\%$. Dit betekent dat wanneer de wtw-unit ingeregeld zou zijn in massabalans, een thermisch rendement van 95% bereikt zou zijn. Dit komt perfect overeen met het thermisch rendement zoals in het laboratorium gemeten is.

■ CONCLUSIE

De verzamelde praktijkgegevens van een vraaggestuurd ventilatiesysteem met warmteterugwinning en gebruik van grondwarmte in een nulwoning in Groenlo heeft veel interessante inzichten gegeven. Een gezond binnenklimaat kan bereikt worden met een hoog comfort in termen van CO₂-niveaus en toevoertemperaturen. De energiezuinige werking is bewezen door de vermeden verwarming van 1.385 kWh en vrije koeling van 769 kWh gedurende de rapportageperiode. Een schatting van de jaarlijkse werkingsgraad is 10 voor de vermeden verwarming en 4 voor de vrije koeling. Dataverzameling zal nog ten minste voortduren tot februari 2012 om een volledig jaar in kaart te kunnen brengen. Een gedetailleerd rapport voor het volledige jaar zal volgen na verwerking van de gegevens.

■ LITERATUUR

1. Vollebregt R. (2011), Koelen zonder energiegebruik door zomernachtventilatie, Verwarming & Ventilatie, mei 2011, pp. 268-271
2. Mooi R. (2011), Huis vol technische installatiesnuffjes, Installatie & Sanitair, 3, april 2011, pp. 12-14
3. Kriesi R. (2011), Comfort ventilation - a key factor of the comfortable, energy-efficient building, Rehva Journal, May 2011, pp. 21-26

	Rapportageperiode	Schatting volledig jaar	API (schatting)
Cumulatieve vermeden verwarming	1.385 kWh	2.700 kWh	10
Cumulatieve vrije koeling	769 kWh	1.000 kWh	4
Elektriciteitsverbruik ventilatoren	190 kWh	275 kWh	

-Tabel 1- Cumulatief energetisch voordeel van ventilatie met warmteterugwinning en geschatte jaarlijkse werkingsgraad.