



Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf

Berekening van de luchtdrukverschillen op gebouwen toegepast op ventilatie en luchtinfiltratie

Christophe Delmotte

01 oktober 2021

Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf - WTCB

Dit document is beschikbaar op www.wtcb.be

Versie 1 – 9 juli 2015

Versie 2 – 1 oktober 2021 (aanpassing van de statistieken voor de windsnelheid)

Inhoud

1	INLEIDING	2
2	LUCHTDRIJKVERSCHILLEN DOOR WINDBELASTING	2
2.1	Algemene formule.....	2
2.2	Windsnelheid.....	3
2.2.1	Variatie van de windsnelheid	3
2.2.2	Gemeten windsnelheden	4
2.2.3	Beaufortschaal.....	5
2.3	De drukcoëfficiënt	5
2.4	Luchtdrukverschil op een gevel.....	7
2.5	Voorbeeld van berekening	8
3	HYDROSTATISCH DRUKVERSCHIL	10
3.1	Algemene formule.....	10
3.2	Drukverdeling	11
3.3	Rekenvoorbeeld	12
3.4	Uitwerking van de formules	13
3.4.1	Luchtdichte kamer met één opening	13
3.4.2	Luchtdicht lokaal met één opening onderaan en één opening bovenaan.....	15
4	COMBINATIE VAN LUCHTDRIJKVERSCHILLEN	18
4.1	Algemene formule.....	18
4.2	Rekenvoorbeeld	18
5	REFERENTIES.....	20

1 Inleiding

Dit document behandelt de luchtdrukverschillen die gebouwen ondergaan door de windbelasting, door temperatuurverschillen tussen de buiten- en binnenomgeving en door de combinatie van beide effecten. Het richt zich voornamelijk tot de vaklui die zich beroepsmatig met ventilatie en de luchtdichtheidsmeting van gebouwen bezighouden.

De belastingen waarmee rekening moet worden gehouden bij de berekening van een constructie door de windwerking komen in dit document niet aan bod.

De begrippen overdruk en onderdruk zijn relatief en hangen af van het standpunt van de waarnemer. In dit geval wordt afgesproken dat het gebouw van buitenaf wordt waargenomen. Tenzij anders vermeld, betekent 'overdruk' dat de druk buiten het gebouw hoger is dan binnen. 'Onderdruk' betekent dat de druk buiten het gebouw lager is dan binnen.

2 Luchtdrukverschillen door windbelasting

2.1 Algemene formule

De winddruk op een punt van de gebouwschil wordt berekend door middel van de volgende formule:

$$p_w = c_p \frac{\rho v^2}{2} \text{ [Pa]} \quad (1)$$

met:

- p_w , de winddruk [Pa]
- c_p , de drukcoëfficiënt [-]
- ρ , de volumemassa van lucht [kg/m³]
- v , de windsnelheid ter hoogte van het beschouwde punt [m/s]

Tabel 1 - Volumemassa van lucht bij normale atmosferische druk van 101325 Pa [2]

Temperatuur [°C]	Volumemassa [kg/m ³]		
	Droge lucht (relatieve vochtigheid 0 %)	Vochtige lucht (relatieve vochtigheid 50 %)	Verzadigde lucht (relatieve vochtigheid 100 %)
-20	1.396	1.395	1.395
-15	1.368	1.368	1.367
-10	1.342	1.342	1.341
-5	1.317	1.316	1.315
0	1.293	1.291	1.290
5	1.270	1.268	1.266
10	1.247	1.244	1.241
15	1.225	1.222	1.218
20	1.204	1.199	1.194
25	1.184	1.177	1.170
30	1.165	1.155	1.146
35	1.146	1.134	1.022
40	1.127	1.112	1.096
45	1.110	1.090	1.070
50	1.092	1.067	1.042

2.2 Windsnelheid

2.2.1 Variatie van de windsnelheid

Wind is algemeen een zeer veranderlijk verschijnsel, zowel wat de windrichting als de windsnelheid betreft. Bij gegeven atmosferische omstandigheden neemt de windsnelheid toe met toenemende hoogte boven de grond. Hoe ruwer het terreinoppervlak (bebouwing, bebossing, enz.), hoe meer de luchtstroming wordt afgeremd. De windsnelheid neemt dus af naarmate de oppervlakteruwheid van het terrein toeneemt. Afhankelijk van de oppervlakteruwheid van het terrein onderscheiden we vijf terreincategorieën in volgorde van toenemende ruwheid (Tabel 2). In de meteorologie wordt de windsnelheid gemeten op 10 m hoogte boven een terrein van ruwheids categorie II.

Met behulp van de volgende¹ vereenvoudigde formule (NBN EN 1991-1-4 [7]) kan de windsnelheid op een bepaalde hoogte z worden geschat:

Voor $z_{\min} \leq z \leq 200$ m

$$v_m(z) = v_b k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \text{ [m/s]} \quad (2)$$

Voor $z \leq z_{\min}$

$$v_m(z) = v_m(z_{\min}) \text{ [m/s]} \quad (3)$$

met

- Tabel 2 z_{\min} , de minimumhoogte (zie Tabel 2) [m]
- v_b , de referentiewindsnelheid gemeten op een hoogte van 10 m boven een terrein dat behoort tot de ruwheids categorie II [m/s]
- z , de hoogte boven het terrein [m]
- k_r , de terreinfactor (zie Tabel 2) [-]
- z_0 , de ruwheidslengte (zie Tabel 2) [m]

Tabel 2 - Terreincategorieën en -parameters (NBN EN 1991-1-4 [7])

Terreincategorieën		z_0 [m]	z_{\min} [m]	k_r [-]
0	Zee of kustzone blootgesteld aan de wind	0,003	1	0,1560
I	Meren of platte, horizontale zone met verwaarloosbare vegetatie en vrij van alle obstakels	0,01	1	0,1698
II	Zone met lage vegetatie zoals gras, met of zonder enkele, geïsoleerde obstakels (bomen, gebouwen) die minstens 20 keer hun hoogte van elkaar gescheiden zijn	0,05	2	0,1900
III	Zone met een gelijkmatige begroeiing of met gebouwen, of met geïsoleerde obstakels die maximaal 20 keer hun hoogte van elkaar gescheiden zijn (bijvoorbeeld dorpen, bebouwde kommen, beboste gebieden)	0,3	5	0,2154
IV	Zone waarvan minimaal 15 % van de oppervlakte bedekt is met gebouwen waarvan de gemiddelde hoogte hoger is dan 15 m.	1,0	10	0,2343

¹ Verscheidene andere modellen zijn beschikbaar in de literatuur.

Voorbeeld

Volgens de vereenvoudigde formule is de windsnelheid op een hoogte van 8 m boven een terrein van ruwheids categorie III in een gebied waar de referentiesnelheid 6 m/s bedraagt, gelijk aan :

$$v_m(8) = v_b k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 6 \cdot 0.2154 \ln\left(\frac{8}{0.3}\right) = 4.2 \text{ [m/s]}$$

NOTA: Deze formule is niet van toepassing op steden met hoge gebouwen en smalle straten. In dat geval moet er rekening worden gehouden met het canyoneffect dat de windsnelheid sterk kan doen afnemen [10].

2.2.2 Gemeten windsnelheden

In België is de overheersende windrichting het zuidwesten. De gemiddelde windsnelheid van 6 tot 7 m/s aan de kust vermindert naar 2 tot 4 m/s in de valleien van Hoog-België en de Gaume. Gemiddeld om de twee jaar bereikt of overschrijdt de maximale windpiek 35 m/s aan de kust en 23 tot 30 m/s in het binnenland. De vermindering van de windsnelheid in het binnenland is te wijten aan de wrijving met de grond, die tot grotere turbulentie leidt [4].

Terwijl pieksnelheden belangrijk zijn voor het bestuderen van de invloed van de wind op constructies, zijn gemiddelde windsnelheden meer geschikt voor ventilatie- en luchtinfiltratieproblemen.

Bij wijze van voorbeeld geeft Tabel 3 de gemiddelde maandelijkse windsnelheden weer van verschillende gemeenten in België. Deze gemiddelde windsnelheden werden tussen 1991 en 2020 gemeten op een hoogte van 10 m boven de grond.

Tabel 3 - Gemiddelde maandelijkse windsnelheden (m/s) geregistreerd tussen 1991 en 2020 (KMI – Klimaatstatistieken van de Belgische gemeenten [3])

Gemeente	Maand											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. Koksijde	5,4	5,2	5,1	4,5	4,5	4,1	3,9	3,9	4,0	4,4	4,8	5,2
2. Middelkerke	5,8	5,6	5,4	4,9	4,9	4,6	4,5	4,4	4,6	4,9	5,2	5,6
3. Deurne	4,2	4,0	3,9	3,3	3,3	3,3	3,2	3,0	3,0	3,4	3,5	4,0
4. Kleine Brogel	3,7	3,5	3,4	2,9	2,9	2,8	2,7	2,5	2,6	2,9	3,0	3,5
5. Zaventem	4,8	4,6	4,3	3,6	3,4	3,3	3,3	3,2	3,3	3,8	4,1	4,6
6. Beauvechain	4,7	4,5	4,2	3,5	3,3	3,1	3,1	3,1	3,3	3,8	4,1	4,6
7. Chièvres	4,7	4,5	4,2	3,6	3,4	3,2	3,1	3,0	3,2	3,7	4,1	4,5
8. Gosselies	4,8	4,6	4,3	3,8	3,6	3,5	3,5	3,3	3,5	4,0	4,2	4,7
9. Florennes	4,5	4,4	4,2	3,5	3,3	3,2	3,1	2,9	3,2	3,7	3,9	4,5
10. Bierset	5,0	4,8	4,5	3,9	3,7	3,6	3,6	3,5	3,7	4,2	4,5	4,9
11. Elsenborn	3,8	3,6	3,4	3,0	3,0	2,7	2,6	2,4	2,7	3,2	3,3	3,7
12. Saint-Hubert	4,2	4,1	4,0	3,7	3,5	3,3	3,1	3,0	3,3	3,8	3,8	4,1



Figuur 1 - Ligging van de verschillende gemeenten zoals voorgesteld in Tabel 3

2.2.3 Beaufortschaal

De Beaufortschaal is een empirische maat met 13 graden (van 0 tot 12) die gebruikt wordt om de windkracht te meten (zie

Tabel 4)

2.3 De drukcoëfficiënt

De drukcoëfficiënt c_p is een parameter die afhankelijk is van de vorm van het gebouw in kwestie, de windrichting en de invloed van nabijgelegen gebouwen, plantengroei of terreinkenmerken.

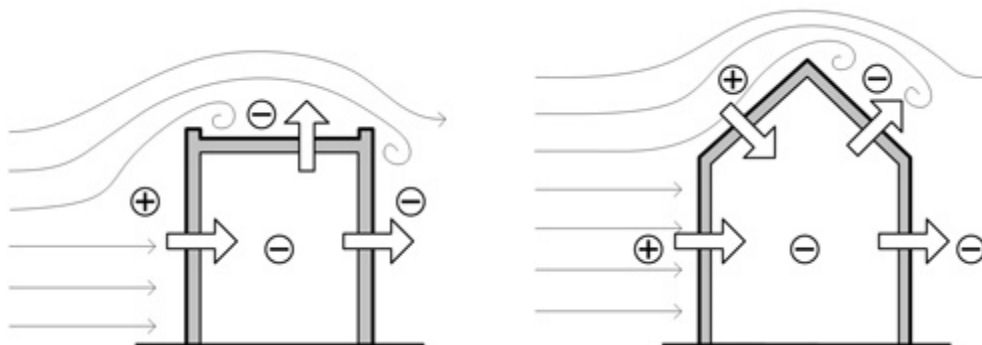
Een nauwkeurige bepaling van deze coëfficiënt gebeurt door metingen op ware grootte ter plaatse, door windtunnelmodellen of door numerieke simulaties met behulp van gespecialiseerde software. Voor ventilatie- of luchtinfiltratieberekeningen in onbeschermd rechte hoekige geïsoleerde gebouwen kunnen de in de literatuur beschikbare waarden redelijkerwijs worden gebruikt. Een voorbeeld wordt gegeven in Tabel 5.

Over het algemeen kan worden gesteld dat de gevels en dakhellingen die aan de wind zijn blootgesteld (helling groter dan ongeveer 20°) overdruk ondervinden (positieve drukcoëfficiënt), terwijl gevels aan de windzijde en platte, licht hellende daken (helling kleiner dan ongeveer 20°) onderdruk ondervinden (negatieve drukcoëfficiënt) (Figuur 2).

Tabel 4 - Beaufortschaal (uittreksel) [6]

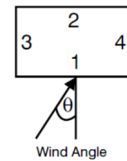
Beaufortschaal	Gebruikte term	Windsnelheid * [m/s]	Kenmerken boven land
0	Windstil	0-0,2	Windstil, rook stijgt recht omhoog
1	Zeer zwakke wind	0,3 – 1,5	Windrichting bepaald via rookpluim, de windvaan reageert niet
2	Zwakke wind	1,6 – 3,3	De wind is merkbaar in het gezicht; bladeren ritselen; windvane bewegen
3	Matige wind	3.4 - 5.4	Bladeren en twijgen zijn voortdurend in beweging; vlaggen zijn gestrekt
4	Matige wind	5,5– 7,9	Stof en papier dwarrelen op; kleine takken bewegen
5	Vrij krachtige wind	8.0 – 10.7	Kleine bebladerde takken zwaaien; vorming van gekuifde golven op binnenwateren
6	Krachtige wind	10.8 – 13.8	Grote takken zijn in beweging. De wind fluit in de telefoondraden; paraplu's gebruiken wordt moeilijk
7	Harde wind	13.9 – 17.1	Gehele bomen bewegen; tegen de wind in gaan wordt vrij moeilijk
8	Stormachtige wind	17.2 – 20.7	Twijgen en takken breken af, tegen de wind in gaan wordt vrijwel onmogelijk
9	Storm	20.8 – 24.4	Veroorzaakt lichte schade aan gebouwen (schoorstenen en dakpannen worden afgerukt)
10	Zware storm	24.5 – 28.4	Komt op het land zelden voor; bomen worden ontworteld; er is aanzienlijke schade aan gebouwen
11	Zeer Zware storm	28.5 – 32.6	Komt op het land zelden voor; uitgebreide schade
12	Orkaan	32,7 en meer	-

* Windsnelheid gelijk aan de standaardhoogte van 10 meter boven een vlak en open terrein



Figuur 2 - Voorbeelden van zones in overdruk en onderdruk als gevolg van de windbelasting op een gebouw

Tabel 5 – Drukcoëfficiënten voor een laag gebouw (maximum 3 verdiepingen) met een lengte/breedteverhouding van 2:1 en zonder windbescherming [1]



		Windrichting							
		0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Gevel 1		0,5	0,25	-0,5	-0,8	-0,7	-0,8	-0,5	0,25
Gevel 2		-0,7	-0,8	-0,5	0,25	0,5	0,25	-0,5	-0,8
Gevel 3		-0,9	0,2	0,6	0,2	-0,9	-0,6	-0,35	-0,6
Gevel 4		-0,9	-0,6	-0,35	-0,6	-0,9	0,2	0,6	0,2
Dak (helling <10°)	Vooraan	-0,7	-0,7	-0,8	-0,7	-0,7	-0,7	-0,8	-0,7
	Achteraan	-0,7	-0,7	-0,8	-0,7	-0,7	-0,7	-0,8	-0,7
Gemiddelde		-0,7	-0,7	-0,8	-0,7	-0,7	-0,7	-0,8	-0,7
Dak (helling 11-30°)	Vooraan	-0,7	-0,7	-0,7	-0,6	-0,5	-0,6	-0,7	-0,7
	Achteraan	-0,5	-0,6	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,6
Gemiddelde		-0,6	-0,65	-0,7	-0,65	-0,6	-0,65	-0,7	-0,65
Dak (helling > 30°)	Vooraan	0,25	0	-0,6	-0,9	-0,8	-0,9	-0,6	0
	Achteraan	-0,8	-0,9	-0,6	0	0,25	0	-0,6	-0,9

NOTA: Deze vereenvoudigde drukcoëfficiënten zijn van toepassing op luchtinfiltratie- en natuurlijke ventilatieproblemen. Voor andere toepassingen, zoals de bevestiging van dakpannen op hellende daken, kunnen nauwkeurigere coëfficiënten vereist zijn. [9]

2.4 Luchtdrukverschil op een gevel

Naast de druk op de buitenmuren, verandert de wind ook de druk binnenin de gebouwen. Deze verandering is het resultaat van het noodzakelijke evenwicht tussen de luchtinfiltratie door de gevels en dakhellingen die onder overdruk staan enerzijds, en de luchtexfiltratie door de gevels en dakhellingen die onder onderdruk staan anderzijds.

Laten we bijvoorbeeld aannemen dat een gebouw wordt blootgesteld aan de windbelasting met een overdruk van 16 Pa op de voorgevel en een onderdruk van -22 Pa op de achtergevel (cfr. de berekening van deze waarden in het voorbeeld in de volgende paragraaf; alle andere buitenmuren worden verondersteld volkomen luchtdicht te zijn om het probleem te vereenvoudigen). Indien deze twee gevels dezelfde luchtdoorlatendheid hebben, is het duidelijk dat ze moeten worden onderworpen aan een drukverschil van gelijke waarde maar van tegengesteld teken om hetzelfde luchtdebiet te laten doorstromen, het ene naar de binnenkant van het gebouw en het andere naar de buitenkant. Het evenwichtsdrukverschil ten gevolge van de windbelasting zal gelijk zijn aan 3 Pa. De voorgevel zal dus een drukverschil ondervinden van 19 Pa (= 16 + 3) en de achtergevel een drukverschil van -19 Pa (= -22 + 3).

Het drukverschil Δp_w over de gevels en dakhellingen van een gebouw is dus afhankelijk van de winddruk p_w en het evenwichtsdrukverschil Δp_l . Dit laatste wordt beïnvloed door de kenmerken en de plaats van de spleten en openingen in de gebouwschil.

$$\Delta p_w = p_w + \Delta p_l \text{ [Pa]} \quad (4)$$

Als de binnenkant van het gebouw van tussenwanden is voorzien, kan het evenwichtsdrukverschil van ruimte tot ruimte verschillen en is het ook afhankelijk van de luchtdoorlatendheid van de binnenmuren. In dat geval dragen de binnenwanden een deel van de winddruk.

In het slechtste geval (geen binnenmuren of alle binnendeuren staan open) wordt de winddruk alleen gedragen door de gevels en de dakhellingen. Met een goede luchtdichtheid van de binnenmuren (bv. in een appartementsgebouw) kan de druk die de gevels en dakhellingen moeten dragen dus worden beperkt. Bijgevolg kan het luchtinfiltratiedebiet worden beperkt.

2.5 Voorbeeld van berekening

Neem nu een vrijstaande woning in voorstedelijk gebied (terreincategorie III), zoals weergegeven in Figuur 3. De windsnelheid bedraagt 4 m/s. De wind waait loodrecht op de voorgevel. Zowel de binnen- als de buitenluchttemperatuur bedraagt 20°C, met een relatieve vochtigheid van 50%. Er zijn geen wanden en vloeren in het huis.

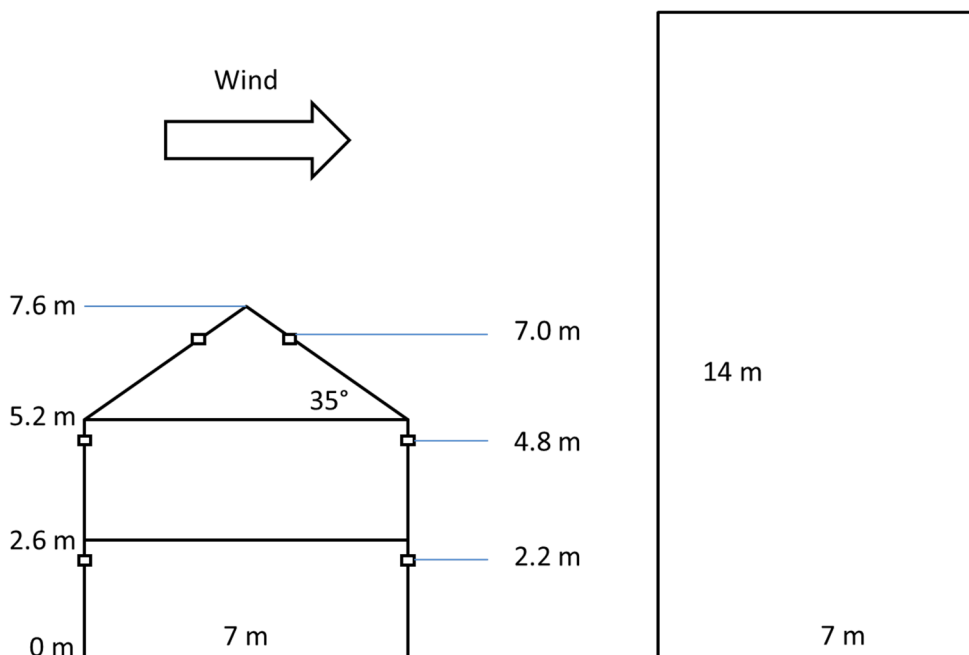
De windsnelheid op halve hoogte van de gevels (2,6 m) kan worden berekend met behulp van de formules (3) en (2). Aangezien deze hoogte lager is dan de minimumhoogte z_{\min} (5 m) voor terreincategorie III, wordt de berekening voor deze minimumhoogte uitgevoerd.

$$v_m(2.6) = v_m(5) = 4 \cdot 0.2154 \ln\left(\frac{5}{0.3}\right) = 2.4 \text{ [m/s]}$$

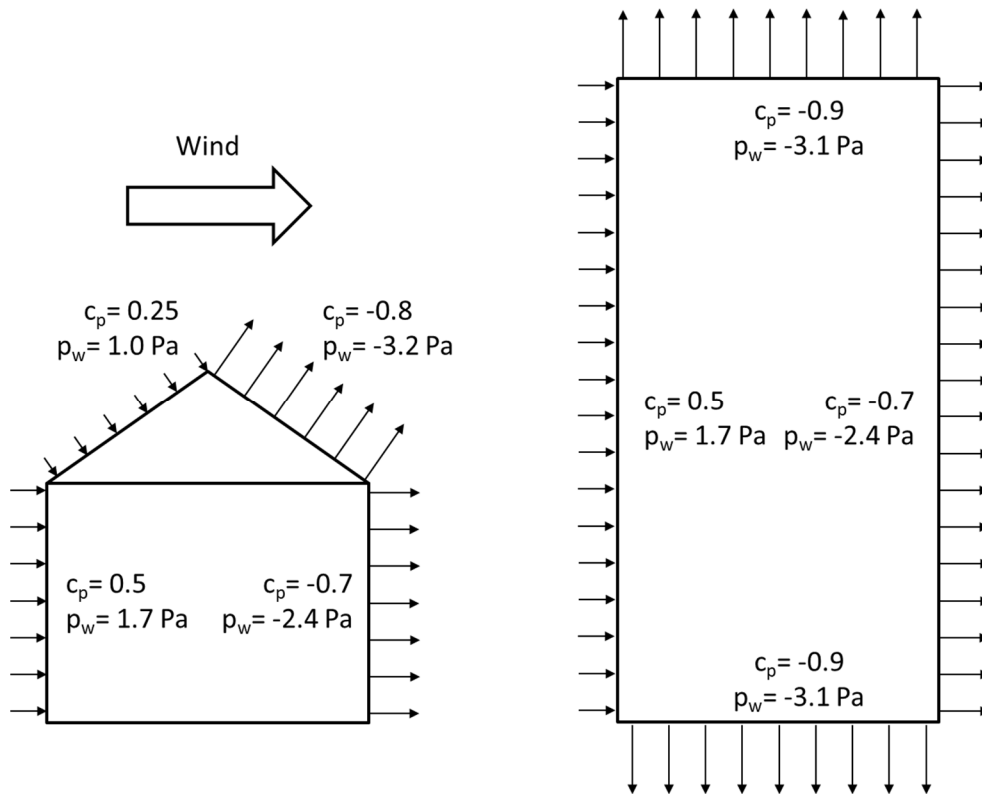
De windsnelheid op halve hoogte van de dakhellingen (6,4 m) kan worden berekend met behulp van formule (2)

$$v_m(6.4) = 4 \cdot 0.2154 \ln\left(\frac{6.2}{0.3}\right) = 2.6 \text{ [m/s]}$$

De winddruk op de gevels en dakhellingen kan worden berekend met behulp van formule (1), door de drukcoëfficiënten van Tabel 5 toe te passen.



Figuur 3 - Doorsnede en bovenaanzicht van het huis in het rekenvoorbeeld



Figuur 4 - Overdruk en onderdruk veroorzaakt door de wind op een gebouw

	Drukcoëfficiënt c_p [-]	Winddruk p_w [Pa]
Voorgevel	0,5	1,7
Achtergevel	-0,7	-2,4
Zijgevel	-0,9	-3,1
Dak vooraan	0,25	1,0
Dak achteraan	-0,8	-3,2

Indien men ervan uitgaat dat de gevels en dakhellingen van de woning perfect luchtdicht zijn en dat het huis 6 identieke ventilatieopeningen heeft (Figuur 3), dan is het evenwichtsdrukverschil Δp_i gelijk aan 0,6 Pa. De verschillende ventilatieopeningen ondergaan dan de volgende drukverschillen Δp_w :

Ventilatieopening	Drukverschil door de windbelasting Δp_w	Ventilatieopening	Drukverschil door de windbelasting Δp_w
Dakhelling vooraan	$1 + 0.6 = 1.6$	Dakhelling achteraan	$-3,2 + 0.6 = -2.6$
Voorgevel (hoog)	$1,7 + 0.6 = 2.3$	Achtergevel (hoog)	$-2,4 + 0.6 = -1.8$
Voorgevel (laag)	$1,7 + 0.6 = 2.3$	Achtergevel (laag)	$-2,4 + 0.6 = -1.8$

NOTA: Het principe van de berekening van het evenwichtsdrukverschil bestaat erin om de som van de inkomende en uitgaande luchtdebieten van het gebouw op te heffen door rekening te houden met de

kenmerken van de verschillende openingen. Daarvoor beschouwt u het debiet door elke opening in functie van de evenwichtsdruk en deze laatste laat u door iteratie variëren tot het gewenste resultaat wordt bekomen (opheffing van de som van de luchtdebieten in dit geval).

3 Hydrostatisch drukverschil

3.1 Algemene formule

Het totale hydrostatische drukverschil $\Delta p_{g,tot}$ wordt bekomen door het temperatuurverschil tussen de buiten- en de binnenkant van een gebouw, en wordt uitgedrukt door de volgende relatie:

$$\Delta p_{g,tot} = (\rho_e - \rho_i) g h \quad (5)$$

Wat als volgt kan worden benaderd:

$$\Delta p_{g,tot} \approx \rho_0 T_0 \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_i} \right) g h \quad (6)$$

met:

- ρ_e , de volumemassa van de buitenlucht [kg/m^3]
- ρ_i , de volumemassa van de binnenlucht [kg/m^3]
- ρ_0 , de volumemassa van de lucht bij 273,15 K = 1.291 [kg/m^3]
- g , de valversnelling ($g = 9,81 \text{ m}/\text{s}^2$)
- h , het hoogteverschil tussen de laagste en de hoogste opening in het gebouw [m].
- T_i , de binnenluchttemperatuur [K] = θ_i [$^{\circ}\text{C}$] + 273.15
- T_e , de buitenluchttemperatuur [K] = θ_e [$^{\circ}\text{C}$] + 273.15
- T_0 , de referentietemperatuur gelijk aan 273.15 [K]

Uit de formule (5) volgt dat het totale hydrostatische drukverschil toeneemt als het hoogteverschil h tussen de bovenste en onderste gebouwopeningen toeneemt en het temperatuurverschil $T_i - T_e$ toeneemt.

Voorbeeld

Laten we het totale hydrostatische drukverschil berekenen met $\theta_e = 0^{\circ}\text{C}$ ($T_e = 273.15 \text{ K}$; $\rho_e = 1.291 \text{ kg}/\text{m}^3$) en $\theta_i = 20^{\circ}\text{C}$ ($T_i = 293.15 \text{ K}$; $\rho_i = 1.199 \text{ kg}/\text{m}^3$) voor verschillende situaties, door gebruik te maken van de formule (5).

	Hoogteverschil [m]	Totaal hydrostatisch drukverschil $\Delta p_{g,tot}$ [Pa]
Normaal raam	1	0,90
Eengezinswoning	5	4,5
Hoogbouw	50	45

3.2 Drukverdeling

Als gevolg van het hydrostatische drukverschil komt er koude lucht binnen door de openingen en spleten in het onderste gedeelte van het gebouw, en ontsnapt er warme lucht door de openingen en spleten in het bovenste gedeelte van het gebouw als dat gebouw warmer is dan de buitenomgeving.

In deze omstandigheden staat het onderste gedeelte van het gebouw in feite onder overdruk, terwijl het bovenste gedeelte onder onderdruk staat. In Figuur 5 A wordt het drukverschil waaraan de gevelelementen worden blootgesteld, weergegeven door het verschil tussen de druklijn van de buitenlucht (p_e) en die voor de binnenlucht (p_i). De hoogte waarop dit drukverschil nul is, is het neutrale drukvlak (NDV).

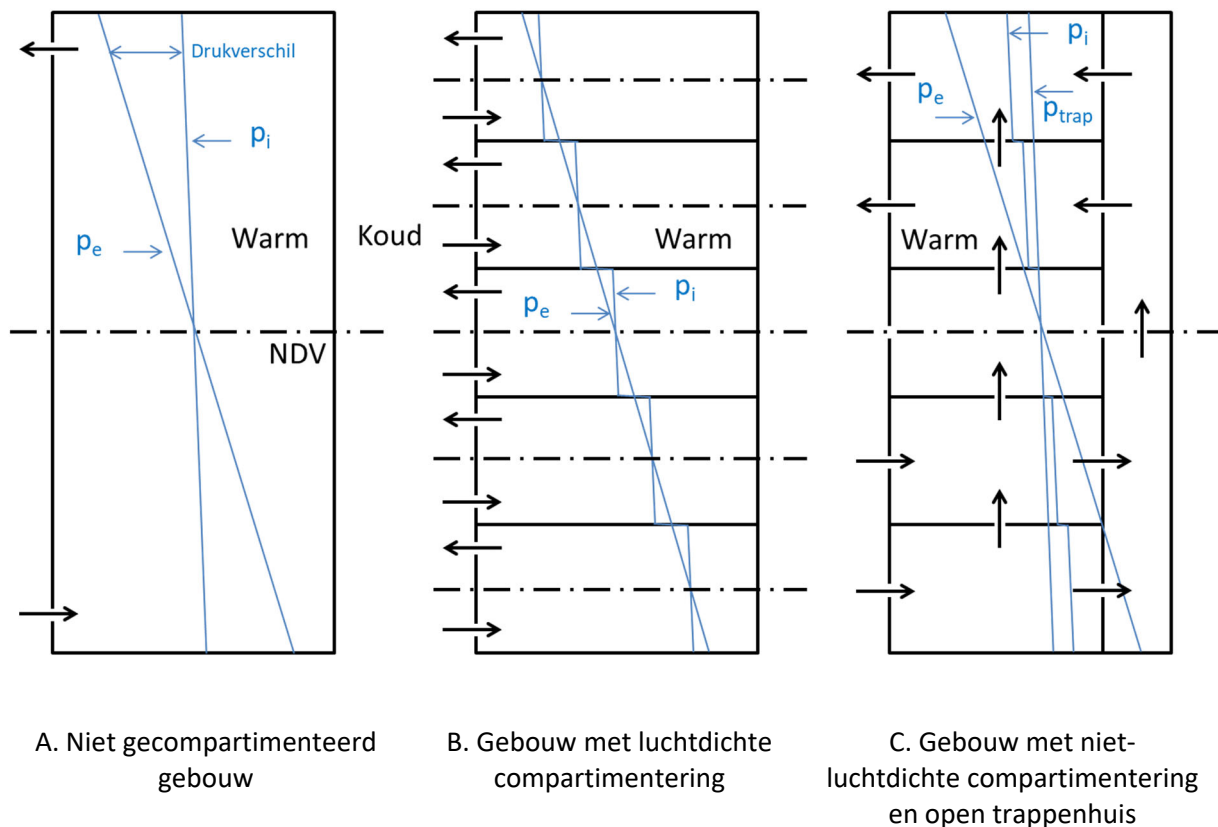
In het geval van een gebouw dat over de hoogte is gecompartmenteerd (met luchtdicht van elkaar afgescheiden verdiepingen), kan het hydrostatische drukverschil zich niet over de gehele hoogte van het gebouw ontwikkelen en in dit geval moet de formule (5) verdieping per verdieping worden toegepast. In dit geval heeft het gebouw verschillende neutrale drukvlakken. Het drukverschil tussen de verschillende verdiepingen wordt weergegeven door de discontinuïteiten in de druklijn van de binnenlucht (p_i) (Figuur 5 B).

Echte gebouwen zijn noch volledig open over hun gehele hoogte, noch perfect luchtdicht tussen de verdiepingen. Luchtcirculatie tussen verdiepingen verloopt via trappenhuisen, technische kokers of andere liftschachten. Figuur 5 C staat voor een verwarmd gebouw met een gelijkmatige verdeling van openingen in de buitengevels, tussen de kamers op de verdiepingen en naar het trappenhuis toe. Het drukverschil tussen de kamers op de verschillende verdiepingen en het trappenhuis wordt weergegeven door het verschil tussen de druklijn van de binnenlucht (p_i) en die van het trappenhuis (p_{trap}). Aangezien een deel van het hydrostatische drukverschil wordt opgenomen door de scheidingswanden van het trappenhuis, is het drukverschil dat wordt ondervonden door de gevels van de kamers bijgevolg kleiner dan wanneer er geen scheidingswanden zouden zijn.

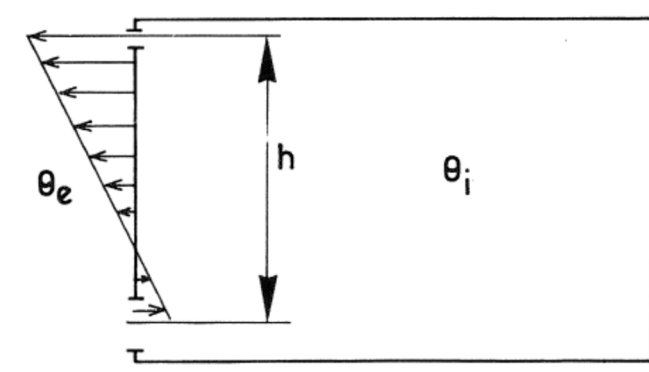
Dankzij een goede luchtdichtheid tussen de kamers op de verschillende verdiepingen en naar de trappenhuisen toe kan het hydrostatische drukverschil op de gevels van deze kamers dus worden beperkt, en bijgevolg kan het luchtinfiltratiedebiet worden verminderd.

Wanneer de openingen, lekken of spleten in de gevels gelijkmatig zijn verdeeld over de hoogte van een gebouw, dan bevindt het neutrale drukvlak zich op halve hoogte ervan (Figuur 5 A). De onderdruk bij de hoogste openingen (in het geval van een verwarmd gebouw) is dus gelijk aan de overdruk bij de laagste openingen. De absolute waarde van deze drukverschillen is gelijk aan de helft van het totale hydrostatische drukverschil en hun som is gelijk aan het totale hydrostatische drukverschil.

Wanneer daarentegen de openingen, lekken of scheuren aan de onderzijde breder zijn dan die aan de bovenzijde, is er een neerwaartse verplaatsing van het neutrale drukvlak (Figuur 6). De onderdruk op de hogere openingen (in het geval van een verwarmd gebouw) is dus groter dan de overdruk op de lagere openingen. De som van de absolute waarden van deze drukverschillen blijft evenwel steeds gelijk aan het totale hydrostatische drukverschil.



Figuur 5 – Invloed van de compartimentering van gebouwen op de drukverdeling



Figuur 6 - Verschuiving van het neutrale drukvlak naar de breedste opening

3.3 Rekenvoorbeeld

We hernemen het vorige voorbeeld nog eens (Figuur 3). De buitentemperatuur θ_e is gelijk aan 0°C ($\rho_e = 1,291 \text{ kg/m}^3$) en de binnentemperatuur θ_i is gelijk aan 20°C ($\theta_i = 1,199 \text{ kg/m}^3$). Het hoogteverschil tussen de laagste en de hoogste ventilatieopeningen in het gebouw is gelijk aan 4,8 m ($7,0 - 2,2$).

Het totale hydrostatische drukverschil kan worden berekend met behulp van de formule (5):

$$\Delta p_{g,tot} = (1.291 - 1.199) 9.81 \cdot 4.8 = 4.3 \text{ [Pa]}$$

De verschillende ventilatieopeningen ondervinden dan de volgende hydrostatische drukverschillen Δp_g :

Ventilatieopening	Hydrostatisch drukverschil Δp_g [Pa]	Ventilatieopening	Hydrostatisch drukverschil Δp_g [Pa]
Dakhelling vooraan	-2,0	Dakhelling achteraan	-2,0
Voorgevel (hoog)	0,0	Achtergevel (hoog)	0,0
Voorgevel (laag)	2,3	Achtergevel (laag)	2,3

De openingen in het bovenste deel van de gevels, bijna op halve hoogte van de muur, bevinden zich ongeveer ter hoogte van het neutrale drukvlak en ondervinden dus vrijwel geen drukverschil.

NOTA: Het principe van de berekening van het hydrostatisch drukverschil voor elke opening bestaat erin om de som van de inkomende en uitgaande luchtdebieten van het gebouw op te heffen door rekening te houden met de kenmerken van de verschillende openingen. Daarvoor beschouwt u het debiet door elke opening in functie van het hydrostatische drukverschil over die opening, waarbij dit drukverschil wordt uitgedrukt in functie van het hydrostatische drukverschil op een bepaalde hoogte, en dit laatste laat u door iteratie variëren tot het gewenste resultaat wordt bekomen (opheffing van de som van de luchtdebieten in dit geval).

3.4 Uitwerking van de formules

3.4.1 Luchtdichte kamer met één opening

We nemen een volledig luchtdichte kamer, met uitzondering van een opening helemaal onderaan, waarlangs deze kamer in verbinding staat met de buitenomgeving (Figuur 7).

Ter hoogte van de opening (hoogte boven het terrein $z = 0$), is de absolute luchtdruk buiten p_e gelijk aan de absolute luchtdruk binnen p_i :

$$p_{e0} = p_{i0} \text{ [Pa]} \quad (7)$$

Op een willekeurige hoogte z (m), zal de druk buiten gelijk zijn aan:

$$p_{ez} = p_{e0} - \rho_e g z \text{ [Pa]} \quad (8)$$

met:

- ρ_e , de volumemassa van de buitenlucht [kg/m^3]
- g , de valversnelling ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$)

Op eenzelfde willekeurige hoogte z (m), zal de druk binnen gelijk zijn aan:

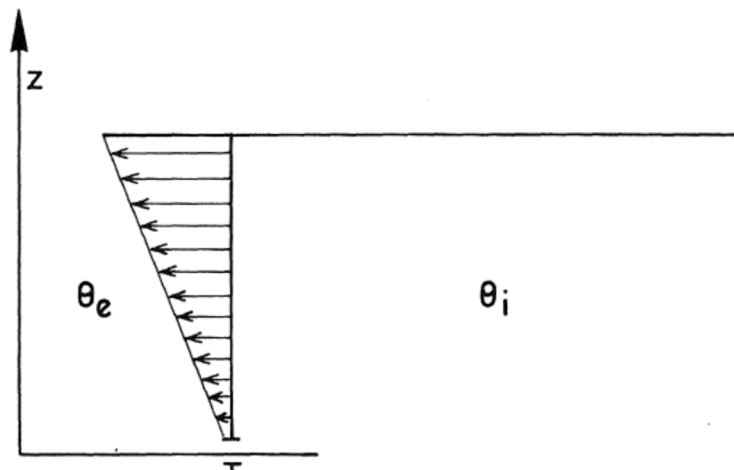
$$p_{iz} = p_{i0} - \rho_i g z \text{ [Pa]} \quad (9)$$

met:

- ρ_i , de volumemassa van de binnenlucht [kg/m^3]

Het drukverschil tussen de buitenomgeving en de binnenomgeving op een hoogte z is dus:

$$\Delta p_z = p_{ez} - p_{iz} = (p_{e0} - \rho_e g z) - (p_{i0} - \rho_i g z) \text{ [Pa]} \quad (10)$$



Legende:

θ_e buitentemperatuur [°C]

θ_i binnentemperatuur [°C]

Driehoek met pijlen: variatie van $p_{iz} - p_{ez}$

met p_{iz} binnenluchtdruk op de hoogte z [Pa]

p_{ez} buitenluchtdruk op de hoogte z [Pa]

Figuur 7 - Ontwikkeling van de hydrostatische druk in een kamer die volledig luchtdicht is met uitzondering van een opening onderaan

en, aangezien $p_{i0} = p_{e0}$ heeft men:

$$\Delta p_z = (\rho_i - \rho_e) g z \text{ [Pa]} \quad (11)$$

Laten we aannemen dat de buitentemperatuur θ_e lager is dan de binnentemperatuur θ_i van de kamer (en dus is $\rho_e > \rho_i$).

In dit geval kan men afleiden dat:

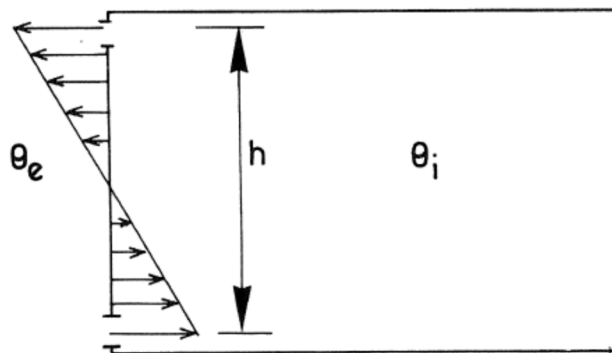
1. wanneer een kamer onderaan één enkele opening heeft, staat ze onder overdruk ten opzichte van de buitenomgeving;
2. deze overdruk verandert lineair met de hoogte volgens formule (10). De verandering van $p_{ez} - p_{iz}$ wordt weergegeven in Figuur 7 door de driehoek met de top in de opening van de kamer;
3. indien er in de bovenste zone van de kamer een kleine opening (voeg of spleet) zou worden aangebracht, dan zou men kunnen vaststellen dat de warme lucht uit de kamer ontsnapt als gevolg van het drukverschil.

Wanneer dezelfde redenering wordt toegepast op een luchtdichte kamer met één opening bovenaan, dan kan men vaststellen:

1. dat heel de kamer in onderdruk komt te staan t.o.v. de buitenomgeving;
2. dat deze onderdruk lineair verandert met de afstand onder de opening;
3. dat indien er onderaan de kamer een kleine opening zou worden gemaakt, er door deze opening koude lucht zou binnenstromen als gevolg van de onderdruk.

3.4.2 Luchtdicht lokaal met één opening onderaan en één opening bovenaan

Laten we een volledig luchtdichte kamer nemen, met uitzondering van één opening helemaal onderaan en een identieke opening net onder het plafond, waarlangs deze kamer in verbinding staat met de buitenomgeving (Figuur 8). In dat geval moet alle buitenlucht die door één van de openingen de kamer binnenkomt, worden gecompenseerd door een gelijke hoeveelheid binnenlucht die door de andere opening de kamer verlaat.



Figuur 8 - Ontwikkeling van de hydrostatische druk in een kamer die volledig luchtdicht is, met uitzondering van één opening onderaan en een identieke opening net onder het plafond

Zoals eerder aangegeven, is de externe druk bij de bovenste opening gelijk aan:

$$p_{eh} = p_{e0} - \rho_e g h \quad (12)$$

met:

- h , het hoogteverschil tussen de beide openingen [m]

Ook is de interne druk bij de bovenste opening gelijk aan:

$$p_{ih} = p_{i0} - \rho_i g h \quad (13)$$

Aangezien de twee openingen identiek zijn en het luchtdebiet dat erdoor stroomt ook identiek is, moet het drukverschil over de openingen ook identiek zijn. Aangezien de debieten een tegengestelde richting moeten hebben, moeten de drukverschillen bovendien een tegengesteld teken hebben.

We kunnen dus stellen:

$$\begin{aligned} \Delta p_0 &= -\Delta p_h \\ (p_{e0} - p_{i0}) &= -(p_{eh} - p_{ih}) \end{aligned} \quad (14)$$

Of nog

$$\begin{aligned} (p_{e0} - p_{i0}) &= (p_{ih} - p_{eh}) \\ &= (p_{i0} - \rho_i g h) - (p_{e0} - \rho_e g h) \\ &= (\rho_e g h - \rho_i g h) - (p_{e0} - p_{i0}) \\ 2(p_{e0} - p_{i0}) &= (\rho_e g h - \rho_i g h) \\ \Delta p_0 = (p_{e0} - p_{i0}) &= -(\rho_i - \rho_e) \frac{g h}{2} \end{aligned} \quad (15)$$

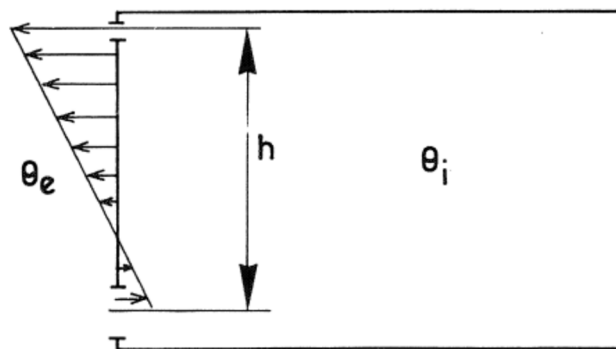
en

$$\Delta p_h = (p_{eh} - p_{ih}) = (\rho_i - \rho_e) \frac{g h}{2} \quad (16)$$

Laten we aannemen dat de buitentemperatuur θ_e lager is dan de binnentemperatuur θ_i van de kamer (en dus is $\rho_e > \rho_i$).

In dat geval stellen we vast dat de koude buitenlucht langs de opening onderaan binnenstroomt en dat de warme kamerlucht zal wegstromen uit de opening net onder het plafond. De luchtdrukverdeling is zoals aangegeven in het diagram in Figuur 8, d.w.z. dat de binnendruk gelijk is aan de buitendruk op precies de helft van de afstand h tussen de twee openingen.

Laten we nu een volledig luchtdichte kamer nemen, met uitzondering van een opening helemaal onderaan en een duidelijk kleinere opening net onder het plafond, waarlangs deze kamer in verbinding staat met de buitenomgeving (Figuur 9). Ook in dat geval moet alle buitenlucht die door één van de openingen de kamer binnenkomt, worden gecompenseerd door een gelijke hoeveelheid binnenlucht die door de andere opening de kamer verlaat.



Figuur 9 - Ontwikkeling van de hydrostatische druk in een ruimte die volledig luchtdicht is, met uitzondering van een opening onderaan en een duidelijk kleinere opening net onder het plafond

De verhouding tussen het debiet en de druk van dergelijke openingen kan als volgt worden uitgedrukt:

$$q = C \Delta p^n \text{ [m}^3/\text{h]} \quad (17)$$

met:

- q , het luchtdebiet door de opening [m^3/h]
- C , de luchtdebietcoëfficiënt [$\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{Pa}^n$]
- n , de luchtdebietexponent [-]
- p , het drukverschil [Pa]

De gelijkheid van de luchtdebieten boven- en onderaan kan dus als volgt worden uitgedrukt:

$$q = C_0 \Delta p_0^{n_0} = -C_h \Delta p_h^{n_h} \quad (18)$$

We hebben dus

$$C_0 \Delta p_0^{n_0} = -C_h \Delta p_h^{n_h} \quad (19)$$

$$\Delta p_0 = -\frac{C_h}{C_0} \Delta p_h^{\frac{n_h}{n_0}}$$

$$\Delta p_0 = -\frac{C_h}{C_0} (p_{eh} - p_{ih})^{\frac{n_h}{n_0}}$$

$$\Delta p_0 = -\frac{C_h}{C_0} ((p_{e0} - \rho_e g h) - (p_{i0} - \rho_i g h))^{\frac{n_h}{n_0}}$$

$$\Delta p_0 = -\frac{C_h}{C_0} ((\rho_i g h - \rho_e g h) + (p_{e0} - p_{i0}))^{\frac{n_h}{n_0}}$$

Indien wordt aangenomen dat de luchtdebietexponent van de twee openingen dezelfde waarde heeft (d.w.z. het zijn openingen van dezelfde soort; bv. ventilatieroosters met $n = 0,5$ of luchtlekken met $n=0,65$), is n_h/n_0 gelijk aan 1 en hebben we

$$\Delta p_0 = -\frac{C_h}{C_0} ((\rho_i g h - \rho_e g h) + (p_{e0} - p_{i0}))^1$$

$$\Delta p_0 = -\frac{C_h}{C_0} (\rho_i g h - \rho_e g h) - \frac{C_h}{C_0} (p_{e0} - p_{i0})$$

$$\Delta p_0 = -\frac{C_h}{C_0} (\rho_i g h - \rho_e g h) - \frac{C_h}{C_0} \Delta p_0 \quad (20)$$

$$\Delta p_0 \left(1 + \frac{C_h}{C_0}\right) = -\frac{C_h}{C_0} (\rho_i g h - \rho_e g h)$$

$$\Delta p_0 = -\frac{C_h}{C_0 + C_h} (\rho_i - \rho_e) g h$$

Ook hebben we

$$\Delta p_h = \frac{C_0}{C_0 + C_h} (\rho_i - \rho_e) g h \quad (21)$$

We stellen vast dat als een van de twee openingen een veel grotere weerstand tegen de luchtstroming heeft dan de andere (bv. als de bovenste opening veel kleiner is), de druklijn zal verschuiven en het punt waar p_i gelijk is aan p_e ook naar de grotere opening zal verschuiven (Figuur 9).

Dat is logisch, aangezien dezelfde hoeveelheid lucht door beide openingen zal stromen en het drukverschil groter zal zijn bij de opening met een hoge weerstand tegen de luchtstroming dan bij de opening met een lage weerstand.

4 Combinatie van luchtdrukverschillen

4.1 Algemene formule

Het is duidelijk dat de invloed van wind en temperatuurverschillen tussen de binnen- en buitenomgeving van een kamer of gebouw gelijktijdig kunnen optreden.

Het werkelijke luchtdrukverschil dat een gevel- of dakelement ondervindt, wordt dan bekomen door de som van de door de wind uitgeoefende druk en die als gevolg van het temperatuurverschil, rekening houdend met een nieuw, a priori onbekend, evenwichtsdrukverschil.

$$\Delta p = p_w + \Delta p_g + \Delta p_l \text{ [Pa]} \quad (22)$$

met:

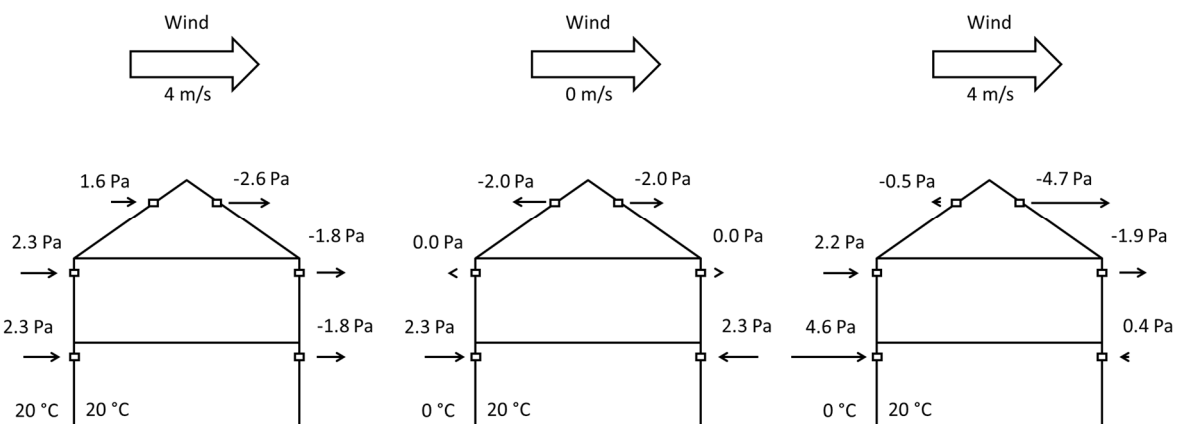
- p_w , de winddruk
- Δp_g , het hydrostatisch drukverschil
- Δp_l , het evenwichtsdrukverschil

Afhankelijk van het geval en van het beschouwde deel van het gebouw, kunnen de twee effecten elkaar versterken (toename van de absolute waarde van het drukverschil) of tegenwerken (afname van de absolute waarde van het drukverschil).

4.2 Rekenvoorbeeld

Als we het hierboven uitgewerkte voorbeeld bekijken (Figuur 3), ondervinden de verschillende ventilatieopeningen de volgende drukverschillen:

Ventilatieopening	Drukverschil [Pa]	Ventilatieopening	Drukverschil [Pa]
Dakhelling vooraan	$1.0 - 2.0 + 0.5 = -0.5$	Dakhelling achteraan	$-3.2 - 2.0 + 0.5 = -4.7$
Voorgevel (hoog)	$1.7 - 0.0 + 0.5 = 2.2$	Achtergevel (hoog)	$-2.4 - 0.0 + 0.5 = -1.9$
Voorgevel (laag)	$1.7 + 2.3 + 0.5 = 4.6$	Achtergevel (laag)	$-2.4 + 2.3 + 0.5 = 0.4$



Figuur 10 - Drukverschillen als gevolg van de wind alleen, het temperatuurverschil alleen en de combinatie van beide effecten

NOTA: Het principe van de berekening van het evenwichtsdrukverschil bestaat erin om de som van de inkomende en uitgaande luchtdebieten van het gebouw op te heffen door rekening te houden met de kenmerken van de verschillende openingen. Daarvoor beschouwt u het debiet door elke opening in functie van de evenwichtsdruk en deze laatste laat u door iteratie variëren tot het gewenste resultaat wordt bekomen (opheffing van de som van de luchtdebieten in dit geval).

5 Referenties

- [1] ASHRAE Handbook - Fundamentals 2009 (SI Edition). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- [2] Davis, R. S., 1991. Formule pour la détermination de la masse volumique de l'air humide (1981/1991). Extrait des Procès-verbaux du Comité international des poids et mesures
- [3] KMI, 2020. Klimaatstatistieken van de Belgische gemeenten – Referentieperiode: 1991-2020. Koninklijk Meteorologisch Instituut.
- [4] KMI, 2021. <https://www.meteo.be/nl/unpublish/algemeen-klimaat-belgie/parameters> (01-10-2021)
- [5] Liddament M.W., 1996. A Guide to Energy Efficient Ventilation. AIVC, Great Britain
- [6] Manuel des codes – Codes internationaux, Volume I.1 : Partie A – Codes alphanumériques. Organisation météorologique mondiale – OMM, 2012 (OMM N°306)
- [7] NBN EN 1991-1-4 : 2005. Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-4: Algemene belastingen - Windbelasting
- [8] Nylund P.O., 1980. Infiltration and Ventilation. Swedish Council for Building Research, Stockholm, Sweden.
- [9] Parmentier, B., 2003. De windwerking op hellende daken. Het WTCB-onderzoek en zijn resultaten (Onderzoek). WTCB-Tijdschrift, 2003/09/00, nr. 3, p. 3-17.
- [10] Santamouris, M., 2004. La ventilation naturelle en zone urbaine. AIVC, VIP n°3, mars 2004.
- [11] Uyttenbroeck, J., Carpentier G., 1984. Vochthuishouding in gebouwen. Schadeorzaken. Koudebruggen. Binnenklimaat. Gegevens voor ontwerp en uitvoering van gebouwen. Woonvoorwaarden van gebouwen. WTCB, TV 153, 84 p.