

LUCHTDICHTHEIDSMETINGEN VOOR HOGE GEBOUWEN: ENKELE RICHTLIJNEN

Auteurs : Nolwenn Hurel en Valérie Leprince (PLEIAQ) voor BCCA vzw

December 2021

1 WAT IS HET PROBLEEM BIJ HET TESTEN VAN HOGE GEBOUWEN?

Bij een ideale luchtdichtheidstest van een gebouw zou het drukverschil tussen binnen en buiten constant zijn in de tijd en uniform langs de volledige gebouwschil. Op deze manier wordt elk lek in gelijke mate in rekening genomen en zijn de testresultaten niet afhankelijk van de testomstandigheden.

Door het schoorsteeneffect en mogelijk ook door het drukverlies door traphallen is het in hoge gebouwen meestal niet mogelijk om een uniform drukverschil te hebben langs de gebouwschil, zoals hieronder nader wordt beschreven.

Ook de wind vormt hierbij een groot obstakel, aangezien deze meestal onstabiel is en een overdruk veroorzaakt op de buitengevels aan de loefzijde en een onderdruk op de buitengevels aan de lijzijde. Daarom wordt aanbevolen de luchtdichtheid van een gebouw te testen bij windstille condities. De windsnelheden nemen gewoonlijk toe met de hoogte vanaf de grond, dus het probleem van winddruk en de onstabieliteit ervan kan meer uitgesproken zijn voor hoge gebouwen, maar dit probleem is niet specifiek voor hoge gebouwen en wordt daarom niet verder behandeld in dit document.

Opmerking: Er is geen strikte definitie van wat de minimumhoogte van een "hoog gebouw" is. In de context van luchtdichtheidstesten hangt de hoogte waarvoor problemen zullen ontstaan af van het temperatuurverschil tussen binnen en buiten het gebouw. ISO 9972¹ schat dat voor $H \cdot \Delta T$ boven 250m.K "het onwaarschijnlijk is dat een aanvaardbaar drukverschil bij nuldebiet kan worden verkregen".

1.1 HET SCHOORSTEENEFFECT

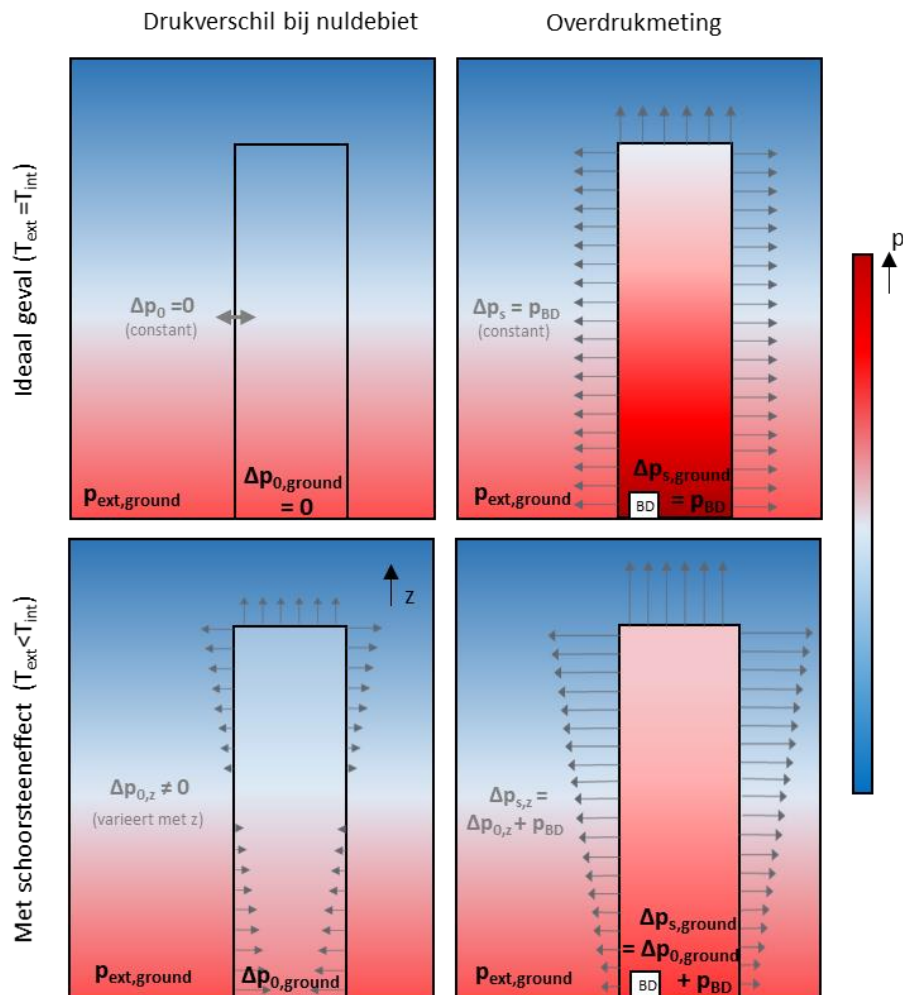
Het schoorsteeneffect is het drukverschil ten gevolge van een temperatuurverschil (en dus een verschil in densiteit van de lucht) tussen binnen en buiten, dat luchtbewegingen in gebouwen kan veroorzaken door openingen of lekken.

Zoals in Figuur 1 te zien is, neemt de luchtdruk af met de hoogte. Als de lucht in het gebouw dezelfde temperatuur heeft als buiten ($T_{\text{ext}}=T_{\text{int}}$), neemt de druk binnen en buiten in gelijke mate af en blijft het drukverschil langs de gebouwschil dus nul. Anderzijds, wanneer de temperatuur binnen en buiten het gebouw niet dezelfde is, varieert het drukverschil tussen binnen en buiten met de hoogte.

¹ ISO 9972:2015 Thermische eigenschappen van gebouwen — Bepaling van de luchtdoorlatendheid van gebouwen — Overdrukmethode met ventilator

In het voorbeeld van winterse omstandigheden ($T_{ext} < T_{int}$), is de densiteit van de binnenlucht kleiner dan de densiteit van de buitenlucht, waardoor de verwarmde lucht opstijgt en langs boven wegstroomt, wat leidt tot overdruk op de bovenste verdieping en onderdruk op de benedenverdieping waar koude lucht infiltreert.

Idealiter zou de luchtdichtheidstest worden uitgevoerd bij gelijkaardige binnen- en buitentemperaturen (in het tussenseizoen en 's nachts om zonnestraling te vermijden), maar door de vele randvoorwaarden is het nauwelijks mogelijk dit schoorsteeneffect uit te schakelen.



Figuur 1 - Impact van het schoorsteeneffect voor overdrukmeting op een hoog gebouw (bij gelijkmatig verdeelde luchtlekken over de hoogte van het gebouw als voorbeeld)

De variatie van het drukverschil tussen de boven- en de onderkant van een gebouw ten gevolge van het schoorsteeneffect (Δp_{stack}) wordt gegeven door:

$$\Delta p_{stack} = -(\rho_{int} - \rho_{ext})gH \quad (1)$$

Als :

$$p_{int,H} - p_{ext,H} = p_{int,ground} - p_{ext,ground} - (\rho_{int} - \rho_{ext})gH \quad (2)$$

Met :

- $p_{int,z}$ de druk in het gebouw op de hoogte z (Pa)
- $p_{ext,z}$ de druk buiten op de hoogte z (Pa)
- H de hoogte van het gebouw (m)
- g de zwaartekrachtversnelling (m/s^2)
- $\rho_{int} - \rho_{ext}$ het verschil in densiteit tussen de binnenlucht en de buitenlucht ten gevolge van het temperatuurverschil:

$$\rho_{int} - \rho_{ext} = \rho_0 \left(\frac{273}{273 + T_{int}} - \frac{273}{273 + T_{ext}} \right) \quad (3)$$

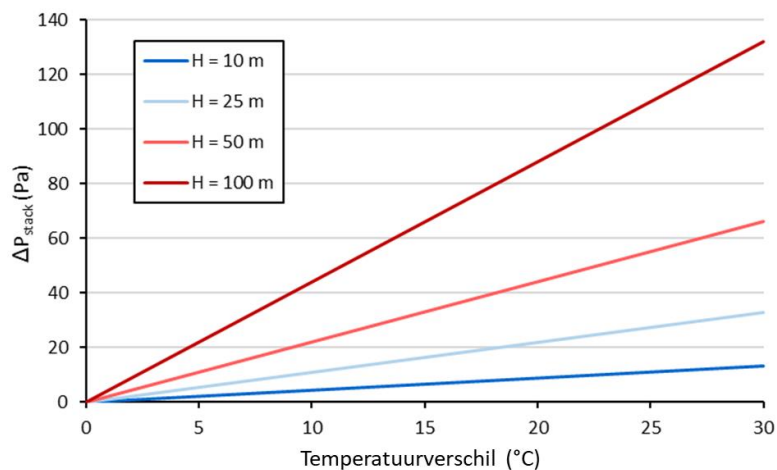
Met :

- ρ_0 de densiteit van lucht op 0°C (1.293 kg/m^3 at P_{atm})
- T_{int} de binnenluchttemperatuur ($^\circ\text{C}$)
- T_{ext} de buitenluchttemperatuur ($^\circ\text{C}$)

Formule (1) wordt vaak als volgt benaderd:

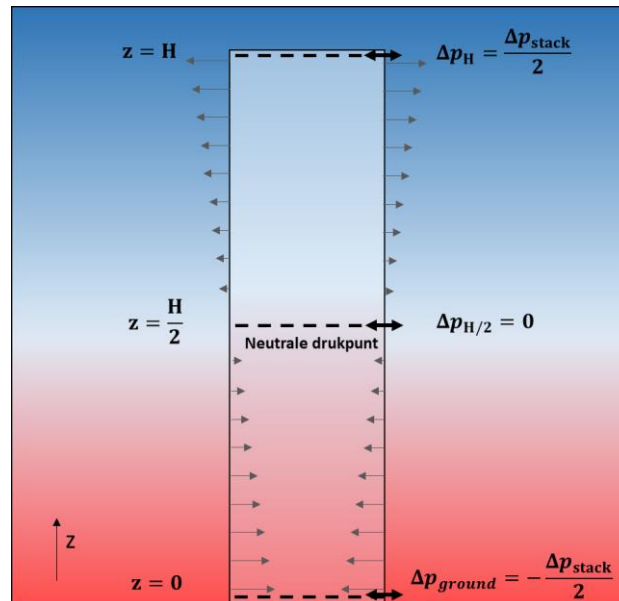
$$\Delta p_{stack} \approx 0.043 \times H \times (T_{int} - T_{ext}) \quad (4)$$

In Figuur 2 wordt deze benadering gebruikt om het drukverschil tussen de boven- en onderkant van het gebouw (Δp_{stack}) in te schatten als functie van het temperatuurverschil en de hoogte van het gebouw.



Figuur 2 – Variatie van het drukverschil ten gevolge van het schoorsteeneffect tussen de boven- en de onderkant van een gebouw, afhankelijk van de hoogte ervan en het temperatuurverschil tussen binnen en buiten

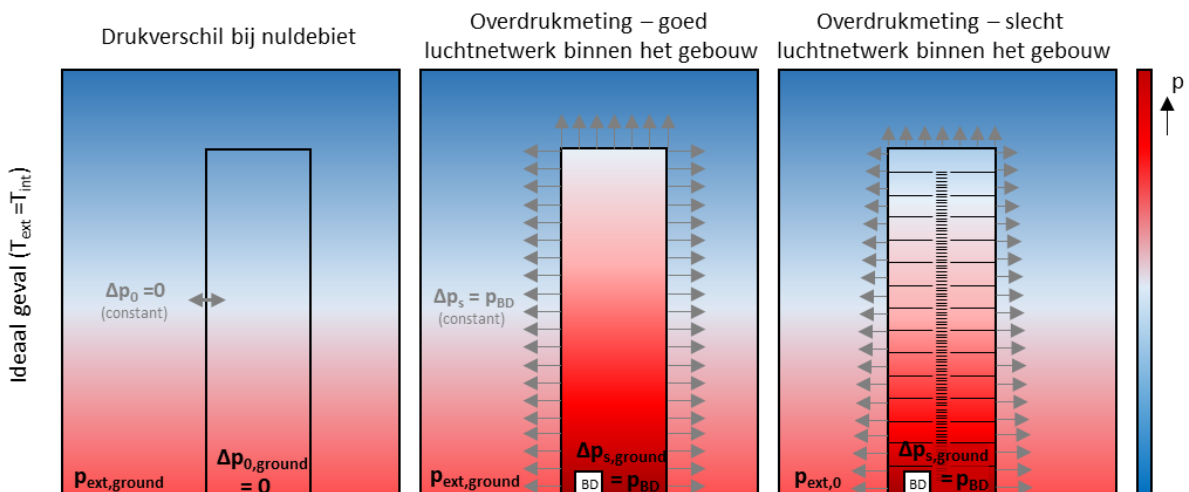
Voor gelijkmatig over de hoogte van het gebouw verdeelde luchtlekken zal het neutrale drukpunt (waarvoor $p_{ext} = p_{int}$) zich in de helft van de hoogte van het gebouw bevinden, zoals aangegeven in Figuur 3. In deze specifieke configuratie zal het drukverschil tussen binnen en buiten aan de boven- en onderkant van het gebouw even groot zijn, maar met tegengestelde tekens. En het drukverschil bij nuldebiet gemeten op de begane grond $\Delta p_{0,ground}$ zal de helft zijn van Δp_{stack} .



Figuur 3 – Schoorsteeneffect in geval van gelijkmatig verdeelde lekken over de hoogte van het gebouw

1.2 HET DRUKVERLIES DOOR TRAPHAL EN CIRCULATIE

Wanneer een gebouw vanaf de begane grond op overdruk wordt gezet, verhinderen de obstakels op de weg naar de hogere verdiepingen (en weg van de ventilator in het algemeen) dat de druk in het gebouw homogeen wordt. Als gevolg hiervan kan, zelfs zonder het schoorsteeneffect, het drukverschil langs de gebouwschil (weg van de ventilator) afnemen, zoals aangegeven in Figuur 4. Hoe groter het lekverlies in het gebouw, hoe groter het interne drukverlies, aangezien dit bij een turbulente stroming varieert met het kwadraat van de stroomsnelheid.



Figuur 4 - Impact van obstakels voor overdrukmeting op hoge gebouwen (veel obstakels voor de stroming leiden tot een slecht lucht netwerk binnen de gebouwen)

2 PROBLEMEN MET STS-P 71-3 (EN NORM ISO 9972)

Deze eigenheid van hoge gebouwen is in strijd met verschillende punten van de STS-P 71-3² (en de internationale norm ISO 9972³) voor de bepaling van de luchtdichtheid van gebouwen met de pressurisatietest:

- 1) Volgens de norm moeten de gemiddelden van de positieve, negatieve en alle natuurlijke nuldrukmetingen (de *baseline*, $\Delta p_{0,ground}$) onder 5 Pa liggen. Voor lage gebouwen betekent dit dat metingen bij sterke wind of sterk schoorsteeneffect uitgesloten worden. Aan deze eis kan echter nauwelijks worden voldaan bij hoge gebouwen, zoals geïllustreerd in Figuur 3. Als we het voorbeeld nemen van een 50 m hoog gebouw met een uniforme lekverdeling, is een temperatuurverschil tussen binnen en buiten van 4.7°C voldoende om $|\Delta p_{0,ground}| = 0.043 * 50 * 4.7 / 2 = 5$ Pa te introduceren.
Wanneer het gebouw echter een volume groter dan of gelijk aan 4000 m³ heeft, beschrijft de STS-P 71-3 §5.9.1 enkele uitzonderingen op deze baseline. Toch wordt geadviseerd te meten wanneer het wind- en schoorsteeneffect beperkt is.
- 2) Volgens de norm is vijfmaal het drukverschil bij nuldebiet ($\Delta p_{0,ground}$) vereist voor het laagste meetpunt van de meetreeks. Aangezien hoge gebouwen vaak gebouwen zijn met een groot volume, kan dit moeilijk te bereiken zijn met standaard testapparatuur. Vooral omdat, zoals hierboven vermeld, $|\Delta p_{0,ground}|$ vaak veel hoger is dan 5 Pa. Het voorbeeld van een 50 m hoog gebouw met een uniforme lekverdeling, getest met een buitentemperatuur van 0°C en een binnentemperatuur van 15°C zou een eerste testpunt boven 82 Pa vereisen ($\Delta p_{0,ground} = -16.5$ Pa). Daarom beperkt de STS-P 71-3 §5.9.1 dit laagste meetpunt tot 40 Pa voor gebouwen met een volume groter dan of gelijk aan 4000 m³. Het hoogste meetpunt moet dan ten minste 25 Pa hoger liggen dan het laagste. Maar dan nog zijn de vereiste gebouwdrukken veel hoger dan voor lage $|\Delta p_{0,ground}|$.
- 3) De norm stelt in §5.2.4: "Het volledige gebouw of het gebouwdeel dat aan de test onderworpen moet worden, dient zo geconfigureerd te worden dat het als één zone reageert op overdruk. Alle verbindingsoeningen (deur, luik, enz.) van het gebouwdeel dat aan de test onderworpen moet worden, dienen open te staan." Voor hoge gebouwen met lange gangen en traphallen is het een uitdaging, zoals voor elk groot gebouw. Het is des te moeilijker bij zeer lekke gebouwen omdat het drukverlies evenredig kan zijn met het kwadraat van de stroomsnelheid (bij turbulente stroming).

3 PRAKTISCHE ADVIEZEN

De eerste prioriteit bij het testen van de luchtdichtheid van een hoog gebouw is te voldoen aan STS-P 71-3. Zoals hierboven besproken, kunnen twee eisen echter moeilijk te realiseren zijn:

- Het drukverschil bij nuldebiet (op de begane grond): $\Delta p_{0,ground} < 5$ Pa (of zo laag mogelijk voor een gebouw met een volume ≥ 4000 m³)
- Het eerste drukpunt (op de begane grond): $\Delta p_{s,ground} > 5 * \Delta p_{0,ground}$ (of ≥ 40 Pa voor een gebouw met een volume ≥ 4000 m³)

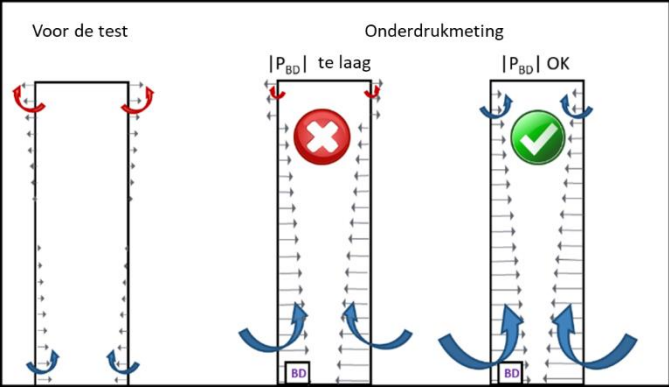
Maar zelfs wanneer aan deze criteria is voldaan, betekent dit nog niet dat het testresultaat een correcte weergave is van het geteste gebouw. Om dat te bereiken, moet het gehele gebouw op over- of onderdruk worden gezet.

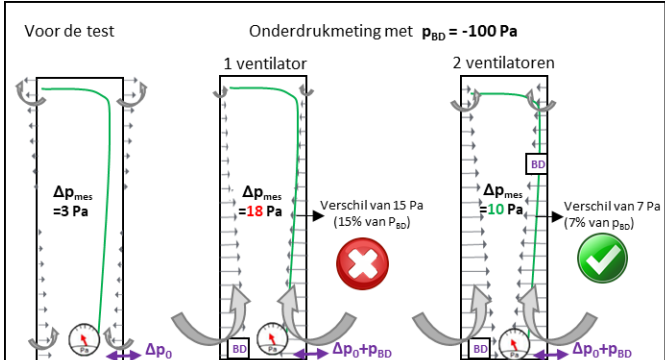
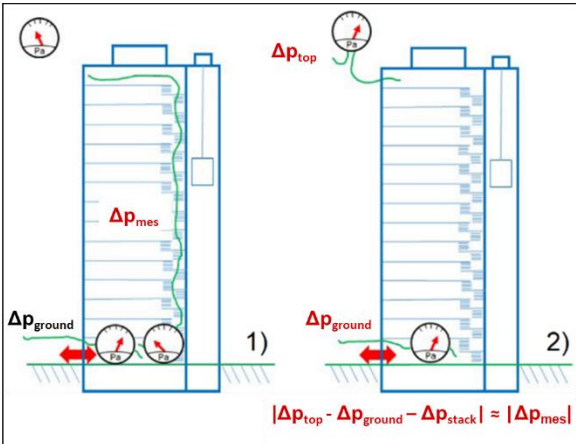
De onderstaande tabel geeft richtlijnen en praktische adviezen voor het uitvoeren van een test bij hoge gebouwen, maar dit zijn zeker geen vereisten.

² STS-P 71-3 Luchtdichtheid van gebouwen – Luchtdichtheidstest - Versie 18 december 2014

³ ISO 9972:2015 Thermische eigenschappen van gebouwen — Bepaling van de luchtdoorlatendheid van gebouwen — Overdrukmethode met ventilator

Een deel van deze praktische adviezen is ontleend aan *Airtightness measurement of high-rise buildings*, Passive House Institute, Sept. 2019 by S. Peper and J. Schieders.

Praktische adviezen	Redenering erachter
Beperk het temperatuurverschil	
<p>Voer de test indien mogelijk 's nachts uit (op voorwaarde dat het gebouw veilig is en de tester niet in gevaar komt), en/of in het tussenseizoen</p>	<p>Verlaging van het temperatuurverschil tussen binnen en buiten het gebouw vermindert het schoorsteeneffect</p>
<p>Indien mogelijk, massale ventilatie van het gebouw vóór de test (ramen en deuren gedurende enkele uren open en verwarming/koeling uitgeschakeld)</p>	
<p>Sluit luiken of andere zonweringen</p>	
Controleer of het hele gebouw op over- of onderdruk staat	
<p>De ingebrachte druk p_{BD} gemeten op de begane grond moet (in aanvulling op de eisen van STS-P 71-3) zodanig zijn dat:</p> $ p_{BD} > \max(\Delta p_{0,ground} ; \Delta p_{0,top}) + 10 \text{ Pa}$ <p>Met $\Delta p_{0,ground}$ en $\Delta p_{0,top}$ het drukverschil bij nuldebiet gemeten respectievelijk op de begane grond en op de bovenste verdieping. $\Delta p_{0,top}$ kan ook geschat worden op basis van $\Delta p_{0,ground}$ en de berekende Δp_{stack} (vergelijking (4)).</p> <p>Dit verhoogt de kans dat het VOLLEDIGE gebouw onder negatieve druk (onderdrukmeting) of onder positieve druk (overdrukmeting) staat, met een veiligheidsmarge van 10 Pa. Merk op dat deze veiligheidsmarge mogelijk niet voldoende is in geval van sterke wind.</p> <p>De externe druksonde(s) moet(en) de externe statische druk meten, en beschut zijn tegen wind (wat op de bovenste verdieping een uitdaging kan zijn).</p> <p>Zoals bij elke test, moet de externe druksonde op de begane grond worden geplaatst en op dezelfde plaats blijven voor de nuldrukmeting en tijdens de test.</p>	<p>Indien een deel van de gebouwschil een druk heeft van tegengesteld teken, zal de lucht doorheen de lekken in dit gebied in de tegenovergestelde richting stromen als in de testconditie, en zal de gemeten luchtdichtheid kunstmatig worden verhoogd.</p>  <p>De meting van het drukverschil op de bovenste verdieping wordt alleen gebruikt om de waarde van het eerste meetpunt te bepalen. Alleen het drukverschil op de begane grond mag worden gebruikt om de meting uit te voeren (de ventilator te regelen). Het is belangrijk te bedenken dat de externe druk aan de bovenkant van het gebouw waarschijnlijk dicht bij de gevel wordt genomen en geen goede referentie is (sterk beïnvloed door de wind) voor de test.</p>
Controleer de homogeniteit van de druk in het gebouw	
<p>Plaats van de ventilator: zo dicht mogelijk bij de traphal(len)/lift. Meestal is het gemakkelijker om hem op de begane grond te plaatsen, maar indien mogelijk zou de</p>	<p>De ventilator moet zo dicht mogelijk bij de traphal(len)/lift worden geplaatst die alle delen van het gebouw met elkaar verbinden. Dit vermindert de belemmeringen voor de</p>

<p>ideale plaats voor de drukhomogeniteit op de middelste verdieping zijn.</p>	<p>luchtstroom en daardoor de drukverliezen van de ventilator naar de meest kritische ruimte.⁴</p>
<p>Controleer tijdens de test, om het drukverlies door traphal en circulatieruimtes te controleren, of het drukverschil tussen de boven- en onderkant van het gebouw niet meer dan 10% van p_{BD} verschilt bij vergelijking vóór en tijdens de test (drukafwijking).</p> <p>Indien niet aan deze voorwaarde wordt voldaan, gebruik dan meerdere ventilatoren om de druk over het interne volume van het gebouw te verdelen.</p>	<p>Aangezien in hoge gebouwen geen uniforme druk kan worden bereikt, wordt geadviseerd om voor, tijdens en na de meting een vergelijkbaar drukverschil tussen de boven- en onderkant van het gebouw aan te houden.</p> 
<p>Twee mogelijkheden om de drukafwijking te meten⁵:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Meting van het drukverschil in het gebouw door middel van een drukslang van de begane grond naar de kritische ruimte. Aangezien de slang zich binnen het gebouw bevindt, is hier geen correctie nodig⁶. 2) Meting van het drukverschil met de omgeving. De invloed van het schoorsteeneffect moet worden afgetrokken (zie de berekening van Δp_{stack} in §1.1 met de luchtdensiteit voor de temperatuur op halve hoogte van het gebouw). <p>Om de invloed van de wind op de bovenste meting te vermijden, verdient optie 1) de voorkeur. Wanneer alleen optie 2) mogelijk is, kan de druk op verschillende gevels worden gemeten en (indien mogelijk) worden gemiddeld.</p>	<p>Illustratie van de twee meetmethoden met het voorbeeld van een drukverschil tussen binnen en buiten van 50 Pa op de begane grond ($\Delta p_{0,ground} + p_{BD}$)</p> 

⁴ De kritische ruimte is het verst verwijderd van de plaats van de drukmeting wat het luchtpad betreft, en bevindt zich waarschijnlijk op de bovenste verdieping aan het uiteinde van een gang. Toch is het niet altijd gemakkelijk om deze ruimte te identificeren (het is een combinatie van luchtstroomsnelheid, afstand en belemmeringen) en het kan nodig zijn om op elke potentiële kritische plaats metingen te verrichten ter vergelijking.

⁵ S. Peper and J. Schieders *Airtightness measurement of high-rise buildings*, Passive House Institute, Sept. 2019

⁶ In dit geval lopen de slangen door het gebouw naar beneden, zodat de manometer alleen het drukverschil door drukverliezen in het gebouw meet en niet het drukverschil door het hoogteverschil.

Indien nodig, verdeel het gebouw voor de test

De regelgeving in Vlaanderen⁷ staat toe dat een meergezinsgebouw in verschillende zones wordt opgesplitst in plaats van het hele gebouw in één test te meten.

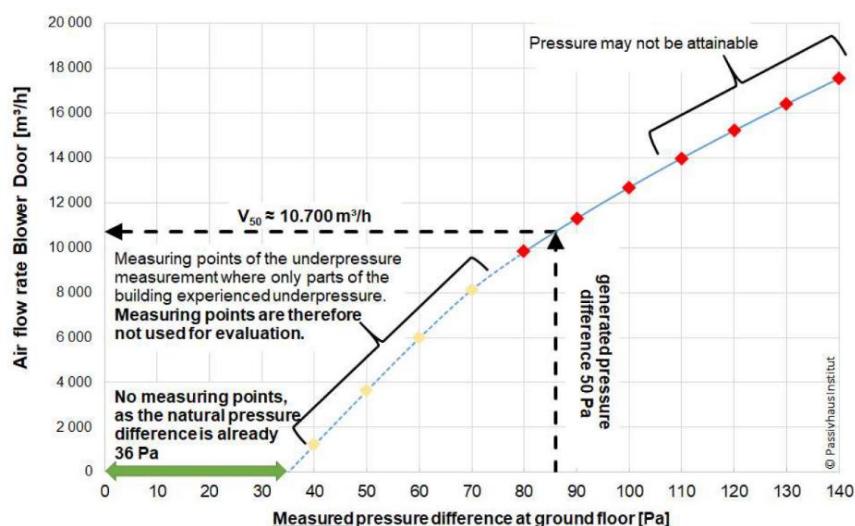
Interne lekken zullen in de meting worden opgenomen, waardoor de luchtdichtheid van het gebouw als geheel kan worden onderschat.

In sommige gevallen kan de meting worden uitgevoerd op slechts een deel van het beschermde volume (en de bijbehorende verliesoppervlakte), maar altijd ten minste op de bedoelde eenheid die overeenkomt met de EPB-berekening.

Zoals gebruikelijk wordt drukverschil bij nuldebiet ($\Delta p_{0,ground}$) afgetrokken van de gemeten drukverschillen (Δp_s) voor de berekening van het geïnduceerde drukverschil (p_{BD}) ($\Delta p_s = p_{BD} + \Delta p_{0,ground}$).

Een illustratie van de complexiteit van de luchtdichtheidsmeting voor hoge gebouwen wordt gegeven in het document *Airtightness measurement of high-rise buildings*⁸ met het voorbeeld van een 120 m hoge wolkenkrabber met een temperatuurverschil van 15°C tussen binnen en buiten, waardoor $\Delta p_{0,ground} = -36$ Pa. Merk op dat volgens STS-P 71-3 een meting met $\Delta p_{0,ground}$ van meer dan 5 Pa niet toegelaten is voor "kleine gebouwen". Voor "grote gebouwen" met een $\Delta p_{0,ground} = -36$ Pa moet het laagste meetpunt (onderdruk) $\Delta p_{s,ground} -40$ Pa zijn en moet ten minste -180 Pa worden bereikt.

Zoals uit Figuur 5 blijkt, staat het gebouw echter pas volledig op onderdruk vanaf ongeveer $\Delta p_{s,ground} = -72$ Pa gemeten op de benedenverdieping, wat overeenkomt met een geïnduceerd drukverschil van $p_{BD} = |\Delta p_{0,ground}|$ (met $\Delta p_{s,ground} = \Delta p_{0,ground} + p_{BD}$). In principe kunnen dus de meetpunten pas vanaf -72 Pa worden gebruikt. Nu zijn ventilatoren vaak niet gekalibreerd voor zeer hoge drukken, wat het bereik van de drukmetingen kan beperken. Bovendien kunnen deze plaatselijke hoge drukken schade aan het gebouw veroorzaken. Daarom kunnen meetwaarden in het bereik van geïnduceerde drukverschillen van 50 Pa voldoende zijn voor een zinvolle indicatie (zie Figuur 5). Dit toont bovendien aan hoe belangrijk het is de baseline zo veel mogelijk te beperken.



Figuur 5 – Luchtdichtheidsmeting van een 120 m hoge wolkenkrabber met $\Delta T=15^\circ\text{C}$ ⁸

⁷ BIJLAGE 6 BIJ HET MB VAN 28 DECEMBER 2018 'Bijkomende specificaties voor de meting van de luchtdichtheid van gebouwen in het kader van de EPB-regelgeving' <https://www.energiesparen.be/epb-pedia/bijlagen-coördinatiemb#bijlage6>

⁸ S. Peper and J. Schieders *Airtightness measurement of high-rise buildings*, Passive House Institute, Sept. 2019

4 BIJLAGE 1: NOMENCLATUUR

Romeinse symbolen

C	Luchtlekcoëfficiënt	$m^3/(s.Pa^n)$
g	Zwaartekrachtversnelling	m/s^2
H	Hoogte van het gebouw	m
n	Luchtdebietsindex	-
p	Druk relatief aan externe druk	Pa
p+	Overdrukmeting	-
p-	Onderdrukmeting	-
q	Volumetrisch luchtdebiet	m^3/s
T	Temperatuur	K
Z	Hoogte vanaf de grond	m

Griekse symbolen

Δp	Drukverschil	Pa
ΔT	Temperatuurverschil tussen binnen en buiten het gebouw	$^{\circ}C$
ρ	Luchtdensiteit (volumieke massa)	kg/m^3

Onderschrift

av	Gemiddeld (overdruk – onderdruk resultaten)
BD	Blower door meettoestel
down	Laagste lek
est	Geschatte waarde
ext	Buiten
ground	Begane grond
int	Binnen het gebouw
j	Index van lek
nostack	Geen schoorsteeneffect (zelfde temperatuur binnen en buiten)
ref	Referentie druk
s	Bij een bepaald drukmeetstation (tijdens een drukmeting)

stack	Wel schoorsteeneffect
t	Total (boven + beneden)
top	Bovenste verdieping
up	Bovenste lek
0	Meting van drukverschil bij nuldebiet