

Gebaseerd op thermiek, zon en wind

Natuurlijke en hybride ventilatieprincipes

Natuurlijke en hybride ventilatiesystemen – gebruikt op een geavanceerde manier – zorgen voor meer tevreden gebruikers, betere luchtkwaliteit en lager energiegebruik. Veel onderzoeken laten zien dat meer of minder geavanceerde natuurlijk of hybride geventileerde gebouwen een hogere gebruikerswaardering hebben dan mechanisch geventileerde gebouwen. Een ander voordeel is een verminderd energiegebruik [1, 2, 3]. Maar de voornaamste succesfactoren zijn niet altijd duidelijk, omdat deze gebouwen kunnen zijn aangepast vanwege een slecht binnenklimaat (tocht, te warm en onvoldoende luchtkwaliteit). Anderzijds zijn er ook veel volledig mechanisch geventileerde gebouwen met comfortproblemen. Het is daarom essentieel om meer inzicht te ontwikkelen in effectieve ventilatieprincipes, betere rekenmodellen en een robuustere regelstrategie voor natuurlijk en hybride geventileerde gebouwen.

Dr.ir. P.J.W. (Peter) van den Engel, ir. R.A.M. (Remco) Kemperman, H.J. (Heleen) Doolaard; Technische Universiteit Delft en Deerns
raadgevende ingenieurs bv

Geavanceerd ontworpen natuurlijk en hybride geventileerde gebouwen hebben het vermogen om hoog gewaardeerd te worden door de gebruikers; niet alleen om fysische maar ook om psychologische redenen. De directe toevoer van buitenlucht kan leiden tot de volgende verbeteringen:

- het verbeteren van luchtkwaliteit, uiteraard mede afhankelijk van de omgeving van het gebouw;
- koeling van het gebouw, door buitenlucht van een lagere temperatuur toe te laten;
- het vergroten van de plaatselijke en gemiddelde luchtsnelheid als de binnentemperatuur hoog is (comfortkoeling).

Het vergroten van de tevredenheid van de

gebruiker is één van de uitgangspunten van het ontwerp van tweede huidgevels of ramen, die ook in hoogbouw worden toegepast. In gebouwcertificeringssystemen als Breeam en Leeds krijgen gebouwen met te openen ramen extra punten en in het programma van eisen van de Rijksgebouwendienst zijn te openen ramen al jaren standaard.

■ BETERE LUCHTKWALITEIT

De luchtkwaliteit kan worden gemeten door de CO₂-niveaus vast te stellen. Maar er zijn ook andere belangrijke fysische en subjectieve elementen, zoals de geur van een boom of de ervaring van de natuur. Veel hiervan is moeilijk of niet te meten.

■ LAGER ENERGIEGEBRUIK

Ventilatorenergie bepaalt, samen met energiegebruik voor apparatuur en verlichting, voor het grootste deel de energievraag van een gebouw. Een goed geïsoleerd en tegen de zon beschermd gebouw met een efficiënte energieopwekking heeft weinig verwarmings- en koelenergie meer nodig. Ventilatorenergie kan worden verminderd door:

- vermindering van de weerstand van alle componenten van een ventilatiesysteem. Een luchtsnelheid van 1 tot 2 m/s wordt aanbevolen [4]. Bij natuurlijke ventilatiesystemen is zelfs nog een lagere ontwerppluchtsnelheid van 0,5 m/s wenselijk [5]. Kritische componenten zijn filters, warmteterugwin-

systemen en geluidabsorberende kanalen. Het is evenwel mogelijk om ook deze elementen te integreren. In dat geval moet bijvoorbeeld worden gedacht aan elektrostatische filters, een dunne draad warmtewisselaar of een platenwisselaar waar lucht met lage snelheid doorheen stroomt;

- natuurlijke ventilatie alleen gedurende een deel van de dag of het jaar als de buitenomstandigheden gunstig zijn. Dit is het gebruikelijke gedrag bij te openen ramen, maar ramen zijn niet altijd 'smart' genoeg ontworpen voor zowel spui- als basisventilatie;
- het ontwerp van gebouwen met natuurlijke toevoer, afvoer of allebei;
- het gebruik maken van natuurkrachten zoals interne of externe drukverschillen (thermiek), zon en wind.

Het uiteindelijke doel is een gebouw dat, voor zover dat mogelijk is, volledig natuurlijk wordt geventileerd met een minimum gebruik van verwarming en koeling. Dit is mogelijk door:

- beheersing van de volumestroom van toegen afvoer, na meting van het CO₂-niveau van de lucht en door uitsluitend tijdens gebruikstijd te ventileren;
- toename van de ventilatie als de buitentemperaturen niet te laag of te hoog zijn;
- warmteterugwinning met een lage weerstand, indien nodig verbonden met een warmtepomp [6]. Als de temperatuurverschillen tussen onttrokken en geleverde warmte klein zijn is de effectiviteit (COP) van de warmtepomp hoog.

■ ECONOMIE

Voor een kosten/batenanalyse zijn verschillende factoren van belang:

De kosten zullen toenemen door:

- natuurlijke en hybride ventilatiesystemen hebben alleen een laag energiegebruik als de volumestromen effectief worden beheerst. Een flowregeling is duur;
- bij natuurlijke ventilatie is de omvang van de kanalen meestal groter;
- hybride systemen hebben een mechanisch back-up system;
- een gevel met te openen ramen is duurder dan zonder [7]. Het openen van een raam op een vochtig warme zomerdag leidt tot een hogere koelvraag bij de centrale luchtbehandelingskast. Opties om dit te voorkomen zijn dat in dat geval:
 - de installatie gaat in de desbetreffende ruimte uit;
 - het raam gaat automatisch dicht;
 - er gaat een waarschuwingsslampje branden zodat de gebruiker wordt gestimuleerd om het raam dicht te doen. Veel bewoners van

woningen doen de ramen overigens dicht als het buiten te warm wordt en de zon op de gevel schijnt. Dit is ook het gebruikelijke gedrag in Mediterrane landen.

Voordelen zijn:

- natuurlijke ventilatie en te openen ramen dragen naar verwachting bij tot een hogere productiviteit en vermindering van het ziekteverzuim. Gebruikers accepteren ook een hogere of lagere binnentemperatuur [8];
- ventilatorenergie wordt verminderd, maar ook koelenergie door vrije koeling als het binnen warmer is dan buiten;
- afhankelijk van het ontwerp principe kan de totale lengte van het kanaalwerk worden verminderd.

■ RISICOBEOORDELING

Natuurlijk geventileerde gebouwen zijn gevoeliger voor verstoringen van de gewenste luchtstroming en voor tocht dan mechanisch geventileerde gebouwen. Opgemerkt moet worden dat dit ook komt door de wijze van beoordelen, die vaak te algemeen is. Natuurlijk geventileerde gebouwen vragen om een aparte vorm van risicobeoordeling, die nog niet beschikbaar is. Bijvoorbeeld: de soort turbulentie bij een open raam is anders dan bij gekoelde mechanisch toegevoerde lucht. De grootte en frequentieverdeling van wervels bij een open raam verschilt met die van mechanische toevoer, hetgeen vraagt om een andere vorm van tochtbeoordeling. Bovendien is het verwachtingspatroon van de gebruikers anders [8].

■ AANDACHTSPUNTEN

De volgende aandachtspunten gelden:

- in een volledig natuurlijk geventileerd gebouw kan een enkel open raam het hele ventilatiesysteem verstoren. Al bij kleine drukverschillen komt veel meer lucht naar binnen dan voor luchtverversing alleen nodig is. Als de luchtkwaliteit in een gebouwcompartiment goed blijft hoeft dit overigens niet altijd een probleem te zijn;
- mechanische systemen zijn meestal wel in staat om met 'gemiddelde' drukverschillen door open ramen om te gaan, maar het is niet altijd duidelijk wat de acceptabele grenzen zijn;
- in natuurlijk geventileerde gebouwen zal een te openen raam geen verstoringen veroorzaken als een gebouwcompartiment een eigen toe- en afvoer heeft [9];
- in kantoorruimten zijn niet alle personen in gelijke mate gevoelig voor tocht, zodat als deze hun eigen werkplek kunnen kiezen (bij het nieuwe werken) er minder risico is;
- koude toegevoerde lucht kan tocht ver-

oorzaken. Dit hangt af van de hoeveelheid toegevoerde lucht, de toevoertemperatuur en de luchtsnelheid. De inductie van omringende ruimtelucht bepaalt mede de toevoertemperatuur en luchtsnelheid;

- bovenin een gebouw kan een toevoer, een afvoer worden. Een apart afvoersysteem op de bovenste lagen kan dit voorkomen;
- de luchtdichtheid van de gevel vraagt voldoende aandacht, hetgeen bij natuurlijk geventileerde gebouwen nogal eens over het hoofd wordt gezien.

■ NATUURLIJKE VENTILATIEPRINCIPES

Natuurlijke of hybride geventileerde gebouwen zijn moeilijk te vergelijken. Luchttoe- en afvoer kan centraal of decentraal zijn georganiseerd. Los hiervan is er een gevarieerd gebruik van thermiek, zon en wind. De belangrijkste verschillen zijn: (1) decentrale toe- en afvoer, (2) decentrale toevoer en centrale afvoer, (3) centrale toevoer en decentrale afvoer en (4) centrale toe- en afvoer. Er zijn daarbij allerlei combinaties mogelijk met mechanische ventilatie en koeling. Bovendien kan het ventilatieprincipe verschillen, met meng- of verdringingsventilatie als meest opvallende varianten. Als verdringingsventilatie wordt toegepast is het altijd nodig om de lucht voor te verwarmen tot bijna kamertemperatuur. Op de lange termijn zullen economische en praktische overwegingen medebepalend zijn welk systeem zal worden toegepast.

■ FYSISCHE PRINCIPES

Thermiek of het schoorsteen-effect is de belangrijkste drijvende kracht van natuurlijke ventilatie en is voor het grootste deel voldoende om een gebouw te ventileren. Interessant is het zelfregelende effect van thermiek: hoe groter de warmtelast, hoe groter de luchtstroom en hoe groter het koeleffect. Onlangs zijn in Engeland en de Verenigde Staten diverse gebouwen neergezet die hiervan gebruik maken, maar ook bij deze gebouwen wordt al gebruik gemaakt van positieve winddruk in het toevoerplenum [5, 9, 10]. Gedurende bepaalde perioden van het jaar is in warme en gematigde klimaten extra verwarming van de schoorsteen nodig om de ventilatiestroom op gang te houden of is koeling gewenst. Voor een gematigd klimaat, en bij een beperkte interne en externe warmtelast, kan het aanvullend gewenst zijn om ook gebruik te maken van zon en wind zodat een groter gemiddeld drukverschil ontstaat. Dit kan nodig zijn bij lage binnentemperaturen in de zomer, waarbij het schoorsteeneffect vermindert of geheel wegvalt. Gebouwen met natuurlijke toevoer via de gevel kunnen last

hebben van grote negatieve drukverschillen, waar gebouwen met natuurlijke toevoer via een centraal atrium of schachten minder last van hebben. Warmteterugwinning in de afvoer kan nodig zijn om de warmte- en koudevraag te verminderen, maar dit hangt ook af van de effectiviteit van de beheersing van de volumestromen. De in- en externe warmte in combinatie met de gebouwmassa (thermische accu) kunnen voor een groot deel het warmteverlies compenseren.

■ THERMIEK

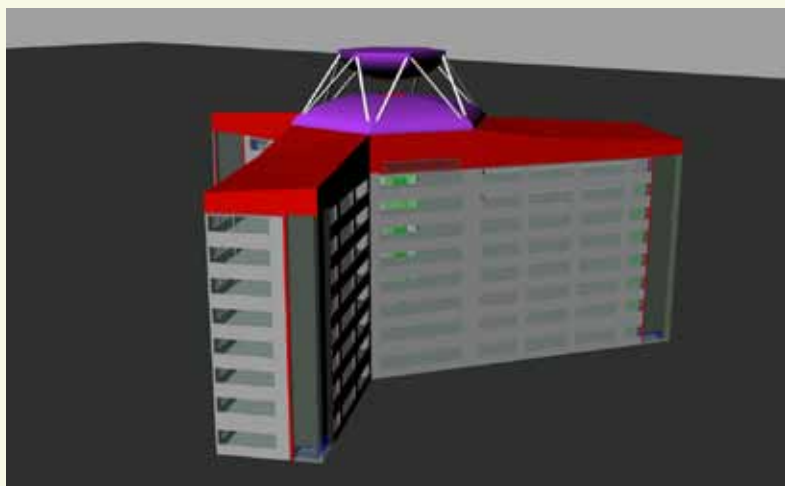
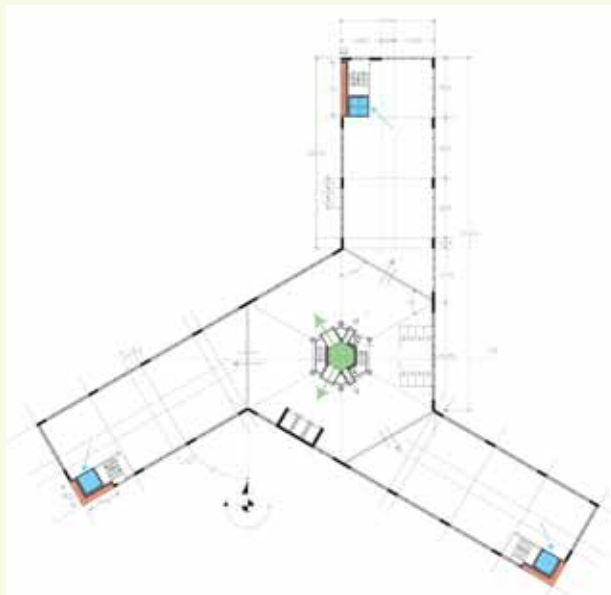
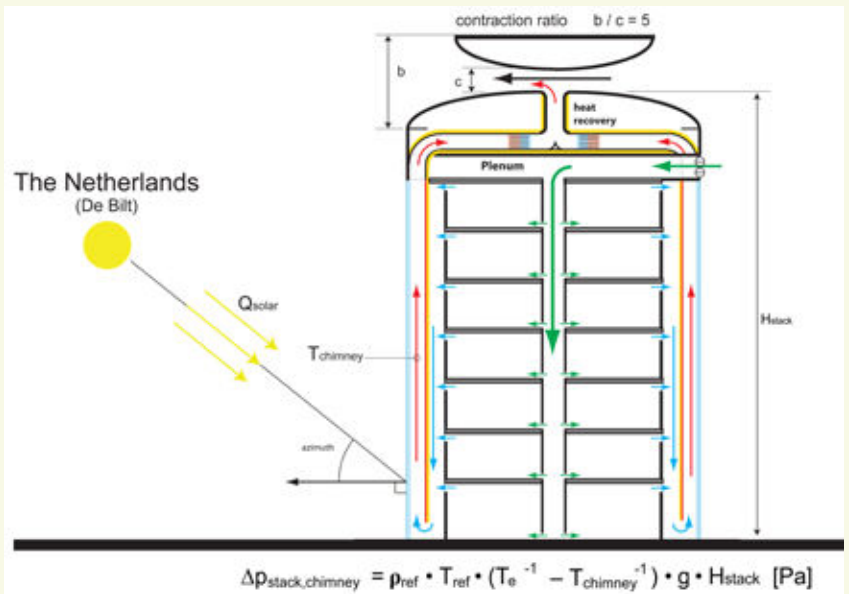
Thermiek is effectief als de binnentemperatuur hoger is dan de buitentemperatuur. Koude buitenlucht met een grotere dichtheid vervangt warme binnenlucht met een lagere dichtheid. In principe zijn de interne warmtebronnen al voldoende om een gebouw te ventileren. In het koelseizoen waarbij er kleinere drukverschillen zijn, is er een vergroot risico op terugstroming. Thermiek kan worden versterkt door de hoogte van een afvoerschacht, verhoging van de oppervlaktetemperatuur van de schacht of door een lagere druk in de schacht als gevolg van de wind. Een andere ontwerpoptie is een gebouwoffwerp waarbij retour-luchtstromen een andere vorm van ventilatie zijn. Dit vraagt om een specifiek ontwerp.

■ WIND

Wind is bijna altijd aanwezig, maar hoe deze voor een ventilatiesysteem effectief kan worden gebruikt wordt niet altijd goed begrepen. Gebouwen met atria en schachten hebben meer mogelijkheden wind te benutten, zowel ter ondersteuning van de toevoer als de afvoer. Terugschakkleppen kunnen hier goed worden toegepast. Kustgebieden hebben meer wind. De windsnelheid neemt toe met de hoogte van het gebouw ten opzichte van de omgeving en de druk is het laagst bij het dak van een gebouw. Onderdruk kan worden versterkt door de vorm van het gebouw en de vorm van de afvoer. Mogelijkheden zijn een afvoer in een venturivorm of een afvoer die met de wind mee kan draaien [11, 12]. De onderdruk boven het dak moet altijd aanzienlijk lager zijn dan de druk op de toevoer.

■ ZON

Hoge buitentemperaturen gaan altijd samen met veel zonneschijn. Vaak is er dan weinig wind. In perioden met weinig thermiek en wind kan de zon de rol van thermiek overnemen en de afvoer verwarmen. Hoe groter het collectoroppervlak hoe meer energie beschikbaar is. Vaak worden atriumdaken hiervoor gebruikt. Het is natuurlijk ook altijd mogelijk om zonneschijn om te zetten in elektrische energie en een ventilator aan te drijven. Bij een lagedruk-



-Figuur 1- Weergave van het ventilatieprincipe en rekenmodel, zoals ingevoerd in Trnsys/TrnFlow (boven). De gebouwofform is ook in CFD (Phoenics) gesimuleerd. De zonneshoornen bevinden zich aan de uiteinden van het gebouw en zijn bouwkundig goed inpasbaar (linksonder). Ook andere schoorsteenontwerpen zijn onderzocht (figuur 2 en 3).

systeem (randvoorwaarde) is maar weinig vermogen en collectoroppervlak nodig.

SIMULATIES

In CFD (Phoenics) en Trnsys/TrnFlow is een model ontwikkeld, waarbij een gebouw met een centrale vorm van luchttoe- en afvoer is gesimuleerd (figuur 1).

De volgende uitgangspunten en setpoints zijn gehanteerd:

- minimum temperatuur 20 °C;
- maximum temperatuur 25 °C;
- gebruikstijd van het gebouw van 7:00 tot 19:00 uur;
- het ventilatiesysteem wordt uitgezet als het gebouw niet in gebruik is;
- de interne warmte is 35 W/m²;
- de gesloten delen van de gevel hebben een U-waarde van 0,23 W/m²K;
- de U-waarde van glas met kozijn is 1,6 W/m²K;
- de g(ZTA)-waarde van het glas is 0,67, het glaspercentage is 30%; de g-waarde van de zonwering is 0,40 (zonwering niet helemaal dicht vanwege het uitzicht);
- het infiltratievoud is 0,1;
- ventilatie > 50 m³/h per persoon;
- grootte van het gebouw 13.050 m² b.v.o.;
- zonnecollectoren: breedte 7 m, hoogte 28,5 m, oriëntatie oost, zuid en west.

CFD-RESULTATEN

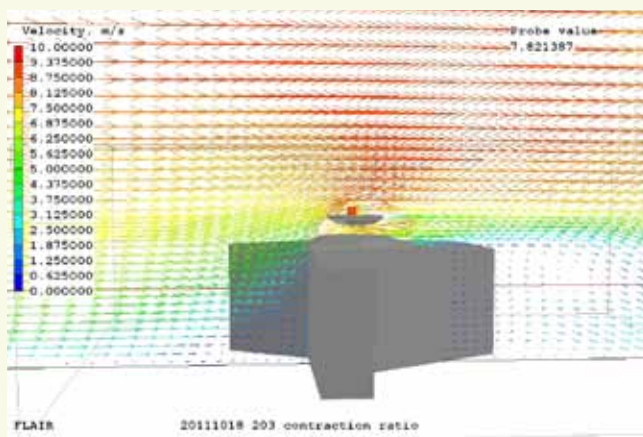
Het afvoersysteem heeft één centrale afvoer in het midden van het gebouw of drie kleine afvoeren aan de uiteinden van het gebouw. De luchttoevoer bevindt zich juist onder de bovenkant van het gebouw in een zone met overdruk (figuur 2c). De onderdruk in de afvoer kan worden vergroot door een venturivorm (figuur 2a en 2b). Het afvoersysteem kan ook gebruik maken van zonne-energie indien deze geïntegreerd is met de gevel.

De CFD-simulaties laten zien dat er altijd een zone is waar de druk positief is en die gebruikt kan worden voor luchttoevoer. De negatieve druk voor de afvoer kan worden vergroot. (De lage druk bij de dakrand kan deels veroorzaakt zijn door de keuze van het rekengrid dat in dit geval vrij grof van structuur is.)

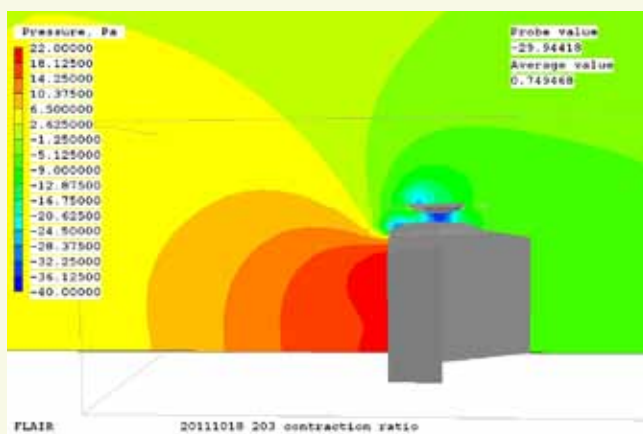
RESULTATEN

Tabel 1 laat zien dat het gemiddeld drukverschil circa 39 Pa is, waardoor het interessanter wordt om specifieke componenten toe te voegen als elektrostatische filters en warmteterugwinning. Uit de tabellen 1 en 2 kan worden afgeleid dat het gebouw gemiddeld twee keer te veel geventileerd wordt met een maximum van 6 keer bij veel wind en erg lage buitentemperaturen.

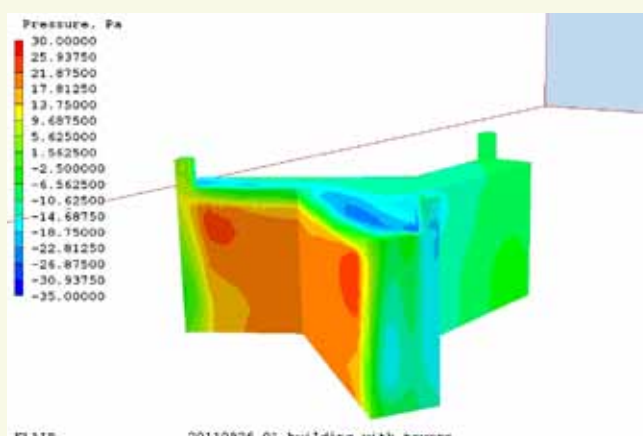
Om de complexiteit van het simulatiemodel



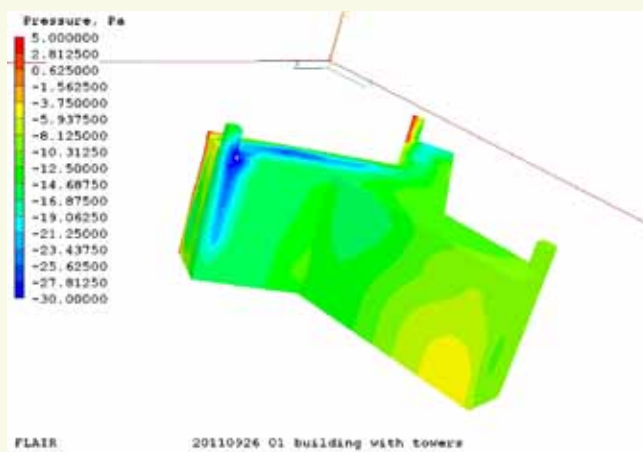
a. De snelheid van 5 m/s wordt vergroot tot circa 8 m/s door de dakvorm



b. De bijbehorende onderdruk is 30 Pa



c. Zone met overdruk voor luchttoevoer. Dit is circa 2 m onder het dak



d. Onderdruk bij decentrale schoorstenen, geïntegreerd in de gevel, zodat ze ook als zonneshoorstenen kunnen worden gebruikt

-Figuur 2- Geavanceerd gebruik van over- en onderdruk bij natuurlijke ventilatiesystemen, verschillende mogelijkheden

Storey	Gemiddelde maximum ventilatievolumestroom [m ³ /s]	Gemiddelde ventilatievolumestroom [m ³ /s]	Relatieve standaardafwijking [%]	Gemiddeld maximum drukverschil [Pa]	Gemiddeld minimum drukverschil [Pa]	Gemiddeld drukverschil [Pa]	Relatieve standaardafwijking [%]
0th	3,19	1,26	28	329	3,3	39,3	70
1st	3,03	1,16	29	326	4,0	39,4	69
2nd	2,79	1,03	30	329	4,1	39,4	69
3rd	2,59	0,92	31	328	4,0	39,4	69
4th	2,91	0,98	33	329	4,0	39,5	69
5th	3,15	1,00	36	329	3,9	39,6	69
6th	3,22	0,95	41	330	3,8	39,6	69
7th	3,29	0,88	49	331	3,8	39,8	69
gemiddeld		1,02				39,6	

-Tabel 1- Ventilatievolumestroom en totale drijvende kracht voor de verschillende verdiepingen (vereist is 0,5 m³/s per kantoorverdieping)

Verdieping	Noordvleugel Westoriëntatie van de zonneshoortsteen [%]	Zuidoostvleugel ZW/ZO-oriëntatie van de zonneshoortsteen [%]	Zuidwestvleugel ZO/ZW-oriëntatie van de zonneshoortsteen [%]
0	99,3	99,5	99,5
1	99,1	99,3	99,3
2	98,3	98,8	98,7
3	96,8	97,7	97,4
4	97,8	98,6	98,4
5	97,7	98,7	98,4
6	93,5	97,0	95,8
7	78,1	86,7	83,7
gemiddeld	95,1	97,0	97,0

-Tabel 2- Deel van de gebruikstijd met voldoende ventilatie [$Q_v > 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ per kantoorverdieping]

	Verwarmingsenergie [MJ]/(m ² jaar)		Equivalent gasgebruik voor verwarming [m ³]/(m ² jaar)
Gemiddeld	226,9		7,2
Ventilatorenergiegebruik			
	Ventilatorenergiegebruik in combinatie met thermiek, wind en zon [kWh]	Ventilatorenergiegebruik bij alleen mechanische ventilatie [kWh]	Mate van energiebesparing [%]
een zeer duurzaam lage druk 10 Pa-systeem	11	927	99
een lage druk 200 Pa-systeem	10.635	18.792	43
een conventioneel 1.000 Pa-systeem	75.796	93.960	20

-Tabel 3- Energiegebruik

te beperken zijn de openingen van een vaste afmeting ontworpen. Dit leidt tot de in tabel 1 genoemde hogere ventilatiestromen bij lage buitentemperaturen. Een ander punt van aandacht is de vermindering van gelijktijdig verwarmen en koelen in koude of warme

zones van het gebouw. Daarnaast valt met warmteterugwinning energie te besparen. In combinatie met een betere controle van de volumestromen kan het berekende gebruik van 7 m³ aardgasequivalent per m² per jaar naar verwachting worden teruggebracht naar een

energiegebruik dicht in de buurt van het passieve gebouwniveau van circa 1,5 m³ gasequivalent per m² per jaar.

De meest opvallende besparing door natuurlijke ventilatie is de vermindering van ventilatorenergie. Besparingen worden bereikt door een systeem met hoge of gemiddelde druk te verlagen naar een systeem met lage druk [4]. Vergeleken met een systeem met 1.000 Pa drukverschil tussen toe- en afvoer, nog niet eens erg hoog in de utiliteitsbouw, kan op jaarbasis 93.000 kWh worden bespaard. Als het natuurlijke systeem wordt vergeleken met mechanisch en zeer lage druksysteem van 10 Pa, kan een combinatie met venturidak en zonneshoortsteen al 99% van de tijd natuurlijk functioneren. Vergeleken met een lage druksysteem van 200 Pa is dit 43% van de tijd. Zelfs bij een 1.000 Pa systeem kan een venturidak nog 20% besparen (tabel 3). Tabel 4 laat zien wat de afzonderlijke bijdrage is van thermiek, wind en zon gerelateerd aan het gemiddelde totale drukverschil in het systeem. Als decentrale venturi-afvoeren worden toege-

	Totaal gemiddeld drukverschil	Drukverschil door thermische trek	Drukverschil door de wind	Drukverschil door de zon, ZO/ZW-oriëntatie
ΔP gemiddeld [Pa]	39,6	19,6	18,5	2,1
Pa > 0 tijdens gebruikstijd [%]	100,0	98,2	100,0	71,2
Pa > 5 [%]	99,9	92,1	62,0	12,3
Pa > 10 [%]	98,0	79,4	45,4	0,3
Pa > 20 [%]	80,1	47,2	30,0	0,0

-Tabel 4- Gemiddelde drukverschil opgewekt door de verschillende fysische elementen

	Thermische trek in de zonneshoorsteen; zuidoost/zuidwest oriëntatie	Bijdrage zon; zuidoost/zuidwest oriëntatie	Onderdruk door de afvoer bij centrale venturi	Onderdruk door de afvoer bij decentrale venturi's
ΔP gemiddeld [Pa]	21,7	2,1	18,3	9,2
Pa > 0 tijdens gebruik [%]	100	72	100	100
Pa > 5 [%]	98	17	68	51
Pa > 10 [%]	89	0	51	31
Pa > 20 [%]	55	0	31	13

-Tabel 5- Bijdrage van de verschillende componenten aan de drijvende kracht

past (figuur 3), wordt het benuttingseffect van de wind weliswaar kleiner, maar blijft dit nog steeds groot.

In tabel 5 is de bijdrage van thermiek, wind en zon van de verschillende componenten meer in detail weergegeven.

DISCUSSIE

1. Het onderzoek laat het grote vermogen van natuurkrachten zien om ventilatorenergie te verminderen, zelfs bij volledige mechanische ventilatie.
2. De meeste besparingen op ventilatorenergie zijn mogelijk door een lage druk ventilatiesysteem te ontwerpen.
3. Voor een gebouw van gemiddelde grootte in een gematigd klimaat is een gemiddeld natuurlijk drukverschil van 39 Pa haalbaar. De bijdrage van elk van de natuurkrachten moet apart worden beoordeeld.
4. Afhankelijk van de kwaliteiten van de regeltechniek van het ventilatie-, verwarmings- en koelsysteem en de beschikbaarheid van warmterugwinning is een laag energiegebruik voor verwarming en koeling mogelijk, dicht in de buurt van die van passieve gebouwen. Om dit aspect in detail te kunnen beoordelen is nog aanvullend onderzoek nodig.
5. Integratie van te openen ramen bij natuurlijk geventileerde gebouwen vraagt meer aandacht. Ontwerpmogelijkheden zijn: terugslagkleppen, volumestroomregelaars en een aparte toe- en afvoer voor een gebouwcompartiment [9].

LITERATUUR

1. Bordass B, Cohen R, Sandeven M, Leaman A. Assessing building performance in use: energy performance of the PROBE build-

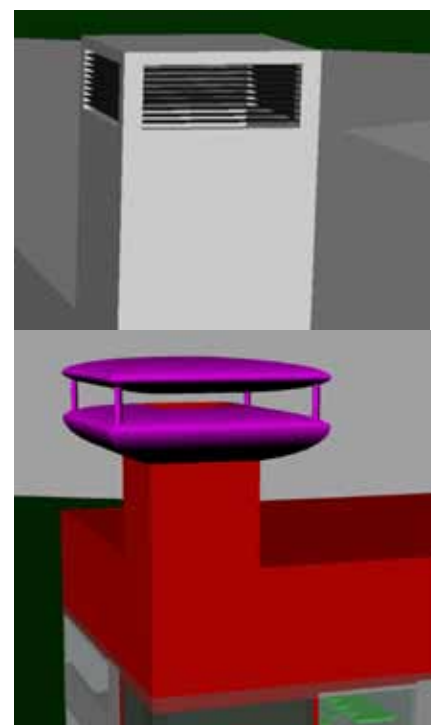
ings. Building Research and Information 29 (2) (2001) 114-128.

2. Hellwig R.T., Brasche S., Bischof W.. Thermal Comfort in Offices – Natural Ventilation vs. Air Conditioning, Proceedings of congress Comfort and Energy Use in Buildings – Getting it Right, Winsor 2006.
3. Brager G., Baker L., Occupant Satisfaction in Mixed-Mode Buildings. Proceedings of Conference: Air Conditioning and the Low Carbon Cooling Challenge, Cumberland Lodge, Windsor, UK, 27-29 July 2008. London: Network for Comfort and Energy Use in Buildings.
4. Gräslund J. Simple and reliable constant pressure ventilation for nZEB. Rehva Journal May 2011.
5. Lomas KJ. Architectural design of an advanced naturally ventilated building form. Energy and Buildings 39 (2007) 166-181.
6. Christensen MS. Natural Ventilation with Heat Recovery and Cooling (Nvhrc). Rehva Journal September 2010.
7. Guzowski M. The "costs" of operable windows. Environmental Design Research Association (EDRA) Conference. June 2003.
8. Brager GS, Paliaga G, Dear R de. Operable windows, personal control and occupant comfort. Ashrae Transactions 2004, Vol. 110, Part 2.
9. Short CA, Lomas KJ, Woods BA. Design strategy for low-energy ventilation and cooling within an urban heat island. Building Research and Information 32 (3) (2004) 187-206.
10. Krause B, Cook M, Lomas K. Environmental performance of a naturally ventilated city centre library. Energy and Buildings 39 (2007) 792-801.
11. Khan N, SU Y, Riffat SB. A review on wind

driven ventilation techniques. Energy and Buildings 40 (2008) 1586 – 1604.

12. Blocken B, Hooff T van, Aanen L. Bronsema B. Computational analysis of the performance of a venturi-shaped roof for natural ventilation: venture-effect versus wind-blocking effect. Computers & Fluids 26 April 2011.

Het onderzoek is geïnspireerd door en gebaseerd op het researchproject 'Earth, Wind & Fire – Air-conditioning powered by Nature' (Bronsema 2010). Referenties: Bronsema, B., 2010. Earth, Wind & Fire – Air-conditioning powered by nature. 10th Rehva World Congress Clima 2010, 9-12 May, Antalya, Turkey.



-Figuur 3- Twee mogelijkheden van decentrale afvoeren. De venturivorm geeft de beste resultaten.