

# 3D DYNAMISCH MODELLEREN VAN PASSIEVE KOELTECHNIEKEN: AARDE – LUCHT WARMTEWISSELAARS



M. Steeman en A. Janssens, Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen, Vakgroep Architectuur en Stedebouw (Marijke.Steeman@ugent.be)

*De energievraag voor koelen is in belangrijke mate toegenomen gedurende de laatste jaren. Aarde-lucht warmtewisselaars (ALWW) of grondbuizen zijn een veelbelovende techniek om een goed thermisch comfort te realiseren en het energieverbruik voor verwarming en koeling te beperken. Voor een goed onderbouwde toepassing in gebouwen is het belangrijk om vanaf het ontwerpproces in staat te zijn de prestaties van deze passieve techniek te kunnen voorspellen. Rond deze problematiek liep tijdens het academiejaar 2004-2005 een eindwerk [1], waarvan in dit artikel een aantal resultaten worden voorgesteld.*

*In dit artikel worden de thermische prestaties van twee ALWW's bestudeerd aan de hand van een driedimensionaal dynamisch simulatiemodel. De resultaten worden vergeleken met een stationair model en met beschikbare meetdata.*

*Het onderzoek toont dat de ALWW's in staat zijn gebouwen te koelen tijdens de zomer en om de ventilatielucht voor te verwarmen in de winterperiode. De techniek blijkt een goed piekvermogen te hebben. Verder wordt een goede overeenstemming tussen het dynamisch model en de meetdata waargenomen. Tijdens zeer warme en koude perioden onderschat het model echter de thermische prestaties van de grondbuizen.*

nog niet frequent toegepast door architecten en ontwerpers. Er is immers weinig praktische informatie voorhanden over ontwerpmethoden en de prestaties van gerealiseerde installaties in België.

## BEREKENINGS- EN EVALUATIE METHODES

In het verleden zijn al verschillende modellen ontwikkeld om de thermische prestaties van grondbuizen te voorspellen. Zowel de ALWW die werd geïnstalleerd in het passiefhuis van Heusden als deze in het kantoorgebouw van SD Worx, werden ontworpen volgens een dimensioneringsmethode gebaseerd op een optimalisatie van thermisch gedrag en drukverlies [3]. Volgens deze methode is de thermische prestatie van een warmtewisselaar bepaald door de stationaire effectiviteit  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{(T_a - T_e)}{(T_w - T_e)} = 1 - \exp\left(-\frac{\pi h D}{m_a c}\right)$$

$$h = \frac{\text{Nu}\lambda}{D}$$

Een verklaring van de symbolen in bovenstaande vergelijkingen wordt gegeven aan het einde van dit artikel. Aangezien de convectieve overgangscoefficiënt functie is van de buisdiameter, zijn de lengte, diameter en debiet van de warmtewisselaar de onafhankelijke ontwerpparameters die deze stationaire effectiviteit rechtstreeks beïnvloeden. Daarnaast zijn ook de diepte in de bodem en de bodemeigenschappen, het buismateriaal, de tussenafstand tussen meerdere parallelle buizen, de eventuele bezonning van het bodemoppervlak en de warmteverliezen van naburige constructies, variabelen die een belangrijke rol spelen in het thermisch gedrag van grondbuizen.

In dit artikel worden de toepassingsmogelijkheden van ALWW's onderzocht aan de hand van een driedimensionaal dynamisch model dat werd opgebouwd in de simulatiesoftware Voltra [1,4]. Voltra maakt het mogelijk driedimensionale warmtetransporten dynamisch te berekenen in elementen die volgens een rechthoekig raster kunnen worden opgebouwd: in een specifiek coördinatenstelsel kan elke materiaallaag worden ingegeven door toekenning van een bepaalde kleur. Deze worden daarna verder opgesplitst in controlevolumes ter verfijning van het raster. Daarnaast kunnen ventilatiestromen worden gedefinieerd, zodat ook de thermische invloed van ventilatie kan worden geëvalueerd. Door middel van een controlevolumemethode kan voor elk controlevolu-

## INLEIDING

Meer en meer wordt mechanische koeling ingezet om een comfortabel binnenklimaat te realiseren in gebouwen. Het grootste nadeel van airconditioning is echter haar energieconsumptie: 15% van het totale energieverbruik wereldwijd gaat immers naar koeling van gebouwen. Tegelijk wil het Kyoto-akkoord de uitstoot van broeikasgassen, waaronder CO<sub>2</sub>, gemiddeld genomen over de periode van 2008 en 2012 met minstens 5% beperken [2]. Het wordt in de toekomst dus van groot belang om, in het licht van deze overeenkomst, gebouwen op een meer verantwoorde manier te koelen.

In het kader van deze problematiek lijken passieve koeltechnieken almaar interessanter te worden. Bij de toepassing van ALWW's wordt de ventilatielucht aangezogen langs ingegraven buizen. Doordat de bodem een zeer grote warmtecapaciteit bezit, heerst er op voldoende diepte een quasi constante temperatuur van ongeveer 10°C. De ventilatielucht wordt in de winter opgewarmd en afgekoeld tijdens de zomer, waarbij de bodem als warmtebron of koudebron fungeert. Alleen een gematigd klimaat (zoals het Belgische), met een voldoende groot temperatuurverschil tussen zomer en winter, is geschikt voor grondbuizen. Toch wordt de techniek

me op elk tijdstip in de simulatie de temperatuur en de warmtestroom berekend worden. Het op deze manier ontwikkelde model werd vervolgens ingezet om de prestaties van twee warmtewisselaars dynamisch te evalueren.

## PASSIEFWONING HEUSDEN – DESTELBERGEN [5]

De rijwoning bestaat uit een sober, kubusvormig volume en is gelegen in Heusden - Destelbergen. De opdrachtgevers kozen voor een kwalitatieve woning waar energiezuinigheid en maximaal comfort centraal stonden. De vrij kleine en compacte woning heeft een totale vloeroppervlakte van 130 m<sup>2</sup>. Een functionele kern in het midden van de woning omvat een trap, keukenblok, badkamer en berging, waardoor de gelijkvloerse en eerste verdieping als open plateaus konden worden opgevat. De woning werd in 2003 in gebruik genomen (ontwerp architect *Bart Cobbaert*, studie *Cenergie*).

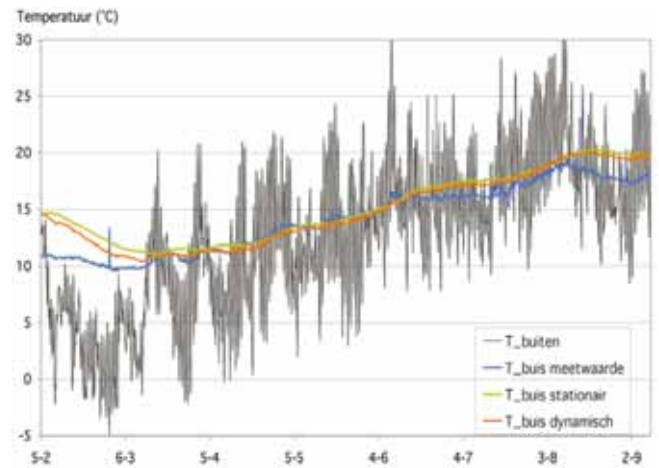
Een grondbuis voorziet de woning van een voorverwarming in de winter en levert voldoende koelte in de zomer zodat mechanisch koelen overbodig wordt. De grondbuis wordt



**Figuur 1:** De kubusvormige woning heeft een totale oppervlakte van 130m<sup>2</sup>.

**Tabel 1:** Gegevens grondbuis Heusden.

	Aantal	Diameter (cm)	Lengte (m)	Debiet (m <sup>3</sup> /h)	Effectiviteit (%)	Materiaal	Grondsoort	Diepte (m)
Heusden	1	11	40	74	99,6	HDPE	klei	van 1,5 tot 2,5



**Figuur 2:** Vergelijking meetresultaten en modellen voor de passiefwoning in Heusden Destelbergen.

permanent geventileerd met een debiet van 74 m<sup>3</sup>/h (CO<sub>2</sub>-tracergasmetingen) [6], de eigenschappen ervan worden in tabel 1 gegeven. De berekende stationaire effectiviteit van de grondbuis is 99,6%. Van februari tot september 2004 werden zowel de buitentemperatuur als de uittredetemperatuur van de grondbuis gemeten.

In figuur 2 worden de meetdata, de resultaten uit het dynamisch model en het stationair model (gerekend met de ongestoorde grondtemperatuur) vergeleken. Een goede overeenstemming tussen de verschillende modellen kan worden waargenomen.

De gemeten waarden tonen dat de grondbuis de schommelingen van het buitenklimaat goed dempt: tijdens het tussenseizoen wordt een bijna constante uittredetemperatuur van 10°C waargenomen, in de zomer loopt de temperatuur op tot 17 à 20°C. Tijdens de koudste dag (-5°C) werd de lucht 13°C opgewarmd, op warmere dagen was de opwarming beperkt tot 1 à 2°C. Op de warmste dag (30,5°C) werd de lucht 11,5°C afgekoeld, op koelere dagen (21°C) was dit slechts 1,5°C. De grondbuis is dus in staat te werken als topkoeling in de zomer en in de winter zal een beperkte bijverwarming volstaan. In het tussenseizoen zijn de prestaties van de grondbuis echter beperkt.

De energiebesparing die met deze passieve techniek gecreëerd kan worden, stijgt met toenemende effectiviteit van de warmtewisselaars en is afhankelijk van hun ventilatiedebiet. Door een systeem met en zonder warmtewisselaar te vergelijken, kan een inschatting worden gemaakt van de verwachte winsten van de techniek. Berekeningen van het energieverbruik worden gemaakt waarbij de uittredelucht van de buis wordt naverwarmd in de winter tot 20°C en in de zomer wordt nagekoeld tot 14°C.

Onderstaande formules werden gebruikt voor het bepalen

van de energiewinsten voor koeling en verwarming en geven het convectief warmtetransport weer dat gepaard gaat met ventilatie. Afhankelijk of het gebouw al dan niet over een grondbuis beschikt, werd voor  $T_e$  de buitentemperatuur of de uittredetemperatuur van de buis gebruikt. In  $\phi_{v,cool}$  geeft de eerste term de voelbare koeling weer, de tweede term is de latente koeling.

$$\phi_{v,cool} = 0,34nV(T_e - 14) + h_{ev}G_c$$

$$\text{met } G_c = \rho_a \xi_a \frac{nV}{3600} (p_e - p_{sat}(14))$$

$$\phi_{v,heat} = 0,34nV(20 - T_e)$$

Er werd gerekend met een energieprijis voor elektriciteit van 14,5 eurocent/kWh en voor aardgas van 5,8 eurocent/kWh [7]. De COP van de koelinstallatie bedraagt 3, het rendement

Tabel 2: Jaarlijkse energetische besparingen in Heusden.

	Zomer (April – Okt.)	Winter (Nov. – Maart)
Benodigde energie zonder buis	342 kWh	1411 kWh
Energie besparing	97 kWh	572 kWh
Besparingspercentage	28%	40,5%
Financiële besparing	5 €	42 €

van de verwarming is 0,8. Tabel 2 toont dat de jaarlijkse energiebesparing ondanks de zeer goede effectiviteit van de warmtewisselaar vrij klein is door het beperkte ventilatie-debiet. Verder zijn de verwachte winsten in Heusden in de winter (opwarmen ventilatielucht) groter dan in de zomer. Doordat de grondbuis continu met buitenlucht wordt geventileerd, wordt de ventilatielucht tijdens de nacht opgewarmd.

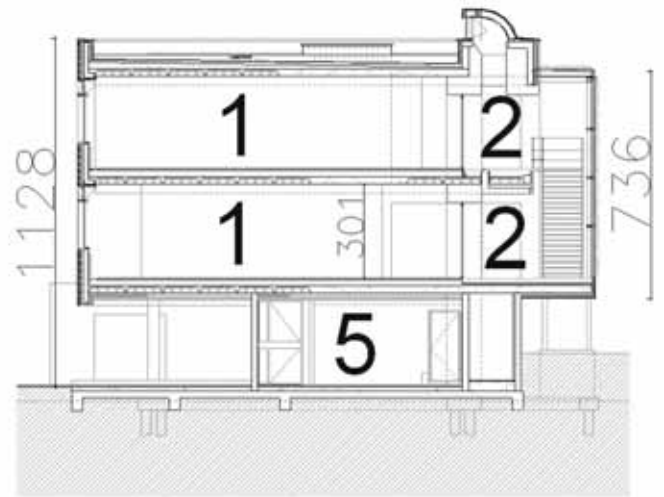
## KANTOORGEBOUW SD WORX KORTRIJK [8]

Het kantoor van SD Worx is gelegen in Kortrijk en bestaat uit twee kantoorverdiepingen. Op de gelijkvloerse verdieping bevinden zich de technische lokalen (ontwerp architect *Stramien*, studie *Cenergie*). Aan de zuidkant komen de verdiepingen uit op een open traphal en een circulatiezone (figuur 3). Het gebouw werd in gebruik genomen in de lente van 2002.

Het was de bedoeling om een kantoor te creëren met een goed thermisch comfort en de helft van het energieverbruik van een standaard kantoorgebouw. Dit werd op verschillende manieren bereikt: door grote compactheid, een zeer goede thermische isolatie en luchtdichtheid, efficiënte ventilatie

Tabel 3: Gegevens grondbuizen SD Worx.

	Aantal	Diameter (cm)	Lengte (m)	Debiet (m³/h)	Effectiviteit (%)	Materiaal	Grondsoort	Diepte (m)
SD Worx	2	80	40	2000/8000	48/38	beton	klei	3 en 5



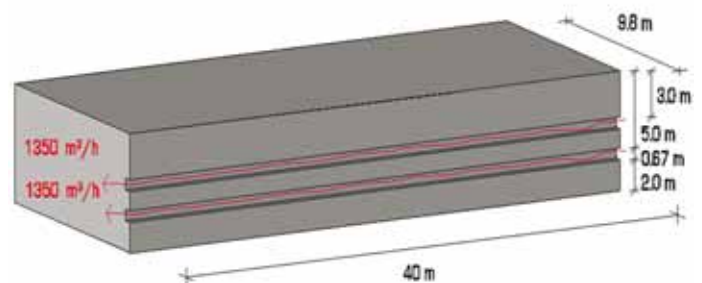
Figuur 3: Dwarsdoorsnede doorheen het kantoorgebouw (1: kantoren, 2: circulatie, 5: technieken).

met warmterecuperatie, zonwering, passieve koeling door een ALWW en 's nachts door middel van nachtventilatie.

Een vraaggestuurd balansventilatiesysteem zorgt voor verse lucht. Het ventilatie-debiet wordt geregeld tussen een minimum van 2000 m³/h en een maximum van 8000 m³/h afhankelijk van metingen van de binnenluchtkwaliteit en de temperatuur in de kantoren. De toevoerlucht gaat door de grondbuizen en wordt verder opgewarmd met een regeneratieve warmtewisselaar (nominaal rendement 90%). Janssens et al. hebben een gedetailleerde analyse van de gemeten prestaties van de warmtewisselaar gepubliceerd [9].

De eigenschappen van de grondbuizen worden gegeven in tabel 3. De stationaire effectiviteit ervan schommelt tussen 38 en 48%. Verder toont de tabel dat een grote variatie in debiet mogelijk is, met relatief weinig invloed op de effectiviteit.

In de uitgevoerde simulaties werd aangenomen dat het ventilatie-debiet in de winterperiode gemiddeld 3000 m³/h (effectiviteit 44,7%) bedraagt en oploopt tot 5400 m³/h in



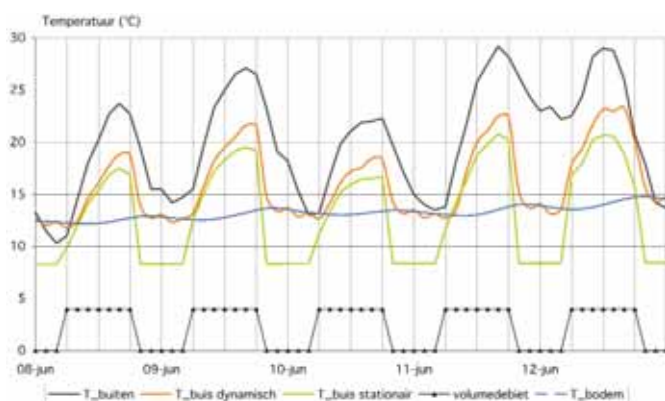
Figuur 4: Dynamisch model voor de betonnen grondbuizen van SD Worx.



**Figuur 5:** De aarde – lucht warmtewisselaar van SD Worx bestond uit betonnen buizen op 3 en 5m diep.

zomer (effectiviteit 40,3%). De grondbuizen worden enkel tijdens de kantooruren met buitenlucht geventileerd. In tegenstelling tot het passiefhuis in Heusden beschikten we hier niet over metingen van de temperatuur van de ventilatielucht voor en na de grondbuizen. Bijgevolg werden de dynamische simulaties uitgevoerd gebruik makend van de weerdata uit het Test Referentie Jaar (TRY) van Ukkel, België.

Simulaties van de prestaties van de grondbuizen werden uitgevoerd voor een volledig jaar. Figuur 6 toont enkele resultaten tijdens een warme zomerperiode (debiet 5400 m<sup>3</sup>/h). Opnieuw stellen we een vrij goede overeenstemming tussen de verschillende modellen vast. Het stationair model (uitgaande van een ongestoorde grondtemperatuur) toont een iets beter gedrag van de warmtewisselaars. De ongestoorde grondtemperatuur op een diepte van 5 m bedroeg geduren-



**Figuur 6:** Koeling in het kantoorgebouw van SD Worx tijdens een zomerweek (TRY Ukkel).

de deze week 8°C.

De uittredetemperatuur van de grondbuis op 3 m en op 5 m verschilt nauwelijks: de laatste toont een lagere temperatuur, doordat de schommelingen in het buitenklimaat dieper in de bodem meer worden gedempt. De grondbuizen zijn enkel tijdens de kantooruren in werking, daartussen valt de temperatuur terug naar de bodemtemperatuur. Slechts bij hoge buitentemperaturen wordt een goede koeling voorspeld, in het tussenseizoen is de koeling beperkt. Als de buitentemperatuur lager ligt dan 12°C à 13°C wordt zelfs een lichte opwarming van de ventilatielucht waargenomen. Op een warme dag (11 juni) nemen we een koeling van ongeveer 7°C waar.

Wanneer we vergelijken met meetresultaten van juni 2002 [10] stellen we vast dat het dynamisch model voornamelijk in het tussenseizoen het werkelijk gedrag van de grondbuizen vrij goed voorspelt, tijdens warme en koude pieken onderschat het model de prestaties van de warmtewisselaars.

De thermische prestaties van de betonnen grondbuizen zijn dus beperkt. Enkel tijdens zeer warme en koude periodes is er een goede koeling en opwarming van de ventilatielucht te

**Tabel 4:** Jaarlijkse energetische besparingen in SD Worx.

	Zomer (April-Okt.)	Winter (Nov. – Maart)
Benodigde energie zonder buis	19045 kWh	32536 kWh
Energie besparing	7467 kWh	4279 kWh
Besparingspercentage	39%	13%
Financiële besparing	361 €	310 €

verwachten.

Opnieuw werd een inschatting gemaakt van de energiebesparing die de warmtewisselaars realiseren (tabel 4). Door het grotere ventilatiedebiet blijken de winsten een stuk hoger te liggen dan in de passiefwoning. De voorspelde winsten zijn in de zomer groter dan tijdens de winterperiode doordat de buizen tijdens de zomerperiode met een hoger ventilatiedebiet worden geventileerd.

## NAAMGEVING

$c$	soortelijke warmtecapaciteit [J/kgK]
$D$	binnendiameter ALWW [m]
$G_c$	condensatiestroom [kg/s]
$h$	convectieve warmteovergangcoëfficiënt [ $W/m^2K$ ]
$h_{ev}$	latente verdampingswarmte [ $2,5 \cdot 10^6 J/kg$ ]
$L$	lengte ALWW [m]
$m_a$	massadebiet lucht per buis [kg/s]
$nV$	ventilatiedebiet [ $m^3/h$ ]
$Nu$	Nusselt getal
$p$	dampdruk [Pa]
$p_{sat}$	verzadigingsdampdruk [Pa]
$T_a$	luchttemperatuur na de grondbuis [K]
$T_e$	luchttemperatuur voor de grondbuis [K]
$T_w$	wandtemperatuur grondbuis [K]
$\epsilon$	effectiviteit ALWW [-]
$\phi_v$	benodigde energie [kWh]
$\lambda$	warmtegeleidingscoëfficiënt van lucht [ $0,025 W/mK$ ]
$\rho_a$	densiteit lucht [ $kg/m^3$ ]
$\xi$	specifieke dampcapaciteit van lucht [ $6,1 \cdot 10^{-6} kg/kgPa$ ]

## CONCLUSIE

De techniek van ALWW's blijkt een goed piekvermogen te hebben, maar in het tussenseizoen is de koelcapaciteit veel geringer. Hierdoor is de realiseerbare energiebesparing eerder beperkt. De aanwending gebeurt daarenboven liefst in goed geïsoleerde gebouwen. De buislucht kan tijdens de zomerperiode gebruikt worden voor vrije koeling. Afhankelijk van de koellast van het gebouw zal de lucht verder gekoeld moeten worden om een behaaglijk binnenklimaat te creëren. De grondbuizen blijken enkel geschikt te zijn om de ventilatielucht voor te verwarmen. Een extra verwarmingsinstallatie is daarom nodig om het comfort in de winter te garanderen.

Het dynamisch simulatiemodel is in staat de thermische prestaties van de warmtewisselaars goed in te schatten, voornamelijk gedurende gematigde periodes van het buitenklimaat. Tijdens warme en koude pieken onderschat het model licht het werkelijke gedrag van de grondbuizen.

## REFERENTIES

- [1] Steeman M. (2005): 3D Dynamisch modelleren van passieve koeltechnieken: aarde – lucht warmtewisselaars. Scriptie, Universiteit Gent.
- [2] EU (2003): The Kyoto-protocol – A brief summary. <http://europe.eu.int/comm/environment/climat/kyoto.htm>
- [3] De Paepe, M., Janssens, A. (2003): Thermo-hydraulic design of earth –air heat exchangers. Energy and Buildings 35, p. 389-397.
- [4] Physibel (2003): Manuel Voltra & Sectra. Computer program to calculate 3D & 2D transient heat transfer in objects described in a rectangular grid using the energy balance technique. Version 4.0w.
- [5] Passiefhuis Platform vzw [www.passiefhuisplatform.be](http://www.passiefhuisplatform.be)
- [6] Willems, L., Janssens, A., (2004): Tracergasmetingen in passiefhuizen, Proceedings Passiefhuis happening (J. Brans, ed.), Passiefhuisplatform vzw, 200-211.
- [7] Essent, 2005. Tariefkaart. <http://www.essent.be/region/vlaanderen/nl/individual/tariefkaart.pdf>
- [8] Cenergie [www.cenergie.be](http://www.cenergie.be)
- [9] Janssens, A., M. Steeman, J. Desmedt, H. Hoes en M. De Paepe. (2005) Energy performance of earth-air heat exchanger in a Belgian office building. Proceedings of the 26<sup>th</sup> AIVC-Conference, ISBN 2-9600355-8-5, Brussels, 15-20.
- [10] De Paepe, K. (2003): Meettechnische analyse van lage energietechnieken in kantoorgebouwen. Scriptie, Universiteit Gent.