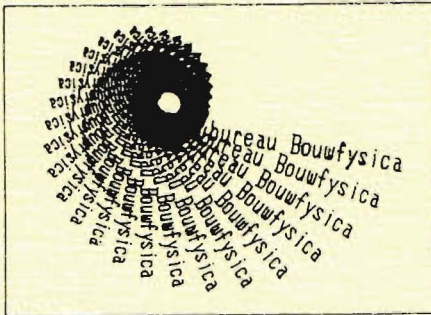




UITGANGSPUNTEN bij de vaststelling van de aan de
LUCHTPOORLATENDHEID VAN GEVELS te stellen eisen

's-Gravenhage, 29 februari 1984
Rijksgebouwendienst
Bureau Bouwfysica
Afdeling Onderzoek en Ontwikkeling

Uitgangspunten luchtdoorlatenheid van gevels

0 Inleiding

In rapport 262.3/L van 8 januari 1980 ("Richtlijn betreffende de aan de luchtdoorlatendheid van gevels te stellen eisen") werden waarden voorgesteld waaraan de luchtdoorlatenheid van gevels zou moeten voldoen. Deze eisen zijn overgenomen in Rijksgebouwendienst-instructie nr. 221 die op 4 december 1980 werd uitgebracht. Als voorbereiding op dit rapport en de instructie verschenen de discussienota's 262.1/L en 262.2/L van 29 maart 1979 respectievelijk 8 januari 1980 waarin de gehanteerde uitgangspunten zijn vastgelegd.

De inmiddels uit eigen praktijkmetingen verkregen gegevens waarbij gevels van 14 verschillende gebouwen aan deze omschreven eisen werden getoetst (rapport 262.08/L) en de van de zijde van andere (particuliere) keuringsinstituten verkregen informatie nopen tot een herziening van de indertijd geformuleerde eisen.

In het voorliggende rapport worden, op basis van dezelfde principes als in de eerdere rapporten, uitgebreid met een beschouwing over efficiënt energiegebruik, nieuwe criteria afgeleid. Om veelvuldig teruggrijpen op de oude rapporten te voorkomen worden alle van belang zijnde zaken hieruit, ook in dit nieuwe rapport opgenomen.

1 Algemene uitgangspunten, NEN 3660/3661

Sinds juli 1975 bestaat er een Nederlandse norm "Luchtdoorlatendheid, waterdichtheid, stijfheid en sterkte van ramen", NEN 3660, "Beproevingsmethoden", NEN 3661, "Eisen". (2)

In dit rapport zal bij deze normbladen aansluiting worden gezocht.

Voor de duidelijkheid worden hier ook vast de begrippen naad en kier gedefinieerd.

Kier: De ruimte tussen delen die bedoeld zijn om ten opzichte van elkaar te kunnen bewegen.

Naad: De ruimte tussen delen die niet bedoeld zijn om ten opzichte van elkaar te kunnen bewegen (zoals ramen en dergelijke).
Uitzetvoegen en dergelijke worden eveneens als naad beschouwd.

De bedoelde normbladen zijn van toepassing op alle verticale bouwdeelen met de ramen en/of deuren die rondom door dit bouwdeel worden omsloten. Deze gevelelementen zijn gewoonlijk samengesteld uit een frame en een vulling en zijn bedoeld om een gevelopening af te sluiten of om een gevel te formeren.

Afhankelijk van vorm, grootte en/of materiaalsoort wordt ook gesproken van kozijnen, gevelpuien, puikozijnen en dergelijke.

De norm geldt voor al dan niet beweegbare delen die zich in gevels bevinden en voor gevelelementen die zich uitstrekken over ten hoogste twee verdiepingen.

De norm heeft uitdrukkelijk geen betrekking op de naden tussen gevelelement (of gekoppelde gevelelementen) en omringende bouwconstructie.

Uitgangspunten

Een van de uitgangspunten voor de norm NEN 3660/3661 wordt gevormd door de norm NEN 1087 "Ventilatie van Woongebouwen". (3)

In deze laatste norm wordt er van uitgegaan dat de verse lucht die nodig is om het klimaat in een ruimte waarin zich personen bevinden leefbaar te houden, niet door de kieren van gevelelementen mag worden aangevoerd. Voor de ventilatie dienen andere voorzieningen te worden getroffen (roosters, klepraampjes, verticale kanalen, mechanische systemen enz.). Deze doelgericht ontworpen ventilatie mag echter niet worden verstoord door grote hoeveelheden lucht die door de kieren van gevelelementen naar binnen zouden kunnen komen.

Als aanvaardbaar wordt beschouwd dat ten hoogste gedurende gemiddeld één aaneengesloten uur per jaar de hoeveelheid lucht die door de kieren naar binnenkomt gelijk is aan of groter dan de gewenste hoeveelheid lucht voor ventilatie.

Uitgaande van een gemiddelde woonkamer wordt zo gevonden dat de hoeveelheid lucht per meter kier ten hoogste gedurende gemiddeld één uur per jaar gelijk mag zijn aan of groter zijn dan 5 l/s.m.

Deze waarde is blijkens de toelichting bij de betreffende paragraaf van de norm NEN 3661 bepaald voor een hoofdwoonvertrek waarin 42 l/s (150 m³/h) ventilatielucht benodigd is en waarin ca. 8 m kier tussen beweegbare en vaste delen van ramen aanwezig is. Uiteraard zit er in werkelijkheid een grote spreiding tussen deze getallen als men meerdere woningbouwprojecten vergelijkt, maar het hanteren van één éénduidige eis heeft natuurlijk veel voordelen. Het zomaar overnemen van deze eis voor kieren in gevels van andere gebouwen ligt echter minder voor de hand. Enerzijds zijn de ventilatiehoeveelheden niet hetzelfde als in een woning, anderzijds zit er een zeer grote spreiding in de aanwezige kierlengte, zie het volgende voorbeeld.

- één klein draairaam per 10 m² (ca 3 m' kier);
- twee tuimelramen per 10 m² (ca 12 m' kier).

Een draairaam van 0,6 x 1,0 m heeft 3,2 m' kier.

Twee tuimelramen van 1,2 x 1,6 m hebben in totaal 11,2 m' kier.

Voor een gevel met te openen ramen kan daarom worden gesteld dat de aanwezige kierlengte kan variëren van 0,3 - 1,2 m' per m² gevel.

Bij praktijkmetingen in 14 verschillende gebouwen (zie rapport 262.08/L) werd een variatie in de kierlengte gevonden van 0,24 tot 1,08 m'/m².

De aansluitingen tussen de vaste raamdelen onderling en tussen het gevelelement en de omringende bouwkundige constructie moeten daarbij vrijwel geheel dicht zijn. Voor de praktijk worden deze naden als dicht beschouwd als de hoeveelheid doorgelaten lucht niet meer bedraagt dan 0,01 maal de maximaal toelaatbare doorlaat van de kieren, bij hetzelfde drukverschil. Veelal wordt voor de toelaatbare doorlaat van naden daarom een waarde van 0,05 l/s.m gehanteerd.

Winddruk

Volgens NEN 3850, "Technische grondslagen voor de berekening van bouwconstructies" TGB 1972 (4) is de winddruk gelijk aan:

$$p = c \cdot q$$

waarin: $c_d = + 0,8$ voor druk
 $c_z = - 0,4$ voor zuiging
 $q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$ (Pa), de stuwdruk
 $\rho = 1,25$ kg/m³, de dichtheid van de lucht
 v = de windsnelheid in m/s

Er wordt van uitgegaan dat de druk binnen een gebouw het gemiddelde is van de winddruk en de windzuiging, zodat voor het drukverschil over een gevel geldt:

$$P_{\text{gevel}} = 0,6 \cdot q \text{ (Pa)}$$

In tabel 1 worden nu de windsnelheden gegeven die gemiddeld niet meer dan één aaneengesloten uur per jaar worden overschreden, het daaruit berekende drukverschil over een gevel en de toetsingsdruk waartoe op basis van deze gegevens is besloten.

De gegevens zijn gebaseerd op uurwaarden van de gemiddelde windsnelheid volgens waarnemingen van het KNMI te De Bilt en te Den Helder over het tijdvak 1931 - 1960.

Hoogte ¹⁾ (m)	Windsnelheid ²⁾ (m/s)		Drukverschil over de gevel (Pa)		Toetsingsdruk (Pa)	
	De Bilt	Den Helder	De Bilt	Den Helder	Binnenland	Kust
7	15,3	24,2	87,8	219,2		
10	16,4	25,3	100,6	240,6		
15 ³⁾	17,7	26,7	117,5	267,3	150	300
20	18,7	27,7	130,9	288,1		
25	19,5	28,5	142,5	305,3		
30	20,2	29,2	152,7	320,1		
35	20,8	29,8	161,9	333,2		
40 ³⁾	21,2	30,3	168,5	344,3	200	350
50	22,2	31,2	185,4	365,5		
70	23,7	32,6	210,7	399,0		
100 ³⁾	25,4	34,1	241,9	436,1	250	450

Tabel 1: Windsnelheid, drukverschil over de gevel en toetsingsdruk volgens NEN 3660/3661.

- 1) Hoogte van bovenkant bovenste gevelelement boven een als vlak aan te nemen terrein.
- 2) Windsnelheid die gedurende de periode 1931 - 1960 niet meer dan gemiddeld één uur per jaar is overschreden.
- 3) In de NEN 3660/3661 gegeven getalwaarden, de overige getallen betreffen berekende tussenwaarden.

2 Luchtdoorlatendheid van de gevel als geheel, Rgd.-richtlijnen

2.0 Inleiding, uitgangspunten

Het is wenselijk om te komen tot een duidelijke eis, betrokken uitsluitend op de gevel.

Het lijkt zinvol dezelfde uitgangspunten te nemen als in de NEN 3660/3661 zijn gekozen.

Dit zou inhouden:

- gedurende ten hoogste gemiddeld één aaneengesloten uur per jaar mag de luchtdoorlatendheid van de gevel (naden en kieren) gelijk aan of groter zijn dan de hoeveelheid lucht benodigd voor ventilatie.

Te overwegen valt om voor een geheel gesloten gevel een iets strenger uitgangspunt te kiezen. Daar ontbreken immers de kieren.

Een eis zou kunnen worden gebaseerd op de voor de luchtdoorlatendheid van naden in de NEN 3661 genoemde uitgangspunten.

Naast deze op grond van NEN 3660/3661 te stellen uitgangspunten zal ook het effect t.a.v. energieverlies/energiebesparing moeten worden bekeken.

2.1 Benodigde ventilatie per m² geveloppervlak

Uitgegaan wordt van een gemiddeld kantoorgebouw.

Hierin komen verschillende typen kamers voor, waarvan het merendeel varieert van éénpersoonskamers van ca. 12 m² nuttige vloeroppervlakte tot meerpersoonskamers waarin men 6 à 7 m² nuttige vloeroppervlakte per persoon heeft.

Voor de hoeveelheid per persoon benodigde verse lucht wordt bij de Rijksgebouwendienst aangehouden (5) 30-50 m³/h.

In NEN 1087 (ventilatie van woongebouwen) (3) wordt een waarde van 25 m³/h per persoon gehanteerd, waarbij 17 m³/h als absoluut minimum en 30 m³/h als na te streven waarde wordt genoemd.

Uit een, overigens nog aan discussie onderhevig, onderzoek naar de uit oogpunt van geurhinder toelaatbare "minimum verse luchttoevoer per persoon"

(6) volgt een ondergrens van 35 m³/h per persoon.

Voorshands lijkt het het meest reëel bij deze laatste waarde aan te sluiten.

Wanneer wordt uitgegaan van een gemiddelde vertrekdiepte van 5 m en een netto vrije hoogte van 2,8 m heeft de hiervoor genoemde één persoonskamer ongeveer 6,7 m² geveloppervlakte (netto, van binnen uit gezien); dit komt overeen met ongeveer 8,4 m² buitenoppervlak.

Voor de meerpersoonskamer komt men op 4,0 à 4,7 m² buitenoppervlak per persoon.

Uitgaande van een ventilatiehoeveelheid per persoon van 9,7 l/s (35 m³/h) (hierbij wordt geen rekening gehouden met eventueel bezoek, dat is slechts incidenteel aanwezig) komt men dan op 1,2 tot 2,4 l/s.m² voor de per m² gevel (buitenoppervlak) benodigde ventilatie. Deze hoeveelheid zou volgens het uitgangspunt van de NEN 3661 model kunnen staan voor de bij de toetingsdruk toelaatbare luchtdoorlaat door de gevel (met gesloten ramen).

2.2 Warmteverlies door infiltratie

In het kader van de werkzaamheden van de normcommissie "Ventilatie van schoolgebouwen" is voor Den Bilt een frequentieverdeling van de windsnelheid (op 10 m hoogte) opgesteld over de periode 1961-1975 voor de dagperiode 9 - 16 uur uitgezonderd de weekenden en de periode juli - half augustus.

$$v_{\text{gem}} = 4,07 \text{ m/s (9-16 uur)}$$

Voor de windsnelheid die gemiddeld gedurende hooguit één uur per jaar wordt overschreden wordt in tabel 1 gevonden:

$$v_{1\text{uur/jaar}} = 16,4 \text{ m/s}$$

Voor het luchttransport door een kier geldt de formule:

$$v = c \cdot (\Delta p)^{\frac{1}{n}}$$

waarin: v = volumestroom in m^3/s
 c = luchtdoorlaatcoëfficiënt in m^3/s bij $\Delta p = 1 \text{ Pa}$
 Δp = drukverschil over de weerstand in Pa
 n = het getal dat de aard van de stroming karakteriseert
 $n = 1$, laminaire stroming;
 $n = 2$, turbulente stroming.

Wanneer voor n wordt aangehouden 1,5 dan volgt voor de volumestroom bij gemiddelde windsnelheid:

$$v_{\text{gem}} = 0,156 v_{1\text{uur/jaar}}$$

Omdat het hier om de geveldichtheid in relatie tot de technische installatie (energiegebruiken) gaat is het overigens zinvol te onderzoeken welke windsnelheden voorkomen bij welke temperaturen. Wanneer bijvoorbeeld de aangehouden windsnelheden (tabel 1) alleen bij temperaturen boven de 10°C voorkomen en bij temperaturen onder 0°C de windsnelheid veel lager is, in het niet om redenen van klimaatbeheersing en energiebesparing nodig om van deze hoge windsnelheden uit te gaan. Hieraan zal derhalve onderzoek moeten worden verricht. Voorlopig wordt van de gemiddelde windsnelheid gedurende de dagperiode (zoals hierboven genoemd) uitgegaan.

De grootte van het warmteverlies door infiltratie laat zich als volgt berekenen.

$$Q = \rho \cdot c \cdot V \cdot \overline{\Delta T} \cdot t \quad (\text{J})$$

hierin is Q het warmteverlies over de periode t in joule;
 ρ de volumieke massa van de lucht, aan te houden op $1,25 \text{ kg/m}^3$;
 c de soortelijke warmte van lucht, 1000 J/kg.K ;
 V de volumestroom in m^3/s
 $\overline{\Delta T}$ het gemiddelde temperatuur verschil over de periode t ;
 t de beschouwde periode in seconde.

Als voor ΔT een waarde van $260 \cdot 10^6$ wordt ingevuld (overeenkomende met 3000 graaddagen) vereenvoudigt de formule, wanneer ook de waarden voor ζ en c worden ingevuld tot:

$$Q = 325 \cdot 10^9 \cdot V \quad (\text{J/jaar})$$

De benodigde hoeveelheid aardgas om dit warmteverlies te dekken volgt uit:

$$G = \frac{Q}{\eta \cdot B} \quad (\text{m}^3 \text{ gas/jaar})$$

hierin is G het gasgebruik in m^3 per jaar;
 Q het warmteverlies in joule;
 η het rendement van de verwarmingsinstallatie, aan te houden op 0,75 (op bovenwaarde);
 B de verbrandingswaarde van aardgas, aan te houden op $35,17 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3$ (bovenwaarde).

Combinatie van beide formules en invullen van alle getallen leidt tot:

$$G = 12,3 \cdot 10^3 V \quad (\text{m}^3 \text{ gas/jaar})$$

De contante waarde van de kosten voor dit gasgebruik CGG ligt over een periode van 20 jaar genomen (zie rapport 262.5/L.B.J.) (7) en uitgedrukt in guldens van 1984 op:

$$\text{CGG} = 10 \cdot G \quad (\text{fl}(1984), \text{ excl. B.T.W.})$$

In tabel 2 zijn deze gekapitaliseerde energiegebruikskosten bij verschillende luchtdoorlatendheden van de gevel opgegeven.

tabel 2: Energiegebruik en energiebesparing per m^2 gevel bij verschillende luchtdoorlatendheden van de gevel.

luchtdoorlaat in l/s.m^2 1 uur/jaar gemidd.		Q in $\text{Mj/m}^2 \cdot \text{jaar}$	CGG in fl(1984) per m^2	Besparing per jaar (excl. BTW) t.o.v. t.o.v. $3,2 \text{ l/s.m}^2$ $1,8 \text{ l/s.m}^2$	
3,2	0,50	162	61,40	-	-
3,0	0,47	152	57,55	3,85	-
2,8	0,44	142	53,75	7,65	-
2,6	0,41	132	49,90	11,50	-
2,4	0,37	122	46,05	15,35	-
2,2	0,34	111	42,20	19,20	-
2,0	0,31	101	38,40	23,00	-
1,8	0,28	91	34,55	26,85	-
1,6	0,25	81	30,70	30,70	3,85
1,4	0,22	71	26,85	34,55	7,70
1,2	0,19	61	23,05	38,35	11,50
1,0	0,16	51	19,20	42,20	15,35
0,9	0,14	46	17,25	44,15	17,30
0,8	0,12	41	15,35	46,05	19,20
0,7	0,11	35	13,45	47,95	21,10
0,6	0,09	30	11,50	49,90	23,05
0,5	0,08	25	9,60	51,80	24,95

N.B. De gemiddelde luchtdoorlaat (infiltratie) van de gevel is bepaald door de maximaal toelaatbare doorlaat, die bij een zekere windsnelheid (zie tabel 1) optreedt, om te rekenen naar de doorlaat bij gemiddelde windsnelheid. Daarnaast is bij het bepalen van het energieverlies er van uitgegaan dat dit gemiddelde verlies het gehele stookseizoen aanwezig is. In feite zal echter door één bepaalde gevel niet altijd lucht binnen treden, maar, afhankelijk van de windrichting, ook wel eens lucht het gebouw verlaten. Men zou kunnen stellen dat bij een langwerpig gebouw de lucht door één gevel binnenkomt en door de andere weer verdwijnt, dit zou betekenen dat het warmteverlies gemiddeld slechts de helft bedraagt van hetgeen uit de hierboven geschetste berekening volgt. Verder is het zo dat de toetsingsdruk wel een erg extreme situatie vertegenwoordigt en is het in gemiddelde omstandigheden optredende drukverschil over de gevel wellicht nog wat lager dan hier aangehouden. Naast de wind als drijvende kracht is er echter ook nog de invloed van het temperatuurverschil tussen binnen en buiten en de invloed van winddrukverschillen over het vlak van de gevel, die de ventilatie/infiltratie hoeveelheden vergroten, deze bijdrage zal meestal kleiner zijn dan die van de (globale) winddruk zelf.

Alleen bij toepassing van verticale (natuurlijke) ventilatiekanalen kan de invloed van de thermische trek groter worden. Hierbij moet men uiteraard ook aan trappehuizen en vides denken.

Omdat het hier om een bepaling van de orde van grootte van het energieverlies waaraan moet worden gedacht gaat, en het in rekening brengen van de laatstgenoemde twee invloeden per gebouw sterk kan verschillen is met de genoemde aanname gewerkt.

Ter oriëntatie worden ook het energiegebruik per m^3 bruto gebouw en de bijbehorende kosten over een periode van 20 jaar en de mogelijke besparingen gegeven, zie tabel 3. Hierbij is de verhouding bruto/netto = 1,67 t.a.v. de vierkante meters en 1,15 voor de verhouding bruto/netto hoogte als uitgangspunt genomen en verder dat iedereen in kamers van 5 m diep aan de gevel zit. Met de andere hiervoor genoemde uitgangspunten komt men zo op een verhouding tussen bruto inhoud en (buiten) geveloppervlak van $8 m^3/m^2$.

tabel 3: Energiegebruik en energiebesparing per m^3 (bruto) gebouw bij verschillende luchtdoorlatendheden van de gevel, tevens is aangegeven wat het gemiddelde ventilatievoud gedurende het jaar is, betrokken op de bruto inhoud van het gebouw.

inf. gevel in $l/s.m^2$ 1 uur/jaar	ventilatie- voud in h^{-1} max. gem.		Energiegebruik per m^3 per jaar MJ m^3 gas		Besparing (excl.BTW)	
					in fl(1984) per m^3 per jaar	per jaar
					t.o.v. 3,2 $l/s.m^2$	t.o.v. 1,8 $l/s.m^2$
3,2	1,45	0,22	20,3	0,77	-	-
2,8	1,25	0,20	17,7	0,67	0,69	-
2,4	1,10	0,17	15,2	0,58	1,92	-
2,0	0,90	0,14	12,7	0,48	2,88	-
1,8	0,80	0,13	11,4	0,43	3,36	-
1,6	0,70	0,11	10,1	0,38	3,84	0,48
1,2	0,55	0,08	7,6	0,29	4,80	1,44
1,0	0,45	0,07	6,3	0,24	5,28	1,92
0,7	0,30	0,05	4,4	0,17	6,00	2,64
0,5	0,20	0,04	3,2	0,12	6,48	3,12

Aanhouden van de eisen van de norm NEN 3661 voor naden en kieren leidt bij de gemiddeld voorkomende naad- en kierlengte in de onderzochte projecten, (zie rapport 262.08/L) tot een luchtdoorlatendheid bij de toetsingsdruk van $3,2 \text{ l/s.m}^2$ ($0,6 \text{ m kier/m}^2 \times 5 \text{ l/s.m} + 3,4 \text{ m naad/m}^2 \times 0,05 \text{ l/s.m}$). De besparing die t.o.v. deze situatie wordt bereikt met een luchtdoorlatendheid van $1,8 \text{ l/s.m}^2$ bedraagt (zie tabel 2 en 3) f 26,85 (excl. B.T.W.) per m^2 gevel bij een besparingsperiode van 20 jaar en f 3,36 per m^3 gebouw. Er wordt nogmaals op gewezen dat de hiervoor genoemde getallen slechts globaal zijn. Ze geven de orde van grootte aan waaraan bij de energiegebruiken en mogelijke besparingen moet worden gedacht. De genoemde getallen geven een bovengrens aan. De werkelijke waarden zullen echter hooguit een factor 2 lager liggen.

3 Keuze aan te houden doorlatendheid van de gevel

Bij het kiezen van een bepaalde luchtdoorlatendheid van de gevel moeten een aantal aspecten in de beschouwing worden betrokken.

- de relatie met het uitgangspunt van de norm NEN 3661.
- de invloed van de infiltratie op de benodigde capaciteit en op het functioneren van de verwarmingsinstallatie.
- de energiebesparing die optreedt bij grotere dichtheid van de gevel in relatie tot de kosten van de eventuele voorzieningen die daarvoor nodig zijn.
- de realiseerbaarheid van een bepaalde eis.

Zoals in 2.0 uiteengezet komt men, uitgaande van de uitgangspunten zoals vastgelegd in de norm NEN 3661 op een maximaal toelaatbare hoeveelheid door de gevel doorgelaten lucht bij de toetsingsdruk van $1,2 - 2,4 \text{ l/s.m}^2$.

Deze spreiding komt voor uit het feit dat de ventilatiebehoefte niet in alle vertrekken gelijk is, voor de gevel moet echter één éénduidige eis worden afgeleid. Een redelijke keuze lijkt dan om de gemiddelde waarde aan te houden, of een afgeronde waarde hiervan, bijvoorbeeld $1,8 \text{ l/s.m}^2$. Immers, voor bijvoorbeeld het energiegebruik van een totaal gebouw is de gemiddelde situatie maatgevend. Daarnaast sluit deze waarde goed aan bij wat voor de luchtdoorlatendheid van afzonderlijke kieren in de industrie algemeen haalbaar kan worden geacht.

Ten aanzien van de verwarmingsinstallaties het volgende.

Tussen een luchtdoorlatendheid van de gevel bij de toetsingsdruk van $1,8 \text{ l/s.m}^2$ en $3,2 \text{ l/s.m}^2$ verschilt het maximaal optredende ventilatievoud (infiltratie) van $0,80 \text{ h}^{-1}$ tot $1,45 \text{ h}^{-1}$.

In het totale warmteverlies betekent dit dat de infiltratie ca 29% of ca 42% van het totaal voor zijn rekening neemt.

Deze getallen gelden voor een gebouw met een thermische isolatie-index $I_t=12$ en normale goed geregelde ventilatie (zie appendix I).

Voor een gebouw met $I_t=18$ en een ventilatie met warmteterugwinning maakt de infiltratie ca 46% of ca 61% van de installatiecapaciteit uit.

Deze getallen gelden maximaal één aaneengesloten uur per jaar: bij de hoogste optredende windsnelheid dus. Ook bij gemiddelde omstandigheden is het verschil echter nog aanzienlijk ca. 5% of ca. 10% bij $I_t=12$ met normale ventilatie en ca. 11% of 20% bij $I_t=18$ met ventilatie met warmteterugwinning.

Hoewel dit slechts globale getallen zijn blijkt wel dat de invloed van de infiltratie op de verwarmingsinstallatie erg groot kan zijn en dat ook om die reden voor een zo laag mogelijke infiltratie moet worden gekozen. Als er van wordt uitgegaan dat een installatiecapaciteit wordt berekend bij een windsnelheid van 5 m/s scheelt een luchtdoorlatendheid van de gevel van 1,8 l/s.m² bij de toetsingsdruk t.o.v. 3,2 l/s.m² ca 10% in benodigde installatiecapaciteit.

Ten aanzien van de energiebesparing het volgende.

Kiezen voor een grenswaarde voor de luchtdoorlatendheid van de gevel van 1,8 l/s.m² geeft t.o.v. de uit de NEN 3661 volgende waarde van 3,2 l/s.m², gemiddeld een besparing op het totale energie gebruik van het gebouw van 5 à 10%, zie ook appendix I.

Per m² gevel ligt de contante waarde van de gasbesparing wanneer een periode van 20 jaar wordt bekeken op ca. f 27,-- (excl. B.T.W.), uitgedrukt in guldens van 1984, zie tabel 2.

Per m³ bruto gebouw ligt de besparing op ca f 3,35, zie tabel 3.

Voor de kosten van de gevel zijn de gevolgen verwaarloosbaar. Er zijn geen andere constructies of extra dichtingsmiddelen nodig. Met een goede detailering en een zorgvuldige uitvoering is de grenswaarde van 1,8 l/s.m² goed haalbaar, zie de evaluatie van de praktijk metingen (rapport 262.08/L).

De extra energiebesparing die wordt bereikt bij nog lagere luchtdoorlatendheden is nog steeds interessant. Het is daarom goed om in gevallen waar dit eenvoudig mogelijk is (geheel gesloten gevels) toch lagere waarden na te streven, vooral gezien de invloed, bij sterke wind op de klimaatbeheersingsinstallatie.

Een waarde van 0,5 l/s.m² blijkt in de praktijk bij geheel gesloten gebouwen goed haalbaar, zie rapport 262.08/L.

Lagere waarden dan 0,5 l/s.m² voor de toelaatbare hoeveelheid doorgelaten lucht bij de toetsingsdruk lijken niet nodig.

De besparing op energiekosten (contante waarde over een periode van 20 jaar) bij terugbrengen van de toelaatbare hoeveelheid bij de toetsingsdruk doorgelaten lucht van 1,8 l/s.m² naar 0,5 l/s.m² bedraagt ca f 25,-- per m² gevel of ca f 3,10 per m³ bruto gebouw. Beide keren uitgedrukt in guldens van 1984 exclusief B.T.W.

Resumerend:

Voor de toelaatbare hoeveelheid door een gevelconstructie doorgelaten lucht bij de toetsingsdrukken volgens de norm NEN 3661 kan worden aangehouden:

1,8 l/s.m² voor gebouwen met te openen ramen.

0,5 l/s.m² voor geheel gesloten gebouwen.

4 Aan kieren en naden te stellen eisen

Tijdens de ontwerpfase, voor het kiezen van producten en voor het opnemen van eisen in bestekken moeten ook eisen worden geformuleerd voor kieren en naden afzonderlijk.

In het algemeen kunnen gevelelementen (raamkozijnen enz.) geleverd worden met een goed gedefinieerde luchtdoorlatendheid van de kieren (tussen draairaam en kozijn bijvoorbeeld) en de in het element zelf aanwezige naden (aansluiting kozijndelen onderling, de glasafdichting, enz.). Veel ramenbedrijven hebben een eigen proefkast, of laten hun productie keuren door een instituut zoals SKG (Stichting Kwaliteitscentrum Gevelelementen).

Wanneer in een bestek de aan de kieren en naden te stellen eisen duidelijk worden omschreven kan de producent hierop inspelen en kan het geleverde product eenvoudig worden getoetst.

Voor het totale eindresultaat in de bouw blijft de in paragraaf 3 afgeleide eis voor de luchtdoorlatendheid per m^2 gevel bestaan. Hiermee worden naast opnieuw het raam, met name de in de bouw uitgevoerde aansluitingen getoetst.

De aan naden en kieren afzonderlijk te stellen eisen moeten wel zodanig zijn, dat als hieraan wordt voldaan, ook aan de eis voor de gevel als geheel wordt voldaan.

Bij de verrichte praktijkmetingen (rapport 262.08/L) blijkt de kierlengte te variëren van 0,24 tot 1,08 m' per m^2 gevel met een gemiddelde van 0,6 m' .

De lengte van naden varieert van 2,3 tot 7,9 m'/m^2 met een gemiddelde van 3,4 m'/m^2 .

Als voor naden de in de norm NEN 3661 genoemde waarde voor de toelaatbare luchtdoorlatendheid bij de toetsingsdruk van 0,05 l/s.m wordt aangehouden volgt bij bijvoorbeeld 6 m' naad per m^2 gevel een luchtdoorlatendheid van deze gezamenlijke naden van 0,3 l/s per m^2 gevel.

Voor de kieren is dan nog 1,5 l/s.m^2 over.

In het algemeen zal in de kleinste vertrekken met één te openen raam worden volstaan. Een raam van 0,7 x 1,5 m heeft ca. 4,5 m kier. Het kleinste vertrek heeft 8 à 10 m^2 (buiten)geveloppervlakte.

In de meeste gevallen zal de kierlengte derhalve stellig lager zijn dan 0,6 m' kier per m^2 geveloppervlakte. Uitgaande van de genoemde 0,6 m' kier per m^2 geveloppervlakte kan een toelaatbare luchtdoorlaat bij de toetsingsdruk voor kieren worden afgeleid van 2,5 $\text{l/s.m}'$.

Bij het formuleren van de eisen kan worden gesteld dat bij een grotere kierlengte dan de genoemde 0,6 m'/m^2 de toelaatbare luchtdoorlatendheid evenredig moet worden verminderd.

5 Ventilatie-roosters

Een apart probleem bij de luchtdoorlatendheid van gevels vormen ventilatie-roosters.

Dit probleem is er niet tijdens de bedrijfsuren van het gebouw.

Bij de warmteverliesberekening voor het ontwerp van de verwarmingsinstallatie is op ventilatie gerekend, en ventilatie is nu eenmaal nodig om aan de hygiënische voorwaarden die aan de binnenlucht worden gesteld, te voldoen. Het probleem ontstaat buiten bedrijfstijd, als er geen behoefte is aan ventilatie. De roosters zullen dan worden gesloten.

De luchtdoorlatendheid van de roosters in gesloten toestand is daarom van grote invloed op de nachtelijke afkoeling van het gebouw in de winter en daarmee op het energieverbruik voor verwarming.

Het is daarom zinvol aan de luchtdoorlatendheid van gesloten roosters eisen te stellen.

Uit oogpunt van installatiecapaciteit behoeft de maximale luchtdoorlatendheid in gesloten toestand niet kleiner te zijn dan de ventilatiehoeveelheid waarvoor het rooster is ontworpen.

Wanneer men dit als uitgangspunt neemt wordt bij de toetsingsdruk de totale luchtdoorlaat door de gevel bij gesloten roosters gemiddeld

$$2.1,8 = 3,6 \text{ l/s.m}^2.$$

Door de roosters komt, evenals door de naden en kieren, ongeveer de hoeveelheid die nodig is voor de ventilatie, zie paragraaf 3.

Zoals gezegd vormt dit voor de bedrijfsperiode geen verschil, dan is de ventilatie nodig.

Buiten bedrijfstijd is de infiltratie echter groter dan gewenst. In plaats van gemiddeld in de tijd $0,156.1,8 = 0,28 \text{ l/s.m}^2$ komt er nu de dubbele hoeveelheid $0,56 \text{ l/s.m}^2$ binnen. Bij een werkweek van 5 dagen van 10 uur betekent dit een vergroting van de infiltratie van ca 70% betrokken op de gehele week.

De hoeveelheid warmte die hiermee (extra) verloren gaat is als volgt te berijferen, op basis van de in paragraaf 2.2 gegevens formules.

$$Q = \frac{118}{168} \cdot 0,9 \cdot 325 \cdot 10^9 \cdot A_v \cdot 0,156 \text{ (J/jaar)}$$

hierin is: $\frac{118}{168}$ een factor die aangeeft welk gedeelte van de tijd buiten de bedrijfstijd van het gebouw ligt.

0,9 een factor die in rekening brengt dat de binnentemperatuur buiten kantooruren lager ligt dan het gemiddelde over de volle 24 uur.

A_v de netto oppervlakte van de ventilatie-opening in m^2 die volgens de NPR 1088 in getalwaarde gelijk is aan de vereiste volumestroom voor ventilatie door het rooster in m^3/s .

0,156 de factor die de verhouding aangeeft van de luchtdoorlatendheid in gemiddelde omstandigheden t.o.v. de luchtdoorlatendheid bij de toetsingsdruk.

Evenzo is de formule voor de contante waarde van het gasgebruik over een periode van 20 jaar te bepalen:

$$CGG = \frac{118}{168} \cdot 0,9 \cdot 123 \cdot 10^3 \cdot A_v \cdot 0,156 = 12,1 \cdot 10^3 \cdot A_v \text{ (fl(1984), excl. B.T.W.)}.$$

Voor een rooster dat 70 m³/h ventilatielucht moet verschaffen, en waarvoor volgens de NPR 1088 een netto ventilatie-opening van $A_v = 0,02 \text{ m}^2$ nodig is, vindt men voor de contante waarde van het gasgebruik:

$$CGG = 12,1 \cdot 10^3 \cdot 0,02 = 242 \text{ (fl(1984), excl. B.T.W.)}.$$

Dit getal geldt voor een rooster met bijvoorbeeld 13 gaten van 20 bij 75 mm, een maat die veel voorkomt.

Deze getallen zijn gebaseerd op een luchtdoorlatendheid van het gesloten rooster bij de toetsingsdruk, die gelijk is aan de ventilatiestroom waarvoor het rooster in geopende toestand geschikt is. Op dit moment voldoen alleen de kwalitatief betere roosters hier aan. Zie bijvoorbeeld rapport 262.11/L. Op dit moment is het daarom praktisch niet mogelijk strengere eisen te stellen, hoewel verder verbeteren van de roosters zeker een zinnige zaak is. Per 200 cm² ventilatie-opening (om even deze oude eenheid te gebruiken) mag een halvering van de luchtdoorlatendheid bij de toetsingsdruk tenslotte zo'n f 120,-- (1984, excl. B.T.W.) kosten. Dit bedrag komt in 20 jaar weer terug via de, verminderde, gasrekening.

Uiteraard is de zaak gecompliceerder dan ze hier is weergegeven. De hoeveelheid lucht die door infiltratie een gebouw binnenkomt wordt niet alleen bepaald door de luchtdoorlatendheid van de door de wind aangeblazen gevel. Ook de weerstand tegen luchttransport in het gebouw (deuren) en de luchtdoorlatendheid van de andere gevels, de mogelijke luchtafvoer via ventilatie kanalen, trappehuizen etc. beïnvloeden de infiltratie. Verder speelt niet alleen de winddruk een rol, maar ook de thermische invloeden (schoorsteeneffect).

Voor al bij ventilatieroosters is het verder zo dat de weerstand tegen luchttransport in de ene richting zeer veel kan verschillen met de weerstand in de andere richting. Op al deze zaken zal in rapport 262.11/L verder worden ingegaan (8).

6 Samenvatting

De eisen in de norm NEN 3661 "Ramen, luchtdoorlatendheid, waterdichtheid, stijfheid en sterkte" zijn gebaseerd op de situatie in woningen. De situatie in bijvoorbeeld kantoorgebouwen wijkt hiervan af. Handhaven van de in het normblad voor de luchtdoorlatendheid van kieren gestelde eisen leidt voor andere gebouwen dan woningen al snel tot grotere luchtverliezen dan wenselijk wordt geacht.

Uitgaande van het uitgangspunt van de norm NEN 3661 ("gedurende hooguit één aaneengesloten uur per jaar mag de door naden en kieren binnenkomende luchthoeveelheid groter zijn dan of gelijk zijn aan de voor de ventilatie benodigde luchthoeveelheid") zijn eisen afgeleid voor de luchtdoorlatendheid van gevels van met name kantoorgebouwen. Bij het afleiden van deze eisen is tevens gekeken naar de invloed van de infiltratie op de werking van de verwarmingsinstallatie, op de capaciteit van deze installatie en op het energiegebruik van het gebouw.

De eisen die zijn afgeleid zijn als volgt:

Bij de toetsingsdruk volgens de norm NEN 3661 mag de luchtdoorlatendheid van een gevel betrokken op de buitenoppervlakte, zowel bij overdruk als onderdruk niet groter zijn dan:

1,8 l/s.m² voor een gebouw met te openen ramen;

0,5 l/s.m² voor een geheel gesloten gebouw.

Voor kieren geldt een waarde van:

2,5 l/s.m¹ bij een kierlengte $\leq 0,6$ m¹/m² gevel

of $\frac{0,6}{l_k}$ 2,5 l/s.m¹ bij een kierlengte $> 0,6$ m¹/m² gevel

hierbij is l_k de kierlengte per m² gevel (m¹/m²).

Voor naden wordt de in de norm NEN 3661 genoemde waarde aangehouden:

0,05 l/s.m¹

Hierbij is uitgegaan van een naadlengte van maximaal 6 m¹/m² gevel. Bij grotere naadlengten moet aan de detaillering van de naden bijzondere aandacht worden besteed en eventueel de luchtdoorlatendheid van de kieren iets worden verminderd om aan de voor de gevel als totaal gestelde eis te kunnen blijven voldoen.

Voor ventilatie-roosters geldt in gesloten toestand, zowel bij overdruk als bij onderdruk op de gevel een maximale luchtdoorlatendheid bij de toetsingsdruk van:

1000.A_v l/s

of de hoeveelheid(ventilatie)lucht waarvoor het rooster volgens de uitgangspunten van de NPR 1088 als ventilatievoorziening geschikt is.

Hierbij is A_v de netto ventilatie-opening in m² volgens de uitgangspunten van de NPR 1088 "Ventilatie van woongebouwen".

Hoewel de eisen in principe zijn afgeleid voor kantoorgebouwen is het zinvol ze ook op alle andere gebouwen van toepassing te doen zijn, omdat daarmee een niet verwaarloosbare verkleining van de installatiecapaciteit mogelijk is en tevens nog een energiebesparing van 5 à 10% wordt bereikt. Per m² gevel bedraagt deze ca. f 27,-- (excl. B.T.W.) uitgedrukt in guldens van 1984 voor een 20-jarige besparingsperiode. De kosten die hier tegenover staan zijn gering. Het is eerder een kwestie van een andere detaillering en zorgvuldige uitvoering dan het toevoegen van extra materialen of bewerkingen.

's-Gravenhage, 29 februari 1984

(ir. A.C. van der Linden)

7 Literatuur

- 1 "Evaluatie van een aantal praktijkmetingen aan de luchtdoorlatendheid van gevels", Rijksgebouwendienst, Bureau Bouwfysica, Rapport 262.08/L, 's-Gravenhage (nog te verschijnen).
- 2 NEN 3660/3661: "Ramen: luchtdoorlatendheid, waterdichtheid, stijfheid en sterkte, meetmethoden/eisen", Nederlandse Normalisatie Instituut, Delft, juli 1975
- 3 NEN 1087: " Ventilatie van woongebouwen", Nederlandse Normalisatie Instituut, Delft, december 1975
- 4 NEN 3850: "Technische grondslagen voor de berekening van bouwconstructies - TGB 1972 (algemeen gedeelte)", Nederlands Normalisatie Instituut, Delft, december 1972
- 5 "Binnenklimaatcondities in kantoorruimten van nieuwe gebouwen", 's-Gravenhage, Rijksgebouwendienst, afdeling Warmte- en Luchttechniek rapport E 115.1/B, januari 1979
- 6 "Onderzoek naar de minimum verse luchttoevoer in gebouwen", IMG-TNO 1982.
- 7 "Kosten-batenanalyse m.b.t. energiebesparende maatregelen", Rijksgebouwendienst, Bureau Bouwfysica, rapport 230.5/L.B.G, 's-Gravenhage, 2 april 1981
- 8 "Metingen en berekeningen aan een gevel met te openen delen en ventilatieroosters", Rijksgebouwendienst, Bureau Bouwfysica, Rapport 262.11/L, 's-Gravenhage (nog te verschijnen).

Invloed van de infiltratie op warmteverlies, installatie en energieverbruik

Om enig inzicht te verschaffen in de verhouding tussen transmissie-, ventilatie- en infiltratieverliezen worden globale berekeningen gemaakt voor twee verschillende gebouwen.

Deze gebouwen zijn eerder als voorbeeld gebruikt in paragraaf 1.4 van rapport 367.06/L en afkomstig uit het door het Bouwcentrum uitgegeven rapport "Energiezuinig ontwerpen utiliteitsbouw".

De gebouwen bestaan uit 12 eenheden van 300 m^3 (als variant 600 m^3) inhoud. Gebouw 3 heeft een compacte plattegrond; gebouw 6 een langgerekte, zie figuur 1. In tabel 1 is weergegeven welke gemiddelde warmtedoorgangscoefficiënt (k) nodig is bij elk van de gebouwen om aan een bepaalde thermische-isolatie-index (I_t) te voldoen.

In het tweede deel van deze tabel wordt aangegeven hoe groot het specifieke warmteverlies is in de verschillende situaties.

Hierbij is o.a. uitgegaan van 3000 graaddagen, voor de overige uitgangspunten wordt verwezen naar rapport 230.7/L (berekening gasbesparing door thermische isolatie).

tabel 1: Benodigde gemiddelde warmtedoorgangscoefficiënt ($\bar{k}$) bij verschillende waarden voor de thermische-isolatie-index (I_t) voor de gebouwen uit figuur 1 en globale aanduiding van het warmteverlies door transmissie in watt per m^3 gebouw bij een gemiddeld temperatuurverschil van $\Delta T = 10^\circ\text{C}$

Gebouw	Ao (m^2)	V (m^3)	Gemiddelde warmtedoorgangscoefficiënt ($\bar{k}$) bij			
			$I_t = 10$	$I_t = 12$	$I_t = 15$	$I_t = 18$
3A	1480	3600	1,11	0,95	0,71	0,46
3B	2310	7200	1,28	1,10	0,83	0,57
6A	3180	3600	0,78	0,65	0,46	0,27
6B	5890	7200	0,81	0,68	0,48	0,28
	Ao/V (m^2/m^3)		Warmteverlies door transmissie in W per jaar per m^3 gebouw			
3A	0,41		4,6	3,9	2,9	1,9
3B	0,32		4,1	3,5	2,7	1,8
6A	0,88		6,9	5,8	4,1	2,4
6B	0,82		6,6	5,5	3,9	2,3

De waarden voor de benodigde gemiddelde warmtedoorgangscoefficiënt ($\bar{k}$) in tabel 1 lijken aanleiding te geven tot de conclusie dat gebouw 6 veel sterker moet worden geïsoleerd dan gebouw 3 om aan dezelfde I_t te voldoen, er is immers een veel lagere k nodig. Dit is echter niet zo. Bij gebouw 6 maakt het slechtst geïsoleerde vlak van de schil, de gevel, een veel kleiner deel uit van de totale oppervlakte van de schil (25% en 19%; 6A en 6B) dan bij gebouw 3 (73% en 65%; 3A en 3B).

In tabel 2 wordt de opbouw van het totale warmteverlies gegeven in de meest extreme situatie, bij de windsnelheid die gedurende één aaneengesloten uur per jaar maximaal bereikt of overschreden wordt.

De getallen zijn uitgerekend voor een temperatuursverschil van $T = 30^{\circ}\text{C}$. Omdat het om de verhouding gaat is dit temperatuursverschil evenwel niet relevant.

tabel 2: Opbouw totaal warmteverlies in extreme omstandigheden (maximale infiltratie), $\Delta T = 30^{\circ}\text{C}$) bij $It = 12$, ventilatievoud $n = 0,7 \text{ h}^{-1}$ en $It = 18$, $n = 0,7 \text{ h}^{-1}$ met warmteterugwinning (50%).

gebouw	Warmteverlies in W/m ³ door								
	transm.		vent.	inf.	totaal	% ¹⁾	inf.	totaal	% ¹⁾
			3,2 l/s.m ²				1,8 l/s.m ²		
It = 12									
3A	11,7	7,3		15,0	34,0	44	8,4	27,4	31
3B	10,5	7,3		15,0	32,8	46	8,4	26,2	32
5A	17,4	7,3		15,0	39,7	38	8,4	33,1	25
5B	16,5	7,3		15,0	38,8	39	8,4	32,2	26
It = 18									
3A	5,7	3,6		15,0	24,3	62	8,4	17,7	47
3B	5,4	3,6		15,0	24,0	63	8,4	17,4	48
5A	7,2	3,6		15,0	25,8	58	8,4	19,2	44
5B	6,9	3,6		15,0	25,5	59	8,4	18,9	44

¹⁾ deze kolom geeft het aandeel van de infiltratie in het totale warmteverlies aan.

In deze tabel is voor de ventilatie $n = 0,7 \text{ h}^{-1}$ aangehouden. Dit is betrokken op een gemiddeld ruimtegebruik in de werkvertrekken van ca. 9 m^2 per persoon.

Voor de infiltratie worden de in het rapport steeds vergeleken situaties met een luchtdoorlatendheid van de gevel bij de toetsingsdruk van $3,2 \text{ l/s.m}^2$ en $1,8 \text{ l/s.m}^2$ weergegeven.

Deze luchtdoorlatendheden stemmen overeen met een ventilatievoud door infiltratie van $n = 1,45 \text{ h}^{-1}$ respectievelijk $n = 0,80 \text{ h}^{-1}$.

In tabel 3 wordt eenzelfde overzicht gegeven voor gemiddelde omstandigheden ($\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$, windsnelheid ca. 4 m/s op 10 m hoogte). De infiltratie door de gevel leidt dan tot een ventilatievoud van $n = 0,22 \text{ h}^{-1}$ respectievelijk $n = 0,13 \text{ h}^{-1}$.

tabel 3: Opbouw totaal warmteverlies in gemiddelde omstandigheden
($\Delta T = 10^\circ\text{C}$, gemiddelde wind)

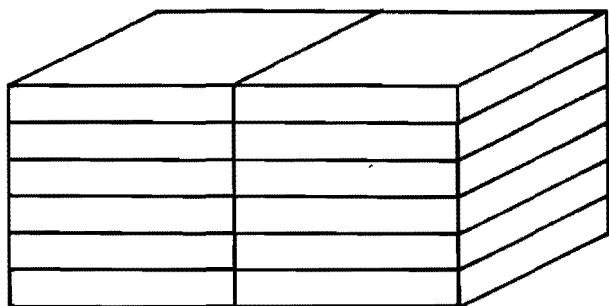
gebouw	Warmteverlies in W/m^3 door							
	transm. vent. inf. totaal % ¹⁾				inf. totaal % ¹⁾			
	3,2 l/s.m ²				1,8 l/s.m ²			
It = 12								
3A	3,9	2,4	0,8	7,1	11	0,4	6,7	6
3B	3,5	2,4	0,8	6,7	12	0,4	6,3	6
5A	5,8	2,4	0,8	9,0	9	0,4	8,6	5
5B	5,5	2,4	0,8	8,7	9	0,4	8,3	5
It = 18								
3A	1,9	1,2	0,8	3,9	21	0,4	3,5	11
3B	1,8	1,2	0,8	3,8	21	0,4	3,4	12
5A	2,4	1,2	0,8	4,4	18	0,4	4,0	10
5B	2,3	1,2	0,8	4,3	19	0,4	3,9	10

¹⁾ deze kolom geeft het aandeel van de infiltratie in het totale warmteverlies aan.

Uit deze tabellen blijkt dat het aandeel van de infiltratie in extreme omstandigheden bij een gebouw met $It = 12$ terugloopt van ca. 42% tot 29% van het totale warmteverlies als de luchtdoorlatendheid van de gevel wordt teruggebracht van 3,2 l/s.m² naar 1,8 l/s.m².

Bij een gebouw met $It = 18$ en warmteterugwinning uit de afgevoerde ventilatielucht loopt het aandeel terug van ca. 61% naar 46%; nog altijd een niet te verwaarlozen post.

Bij gemiddelde windomstandigheden loopt het aandeel van de infiltratie terug van ca. 10% naar ca. 5% bij het gebouw met $It = 12$ en van ca. 20% naar ca. 11% bij het gebouw met $It = 18$ en warmteterugwinning. Globaal vindt men deze verhouding ook terug in het energiegebruik van het gebouw.



Gebouw 3A: $A_o/V = 0,41 \text{ m}^2/\text{m}^3$

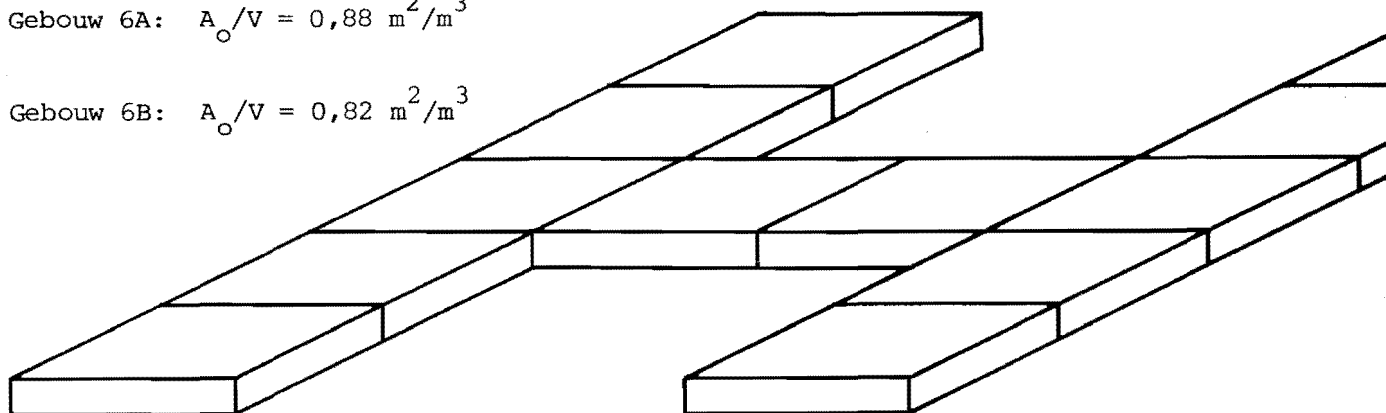
Gebouw 3B: $A_o/V = 0,32 \text{ m}^2/\text{m}^3$

Variant A: $V = 3600 \text{ m}^3$

Variant B: $V = 7200 \text{ m}^3$

Gebouw 6A: $A_o/V = 0,88 \text{ m}^2/\text{m}^3$

Gebouw 6B: $A_o/V = 0,82 \text{ m}^2/\text{m}^3$



Variant A: $V = 3600 \text{ m}^3$

Variant B: $V = 7200 \text{ m}^3$

figuur 1: Twee manieren om een bepaald bouwvolume vorm te geven.

De gebouwen bestaan uit 12 eenheden van 300 m^3 (variant A) respectievelijk 600 m^3 (variant B).

Voorbeeld afkomstig uit het rapport "Energiezuinig ontwerpen utiliteitsbouw"

