

Deel 4

Hybride ventilatie, drukevenwicht

De huidige ontwikkeling richting bijna energieneutrale gebouwen zorgt voor nieuwe gebouwen met een zeer geringe warmtebehoefte. Met het verkorten van het stookseizoen neemt echter de behoefte aan koeling toe. Vanwege de grote gevoeligheid van deze gebouwen voor de interne warmtebelasting is het niet ongebruikelijk dat ook in het stookseizoen nog behoefte is aan koeling. De gelijktijdigheid van de koelbehoefte in een gebouw en een buitentemperatuur die lager is dan de gewenste binnentemperatuur zorgt voor groot potentieel aan vrije koeling. Omdat het energiegebruik van nieuwe gebouwen sterk afneemt wordt het aandeel van het elektriciteitsverbruik door ventilatoren in het totale energiegebruik steeds groter. Hybride ventilatie is er op gericht te voorzien in de verseluchtbehoefte terwijl het potentieel aan vrije koeling optimaal benut wordt en daarbij ventilatorenergie te bespaard wordt door gebruik te maken van natuurlijke ventilatie.

M. (Michiel) van Bruggen, De Energiemanager,
TVVL expertgroep Klimaattechniek

TVVL organiseert op donderdagochtend 18 mei a.s. een workshop hybride ventilatie. Inschrijven kan via de website van TVVL.

Dit is het laatste deel uit een serie van vier artikelen over hybride ventilatie. De artikelen zijn gebaseerd op de rapportage KT-26 Hybride ventilatie van TVVL. Deze rapportage is mede mogelijk gemaakt door inhoudelijke en/of financiële bijdragen van TVVL, Duco ventilation and suncontrol, Zehnder Group Nederland b.v., Velux en ISSO. De rapportage zal ook gebruikt worden voor het actualiseren van ISSO publicaties waar dit onderwerp aan de orde komt. De rapportage is voor leden gratis te downloaden via de website van TVVL.

Artikel 1: Definitie en uitgangspunten

Artikel 2: Varianten van hybride ventilatie

Artikel 3: Ontwerpen met natuurlijke krachten: Thermische trek en wind

Artikel 4: Drukevenwicht, Voorbeeldberekening, Nachtventilatie

Kijk voor enkele handige hybride ventilatie rekentools www.mijnenergiemanager.nl.

■ DRUKEVENWICHT

Bij het ontwerp worden de natuurlijke ventilatiestromen door een gebouw bij enkele maatgevende situaties berekend. Bij deze berekeningen wordt eerst het drukprofiel op de gebouwschil door thermische trek en winddruk bepaald. Vervolgens worden er zodanig gevelopeningen ontworpen dat er een drukevenwicht is bij de gewenste ventilatievolumestromen. Het drukevenwicht bestaat uit de volgende onderdelen:

- het drukprofiel op de schil van het gebouw;
- het drukverlies door de ventilatie-openingen;

- het drukverlies door de luchtstroom door het gebouw.

Omdat het drukverlies door de ventilatie-openingen (als het goed is) veel groter is dan het drukverlies door de luchtstroom door het gebouw, wordt deze laatste in een eenvoudige berekening vaak achterwege gelaten.

Als het drukprofiel op de gevel bekend is, kan het drukevenwicht bepaald worden. Dit kan door te bepalen waar het neutrale punt (druk binnen is gelijk aan druk buiten) komt te liggen. Dit neutrale punt wordt zodanig vastgesteld dat met de resulterende drukverschillen de gewenste volumestromen worden bereikt. Enkele randvoorwaarden en aandachtspunten ten aanzien van het vaststellen van het neutrale punt:

- het neutrale punt bevindt zich ergens tussen het minimale drukverschil en het maximale drukverschil;
- het drukverschil over een gevelopening mag niet gelijk zijn aan nul, dan zou er immers geen volumestroom plaats vinden;
- kies het neutrale punt zodanig dat de gewenste stroming plaats vindt. Dus een positieve druk voor toevoer en een negatieve druk voor afvoer. Dit is overigens niet altijd mogelijk;
- bij openingen waar een grotere volumestroom gerealiseerd moet worden is ook een groter drukverschil logisch.

De exacte bepaling van het drukevenwicht is dus vooral een kwestie van gezond verstand. Dit wordt geïllustreerd met twee voorbeelden (zie kader).

De berekening van het drukevenwicht, met thermische trek en windinvloeden is uitgevoerd voor het klaslokaal dat schematisch weergegeven is in figuur 3. De hier gegeven C_p -waarden zijn bijvoorbeeld gebaseerd op een simulatie-berekening.

Bij de berekening wordt uitgegaan van een homogene binnentemperatuur (in werkelijk zal dit een gradiënt zijn). Verschil in dichtheid tussen warme lucht en koude lucht wordt bepaald met vergelijking 2 (zie kader):

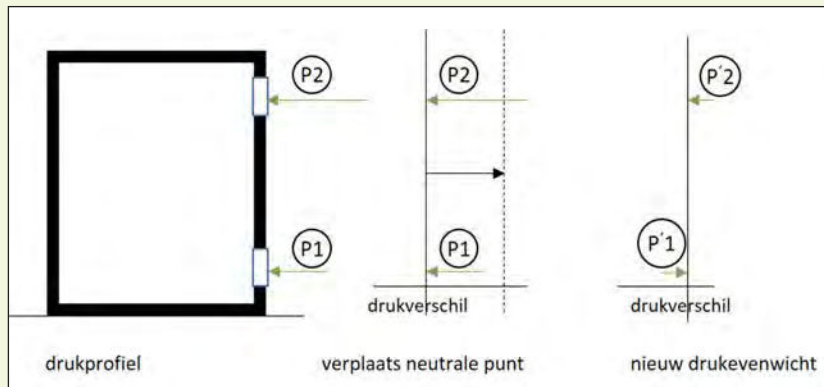
$$\Delta\rho = (28-21) \cdot 1,2 / (21+273) = 0,029 \text{ kg/m}^3$$

Voor het bepalen van het drukverschil ten gevolge van thermische trek kiezen we eerst als neutrale punt de druk bij het hoogste punt. Vervolgens kunnen we het drukprofiel bepalen bij elke ventilatie-opening op basis van vergelijking 3, bijvoorbeeld voor de laagste ventilatie-opening:

$$\Delta\rho = (h_n - h_i) \cdot (\rho_{\text{koud}} - \rho_{\text{warm}}) \cdot g = (4,5 - 1,4) \cdot 0,029 \cdot 9,81 = 0,882 \text{ Pa}$$

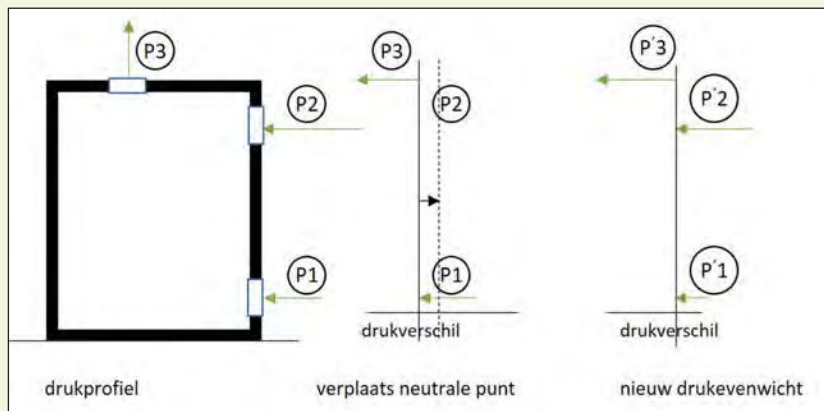
In Tabel 1 is de resulterende druk voor alle

VOORBEELDEN BEPALING DRUKEVENWICHT



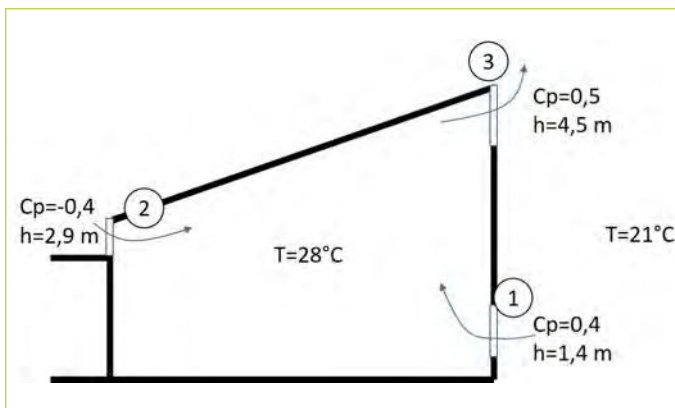
-Figuur 1- Voorbeeld bepalen van drukevenwicht bij gewenste stromingsrichting bij gegeven drukprofiel

Figuur 1: gegeven drukprofiel op de gevel, $P_1 = 3 \text{ Pa}$, $P_2 = 5 \text{ Pa}$. Bepaal de drukverliezen bij de ventilatie-openingen zodanig dat het drukverlies voor beide openingen gelijk is en dat er een lucht volumestroom optreedt van P_2 naar P_1 . Het neutrale punt wordt 4 Pa verschoven. Hierdoor is er bij P_4 een positief drukverschil van 1 Pa en bij P_3 een negatief drukverschil van 1 Pa . Er zal een volumestroom optreden van P_4 naar P_3 .



-Figuur 2- Voorbeeld bepalen van drukevenwicht bij gewenste stromingsrichting bij gegeven drukprofiel

Figuur 2: gegeven drukprofiel op de gevel, $P_1 = 3 \text{ Pa}$, $P_2 = 5 \text{ Pa}$, $P_3 = -4 \text{ Pa}$. Bij P_3 wordt er lucht afgevoerd, bij P_1 en P_2 worden gelijke hoeveelheden lucht toegevoerd. Bepaal een drukevenwicht door het verplaatsen van het neutrale punt. Door het verschuiven van het neutrale punt mag P_1 niet negatief worden. De volumestroom door P_3 is twee maal zo groot als de volumestroom door P_1 respectievelijk P_2 , een groter drukverschil bij P_3 is logisch. Op basis van deze overwegingen wordt het neutrale punt 1 Pa naar rechts verschoven. Hierdoor wordt $P'_1 = 2 \text{ Pa}$, $P'_2 = 4 \text{ Pa}$ en $P'_3 = -5 \text{ Pa}$. Er worden vervolgens ventilatie-openingen gekozen die bij het betreffende drukverschil de gewenste volumestroom hebben.



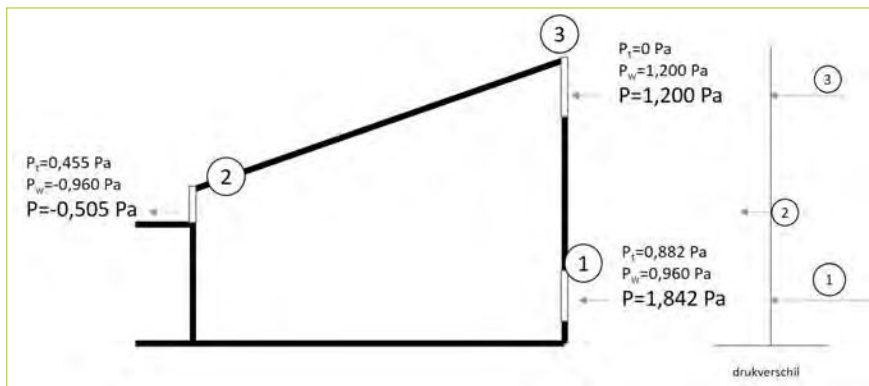
-Figuur 3- Situatie bij voorbeeldberekening drukbalans

	h	Δh	ΔP_T
		$h_n - h_i$	$\Delta h \cdot g \cdot \Delta \rho$
	[meter]	[meter]	[Pa]
Venster 1	1,4	3,1	0,882
Venster 2	2,9	1,6	0,455
Venster 3	4,5	0	0

-Tabel 1- Drukprofiel op basis van thermische trek

	C_p	ΔP_w
		$0,5 \cdot \rho \cdot v_w^2 \cdot C_p$
	[-]	[Pa]
Venster 1	0,4	0,960
Venster 2	-0,4	-0,960
Venster 3	0,5	1,20

-Tabel 2- Drukprofiel op basis van winddruk



-Figuur 4- Drukprofiel op basis van thermische trek en windbelasting

		optie 1		optie 2	
	drukprofiel	Verschuiving	Drukverschil	Verschuiving	Drukverschil
	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
Venster 1	1,842	1,521	0,321	0,9	0,942
Venster 2	-0,505	1,521	-2,026	0,9	-1,405
Venster 3	1,200	1,521	-0,321	0,9	0,3

-Tabel 3- Bepaling van neutrale punt

	h	q	A
	Drukverschil		
	[Pa]	m ³ /s	[m ²]
Venster 1	0,942	0,08	0,105
Venster 2	-1,405	-0,12	0,129
Venster 3	0,3	0,04	0,093

-Tabel 4- Bepaling van gevelopeningen

vensters gegeven.

Voor het bepalen van het drukverschil ten gevolge van wind wordt vergelijking 4 gebruikt, bijvoorbeeld voor de laagste ventilatieopening:

$$P_w = 0,5 \cdot \rho \cdot v_w^2 \cdot C_p = 0,5 \cdot 1,2 \cdot 2^2 \cdot 0,4 = 0,960 \text{ Pa}$$

In Figuur 4 is het resulterende drukprofiel gegeven.

Als we nu het neutrale punt zodanig willen verschuiven dat het stromingspatroon ontstaat als gewenst (zie figuur 3), wordt het drukverschil bij 1 en 3 erg klein (zie optie 1, tabel 3). Er wordt dus voor een andere stromingspatroon gekozen, waarbij ook bij 3 toevoer plaats vindt (zie optie 2, tabel 3).

We willen een ventilatievolumestroom van

0,12 m³/s realiseren bij het drukevenwicht als bij optie 2 in tabel 3. Daarvoor wordt vergelijking 5 gebruikt. De lucht volumestromen worden zo gekozen dat er een acceptabele gevelopening gekozen kan worden, zie tabel 4. Een eenvoudig computerprogramma om de drukbalans in een gebouw te berekenen is LoopDA van het National Institute of Standards and Technology (U.S.). Dit programma is te vinden op: <http://www.bfrl.nist.gov/IAQanalysis/software/LOOPDAdesc.htm>

NACHTVENTILATIE

Voor een effectieve toepassing van nachtventilatie zijn de volgende richtlijnen te geven:

- zorg voor een minimale interne warmtelast door een laag glaspercentage in de gevel

($A_{\text{glas}} < 0,2 \cdot A_{\text{vloer}}$), een goede zonwerende beglazing en het toepassen van automatisch geregelde buitenzonwering;

- zorg voor voldoende, goed bereikbare, thermische massa, bij voorkeur bij het plafond;
- zorg er voor dat een groot ventilatievoud op basis van natuurlijke ventilatie mogelijk is. Voor het creëren van de natuurlijke ventilatiestromen ten behoeve van nachtventilatie worden dezelfde principes gebruikt als beschreven in het artikel 'Hybride ventilatie, natuurlijke drijfkrachten'. Over het algemeen zal thermische trek groter zijn in de nachturen vanwege het grotere temperatuurverschil tussen binnen en buiten.

THERMISCHE MASSA

Voor het bepalen van een richtwaarde van de benodigde actieve thermische massa wordt deze zodanig bepaald dat deze gelijke is aan de interne warmtelast over een (werk)dag. De effectieve thermische massa wordt gegeven door:

$$Q_{\text{opslag}} = \rho \cdot c \cdot A \cdot d \cdot \Delta T \quad [J]$$

Of

$$A = (Q_{\text{opslag}} / \rho \cdot c \cdot A \cdot d \cdot \Delta T) \cdot m^2 \quad [1]$$

Waarin:

Q_{opslag} : de warmte die in de massa opgeslagen wordt [J]

ρ : soortelijke massa (beton: 2400 kg/m³ [kg/m³])

c : soortelijke warmte (beton: 920) [J/kg·K]

A : oppervlakte [m²]

d : penetratiediepte (0,1) [m]

ΔT : temperatuurverschil van de massa tussen eind van de dag en begin van de dag (richtwaarde: 4°C) [°C]

De interne warmtelast over een dag wordt gegeven door:

$$Q_{\text{int}} = t \cdot (\Phi_{\text{int,Oc}} + \Phi_{\text{int,A}} + \Phi_{\text{int,L}} + \int \Phi_{\text{sol}} [J])$$

Waarin:

Q_{int} : De interne warmtelast over een (werk)dag [J]

$\Phi_{\text{int,Oc}}$: Warmtestroom door personen [W]

$\Phi_{\text{int},A}$: Warmtestroom door apparatuur [W]
 $\Phi_{\text{int},L}$: Warmtestroom door verlichting [W]
 $\Phi_{\text{int},\text{sol}}$: Warmtestroom door zoninstraling [W]
 t : Duur van de (werk)dag [s]

■ VOORBEELD

Bereken het benodigde oppervlakte aan thermisch actieve massa

Gegeven:

Ruimte van 20 m²

Interne warmtelast door personen: 160 W

Interne warmtelast door apparaten: 10 W/m² = 200 W

Interne warmtelast door verlichting: 8 W/m² = 160 W

Zoninstraling over de dag: 3,24 · 10⁶ J (gemiddeld 100 W)

Duur van de dag 8:30 - 17:30: 9 uren = 32400 s

De totale interne warmtelast is gelijk aan:

$$Q_{\text{int}} = 32400(160+200+160)+3,24 \cdot 10^6 = 20,01 \cdot 10^6 \text{ [J]}$$

Benodigde oppervlakte aan thermische massa is dan:

$$A = 20,01 \cdot 10^6 / 2400 \cdot 920 \cdot 0,1 \cdot 4 = 22,7 \text{ m}^2$$

Hieruit blijkt dat in dit geval de oppervlakte van het plafond (net) niet voldoende is om de benodigde actieve thermische massa te realiseren.

■ REGELING NACHTVENTILATIE

Nachtventilatie wordt gebruikt voor het afkoelen van een gebouw ten behoeve van de volgende dag. Het gevaar van overkoelen is aanwezig als deze volgende dag deze afkoeling niet noodzakelijk bleek. Vooral in de overgangsmaanden mei, juni, september en oktober is er risico op overkoelen. Om overkoelen door nachtventilatie te voorkomen wordt voor de nachtventilatie een temperatuursetpoint aanbevolen die gelijk is aan het temperatuursetpoint voor verwarming. Over het algemeen leidt een complexe, anticiperende, regeling niet tot betere resultaten dan een eenvoudige, robuuste, regelstrategie. Een eenvoudige regelstrategie is gegeven in tabel 5.

■ TOT SLOT

De kennis van de beschreven fysische principes helpt bij het ontwerpen van het natuurlijke ventilatiedeel van een gebouw met hybride ventilatie. Doorgerekende situaties zijn echter altijd momentopnamen. Er moet rekening gehouden worden met het gevarieerde en dynamische karakter van de samenwerking

tussen winddruk en thermische trek. Elke verandering van het drukprofiel op de schil van het gebouw heeft effect op het verloop van de natuurlijke ventilatie. De hier geschetste berekeningsprincipes moeten dan ook vooral als vuistregels gezien worden die het ontwerpproces ondersteunen. Voor een goede beoordeling

van het gebouw is een gedetailleerde berekening met een gebouwsimulatieprogramma noodzakelijk. De regelstrategie van het gehele ventilatiesysteem moet dan ook rekening houden met de situatie dat het drukprofiel leidt tot een ongewenste stromingsrichting van de natuurlijke ventilatielucht.

Nachtventilatie actief als:	
Temperatuur afgelopen dag	>23°C
Luchttemperatuur nabij plafond	>22°C
Verschil tussen binnen- en buitentemperatuur	>2°C
Relatieve vochtigheid buiten	<70%
Windsnelheid buiten	<7 m/s

-Tabel 5- Eenvoudige regelstrategie voor nachtventilatie

■ FORMULES UIT VORIGE ARTIKEL

$$\Delta\rho = (T_{\text{bi}} - T_{\text{bu}}) \cdot \rho_0 / (T_{\text{bu}} + 273) \quad [2]$$

Waarin:

$\Delta\rho$: Verschil in dichtheid warmte lucht en koude lucht (benadering) [kg/m³]
 T_{bi} : Binnentemperatuur [°C]
 T_{bu} : Buitentemperatuur [°C]
 ρ_0 : Referentie dichtheid van lucht (1,2) [kg/m³]

$$\Delta P = (h_n - h_i) \cdot (\rho_{\text{koud}} - \rho_{\text{warm}}) \cdot g \quad [3]$$

Waarin:

ΔP : Drukverschil over ventilatieopening op hi [Pa]
 h_n : Hoogte van het neutrale punt [m]
 h_i : Hoogte van de ventilatie-opening [m]
 ρ_{koud} : Dichtheid van de koude lucht [kg/m³]
 ρ_{warm} : Dichtheid van de warme lucht [kg/m³]
 g : Zwaartekrachtversnelling (9,81) [m/s²]

$$P_w = 0,5 \cdot \rho \cdot v_w^2 \cdot C_p \quad [4]$$

Waarin

P_w : Winddruk [Pa]
 $\rho_{\text{t,warm}}$: Dichtheid van lucht [kg/m³]
 v_w : windsnelheid [m/s]
 C_p : vormfactor [-]

$$A = |q| / Cd \cdot \sqrt{2|\Delta P|} / \rho \quad [5]$$

Waarin:

q : De volumestroom (absolute waarde) [m³/s]
 C_d : Drukverliesfactor [-]
 A : Oppervlakte van de opening [m²]
 ΔP : Drukverschil over de opening (absolute waarde) [Pa]
 ρ : Soortelijke massa lucht [kg/m³]