

6. Luchttransport door constructies

6.1. *Introductie*

Luchtdichtheid van de gebouwschil kan worden beschreven als de luchtvolumestroom (q_v) die ontstaat door de gebouwschil van een gebouw bij een zeker drukverschil. In Nederland wordt voor dat drukverschil 10 Pascal aangehouden.

De luchtvolumestroom wordt veroorzaakt door een drukverschil over de gevel, dat drukverschil ontstaat door wind of temperatuur verschil tussen binnen en buiten [1] [2], maar kan ook het gevolg zijn van over- of onderdruk in een gebouw ten gevolge van de mechanische ventilatie. De lucht die ongewenst van buiten naar binnen stroomt wordt infiltratie genoemd, de lucht die ongewenst van binnen naar buiten stroomt noemen we exfiltratie [3].

De luchtdoorlatendheid van een gebouw wordt uitgedrukt in de $q_{v,10}$ waarde (de luchtvolumestroom bij een drukverschil van 10 Pa). In het bouwbesluit wordt een $q_{v,10}$ kar gehanteerd: de karakteristieke luchtvolumestroom die ontstaat bij een drukverschil van 10 Pascal voor een gebouw van 500 m³ [4] en [5].

Ook kunnen eisen gesteld aan aparte gebouwdelen. Voor vliesgevels geldt volgens NEN-EN 12152 een eis waarbij de gevels geclassificeerd worden gebaseerd op de luchtdoorlatendheid gerelateerd aan het oppervlak (m³/h.m²) en de naadlengte (m³/h.m). Per klasse wordt hier de luchtdoorlatendheid aangegeven die op mag treden bij de bij die klasse behorende maximale testdruk. De klassen zijn onderverdeeld in A1 t/m A4, daarboven is er een klasse AE die gevolgd wordt door het drukverschil (zoals AE700). [6]

Aan deuren en ramen geldt volgens NEN-EN 12207 een eis voor de luchtdoorlatendheid per m¹ lengte van de sluitnaad en m² oppervlak waarbij de deuren en ramen worden geklasseerd in klasse 1 t/m 4. Klasse 1 is de laagste, 4 de hoogste klasse. [7]

Deze huidige normen geven slechts eisen en worden niet gemotiveerd vanuit energiezuinigheid of comfort. In de praktijk worden luchtdichtheid en luchtdoorlatendheid van gebouwen door elkaar gebruikt, Nederlandse normen en eisen spreken echter enkel over luchtdoorlatendheid. [8]

Ondanks dat er verschillende normen en eisen bestaan met betrekking tot de luchtdichtheid van de gebouwschil, is het voor adviseurs lastig om voor niet bestaande gebouwen een goed oordeel te geven over luchtdichtheidsmaatregelen en de bijbehorende eis die daarmee behaald kan worden.

Het bouwbesluit geeft een bovengrens voor de luchtdoorlatendheid, die resulteert in een $q_{v,10}$ waarde die niet erg streng is, en niet tot een erg luchtdicht gebouw leidt. [9] Ook andere eisen leiden vaak tot onduidelijkheden en kunnen vrijwel enkel worden gebaseerd op metingen in bestaande gebouwen. [10]

6.2. Parameters

Er zijn verschillende parameters die gerelateerd zijn aan luchtdoorlatendheid. Om een uitspraak te kunnen doen over luchtdoorlatend, de normen en voorschriften en verschillende eenheden te kunnen omrekenen wordt hier inzicht gegeven in de verschillende parameters.

$q_{v,10}$ de luchtvolumestroom bij een drukverschil van 10 Pa [dm^3/s] of [$\text{dm}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$ Ag (gebruiksoppervlak)]
Bij een $q_{v,10}$ waarde in $\text{dm}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$ wordt een standaard gebruiksoppervlak van 100 m^2 aangenomen, een $q_{v,10}$ van $40 \text{ dm}^3/\text{s}$ komt dus overeen met $0,4 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$

$q_{v,10 \text{ kar}}$ de karakteristieke luchtvolumestroom bij een drukverschil van 10 Pa bij een inhoud van 500 m^3 [dm^3/s]
De $q_{v,10 \text{ kar}}$ kan worden omgerekend naar een groter volume dan 500 m^3 , door de verhouding van het groter wordende volume in de berekening mee te nemen. Voor een volume van 600 m^3 en een $q_{v,10 \text{ kar}}$ van $150 \text{ dm}^3/\text{s}$ geldt bijvoorbeeld:
$$q_{v,10} = (500/600) \times 150 = 125 \text{ dm}^3/\text{s}$$

n_{50} het infiltratievoud bij een drukverschil van 50 Pa [1/h]

C de totale luchtdoorlatendheid [$\text{dm}^3/\text{s}\cdot\text{Pa}^n$], luchtdoorlatendheid bij een drukverschil van 1 Pascal

c partiële luchtdoorlatendheid [$\text{dm}^3/\text{s}\cdot\text{m}^1\cdot\text{Pa}^n$] - per meter aansluiting.

A_e oppervlakte luchtlek, aerodynamisch doorlaatoppervlakte [cm^2].

A_g gebruiksoppervlakte [m^2].

$q_{v,10;\text{gemeten}}$, de gemeten luchtvolumestroom afgeleid uit de druk/volumestroom-karakteristiek bij een drukverschil van 10 Pa, zonder herleiding naar een gestandaardiseerde netto-inhoud [dm^3/s of m^3/s]

$q_{v,10;\text{spec}}$, specifieke luchtdoorlatendheid bij een uniform drukverschil van 10 Pa [$\text{dm}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$] (NEN 8088-1).

$q_{v,10;\text{spec;reken}}$, rekenwaarde voor de specifieke luchtdoorlatendheid bij een uniform drukverschil van 10 Pa [$\text{dm}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$] (NEN 8088-1).

$q_{ve;\text{inf}}$, toevoerluchtvolumestroom ten gevolge van infiltratie [dm^3/s] (NEN 8088-1).

Verschillende luchtdichtheidsklassen voor gevelelementen voor vliesgevels (conform NEN-EN 12152) en raamkozijnen conform NEN-EN 12207 [$\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$ geveloppervlak of $\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{m}$ naadaansluiting].

De partiele luchtdoorlatend c wordt vaak ook gegeven bij een drukverschil van 1 Pa, in SI-eenheden: $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s}\cdot\text{Pa}^{2/3})$.

In normen en meetrapporten wordt de luchtdoorlatendheid vaak gegeven bij een ander drukverschil. Indien c_n de luchtdoorlatendheid is bij een ander drukverschil (ΔP_n) dan volgt:

$$c = c_n (\Delta P_n)^{2/3}.$$

Soms wordt c gegeven in liters/($m^2 \cdot s \cdot Pa^{2/3}$), ook te schrijven als $dm^3/(m^2 \cdot s \cdot Pa^{2/3})$, soms in $dm^3/(m^2 \cdot h \cdot Pa^{2/3})$ of in $m^3/(m^2 \cdot h \cdot Pa^{2/3})$. Het is dus zaak om goed op de eenheden te letten waarin een formule gehanteerd wordt.

6.3. Berekening luchtvolumestroom

De luchtvolumestroom wordt berekend met de formule:

$$q_{v,p} = \Sigma (C) \cdot p^n \quad (1)$$

waarin:

$q_{v,p}$ de luchtvolumestroom bij een bepaald drukverschil over de gevel is [dm^3/s]

C de luchtdichtheidscoëfficiënt (het totaal aan luchtlekken) is [$dm^3/s \cdot Pa^n$]

p het drukverschil is [Pa]

n de luchtstromingsexponent is (0,625 volgens SBR: publicatie luchtdicht bouwen)

Theoretisch gezien ligt de luchtstromingsexponent tussen 0,5 en 1,0 voor een volledig ontwikkelde laminaire luchtstroom. De luchtstromingsexponent wordt daardoor gezien als een indicator voor het type luchtstroming en geeft een indicatie van de grootte van de meest dominante lekken. De SBR gaat uit van een waarde voor de luchtstromingsexponent n van 0,625 [17], de NEN-EN 12152 en de NEN-EN 12207 geeft $2/3$, maar ook wordt voor n vaak 0,61 aangehouden.

6.4. Berekening equivalent oppervlak luchtlekken

Het equivalent oppervlak aan luchtlekken kan volgens NEN 2686:2008 worden berekend. De daarbij behorende formule is [18]

$$A_e = \frac{c \cdot \sqrt{p}}{1000 \cdot 2^n} \quad (2)$$

Waarbij:

A_e het equivalent oppervlak aan luchtlekken is [m^2]

C de luchtdichtheidscoëfficiënt (het totaal aan luchtlekken) is [$dm^3/s \cdot Pa^n$]

ρ de dichtheid van lucht is [kg/m^3]

n de luchtstromingsexponent (0,625 volgens SBR: publicatie luchtdicht bouwen)

In de NEN-norm wordt hierbij een notie gemaakt dat deze formule enkel geldig is bij een turbulente luchtstroom ($n=0,5$), uit onderzoek blijkt dat dit ook geldt voor hogere waarden van n . [38] [40]

6.5. Berekening luchtdichtheidscoëfficiënt

De luchtdichtheidscoëfficiënt kan worden berekend volgens

$$C = \Sigma c_m + C_{lek} \quad (3)$$

Waarbij:

C de luchtdichtheidscoëfficiënt (het totaal aan luchtlekken) is [$\text{dm}^3/\text{s}\cdot\text{Pa}^n$]
 c de partiële luchtdoorlatendheid is [$\text{dm}^3/\text{s}\cdot\text{m}^1\cdot\text{Pa}^n$] per meter aansluiting
 m de lengte aansluiting is [m]

C_{lek} de luchtdoorlatendheid van een doorvoer [$\text{dm}^3/\text{s}\cdot\text{Pa}^n$]

6.6. Berekening luchtdoorlatendheid van een doorvoer

De luchtdoorlatendheid van een doorvoer kan berekend worden met

$$C_{\text{lek}} = \frac{A_e \times 10^3 \times 2^n}{\sqrt{\rho}} \quad (4)$$

Waarbij:

C_{lek} de luchtdoorlatendheid van een doorvoer [$\text{dm}^3/\text{s}\cdot\text{Pa}^n$]

A_e het equivalent oppervlak aan luchtlekken doorvoer is [m^2]

n de luchtstromingsexponent is (0,625 volgens SBR: publicatie luchtdicht bouwen)

ρ de dichtheid van lucht is [kg/m^3]

6.7. Toepassing parameters luchtdoorlatendheid

De eisen met betrekking tot de $q_{v,10}$ waarde worden tegenwoordig vooral gesteld met betrekking tot de energieprestatie van een gebouw. De EPC eis wordt voortdurend aangescherpt en daarmee wordt de eis ten aanzien van de luchtdoorlatendheid voortdurend strenger. De opgestelde datasheet is daardoor opgezet vanuit een zelf te stellen $q_{v,10}$ eis die zo vertaald kan worden naar een bepaalde gevel opbouw.

6.8. Omrekenen van $q_{v,10}$ eisen naar eisen met betrekking tot normen en voorschriften.

De $q_{v,10}$ waarde wordt zoals eerder beschreven veelal uitgedrukt in $\text{dm}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$ gebruiksoppervlak A_g . Echter zoals in hoofdstuk 5.2 is terug te lezen worden de huidige eisen met betrekking tot luchtdoorlatendheid van vliesgevels en kozijnsystemen uitgedrukt in $\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$ geveloppervlak en $\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{m}$ voeglengte. Omrekenen van beide eenheden kan op dit moment enkel via ISSO publicatie 53 - warmteverliesberekeningen voor utiliteitsgebouwen met vertrekhoogten tot 5 meter, waarin een standaard omrekeningstabel is weergegeven. Echter is dit niet gebaseerd op de praktijk, de waarden in de tabel zijn bepaald door TNO (Wil de Gids en Bas Knoll). Hiervoor zijn simulaties uitgevoerd doormiddel van meerkamer modellen. De buitencondities hierbij waren $-10\text{ }^\circ\text{C}$ en een windsnelheid van 5 m/s op de gevel. Binnentemperatuur $20\text{ }^\circ\text{C}$. Simulaties zijn uitgevoerd voor kantoorachtige omgevingen met aan beide zijden van het gebouw kantoorvertrekken en een gang in het midden tussen de vertrekken. Centraal in het gebouw een door deuren afgesloten trappenhuis. Hoe realistisch deze omrekenmethode in de praktijk is, kan dus niet worden gezegd. Daarnaast lijkt er ook geen eenduidig duidelijk verband te vinden tussen de waarden die hier genoemd worden en de daarbij behorende luchtdichtheidseisen.

6.9. Drukverschil

Onder invloed van een luchtdrukverschil kan luchttransport plaatsvinden door poreuze materialen en door naden en kieren.

Een drukverschil over gevels, vloeren en daken wordt veroorzaakt door winddruk en door temperatureffecten: thermische trek.

Drukverschillen die door de wind worden veroorzaakt zijn het grootst, en kunnen in een korte tijd sterk variëren. Bij een windvlaag kan de luchtdruk snel met een factor 2,5 toenemen, om dan weer in enkele seconden te dalen.

De winddruk op gevel of dak is afhankelijk van de windsnelheid:

$$P_w = c_p \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \quad (5)$$

met:

P_w	winddruk [Pa]
c_p	winddrukcoëfficiënt [-]
ρ	volumieke massa van de lucht [kg/m^3]
v	windsnelheid [m/s]

De winddrukcoëfficiënt is een factor waarmee de druk bepaald uit de windsnelheid op referentiehoogte wordt vermenigvuldigd om de winddruk op gevel of dak te bepalen. Deze factor is ondermeer afhankelijk van de gebouwhoogte, gebouwworm, de terreinruwheid (open terrein, bos, laagbouw, hoogbouw) in de ruimere omgeving, de direct nabij het gebouw gelegen bebouwing en de plaats op de gevel.

Voor een gebouw -aan de windzijde- zal de winddrukcoëfficiënt positief zijn, achter het gebouw zal de winddrukcoëfficiënt negatief kunnen zijn; door de daar heersende onderdruk ontstaat windzuiging.

Het drukverschil over gevel of dak is natuurlijk bovendien afhankelijk van de luchtdruk binnen. Deze kan hoger zijn dan de gemiddelde luchtdruk -wanneer er bijvoorbeeld een raam openstaat aan de zijde van het gebouw waar de wind op staat -de loefzijde, of doordat de ventilatie-installatie een overdruk levert- of lager: wanneer een raam aan de lijzijde van het gebouw openstaat.

Het drukverschil over een gevel zal gewoonlijk in de orde van 10 Pa liggen, maar kan oplopen tot 400 Pa en meer.

Omdat een luchtvolume bij toenemende temperatuur uitzet, zal de volumieke massa van warme lucht minder zijn dan van koude lucht. In een ruimte zal daardoor de warme lucht opstijgen.

Door deze thermische effecten kan ook een drukverschil over de gebouwschil ontstaan.

Voor het drukverschil dat door thermische effecten ontstaat geldt:

$$\Delta P = \rho g h \frac{\Delta T}{T} \quad (6)$$

met:

ΔP	drukverschil [Pa]
ρ	volumieke massa van de lucht [kg/m^3]
g	valversnelling [m/s^2]
h	hoogte [m]
ΔT	temperatuurverschil tussen binnen- en buitenlucht [$^{\circ}\text{C}$] of [K]
T	gemiddelde temperatuur [K]

De in de formule gegeven hoogte is de maat tussen het niveau waar de luchtdruk binnen en buiten gelijk is (ter plaatse van de instroomopening) en de hoogte waarop de luchtdruk wordt gemeten.

Bij een positief temperatuurverschil (binnen warmer dan buiten) wordt boven de instroomopening een positief drukverschil gevonden, onder deze opening is het drukverschil negatief. Daarom zal ook, wanneer in een kruipruimte de luchtdruk niet door de windaanval wordt bepaald, in de winter over de beganegrondvloer een negatief drukverschil worden gevonden; de lucht stroomt van de kruipruimte in de woning.

Boven in de woning zal in de winter, wanneer het binnen warmer is dan buiten, een positief drukverschil worden gevonden; de luchtstroom is van binnen naar buiten. Het drukverschil door thermische trek is klein, en ligt (bij een temperatuurverschil van 20°C) voor een woning met drie bouwlagen in de orde van 1 tot 4 Pa.

6.10. Luchtstroming door constructies: theoretische achtergrond

Door een luchtdrukverschil kan door openingen en poreuze materialen een luchtstroming tot stand komen. Voor dit luchttransport geldt de wet van behoud van massa (de lucht die in het materiaal gaat komt er ook weer uit). Bovendien geldt dat de luchtstroom evenredig is met de drukgradiënt. Analoog aan het warmtetransport geldt voor het luchttransport:

$$Q_i = -k \text{ grad } P \quad (7)$$

met:

Q_i	luchtstroomdichtheid [$\text{kg/m}^2\text{s}$]
k	permeantie of luchtgeleidingscoëfficiënt [s]
P	luchtdruk [Pa]

Zoals bij een samengestelde wand de grootste temperatuurgradiënt optreedt over de materiaallaag met de laagste warmtegeleidingscoëfficiënt, zal het grootste luchtdrukgradiënt optreden over de laag met de laagste luchtgeleidingscoëfficiënt.

Voor het luchttransport door poreuze materialen en openingen - zoals kieren en naden, luchtlekken - kan (8) worden geschreven als:

$$Q_{im} = K \Delta P \quad (8)$$

met:

Q_{im}	luchtstroomdichtheid [$\text{kg/m}^2\text{s}$]
----------	--

K luchtdoorlatendheid [s/m]
 ΔP luchtdrukverschil [Pa]

De luchtdoorlatendheid van poreuze materialen en openingen blijkt afhankelijk te zijn van het drukverschil. Een enkele auteur (Hens [52]) geeft 'principeel':

$$K = a (\Delta P)^b \quad (9)$$

met:

a luchtdoorlatendheid
 b luchtdoorlatendheidsexponent
 en geeft voor de materiaaleigenschappen de waarden van a en b.

Vaker wordt gemakshalve geschreven:

$$Q_l = c (\Delta P)^n \quad (10)$$

met:

Q_l luchtstroomdichtheid [$m^3 / m^2 \cdot s$]
 c luchtdoorlatendheid [$m^3 / (m^2 \cdot s \cdot Pa^{2/3})$] voor bv een gevelconstructie
 c luchtdoorlatendheid [$m^3 / (m^1 \cdot s \cdot Pa^{2/3})$] voor een naad of kier
 n luchtdoorlatendheidsexponent [-]

Waarbij dan geldt dat:

$$\begin{aligned} Q_{lm} &= Q_l \cdot \rho \\ c &= a \cdot \rho^{-1} \\ n &= b + 1 \end{aligned} \quad (11)$$

met:

ρ volumieke massa van lucht: 1,2 [kg/m^3]

Bij laminaire stroming is de exponent n: 1, bij geheel turbulente stroming is de luchtdoorlatendheidsexponent n: 0,5. In grote openingen is de stroming turbulent, in poreuze materialen laminair. In de vele luchtlekken die in gebouwconstructie voorkomen is de stroming niet zuiver laminair of geheel turbulent. Tabel 2 geeft een overzicht van de luchtdoorlatendheidsexponent voor enkele situaties.

Tabel 2: luchtdoorlatendheidsexponent

Soort opening	n
grote opening	0,5
kieren en naden	0,66
poreus materiaal met voegen	0,75
poreus materiaal	1,0

De luchtdoorlatendheidsexponent wordt ook wel stromingsexponent genoemd. Hoewel de luchtdoorlatendheidsexponent dus afhankelijk is van de grootte van de

opening, kan als gemiddelde waarde voor alle lekken in de gebouwschil van de woning een waarde van circa 0,61 aangehouden worden.

De NEN 2686 (luchtdoorlatendheid van gebouwen, meetmethode) geeft een waarde van de stromingsexponent van 0,61.

In NEN 2687 (luchtdoorlatendheid van woningen, Eisen) en SBR 200 (bouwtechnische details voor energiezuinige woningbouw) wordt een waarde van 0,625 aangehouden. De verschillen zijn verwaarloosbaar klein.

6.11. Luchtstroming door constructies: voorbeelden

Luchtstroming door poreuze materialen

Voor materialen waardoor een laminaire stroming optreedt kan gerekend worden met formule (46). Voor veel bouwmaterialen is de luchtdoorlatendheid K onbekend. Ter indicatie wordt in tabel 3 voor een aantal materialen de orde van grootte gegeven.

Tabel 3 Luchtdoorlatendheid K

materiaal	volumieke massa [kg/m ³]	K [s/m]
kalkzandsteen	1700	23. 10 ⁻⁹
baksteen	1900	4. 10 ⁻⁹
grindbeton	2200	1. 10 ⁻⁹
gasbeton	700	15. 10 ⁻⁹
poreuze pleister	700	900. 10 ⁻⁶
hout (loodrecht op vezels)	500	8. 10 ⁻⁹
hout (evenwijdig aan vezels)	500	200. 10 ⁻⁹
mineraalwol	30	125. 10 ⁻⁶

Voor enkele constructies waarin de stroming niet meer als geheel laminair beschouwd mag worden is in tabel 4 de waarde van de luchtdoorlatendheid en de luchtdoorlatendheidsexponent gegeven.

De exponent is voor deze constructies kleiner dan 1, maar groter dan de waarde die voor naden en kieren aangehouden kan worden. De stroming is wat meer laminair dan door kieren.

Tabel 4 Luchtdoorlatendheid gevel- en dakconstructies per m²

constructie	luchtdoorlatendheid c *10 ⁻³ [m ³ /(s.m ² .Pa ^{2/3})]	luchtdoorlatendheids exponent [-]	bron
metselwerk, geventileerde spouw, glaswol, dampremmende laag, beplating	0,18	0,81	[53]
vliesgevel	0,19	0,75	[53]
golfplaten (a.b.c.)	0,6	0,7	[53]

Luchtstroming door openingen: uit literatuur bekende luchtdoorlatendheid

Uit metingen zijn veel waarden van de luchtdoorlatendheid van naden en kieren bekend. Tabel 6 op de volgende pagina geeft een aantal voorbeelden. De luchtstroom door een naad of kier wordt dan

$$Q_k = L \cdot c_k (\Delta P)^n \quad (12)$$

met:

Q_k luchtstroom [m³/s]

L lengte van de kier of naad [m]

ΔP drukverschil [Pa]

c_k luchtdoorlatendheid van de kier of naad [m³/(s.m.Pa^{2/3})]

n luchtdoorlatendheidsexponent [-]

Voor grotere openingen, waar de luchtdoorlatendheid per type opening bekend is, kan de luchtstroom worden berekend uit:

$$Q_o = c_o (\Delta P)^n \quad (13)$$

met:

Q_o luchtstroom [m³/s]

ΔP drukverschil [Pa]

c_o luchtdoorlatendheid van de opening [m³/(s.Pa^{2/3})]

n luchtdoorlatendheidsexponent [-]

Tabel 5 geeft voor enkele openingen de waarde luchtdoorlatendheid van de opening en van de luchtdoorlatendheidsexponent.

Tabel 5: luchtdoorlatendheid openingen per stuk

constructie	luchtdoorlatendheid *10 ⁻³ [m ³ /(s. Pa ^{2/3})]	Luchtdoorlatend- heids-exponent [-]	bron
Schoorsteen open haard (inzet haard)	4,1	0,6	[53]
- klep dicht	8,4	0,5	[53]
- klep open	4,7	0,5	[53]
brievenbus	0,2	0,5	[53]
kanaaldoorvoer door gevel spiralo-buis, Ø 180 mm			
- slecht afgedicht	0,44	0,66	[53]
- afgepurd	0,015	0,66	[53]

Tabel 6: luchtdoorlatendheid naden en kieren per lengte

constructie	luchtdoorlatendheid c _k *10 ⁻³ [m ³ /(s.m.Pa ^{2/3})]	Luchtdoorlatend- heids-exponent [-]	bron
houten buitendeur (enkele deurvleugel)			
- zonder kierdichting	1,32	0,59	[53]
- met kierdichting	0,96	0,64	[53]
houten buitendeur (dubbele deurvleugel)			
- zonder kierdichting	4,17	0,66	[53]
houten draairaam			
- zonder kierdichting	0,23	0,66	[53]
- met kierdichting	0,03	0,66	[53]
houten schuifraam			
- met kierdichting	0,05	0,66	[53]
kozijn - metselwerk (afgekit)	0,0014	0,6	[53]
kozijn - houten gevelement (niet afgekit)	0,05	0,66	[53]
houten gevelementen niet afgekit	0,002	0,66	[53]
houten ramen en deuren			
- zonder kierdichting	0,36	0,67	[54]
- met kierdichting	0,15	0,67	
dubbele ramen en deuren			
- zonder kierdichting	0,24	0,67	[54]
- met kierdichting	0,12	0,67	
binnendeur			
- zonder drempel	2,4	0,67	[54]
- met drempel	0,9	0,67	
ramen en deuren volgens NEN 3661, klasse:			
B15	0,18	0,67	[54]
B40	0,15	0,67	
B100	0,13	0,67	
K15	0,11	0,67	
K40	0,10	0,67	
K100	0,085	0,67	

De in tabel 6 gegeven waarden gelden per strekkende meter.

Ook de SBR-publicaties over luchtdicht bouwen [55] geven waarden voor de luchtdoorlatendheid. Afhankelijk van de kwaliteit van de aansluiting - waarvoor in de publicatie uitvoeringsrichtlijnen zijn gegeven - worden waarden voor de luchtdoorlatendheid c gegeven die zijn weergegeven in tabel 7.

Tabel 7 luchtdoorlatendheid c voor luchtdichtheidsklassen 1 en 2, volgens SBR

constructie	c-waarde luchtdichtheids- klasse 1	c-waarde luchtdichtheids- klasse 2	eenheid
dakvoet	0,10	0,05	dm ³ /sm ¹ Pa ⁿ
nok	0,20	0,10	dm ³ /sm ¹ Pa ⁿ
naden tussen kozijnen en gevelconstructie	0,05	0,025	dm ³ /sm ¹ Pa ⁿ
naden tussen dakramen en dakconstructie	0,10	0,05	dm ³ /sm ¹ Pa ⁿ
naden tussen dakplaten en bouwmuur	0,10	0,05	dm ³ /sm ¹ Pa ⁿ
naden tussen dakplaten onderling	0,01	0,005	dm ³ /sm ¹ Pa ⁿ
naden tussen gevelconstructie en bouwmuur	0,01	0,01	dm ³ /sm ¹ Pa ⁿ
naden tussen gevelconstructie en vloeren	0,02	0,01	dm ³ /sm ¹ Pa ⁿ
draaiende delen in kozijnen (doorgaande kaderdichting, knevelend hang- en sluitwerk)	0,15	0,12	dm ³ /sm ¹ Pa ⁿ
draaiende delen in kozijnen (geen kaderdichting, wel tochtprofielen knevelend hang- en sluitwerk)	0,20	0,15	dm ³ /sm ¹ Pa ⁿ
Openingen in begane grondvloeren (doorvoeren), 44,1 m ² * 0,02 dm ³ /sPa ⁿ	0,88		dm ³ /sPa ⁿ
Openingen in begane grondvloeren (doorvoeren), 44,1 m ² * 0,015 dm ³ /sPa ⁿ		0,66	dm ³ /sPa ⁿ
Openingen in dakconstructie (doorvoeren) 53 cm ²	7,42		dm ³ /sPa ⁿ
Openingen in dakconstructie (doorvoeren) 10 cm ²		1,40	dm ³ /sPa ⁿ

6.12. Luchtstroming door openingen: inschatten van de luchtdoorlatendheid

Sommeren van plaatselijke drukverschillen

De luchtstroming door een opening, naad of kier kan door berekening worden ingeschat. Omdat er een luchtdruk verval over de opening (gezien van binnen naar buiten) optreedt die evenredig is met de luchtweerstand van elk deel van de opening geldt;

$$\Delta P = \Sigma \Delta P_{pl} + \Sigma \Delta P_{wr} \quad (14)$$

met:

ΔP drukverschil over de constructie

$\Sigma \Delta P_{pl}$ som van plaatselijke drukverschillen: verbredingen, vernauwingen en bochten

$\Sigma \Delta P_{wr}$ som van wrijvingsweerstand

De plaatselijke drukverschillen en de wrijvingsweerstand van 'kanalen' zijn ervan afhankelijk of de stroming (zuiver) laminair of (zuiver) turbulent is, of in het overgangsgedrag tussen laminair en turbulent gezien kan worden.

Of de stroming laminair of turbulent is, hangt af van het getal van Reynolds.

Getal van Reynolds

Het dimensieloze getal van Reynolds Re :

$$Re = v \cdot L / \nu \quad \text{of:} \quad Re = \rho \cdot v \cdot L / \eta \quad (15)$$

met:

v luchtsnelheid [m/s]

L karakteristieke lengte [m]

ν kinematische viscositeit [m²/s]

met:

v luchtsnelheid [m/s]

L karakteristieke lengte [m]

η dynamische viscositeit [Ns/m²]

ρ soortelijke massa [kg/m³]

De kinematische viscositeit van lucht is temperatuur afhankelijk:

bij 0 °C: 13,3 · 10⁻⁶ [m²/s],

bij 20°C: 15,1 · 10⁻⁶ [m²/s].

De karakteristieke lengte (of $\xi \cdot \frac{1}{2} \rho v^2$ hydraulische diameter) is afhankelijk van de vorm van de opening:

- voor een cirkelvormige opening: $L = d$ (diameter)

- voor een rechthoekige opening (breed: b , hoog: h): $L = 2bh/(b+h)$

- voor een zeer brede spleet (spouw, breed b): $L = 2b$

Bij een Reynoldsgetal kleiner dan 2500 is er een laminaire stroming, bij een Reynoldsgetal groter dan 3500 is er een duidelijk turbulente stroming.

Plaatselijk drukverschil door vernauwingen, verbredingen en bochten

Voor de plaatselijke drukverliezen door variatie in de afmetingen van de doorstroomopening en door bochten geldt:

$$\Delta P = \zeta \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_l^2 \quad (16)$$

met:

- ζ factor van plaatselijk verlies [-]
- ρ soortelijke massa [kg/m^3]
- v_l (lokale) lichtsnelheid in de opening [m/s]

In Recknagel und Sprenger [56] wordt voor vele situaties de factor voor plaatselijk verlies gegeven, voor turbulente stroming.

Hens [7] geeft voor enkele situaties formules, zie de bijlage.

Bedacht dient te worden dat natuurlijk geldt:

$$Q_l = v \cdot L \cdot b \quad (17)$$

met:

- Q_l de luchtstroom [m^3/s]
- v lichtsnelheid [m/s]
- L lengte van de kier of naad [m]
- b breedte van de kier of naad [m]

De breedte van de kier of naad zal bij vernauwingen en verbredingen niet overal gelijk zijn, de lichtsnelheid zal daardoor ook toenemen na een vernauwing. Er geldt immers de wet van behoud van massa, zodat;

$$v_1 \cdot b_1 = v_2 \cdot b_2 \quad (18)$$

met

- v_1, v_2 lichtsnelheid in sectie 1 resp. sectie 2
- b_1, b_2 breedte van opening in sectie 1 resp. sectie 2

Plaatselijk drukverschil door wrijving

Voor de plaatselijke drukverliezen door wrijving geldt:

$$\Delta P = f \cdot L \cdot d_h^{-1} \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_l^2 \quad (19)$$

met:

- f wrijvingsfactor [-]
- L lengte [m]
- d_h hydraulische diameter [m]
- ρ soortelijke massa [kg/m^3]
- v_l (lokale) lichtsnelheid in de opening [m/s]

Voor elke sectie met de lengte L, waarin de ruwheid en de hydraulische diameter constant zijn kan het drukverlies door wrijving worden bepaald.

De hydraulische diameter is:

- voor een spleet: 2 maal de spleetbreedte
- voor een kanaal met ronde doorsnee: de diameter
- voor een kanaal met een rechthoekige doorsnee: $2 \cdot h \cdot b / (h + b)$, met
 - h: de hoogte van de opening
 - b: de breedte van de opening.

De wrijvingsfactor f, die afhankelijk is van het Reynoldsgetal, is gegeven in onderstaand overzicht.

Reynoldsgetal	f
$Re < 2500$	$96/Re$
$2500 < Re < 3500$	$(0,038(3500-Re) + f_{T, Re = 2500}(Re-2500)) \cdot 10^{-3}$
$Re > 3500$	f_T
$f_T = \{2 \log[-4,793 \cdot \log(10/Re + 0,2 \cdot \varepsilon/d_h)/Re + 0,2698 \cdot \varepsilon/d_h]\}^{-2}$	

De relatieve ruwheid, ε/d_h wordt bepaald door de gemiddelde hoogte van de oneffenheden in de spleet, gedeeld door de spleetbreedte.

6.13. Warmtestroom door luchttransport

De warmtestroom door luchttransport is te schrijven naar analogie van het warmtetransport door geleiding:

$$q = U (T_i - T_e) \quad (20)$$

met

- q warmtestroom
- U warmtedoorgangscoefficiënt
- T_i binnentemperatuur
- T_e buitentemperatuur

Voor de warmtestroom door luchttransport geldt:

$$q = V \cdot \rho c (T_{i0} - T_{is}) \quad (21)$$

met

q	warmtestroom [W]
V	ventilatie debiet [m ³ /s]
ρ	volumieke massa [kg/m ³]
c	soortelijke warmte [J/kgK]
T _i	binnentemperatuur [°C] of [K]
T _e	buitentemperatuur [°C] of [K]

Voor lucht kan worden aangehouden:

ρ = 1,2	kg/m ³
c = 1000	J/kgK

6.14. Luchtdoorlatendheid en de energieprestatie

De energieprestatienorm kent de q_{v10}-waarde: dit is de totale luchtvolumestroom bij een drukverschil van 10 Pa.

Er geldt:

$$q_{v10} = C \cdot \Delta P^{0,625} \quad (22)$$

met:

C	de totale luchtdoorlatendheidscoëfficiënt,
ΔP	het genormeerde drukverschil: 10 Pa,

Zodat:

$$q_{v10} = C \cdot 10^{0,625} = C \cdot 4,22 \quad (23)$$

en:

C: de som van de c-waarde van iedere kier en naad maal de lengte van die kier of naad voor de gehele woning cq het bouwdeel.

In de energieprestatienorm wordt een eis gesteld aan de q_{v10}-waarde, afhankelijk van het ventilatiesysteem. De q_{v10}-waarde is een maat voor de luchtdichtheid van bijvoorbeeld een woning. Deze waarde kan of tevoren worden ingeschat, door de alle naden en kieren te beschouwen: de lengte van de naad of kier wordt opgemeten cq uit de tekening afgeleid, en vermenigvuldigd met de luchtdoorlatendheidscoëfficiënt voor die kier of naad. Zie bijvoorbeeld de SBR-publicatie 'Luchtdicht bouwen, uitvoerings- en ontwerpaanbevelingen' voor aan te houden c-waarden.

De totale luchtdoorlatendheidscoëfficiënt kan gemeten worden: de Nederlandse norm NEN 2686 geeft de te hanteren meetmethode.

Deze meetmethode komt er kortweg op neer dat een woning met een grote ventilator onder overdruk wordt gezet. Er moet tenminste bij 6 verschillende drukverschillen de hoeveelheid lucht die in de woning wordt geblazen worden gemeten. De volumestroom bij ieder van de 6 drukverschillen wordt op dubbel logaritmisch papier

uitgezet, door de 6 punten wordt een rechte lijn getrokken. De luchtvolumestroom bij 10 Pa is de (daadwerkelijk behaalde) q_{v10} -waarde.

6.15. LUCHTDICHTHEIDSKLASSEN

In Nederland wordt de luchtdichtheid uitgedrukt in drie klassen.

Klasse 1: Basis

Klasse 1 wordt als basisklasse aangeduid en moet als ondergrens worden beschouwd. Deze klasse voldoet aan het Bouwbesluit, en heeft verder geen bijzondere eisen. Klasse 1 komt tegenwoordig in de uitvoerende bouw vrijwel niet meer voor.

Klasse 2: Goed

Klasse 2 wordt als goed aangeduid en dient als standaard (ondergrens) voor woongebouwen en woningen. Deze klasse voldoet aan de eisen voor energiezuinig bouwen en wordt gezien als de gewenste huidige standaard. Klasse 2 voldoet in de huidige bouwpraktijk voor nieuwbouwwoningen.

Klasse 3: Uitstekend

Klasse 3 wordt als uitstekend aangeduid en is de ondergrens voor het Passiefhuisconcept en voor energieneutraal bouwen. Om deze klasse te behalen zijn extra eisen nodig. Klasse 3 moet voor Passief Bouwen aangehouden worden.

Relatie tussen luchtdichtheidsklassen en de in de EPC in te voeren $q_{v;10}$ -waarde (bron NEN 2687)

klasse	woningvolume (m ³)		Maximumwaarde voor een woning		Minimumwaarde voor een woning
	groter dan	tot en met	maximale $q_{v;10}$ (dm ³ /s)	$q_{v;10}$ per m ² (dm ³ /s.m ²)	maximale $q_{v;10}$ (dm ³ /s)
1 (basis)		250	100	1,0	30
	250	500	150	1,0	50
	500		200	1,0	50
2 (goed)		250	50	0,6	
	250		80	0,4	
3 (uitstekend)		250	15	0,15	
	250		30	0,15	

Bijlage 1: recent onderzoek

Gedurende de laatste jaren heeft onderzoek met betrekking tot luchtdoorlatendheid zich vooral gericht op luchtdoorlatendheid van woningen. Hoewel dit niet de specifieke doelgroep van de utiliteitsbouw betreft kan er wel geleerd worden uit de conclusies die hier getrokken zijn. In deze bijlage zullen daarom verschillende onderzoeken worden toegelicht op basis waarvan conclusies kunnen worden getrokken met betrekking tot luchtdoorlatendheid in de utiliteitsbouw.

Volgens Johnston en Miles-Shenton waren de woningen uit hun onderzoek met een gepleisterde baksteen spouw constructie het meest luchtdicht. Gemiddeld waren deze een factor 3 of meer luchtdicht dan de woningen die gebouwd waren met een baksteen spouw constructie, afgewerkt met een gipswand aan de binnenzijde. Notie hierbij is dat de woningen met een gepleisterde baksteen spouw constructie uit het onderzoek, appartementen waren. De redenen die gevonden worden voor de toenemende luchtdichtheid liggen dan zowel bij de opbouw van de gevel als het feit dat de woningen appartementen zijn. [15] Olivier deed in 1999 een soortgelijk onderzoek dat ook resulteerde in een betere luchtdichtheid van de gevel bij gepleisterde constructies. De minst luchtdichte woningen waren de woningen met een staal frame constructie. Het is niet terug te leiden of de performance van de staalframe bouw constructies is veroorzaakt door een grotere luchtdoorlatendheid van de staalconstructie of de kwaliteit die geleverd is bij het plaatsen van de gevelconstructie. Hieronder zijn in een tabel de verschillen tussen de gemiddelde luchtdoorlatendheid te zien.

Table 2: Mean air permeability by construction type.

Construction type	Mean Permeability ($\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ @ 50Pa)
Mechanically/manually wet plastered masonry cavity (Developer E)	5.1
Dry-lined masonry cavity (Developers A, B and C)	12.6
Light steel frame (Developer D)	13.5

Tabel 1: gemiddelde luchtdoorlatendheid voor verschillende gevel constructies

Daarnaast kwam in het onderzoek ook naar voren waar de meeste luchtlekken plaatsvonden in zowel de huizen als de appartementen.

Table 4: Main air leakage entry points associated with developers A, B, C and D (all houses)

Elements and junctions	Fixtures and fittings	Service penetrations
Between skirting board and ground floor.	Around kitchen units. Around trickle vents.	Service penetrations in the kitchen and utility room.
Around the stairs.	Around French door and patio doors.	Service penetrations in the toilets, bathroom and en-suite.
Between skirting board and intermediate floor.	Around loft hatch.	Pipework penetrations behind the radiators.
Between flooring panels on the intermediate floor.	Around the bath panel and the shower tray. Through sliding mechanism of patio doors.	Service penetrations in the bathrooms and en-suite. Around electrical fuse box. Around extract fans.

Table 5: Main air leakage path entry points associated with developer E (apartments)

Elements and junctions	Fixtures and fittings	Service penetrations
Ceiling/wall junction in airing cupboard.	Around patio/balcony doors. Around bath panel.	Service penetrations in the kitchen and bathroom. Around purpose provided ventilation openings. Around electrical fuse box. Through spot lights.

Tabel 2: meest voorkomende luchtlekken in de onderzochte woningen

Hieruit kwam naar voren dat de meeste luchtlekken ter plaatse van doorsteken ten behoeve van installatie of ventilatie kanalen voorkwamen.

Weidt heeft 192 beglazing systemen in de praktijk getest in Minnesota (Verenigde Staten) en ondervond dat het type raam de meest bepalende factor was voor de mate van luchtdoorlatendheid. Het materiaal-type van het kozijn of raam maakte hierbij geen significant verschil. De meeste defecten die leiden tot een overmatige luchtdoorlatendheid werden veroorzaakt door discontinuïteit van de tochtstrip, een slechte pasmaat van het kozijn en/of defecte onderdelen. Voor 60% van de onderzochte ramen overschreed de luchtdoorlatendheid test de op voorhand beloofde specificaties van de fabrikant. [22]

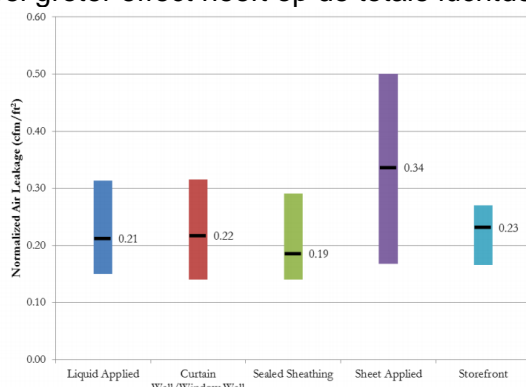
Jones et al. heeft onderzoek gedaan naar gevelsystemen van 31 verschillende commerciële, institutionele en grote residentiële gebouwen in Seattle (Verenigde Staten), waarbij de gevelsysteem worden verdeeld in 5 hoofdklassen [23] :

1. Vliesgevel – overspanning van vloer tot vloer. De verbindingen zijn normaal afgedicht of gevuld met kit.
2. ‘Liquid applied’ (luchtdichte laag aan de buitenzijde) - Het oppervlak en de verbindingen aan de buitenzijde van de binnenwand worden gecoat met een vloeibaar membraan en afgekit.
3. ‘Sheet applied’ (luchtdichte laag aan de buitenzijde) - Het oppervlak aan de buitenzijde van de binnenwand worden afgedekt met een membraan en geseald met tape of kit. Er kan ook sprake zijn van een zelf hechtend membraan.
4. ‘sealed sheeting’ (luchtdichte laag aan de buitenzijde)- Het oppervlak aan de buitenzijde van de binnenwand word afgedekt met een weer bestendig membraan, de aansluitingen tussen de onderdelen van de binnenwand worden geseald met kit.
5. ‘Aluminium vliesgevel systeem’ - Het systeem is voorzien van extra afdichtingen en kit.



Figuur 3 en 4 : Het aanbrengen van het membraam volgens 3 en 4 in de praktijk

In de grafiek hieronder is te zien dat er geen enorm grote verschillen te zien zijn tussen de verschillende systemen wat betreft de luchtdoorlatendheid van de gevel. Daarnaast concludeerde hij dat de kwaliteit van de details en de vakmanschap op de werkplaats een veel groter effect heeft op de totale luchtdoorlatendheid dan het type gevelsysteem.



figuur 5: genormaliseerde luchtdoorlatendheid per systeem, de gemiddelde waarden zijn respectievelijk 0,36; 0,37; 0,32; 0,58; 0,39 m³/h bij een drukverschil van 50 Pa

Shaw en Reardon hebben in 1995 onderzoek gedaan naar 6 kantoor gebouwen in Ottawa (Canada), waarbij eerst de luchtdoorlatendheid van het gebouw is gemeten en daarna een tweede meting is uitgevoerd na een kleine renovatie. De metingen zijn gedaan bij een drukverschil van 50 Pa en beslaan een luchtdoorlatendheid per m² vloeroppervlak. Gebouw A bestaat uit 10 verdiepingen waarbij 38% van de totale gevel uit glas bestaat. De gevelopbouw bestaat uit tegelwerk, 200 mm prefab beton, 50 mm isolatie, een spouw, 150 mm prefab beton en een afwerking laag van pleisterwerk. Ten tijde van de renovatie werd er een nieuwe dampdichte laag aangebracht in combinatie met 100 mm stijve isolatie op de 9^e en 10^e verdieping. De totale luchtdoorlatendheid verbeterde hierdoor van 4,85 L/s.m² naar 3,65 L/s.m².

Voor gebouw B werden alle ramen hersteld en opnieuw gekit. Het totale geveloppervlak van kantoor B bestaat voor 33 % uit ramen. De gevelopbouw bestaat uit 200 mm prefab beton, 50 mm isolatie en 150 mm prefab beton. Dit leidde tot een verbetering van de totale luchtdoorlatendheid van 2,17 naar 1,36 L/s.m².

Voor gebouw D werd een nieuw niet-dragend vliesgevelsysteem geïnstalleerd, 26% van het totale geveloppervlak bestond hierbij uit vliesgevel. De gevelopbouw bestaat uit staalframebouw met 50 mm isolatie. De totale luchtdoorlatendheid werd hierdoor verbeterd van 2,54 naar 1,44 L/s.m².

Voor gebouw E werden alle aansluitingen in de vliesgevel hersteld, echter had dit weinig effect op de totale luchtdoorlatendheid en was er geen sprake van verbetering dan wel verslechtering. De gevelopbouw bestaat uit staalframebouw met 50 mm isolatie.

Voor gebouw F werden geen maatregelen getroffen, echter ging de mate van luchtdoorlatendheid achteruit over tijd. De luchtdoorlatendheid veranderde van 1,73 naar 2,13 L/s.m² in 20 jaar tijd. De gevelopbouw bestaat uit 200 mm prefab beton, 25 mm isolatie en 150 mm prefab beton.

Gebouw G werd voorzien van een nieuwe dakconstructie dat de luchtdoorlatendheid beïnvloedde van 2,49 L/s.m² naar 1,80 L/s.m². De gevelopbouw bestaat uit 200 mm prefab beton, 25 mm isolatie en 150 mm prefab beton.

Concluderend kan uit dit onderzoek worden gesteld dat bij renovatie van bestaande bouw in het geval van een vliesgevel, de luchtdoorlatendheid verbeterd kan worden door het plaatsen van een nieuw vliesgevel systeem. Het tijdig herstellen van verouderde verbindingen en bevestigingen zorgt ervoor dat de luchtdoorlatendheid over de jaren niet achteruit gaat. Betreft bestaande bouw met een prefab beton constructie zal het vervangen van de dampdichte laag het grootste effect hebben op de luchtdoorlatendheid. De luchtdoorlatendheid zal over de jaren verslechteren door het verval van de prestatie van materialen over de tijd.

Shaw et al. hebben ook onderzoek verricht naar een 5 verdieping tellend appartementencomplex. De gevelopbouw van dit complex is 80 mm baksteen, 25 mm spouw, 200 mm beton blokken, 38 mm glasfiber isolatie in metal-stud, dampdichte laag, 12 mm gips plaat. De totale luchtdoorlatendheid van het gebouw is 3,1 L/s.m² vloeroppervlak bij een drukverschil van 50 Pa. De metingen van de verschillende verdiepinglagen wezen uit dat de compositie van ramen en deuren de meest bepalende factor is voor de luchtdoorlatendheid. De verdiepingen met meer ramen en deuren hadden een hogere luchtdoorlatendheid dan de andere verdiepingen. [25]

Rousseau (1998) heeft onderzoek gedaan naar een aantal verbindingselementen in de gevel en de daarbij behorende luchtdoorlatendheid in de praktijk. De resultaten van dit onderzoek zijn in onderstaande tabel weergegeven. [26]

Verbindingselement	Luchtdoorlatendheid (in m ³ /h.m) bij een drukverschil van 50 Pa
Rug vulling gesloten cel 2 cm in 1,3 cm aansluiting	0.0777
Rug vulling gesloten cel 2,5 cm in 1,3 cm aansluiting	0.0794
Pvc open cel schuimrubber afdichting 1,6 cm in 1,3 cm aansluiting	21.86
Pvc open cel schuimrubber afdichting 1,6 cm in 0,9 cm aansluiting	11.78
Minerale wol 2,5 cm in 1,3 cm aansluiting (50% verdichting)	5.05
Minerale wol 5 cm in 1,3 cm aansluiting (70% verdichting)	1.743
Combinatie van polyethyleen en minerale wol (50% verdichting)	0.5647
EPDM afdichting	0.0787
1,3 cm PUR afsluiting tussen een hout-aluminium aansluiting	0.0599
Damp en luchtdichte tape op een gipsplaat aansluiting	0
Damp en luchtdichte tape op een geperforeerde PE membraam verbinding	0.5276
Acrylaatkit voegafdichting zowel voor interieur als exterieur gebruik, inclusief rug vulling	0

Tabel 3: luchtdoorlatendheid van verbindingselementen in de gevel in de praktijk

Uit dit onderzoek kwam naar voren dat het kiezen van een juiste maat afdichting voor naden en kieren van groot belang is en dat bijvoorbeeld een rug vulling met te grote of te kleine afmetingen ten opzichte van de te sluiten naad of kier erg negatieve gevolgen kan hebben voor de luchtdoorlatendheid.

Yuill deed ten behoeve van te hoog gemeten waarde Radon in woningen, onderzoek naar de luchtdichtheid van keldervloeren. Uit laboratorium testen bleek hierbij dat een combinatie van Poly Ethyleen met de betonnen keldervloeren leidde tot de hoogste luchtdichtheid. In onderstaande tabel staat een overzicht van de gevonden luchtdichtheidswaarden voor verschillende toepassingen van het Poly Ethyleen membraam. [31]

Vloeropbouw	R (Pa s/L)	C (L/Pa s)
Geen PE toegepast	25	4.0E-2
PE membraam toegepast	610	1.6E-3
Gekit PE membraam 1	9200	1.1E-4
Geperforeerd PE membraam	11000	9.1E-5
Gekit PE membraam 2	42000	2.4E-5

De conclusies die hieruit naar voren kwamen zijn ten eerste dat perforaties in de PE laag geen problemen veroorzaken voor de luchtdoorlatendheid. Daarnaast heeft Poly Ethyleen een significant effect op de luchtdoorlatendheid. Echter is het afkitten wel noodzakelijk om een goede luchtdichtheid te garanderen.

Litvak en Boze hebben onderzoek verricht naar 12 utiliteitsgebouwen in Frankrijk, in tegenstelling tot voorgaand genoemde onderzoeken vonden zij geen overeenkomst tussen de luchtdoorlatendheid waardes en de verschillende gevelconstructies (staalframebouw, baksteen i.c.m. beton, houtskeletbouw). Wel vonden ze een overeenkomst tussen de activiteiten die in de gebouwen plaats vinden en de luchtdoorlatendheid: hotels en onderwijs gebouwen leiden vaker tot betere luchtdoorlatendheid waardes dan kantoren en bedrijfshallen. Zij verklaren dit verband doordat de plafonds van kantoren en bedrijfshallen minder vaak worden afgewerkt, wat leidt tot een hogere luchtdoorlatendheid.

Emmerich en Persely hebben een onderzoek verricht naar 200 kantoorgebouwen in de Verenigde Staten. Zij vonden hierbij een relatie tussen de luchtdichtheid en het aantal verdiepingen van een kantoorgebouw, des te meer verdiepingen er waren, des te lager de luchtdoorlatendheid waarde van de gevel was. Daarnaast konden zij een relatie leggen tussen de luchtdoorlatendheid en het klimaat waarin de kantoorgebouwen stonden, in koude droge klimaten bleek de luchtdoorlatendheid waarde kleiner dan in warmere klimaten. Er was geen verband te vinden tussen het jaar waarin de kantoren gebouwd waren (over een periode van 1955 tot 2005) en de luchtdoorlatendheid. [32]

Blomsterberg en Burke hebben onderzoek verricht naar de luchtdichtheid van utiliteitsbouw. [33] De resultaten (bij 50 Pa) zijn weergegeven in navolgende tabel.

Type gebouw	Bouw-jaar	Gevel oppervlak	luchtdichtheid in L/s.m ²	Voornaamste luchtlekken	Type gevel
Winkel	2011	18,721	0.18	Betonnen verbindingen, buitendeuren	Prefab beton
Sportcentrum	2011	6,616	0.44	Buitendeuren	Prefab beton
Kantoor	2008	2,580	0.34	Entree, buitendeuren en ramen	Staalframebouw met aluminium en kunststof gevelelementen
Kantoor	2010	-	0.27	Verbinding tussen vloer en wanden	Prefab beton
Kantoor	2007	8,574	0.7	Verbinding tussen vloer, gevelelementen en dak	Staalskeletbouw, prefab vliesgevel
Industrie	2009	1,269	0.26	Buitendeuren, verbinding tussen vloer en gevel	Staalframebouw
Opslag, kantoor	2011	10,034	0.29	Buitendeuren	
Supermarkt	2011	3,995	0.62	Entree, ramen, aansluiting staalframe op gevel blokken 'geëxpandeerd klei'	staalframebouw
School	2011	2,607	0.13	-	Staalframebouw
School	2008	3,335	0.41	-	Staalframebouw
School	2008	5,180	0.21	-	Staalframebouw
School	2009	2,832	0.27	Buitendeuren	Staalframebouw
School	2008	2,414	0.26		Staalframebouw
School	2010	2,460	0.23	Buitendeuren, ramen	Staalframebouw
School	2010	2,182	0.57		Staalframebouw
School	2010	2,054	0.38	buitendeuren	Beton in combinatie met staalskeletbouw
School	2010	5,513	0.09	Niet aanwezig	Staalframebouw
School	2011	2,520	0.28	buitendeuren	Houtskeletbouw
School	2011	4,973	0.17	Buitendeuren	Staalframebouw
School	2011	4,973	0.48	Dak, ramen, deuren	
School	2010	2,295	0.4	Verbinding gevel / plafond	Prefab beton
School	2011	4,822	0.16		Staalframebouw
School	2010	5,641	0.88		Staalframebouw
Verzorgings-tehuis	2012	4,081	0.20	buitendeuren	Prefab beton
Verzorgings-tehuis	2011	3,900	0.14		Baksteen i.c.m. betonnen vloer en dak

Tabel 4: overzicht van de verschillende gemeten utiliteitsgebouwen en de daarbij behorende gemeten luchtdoorlatendheid

Hieruit kwam naar voren dat er geen directe relatie gevonden kon worden tussen de luchtdoorlatendheid en de functie van een gebouw, het bouwjaar en de grootte van het geveleppervlak.

Voorlopige conclusies met betrekking tot recent onderzoek

Gebaseerd op voorgaande onderzoeken kan er geconcludeerd worden dat er geen directe relatie gevonden kan worden tussen de luchtdoorlatendheid en het bouwjaar, dan wel tussen de luchtdoorlatendheid en de functie van een gebouw. De luchtdoorlatendheid is in grotere mate afhankelijk van de grootte van het geveleppervlak, maar heeft de grootste afhankelijkheid van het gekozen gevelsysteem en de uitvoering van de bouw. Luchtlekken ontstaan voornamelijk rondom aansluitingen ter plaatse van ramen, deuren en vliesgevels. Des te minder aansluitingen er in het gevel oppervlak voorkomen, des te kleiner de kans wordt dat de op voorhand gespecificeerde luchtdoorlatendheid niet gehaald kan worden.

Bijlage 2 Normen, voorschriften en meetmethoden

In Nederland zijn er verschillende normen en voorschriften voor handen die inzicht geven in de eisen voor de luchtdoorlatendheid van de gevel. Echter leiden de verschillende eisen en voorschriften tot een grote onduidelijkheid. Om inzicht te krijgen in de normeringen en eisen die van toepassing zijn zal in dit hoofdstuk een duidelijk overzicht worden gemaakt. Hierin zal een onderscheiding aangebracht worden tussen normeringen die eisen, meetmethodes of berekeningen voorschrijven.

Eisen

A. Maximale eis conform bouwbesluit 2012, afdeling 5.1, artikel 5.4

Het bouwbesluit 2012 schrijft voor dat de volgens NEN 2686 bepaalde luchtvolumestroom van het totaal aan verblijfsgebieden, toiletruimten en badruimten van een gebruiksfunctie niet groter mag zijn dan 0,2 m³/s. In het bouwbesluit wordt verder gesproken over een q_{v,10}, waarde, dit is de luchtvolumestroom die ontstaat via de kieren en naden tussen de verschillende bouwdelen in de omhulling van een gebouw bij een drukverschil van 10 Pascal voor een gebouw van 500 m².

B. Maximale eis conform bouwbesluit 2012, afdeling 3.5, artikel 3.21

Een constructie die de scheiding vormt tussen een verblijfsgebied, een toiletruimte of een badruimte, en een kruipruimte, inclusief van de op die constructie aansluitende delen van andere constructies, voor zover die delen van invloed zijn op de specifieke luchtvolumestroom naar het verblijfsgebied, de toiletruimte of de badruimte, heeft een volgens NEN 2690 bepaalde, specifieke luchtvolumestroom van ten hoogste 20*10⁻⁶ m³/(m².s).

C. NEN 2687:1989 luchtdoorlatendheid van woningen, eisen, artikel 5

De NEN 2687 gaat uit van verschillende luchtdichtheidsklassen voor woningen, om de maximale q_{v10} te bepalen. De q_{v10} is de luchtvolumestroom die ontstaat via de kieren en naden tussen de verschillende bouwdelen in de omhulling van een gebouw bij een drukverschil van 10 Pascal. De luchtdichtheidsklassen zijn hieronder beschreven.

Klasse	Woningvolume in m ³		Maximale q _{v10} [dm ³ /s]	q _{v10} /m ² dm ³ /(s*m ²)
	Groter dan	Tot en met		
1 basis	-	250	100	1,0
	250	500	150	1,0
	500	-	200	1,0
2 goed	-	250	50	0,6
	250	-	80	0,4
3 uitstekend (aanvulling betreft passiefhuis eis)	-	250	15	0,15
	250	-	30	0,15

Tabel 5 : luchtdichtheidsklassen voor woningen conform NEN 2687

D. BREEAM

De q_{v,10} moet overeenkomen met de gestelde eis in de EPC-berekening, voor ruimtes waarvoor geen EPC-eis hoeft te worden gedaan geldt:

Luchtdoorlatendheid per m² geveloppervlak (m³/h.m²) bij 50 Pa (q₅₀)

Industriële gebouwen	2,0
Koel/vrieshuizen	0,2

Meetmethodes

E. NEN 2686: luchtdoorlatendheid van gebouwen, meetmethode

In deze norm wordt een meetmethode voor de bepaling van de luchtdoorlatendheid van gebouwen of van gedeelten van gebouwen beschreven.

F. NEN 8087:2001 ventilatiemethoden van gebouwen, bepalingsmethode voor bestaande gebouwen, artikel 4.1.3

In deze norm wordt een meet en bepalingsmethode gegeven waarbij het verband tussen de luchtvolumestroom en het luchtdrukverschil wordt weergegeven door:

$$qv = C \times \Delta p^n$$

Hierin moeten de C- en n-waarden met een luchtdoorlatendheidsmeting worden vastgesteld. Bij verschillende luchtdrukverschillen over de ventilatiecomponent wordt de luchtvolumestroom door het gevel-element bepaald. Hiermee ligt de druk/volumestroom karakteristiek vast. De meetmethode komt overeen met de meetmethode beschreven in NEN 2686.

G. NEN 1087:2001 nl ventilatie van gebouwen: bepalingsmethode voor nieuwe gebouwen, artikel 5.1.3

De NEN 1087 gaat uit van hetzelfde beginsel als de NEN 8087. De C- en n-waarden moeten ook hier met een luchtdoorlatendheidsmeting worden vastgesteld. Bij verschillende luchtdrukverschillen over de ventilatiecomponent wordt de luchtvolumestroom er doorheen bepaald. Hiermee ligt de druk/volumestroomkarakteristiek vast. De meetmethode komt overeen met de meetmethode beschreven in NEN 2686.

H. NEN-EN 12207:1999 Ramen en deuren - luchtdoorlatendheid – classificatie

Hierin wordt de luchtdoorlatendheid, na beproeving conform NEN-EN 1026, per m¹ naad en m² oppervlak grafisch weergegeven en wordt het gevelement geklasseerd in klasse 1, 2, 3 of 4 van NEN-EN 12207.

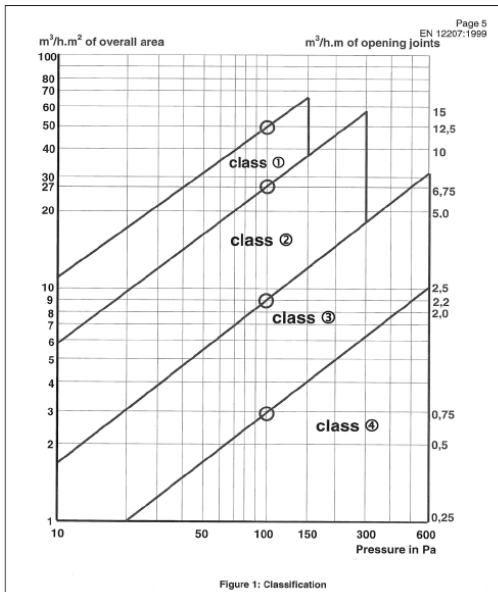
Het beproefde element wordt hierbij geklasseerd op basis van het oppervlak en de lengte van de sluitnaad.

- Als beiden in dezelfde klasse vallen wordt het gevelement geklasseerd in deze klasse
- Als er 1 klasse verschil is wordt het gevelement geklasseerd in de beste klasse
- Als er 2 klassen verschil is wordt het gevelement geklasseerd in de tussenliggende klasse
- Als er meer dan 2 klassen verschil is kan het gevelement niet geklasseerd worden

Figuur 6: Luchtdichtheidsklassen ramen en deuren conform NEN 12207

I. NEN-EN 12152:2002 Vliesgevels - luchtdoorlatendheid-prestatie eisen en classificatie

Volgens deze norm wordt de luchtdoorlatendheid van vliesgevels bepaald met behulp van een beproeving in een proefkast volgens NEN-EN 12153. De resultaten van de beproeving worden geclassificeerd volgens NEN-EN 12152. De classificatie (tabel 2) is gebaseerd op de

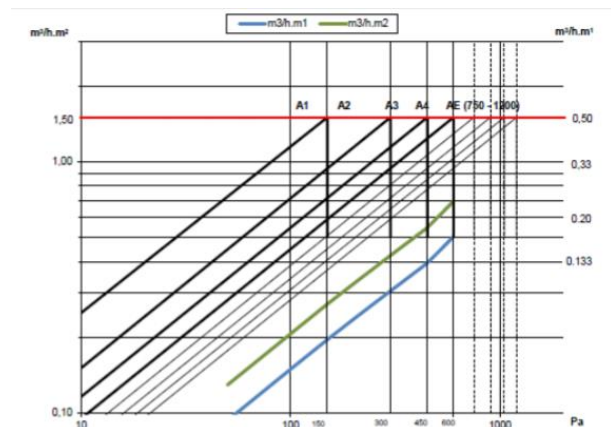


luchtdoorlatendheid gerelateerd aan het oppervlak ($m^3/h.m^2$) en de naadlengte ($m^3/h.m$). In onderstaande tabel wordt per klasse de luchtdoorlatendheid aangegeven die maximaal op mag treden bij die klasse behorende testdruk. De naadlengte wordt gezien als: 1x de glasomtrek. Het testobject behoort tot een bepaalde klasse als geen enkel testresultaat de bovenste grenswaarde overschrijdt.

Klasse	Luchtdoorlatendheid in $m^3/m^2.h$	Luchtdoorlatendheid in $m^3/m.h$	Maximale testdruk in Pascal
A1	1,5	0,5	150
A2	1,5	0,5	300
A3	1,5	0,5	450
A4	1,5	0,5	600
AE	1,5	0,5	> 600

Tabel 7: klassen volgens NEN-EN 12152 voor vliesgevels

Klasse bij een drukverschil van 10 Pa	Luchtdoorlatendheid in $m^3/m^2.h$
A1	0.28
A2	0.18
A3	0.12
A4	0.09
AE	Afhankelijk van de maximale testdruk



Tabel 8 en figuur 7: klassen omgerekend naar een drukverschil van 10 Pa

J. Handboek bouwfysische kwaliteit voor kantoren

In het handboek bouwfysische kwaliteit voor kantoren wordt uitgegaan van een bepaling van de luchtdoorlatendheid volgens NEN 2686. Er dient hierbij bij minimaal 5 drukverschillen over de uitwendige scheidingsconstructie gemeten te worden. De meetresultaten worden na regressieanalyse in een dubbel-logaritmische grafiek uitgewerkt, waarna het meetresultaat bij 10 Pa afgelezen kan worden.

De bijbehorende toetsingsdrukken zijn opgenomen in tabel 9.

Klasse ¹⁾	Gebouwhoogte [m]	Toetsingsdruk [Pa]
B15	15	150
B40	40	200
B100	100	250
K15	15	300
K40	40	350
K100	100	400

1) Klasse K dient te worden toegepast in de volgende gebieden: provincie Noord-Holland, Waddengebied, IJsselmeergebied en een zone van 2,5 km vanaf het Noordzeestrand. Klasse B dient te worden toegepast in het overige gebied van Nederland

Tabel 9 : toetsingsdrukken volgens het handboek bouwfysica

De gemeten waarden resulteren hierna in een prestatieniveau, tabel 10.

Prestatieniveaus:

	Klasse prestatieniveau		
	Basis	Goed	Uitstekend
Luchtdoorlatendheid (= luchtdoorlatendheidscoëfficiënt)	Luchtvolumestroom bij gevel als geheel: • Gevel met te openen ramen: $1,8 \cdot 10^{-3}$ m ³ /s·m ² geveloppervlakte • Zonder te openen ramen: $0,5 \cdot 10^{-3}$ m ³ /s·m ² geveloppervlakte Afzonderlijke delen, per kierlengte: • C _{vast} = 0,0025 dm ³ /s·m ¹ • C _{draaiend} = 0,12 dm ³ /s·m ¹ • C _{dakrand} = 0,0050 dm ³ /s·m ¹ • C _{tand} = 0,0050 dm ³ /s·m ¹	Luchtvolumestroom bij gevel als geheel: • Gevel met te openen ramen: $1,44 \cdot 10^{-3}$ m ³ /s·m ² geveloppervlakte • Zonder te openen ramen: $0,4 \cdot 10^{-3}$ m ³ /s·m ² geveloppervlakte Afzonderlijke delen, per kierlengte: • C _{vast} = 0,0020 dm ³ /s·m ¹ • C _{draaiend} = 0,08 dm ³ /s·m ¹ • C _{dakrand} = 0,0040 dm ³ /s·m ¹ • C _{tand} = 0,0040 dm ³ /s·m ¹	Luchtvolumestroom bij gevel als geheel: • Gevel met te openen ramen: $1,15 \cdot 10^{-3}$ m ³ /s·m ² geveloppervlakte • Zonder te openen ramen: $0,3 \cdot 10^{-3}$ m ³ /s·m ² geveloppervlakte Afzonderlijke delen, per kierlengte: • C _{vast} = 0,0015 dm ³ /s·m ¹ • C _{draaiend} = 0,06 dm ³ /s·m ¹ • C _{dakrand} = 0,003 dm ³ /s·m ¹ • C _{tand} = 0,0030 dm ³ /s·m ¹

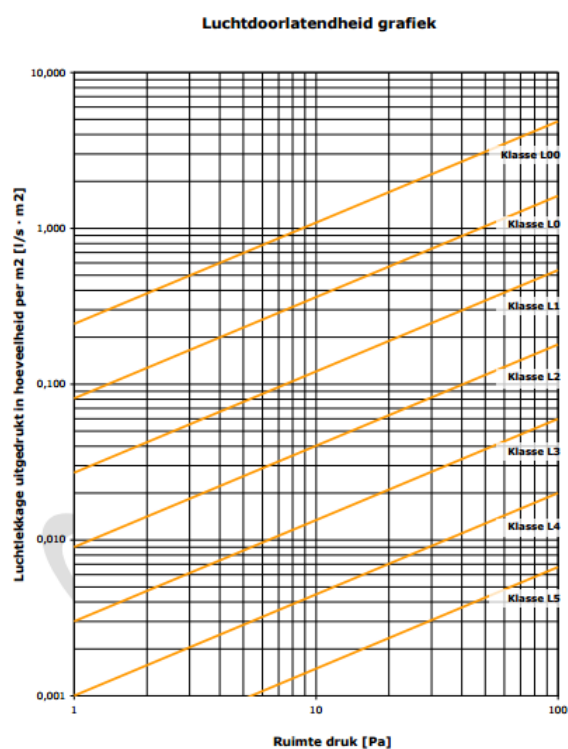
tabel 13 | Prestatieniveaus luchtdoorlatendheid.

Bepalingsmethode: volgens NEN 2686 "Luchtdoorlatend van gebouwen."

Tabel 10 : toetsingsdrukken volgens het handboek bouwfysica

K. VCCN Directive 10

Deze richtlijn is ontwikkeld voor het vaststellen van de luchtdoorlatendheid van de schil van schone ruimten en gecontroleerde omgevingen. De classificatie is ingedeeld op basis van lekclassen. Met een lekklasse wordt een maximale lekfactor gegeven, door middel van een berekening leidt deze lekfactor tot een maximaal toelaatbare hoeveelheid leklucht per m2 schiloppervlak bij een gegeven drukverschil. De testprocedure en meting wordt uitgevoerd per ruimte conform NEN-EN 13829.



L. NEN-EN 12426 Industrie, bedrijfs- en garagedeuren en poorten - Luchtdoorlatendheid – Classificatie

Voor poorten en industriële deuren is een classificatie aanwezig waarbij de luchtdichtheidsklasse van een poort wordt gebaseerd op de luchtdoorlatendheid per oppervlakte eenheid uitgedrukt in m³/h.m² en de oppervlakte van de structurele opening van de poort. De luchtdichtheidsklassen worden hieronder aangegeven

Klasse	Luchtdoorlatendheid ΔP bij een overdruk van 50 Pascal [m ³ /m ² .h]
0	Niet gespecificeerd
1	24
2	12
3	6
4	3
5	1,5
6	Excellent, er is hierbij een overeenkomst tussen producent en opdrachtgever benodigd.

Tabel 11: Klassen voor industrie en bedrijfspoorten conform NEN-EN 12426

Literatuur

1. "Luchtdicht Bouwen Met Kanaalplaatvloeren". VBI., 2016. Web. 27 Sept. 2016.
2. Krstić, Hrvoje et al. "Application Of Neural Networks In Predicting Airtightness Of Residential Units". *Energy and Buildings* 84 (2014): 160-168. Web.
3. "Waarom Luchtdicht Bouwen? - Nieman Raadgevende Ingenieurs". *Nieman Raadgevende Ingenieurs.*, 2016. 27 Sept. 2016.
4. "Eisen Aan Luchtdicht Bouwen". *Luchtdichtbouwen.nl.*, 2016. Web. 27 Sept. 2016.
5. Bouwbesluit 2012, afdeling 5.1, artikel 5.4
6. NEN normering, NEN-EN 12152 Vliesgevels - Luchtdoorlatendheid-Prestatie Eisen En Classificatie. 2012.
7. NEN normering, NEN-EN 12207 Ramen en Deuren - Luchtdoorlatendheid – Classificatie. 1999
8. "Basismodule Luchtdichtheid". *Klimapedia.*, 2016. Web. 27 Sept. 2016.
9. "Wat Is Een Luchtdicht Gebouw? - Sbrcurnet". *Sbrcurnet.nl.*, 2016. Web. 27 Sept. 2016.
10. "Fire Seminar". *Nieman adviseurs.*, 2016. 27 Sept. 2016.
11. Jokisalo, Juha et al. "Building Leakage, Infiltration, And Energy Performance Analyses For Finnish Detached Houses". *Building and Environment* 44.2 (2009): 377-387.
12. Pan, Wei. "Relationships Between Air-Tightness And Its Influencing Factors Of Post-2006 New-Build Dwellings In The UK". *Building and Environment* 45.11 (2010): 2387-2399. Web.
13. Kraus, M. and D. Kubečková. "Airtightness Of Energy Efficient Buildings". *GSTF Journal of Engineering Technology* 2.2 (2013)
14. Universiteit Gent, Waterdichtheid Van Buitenschrijnwerk. Gent: Universiteit Gent, 2008.
15. Johnston, D. and Miles-Shenton, D. (2009) Airtightness of UK dwellings and buildings. In: Dainty, A.R.J. (Ed) Procs 25th Annual ARCOM Conference, 7-9 September 2009, Nottingham, UK, Association of Researchers in Construction Management, 271-80
16. Vereniging Leveranciers luchttechnische apparaten, "VLA Methodiek Gelijkwaardigheid Voor Energiebesparende Ventilatie Oplossingen In Woningen". 1.1 (2013)
17. Hens, Hugo S.L.C. "The Vapor Diffusion Resistance And Air Permeance Of Masonry And Roofing Systems". *Building and Environment* 41.6 (2006): 745-755.
18. Kuindersma, P and H.M Nieman. *Luchtdicht Bouwen*. Rotterdam: SBRCURnet, 2013.
19. OLIVIER, D. (1999) Air Leakage Standards. Unpublished DTLR Report
20. Morgan, Chris. "Design And Detailing For Airtightness". *SEDA Design guides for Scotland*. 2016. Web. 13 Oct. 2016.
21. Testing buildings for air leakage. CIBSE Technical Memorandum TM23, London, 2000. Building energy code. Part 2 (a) Calculation of energy demands and targets for newly built, heated and naturally ventilated buildings
22. Weidt, J, J.L. Weidt, and S. Selkowitz. "Field Air Leakage Of Newly Installed Residential Windows". (1998)
23. Jones, Denali, Bailey Brown, and Tony Thompsom. "Building Enclosure Airtightness Testing In Washington State – Lessons Learned About Air Barrier Systems And Large Building Testing Procedures". *ASHRAE annual conference building enclosure airtightness* (2014)
24. Shaw, C.Y. and J.T. Reardon. "Changes In Airtightness Levels Of Six Office Buildings". *Airflow performance of building envelopes, components and systems* 1255 (1995): 47-57.
25. Shaw, C.Y., R.J. Magee, and J. Rousseau. "OVERALL AND COMPONENT AIRTIGHTNESS VALUES OF A FIVE-STORY APARTMENT BUILDING". *ASHRAE transactions* 97.2 (1991): 347-353.
26. "Airtightness Tests On Components Used To Join Different Or Similar Materials Of The Building Envelope". *Air ins inc. Technical series* (1998): 98-108.

27. Delmotte, C. & Laverge, J. (2011). Interlaboratory tests for determination of repeatability and reproducibility of buildings airtightness measurements. Belgian Building Research Institute.
28. Kim, A.K. & Shaw, C. Y. (1986). Seasonal variation in airtightness of two detached houses. Measured Air Leakage of Buildings. National Research Council Canada
29. Persily, A. (1982). Repeatability and Accuracy of Pressurization Testing. Proceedings of the ASHRAE/DOE Conference on Thermal Performance of the Exterior Envelope of Buildings.
30. Dickinson, J.B. & Feustel, H.E. (1986). Seasonal variation in effective leakage area. Lawrence Berkeley Laboratory, University of California
31. Yuill, G.K. "Airtightness Of Concrete Basement Slabs". Research Highlights Technical series.00-130 (2000)
32. Emmerich, Steven. J. and Andrew. K. Persely. "Airtightness Of Commercial Buildings In The U.S.". Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology (2005)
33. Blomsterberg, Ake and Stephen Burke. "AIRTIGHTNESS OF OFFICE AND EDUCATIONAL BUILDINGS IN SWEDEN – MEASUREMENTS AND ANALYSES". AIVC-tightvent (2012)
34. Van Den Bossche, Nathan et al. "Airtightness Of The Window–Wall Interface In Cavity Brick Walls". Energy and Buildings 45 (2012)
35. Hurel, Nowlenn et al. "Contribution To The Wooden-Frame Wall Assemblies Airtightness Tests : A Three-Scale Laboratory Study". Clima 2016 - Proceedings Of The 12Th REHVA World Congress: Volume 2. Aalborg university, department of civil engineering, 2016.
36. Relander, Thor-Oskar, Jan Vincent Thue, and Arild Gustavsen. "Air Tightness Performance Of Different Sealing Methods For Windows In Wood-Frame Buildings". SINTEF strategic institute project "Climate Adapted Buildings"
37. Universiteit Gent,. "Webinar Tightvent Europe". Building Airtightness Solutions: Recent Research and Characterisation of Sealants and Tapes.
38. Relander, Thor-Oskar, Bjørnar Heiskel, and John Sølve Tyssedal. "The Influence Of The Joint Between The Basement Wall And The Wood-Frame Wall On The Airtightness Of Wood-Frame Houses". Energy and Buildings 43.6 (2011): 1304-1314.
39. Sandberg, Per Ingvar and Eva Sikander. "Airtightness Issues In The Building Process". Swedish National Testing and Research Institute (2006)
40. NEN 2686:1988/A2:2008 nl,. Luchtdoorlatendheid Van Gebouwen - Meetmethode. NEN.
41. Genge, Colin. "Towards Optimal Airtightness Performance 12-13 October 2011, Brussel, Belgium". 32Nd AIVC Conference. Everson: AIVC.
42. Energievademeccum. 3rd ed. Boxtel: Aeneas, uitgeverij van vakinformatie, 2010.
43. VCCN projectgroep PG-15,. RICHTLIJN VOOR HET CLASSIFICEREN EN TESTEN VAN LUCHTDOORLATENDHEID VAN DE SCHIL VAN SCHONE RUIMTEN EN GELIJKSOORTIGE GECONTROLEERDE OMGEVINGEN. V2.1. VCCN, 2015.
44. van den Bossche, Nathan and Bart Desanghere. "BUITENSCHRIJNWERK CRUCIAAL VOOR LUCHTDICHTHEID VAN GEBOUWEN". schrijnwerk 178 (2012): 33-35.
45. "CORUS, Creating An Airtight Envelope". 4 Nh2 (2007)
46. "Referentiedetails Zoeken - Sbrcurnet". Sbrcurnet.nl. 27 Feb. 2017.
47. Maessen, Amber. Resultaten Qv;10 Luchtdichtheidsmeting. Arnhem: dGmR, 2016.
48. Wind, Henk. "Niverplast Rndom Duurzaam » Bouwwereld.NI". Bouwwereld.nl. 27 Feb. 2017.
49. "Bouwen Met Staal". Referentiedetails.bouwenmetstaal.nl. 27 Feb. 2017.
50. "Bouwknopen Details". Bouw-energie.be. 27 Feb. 2017.

51. "Archidat Bouwdetails - Utiliteitsbouw - Prefab-Casco - 0303 -". Bouwdetails.bouwformatie.nl. 27 Feb. 2017.
52. Hens, H. Bouwfysica 1, warmte en massatransport. Uitgeverij Acco, Leuven. ISBN 90 334 2757 5
53. Liddament, M.W. Air infiltration Calculation techniques - An Applications guide The Air Infiltration and Ventilation Centre, Berkshire, 1986
54. Jellema, Bouwkunde 7b, Waltman, Delft
55. SBR-publicatie: Engel, J.J. van den; P.J.M. Op 't Veld, SBR 360: Luchtdicht bouwen: uitvoerings- en ontwerpaanbevelingen, Stichting Bouwresearch, ISBN 90-5367-168-4s
56. Recknagel, E. Sprenger. Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik. R. Oldenbourg, München, Wien

Symbolen en indices

b	dikte van de wand	[m]
b	de breedte van de spleet	[m]
c	waterdampconcentratie	[kg/m ³]
d	dikte van de materiaallaag	[m]
d	dikte van materiaallagen tussen vochtfront en oppervlak	[m]
d	diepte van de spleet (gemeten vanaf het oppervlak)	[m]
g	de valversnelling	[m/s ²]
h	de stijghoogte	[m]
h	hoogte van de waterkolom op de te beoordelen positie	[m]
l	lengte van de spleet	[m]
m	massa van de waterdamp	[kg]
n	ventilatievoud [h ⁻¹]	
p _c	de capillaire zuigkracht	[Pa]
q	dampstroom (dichtheid)	[kg/m ² s]
r	de capillairstraal	[m]
t	tijd	[s]
t	tijd waarna water de andere zijde van de spleet bereikt	[s]
v	luchtsnelheid [m/s]	
w	stromingsweerstand van het materiaal	[Pa.s/m ²]
A	oppervlak	[m ²]
A	de waterabsorptie coëfficiënt	[kg / (m ² / s ^{0.5})]
B	waterpenetratie coëfficiënt	[m/ s ^{0.5}]
D _w	de vochtvereffeningscoëfficiënt	[m ² s]
M	massa van het opgezogen water	[kg/ m ²]
P	waterdampspanning	[Pa]
P'	verzadigingsdampspanning	[Pa]
P''	de verzadigings dampdruk boven de capillair	[Pa]
Q	waterstroom door de spleet	[kg/s]
R	gasconstante = 462	[J/(kgK)]
R _d	dampdiffusieweerstand (dampspanning)	[m/s]
T	temperatuur [K]	
V	volume	[m ³]
X	plaats van vochtfront vanaf het vlak van watertoevoer	[m]
Z _d	dampdiffusieweerstand (concentratie)	[s/m]
α	warmteoverdrachtscoëfficiënt	[m ² K/W]
β	waterdampoverdrachtscoëfficiënt	[s/m]
δ _l	waterdampgeleidingscoëfficiënt	[s]
ρ	de soortelijke massa	[kg/m ³]
σ	oppervlaktespanning	[J/m ²] of [N/m].
φ	relatieve luchtvochtigheid	[%]
μ	dampdiffusieweerstandsgetal	[-]
ς	factor van plaatselijk verlies	[-]
ψ	watergehalte [m ³ / m ³]	
ν	kinematische viscositeit	[m ² /s]
η	dynamische viscositeit	[Ns/m ²]
φ	warmtebron	[W/m ³]
λ	warmtegeleidingscoëfficiënt	[W/mK]

λ	golflengte	[m]
σ	constante van Stefan-Boltzmann ($5,76 \cdot 10^{-8}$)	[W/(m^2K^4)]
φ	blikfactor voor straling	[-]
ΔP	de uitwendige kracht	[Pa]
ΔP	dampdruk verschil	[Pa]
ΔP	drukverschil	[Pa]
Δc	waterdampconcentratie-verschil	[kg/m ³]

indices

a	buiten (in c_a)
b	barometrische (in: P_b)
c	kritisch (in: ψ_c)
c	convectie (in: α_c)
d	van samengestelde constructie (in: R_d)
d,i	van een laag (in: $R_{d,i}$)
h	hygroscopisch (in: ψ_h)
i	binnenlucht (in: T_i)
i	binnen (in c_i)
l	'droge' lucht (in: P_l)
m	van een materiaal (in: θ_m)
m	maximaal (in: P_m, c_m)
o	maximaal (in: ψ_o)
o	onttrekking (in G_o)
p	productie (in G_p)
si	oppervlak (in: T_{si})
s	straling (in α_s)