

Meten en berekenen luchtdoorlatendheid

Kennisbank Bouwfysica
Auteur: ir. Peter Erdsieck

In de module “Meten en berekenen luchtdoorlatendheid”, wordt ingegaan op de beschikbare methoden voor het meten en berekenen van de luchtdoorlatendheid van ramen, gevelelementen en gebouwen.

De meetmethoden worden met name beschreven in een aantal NEN-normen. Toegelicht wordt hoe de meetmethoden op hoofdlijnen functioneren en op welk moment zij kunnen worden ingezet.

De berekeningsmethoden worden toegelicht in paragraaf 4. Deze methoden zijn van belang omdat hiermee kan worden bepaald binnen welke grenzen het eindresultaat zal liggen.

1 Inleiding

De luchtdoorlatendheid van een gebouw kan zowel gemeten als berekend worden. Meten en rekenen is belangrijk om ervoor te zorgen, dat de eisen die gesteld worden daadwerkelijk leiden tot een betere luchtdichtheid van gebouwen. Aan de ene kant kunnen de resultaten gebruikt worden voor het verbeteren van bij voorbeeld de detaillering. Aan de andere kant vormen de metingen bij oplevering van een gebouw een stimulans voor een zorgvuldige uitvoering.

Van ramen en gevelelementen kan de luchtdoorlatendheid van een proefelement vooraf gemeten worden. Aan de hand van de resultaten kan de detaillering zo nodig worden aangepast. Als sprake is van een groot aantal elementen eist de opdrachtgever soms dat tijdens de productie steekproefsgewijs nog elementen worden getest. Deze laatste testen kunnen uitgevoerd worden door de Stichting Kwaliteitscentrum Gevelelementen (SKG). Van geveldelen die het keurmerk van deze stichting dragen, mag worden aangenomen dat ze voldoen aan de opgegeven kwaliteitscriteria.

Voor een gebouw als geheel kan de luchtdoorlatendheid alleen achteraf - aan het einde van de afbouwfase - worden gemeten. Door het uitvoeren van een dergelijke meting ontstaat wel een compleet beeld. Nadeel van dit type meting is dat deze niet toepasbaar is op grotere gebouwen, zodat in de praktijk alleen woningen als geheel worden gemeten.

Voor het berekenen van de luchtdoorlatendheid is gedetailleerde informatie nodig over toe te passen materialen en detailleringen. Berekenen van de luchtdoorlatendheid is dan ook pas mogelijk in een relatief laat stadium van het ontwerp.

2 Luchtdichtheidscontrole; meetmethoden

Voor het meten van de luchtdoorlatendheid, bestaan verschillende methoden. Iedere methode heeft zijn eigen toepassingsgebied en nauwkeurigheid.

2.1 Laboratoriummeting luchtdoorlatendheid

Het nadeel van laboratoriummetingen is dat wordt gemeten onder ideale omstandigheden, die niet overeenkomen met de omstandigheden in de praktijk. Gevolg hiervan is dat de praktijkresultaten nagenoeg altijd minder goed zijn dan de resultaten van laboratoriummetingen. Echter, door vooraf te meten en zo nodig de detaillering aan te passen, wordt de kans op structurele fouten wel aanzienlijk verkleind. Het uitvoeren van laboratoriummetingen is dan ook wel degelijk zinvol.

De methode voor het meten van ramen en gevelelementen is beschreven in "NEN 3660: Gevelvullingen; Luchtdoorlatendheid, stijfheid en sterkte – Beproevingsmethoden". De methode is alleen geschikt voor het bepalen van de luchtdoorlatendheid van al dan niet bewegende delen in de gevel en voor gevelelementen die niet hoger zijn dan twee verdiepingen. Omdat de methode zich alleen richt op de ramen en gevelelementen, zegt een beproeving niets over de luchtdichtheid van de aansluitingen van het element op de omringende bouwconstructie.

De methode zoals beschreven in norm, is een zogenaamde opblaasmethode. Bij deze methode wordt gebruik gemaakt van een beproevingskast. Dit is een kast die aan een zijde open is. De overige zijden sluiten onderling luchtdicht aan.

Het proefelement wordt zo geplaatst, dat de opening van de beproevingskast volledig wordt afgesloten. De aansluitingen tussen het proefelement en de kast worden luchtdicht afgewerkt. Voor de meting wordt de kast op over- of onderdruk gebracht. De hoeveelheid lucht die bij een bepaalde toetsingsdruk via het proefelement ontsnapt of juist wordt aangezogen, is een maat voor de luchtdoorlatendheid van het element. Met behulp van rook, kan de plaats van luchtlekken worden opgespoord. Vaak is het hiervoor noodzakelijk dat de onderzoeker zelf plaatsneemt in de beproevingskast zodat de plaats van de lekken goed kunnen worden gedetecteerd.

De laboratoriummeting is geschikt voor het toetsen aan eisen, omdat hiermee een kwantitatieve analyse gemaakt kan worden. Door een meting uit te voeren voordat de productie begint, kunnen "systematische" luchtlekken worden opgespoord en verholpen. Voor een gedetailleerde beschrijving van de methode wordt naar de norm zelf verwezen.

2.2 Praktijkmeting luchtdoorlatendheid

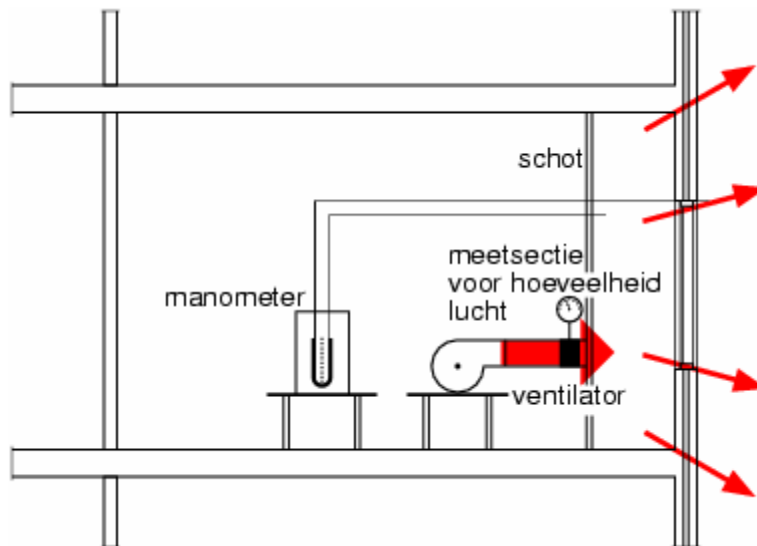
De opzet van de meting voor de woningbouw verschilt aanzienlijk van de opzet voor de utiliteitsbouw. Beide metingen worden hier besproken.

2.2.1 Woningbouw

De praktijkmeting voor de luchtdoorlatendheid is evenals de laboratoriummeting een opblaasmethode. Echter, in plaats van een enkel raam of gevelelement, wordt de volledige gebouwschil gemeten door de woning onder druk te brengen. In het Bouwbesluit wordt verwezen naar NEN 2686 voor het meten van de luchtdoorlatendheid van woningen. De luchtvolumestroom moet worden bepaald voor een drukverschil tussen binnen en buiten van 10 Pascal (Pa). Gekozen is voor 10 Pa omdat dit globaal het drukverschil is dat - gemiddeld op jaarbasis - over de verschillende openingen aanwezig is.

Omdat metingen bij een druk van 10 Pa snel worden verstoord door natuurlijke drukverschillen (wind, thermische trek), wordt de luchtdoorlatendheid gemeten bij zes drukverschillen tussen 15 en 100 Pa. In figuur 1 is een schematische weergave van de meetopstelling conform NEN 2686 gegeven. Voor de meting wordt een deur of een raam verwijderd en wordt in plaats daarvan een paneel met een toevoeropening aangebracht. Met behulp van een ventilator wordt lucht via deze toevoeropening de woning ingeblazen.

Voordeel van deze methode is dat de luchtlekken zowel gelokaliseerd als gekwantificeerd kunnen worden. Nadeel is, dat de meting alleen kan worden uitgevoerd aan het einde van de bouw. Een enkele keer komt het voor dat de luchtdichtheid van de woning zo slecht is, dat het niet lukt om de woning op voldoende druk te krijgen. In die situatie gaat het over het algemeen om een beperkt aantal geconcentreerde en zeer grote luchtlekkages. Hieruit mag blijken dat het uitvoeren van een meting zeer zinvol kan zijn.

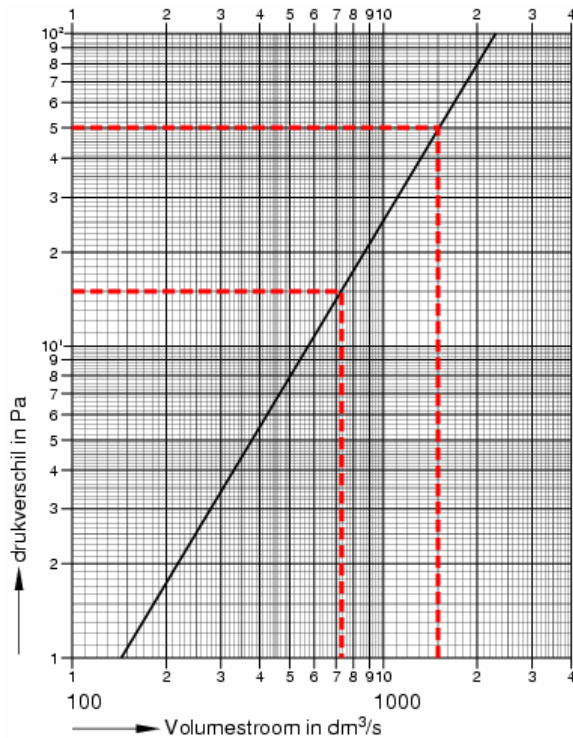


figuur 1. principe van de meetopstelling

Tijdens de meting wordt zowel de volumestroom van de toevoerlucht, als het drukverschil tussen binnen en buiten gemeten. Aan de hand van de meetgegevens kan op dubbel logaritmisch papier een grafiek worden getekend die het verband weergeeft tussen drukverschil en volumestroom. Op de grafiek kan vervolgens de volumestroom bij 10 Pa worden afgelezen. In tabel 1 en figuur 2, is een voorbeeld van de resultaten van een luchtdoorlatendheidsmeting weergegeven.

Δp in Pa	q_v in dm^3/s
15	740
20	840
27	1080
34	1200
40	1320
50	1530

tabel 1. resultaten luchtdoorlatendheidsmeting



figuur 2. resultaten luchtdoorlatendheidsmeting

Uit de grafiek in figuur 2 valt af te lezen dat de volumestroom bij 10 Pa gelijk is aan $q_{v;10} = 580$ dm^3/s . Uiteraard kan de volumestroom bij 10 Pa ook met een formule worden bepaald. De luchtstroming door een opening kan worden beschreven met de vergelijking:

$$q_v = C \cdot \Delta p^{1/n} \quad [\text{dm}^3/\text{s}]$$

Hierin is:

- q_v volumestroom in dm^3/s
- C luchtdoorlatendheidscoëfficiënt in $\text{dm}^3/(\text{s} \cdot \text{Pa}^{1/n})$
- Δp drukverschil over de opening in Pa
- n stromingsexponent

De grootheid C is in wezen de volumestroom door de opening bij een drukverschil van 1 Pa. Uit figuur 2 blijkt, dat $C = 145 \text{ dm}^3/(\text{s} \cdot \text{Pa}^{1/n})$. Uit een serie meetgegevens kan de exponent n worden bepaald. Wanneer uit het voorbeeld de eerste (P_1) en de laatste meting (P_2) worden genomen, vindt men voor de exponent n :

$$n = \frac{\log p_2 - \log p_1}{\log q_2 \cdot \log q_1} = \frac{\log 50 - \log 15}{\log 1530 \cdot \log 740} = 1,66$$

De waarde voor de volumestroom bij 10 Pa volgt rechtstreeks uit de eerder gegeven formule:

$$q_{v;10} = C p^{1/n} = 145 \times 10^{1/1,66} = 580 \text{ dm}^3/\text{s}$$

Aanvulling

Een grootte die ook uit de metingen kan worden bepaald, is het “equivalente oppervlak” (A_e). Dit is de grootte van een fictieve opening die bij 1 Pa even veel lucht doorlaat als de gezamenlijke ondichtheden in de totale gebouwschil. Het equivalente oppervlak staat daarmee model voor het totale lekoppervlak in de gebouwschil. Het equivalente oppervlak kan worden berekend met de onderstaande formule:

$$A_e = \frac{C \cdot \sqrt{\rho}}{10^3 \cdot 2^{1/n}} \quad [m^2]$$

Hierin is:

A_e	equivalent oppervlak in m^2 ;
C	luchtdoorlatendheidscoëfficiënt in $dm^3/(s \cdot Pa^{1/n})$;
ρ	dichtheid van de lucht (ca. $1,25 \text{ kg/m}^3$);
n	stromingsexponent.

In het voorbeeld wordt voor A_e gevonden:

$$A_e = \frac{145 \cdot \sqrt{1,25}}{1000 \cdot 2^{1/1,66}} = 0,11 \text{ m}^2$$

De waarde voor de totale luchtdoorlatendheid van de gebouwschil is geen rechtstreekse maat voor de werkelijke luchtdoorlatendheid onder praktijkomstandigheden. De luchtdoorlatendheid van de gebouwschil wordt bepaald bij een constant drukverschil van 10 Pa over de gevel. In werkelijkheid heerst er rondom de woning een steeds wisselende drukverdeling die bepaald wordt door de windrichting en de windsterkte, de omliggende bebouwing, het temperatuurverschil tussen binnen en buiten enzovoort. Daarnaast is de verdeling van de lekken over de gebouwschil van invloed op de luchtdoorlatendheid onder praktijkomstandigheden.

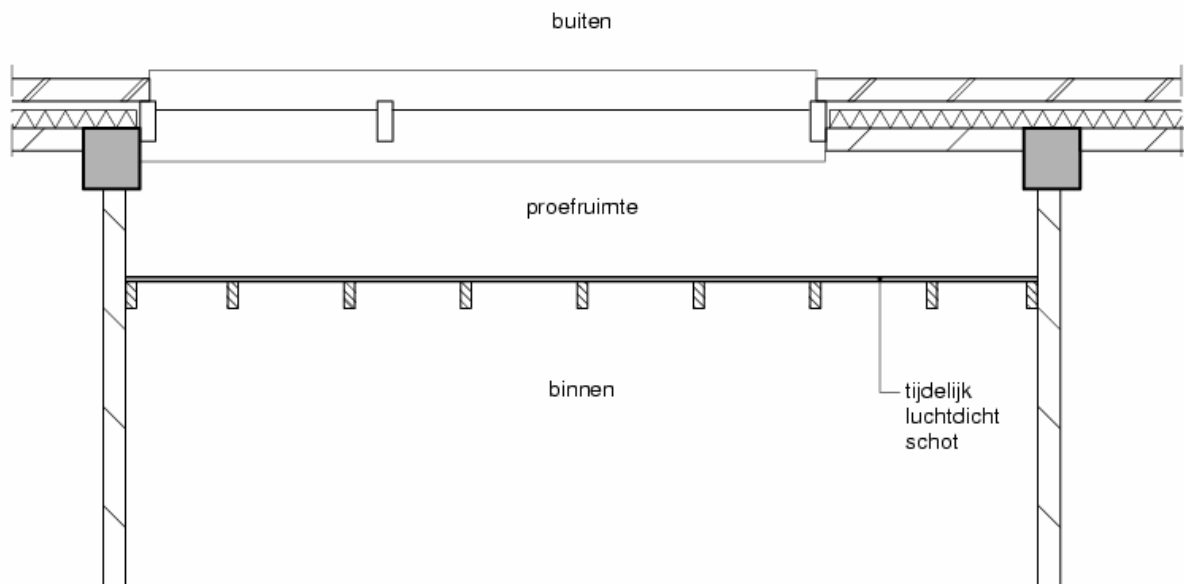
2.2.2 Utiliteitsbouw

Het Bouwbesluit verwijst voor de methode om de luchtdoorlatendheid van niet tot bewoning bestemde gebouwen te meten, eveneens naar de NEN 2686. Hoewel de norm de titel “Luchtdoorlatendheid van gebouwen – Meetmethode” heeft meegekregen, is de methode niet te gebruiken voor gebouwen met een bruto volume van meer dan 3000 m^3 .

Een methode die het mogelijk maakt om een indruk te krijgen van de luchtdoorlatendheid van grote gebouwen richt zich op de luchtdoorlatendheid van een zogenaamd representatief geveldeel. Onder een representatief geveldeel wordt een geveldeel verstaan dat regelmatig (repetierend) voorkomt in de gebouwschil en daardoor representatief is voor de gevel als geheel. Bij deze methode wordt ervan uitgegaan, dat de luchtdoorlatendheid van het dak en de begane grondvloer in grotere gebouwen over het algemeen gering is. Aangenomen wordt dat luchtlekken zich voornamelijk in de gevel, en de aansluitingen tussen gevel en dak of gevel en vloer bevinden. Door voor de meting een geveldeel uit te kiezen dat bij voorbeeld aan het dak grenst, kan de aansluiting van de gevel op het dak eveneens in de meting worden betrokken.

De methode lijkt in hoofdlijnen op de meetmethode zoals beschreven in de NEN 3660. Voor de bepaling van de luchtdoorlatendheid van een representatief geveldeel wordt op enige afstand van de gevel - aan de binnenzijde - een luchtdicht schot geplaatst. Het schot wordt luchtdicht aangesloten op de omliggende constructie. De afgesloten proefruimte wordt met behulp van een traploos regelbare ventilator op over- c.q. onderdruk gebracht. Uit het drukverschil over het geveldeel en de hoeveelheid toegevoerde c.q. afgezogen lucht wordt de luchtdoorlatendheid van het gevelsegment berekend. In figuur 3 wordt het principe van de meetopstelling weergegeven. Het luchtdichte schot is in deze situatie aangebracht tussen de beide zijwanden.

Het voordeel van deze praktijkmeting ten opzichte van de laboratoriummeting uit NEN 3660 is, dat bij voorbeeld ook de aansluiting van ramen en gevelelementen op de omliggende constructie en de aansluiting van de gevel op het dak kan worden gemeten.



figuur 3. principe van de meetopstelling voor het meten van een representatief geveldeel

Nadeel van de praktijkmethode is de relatief grote tijdbesteding. Daarnaast kan met één drukschot slechts een klein gedeelte van de gevel op luchtlekken getest worden. Voordeel is dat de meting al kan worden uitgevoerd als slechts een gedeelte van de gevel is geplaatst. Eventuele systematische luchtlekken die bij de meting naar voren komen, kunnen nog worden voorkomen bij het plaatsen van de overige geveldelen.

Met rook kan de plaats van luchtlekken worden opgespoord. Door bij voorbeeld bepaalde naden en kieren af te plakken en opnieuw te meten, kan de bijdrage van de verschillende luchtlekken aan de totale luchtdoorlatendheid worden bepaald.

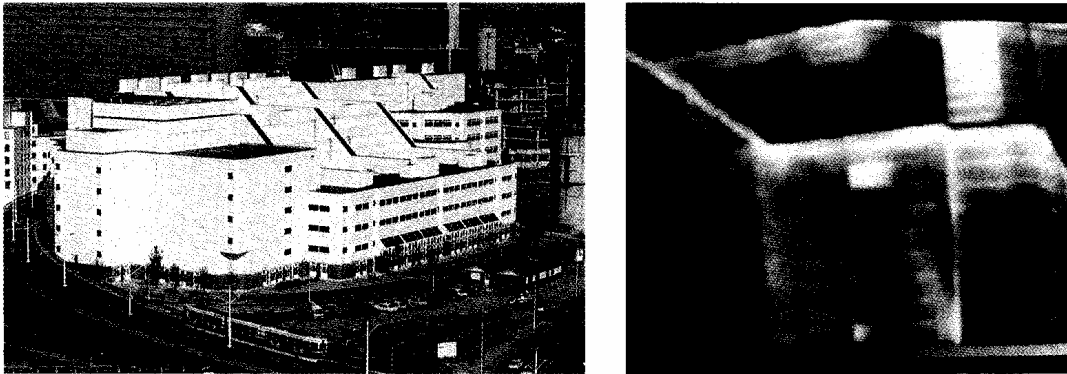
2.3 Thermografie

Het opsporen van luchtlekken in gebouwen die al gerealiseerd zijn, is eveneens mogelijk met behulp van thermografie. De methode wordt gebruikt voor de controle van nieuwe gebouwen of bij voorbeeld bij renovatieplannen. Hierbij kan de toestand van de bestaande situatie op hoofdlijnen in kaart worden gebracht.

Thermografie berust op het detecteren van langgolvlige elektromagnetische straling (warmtestraling), die door vaste lichamen wordt uitgezonden. Voor een thermografisch onderzoek worden met een infraroodcamera opnamen gemaakt van een gebouw. Op opnamen of kijkend door de camera worden de “koude” en “warme” vlakken op de gebouwmhulling zichtbaar. De warmere vlakken hebben een lichte kleur, de koudere vlakken een donkere kleur. De warmere plekken zijn die plekken waar meer warmte van binnen naar buiten stroomt en waardoor ter plaatse het buitenoppervlak warmer is.

Thermografie is met name geschikt om onbekende, incidenteel optredende warmtelekken op te sporen. Of temperatuurverschillen een gevolg zijn van lucht lekkage of van koudebruggen, moet worden bepaald op grond van de vorm van de temperatuurafwijking op de thermografische opname en de plaats hiervan op de gevel.

In figuur 4 is links een gewone en rechts een thermografische opname van een gebouw weergegeven. De lichtere kleur is een indicatie voor de aanwezigheid van koudebruggen of lucht lekkages.



figuur 4. een gewone en een thermografische opname van een gebouw

Vooraf bij grote en complexe gebouwen is thermografie bijzonder geschikt om op een kwalitatieve wijze luchtdichtheidsgebreken op te sporen. Het is relatief eenvoudig om de volledige schil van een gebouw te onderzoeken. Op grond van thermografisch onderzoek kan vervolgens gericht bouwkundig en/of meettechnisch onderzoek plaatshebben.

Het gebouw op de foto heeft een buitenhuid van metaal. Bij vorst vormden zich onderaan de buitenbeplating ijspegels. Met name bij een aantal onderdoorgangen ontstonden vervolgens levensgevaarlijke situaties als de ijspegels bij invallende dooi naar beneden vielen. Men dacht dat de ijsvorming een gevolg zou kunnen zijn van lucht lekkage door het binnenspouwblad, waarbij de warme en vochtige binnenlucht condenseert tegen de buitenhuid van metaal. Bij het maken van thermografische opnamen waren de lucht lekkages ter plaatse van aansluitingen goed zichtbaar.

Voor het maken van thermografische opnamen moet aan de volgende voorwaarden worden voldaan:

- Om de invloed van geaccumuleerde warmte (bij voorbeeld zonbestraling) uit te sluiten, kan alleen in de nacht of bij bewolkte hemel worden gewerkt.
- Er moet een temperatuurverschil van ten minste 10°C tussen binnen en buiten aanwezig zijn. Consequentie hiervan is, dat het maken van thermografische opnamen alleen mogelijk is tijdens de koudere periode van het jaar. Door het tijdelijk verhogen van de

binnentemperatuur buiten kantoortijd kan het temperatuurverschil wel kunstmatig worden vergroot.

- Wanneer thermografische opnamen worden gemaakt om luchtdichtheidsgebreken op te sporen, is het noodzakelijk dat in het gebouw een overdruk ten opzichte van buiten heerst. In principe kan ook gewerkt worden bij een onderdruk ten opzichte van buiten, maar dan is het noodzakelijk om ook de opnamen aan de binnenzijde te maken.

3 Luchtdichtheidscontrole; rekenmethoden

De beschikbare rekenmethoden zijn gericht op het berekenen van de zogenaamde karakteristieke lucht volumestroom ($q_{v,10;kar}$). Bij een gebouwinhoud tot maximaal 500 m³, is de karakteristieke lucht volumestroom ($q_{v,10;kar}$) gelijk aan de lucht volumestroom ($q_{v,10}$) zoals genoemd in het Bouwbesluit. Bij een gebouwinhoud groter dan 500 m³, kan de lucht volumestroom ($q_{v,10}$) worden afgeleid uit de karakteristieke lucht volumestroom ($q_{v,10;kar}$). Voor een uitleg hiervan wordt verwezen naar module LU-2; "Regelgeving luchtdoorlatendheid van gebouwen en scheidingsconstructies".

In de SBR-publicatie "Referentiedetails woningbouw", wordt een groot aantal voorbeeldetails voor de woningbouw gegeven. Bij ieder detail wordt een aantal bouwfysische prestaties gegeven, zoals de zogenaamde f-factor, de luchtdichtheid en dergelijke.

SBR-publicatie 200 geeft een formule voor het berekenen van de $q_{v10; kar}$. De methode gaat uit van de relatie tussen de lucht volumestroom en de opbouw van de details. Het berekenen van de $q_{v10; kar}$ aan de hand van de formule is relatief simpel, maar wel tijdrovend. Uitgegaan wordt van de formule:

$$q_{v10; kar} = C \times \Delta p^n \quad [\text{dm}^3/\text{s}]$$

Hierbij is:

C	gesommeerde luchtdoorlatendheidscoëfficiënt [$\text{dm}^3/\text{s} \cdot \text{Pa}^n$]
Δp	genormeerd drukverschil = 10 Pa
n	stromingsexponent

Uitgaande van $n = 0,625$, wordt de formule $q_{v10; kar} = C \times 4,22 \quad [\text{dm}^3/\text{s}]$. De gesommeerde luchtdoorlatendheidscoëfficiënt C kan worden berekend aan de hand van de waarden uit SBR-publicatie 200. C wordt berekend door de lengte van de details te vermenigvuldigen met de luchtdoorlatendheidscoëfficiënt C van de betreffende details.

detailsoort	lengte L	C	L x C
naden tussen kozijnen en gevel	30	0,10	3
nok	6	0,25	0,75
dakvoet	12	0,10	1,2
totaal			4,95

tabel 2. voorbeeld berekening luchtdoorlatendheid

In dit voorbeeld bedraagt de $q_{v10; kar} = 4,95 \times 4,22 = 20,9 \quad [\text{dm}^3/\text{s}]$.

SBR-publicatie 200 maakt onderscheid in twee luchtdichtheidsklassen:

- Klasse 1: standaarddetails voor normale luchtdichte woning;
Klasse 2: extra aandacht voor detaillering in verband met extra luchtdichte woningen.

Klasse 1 kan worden gehaald door zorgvuldig ontwerpen en uitvoeren. Voor klasse 2 is extra aandacht vereist zoals bij voorbeeld knevelende sluitingen voor het goed sluiten van kierdichtingsprofielen.

Uit berekeningen voor een woning met een vloeroppervlak van circa 110 m² blijkt dat de luchtdoorlatendheid ($q_{v10; kar}$) bij klasse 1 circa 95 dm³/s en bij klasse 2 circa 47 dm³/s bedraagt. Hiermee wordt voldaan aan de eis uit het Bouwbesluit dat de luchtvolumestroom ($q_{v;10}$) niet groter mag zijn dan 200 dm³/s.