

Cursus Bouwfysica

Klimaat en Gezondheid

Binnenmilieu en ventilatie van woningen & woongebouwen

2016-2017

Auteurs en copyright:

ir. C.J.M. Passlack - Zwaans
ing. E.J.A. Roijen
ir. B.J.M. Slot

Inhoudsopgave

Hoofdstuk	Titel	Blad
1.	Inleiding	5
2.	Binnenmilieuparameters	6
2.1.	Inleiding	6
2.2.	Dosiseffect relaties en toetsingscriteria	6
2.2.1.	Dosiseffect relaties	6
2.2.2.	Beoordeling meetwaarden	7
2.3.	Agentia	9
2.4.	Thermisch binnenklimaat	9
2.4.1.	Thermoregulatie	10
2.4.2.	Warmtebalans	10
2.4.3.	Thermoreceptie	13
2.4.4.	Thermische sensatie	14
2.4.5.	Autonome thermoregulatie	15
2.4.6.	Gedrag	16
2.4.7.	Individuele verschillen	17
2.4.8.	Comfort - discomfort	18
2.4.9.	Modellen	18
2.4.10.	Fanger	22
2.4.11.	Tocht	29
2.5.	Geluid	31
2.6.	Chemische agentia	32
2.6.1.	Kooldioxide (CO ₂)	33
2.6.2.	Koolmonoxide (CO)	34
2.6.3.	Formaldehyde (CH ₂ O)	35
2.6.4.	Vluchtig organische verbindingen	36
2.6.5.	Stikstofoxiden (NO _x)	38
2.6.6.	Ozon (O ₃)	39
2.6.7.	Radon	40
2.6.8.	Stof	41
2.7.	Biologische agentia - Micro-organismen	42
3.	Basisbegrippen en principes ventilatie	44
3.1.	Basisbegrippen	44
3.2.	Ventilatie	44
3.2.1.	Waarom ventilatie?	44
3.2.2.	Hoe komt ventilatie tot stand?	45

3.2.3.	Spanningsveld binnenmilieu en comfort	47
3.2.4.	Spanningsveld binnenmilieu en energiegebruik	47
3.2.5.	Basisprincipes van ventilatie voor woningen	48
3.3.	Infiltratie	50
3.3.1.	Algemeen	50
3.3.2.	Relatie ventilatiesysteem en luchtdichtheid	50
3.3.3.	Spuiventilatie	51
4.	Ventilatie in het Bouwbesluit	52
4.1.	Ventilatie in de bouwreggeving – historisch perspectief	52
4.2.	Algemeen	52
4.2.1.	Bouwbesluitartikelen over ventilatie	52
4.3.	Vorm van de voorschriften	54
4.4.	Belangrijke begrippen uit het Bouwbesluit	54
4.5.	Bouwbesluiteisen	56
4.5.1.	Luchtverversing	56
4.5.2.	Spuivoorziening	60
4.5.3.	Installatiegeluid	61
4.5.4.	Energie	61
4.6.	Grote woningen met gebalanceerde ventilatie	62
4.7.	Ventilatiebalans	62
5.	Normen en richtlijnen	64
5.1.1.	NEN 1087: "Ventilatie van gebouwen. Bepalingsmethoden voor Nieuwbouw"	64
5.1.2.	Toelichting op NEN 8087: "Ventilatie van gebouwen. Bepalingsmethoden voor bestaande gebouwen"	67
5.1.3.	Toelichting op NPR 1088: "Ventilatie van woningen en woongebouwen. Aanwijzingen voor en voorbeelden van de uitvoering van ventilatievoorzieningen".	67
5.1.4.	Toelichting op NEN 2686: "Luchtdoorlatendheid van gebouwen. Meetmethode".	67
5.1.5.	Toelichting op ISSO publicatie 61: "Kwaliteitseisen ventilatiesystemen woningen"	68
5.1.6.	Toelichting op ISSO publicatie 62 "Gebalanceerde ventilatie in de woningbouw"	69
6.	Meetmethoden voor ventilatie	70
6.1.	Ventilatiecomponenten	70
6.2.	Luchtdoorlatendheid	70
6.3.	Ventilatievoudmetingen	71

7.	Technische ontwikkelingen	74
7.1.	Trends in technische ontwikkelingen	74
7.2.	Beperking volumestromen	74
7.2.1.	Regelingen algemeen	74
7.2.2.	Drukgestuurde roosters	75
7.2.3.	Vochtgestuurde ventilatieopeningen	76
7.2.4.	Sensorgestuurde ventilatie op basis van binnenmilieuparameters	76
7.2.5.	Sensorgestuurde ventilatie op basis van aanwezigheid	77
7.3.	Warmteterugwinning	77
7.3.2.	Multifunctionele toestellen	78
7.4.	Voorverwarming van ventilatielucht	79
7.4.1.	Voorverwarming van ventilatielucht door zonne-energie	79
7.5.	Beperking van het gebruik van hulpenergie	80
7.5.1.	Energiezuinige ventilatoren	80
7.5.2.	Frequentie gestuurde regeling van ventilatoren	81
7.6.	Hybride ventilatie	81
8.	Voorbeelden ontwerp ventilatiesysteem	83
9.	Literatuurlijst	91

1. Inleiding

Het binnenmilieu is een belangrijke factor die het welzijn van een mens in de gebouwde omgeving bepaalt en bestaat uit een complex geheel van parameters. Deze parameters worden in het tweede hoofdstuk beknopt besproken. Een belangrijke factor in het resulterende binnenmilieu is de ventilatie, welke van directe invloed is op de kwaliteit van de binnenlucht en het thermisch comfort.

Het thermisch binnenklimaat is één van de belangrijkste kwaliteiten van een gebouw. Er wordt uitgebreid ingegaan op wat het thermisch binnenklimaat inhoudt. Wat is thermisch comfort en hoe kan men dit beoordelen? Welke richtlijnen en eisen gelden er en hoe kan men dit thermisch binnenklimaat optimaliseren, vooral in relatie tot het ventilatiesysteem dat toegepast wordt?

Ventilatie is ook van invloed op het energiegebruik. Het aandeel energiegebruik door ventilatie, infiltratie en ventilatoren in een energiezuinige woning is gemiddeld ca. 40 % van het totale energiegebruik. Als men het totale energiegebruik in Nederland beschouwt, dan betekent dit dat hiervan ca. 10% gebruikt wordt voor de ventilatie van woningen. Alle reden dus om aandacht te besteden aan ontwerp en selectie van ventilatiesystemen en aan de beperking van de luchtdoorlatendheid. Het is dus belangrijk om een optimum te vinden tussen een gezond binnenmilieu en energiezuinigheid.

De keuze voor een ventilatiesysteem, de componenten en het ontwerp wordt door vele factoren bepaald. Belangrijke randvoorwaarden hierbij zijn de luchtdichtheid van de gebouwmhulling, de emissie van bouwmaterialen en andere bronnen, het bouwconcept en de eindgebruikers. Daarnaast speelt ook het energiegebruik tengevolge van ventilatieverliezen en hulpenergie voor ventilatoren een belangrijke rol. De eerste pogingen om het energiegebruik voor ventilatie en infiltratie te beperken liepen veelal uit op problemen met het binnenmilieu en het thermisch comfort. Ventilatie werd meestal verminderd zonder te kijken naar de werkelijke ventilatiebehoefte. Problemen met vocht die hierdoor kunnen ontstaan, kunnen zelfs leiden tot extra energiegebruik.

De keuze van ventilatiesystemen voor energie-efficiënte woningen moet zorgvuldig worden afgestemd op de bouwkundige eigenschappen en randvoorwaarden van de woning. Ook de trends en ontwikkelingen van ventilatiesystemen dienen hierop te worden afgestemd. De uiteindelijke doelstelling is om een zo goed mogelijk binnenklimaat te creëren, zowel qua thermisch comfort als qua luchtkwaliteit, tegen zo gering mogelijk energiegebruik.

2. Binnenmilieuparameters

2.1. Inleiding

Teneinde een indicatie te krijgen over de kwaliteit van het binnenmilieu en een eventuele relatie met gezondheidseffecten is het van belang informatie over het daadwerkelijk binnenmilieu te verzamelen.

Er zijn verschillende opties mogelijk over de plaats en de wijze van uitvoering die deze informatie in het algehele inventarisatieproces moet innemen. Afhankelijk van het type woning c.q. gebouw, de bewoners/gebruikers en eventuele aanwezige klachten wordt in het algemeen vooraf een keuze gemaakt voor de te volgen methode, bijvoorbeeld de conventionele methode versus de building-in-use method of combinaties.

Een onderzoek van het binnenmilieu is meer dan alleen het meten en toetsen van de relevante parameters aan richtlijnen, normen etc. Een evaluatie naar de dosiseffect relaties achter de criteria, de bouwfysische en installatietechnische eigenschappen (zowel ontwerp als huidige toestand), en het gebruik van de woning c.q. het woongedrag en vooral het gebruik van de ventilatievoorzieningen maken er deel van uit. De doelstelling van een inventariserend onderzoek, namelijk het vaststellen/aannemelijk maken dan wel het uitsluiten van een verband tussen mogelijke gezondheidseffecten en een of meerdere parameters van het binnenmilieu, zo mogelijk in relatie tot de energetische kwaliteit van het gebouw, kan alleen op deze wijze gebeuren.

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de belangrijkste binnenmilieuparameters, onderverdeeld in fysische, chemische en microbiologische agentia, grens- of andere toetsingswaarden en meetmethoden. Tevens wordt een aantal meetmethoden voor het meten van de diverse componenten die de totale ventilatie in een gebouw bepalen omschreven.

2.2. Dosiseffect relaties en toetsingscriteria

2.2.1. Dosiseffect relaties

Dosiseffect relaties vormen veelal de grondslag voor normen en richtlijnen. Kennis van de dosiseffect relatie is ook noodzakelijk om tot een goede interpretatie van de meetresultaten te komen. Een tweetal hoofdvarianten van dosiseffect relaties zijn te onderscheiden, namelijk:

- a. de (positief) lineaire relatie
- b. de parabolische relatie

Van een positief lineaire relatie is veelal sprake bij chemische agentia. Een parabolische relatie geldt o.a. voor het thermisch klimaat, namelijk PPD-waarde versus de PMV-waarde.

Het criterium is vaak een compromis tussen enerzijds de aard van het effect dat bij de criteriumwaarde door de agens wordt veroorzaakt en anderzijds de maatschappelijke en economische haalbaarheid alsmede de technische mogelijkheden om het effect te voorkomen en/of te bestrijden. Dit betekent dat criteria zelden absoluut zijn maar steeds bij een aantal personen bepaalde effecten kunnen oproepen. Conform een advies van de Gezondheidsraad mag hierbij geen onderscheid worden gemaakt tussen nadeel voor de gezondheid en hinder. Zowel hinder als lichamelijke ongezondheid leggen beperkingen op aan het in staat zijn en het zich in staat voelen van de mens om adequaat te kunnen functioneren.

Het feit dat het criterium vaak een compromis inhoudt, is belangrijk voor de interpretatie van meetresultaten. Dit is te verduidelijken aan de hand van criteria voor tocht. Het criterium zoals gegeven in DIN 1946 "Raumluftechnik Gesundheitstechnische Anforderungen" is (was) een gebruikelijk criterium bij het ontwerpen van klimaatinstallaties. Dit criterium gaat er echter van uit dat ca. 20% van de personen bij dit criterium zullen klagen over tocht. Een percentage dat op zich aanleiding geeft om te spreken van een sick building. De klacht in een gebouw over tocht of door tocht veroorzaakte verschijnselen zoals langdurige verkoudheid, spierklachten zal dan ook met een fijner criterium moeten worden geëvalueerd.

Ook in ASHRAE 62 "ventilation for acceptable indoor air quality" is sprake van een vergelijkbare definitie namelijk: "acceptable indoor air quality: air in which there are no known contaminants at harmful concentrations and with a substantial majority (80% or more) of the people exposed do not express dissatisfaction".

Een belangrijk aspect bij het waarderen van meetresultaten is het feit of de dosis individueel te beïnvloeden is. Bij het beoordelen van het thermisch klimaat middels het bepalen van de PMV-waarde (de dosis) is hiervan sprake. De PMV-waarde zoals deze op een bepaalde plaats tot stand komt, is afhankelijk van de kleding. Zo kan met betrekking tot de wintersituatie de Clo-waarde variëren tussen 0,7 en 1,0. Het effect hiervan op de optimale PMV-waarde laat zich berekenen dat een individu middels een aangepast kledinggedrag binnen een range van de binnenluchttemperatuur van 2°C zelf zijn optimaal thermische omgeving kan schapen.

2.2.2. Beoordeling meetwaarden

Met betrekking tot de beoordeling van het binnenmilieu en de daarop betrekking hebbende meetwaarden kan men drie gebieden onderscheiden.

Comfort	Hinder	Gezondheidszorg

Min of meer in relatie tot deze drie gebieden zijn een aantal toetsingsniveaus te zien, namelijk:

- grenswaarden, waaronder MAC-waarden
- streef- of advieswaarden (bijvoorbeeld gezondheidkundige advieswaarden van de gezondheidsraad).

Voor blootstelling aan chemische agentia zijn zowel de grenswaarden als de advieswaarden gerelateerd aan het voorkomen van gezondheidsklachten. Comfort en hinder zijn meestal niet uitgedrukt in deze waarden.

Voor het industriële binnenmilieu zijn de grenswaarden in het algemeen redelijk gespecificeerd middels MAC-waarden. In het niet-industriële binnenmilieu zijn slechts een beperkt aantal grenswaarden voor handen (alleen voor formaldehyde en asbest) met daarnaast een aantal advieswaarden.

Grenswaarden:

Grenswaarden zijn waarden die wettelijk zijn vastgelegd. In het industriële binnenmilieu worden ze MAC-waarden genoemd.

In het niet-industriële binnenmilieu zijn slechts van een beperkt aantal stoffen grenswaarden bekend. Deze categorie grenswaarden zijn vooral gerelateerd aan hinder of het voorkomen van hinder, in het algemeen op een niveau dat de hinder (net) acceptabel is. In een aantal gevallen zijn grenswaarden of gerelateerd aan gezondheid, bijvoorbeeld bij carcinogene stoffen.

Voor een aantal agentia welke in het binnenmilieu voorkomen en voor stoffen met een belangrijk gezondheidsrisico zijn de grenswaarden bekend. Indien van een bepaalde stof geen grenswaarde bekend is wordt soms 1/10 van de MAC-waarde gekozen, althans als er geen bijzondere gezondheidsrisico's in het spel zijn. Verder dient men er op bedacht te zijn dat de grenswaarden niet zondermeer geldig zijn bij een gecombineerde blootstelling, met andere woorden, indien meerdere stoffen in de binnenlucht voorkomen kan al bij lagere concentraties hinder ontstaan.

MAC-waarden:

MAC-waarden (voor chemische agentia) zijn gerelateerd aan gezondheid, betrokken op gezonde personen bij een blootstelling gedurende een 8-urige werkdag. MAC-waarden zijn voor zeer veel stoffen bekend. Ze zijn echter in het algemeen niet bruikbaar voor een sick-building onderzoek en zijn veel meer gerelateerd aan het beoordelen van de luchtkwaliteit op een industriële arbeidsplaats. Bij het vaststellen van een MAC-waarde speelt economische haalbaarheid ook een grote rol. Er zijn diverse MAC-waarden die veel hoger liggen dan de gezondheidkundige advieswaarde. Een extreem voorbeeld hiervan is chroom(VI) die

een MAC-waarde heeft van 10 ug/m^3 terwijl de gezondheidskundige advies-waarde $0,02 \text{ ug/m}^3$ bedraagt.

Advies- en streefwaarden:

Advieswaarden zijn waarden opgesteld door bijvoorbeeld de gezondheidsraad of de WHO en geven aan wat op basis van onderzoek een grenswaarde zou moeten zijn. Er zijn advieswaarden voor zowel het industriële binnenmilieu al voor een beperkt aantal stoffen in het niet-industriële binnenmilieu.

Streefwaarden zijn vooral gerelateerd aan een goed comfort. Het zijn waarden welke ook na zijn te streven voor de toekomst. Streefwaarden zijn voor de belangrijkste stoffen of groepen van stoffen bekend. Bij gecombineerde blootstelling tot en niveau van de streefwaarden zijn geen problemen te verwachten.

2.3. Agentia

Monitoring van het binnenmilieu is in principe agens georiënteerd en omvat onderzoek naar:

- a. aanwezigheid c.q. blootstelling aan diverse agentia
- b. de invloedssferen binnen en buiten het gebouw

Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen:

- Fysische agentia
De belangrijkste hiervan zijn geluid, licht, thermische- fysiologische factoren en vocht.
- Chemische agentia
Onder chemische agentia worden chemische stoffen verstaan met een biologisch effect. In beginsel betekent dit alle chemische stoffen hieronder vallen omdat als de concentratie maar hoog genoeg is, er altijd wel een effect op de mens optreedt. Praktisch is er zoals ook bij de fysische agentia, sprake van een beperkt aantal stoffen die in het binnenmilieu van gebouwen aanwezig (kunnen) zijn. Hoewel stof in het algemeen tot de fysische agentia wordt gerekend wordt 'stof' in dit dictaat bij chemische agentia behandeld.
- Biologische agentia
Dit zijn agentia van biologische oorsprong die een effect hebben op organismen die in het binnenmilieu voorkomen en die invloed hebben op de gezondheid.

2.4. Thermisch binnenklimaat

Het thermisch binnenklimaat is een van de belangrijkste belastingen waarmee de mens wordt geconfronteerd. De gewaarwording van het thermisch binnenklimaat heeft vooral te maken met de warmtebalans van het menselijk lichaam die beïnvloed wordt door:

- a. persoonsgebonden grootheden (metabolisme, Clo-waarde (kledingisolatie))
- b. omgevingsgebonden grootheden (luchttemperatuur, stralingstemperatuur, luchtsnelheid en luchtvochtigheid).

Volgens Fanger wordt thermisch comfort bereikt als aan drie condities wordt voldaan: de warmtehuishouding moet in balans zijn, de zweetproductie moet binnen de comfortgrenzen blijven en de gemiddelde huidtemperatuur moet binnen de comfortgrenzen liggen. Zoals hieruit al blijkt is de thermoregulatie een belangrijke factor.

2.4.1. Thermoregulatie

- Warmtebalans
- Thermoreceptie
- Thermische sensatie
- Autonome thermoregulatie
- Gedrag
- Individuele verschillen

2.4.2. Warmtebalans

Voor het goed functioneren van de mens is het van belang dat de kerntemperatuur (de temperatuur van de vitale organen en de hersenen) binnen een bepaalde bandbreedte constant wordt gehouden. De warmteproductie in het lichaam en de warmteopname van het lichaam dienen over langere tijd in balans te zijn met de warmteafgifte van het lichaam. De verschillende elementen die een rol spelen in de warmtebalans van het menselijk lichaam worden in deze paragraaf nader toegelicht.

Metabolisme

In het menselijk lichaam vindt de meeste warmteproductie plaats in de lever, de hersenen en het hart. Wanneer het lichaam in beweging is, wordt ook warmte geproduceerd in de spieren. De totale hoeveelheid energie die in het lichaam wordt geproduceerd, wordt het metabolisme genoemd. Het metabolisme wordt meestal gerelateerd aan de lichaamsoppervlakte en wordt dan uitgedrukt in met. 1 met staat hierbij voor een metabolisme van 58 W/m^2 .

Het basaal metabolisme is de energieproductie in het lichaam in rusttoestand. Dit ligt bij mannen hoger dan bij vrouwen en neemt af naarmate de mens ouder wordt. Het basaal metabolisme van een pasgeborene per oppervlakte-eenheid is ongeveer twee keer zo groot als van een bejaard persoon.

Het metabolisme is ten eerste afhankelijk van het activiteitsniveau. De volgende tabel geeft een overzicht van de warmteproductie per type activiteit.

Activiteit	Metabolisme	
	W/m ²	met
Rust, liggend	46	0,8
Rust, zittend	58	1,0
Lichte activiteit, zittend (kantoor, huis, school, laboratorium)	70	1,2
Lichte activiteit, staand (winkel, laboratorium, lichte industrie)	93	1,6
Gemiddelde activiteit, staand (verkoper, huishoudelijk werk, werk aan machine)	116	2,0
Lopen (op gelijk niveau):		
2 km/u	110	1,9
3 km/u	140	2,4
4 km/u	165	2,8
5 km/u	200	3,4

Tabel 1. Activiteitsniveau per activiteit.

Ook de temperatuur van de omgeving is een belangrijke parameter die het metabolisme beïnvloedt. Verder neemt het metabolisme toe wanneer de lichaamstemperatuur hoger wordt. Het metabolisme neemt met een factor twee tot drie toe wanneer de kerntemperatuur met 10°C stijgt.

Warmteuitwisseling

Tussen het menselijk lichaam en zijn omgeving vindt warmteuitwisseling plaats door middel van convectie, straling, geleiding en verdamping. Onder normale omstandigheden staat het lichaam warmte af aan zijn omgeving. Kleding zorgt hierbij voor een thermische weerstand tussen het menselijk lichaam en de omgeving en speelt dus een belangrijke rol bij de warmteuitwisseling. In een neutrale omgeving, waarbij in het lichaam geen actieve thermoregulatie plaatsvindt, bedraagt de verdamping ongeveer 25% van de totale warmteafgifte. Verdamping vindt hierbij zowel plaats aan het huidoppervlak als via de ademhaling. Naarmate het activiteitsniveau hoger wordt en het lichaam meer transpireert, neemt het aandeel van de warmteafgifte door verdamping aanzienlijk toe.

De overige 75% van de warmteafgifte vindt plaats via convectie (via de huid en ademhaling), straling en geleiding. Onder normale binnencondities zijn het convectieve en het stralingsaandeel ongeveer aan elkaar gelijk. De convectieve warmteoverdracht aan het huidoppervlak neemt aanzienlijk toe wanneer het lichaam in beweging is of de luchtsnelheid hoog is.

Het aandeel van de warmtegeleiding in de totale warmteuitwisseling is in de meeste situaties erg klein ($\pm 3\%$), doordat slechts een klein deel van het lichaam in direct contact staat met omringende objecten. De warmtegeleiding wordt daarom meestal verwaarloosd.

Warmteopslag

Het is mogelijk om warmte op te slaan in de weefsels. Een gevolg van de warmteopslag is dat de kerntemperatuur hoger wordt. De lichaamsmassa is hierbij een bepalende factor. Voor een zelfdestijging van de kerntemperatuur kan in een lichaam met een grote massa namelijk meer warmte worden opgeslagen dan in een lichaam met een kleine massa. Warmteopslag is een korte termijn mechanisme. Over een langere periode dient de warmteopslag nul te bedragen, zodat het lichaam de juiste kerntemperatuur behoudt.

Vergelijking

De warmtebalansvergelijking van het menselijk lichaam over een langere periode kan als volgt worden opgesteld:

$$M - W = Q_{sk} + Q_{res} = (C_{sk} + R_{sk} + E_{sk}) + (C_{res} + E_{res})$$

Hierin is:

M = metabolisme [W/m²]

W = arbeid [W/m²]

Q = totale warmteverlies [W/m²]

C = warmteverlies door convectie [W/m²]

R = warmteverlies door straling [W/m²]

E = warmteverlies door verdamping [W/m²]

sk = via de huid (skin)

res = via de ademhaling (respiration)

Voor de mens is het van belang dat de kerntemperatuur constant wordt gehouden. Dit gebeurt door thermoregulatie.

Om de warmtehuishouding goed in balans te kunnen houden, vindt ook in het lichaam zelf op verschillende manieren warmteuitwisseling plaats. De warmte in de kern van het lichaam wordt door geleiding en convectie naar de verschillende lichaamsdelen en naar het huidoppervlak overgedragen.

De lichaamstemperatuur kan behoorlijk variëren over het lichaam. In de kern wordt de temperatuur relatief constant gehouden op circa 37°C, terwijl de temperatuur van de ledematen en de huid flink kan variëren. De kerntemperatuur is overigens niet geheel constant gedurende de dag, maar varieert met ongeveer 0,5°C. Ook kan door een verhoging van het activiteitsniveau de kerntemperatuur met enkele graden toenemen.

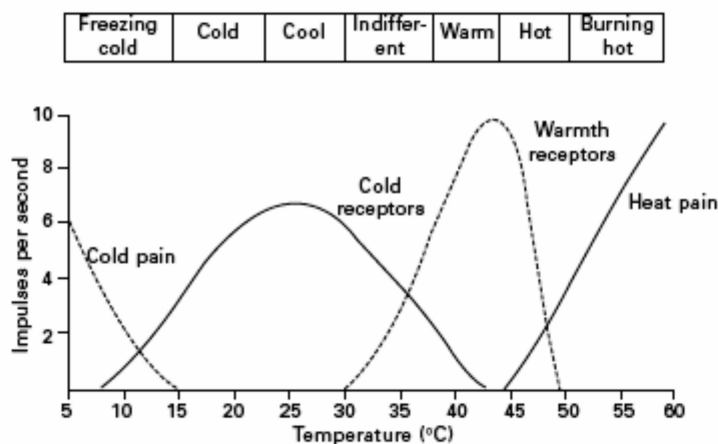
Volwassen man in rust in een thermoneutrale omgeving	% van totale huidoppervlakte [%]	Huidtemperatuur [°C]
Hoofd	6	34,6
Romp	36	34,6
Bovenarmen	8	33,0
Onderarmen	6	30,8
Handen	5	28,6
Dijbenen	19	33,0
Kuiten	13	30,8
Voeten	7	28,6

Tabel 2. Huidtemperatuur van verschillende lichaamsdelen.

2.4.3. Thermoreceptie

De thermoreceptoren in de opperhuid (vlak onder het huidoppervlak) bestaan uit vrije zenuwuiteinden en zijn via zenuwbanen verbonden met de hypothalamus. In de hypothalamus wordt de informatie van alle thermoreceptoren geïntegreerd. Op basis van deze informatie worden de verschillende thermoregulatiemechanismen aangestuurd. Vooral in de huid van de extremiteiten en het hoofd zijn veel thermoreceptoren aanwezig.

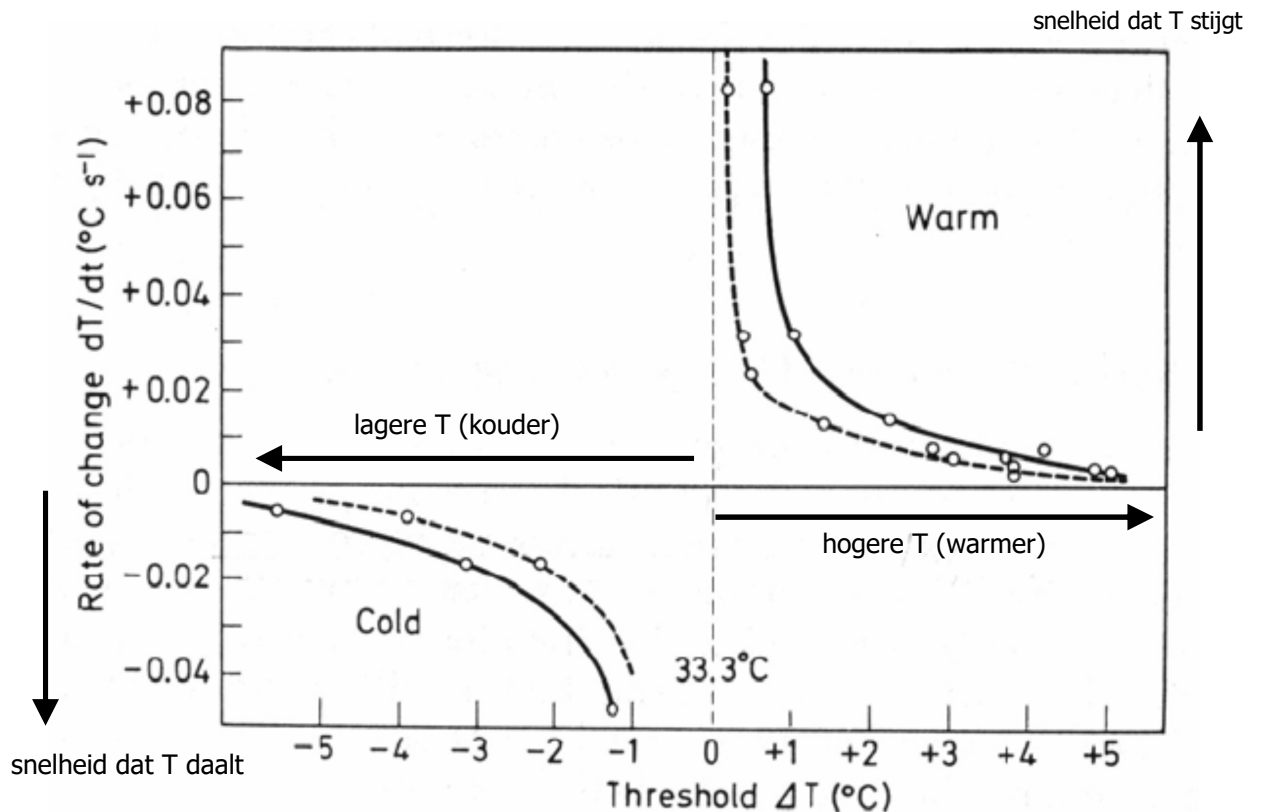
Bij thermoreceptoren kan onderscheid worden gemaakt tussen warmte- en koudereceptoren. Ze vertonen activiteit bij een ander temperatuurbereik. Bij de lage temperaturen ($< 30^{\circ}\text{C}$) geven alleen de koudereceptoren pulsen af en bij de hoge temperaturen ($> 42^{\circ}\text{C}$) zijn alleen de warmtereceptoren actief. In het tussenliggende gebied ($30\text{--}42^{\circ}\text{C}$) vertonen zowel de koude- als de warmtereceptoren activiteit. Bij extreem hoge of extreem lage temperaturen worden de pijnreceptoren in werking gesteld.



Figuur 1. Pulsfrequentie van koude-, warmte en pijnreceptoren.

2.4.4. Thermische sensatie

Thermische sensatie is gerelateerd aan hoe mensen zich 'voelen' (warm, neutraal, koud etc.). Uit onderzoek is gebleken dat de intensiteit van warmte- en koudesensatie uitgedrukt kan worden als een functie van de huidtemperatuur, de snelheid waarmee de huidtemperatuur verandert en het oppervlak dat wordt geprikkeld.



Figuur 2. Invloed verandering van huidtemperatuur op de warmtesensatie.

Gemiddelde drempelwaarden voor warmte- en koudesensatie aan de onderarm (20 cm^2). De gestippelde lijn geeft de drempelwaarden weer, de doorgetrokken lijn geeft de duidelijke sensaties aan.

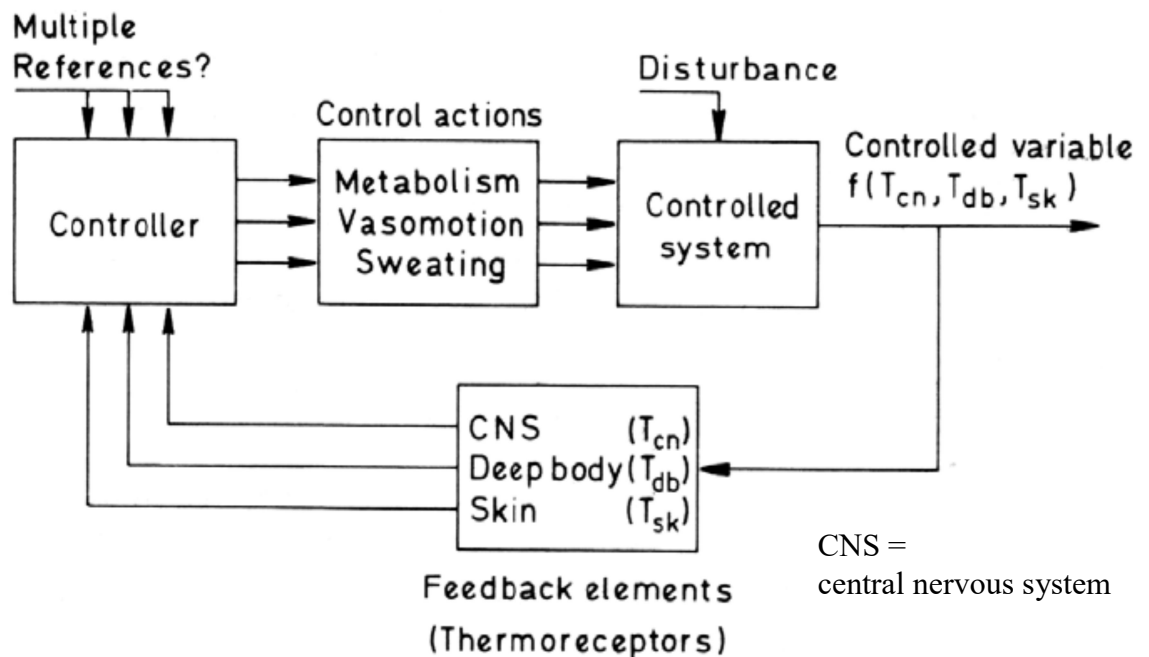
Voor andere lichaamsdelen en andere afmetingen van het blootgestelde oppervlak liggen de drempelwaarden bij andere temperaturen. Ook de kerntemperatuur speelt een rol in de thermische sensatie, met name onder warme omgevingscondities. De bijdrage van de huidtemperatuur aan de thermische sensatie is echter veel groter dan die van de kerntemperatuur. Thermische sensatie is ook afhankelijk van ervaring, acclimatisatie en persoonlijke verschillen.

De mens is hierdoor geen goed meetinstrument en kan geen goede inschatting maken van de temperatuur. Bijvoorbeeld als de ene hand van een persoon in warm water en de andere in koud water wordt gehouden, en beide handen na

enkele minuten in water van 30°C worden gehouden, blijkt de ene hand warm aan te voelen en de andere koud.

2.4.5. Autonome thermoregulatie

Om de kerntemperatuur op circa 37°C zijn verschillende regelmechanismen aanwezig, welke onbewust worden ingeschakeld. Dit is het autonome thermoregulatiesysteem.



Figuur 3. Schema van autonome thermoregulatie

De regulerende variabele is niet de temperatuur van een bepaald deel van de kern van het lichaam, maar een geïntegreerde waarde van meerdere temperaturen: een gewogen gemiddelde lichaamstemperatuur. Signalen vanuit de thermoreceptoren in de huid zorgen ervoor dat de verstoring opgemerkt wordt voordat deze de kern van het lichaam heeft bereikt.

Er zijn verschillende regelmechanismen:

- Vasoactiviteit

Als het lichaam extra warmte wil verliezen, worden de bloedvaten verwijd, zodat gemakkelijker warmte aan het omringende weefsel kan worden afgegeven. Dit is vasodilatatie. Als het lichaam zoveel mogelijk warmteverlies wil tegengaan, worden de bloedvaten zoveel mogelijk vernauwd, zodat het warmteverlies naar het omringende weefsel wordt beperkt. Dit is vasoconstrictie.

- Verhoging van de warmteproductie

Wanneer het menselijk lichaam in een koude omgeving onvoldoende in staat is om door middel van vasoconstrictie zijn kerntemperatuur op peil te houden, wordt het metabolisme verhoogd. Allereerst wordt non-shivering thermogenese ingezet. Hierbij wordt het metabolisme in het bruine vetweefsel verhoogd.

Als dit niet voldoende is, zal het lichaam gaan rillen. Rillen is het gelijktijdig asynchroon samentrekken van de spiervezels in zowel de buig- en strekspieren waardoor warmte wordt geproduceerd zonder externe arbeid te verrichten. Bij een persoon in rust kan de metabolische warmteproductie door rillen toenemen van 70 W/m^2 tot 200 W/m^2 . De warmteproductie ten gevolge van rillen kan worden berekend met behulp van de volgende formule.

$$M_{\text{shiv}} = 19,4 \cdot (33,7 - T_{\text{sk}}) \cdot (36,8 - T_{\text{cr}})$$

M = metabolisme

T = temperatuur

shiv = rillen (shivering)

sk = huid (skin)

cr = kern (core)

- Kippenvel

Kippenvel, treedt op als de huid koud wordt en heeft als doel het warmteverlies via de huid te beperken. Hiertoe wordt de lichaamsbehaaring opgericht, waardoor een stilstaande luchtlaag wordt gecreëerd tussen het lichaam en zijn omgeving. Bij mensen draagt dit mechanisme nauwelijks bij tot de thermoregulatie, doordat de mens relatief onbehaard is en in de meeste situaties kleding aan.

- Zweten

Als de lichaamstemperatuur stijgt en de warmteafgifte naar de omgeving onvoldoende kan worden verhoogd door middel van vasodilatatie, wordt over het gehele lichaam zweet afgescheiden om door middel van verdamping afkoeling mogelijk te maken. Wanneer de huid- en kerntemperatuur verder stijgen, wordt vasodilatatie nog meer gestimuleerd door het zweten. Vasodilatatie zorgt op haar beurt weer voor voldoende bloedtoevoer, waardoor de aanvoer van vloeistof naar de zweetklieren mogelijk wordt gemaakt.

2.4.6. Gedrag

Een andere belangrijke manier voor de mens om zijn lichaamstemperatuur te reguleren is door middel van gedrag.

- plaats
- kleding
- houding

Toch kan het zo zijn dat de mens juist, tijdelijk, een oncomfortabele situatie opzoekt, bijvoorbeeld een sauna. Dit stimuleert het thermoregulatiesysteem.

2.4.7. Individuele verschillen

Tussen individuen onderling bestaan grote verschillen in thermoregulatie. Het betreft de volgende aspecten, in volgorde van belangrijkheid:

- Acclimatisatiegraad. Warmteacclimatisatie treedt bijvoorbeeld op gedurende de seizoenen. Wanneer personen worden blootgesteld aan een koude omgeving in de winter neemt het metabolisme in het lichaam toe.
- Fysieke conditie. De fysieke conditie beïnvloedt de capaciteit van de bloedcirculatie.
- Antropometrische verschillen. Lichaamsoppervlakte, vetgehalte, en gewichtsbelasting (niet actieve lichaamsmassa).
- Hydratatie-niveau. Het plasmavolume beïnvloedt de efficiëntie van het hart en de bloedcirculatie.
- Tijd van de dag. Gedurende de dag treden variaties op in de zweetkarakteristiek, de huiddoorbloeding en de kerntemperatuur.
- Geslacht. De meeste verschillen in thermoregulatie tussen mannen en vrouwen kunnen worden toegeschreven aan antropometrische verschillen en verschillen in de fysieke conditie. Wel blijkt dat de zweetproductie van vrouwen minder is dan bij mannen. Ook speelt de menstruatiecyclus een rol. Er treedt hierdoor een variatie in de kerntemperatuur op van ongeveer 0,4°C.
- Leeftijd. Vooral bij koude werkt het thermoregulatiesysteem bij ouderen minder efficiënt. Dit komt voornamelijk door een verminderde fysieke conditie.

Verschillen tussen mannen en vrouwen

Vooral in dynamische situaties is er verschil in thermisch comfort tussen mannen en vrouwen. Mannen blijken zich bij dezelfde temperatuur in het begin namelijk warmer te voelen dan vrouwen. Dit verschil verdwijnt echter als men langer aan de temperatuur is blootgesteld. Mannen en vrouwen verschillen dus in adaptatie. De oorzaak hiervan ligt waarschijnlijk in het verschil in thermoregulatie tussen mannen en vrouwen.

Dit blijkt ook uit verschillen tussen mannen en vrouwen in warme omstandigheden. Voor mannen is in dergelijke omstandigheden de relatieve luchtvochtigheid belangrijker voor het thermisch comfort dan voor vrouwen. Mannen zijn voor hun thermoregulatie namelijk meer afhankelijk van zweten, terwijl vrouwen meer regelen met behulp van vasoactiviteit.

In koude omstandigheden hebben vrouwen het eerder oncomfortabel dan mannen door de grotere mate van vasoconstrictie, waardoor hun huidtemperatuur lager is. Vrouwen blijken minder op een verhoging van de gemiddelde lichaamstemperatuur te reageren dan mannen en meer op een verlaging van de lichaamstemperatuur. Vrouwen voelen zich hierdoor in een warme omgeving

minder snel oncomfortabel dan mannen. In een koude omgeving voelen zij zich juist sneller oncomfortabel. In veel gevallen zijn verschillen in comfortbeleving tussen mannen en vrouwen echter te wijten aan verschillen in kleding. Naast het verschil tussen de geslachten spelen dezelfde parameters die van invloed zijn op de thermoregulatie een rol bij de verschillen in de beleving van thermisch .

Doordat er grote verschillen bestaan tussen individuen onderling is het onmogelijk een thermische omgeving te definiëren waarover iedereen tevreden is; men kan alleen proberen het aantal ontevredenen te beperken. De individuen hebben echter wel de mogelijkheid om hun warmtebalans door middel van gedrag te beïnvloeden, bijvoorbeeld door het aanpassen van hun kleding. Hierdoor kan toch een situatie worden bereikt waarin iedereen min of meer tevreden is over zijn thermische omgeving.

2.4.8. Comfort - discomfort

Bij lage omgevingstemperaturen hangt discomfort samen met een lage huidtemperatuur en periodes van rillen. Bij hoge omgevingstemperaturen is discomfort vooral gerelateerd aan de mate van zweten. Bij een verandering in omgevingstemperatuur blijkt relatief snel een verandering in thermische sensatie op te treden, terwijl een verandering in thermisch comfort pas veel later. Op basis hiervan is geconcludeerd dat thermische sensatie voornamelijk wordt bepaald door de signalen die worden doorgegeven door de thermoreceptoren in de huid, terwijl voor thermisch comfort ook de signalen van de thermoreceptoren in de kern van het lichaam een belangrijke rol spelen.

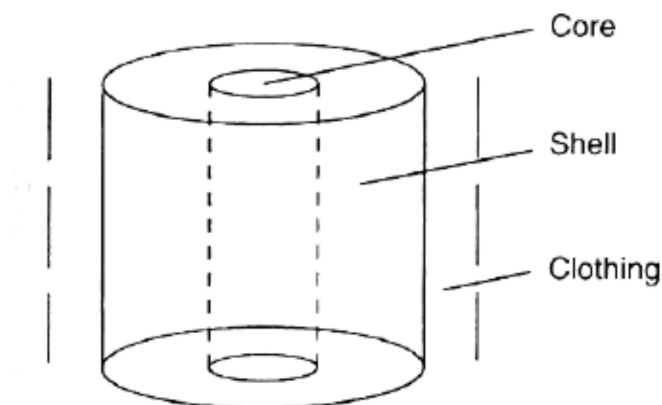
2.4.9. Modellen

Er zijn verschillende thermo-fysiologische modellen opgesteld om uit meetbare, fysische parameters af te leiden welke waardering de mens voor het binnenklimaat zal hebben. Het meest bekende is het model van Fanger, maar zijn ook andere modellen, die meer rekening houden met het dynamische karakter van de processen.

Gagge

Een van de meest bruikbare modellen met beperkte dynamische mogelijkheden is dat van Gagge. Hierbij is het menselijk lichaam niet tot een blok met interne warmteproductie en met warmteverliezen naar de omgeving geschematiseerd, zoals bij Fanger, maar tot een model met twee concentrische lagen waarin warmteopslag (accumulatie) mogelijk is. Hiervan stelt de buitenste laag de huid voor. De twee lagen (kern en huid, zie onderstaande figuur) wisselen warmte uit door convectie (via een geschematiseerde bloedsomloop) en door geleiding. Het model streeft naar temperaturen voor kern en schil van 37 °C, en tracht deze te bereiken door het regelen van de bloedsomloop (uitwisseling van warmte tussen kern en schil) en zweetafscheiding. Bepalend voor de mate van behaaglijkheid

zijn in het koude gebied de huidtemperatuur en in het warme gebied de natheid van de huid. Het model dat in een computerprogramma is vervat, werkt met tijdstippen van in beginsel één minuut. Voor betrouwbare uitspraken moet worden gerekend met een expositietijd van minstens een half uur tot maximaal 4 uur.

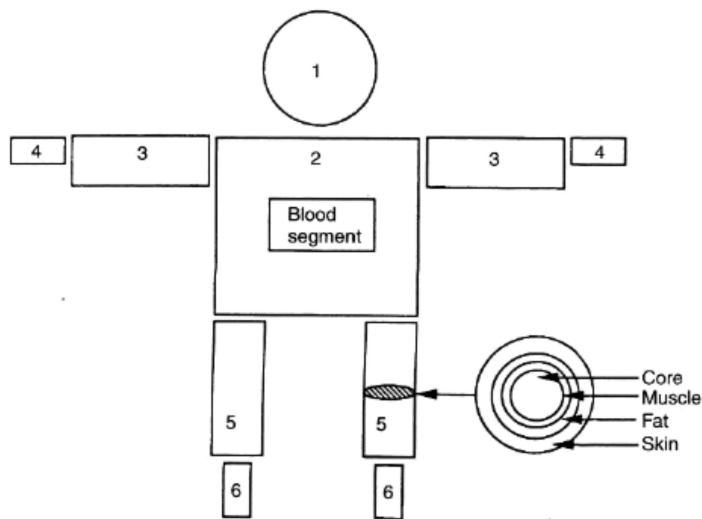


Figuur 4. Het model Gagge

Stolwijk

Het model van Stolwijk is aanzienlijk uitgebreider dan het Gagge model. Het passieve systeem van het model wordt gerepresenteerd door vijf cilinders van gepaste afmetingen (bepaald uit metingen aan proefpersonen) die de romp, armen, handen, benen en voeten representeren en door een bol, die het hoofd voorstelt. Elk van deze elementen bestaat uit vier concentrische lagen of compartimenten die het kernweefsel, het spierweefsel, de vetlaag en de huidlaag representeren.

Daarnaast is er een centraal bloedcompartiment aanwezig, welke de grote aders en slagaders vertegenwoordigt en warmte uitwisselt met alle andere compartimenten door middel van convectief warmtetransport dat optreedt bij de bloedstroming naar de compartimenten. Het model gaat ervan uit dat het lichaam symmetrisch is; zo worden de armen bijvoorbeeld door één cylinder gerepresenteerd. Het totale passieve model bestaat dus uit 25 knooppunten: zes elementen, die elk uit vier compartimenten bestaan en een centraal bloedcompartiment, zie onderstaande figuur.



Figuur 5. Het model Stolwijk

Per knooppunt wordt de dynamische energiebalans opgesteld en het metabolisme en de doorbloeding bepaald. De huiddoorbloeding en de gemiddelde huidtemperatuur worden berekend door de huiddoorbloeding en de huidtemperatuur van ieder element, naar huidoppervlakte gewogen, bij elkaar op te tellen. De gemiddelde lichaamstemperatuur wordt berekend uit het gemiddelde van alle elementtemperaturen met als weegfactor hun soortelijke warmtecapaciteit. In het model wordt uitgegaan van een gemiddelde man (1,72m, 74,4 kg met een volume van $74,4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$). De afmetingen en thermische eigenschappen van de verschillende elementen zijn bepaald op basis van resultaten afkomstig uit eerder onderzoek. Doordat het menselijk lichaam in het Stolwijk model is opgebouwd uit verschillende lichaamsdelen, is het mogelijk de isolerende werking van kleding alleen aan de lichaamsdelen toe te kennen die daadwerkelijk bedekt zijn met kleding. Daarnaast is het mogelijk om warmteopslag in het model mee te nemen, waardoor het model dynamisch is.

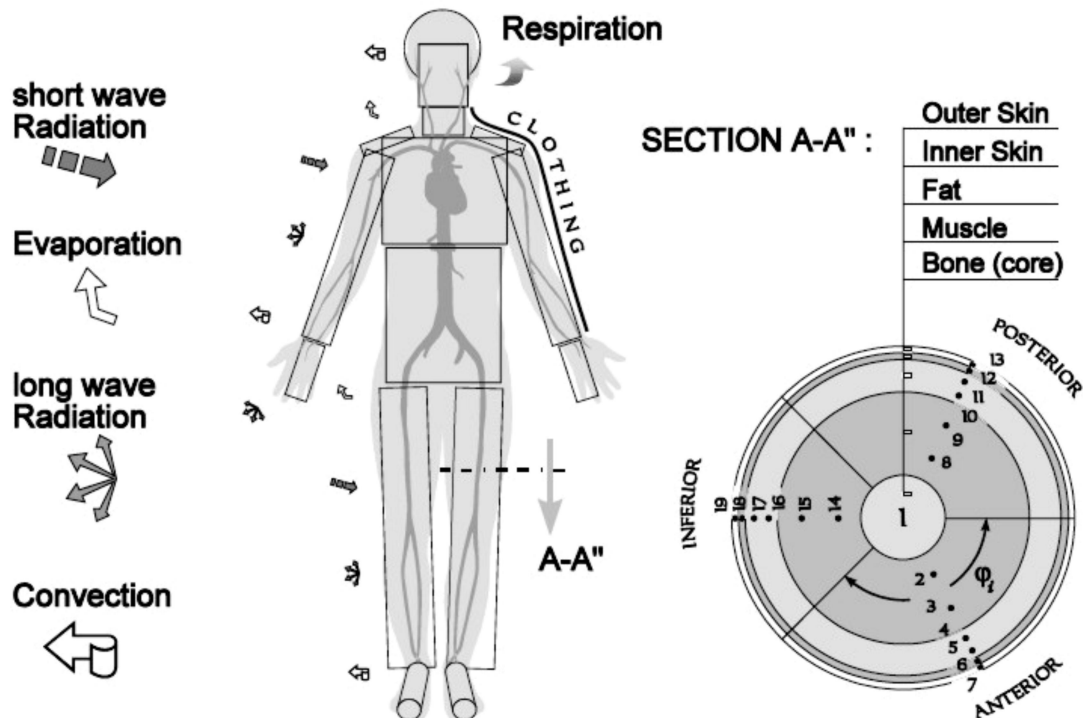
Het actieve systeem van het Stolwijk model bestaat uit een temperatuurwaarnemend systeem, een integrerend systeem en een regulerend systeem. Het is een eenvoudige representatie van het thermoregulatiesysteem van de mens en is net als het Gagge model gebaseerd op setpoint waarden. Voor ieder knooppunt wordt voor de setpoint waarde in principe de temperatuur aangehouden die in rusttoestand in een thermoneutrale omgeving wordt bereikt. Indien de temperatuur in één van de 25 knooppunten afwijkt van de setpoint waarde, vindt bijsturing plaats door middel van de regelmechanismen. Na deze bijsturing ontstaat een nieuwe situatie. Indien deze situatie weer afwijkt van de setpoint waarden, vindt opnieuw bijsturing plaats. Als de situatie lang genoeg duurt, zal zich op den duur een evenwichtssituatie instellen.

Fiala

Door Fiala is een thermofysiologisch model ontwikkeld dat de thermische respons van de mens en de hiermee samenhangende thermische sensatie voorspelt. Het passieve systeem van het model is opgebouwd uit 14 cilinders (gezicht, nek, 2 schouders, 2 armen, 2 handen, borstkas, buik, 2 benen en 2 voeten) en een bol voor het hoofd.

De warmteafgifte naar de omgeving is vaak niet symmetrisch, bijvoorbeeld door ongelijkmatig verdeelde kleding, stralingsasymmetrie of tocht. Om deze asymmetrische warmteafgifte in het model mee te kunnen nemen, zijn de elementen (behalve het gezicht en de schouders) verdeeld in meerdere sectoren. Het merendeel van de elementen is opgesplitst in drie sectoren: een posterieur, een anterieur en een inferieur deel. Het inferieure deel houdt hierbij rekening met de verminderde uitwisseling van stralingswarmte naar de omgeving doordat afscherming plaatsvindt door andere lichaamsdelen.

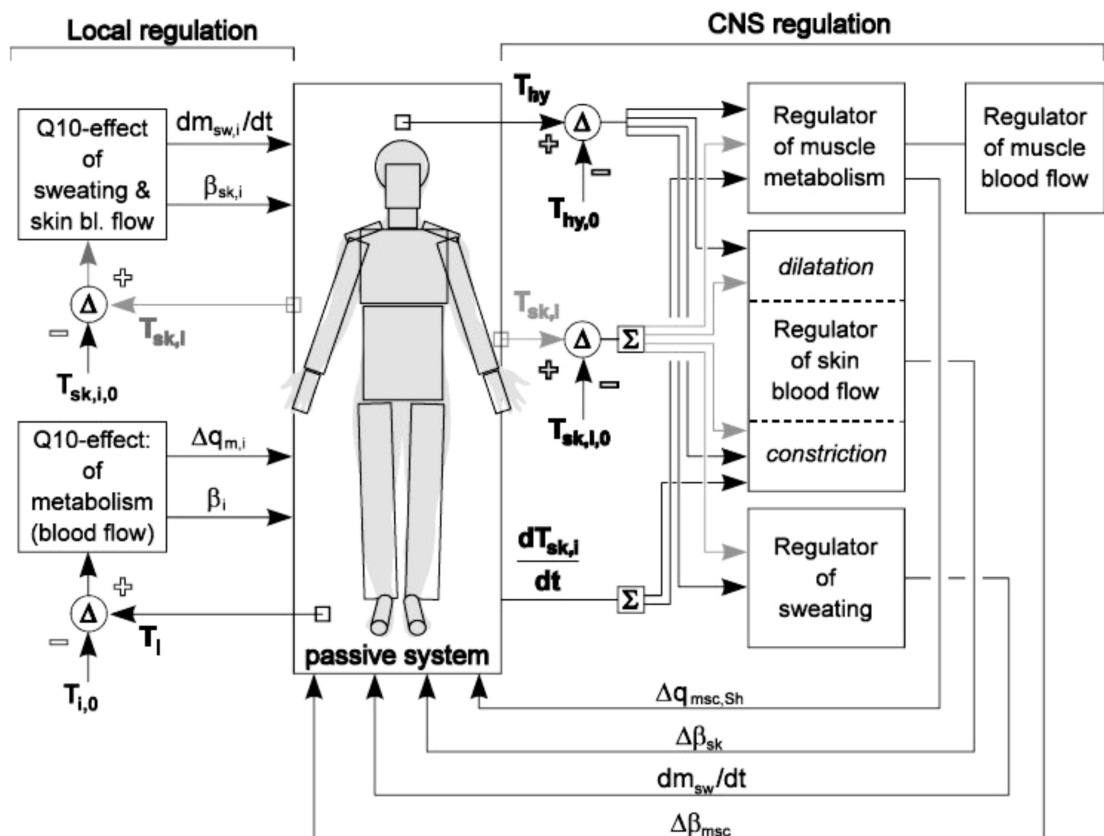
In het passieve systeem wordt zowel de warmtehuishouding in het lichaam zelf als het warmtetransport naar de omgeving meegenomen. Er wordt rekening gehouden met de houding van het lichaam (zittend of staand). Daarnaast is het mogelijk om de weerstand van kleding tegen warmte en vocht per individuele sector in te voeren.



Figuur 6. Het model Fiala

In het actieve systeem van het model zijn de verschillende thermoregulatiemechanismen (zweeten, vasodilatatie, vasoconstrictie en rillen) opgenomen. Dit

thermoregulatiegedeelte van het model is ontwikkeld op basis van regressieanalyse, waarbij gebruik is gemaakt van resultaten van een groot aantal eerdere onderzoeken. De koppeling tussen de fysiologische respons en de thermische sensatie is gebaseerd op statistische analyses van eerder uitgevoerd proefpersonenonderzoek onder een groot aantal omstandigheden. Volgens Fiala is het model hierdoor toepasbaar in zowel milde stationaire omgevingen als niet-gematigde klimaten (luchttemperatuur van 13°C tot 48°C), in niet-stationaire omgevingen, en van lage tot hoge activiteitsniveaus (0,8 tot 10 met).



Figuur 7. De regeling van het model Fiala

2.4.10. Fanger

De modellen van Gagge, Stolwijk en Fiala zijn thermofysiologische modellen. Fanger heeft een onderzoek gedaan op een groot aantal proefpersonen en hieruit een (empirische) formule afgeleid die de thermische behaaglijkheid van de mens uitdrukt.

Hij onderkende dat menselijk thermisch comfort wordt bepaald door de combinatie van de zes basisparameters:

1. luchttemperatuur
2. stralingstemperatuur
3. luchtvochtigheid
4. luchtsnelheid
5. metabolisme
6. kleding

Luchttemperatuur

De luchttemperatuur speelt een belangrijke rol bij de convectieve warmteoverdracht. Het lichaam wordt omringd door een laag 'warme' lucht, de zogenaamde natuurlijke convectieve grenslaag. In staande positie bouwt deze grenslaag zich op vanaf de voeten en kan bij het hoofd een dikte van meerdere centimeters bereiken. Variaties in de luchttemperatuur kleiner zijn dan 1°C hebben geen invloed zijn op het thermisch comfort; grotere variaties kunnen tot oncomfortabele situaties leiden.

Stralingstemperatuur

De gemiddelde stralingstemperatuur is de temperatuur van een denkbeeldige uniforme omhulling, waarin een kleine zwarte bol op dezelfde positie dezelfde stralingsuitwisseling heeft als in de werkelijke omgeving. Omdat de mens geen bolvorm heeft, kan de gemiddelde stralingstemperatuur van het lichaam niet gemeten worden met behulp van een zwarte bol.

Lucht- en stralingstemperatuur.

Voor de gecombineerde lucht- en stralingstemperatuur wordt ook wel de term operatieve temperatuur gebruikt. De operatieve temperatuur is de uniforme temperatuur van een denkbeeldige zwarte omgeving waarin een persoon dezelfde hoeveelheid warmte zou uitwisselen door straling en convectie als in de werkelijke niet-uniforme omgeving. De operatieve temperatuur is numeriek het gemiddelde van de lucht- en de stralingstemperatuur, gewogen door de respectievelijke warmteoverdrachtscoëfficiënten.

$$T_o = (h_c \cdot T_c + h_r \cdot T_r) / (h_c + h_r)$$

Een andere grootte is de effectieve temperatuur. Dit is de operatieve temperatuur (T_o) van een omgeving bij 50% vochtigheid die dezelfde voelbare plus latente warmte-uitwisseling met een persoon zou veroorzaken als in de werkelijke omgeving.

Luchtvochtigheid

Door verdamping van vocht aan het huidoppervlak wordt warmte aan het menselijk lichaam onttrokken. De drijvende kracht achter dit vochttransport is het verschil in absoluut vochtgehalte tussen het huidoppervlak en de omgeving. Hoe hoger de luchtvochtigheid, hoe moeilijker het voor de mens is om door middel

van verdamping warmte aan de omgeving af te staan. Bij gematigde temperaturen ($< 26^{\circ}\text{C}$) en een gematigd activiteitsniveau (< 2 met) is de invloed van de luchtvochtigheid op de warmte-afgifte van het lichaam en het waargenomen thermisch comfort gering.

Luchtsnelheid

In combinatie met de luchttemperatuur bepalen de luchtbewegingen de snelheid waarmee warmte lucht en vocht van het lichaam wordt afgevoerd. Het lichaam is in staat erg lage luchtsnelheden ($< 0,1$ m/s) waar te nemen.

Voor het thermisch comfort zijn naast de gemiddelde luchtsnelheid ook de variaties in de luchtsnelheid van groot belang.

Metabolisme

Zie: De warmtebalans van het menselijk lichaam.

Kleding

Kleding zorgt voor een thermische weerstand tussen het menselijk lichaam en zijn omgeving. Daarnaast hebben we ook te maken met thermisch isolerende luchtlagen, tussen het lichaam en de kleding en de grenslaag tussen kleding en omgeving. Naast de thermische isolatie zijn ook de luchtdoorlatendheid van de kleding, het vocht- en damptransport door de kleding en de houding van het menselijk lichaam van belang.

De thermische isolatiewaarde van kleding wordt meestal uitgedrukt in Clo eenheden. Eén Clo eenheid is de hoeveelheid thermische isolatie die benodigd is om een zittend persoon comfortabel te houden bij een omgevingstemperatuur van 21°C . Eén Clo eenheid komt overeen met een waarde van $0,155 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Formule

Op basis van de warmtebalans van het menselijk lichaam en resultaten van uitgebreid proefpersonenonderzoek heeft Fanger een methode ontwikkeld waarmee de te verwachten thermische sensatie voor de gemiddelde mens (Predicted Mean Vote) en het te verwachten aantal ontevredenen (Predicted Percentage of Dissatisfied) kan worden voorspeld. Fanger definieert drie condities waaraan voldaan moet worden om algeheel thermisch comfort te bereiken:

- de warmtebalans van het lichaam moet in evenwicht zijn;
- de mate van zweten moet binnen de comfortgrenzen blijven;
- de gemiddelde huidtemperatuur moet binnen de comfortgrenzen blijven.

Ook mag er geen sprake zijn van lokale thermische onbehaaglijkheid. De vereiste waarden voor de mate van zweten ($E_{\text{rs},\text{req}}$ - required sweating heat loss) en de gemiddelde huidtemperatuur ($T_{\text{sk},\text{req}}$ - required skin temperature) om thermisch comfort te bereiken zijn zowel afhankelijk van het metabolisme (M) als van de externe arbeid (W):

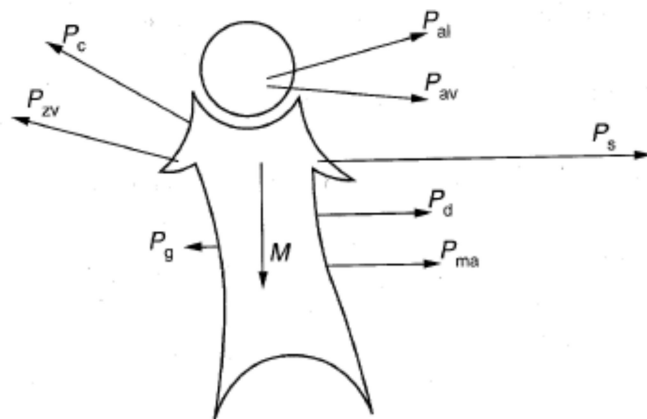
$$E_{\text{rs},\text{req}} = 0,42 \cdot (M - W - 58,15)$$

$$T_{\text{sk},\text{req}} = 35,7 - 0,0275 \cdot (M - W)$$

Uit de laatste vergelijking blijkt dat men de voorkeur heeft voor een huidtemperatuur van 34°C bij de activiteit 'zitten' ($M = 58 \text{ W/m}^2$) en dat de gewenste huidtemperatuur bij een activiteit met drie keer zoveel ontwikkelde warmteproductie, bijvoorbeeld 'lopen met 4 km/h ' ($M = 165 \text{ W/m}^2$) circa 31°C is.

Uit de eerste vergelijking blijkt dat men met de activiteit 'zitten' ($M = 58 \text{ W/m}^2$) de voorkeur heeft voor géén zweetproductie, terwijl bij meer activiteit, zoals 'lopen' of 'staan', de zweetproductie bij voorkeur een latent warmteverlies heeft van 42% van de extra warmteproductie. Lage omgevingstemperaturen waarbij niet wordt gezweet, worden als te koud ervaren.

Fanger veronderstelt dat de mate van discomfort afhankelijk is van de thermische belasting. De thermische belasting definieert hij als het verschil tussen de interne warmteproductie en het warmteverlies naar de omgeving voor een persoon die hypothetisch gezien de gemiddelde huidtemperatuur en de zweetafscheiding op de comfortwaarden houdt bij een bepaald activiteitsniveau. In een thermisch comfortabele situatie zal de thermische belasting nul bedragen.



Figuur 8. Het model Fanger

Energiebalans van de mens:
 M ontwikkelde energie (stofwisseling)
 P_{ma} uitwendig verrichte mechanische arbeid
 P_d dampdiffusie door de huid
 P_{zv} warmte-afvoer door zweetverdamping
 P_{av} met de ademhaling afgevoerde warmte
 P_{al} met de ademhaling afgevoerde waterdamp
 P_c warmte-uitwisseling met de lucht

Op basis van resultaten uit onderzoek met grote aantallen proefpersonen heeft Fanger een formule afgeleid om de thermische sensatie van een 'gemiddelde' persoon te bepalen, de zogenaamde Predicted Mean Vote (PMV). Deze formule is een functie van de hierboven genoemde zes basisparameters die bepalend zijn voor het thermisch comfort. De volledige formule voor de berekening van de PMV luidt:

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-0,036M} + 0,028) \cdot [(M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot \{5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a\} - 0,42 \cdot \{(M - W) - 58,15\} - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - T_i) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot \{(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4\} - f_{cl} \cdot h_c \cdot (T_{cl} - T_i)]$$

Hierin is:

M = metabolisme per m² [W/m²]

W = de uitwendige mechanische arbeid per m² [W/m²]

p_a = dampspanning van de binnenlucht in Pa

T_i = Temperatuur van de binnenlucht [°C]

T_r = Gemiddelde stralingstemperatuur [°C]

T_{cl} = Oppervlaktetemperatuur van de kleding [°C]

f_{cl} = oppervlaktefactor van de kleding

h_c = convectieve overdrachtscoëfficiënt [W/m²K]

$$T_{cl} = 35,7 - 0,028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot \{3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (T_{cl} - T_i)\}$$

I_{cl} = kledingisolatie [m²K/W]

$$h_c = \max \{ 2,38 \cdot (T_{cl} - T_i)^{0,25} ; 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \}$$

v_{ar} = relatieve luchtsnelheid in m/s

De thermische sensatie wordt uitgedrukt in een 7-puntsschaal:

7-puntsschaal voor PMV:

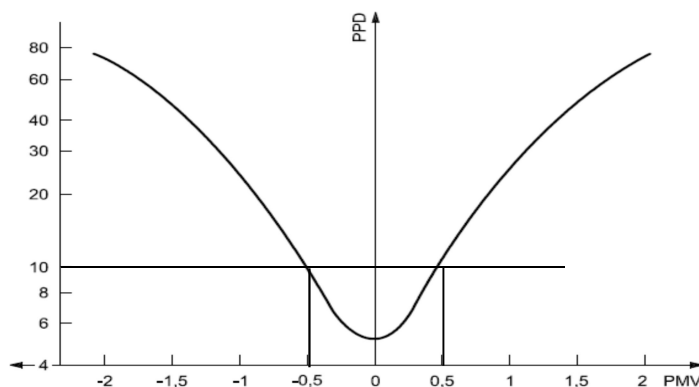
+3	heet
+2	warm
+1	lichtelijk warm
0	neutraal
-1	lichtelijk koel
-2	koel
-3	koud

De beoordeling geldt alleen binnen het behaaglijkheidsgebied waarin de experimenten zijn uitgevoerd. Aanbevolen wordt om de formule alleen te gebruiken voor het gebied $-2 < PMV < +2$. Bovendien gaat het model uit van een stationaire situatie, zodat men voor een kort verblijf in een ruimte (tot een half uur) of voor kortdurende activiteiten geen waardering van het klimaat kan maken. Daarnaast blijkt uit recent onderzoek dat de "comforttemperatuur" die mensen in praktijksituaties aangeven niet altijd overeenkomt met de thermisch neutrale temperatuur zoals die uit de PMV-berekening volgt.

Het model van Fanger verschaft in normale situaties waarbij men binnen het behaaglijkheidsgebied blijft (woningen, kantoren, scholen ets.) voldoende inzicht in de zaken waar het bij behaaglijkheid om gaat. Daarom wordt dit model het meest toegepast bij de beoordeling van de thermische behaaglijkheid in gebouwen.

Dit is ook de basis van de bepaling van het thermisch klimaat in NEN-ISO 7730: 'Gematigde thermische binnencondities. Bepaling van de voorwaarden voor thermische behaaglijkheid' en NEN-ISO 7726: 'Thermische binnencondities. Instrumenten en methoden voor het meten van fysische omgevingsgrootheden'.

NEN 7730 bevat een bijlage waarin aanbevolen behaaglijkheidseisen worden vermeld. Aanbevolen wordt een PPD-waarde (predicted percentage dissatisfied) te realiseren lager dan 10%, hetgeen leidt tot een te toetsen PMV-waarde (predicted mean vote) van: $-0,5 < PMV < 0,5$.



Figuur 9. De relatie tussen PPD en PMV

Voor de wintersituatie is de toepassing van bovengenoemd criterium zonder meer mogelijk. Voor de zomersituatie in principe ook. In woningen worden echter (tot nu toe) nog geen criteria gesteld. Daarnaast worden ook uit andere redenen (bouwkundig, architectonisch en/of financieel) geen eisen gesteld c.q. maatregelen genomen. Op deze wijze zijn toetsingscriteria tot stand gekomen, die ervan uitgaan dat gedurende een bepaalde tijd een overschrijding van het comfortcriterium toelaatbaar is bij bepaalde randvoorwaarden (bijvoorbeeld de aanwezigheid van de te openen ramen).

Het PMV-criterium heeft betrekking op de thermische gewaarwording voor het gehele lichaam. Overigens blijkt uit recent onderzoek dat de door mensen aangegeven 'comforttemperatuur' niet altijd overeenkomt met de thermisch neutrale temperatuur, zoals die uit de PMV-berekening volgt. Reden te meer om dit in het achterhoofd te houden bij een toetsing van het binnenklimaat.

Ontevredenheid met het binnenklimaat kan verder worden veroorzaakt door ieder van de componenten van het thermisch klimaat afzonderlijk. Te toetsen eigenschappen zijn o.a.:

- * temperatuur
 - Gradiënt
 - verschil tussen lucht- en stralingstemperatuur
 - Vloertemperatuur
 - Stralingsasymmetrie
 - Temperatuurfluctuaties
- * luchtsnelheid
 - gemiddelde luchtsnelheid
 - Luchttemperatuur
 - turbulentie-intensiteit
- * relatieve luchtvochtigheid

Onderzoek naar en beoordeling van het thermisch klimaat dienen bij voorkeur te geschieden met een bouwfysische evaluatie. Het is immers praktisch niet mogelijk om representatieve “bedrijfsomstandigheden” af te wachten. Mede aan de hand van detailinformatie van de componenten die de PMV-waarde bepalen, kan een extrapolatie naar de toetsingssituatie voor de winter plaatsvinden. De zomersituatie wordt veelal getoetst met behulp van een zogenaamde temperatuuroverschrijdingsberekening.

Meetmethode

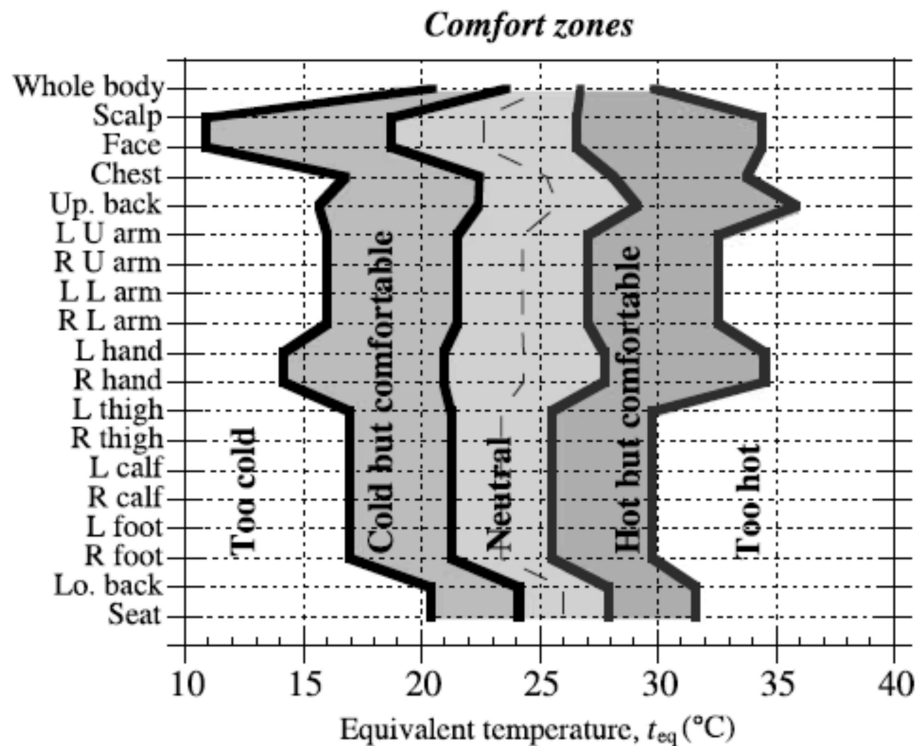
Comfortmetingen kunnen worden uitgevoerd met behulp van een zogenaamde binnenklimaat analyser (bijvoorbeeld Brüel & Kjær, type 1213). De meetopstelling bestaat uit een draagbare analyser, een aantal sensoren en een statief. Voor het bepalen van het thermisch comfort wordt gebruik gemaakt van temperatuursensoren (stralings- en luchttemperatuur), een sensor voor de luchtvochtigheid en van een sensor voor het bepalen van de luchtsnelheid. De sensoren worden geplaatst in het statief. De metingen worden uitgevoerd op vooraf gedefinieerde hoogten, bijvoorbeeld op een hoogte van 1,1 meter en op een hoogte van 0,2 meter boven de grond. De metingen worden uitgevoerd op representatieve plaatsen in de ruimte.

Lokaal thermisch discomfort

Thermisch oncomfortabele situaties kunnen ontstaan doordat het lichaam in zijn totaliteit te warm of te koud is, maar ook doordat slechts een gedeelte van het lichaam te warm of te koud is. De laatste jaren komt er steeds meer aandacht voor dit lokale discomfort. Door Nilsson en Holmér zijn zogenaamde comfortzones gedefinieerd waarmee op basis van de equivalente temperatuur ter plaatse van de verschillende lichaamsdelen een uitspraak kan worden gedaan over het thermisch comfort van deze lichaamsdelen (zie onderstaande figuur). De werkelijke thermische omgeving dient hiervoor te worden vertaald naar een equivalente temperatuur. De equivalente temperatuur wordt gedefinieerd als de temperatuur in een fictieve omsloten ruimte waarbij de gemiddelde stralingstemperatuur gelijk is aan de luchttemperatuur en er geen luchtstroming aanwezig is, zodanig dat de warmte-uitwisseling door straling en convectie van een persoon

naar de omgeving gelijk is aan de werkelijke situatie. Het verloop van de comfortzones is hierbij afhankelijk van de kleding eigenschappen.

Lokaal thermisch discomfort kan worden veroorzaakt door tocht, stralings-asymmetrie, een grote verticale temperatuurgradiënt of door contact met koude of warme oppervlakken. In dit dictaat wordt dieper ingegaan op het aspect tocht.



Figuur 10. Voorbeeld van comfortzones voor verschillende lichaamsdelen

2.4.11. Tocht

Om tochtverschijnselen in beeld te brengen, kan uitgegaan worden van de Draught Rate (DR) volgens NEN-EN-ISO 7730. Dit is een factor die aangeeft in hoeverre men 'tocht'-verschijnselen ervaart. De DR is het percentage ontevreden als gevolg van tochtverschijnselen.

Het percentage ontevreden over tocht is te berekenen met behulp van de volgende formule. Als uitgangspunt is gekozen voor een relatieve turbulentie - intensiteit van 40%.

$$DR = (34 - T_i) \cdot (v_{\text{gem}} - 0,05)^{0,62} \cdot (0,37 \cdot v_{\text{gem}} \cdot T + 3,14)$$

Waarin:

DR = (Draught Rate) het percentage ontevreden over tocht [%]

T_i = de luchttemperatuur [°C]

v_{gem} = de gemiddelde luchtsnelheid [m/s]

T = de relatieve turbulentie - intensiteit [-]

Voor $v_{\text{gem}} < 0,05$ m/s: gebruik $v_{\text{gem}} = 0,05$ m/s

Voor $DR > 100$ %: gebruik $DR = 100$ %

Dit draught rating model is van toepassing op mensen die zich in een thermisch neutrale situatie bevinden. Uit onderzoek is gevonden dat een verlaging in thermische sensatie met één punt van neutraal resulteerde in een twee tot drie keer hoger percentage ontevreden ten gevolge van tocht.

De draught rating modellen zijn gebaseerd op experimenten waarbij de gemiddelde luchtsnelheid iedere 15 minuten stapsgewijs werd verhoogd. Uit onderzoek is echter gebleken dat wanneer de fysische parameters die van invloed zijn op de waarneming van tocht constant worden gehouden, hinder ten gevolge van tocht met de tijd toeneemt en pas na 40 tot 50 minuten stabiliseert. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de voorgestelde modellen de effecten van tocht wellicht onderschatten.

Individuele verschillen

Tussen individuen onderling blijken grote verschillen te bestaan in gevoeligheid voor tocht. Vrouwen voelen zich eerder koud dan mannen en zijn gevoeliger voor tocht. Uit onderzoek van Fanger is gebleken dat vrouwen bij lage luchtsnelheden iets gevoeliger zijn voor tocht dan mannen. Dit verschil verdwijnt echter bij hogere luchtsnelheden. Mannen blijken even vaak luchtstromingen waar te nemen als vrouwen, maar voelen zich hierdoor minder snel oncomfortabel dan vrouwen. Mannen bereiken ook eerder een stationaire toestand dan vrouwen en hebben minder vaak last van koude.

De verschillen tussen geslachten die vaak worden genoemd, worden voor een groot deel veroorzaakt door de kleding. Het is daarom van belang bij experimenten de kleding voor beide geslachten gelijk te houden. Kleding heeft sowieso veel invloed op de mate waarin tocht wordt waargenomen.

Naast het verschil tussen de geslachten blijkt ook vermoeidheid een rol te spelen bij de waarneming van tocht. Het percentage dat zich oncomfortabel voelt door tocht blijkt significant hoger te zijn bij vermoeide mensen dan bij alerte mensen. Uit onderzoek is verder gebleken dat leeftijd geen invloed heeft op de mate waarin tocht wordt waargenomen of als oncomfortabel wordt ervaren. Hierbij

moet worden opgemerkt dat ouderen meestal minder actief zijn, waardoor het metabolisme meestal lager is, waardoor men wel gevoeliger is voor tocht.

De mens is niet op alle plaatsen van het lichaam even gevoelig voor tocht. De hoofdzone blijkt hiervoor het gevoeligst te zijn. Vaak treden ook klachten op over tocht bij de armen en voeten.

2.5. Geluid

In het Bouwbesluit zijn eisen opgenomen voor het installatiegeluid:

De eisen ten aanzien van installatiegeluid van een aangrenzend perceel volgens het Bouwbesluit zijn als volgt: Een toilet met waterspoeling, een kraan, een mechanisch ventilatiesysteem, een warmwatertoestel, een installatie voor het verhogen van waterdruk of een lift veroorzaakt in een op een aangrenzend perceel gelegen verblijfsgebied een volgens NEN 5077 bepaald karakteristiek installatiegeluidsniveau van ten hoogste 30 dB.

De eisen ten aanzien van installatiegeluid op hetzelfde perceel volgens het Bouwbesluit zijn als volgt: Een toilet met waterspoeling, een kraan, een mechanische voorziening voor luchtverversing, een warmwatertoestel, een installatie voor verhoging van waterdruk of een lift veroorzaakt in een niet-gemeenschappelijke verblijfsruimte van een aangrenzende op hetzelfde perceel gelegen woonfunctie een volgens NEN 5077 bepaald karakteristiek installatiegeluidsniveau van ten hoogste 30 dB.

Situatie	Toegestaan karakteristiek installatiegeluidniveau $L_{i,A,k}$
verblijfsgebied	maximaal 30 dB(A)
geen verblijfsgebied	geen eis

Tabel 3. Toegestaan karakteristiek installatiegeluidniveau van een installatie van een andere gebruiksfunctie.

Sinds 2012 is ook een eis gesteld aan het installatiegeluidniveau van de 'eigen' installatie. Een mechanische voorziening voor luchtverversing, warmteopwekking of warmteterugwinning veroorzaakt in een verblijfsgebied van de gebruiksfunctie een volgens NEN 5077 bepaald karakteristiek installatiegeluidsniveau van ten hoogste de in tabel 4 aangegeven waarde.

	eis	eenheid
Woonfunctie	30	dB
Bijeenkomstfunctie voor kinderopvang voor kinderen < 4 jaar	35	dB
Bijeenkomstfunctie andere kinderopvang	35	dB
Bijeenkomstfunctie voor kinderopvang met bedgebied	35	dB
Bijeenkomstfunctie voor kinderopvang	35	dB
Onderwijsfunctie	35	dB

Tabel 4. Maximum eisen installatiegeluid in een verblijfsgebied van de eigen gebruiksfunctie.

Naast het installatiegeluid spelen bij ventilatie nog andere belangrijke geluidaspecten een rol:

- buitengeluid via ventilatievoorzieningen in gevels;
- overspraak via ventilatiekanalen binnen de woning en tussen woningen onderling bij gestapelde bouw met collectieve ventilatiekanalen

Meetmethode:

Met behulp van een integrerende geluidniveaumeter wordt het minimale geluidniveau in de ruimte bepaald (A-gewogen). Tijdens het bepalen van dit geluidniveau zijn de, in de ruimte aanwezige, ramen en deuren gesloten. Het op deze manier gevonden geluidniveau wordt gebruikt als waarde voor $L_{i,A}$.

Dit niveau wordt omgerekend tot $L_{i,A;k}$ met behulp van de volgende formule:

$$L_{i,A;k} = L_{i,A} + 5 * \log \frac{V}{25}$$

Waarin:

$L_{i,A;k}$ = het karakteristieke A-gewogen installatiegeluidniveau [dB]

$L_{i,A}$ = het gemeten A-gewogen minimale geluidniveau [dB]

V = het volume van de ruimte [m^3]

2.6. Chemische agentia

In kantoren of gebouwen met een “kantoorachtig milieu” komen in meer of mindere vaak dezelfde agentia voor welke de luchtreinheid bepalen. De meeste van deze agentia komen ook voor in woningen; een aantal andere (Ozon, sommige VOC's) weer specifiek niet. De belangrijkste agentia zijn:

- kooldioxide (CO_2)
- koolmonoxide (CO)
- formaldehyde (CH_2O)
- vluchtige organische componenten (VOC)
- stikstofoxiden (NO_x)
- ozon (O_3)
- stof

- micro-organismen

Van deze agentia wordt een beknopte omschrijving gegeven van de kenmerken, de normen, de bronnen en de meest gangbare meetmethoden. Opgemerkt wordt dat met name de onderwerpen “stof” en “micro-organismen” zeer complex zijn en hier slechts summier en sterk samengevat worden behandeld.

Een tweede opmerking geldt het hanteren van grenswaarden. Hoewel grenswaarden vooral gerelateerd zijn aan (het voorkomen van) hinder is het vaak in praktijk dat bij binnenmilieuklachten of andere SBS symptomen dat er zelden ook een significante overschrijding van een of meerdere agentia wordt waargenomen (Seiffert, Healthy Buildings 2000).

2.6.1. Kooldioxide (CO₂)

Kenmerken:

CO₂ is een goede indicator voor de algemene luchtreinheid, vooral voor kantoren en woningen. De CO₂-concentratie geeft tevens een goede indicatie over de kwaliteit van de ventilatie, zowel in relatie tot het systeem als in relatie tot het gebruik van het gebouw.

Problemen met te hoge concentraties zijn vaak eerder gerelateerd aan “Hygiene” (dat wil zeggen, geurhinder) dan aan gezondheid. Te hoge CO₂ concentraties kunnen leiden tot klachten als vermoeidheid, hoofdpijn, bedompte lucht, geuroverlast, irritatie slijmvliezen)

Normen:

- hygiënische grenswaarde: 1200 ppm
- MAC-waarde: 5000 ppm
- streefwaarde: 600 ppm

Bronnen:

- mensen
- roken
- verbrandingsproduct

Meetmethoden:

Continu:

- fotometrisch
- foto akoestisch

Voor beide meetmethoden geldt dat de detectiegrenzen voldoende laag zijn en het meetbereik voldoende is voor de te verwachten binnenmilieu concentraties.

Momentaan:

- gasdetectie buisjes (zeer onnauwkeurig: kan alleen dienen ter indicatie)

2.6.2. Koolmonoxide (CO)

Kenmerken:

CO heeft twee gezondheidseffecten:

- acuut (vergiftiging): bij hoge concentraties
- chronisch: bij lage concentraties. hierbij kunnen nadelige effecten optreden voor hart en bloedvaten en het centrale zenuwstelsel.
- vroeger was vooral het acute effect van belang (“kolendamp”).
- nu is veel meer het chronische effect van belang. dit speelt vooral bij een verkeerd gekozen plaats van de luchtinlaat van het ventilatiesysteem (bijv. nabij een parkeergarage of een drukke weg).

Normen:

Voor CO geldt er een getrapte normstelling (WHO)

15 – min. gem.	100 mg/m ³
30 – min. gem.	60 mg/m ³
1 – uurs gem.	30 mg/m ³
8 – uurs gem.	10 mg/m ³

MAC-waarde: 27,5 mg/m

Advieswaarden Gezondheidsraad:

8-uursgemiddelde	40 mg/m ³
1 uursgemiddelde	10 mg/m ³

Streefwaarde: 1-2 mg/m³

NB: Bij niveaus tussen de 4 en 10 mg/m³ kunnen al problemen ontstaan voor hartpatiënten.

Bronnen:

Concentraties die ontstaan in de ruimte zijn afhankelijk van de bronsterkte, inhoud en ventilatie van de ruimte. Ter indicatie zijn onderstaand van een aantal bron de mogelijk optredende concentraties gegeven.

- roken (1 tot 10 mg/m³)
- wegverkeer, industrie met name in combinatie met een slecht gekozen plaats van de inlaat van het ventilatiesysteem (1 tot 10 mg/m³)
- rookgas terugslag (10 tot 50 mg/m³, bij calamiteiten > 100 mg/m³).

Meetmethoden:

Continu:

- fotometrisch, detectiegrens > 1 mg/m³
- fotoakoestisch, detectiegrens > 0,1 mg/m³
- elektrochemische oxidatie, detectiegrens > 1 mg/m³

Momenteel:

- gas detectiebuisjes (indicatieve meting)

2.6.3. Formaldehyde (CH₂O)

Kenmerken:

- formaldehyde heeft een sterk irriterende werking. Bepaalde mensen zijn hypergevoeligheid voor formaldehyde.
- formaldehyde is bovendien verdacht carcinogeen.
- het is een stof die veelvuldig in het binnenmilieu wordt aangetroffen en daarom, gezien ook de voorgaande twee opmerkingen, en de lage grenswaarde, de nodige aandacht behoeft.

Normen:

Grenswaarde:	120 µg/m ³
Streefwaarde:	< 60 µg/m ³
MAC-waarde:	1,5 mg/m ³

Bronnen:

- bouwproducten (spaanplaat, UF(Ureumformaldehyde)-schuim)
- afwerkmaterialen, lijmen, verf
- woningtextiel
- schoonmaakmiddelen (hoge pieken mogelijk)
- roken
- verbrandingsproduct (afvoerloze geisers, fornuizen), zeer hoge pieken mogelijk (1-10 mg/m³)

Meetmethode:

Continu:

In verband met de lage detectiegrens wordt CH₂O vaak met een foto-akoestisch-gasanalyser te meten. De detectiegrens ligt hierbij rond 50 µg/m³. Probleem is echter dat naast formaldehyde ook een aantal andere aldehyden worden gemeten zoals acroleïne en acetaldehyde alsmede een aantal andere organische verbindingen (bijvoorbeeld CH₄). Het is daarom niet altijd mogelijk om een betrouwbare absolute waarde te verkrijgen. In het algemeen wordt deze methode niet toegepast in het niet-industriële binnenmilieu)

Tijdsgemiddelde metingen:

De kunnen op twee manieren worden uitgevoerd:

- Met de impingermethode (coulourimetrisch). Hierbij is de extinctie een maat voor de concentratie.
- Met bemonstering met DNPH en een HPLC-analyse in het laboratorium (DNPH: dinitrophenylhydrazine used for formaldehyd analysis via HPLC: high performance liquid chromatography). Hierbij kan een scheiding gemaakt worden tussen diverse aldehyden.

2.6.4. Vluchtig organische verbindingen

Kenmerken:

- VOC's komen veelvuldig voor in binnenmilieu van woningen en kantoren
- overschrijding van advieswaarden van afzonderlijke componenten komt vrij weinig voor. Wel kan gecombineerde blootstellingen tot problemen leiden.
- een aantal verbindingen zijn carcinogeen zoals:
 - o benzeen (geeft regelmatig een overschrijding van de grenswaarde te zien)
 - o 1,2-dichloorethaan
 - o tetrachloorethaan

Normen:

advieswaarde: som van organische verbindingen (TVOC) = $< 0,2 \text{ mg/m}^3$

Er zijn thans twee benaderingen om VOC-niveaus te beoordelen.

- 1) TVOC - optellen van alle VOC's volgens een bepaalde definitie - in de praktijk alle verbindingen in het chromatogram tussen n-hexaan en n-hexadecaan verkregen met een GC met apolaire kolom en FID. Hierbij wordt geen rekening gehouden met de (grote verschillen tussen) toxische eigenschappen van de individuele verbindingen.
- 2) Iedere verbinding toetsen aan zijn individuele grenswaarde. De som van alle verbindingen, uitgedrukt als fractie van zijn grenswaarde mag niet hoger zijn dan 1. (additiviteitsregel, zoals gehanteerd in de arbeidshygiene voor de MAC van mengsels). Deze benadering is van oorsprong Deens (labelling), nu ook door Noorwegen overgenomen.

De tweede benadering is uiteraard juister, maar vraagt meer analytisch werk, terwijl van vele verbindingen geen (gefundeerde) grenswaarde bestaat.

Internationaal staat het gebruik van TVOC sterk ter discussie. Tot voor enkele jaren geleden werden de volgende TVOC grenswaarden gehanteerd:

Land	Grenswaarde TVOC in $\mu\text{g/m}^3$
Nederland	--
Duitsland (Seifert)	300
Duitsland (overheid)	--
Denemarken (Möhlhave)	200 en 3000
Scandinavië (SCANVAC)	200 en 500
Finland	200, 300 en 600
USA (EPA)	500
USA (staat Washington)	500

Tabel 5. Grenswaarden TVOC in diverse landen.

200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ werd internationaal gezien als een absoluut zekere grenswaarde, terwijl een TVOC concentratie van meer dan 3000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ een zeer grote kans op irritaties geeft.

Het TVOC-concept is in de Scandinavische landen verlaten. Buiten Scandinavië wordt TVOC als indicator nog steeds gehanteerd.

In Duitsland wordt wel een tussenweg gevolgd. Seifert (WBL - Berlijn) stelde in 1990 (Indoor Air Conference Toronto 1990) voor om grenswaarden voor groepen van verbindingen te hanteren. (alkanen, aromaten, esters, aldehyden, etc.). Hij stelt ook getalwaarden voor, maar zegt er bij, dat ze niet toxicologisch gefundeerd zijn.

Scholz en Santl (Gesellschaft für Umweltchemie) presenteren bij Indoor Air Conference 1999 een verfijndere versie van Seifert. Zij geven twee grenswaarden per groep: een target value en een action value. Zie tabel.

Groep verbindingen	Target value $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Action value $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Aromatische koolwaterstoffen	50	200
Alkanen en alkenen	50	200
Terpenen	30	200
Esters en ketonen	20	100
Aldehyden	10	50
Alcoholen	20	50
Glycolen en glycolethers	20	200
Andere	20	50
Totaal VOC	220	1000

Tabel 6. Target value en Action value voor diverse groepen verbindingen.

Advieswaarden voor afzonderlijke componenten:

Dichloormethaan	1,7 mg/m^3
Tetrachloorethaan	5 mg/m^3
Trichlooretheen	1 mg/m^3
Styreen	800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Tolueen	3 mg/m^3
Benzeen	12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ * (jaar)
1.2. dichloorethaan	37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ * (jaar)

* carcinogeen

Bronnen:

- bouwmaterialen
- afwerkmaterialen, lijmen, verf
- huishoudelijk producten

- drukwerk

Meetmethode:

Het continu meten van afzonderlijke componenten is in principe mogelijk, bijvoorbeeld:

- draagbare gas-chromatograaf (detectiegrens in ppb-sfeer)
- fotometrisch (te hoge detectiegrens: ppm-sfeer)
- fotoakoestisch (in ppb-sfeer mogelijk, vaak meerdere componenten op een filter)

Het meest gebruikelijke is echter het meten van een tijdsgemiddelde concentratie door middel van een GC-analyse op bemonsterde:

- actieve koolbuisjes (hogere detectiegrenzen, daarom voldoende lang bemonsteren, dat wil zeggen tenminste 1m³ lucht, geschikt voor dag- of weekgemiddelden. Deze methode wordt eigenlijk alleen toegepast in het industriële binnenmilieu)
- tenaxbuisjes (lagere detectiegrenzen, daarom kleiner bemonsteringsvolumes nodig; geschikt voor uurgemiddelden). Deze methode is genormaliseerd middels ISO/CD 16000-6

Opgemerkt wordt dat absorptie meestal niet het probleem is. De keuze van het desorptiesysteem en de kolom bepalen welke stoffen geanalyseerd kunnen worden. In ISO/CD 16000-6 wordt dit gespecificeerd.

2.6.5. Stikstofoxiden (NO_x)

Kenmerken:

NO_x is een verzamelnaam voor NO en NO₂; vooral NO₂ is schadelijk voor de gezondheid.

Bij chronische blootstelling kan een vermindering van de longfunctie optreden. Dit is vooral problematisch bij astmatici.

NO_x komt vooral vrij bij verbrandingsprocessen, waarbij met name afvoerloze gasapparatuur een rol speelt. Het is daarom vooral van belang bij woningen en wat minder voor kantoren.

Normen:

Advieswaarde gezondheidsraad:

400 µg/m³ (1 uur)

150 µg/m³ (24 uur)

100 µg/m³ (jaar)

MAC-waarde:

NO₂: 4 mg/m³

NO: 30 mg/m³

Bronnen:

- verbrandingsproduct (afvoerloze geisers, fornuizen), gemiddelden van 200 tot $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mogelijk.
- roken
- wegverkeer, industrie warmte, met name in combinatie met een slecht gekozen plaats van de inlaat van het ventilatiesysteem.

Meetmethoden:

NO_2 is lastig meetbaar in verband met de gewenste detectiegrens.

Voor continu metingen zijn allen gasanalyses op basis van chemoluminescentie geschikt (detectiegrens $> 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Voor het meten van tijdsgemiddelden is de methode met Palmes diffusiebuisjes bijzonder geschikt. Bij een meetduur van circa één week ligt de detectiegrens op $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

2.6.6. Ozon (O_3)

Kenmerken:

- ozon is een zeer agressief en toxisch gas;
- in verband met de toename van het aantal laserprinters en kopieerapparaten is ozon een toenemend probleem in kantoren; bij concentraties boven $6000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ treedt aantasting van luchtwegen en longen op. tussen 200 en $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ kunnen problemen optreden bij enige fysieke inspanning.

Normen:

advieswaarde (WHO):	$150\text{-}200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 uur)
	$100\text{-}120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (8 uur)

MAC-waarde:	$120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 uurgemiddelde)
-------------	--

Bronnen:

- laserprinters en kopieerapparaten;
- onder bepaalde omstandigheden (smog) kan het O_3 gehalte in de buitenlucht tussen de 150 en $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ liggen.

Meetmethode:

- Continu:
in verband met de lage detectiegrens is alleen meting op basis van chemoluminescentie mogelijk. De detectiegrens ligt rond de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Fotoakoestische metingen zijn qua detectiegrens mogelijk maar geven problemen met ijking. Fotometrisch.

- Tijdsgebundelde metingen:
impinger methode (indigodisulfonaat); hierbij is de extinctie een maat voor de concentratie.

2.6.7. Radon

Kenmerken:

Radon is een radioactief gas. Dit gas ontstaat door het radioactief verval van uranium. Uranium komt van nature in kleine hoeveelheden voor in de bodem en in bouwmaterialen. Radon wordt door radioactief verval omgezet in andere stoffen die ook radioactief zijn. In tegenstelling tot radon zijn deze stoffen echter niet gasvormig. Na inademing kunnen deze stoffen zich aan het longweefsel hechten. In de longen wordt vervolgens radioactieve straling uitgezonden. Als gevolg van deze straling bestaat een verhoogde kans op longkanker. De kans op longkanker tengevolge van radon wordt geschat op ongeveer 1000 mensen per jaar (dit wil zeggen dat er een kans van 1 op 15000 bestaat dat een mens overlijdt aan longkanker ten gevolge van radon).

De radon concentratie in de woning is afhankelijk van de plaats van het huis, doordat de concentratie radon in de bodem van plaats tot plaats verschilt. Omdat radon een gas is kan het zich verplaatsen via kleine luchtruimtes in de bodem en in de bouwmaterialen. Radon kan zo via de bodem in de kruipruimte van het huis terecht komen en dan via openingen in de vloer van de begane grond in de woning terecht komen. Het radon dat ontstaat in de bouwmaterialen van de muren, vloeren etc. kan direct in de woning terechtkomen. Voor de Nederlandse woningen wordt geschat dat ongeveer 20 tot 70% van het aanwezige radon via de bodem in de woning komt, de rest is afkomstig van bouwmaterialen.

Normen:

De hoeveelheid radon in de woning wordt aangegeven in Becquerel per kubieke meter (Bq/m^3). Radon concentraties in de woning zijn in het algemeen hoger dan radon concentraties in de buitenlucht, omdat het radon zich in de woning kan ophopen. De radon concentratie in de kruipruimte is in het algemeen hoger dan de radon concentratie in de rest van de woning omdat de kruipruimte in direct contact staat met de bodem. Als grenswaarde wordt 20 Bq/m^3 gehanteerd.

Bronnen:

- Bouwmaterialen
- Kruipruimte

Meetmethode:

De radonmetingen worden uitgevoerd met behulp van radonmeetbekers van het Kernfysisch versneller instituut (KVI) te Groningen.

Metingen vinden doorgaans plaats in de woonkamer, en in een aantal gevallen in de slaapkamer, meestal op een meethoogte van ca. 1,80 m.

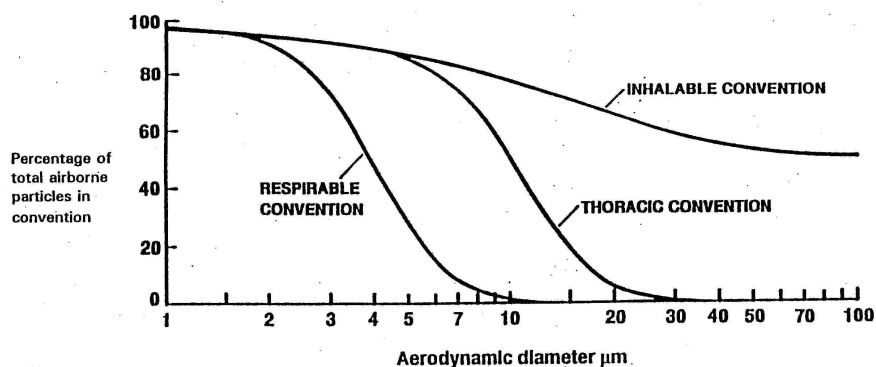
2.6.8. Stof

Kenmerken:

Stofdeeltjes in lucht kunnen verschillende afmetingen hebben. In lucht zwevende deeltjes worden aerosolen genoemd. De afmetingen van aerosolen liggen tussen 0,01 μm en 200 μm .

Voor de luchtreinheid is van belang de stoffractie welke van invloed is op de gezondheid:

- < 200 μm is de fractie welke inadembaar is.
- < 10 μm is de fractie welke de borstkas kan bereiken, dit wordt thorocaal stof genoemd (= pm10 (*particulate matter*)).
- < 5 μm is de fractie welke de longblaasjes kunnen bereiken (en beschadigen), dit wordt respirabel stof genoemd.



Figuur 11. Percentage of total airborne particles in convention.

Normen:

Normwaarden voor stof worden voornamelijk gravimetrisch uitgedrukt. Alleen voor vezelmetingen en cleanroomtoepassingen worden numerieke grenswaarden gehanteerd.

Normwaarden voor stof kunnen gravimetrisch of numeriek worden uitgedrukt.

Voorbeeld van numerieke grenswaarden:

asbest: 10 vezels/ m^3

Ook voor cleanrooms worden normen gesteld door middel van numerieke grenswaarden.

Grenswaarden voor een gezond binnenmilieu worden als gravimetrische waarden gesteld:

pm10 (thorocaal)	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	(jaar)
	140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	(24 uur)
totaal stof	75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	(jaar)
	260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	(24 uur)

Meetmethode:

Inhaleerbaar stof wordt gemeten door bemonstering met 6 mm PAS op filters en weging op een microbalans. Bij inhaleerbaar stof dient de aanzuigsnelheid 1,25 m/s te bedragen. In de praktijk wordt hiermee de thorocaal fractie bemonsterd. Er zijn discussies gaande om de PAS (Personal air sampler) metingen te vervangen door IOM (Institute of Occupational Medicine) metingen waarmee wel de totaal inhaleerbare fractie wordt bemonsterd.

Respirabel stof kan eveneens gemeten worden door bemonstering op filters. Er is dan echter een voorafscheider (cycloonfilter) nodig om de respirabele of de thorcale stoffractie te scheiden. Van belang is dat met het juiste debiet bemonsterd wordt. Voor respirabel stof zijn ook continu registrerende stofmeters beschikbaar. De meest bekende is de tyndallometer.

Indien men stof in de kanalen meet dient in principe isokinetisch gemeten te worden, dat wil zeggen met een gelijke aanzuigsnelheid als de luchtsnelheid in het kanaal.

2.7. Biologische agentia - Micro-organismen

Kenmerken:

- problemen met microbiologische verontreinigingen treden vooral op in bedrijven waar biologisch materiaal wordt gehanteerd of verwerkt.
- in kantoren kan het echter ook een probleem zijn, vooral bij luchtbehandelingsinstallaties. Hierdoor kunnen infectieziektes of allergische reacties optreden.

Bronnen (kantoren):

- bevochtigings- en ventilatiesystemen
- vooral bij verdamper
- luchtinlaat van het ventilatiesysteem nabij koeltorens, watergekoelde condensators of ontluchtingspijpen
- wanden van ventilatiekanalen, inductie-units, luchtbehandelingskasten

Metingen:

Indien men vermoedens heeft over een mogelijk verband tussen bepaalde klachten en micro-organismen dan kan het beste met een oriënterend onderzoek naar de microbiologische kwaliteit van het binnenmilieu en/of een monsternamen bij potentiële bronnen worden begonnen. Zijn er medische klachten (ziektes of allergische reacties) die heel duidelijk veroorzaakt worden door een bepaald micro-organisme dan kan hier een gericht onderzoek naar plaatsvinden.

Meettechnieken (voor een oriënterend onderzoek):

Monstername: dipslides

Luchtmonsters:

- anderssen n-6 sampler
- RCS-biosampler (Reuter centrifugal sampler)

Met deze methoden worden voedingsbodems bemonsterd. Daarna vindt bebroeding bij een bepaalde temperatuur plaat, afhankelijk van de voedingsbodem en de te onderzoeken groepen van micro-organismen. Daarna vindt een telling van het aantal kolonievormende eenheden (KVE) plaats. Dit wordt het Totaal Aëroob Kiemgetal genoemd. Met deze methode zijn eenvoudige routinematige onderzoeken mogelijk en wordt een indicatie van de algemene microbiologische kluchtkwaliteit verkregen.

Normen:

Er is geen eenduidige normstelling voorhanden. Een goede interpretatie is evenmin niet eenvoudig. Een indicatie is dat het aëroob kiemgetal echt “hoog: te noemen is bij $> 10.000 \text{ KVE/m}^3$.

Als grenswaarde kan gehanteerd worden:

- schimmels 75 KVE/m^3
- bacteriën 500 KVE/m^3 per soort

Een onderscheid tussen schimmels en bacteriën is redelijk eenvoudig te maken. Een onderscheid op een bebroede voedingsbodem naar bacteriën of schimmels per soort echter niet. Daarom kan gesteld worden dat bij een aëroob kiemgetal boven 500 KVE/m^3 en klachten die kunnen wijzen op microbiologische verontreinigingen een nadere determinatie gewenst is.

Deze nader determinatie kan plaatsvinden op een aantal micro-organismen, welke typisch in luchtbehandelinginstallaties voorkomen zoals.

Bacteriën

- thermofiele actinomyceten
- bacillus (species, cereus, subtilius)
- staphylococcus
- micrococcus
- enterobacter

Schimmels:

- aspergilus
- mucor
- penicillium

3. Basisbegrippen en principes ventilatie

3.1. Basisbegrippen

Voor woningen worden in de wetgeving eisen gesteld aan de luchtverversing. Basisbegrippen hierbij zijn:

- Ventilatie
- Infiltratie
- Spuien

Onder ventilatie wordt verstaan: de gecontroleerde luchtuitwisseling tussen binnen en buiten. Verontreinigde lucht in een gebouw wordt naar buiten afgevoerd en 'schone' buitenlucht wordt toegevoerd. Ventilatie wordt bewust teweeggebracht via speciaal daartoe aangebrachte ventilatievoorzieningen en is bij voorkeur regelbaar en controleerbaar.

Infiltratie, ofwel onbewuste ventilatie of dwarsventilatie, daarentegen vindt plaats via kieren, naden en andere lekken in de bouwkundige constructies. Infiltratie is altijd ongecontroleerd en leidt tot onnodig energieverlies en kan tochtverschijnselen en discomfort veroorzaken. Infiltratie dient daarom zoveel mogelijk beperkt te worden.

Spuiventilatie, ook wel 'luchten' genoemd, vindt plaats door te openen geveldelen en dient om sterk verontreinigde binnenlucht snel te kunnen afvoeren.

3.2. Ventilatie

3.2.1. Waarom ventilatie?

In de eerste plaats wordt er geventileerd omdat levende wezens zoals mensen en dieren zuurstof nodig hebben om in leven te kunnen blijven. De hiervoor benodigde luchtvolume-stroom is echter klein, vergeleken met de luchtvolume-stroom die nodig is om tevens de concentratie van door de mens geproduceerde geuren en andere stoffen effectief te verlagen tot een aanvaardbaar niveau. Uit hygiënische overwegingen worden dus zwaardere eisen aan de ventilatie gesteld dan strikt noodzakelijk is om te overleven.

Ventilatie van woningen is dan ook in de eerste plaats nodig uit oogpunt van *hygiëne en gezondheid*. Ventilatie moet zorgen voor de toevoer van zuurstof en voor de afvoer van verontreinigde binnenlucht; kooldioxide, waterdamp, onaangename geurstoffen en stofdeeltjes. Hiervan is de afvoer van de (door de mens geproduceerde) kooldioxide en de hoeveelheid geurstoffen maatgevend voor de aan ventilatie gestelde eisen. In keukens en badruimten is de afvoer van vocht, veroorzaakt door koken, wassen en dergelijke bepalend voor de hoeveelheid ventilatie. Ook in verband met emissies van stoffen door bouw- en afwerkings-

materialen en inrichtingselementen, bijvoorbeeld formaldehyde-emissie, is ventilatie van belang.

Ventilatie heeft tevens als doel overtollige warmte af te voeren en levert hiermee een bijdrage aan het *thermisch comfort*. (En kan bij te hoge lichtsnelheden tevens leiden tot discomfort). In de zomer wordt warmte overigens voor een belangrijk deel via spui ventilatie afgevoerd.

Daarnaast heeft ventilatie uit het oogpunt van *veiligheid en gezondheid* nog als doel het toevoeren van zuurstof voor verbrandingstoestellen en de afvoer van verbrandingslucht bij atmosferische gastoestellen.

3.2.2. Hoe komt ventilatie tot stand?

Ventilatie komt tot stand door luchtdrukverschillen die via openingen in de gebouwschil luchttransporten veroorzaken. De drukverschillen worden veroorzaakt door:

Natuurlijke krachten:

- Drukverschillen over een woning ten gevolge van wind;
- Drukverschillen over de gevels ten gevolge van temperatuurverschillen.

Mechanische krachten:

Drukverschillen ten gevolge van ventilatoren.

De basisprincipes van ventilatie zijn dan ook natuurlijke ventilatie en mechanische ventilatie. Natuurlijke ventilatie komt tot stand onder invloed van:

- Wind

Ten gevolge van de aanwezigheid van luchtdrukverschillen in de atmosfeer treedt luchtverplaatsing op: de wind. De ruwheid van het aardoppervlak en de dichtheid van bebouwing of bebossing bepaalt in hoeverre de wind nabij het aardoppervlak wordt afgeremd. Wanneer de wind een gebouw treft zal een deel van de snelheidsenergie worden omgezet in druk. De windaanval op het gebouw veroorzaakt derhalve een drukverschil over het gebouw, de naar de wind toegekeerde gevel (loefzijde) krijgt overdruk ten opzichte van de van de wind afgekeerde gevel (lijzijde) en een min of meer horizontaal gelegen dakvlak. De vorm van de bebouwing en zijn directe omgeving spelen hierbij een belangrijke rol. De volumestroom door een opening vanwege drukverschil door wind kan berekend worden door:

$$q_v = c \cdot \Delta p^n$$

waarin:

q_v	=	luchtvolumestroom [dm^3/s]
c	=	luchtstroombdoorlatendheidscoëfficiënt [$\text{dm}^3/\text{s} \cdot \text{Pa}^n$]
n	=	stromingscoëfficiënt $0,5 < n < 1,0$ [n]
Δp	=	drukverschil [Pa]

bij 1 Pa is $q_v = c$ [dm^3/s] dus gelijk aan de luchtdoorlatendheidscoëfficiënt.

Voor klepramen geldt bij benadering:

$$c = 0,91 \cdot A \cdot 10^{-3}$$

Voor roosters geldt bij benadering:

$$c = \frac{0,65 \cdot A \cdot 10^{-3}}{\sqrt{\sum \zeta}}$$

waarin:

A = oppervlakte rooster [m²]

$\sum \zeta$ = som van de weerstandsfactoren van het rooster [-], waarden zijn gegeven in diverse literatuur;

– Temperatuur

Temperatuurverschillen tussen binnen en buiten veroorzaken verschillen in de soortelijke massa van de lucht welke weer drukverschillen veroorzaken, het schoorsteeneffect treedt op waarbij warme, lichtere lucht opstijgt om het gebouw via het dak te verlaten terwijl koudere, zwaardere buitenlucht beneden toe zal treden. Het schoorsteeneffect kan berekend worden door:

$$\Delta p = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot \Delta t}{T}$$

waarin:

ρ = soortelijke massa van lucht [1,2 kg/m³]

g = gravitatieversnelling [9,8 m/s²]

h = hoogte schoorsteen [m]

Δt = temperatuurverschil tussen binnen en buiten [K]

– Turbulentie

Ten gevolge van lokale thermische krachten of stromingen langs randen en obstakels in de buurt van de openingen, kunnen luchtwervelingen ontstaan waardoor door een opening tegelijkertijd lucht kan worden toegevoerd als afgevoerd.

Mechanische ventilatie wordt tot stand gebracht door middel van ventilatoren. De basiscomponenten bij mechanische ventilatie zijn: ventilator, kanalen en roosters/dakkap. Eventueel uit te breiden met filters, geluiddempers, verwarmings- koelings- en bevochtigingssectoren, kleppen etc.

3.2.3. Spanningsveld binnenmilieu en comfort

Ventilatie heeft een sterke invloed op het thermisch comfort in een ruimte. De invloed op het comfort wordt met name bepaald door de luchtsnelheid, de turbulentie en de temperatuur van de lucht. Hierbij geldt dat hoe groter de luchtsnelheid, des te meer tocht wordt ervaren. Tevens geldt hoe groter het temperatuurverschil tussen ruimtetemperatuur en ventilatieluchttemperatuur, des te meer tocht wordt ervaren. Om tochtklachten tegen te gaan wordt bij woningventilatie altijd geprobeerd de binnenkomende lucht zo snel en zo volledig mogelijk te vermengen met de ruimtelucht, zodat er geen of slechts een klein verschil in temperatuur en luchtsnelheid overblijft zodra de binnenkomende lucht in de nabijheid van mensen komt. Met name ventilatiesystemen met natuurlijke luchttoevoer geven aanleiding voor tochtklachten. De ervaring leert dat ventilatievoorzieningen in de gevel dichtgezet worden wanneer er tochtverschijnselen optreden. Met alle gevolgen van dien voor de binnenluchtkwaliteit.

3.2.4. Spanningsveld binnenmilieu en energiegebruik

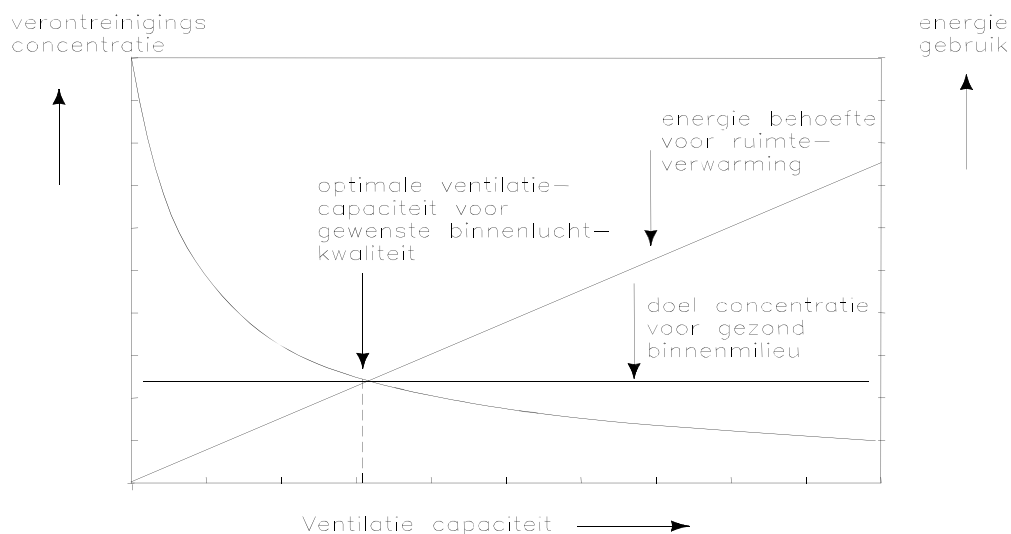
Meer ventileren betekent: een gezonder binnenmilieu. Maar meer ventileren betekent ook: meer energiegebruik. Het totale ventilatiedebiet heeft hierdoor een directe relatie met het energiegebruik.

Het is daarom van belang om een optimum te zoeken tussen gewenst binnenmilieu, benodigde ventilatiecapaciteit en energiegebruik. Het is derhalve van belang dat een goede ventilatiestrategie wordt gekozen.

Ventilatiestrategie:

- Vermijd verontreinigingsbronnen;
- Beperk zoveel mogelijk de emissies van niet te vermijden verontreinigingsbronnen;
- Kies een ventilatiesysteem dat past bij het gebouwconcept en de te verwachten verontreinigingen;
- Ventileer op een efficiënte manier zodat met de juiste hoeveelheden op het juiste moment op de juiste plaats geventileerd wordt.

In onderstaande figuur is de ventilatiestrategie nog eens grafisch toegelicht.



Figuur 12. Optimalisatie ventilatiestrategie.

De temperatuur buiten is een belangrijk gedeelte van het jaar lager dan de gewenste binnentemperatuur. De lucht die vanuit de woning naar buiten stroomt heeft meestal ongeveer de binnentemperatuur aangenomen. Om de ventilatietoevoerlucht op te warmen is energie in de vorm van warmte nodig. Deze energie wordt voor een belangrijk deel door de verwarmingsinstallatie geleverd. Met name de ongecontroleerde infiltratie van buitenlucht is hierbij van belang. Dat een bepaalde gewenste hoeveelheid ventilatielucht moet worden opgewarmd is onvermijdelijk. De onbeheersbare infiltratie is soms groter dan de gewenste ventilatie en betekent dus een onnodig gebruik van energie.

3.2.5. Basisprincipes van ventilatie voor woningen

In Nederland worden ventilatiesystemen van woningen ingedeeld op basis van praktijkrichtlijn NPR 1088. Hierin worden de volgende systemen onderscheiden:

Systeem A: natuurlijke toevoer en afvoer (natuurlijke ventilatie)

Systeem B: mechanische toevoer en natuurlijke afvoer

Systeem C: natuurlijke toevoer en mechanische afzuiging

Systeem D: mechanische toevoer en mechanische afvoer

(gebalanceerde ventilatie)

Bij *systeem A* zijn in de gevels van verblijfsruimten (kamers en keukens) regelbare ventilatievoorzieningen aanwezig terwijl de afvoer via overstroomvoorzieningen in de binnenwanden plaatsvindt (bijvoorbeeld spleten onder deuren) en door verticale ventilatiekanalen in de keuken, de toilet- en de badruimte. Dit systeem kan in combinatie met een afzuigkap of andere lokale mechanische afzuiging toegepast worden.

Bij *systeem B* wordt in alle verblijfsruimten door middel van een kanalsysteem lucht op mechanische wijze ingeblazen terwijl de afvoer plaatsvindt door verticale bouwkundige afvoerkanalen. Dit systeem komt in Nederland nauwelijks voor. Een enkele keer komt dit systeem nog voor in oudere luchtverwarmingssystemen.

Bij *systeem C* zijn in de gevel regelbare ventilatievoorzieningen aanwezig terwijl de afvoer plaatsvindt via openingen in binnenwanden en door een kanalsysteem dat lucht mechanisch afzuigt uit de keuken, toilet- en badruimte. In Nederland is dit het meest toegepaste systeem.

Bij *systeem D* wordt door een kanalsysteem in alle verblijfsruimten lucht mechanisch toegevoerd, terwijl de afvoer plaatsvindt via openingen in binnenwanden en door een kanalsysteem dat lucht afzuigt uit de keuken, de toilet- en badruimte. Gebalanceerde ventilatie vindt in het algemeen plaats in combinatie met een warmteterugwinapparaat (WTW of WTA), waarin zijn ondergebracht een toevoer- en een afzuigventilator, een warmteterugwinblok (meestal een platenwisselaar) en filters. Indien gewenst, kan naverwarming worden toegepast (elektrisch verwarmingselement of een warmtewisselaar met cv-water).

NPR 1088 kent een kwalificatie toe aan de bovengenoemde ventilatiesystemen. Indien een ventilatiesysteem een kwalificatie van tenminste voldoende heeft, wordt geacht dat dit systeem voor de betreffende toepassing aan de prestatie-eisen van het Bouwbesluit kan voldoen.

Ventilatiesysteem	Woningen en lage woongebouwen (maximaal 4 bouwlagen)	Hoge woongebouwen
Systeem A	Voldoende	(On)voldoende
Systeem B	Ruim voldoende	(On)voldoende
Systeem C	Ruim voldoende	Voldoende
Systeem D	Goed	Goed

Tabel 7. Systeemkwalificatie volgens NPR 1088

In de systeemkeuze is men in principe vrij. Het Bouwbesluit schrijft geen ventilatieprincipe voor. Men mag dus in principe ieder ventilatiesysteem toepassen, mits aan de prestatie-eisen uit het Bouwbesluit wordt voldaan. Wél schrijft het Bouwbesluit prestatie-eisen voor ten aanzien van de binnenluchtkwaliteit, het thermisch comfort, het geluid van buiten, geluid van installaties en energie.

Het meest toegepaste ventilatiesysteem in de nieuwbouw van zowel eengezinswoningen als meergezinswoningen is, door de strenger wordende EPC-eisen, momenteel systeem D, met hoog rendement warmteterugwinning.

Van de systemen C en D zijn inmiddels talloze varianten ontwikkeld die het energiegebruik beperken bij een goede luchtkwaliteit. Deze systemen zijn zeer divers

met opties als CO₂-sensoren, filtering, decentrale warmteterugwinning, et cetera.

3.3. Infiltratie

3.3.1. Algemeen

Infiltratie vindt plaats via kieren, naden en andere lekken in de bouwkundige constructies. De mate van infiltratie wordt bepaald door de luchtdoorlatendheid van de woning of het woongebouw. De begrippen *luchtdichtheid* en *luchtdoorlatendheid* worden in het spraakgebruik vaak door elkaar gebruikt. Het zijn in feite elkaars tegenovergestelden. In de regelgeving wordt in het algemeen de term "luchtdoorlatendheid" gebruikt.

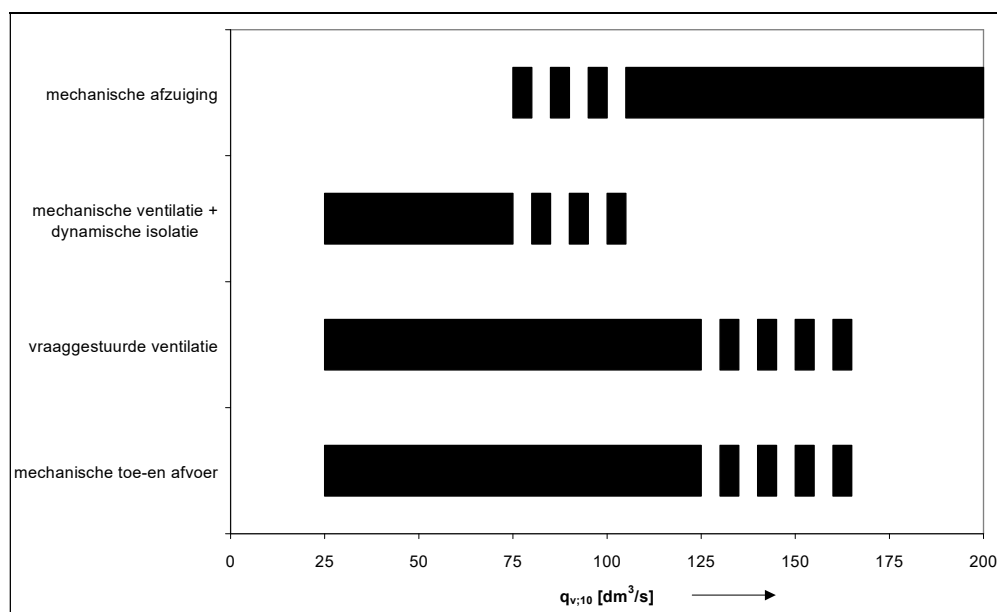
De luchtdoorlatendheid wordt uitgedrukt in de $q_{v,10}$ -waarde, dit is de lekvolume-stroom door de gebouwschil bij een drukverschil van 10 Pa. De $q_{v,10}$ -waarde kan bepaald worden na de bouw door het uitvoeren van metingen (opblaasproef) volgens NEN 2686. Het is echter van belang om van te voren te weten of men de luchtdichtheidseis zal halen. Met behulp van de rekenmethode uit SBR-publicatie 200 en 360 kan de $q_{v,10}$ -waarde globaal worden bepaald vanaf tekening. Aandachtspunten bij de detaillering van naden en kieren zijn:

- kierdichting van ramen en deuren;
- aansluitingen tussen kozijnen en gevels;
- aansluitingen van daken op gevels en bouwmuren;
- daknokken;
- dakdoorvoeren;
- vloeren.

3.3.2. Relatie ventilatiesysteem en luchtdichtheid

Aan het beperken van de luchtdichtheid van een woning zijn wettelijke eisen gesteld. Deze zijn bedoeld voor het beperken van energieverliezen en voor het beperken van toetreding van (vochtige) lucht uit een kruipruimte.

Indien de infiltratie tot een minimum wordt beperkt is de totale woningventilatie geheel afhankelijk van het gebruik van ventilatievoorzieningen. Indien deze voorzieningen niet worden gebruikt dan vindt er in een luchtdichte woning in het geheel geen ventilatie plaats. In een niet geheel luchtdichte woning vindt in een dergelijke situatie nog altijd enige achtergrond ventilatie plaats door middel van in- en exfiltratie. Dit betekent dat in luchtdichte woningen de inrichting van de toegepaste ventilatievoorzieningen dusdanig moet zijn dat deze onder alle weers- en gebruiksomstandigheden ook daadwerkelijk gebruikt kunnen worden. Ventilatie-roosters, zonder verdere geavanceerde regelingen, zullen bij windaanval of lage buitentemperaturen gesloten worden. In een zeer luchtdichte woning leidt dit tot binnenmilieuproblemen.



Figuur 13. Globale indicatie toepasbaarheid ventilatiesystemen als functie van de luchtdichtheid (bron: Techniekinventarisatie ventilatie)

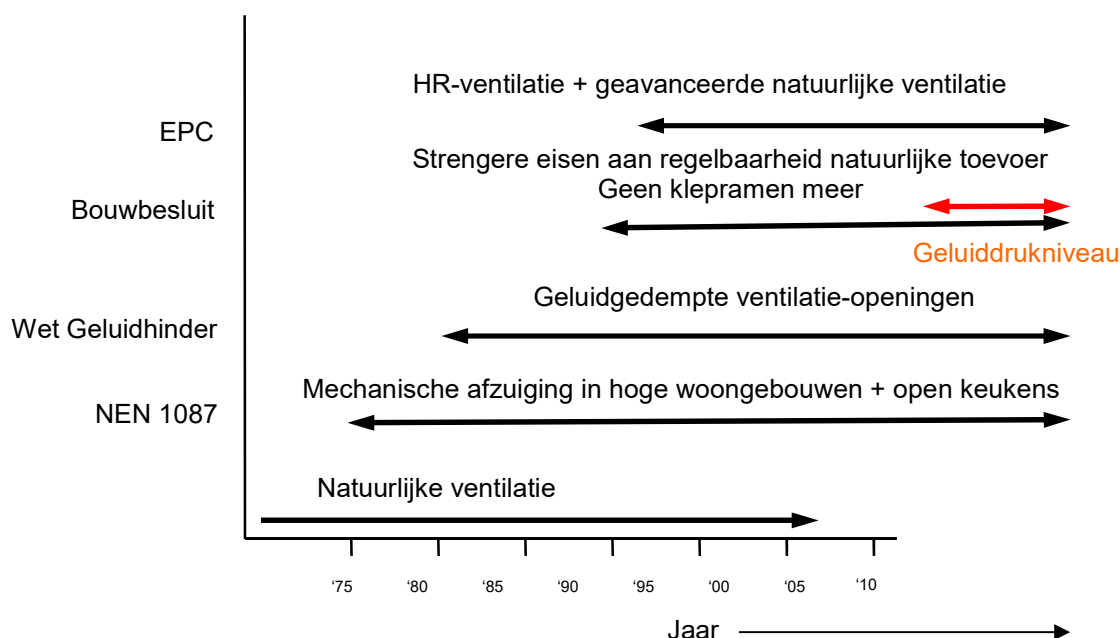
Met name door de toenemende aandacht voor energiebesparing is in Nederland de laatste jaren de luchtdichtheid van de woningen sterk toegenomen. Naarmate de woning kierdichter is, wordt echter het gebruik van ventilatievoorzieningen steeds belangrijker, aangezien de ventilatie die in weinig luchtdichte woningen min of meer vanzelf via naden en kieren tot stand komt, in belangrijke mate ontbreekt bij kierdichte woningen.

3.3.3. Spuiventilatie

Spuiventilatie is bedoeld om in korte tijd grote luchtdebieten te realiseren om sterk verontreinigde binnenlucht en warmte snel af te kunnen voeren. Spuiventilatie vindt plaats door te openen geveldelen: ramen en deuren. Bij spuiventilatie worden geen eisen gesteld aan comfort of geluid.

4. Ventilatie in het Bouwbesluit

4.1. Ventilatie in de bouwregelgeving – historisch perspectief



Figuur 14. Ontwikkeling en invloed van regelgeving in Nederland

4.2. Algemeen

4.2.1. Bouwbesluitartikelen over ventilatie

In het Bouwbesluit worden eisen gesteld aan de luchtverversing van woningen en woongebouwen. Daarnaast stelt het Bouwbesluit eisen aan geluid ten gevolge van mechanische ventilatiesystemen voor zover deze niet in de eigen woning zijn gelegen, er worden eisen gesteld aan de brandveiligheid van de ventilatievoorziening en er worden eisen gesteld ten aanzien van de energiezuinigheid. In het Bouwbesluit worden geen directe eisen gesteld aan het type ventilatiesysteem dat in een woning of een gebouw moet worden gemonteerd. Men is in principe vrij om, ongeacht het type woning of gebouw, natuurlijke of mechanische ventilatie aan te brengen. Wel dient rekening te worden gehouden met de capaciteitsbepalingen en de inrichtingseisen van NEN 1087. Dit houdt in de praktijk in dat er vaak beperkingen zijn ten aanzien van de keuze van het type ventilatiesysteem, met name wat betreft het toepassen van natuurlijke afvoer.

In navolgende tabel is een overzicht van de betreffende artikelen in het Bouwbesluit 2012 gegeven.

Belangrijke Bouwbesluitartikelen met betrekking tot ventilatie en ventilatievoorzieningen (exclusief brandveiligheid):

Afdeling Bouwbesluit	Artikel
Luchtverversing	Afdeling 3.6
<i>Nieuwbouw</i>	§ 3.6.1
Aansturingsartikel	Artikel 3.28
Luchtverversing verblijfsgebied; verblijfsruimte; toiletruimte en badruimte	Artikel 3.29
Thermisch comfort	Artikel 3.30
Regelbaarheid	Artikel 3.31
Luchtverversing overige ruimten	Artikel 3.32
Plaats van de opening	Artikel 3.33
Luchtkwaliteit	Artikel 3.34
Verbouw	Artikel 3.35
Tijdelijke bouw	Artikel 3.36
<i>Bestaande bouw</i>	§ 3.6.2
Aansturingsartikel	Artikel 3.37
Luchtverversing verblijfsruimte; toiletruimte en badruimte	Artikel 3.38
Luchtverversing overige ruimten	Artikel 3.39
Luchtkwaliteit	Artikel 3.40
Spuivoorziening	Afdeling 3.7
<i>Nieuwbouw</i>	§ 3.7.1
Aansturingsartikel	Artikel 3.41
Capaciteit	Artikel 3.42
Plaats van de opening	Artikel 3.43
Verbouw	Artikel 3.44
Tijdelijke bouw	Artikel 3.45
<i>Bestaande bouw</i>	§ 3.7.2
Aansturingsartikel	Artikel 3.46
Capaciteit	Artikel 3.47
Bescherming tegen geluid van installaties, nieuwbouw	Afdeling 3.2
Aansturingsartikel	Artikel 3.7
Aangrenzend perceel	Artikel 3.8
Zelfde perceel	Artikel 3.9
Verbouw	Artikel 3.10
Tijdelijke bouw	Artikel 3.11
Energiezuinigheid, nieuwbouw	Afdeling 5.1
Energieprestatiecoëfficiënt	Artikel 5.2
Luchtvolumestroom	Artikel 5.4

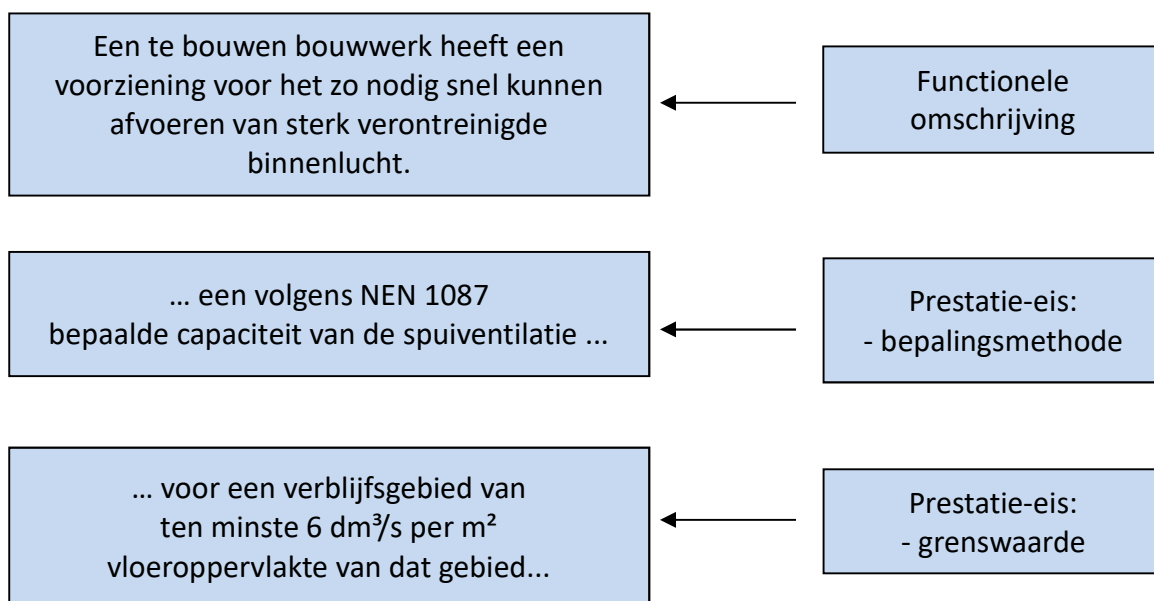
Tabel 8. Overzicht ventilatie-eisen Bouwbesluit 2012.

In de volgende paragraaf wordt uitsluitend ingegaan op de eisen en voorschriften die direct betrekking hebben op de eisen ten aanzien van de ventilatievoorziening en de werking ervan. De aspecten brandveiligheid en geluid zullen in dit deel van de cursus niet behandeld worden.

4.3. Vorm van de voorschriften

De voorschriften van het Bouwbesluit zijn gesteld in de vorm van prestatie-eisen die gekoppeld zijn aan functionele eisen. Een prestatie-eis geeft een duidelijk omschreven en gekwantificeerde grenswaarde. Vervolgens wordt een bepalingsmethode gegeven waarbij op een eenduidige en ondubbelzinnige wijze gemeten of gecontroleerd kan worden of aan een voorschrift wordt voldaan. De prestatie-eis is altijd gekoppeld aan een functionele omschrijving waarin de motivering van de eis wordt gegeven. Wat per definitie niet wordt gedaan is het geven van een receptuur, dat wil zeggen, er wordt geen exacte omschrijving gegeven van hoe men aan de prestatie-eis kan voldoen.

Bijvoorbeeld afdeling 3.7 (spuivoorziening):



Figuur 15. Voorbeeld prestatie-eis.

4.4. Belangrijke begrippen uit het Bouwbesluit

Vrije indeelbaarheid

Een belangrijk uitgangspunt van het Bouwbesluit is de vrije indeelbaarheid van woningen. Een gebouw is vrij indeelbaar als de indeling van dat gebouw vrijwel geen invloed heeft op de, ingevolge het Bouwbesluit, minimaal aan te brengen voorzieningen. Voor de inrichtingstechnische basiseisen geldt bijvoorbeeld dat het aantal toiletruimten niet afhankelijk mag zijn van het achteraf plaatsen van een schei-

dingsconstructie. Voor bouwtechnische basiseisen geldt dit voor bijvoorbeeld de voorschriften voor daglichttoetreding, geluidisolatie en ventilatie. Het al of niet plaatsen van een scheidingsconstructie in een woning mag bijvoorbeeld niet tot gevolg hebben dat voor de scheidingsconstructie tussen de twee woningen er plotseling een andere opbouw nodig is om aan de gestelde eis te voldoen.

Om het beginsel van de vrije indeelbaarheid inhoud te geven zijn voor het Bouwbesluit een aantal specifieke begrippen ontwikkeld. Dit zijn o.a. de begrippen gebruiksoppervlakte, verblijfsgebied en verblijfsruimte.

Gebruiksoppervlakte

De gebruiksoppervlakte dient bepaald te worden conform NEN 2580, het is een oppervlaktemaatstaf die aangeeft welk deel van een gebouw in beginsel geschikt is voor het beoogde gebruik van het gebouw.

Voor de gebruiksoppervlakte van een gebouw moeten de gebruiksoppervlakten van de afzonderlijke gebouwfuncties bij elkaar worden opgeteld. De gebruiksoppervlakte wordt bepaald door de oppervlakte (gemeten op vloerniveau) binnen de uitwendige scheidingsconstructie te bepalen de volgende oppervlakten dienen hierbij buiten beschouwing te blijven:

- trapgat of vide $> 4 \text{ m}^2$;
- dragende binnenwand;
- afzonderlijke bouwconstructie, niet zijnde een trap, $> 0,5 \text{ m}^2$;
- leidingschacht voor zover $> 0,5 \text{ m}^2$;
- afzonderlijke nis of uitsparing $< 0,5 \text{ m}^2$;
- oppervlakte waarboven de netto-hoogte $< 1,5 \text{ m}$, uitgezonderd trappen en hellingbanen.

Bij een woongebouw dient een evenredig deel van de oppervlakte gemeten op vloerniveau van de buiten de gebouwfunctie gelegen gemeenschappelijke respectievelijk algemene ruimten waarop de gebouwfunctie is aangewezen bij de gebruiksoppervlakte van de afzonderlijke appartementen te worden opgeteld.

Verblijfsgebied en verblijfsruimte

Een verblijfsgebied is een besloten ruimte, bestaande uit één of meer met elkaar in verbinding staande, op dezelfde bouwlaag gelegen, verblijfsruimten en andere afzonderlijke ruimten, anders dan een toilet- of badruimte, technische ruimte of gemeenschappelijke verkeersruimte. Niet alle ruimten die aan de criteria die voor een verblijfsgebied gelden voldoen behoeven als zodanig door de aanvrager te worden aangeduid. Voor woningen moet het verblijfsgebied ten minste 55% van het gebruiksoppervlakte bedragen. Een woonfunctie heeft een vloeroppervlakte van ten minste 18 m^2 aan niet-gemeenschappelijk verblijfsgebied.

Niet tot de bouwconstructie behorende constructieonderdelen, zoals niet-dragende scheidingsconstructies binnen het verblijfsgebied, blijven bij de bepaling van de afmetingen van het verblijfsgebied buiten beschouwing.

Uit het oogpunt van bruikbaarheid zijn de minimale afmetingen van een verblijfsgebied:

- Breedte van tenminste 1,8 m;
- Vloeroppervlakte van tenminste 5m²;
- Hoogte boven het vloeroppervlak van tenminste 2,6 m.

Een verblijfsruimte is een besloten ruimte voor het verblijven van mensen; dus een ruimte in een woning die gebruikt wordt als woon-, eet- of slaapkamer. Een als verblijfsruimte aangemerkte ruimte is op grond van het Bouwbesluit een verblijfsgebied of maakt deel uit van een verblijfsgebied.

4.5. Bouwbesluiten

4.5.1. Luchtverversing

Om een voldoende binnenluchtkwaliteit te kunnen garanderen worden in afdeling 3.6 van het Bouwbesluit 2012 voor nieuw te bouwen woningen en woongebouwen de volgende eisen gesteld:

Artikel 3.28

Een te bouwen bouwwerk heeft een zodanige voorziening voor luchtverversing dat het ontstaan van een voor de gezondheid nadelige kwaliteit van de binnenlucht wordt voorkomen.

Artikel 3.29

Prestatie-eisen ten aanzien van capaciteit, nieuwbouw

Ruimte	Capaciteit ventilatievoorziening
verblijfsruimte	0,7 dm ³ /s per m ² vloeroppervlakte met een minimum van 7 dm ³ /s
verblijfsgebied	0,9 dm ³ /s per m ² vloeroppervlakte met een minimum van 7 dm ³ /s
verblijfsgebied of verblijfsruimte met kooktoestel	0,9 dm ³ /s per m ² vloeroppervlakte met een minimum van 21 dm ³ /s
toiletruimte	7 dm ³ /s
badruimte	14 dm ³ /s

Tabel 9. Ventilatie-eisen woningen

De capaciteit van de voorziening voor toevoer van verse lucht en afvoer van binnenlucht moet bepaald worden overeenkomstig NEN 1087. Onder capaciteit wordt de luchtvolumestroom verstaan die met een bepaalde ventilatievoorziening moet kunnen worden gehaald. De voorgeschreven capaciteit van 0,9 dm³/s per m² vloeroppervlakte van een verblijfsgebied is gebaseerd op een bezetting van gemiddeld één persoon per 7 m² verblijfsruimte en het feit dat het oppervlak van een verblijfsgebied gemiddeld 10% groter is dan de som van de oppervlakken van de daarbinnen gelegen verblijfsruimten. De prestatie-eis is afgeleid van een advies van de Gezondheidsraad (1984): 'Het binnenklimaat, in het bijzonder een ventilatieminimum, in Nederlandse woningen'. Hierin wordt geadviseerd om een minimum aan luchtverversing van 25 m³/h (= 7 dm³/s) per persoon te waarborgen. Om te waarborgen dat in het kleinst denkbare verblijfsge-

bied van 5 m² toch voldoende ventilatie aanwezig is, is als ondergrens een capaciteit van 7 dm³/s voorgeschreven. Deze eis zorgt er tevens voor dat een verblijfsruimte na indeling van de woning nog enige ventilatie heeft. In verblijfsgebieden waar een kooktoestel is gesitueerd is een minimum van 21 dm³/s voorgeschreven, zodat geurstoffen en waterdamp ten gevolge van het koken in korte tijd te kunnen afvoeren.

Artikel 3.37 (Bestaande bouw)

Een bestaand bouwwerk heeft een zodanige voorziening voor luchtverversing dat het ontstaan van een voor de gezondheid nadelige kwaliteit van de binnenlucht wordt voorkomen.

Artikel 3.38 (Bestaande bouw)

Prestatie-eisen ten aanzien van capaciteit, bestaande bouw

Ruimte	Capaciteit ventilatievoorziening
verblijfsruimte	0,7 dm ³ /s per m ² vloeroppervlakte met een minimum van 7 dm ³ /s
Verblijfsruimte met kooktoestel	0,7 dm ³ /s per m ² vloeroppervlakte met een minimum van 21 dm ³ /s
Toiletruimte	7 dm ³ /s
Badruimte	14 dm ³ /s

De capaciteit van de voorziening voor toevoer van verse lucht en de afvoer van binnenlucht moet bepaald worden volgens NEN 8087.

Het niveau van de geëiste ventilatiecapaciteit is het laagste dat in verblijfsruimten uit het oogpunt van gezondheid nog aanvaardbaar is. De eis komt overeen met de voor nieuwbouw gestelde eis voor verblijfsruimten. Voor bestaande bouw geldt nu ook een eis per m² vloeroppervlak van een verblijfsruimte.

Artikel 3.34

Prestatie-eisen ten aanzien van de luchtkwaliteit, nieuwbouw

	Eisen luchtkwaliteit ventilatielucht bij woningen
verblijfsruimte	geen eis
verblijfsgebied	≥ 50% van de totale toevoercapaciteit direct van buiten*
gemeenschappelijk verblijfsgebied	100 % van de totale toevoercapaciteit direct van buiten
verblijfsgebied met kooktoestel	≥ 50% van de totale toevoercapaciteit direct van buiten* afvoer rechtstreeks naar buiten
toiletruimte	afvoer rechtstreeks naar buiten
badruimte	afvoer rechtstreeks naar buiten

Tabel 10. Eisen aan luchtkwaliteit van de ventilatielucht bij woningen

* De toevoer van de in artikel 3.29 bedoelde hoeveelheid verse lucht naar een verblijfsgebied vindt rechtstreeks van buiten plaats.

** In afwijking van het eerste lid mag, bij de toevoer van verse lucht naar een niet-gemeenschappelijk verblijfsgebied, ten hoogste 50% van de in artikel 3.29 bedoelde hoeveelheid via een niet-gemeenschappelijk verblijfsgebied of niet-gemeenschappelijke verkeersruimte van dezelfde gebruiksfunctie worden aangevoerd.

Van de totale capaciteit aan ventilatielucht ten behoeve van een verblijfsgebied van een woning moet tenminste de helft rechtstreeks van buiten worden aangezogen; het restant mag worden betrokken uit een ander tot de woning behorend verblijfsgebied of verkeersruimte (dit geldt voor elk van de verblijfsgebieden). Hiermee is interne recirculatie van lucht toegestaan, wat een zekere mate van energiebesparing oplevert. De toevoer van verse lucht naar een gemeenschappelijk verblijfsgebied in een woongebouw moet overigens altijd rechtstreeks van buiten plaatsvinden.

Om te bewerkstelligen dat geurstoffen en waterdamp zich zo min mogelijk verspreiden door de woning of het woongebouw, is voorgeschreven in een verblijfsgebied met kooktoestel een afvoervoorziening aanwezig moet zijn die uitmondt in de buitenlucht. Om te voorkomen dat onaangename geuren of grote hoeveelheden waterdamp zich naar andere ruimten verspreiden moet de binnenlucht van een toilet- of badruimte eveneens rechtstreeks naar buiten worden afgevoerd.

Artikel 3.40 (Bestaande bouw)

Prestatie-eisen ten aanzien van de luchtkwaliteit, bestaande bouw

Ruimte	Eisen luchtkwaliteit ventilatie woningen
Verblijfsruimte	Geen eis
Verblijfsruimte met kooktoestel	Ten minste 21 dm ³ /direct naar buiten
Toiletruimte	Afvoer direct naar buiten
Badruimte	Afvoer direct naar buiten

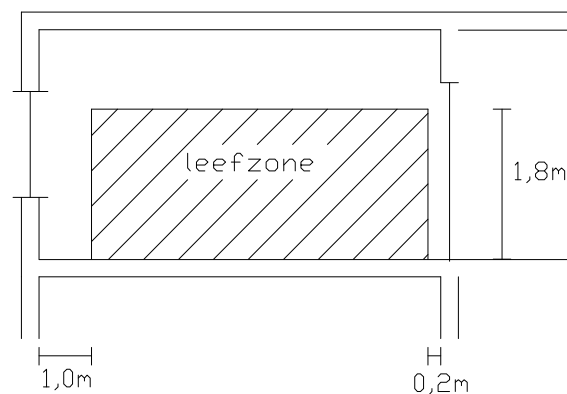
Tabel 11. Eisen aan luchtkwaliteit van de ventilatielucht bij woningen

Bij bestaande bouw zijn geen eisen gesteld aan de inrichting van de ventilatievoorziening. De achterliggende gedachte hiervoor is dat uit oogpunt van gezondheid de capaciteit van de ventilatievoorziening van primair belang is en niet de wijze waarop de ventilatie plaatsvindt. Als bijvoorbeeld door middel van een raam (ongecontroleerde dosering, ongecontroleerde lichtsnelheid) voldoende ventilatie kan worden verkregen, dan hoeft in dat raam niet alsnog een ventilatierooster te worden aangebracht. Ook mag in bestaande bouw geventileerd worden door kieren.

Artikel 3.30

Thermisch comfort, nieuwbouw

In artikel 3.30 is aangegeven dat de lichtsnelheid in de leefzone van een verblijfsgebied, bepaald overeenkomstig NEN 1087 niet groter mag zijn dan 0,2 m/s. De leefzone is dat gedeelte van een verblijfsgebied waarbij de ruimte gelegen binnen 1 m van een uitwendige scheidingsconstructie, binnen 0,2 m van een inwendige scheidingsconstructie en hoger gelegen dan 1,8 m boven de vloer buiten beschouwing blijft.



Figuur 16. Definitie leefzone.

Een instroomopening in een uitwendige scheidingsconstructie moet bij nieuwbouw zo worden geplaatst, dat in de leefzone geen tocht (luchtsnelheid $\geq 0,2$ m/s) ontstaat. In NPR 1088 is aangegeven, dat bij een woonfunctie geacht wordt dat hieraan in ieder geval is voldaan als de opening zich op meer dan 1,8 m boven de vloer bevindt. Deze eis betekent onder meer, dat een draaikiepraam niet als ventilatievoorziening mag worden aangemerkt (tenzij ook daar het gedeelte dat openstaat hoog genoeg ligt).

Artikel 3.31

Regelbaarheid, nieuwbouw

In artikel 3.31 staat dat de capaciteit van een voorziening voor luchtverversing van een verblijfsgebied of verblijfsruimte regelbaar is. De voorziening heeft, bepaald volgens NEN 1087, naast een laagste stand van ten hoogste 10% van de capaciteit en een stand van 100% van de capaciteit ten minste twee standen in het regelgebied tussen de laagste stand en 30% van de capaciteit. Deze twee standen verschillen in capaciteit ten opzichte van de nulstand en onderling ten minste 10%.

Met het voorschrift betreffende de regelbaarheid van de ventilatievoorziening is beoogd de gebruikers van een gebouw een adequate regelmogelijkheid te bieden voor de ventilatievoorziening. Dit geldt zowel voor natuurlijke als voor mechanische ventilatievoorzieningen.

Extra eisen ten aanzien van zelfregelende voorzieningen zijn niet meer genoemd. Ook is niet meer vermeld dat een overstroomvoorziening niet regelbaar mag zijn.

Artikel 3.32

Ventilatie overige ruimten, nieuwbouw

Dit betreft eisen ten aanzien van gemeenschappelijke verkeersruimte ($0,5 \text{ dm}^3/\text{s}$ per m^2 vloeroppervlakte van die ruimte), meterkast (minste $1 \text{ dm}^3/\text{s}$ per m^2 vloeroppervlakte van die ruimte, met een minimum van $2 \text{ dm}^3/\text{s}$), liftschacht (ten minste $3,2 \text{ dm}^3/\text{s}$ per m^2 vloeroppervlakte van die liftschacht), opslagruimte voor huishoudelijk afval met een vloeroppervlakte van meer dan $1,5 \text{ m}^2$ (ten minste $10 \text{ dm}^3/\text{s}$ per m^2 vloeroppervlakte van die ruimte) en nog enkele specifieke ruimten.

Artikel 3.39 (bestaande bouw)

Ventilatie overige ruimten, bestaande bouw

Dit betreft eisen ten aanzien van meterkast (minste $1 \text{ dm}^3/\text{s}$ per m^2 vloeroppervlakte van die ruimte, met een minimum van $2 \text{ dm}^3/\text{s}$), liftschacht (ten minste $3,2 \text{ dm}^3/\text{s}$ per m^2 vloeroppervlakte van die liftschacht), opslagruimte voor huishoudelijk afval met een vloeroppervlakte van meer dan $1,5 \text{ m}^2$ (ten minste $10 \text{ dm}^3/\text{s}$ per m^2 vloeroppervlakte van die ruimte) en nog enkele specifieke ruimten.

4.5.2. Spuivoorziening

In afdeling 3.7 zijn de eisen ten aanzien van spuivoorzieningen gegeven.

Artikel 3.41

Een te bouwen bouwwerk heeft een voorziening voor het zo nodig snel kunnen afvoeren van sterk verontreinigde binnenlucht.

Artikel 3.42

Prestatie-eisen ten aanzien van capaciteit, nieuwbouw

Een verblijfsgebied (verblijfsruimte) heeft een spuivoorziening met een volgens NEN 1087 bepaalde capaciteit van de spuiventilatie van ten minste $6 \text{ dm}^3/\text{s}$ per m^2 vloeroppervlakte van dat gebied ($3 \text{ dm}^3/\text{s}$ per m^2 vloeroppervlakte van die ruimte). In een uitwendige scheidingsconstructie van dat gebied zijn beweegbare constructieonderdelen die op die capaciteit zijn afgestemd. (Ten minste een van die beweegbare constructieonderdelen is een beweegbaar raam.)

Artikel 3.46 (Bestaande bouw)

Een bestaand bouwwerk heeft een voorziening voor het zo nodig snel kunnen afvoeren van sterk verontreinigde binnenlucht.

Artikel 3.47 (Bestaande bouw)

Prestatie-eisen ten aanzien van capaciteit, bestaande bouw

Een verblijfsruimte heeft een spuivoorziening met een volgens NEN 8087 bepaalde capaciteit van de spuiventilatie van ten minste 3 dm³/s per m² vloeroppervlakte van die ruimte.

4.5.3. Installatiegeluid

In afdeling 3.2 van het Bouwbesluit 2012 zijn, naast eisen aan installatiegeluid naar aangrenzende gebruiksfuncties, ook eisen gesteld aan het installatiegeluid in de eigen woning voor nieuwbouw.

Artikel 3.9

Eisen installatiegeluidniveau zelfde perceel, nieuwbouw

	eis	eenheid
Woonfunctie	30	dB
Bijeenkomstfunctie voor kinderopvang voor kinderen < 4 jaar	35	dB
Bijeenkomstfunctie andere kinderopvang	35	dB
Bijeenkomstfunctie voor kinderopvang met bedgebied	35	dB
Bijeenkomstfunctie voor kinderopvang	35	dB
Onderwijsfunctie	35	dB

Tabel 12. Maximum eisen installatiegeluid in een verblijfsgebied van de eigen gebruiksfunctie.

Een mechanische voorziening voor luchtverversing, warmteopwekking of warmteterugwinning veroorzaakt in een verblijfsgebied van de gebruiksfunctie een volgens NEN 5077 bepaald karakteristiek installatie-geluidsniveau van ten hoogste de in tabel 12 aangegeven waarde.

4.5.4. Energie

In afdeling 5.1 zijn ook een aantal belangrijke eisen gesteld die van invloed zijn op de ventilatie.

Artikel 5.2

Energieprestatiecoëfficiënt

In artikel 5.2 is geëist dat de energieprestatiecoëfficiënt van een woning of een woongebouw, bepaalt volgens NEN 7120, niet meer mag bedragen dan 0,4 [-]. De keuze van het type ventilatiesysteem (geheel natuurlijk, mechanische afzuiging of gebalanceerde ventilatie) mede in relatie tot de luchtdoorlatendheid is een belangrijke invloedsfactor voor de energieprestatiecoëfficiënt. Warmteterugwinning en andere vormen van voorverwarming van ventilatielucht wordt door de energieprestatienormering positief gehonoreerd.

Voor bestaande bouw zijn nog geen eisen gesteld aan de energieprestatie in het Bouwbesluit.

Artikel 5.4

Luchtvolumestroom

In afdeling 5.4 zijn eisen gesteld aan de maximale luchtvolumestroom door infiltratie voor nieuwbouw. Hier is geëist dat de luchtstroom door de scheidingsconstructie van een woning of woongebouw, bepaalt volgens NEN 2686, niet meer mag bedragen dan $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$.

Voor bestaande woningen en woongebouwen worden geen eisen ten aanzien van infiltratie gesteld.

4.6. Grote woningen met gebalanceerde ventilatie

Bij grote woningen is het op basis van het Bouwbesluit noodzakelijk om met grote luchthoeveelheden te ventileren, terwijl in een dergelijke woning niet meer personen verblijven dan in een gemiddelde woning. Bij toepassing van gebalanceerde ventilatiesystemen leidt dit tot onpraktische grote installaties met onnodig hoge investeringskosten en energiegebruik.

Op basis van gelijkwaardigheid kan bij dergelijke woningen van de Bouwbesluit-eis worden afgeweken. Volstaan kan worden met een WTA met een capaciteit van tenminste $63 \text{ dm}^3/\text{s}$ ($250 \text{ m}^3/\text{h}$). Deze gelijkwaardigheid kan worden aangetoond met behulp van de door TNO opgestelde "Verklaring van gelijkwaardigheid. Luchtkwaliteit in woningen".

4.7. Ventilatiebalans

Voordat een ventilatiesysteem gedimensioneerd kan worden dient een ventilatiebalans voor elk van de verblijfsgebieden in de woning overeenkomstig het Bouwbesluit te worden opgesteld. Hierin moeten alle ventilatiestromen (toevoer, afvoer en intern) betrokken worden. Het is in verband met een goede werking van het ventilatiesysteem aan te bevelen om de ventilatiebalans in plaats van op verblijfsgebiedniveau op woningniveau op te stellen.

Bij het bepalen van een ventilatiebalans wordt de volgende werkwijze gehanteerd:

1. Bepaal de oppervlakten van de verblijfsgebieden;
2. Bepaal de vereiste ventilatiecapaciteit per verblijfsgebied;
3. Stel de ventilatiebalans op en betrek hierin de interne ventilatiestromen, eventueel gebruik makend van de 50%-regel;
4. Bepaal de benodigde afvoercapaciteit;

5. Bepaal de verdeling van de ventilatiecapaciteit over de diverse verblijfsruimten, met in achtneming van de minimaal vereiste capaciteit per verblijfsruimte;
6. Dimensioneer de benodigde ventilatietoevoervoorzieningen en overstroomvoorzieningen (niet meer dan twee overstroomvoorzieningen per luchtstroom).

Bij toepassing van de 50%-regel moet men erop bedacht zijn dat er een drijvend mechanisme aanwezig moet zijn waarmee de vereiste ventilatiecapaciteit, gebruik makend van 50% binnenlucht, gehaald kan worden. Dit betekent bijvoorbeeld dat een slaapkamer vrijwel altijd met 100% buitenlucht wordt geventileerd.

Bij de bepaling van de grootte van de verblijfsgebieden kan gebruik gemaakt worden van de krijtstreepmethode. Dit houdt in dat de ontwerper vrij is om aan te geven welk deel van het gebouw wordt aangemerkt als verblijfsgebied (niet alle ruimten die aan de definitie verblijfsgebied voldoen, hoeven aangemerkt te worden als verblijfsgebied), rekening houdend met de volgende randvoorwaarden:

- het totale oppervlak aan verblijfsgebied moet tenminste 55% van de gebruiksoppervlakte beslaan
- het totale oppervlak aan verblijfsgebied mag niet kleiner zijn dan 18 m²
- bij het aanmerken van ruimten als verblijfsgebied moet rekening worden gehouden met de eisen inzake ventilatie, daglicht e.d.

Een verblijfsgebied hoeft niet direct begrensd te zijn door fysieke scheidingen; het gedeelte van de ruimte dat niet wordt aangemerkt als verblijfsgebied, dient te worden aangeduid als onbenoemde ruimte.

5. Normen en richtlijnen

5.1.1. NEN 1087: "Ventilatie van gebouwen. Bepalingsmethoden voor Nieuwbouw"

Algemeen

Om te controleren of een ventilatievoorziening aan de in het Bouwbesluit gestelde eisen voldoet, zijn in NEN 1087 bepalingmethoden gegeven.

De norm geeft bepalingmethoden voor nieuwbouw voor:

- de nominale ventilatiecapaciteit van een voorziening voor luchtverversing (natuurlijke toe- en afvoer, mechanische toe- en afvoer en overstroomvoorziening) en van een spuivoorziening;
- De inrichting van een voorziening voor luchtverversing met betrekking tot:
 - Het thermisch comfort;
 - De richting van de luchtstroming;
 - De regelbaarheid van de ventilatievoorziening;
 - Plaats van de toe- en afvoeropening (berekening verdunningsfactor).

Capaciteit

De capaciteit van ventilatieopeningen ten behoeve van verblijfsgebieden en toilet- en badruimten wordt bepaald uit de drukvolumestroomkarakteristiek. De drukvolumestroomkarakteristiek wordt bepaald door middel van het meten van de volumestromen door de opening bij een aantal drukverschillen over de opening. De capaciteit van de toevoeropeningen wordt bepaald uit de drukvolumestroomkarakteristiek bij 1 Pa drukverschil. Bij kanalen voor natuurlijke afvoer bedraagt de toetsingsdruk $0,4 \cdot \Delta h + 1$ Pa, waarbij Δh het hoogteverschil tussen de instroomopening en de uitstroomopening van het kanaal is.

Voor andere ruimten dan verblijfsgebieden, toilet- en badruimten (bijvoorbeeld garages en stallingsruimten) wijkt de bepalingmethode af. Hiervoor mag de capaciteit worden berekend met de vergelijking:

$$q_v = A \cdot v \cdot 1000$$

Waarin:

q_v	=	ventilatiecapaciteit, in dm^3/s ;
A	=	de oppervlakte van de opening, in m^2 ;
V	=	de luchtsnelheid door de opening van 2,5 m/s bij ventilatie die tot stand komt via openingen in twee tegenoverliggende gevels of een gevel en een dakvlak, en met 0,625 m/s bij twee of meer openingen in dezelfde gevel.

De capaciteit van overstroomvoorzieningen kan bij grote woningen ($A_g > 500 \text{ m}^2$) worden beperkt door brandwerendheidseisen. Bij een luchtsnelheid van 0,83 m/s bedraagt het maximale debiet via een overstroomvoorziening onder een deur maximaal $15 \text{ dm}^3/\text{s}$.

In een praktijksituatie kan de capaciteit van een mechanische ventilatievoorziening worden bepaald met behulp van een nuldrukcompenserende volumestroommeter (flowfinder).

Natuurlijke ventilatiestromen dienen te worden bepaald door met een grote ventilator de woning op een luchtdrukverschil ten opzichte van buiten te brengen, waarbij aan de hand van meetpunten bij verschillende drukken een drukvolumekarakteristiek kan worden vastgesteld (opblaasproef). De ventilatiecapaciteit q_v van de ventilatievoorziening is hierbij de volumestroom, die bij een drukverschil van 1 Pa door de opening stroomt. Inmiddels zijn voor vrijwel alle op de Nederlandse markt verkrijgbare ventilatieroosters de ventilatiecapaciteiten door middel van laboratoriummetingen vastgesteld. De afvoercapaciteit van een ventilatieafvoerkanaal voor natuurlijke ventilatie wordt op gelijksoortige wijze gemeten. Op basis van luchtweerstand van de diverse componenten kan de capaciteit hiervan ook rekentechnisch worden bepaald.

Inrichting

Thermisch comfort

De grenswaarde van de luchtsnelheid van 0,2 m/s mag in de leefzone van een verblijfsruimte met niet meer dan 0,04 m/s op maximaal 10% van de aangegeven meetposities overschreden worden.

Richting van de stroming

De richting van de luchtstroming moet zodanig zijn dat de toevoer als toevoer werkt en de afvoer als afvoer. Terugstroming van de lucht in een ventilatieafvoervoorziening is niet toegestaan.

De toevoervoorziening moet hiertoe in een gevel of in een dak met een helling > 45° bevinden. Afvoeren moeten bovendaks uitmonden in een voorgeschreven uitmondingsgebied. Voorzieningen in dak en gevel kunnen afhankelijk van de windrichting als toe- of afvoer werken.

Bij mechanische ventilatie is de stromingsrichting altijd gegarandeerd.

Regelbaarheid

Ventilatievoorzieningen voor natuurlijke luchttoevoer dienen in verschillende standen regelbaar te zijn. Per ruimte moeten de luchttoevoervoorzieningen regelbaar en afsluitbaar zijn. In artikel 3.31 van het Bouwbesluit 2012 is aangegeven dat de volgende standen aanwezig dienen te zijn:

- Nulstand, waarin niet meer dan 10% van de capaciteit wordt doorgelaten;
- Fijnregeling in het gebied van 0% tot 30% van de vereiste capaciteit.
- Voor de fijnregeling moeten er twee instelstanden zijn die onderling tenminste 10% van de vereiste capaciteit verschillen.

Dit geldt zowel voor natuurlijke als voor mechanische ventilatievoorzieningen.

De luchttoevoervoorzieningen moeten per ruimte regelbaar en afsluitbaar zijn. In principe kunnen ook klepramen voldoen aan de regelbaarheid mits bepaalde uitzetmechanismen worden toegepast.

Plaats van de toe- en afvoeropening

Volgens 3.33 moet een opening van de voorziening voor toevoer van verse lucht en afvoer van binnenlucht op ten minste 2 m afstand van de perceelsgrens zijn gelegen. Indien het perceel waarop de woning of het woongebouw staat, grenst aan een openbare weg, openbaar water of openbaar groen mag de afstand tot het hart van die weg, dat water of dat groen worden aangehouden.

De toegevoerde lucht dient voldoende zuiver te zijn. Hiertoe worden in artikel 3.33 van het Bouwbesluit 2012 de volgende eisen gesteld aan de verdunningsfactor:

Soort afvoer	Verdunningsfactor
Luchtverversing	0,01
Rookafvoer voor met gasgestookte toestellen	0,01
Rookgasafvoer voor toestellen met andere brandstoffen	0,0015

Tabel 13. Eisen aan de verdunningsfactor.

De verdunningsfactor is een factor die de mate van verdunning aangeeft, van afvoerlucht die zich verspreidt en vermengt langs en over gebouwen. De verdunningsfactor wordt bepaald uit de capaciteit van de afvoervoorziening, de afstand tussen een opening van een ventilatietoevoervoorziening en een opening bestemd voor de afvoer van rook e.d. en de wijze waarop de toevoer ten opzichte van de afvoer gesitueerd is.

De verdunningsfactor wordt bepaald volgens hoofdstuk 9 van NEN 1087:

$$f = \frac{\sqrt{q_v \text{ of } B}}{C_1 \times l + C_2 \times \Delta h}$$

met q_v in dm^3/s en B in kW.

Bij natuurlijke ventilatie van een verblijfsgebied mag de natuurlijke afvoer bestaan uit bovendaks uitmondende kanalen of plaatsvinden via een afvoer in de gevel. Hiermee wordt dwarsventilatie toegestaan. Aan de ligging van ventilatietoeverroosters ten opzichte van ventilatie-afvoerroosters worden bij dwarsventilatie eisen gesteld. Deze dienen in haaks op elkaar staande of tegenover elkaar gelegen gevels te zijn geplaatst. Dwarsventilatie mag niet betrokken worden uit bad- en toiletruimten en ruimten met opstelplaatsen voor kooktoestellen.

5.1.2. Toelichting op NEN 8087: "Ventilatie van gebouwen. Bepalingsmethoden voor bestaande gebouwen"

Voor bestaande gebouwen is NEN 8087 aangewezen. NEN 8087 geeft slechts bepalingmethoden voor de ventilatiecapaciteit van een voorziening voor luchtverversing en van een spuivoorziening. De bepalingmethoden zijn naar analogie van NEN 1087.

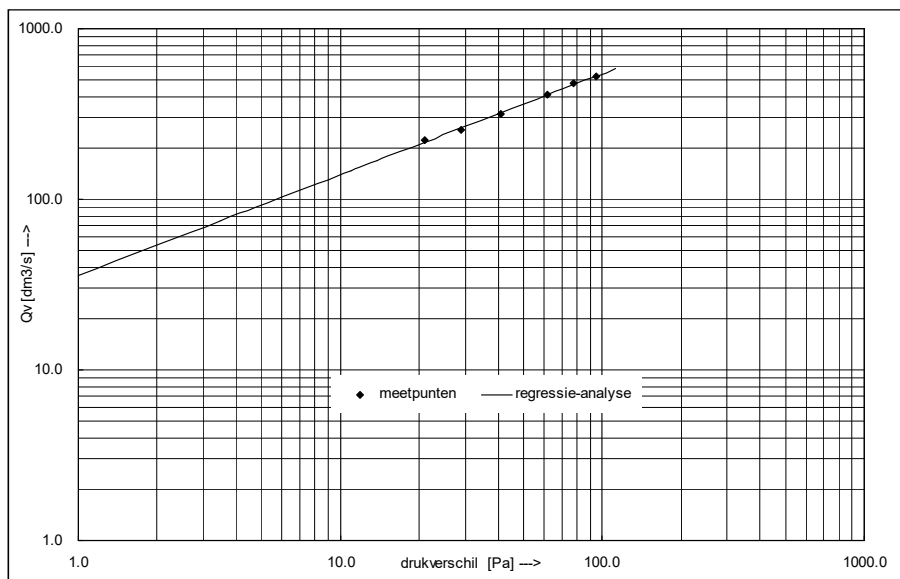
5.1.3. Toelichting op NPR 1088: "Ventilatie van woningen en woongebouwen. Aanwijzingen voor en voorbeelden van de uitvoering van ventilatievoorzieningen".

De praktijkrichtlijn 1088 geeft aanwijzingen voor en voorbeelden van de uitvoering van ventilatievoorzieningen waarmee voldaan kan worden aan de prestatie-eisen uit het Bouwbesluit en de Ministeriële regeling nieuwbouw. Er wordt een onderscheid gemaakt in natuurlijke ventilatie, natuurlijke toevoer met mechanische afzuiging en gebalanceerde ventilatie. Voor alle systemen worden aan de hand van referentiewoningen uitgewerkte voorbeelden gegeven. NPR 1088 geeft alleen voorbeelden voor woningen, niet voor utiliteitsgebouwen.

5.1.4. Toelichting op NEN 2686: "Luchtdoorlatendheid van gebouwen. Meetmethode".

NEN 2686 geeft een meetmethode waarmee de luchtdoorlatendheid van een gebouw bepaald kan worden. De in de norm beschreven meetmethode kan ook worden gebruikt om de luchtstroom in delen van een gebouw of afzonderlijke vertrekken te meten.

Het principe van de meting is als volgt: met behulp van een ventilator wordt lucht toegevoerd aan, of afgevoerd uit het te beproeven gebouw of vertrek. De daarbij ontstane luchtvolumestroom over de omhulling wordt gemeten als functie van het drukverschil. De meting is bedoeld voor het bewoonbare deel van de woning. Kruipruimten en niet bewoonbare delen van zolders en serres die geen deel uitmaken van het geïsoleerde deel van de woning horen hier niet bij.



Figuur 17. Voorbeeld resultaat luchtdoorlatendmeting conform NEN 2686

5.1.5. Toelichting op ISSO publicatie 61: “Kwaliteitseisen ventilatiesystemen woningen”

Door Stichting ISSO te Rotterdam is in 2000 publicatie 61 uitgebracht. Deze publicatie omvat ontwerptechnische eisen en richtlijnen voor ventilatiesystemen in woningen en een variantenboek (voorbeeldenboek) woningventilatie. Voor het structureren van de informatie is gebruik gemaakt van het Model Kwaliteitsbeheersing Klimaatinstallaties, de zogenaamde MKK-structuur. Het MKK is een instrument voor het beheersen van het voortbrengingsproces van klimaatinstallaties binnen het bouwproces. Het toepassen hiervan betekent het geven van informatie met betrekking tot de ventilatie van de woning en het ventilatiesysteem, in de betreffende fase van het bouwproces aan de betrokken partijen.

In de MKK-structuur wordt het realisatieproces verdeeld in 5 fasen:

- I. Programmafase
- II. Ontwerpfase
- III. Uitwerking (besteksfase)
- IV. Uitvoering
- V. Beheerfase

In elke fase spelen 10 kwaliteitsbeheersaspecten een rol:

0. Algemeen
1. Organisatie
2. Communicatie
3. Eisen
4. Middelen
5. Inkoop

- 6. Tijd
- 7. Financiën
- 8. Realisatie
- 9. ervaringen

ISSO 61 is met name bedoeld om een gefundeerde keuze voor een bepaald ventilatiesysteem te kunnen maken; daarnaast bevat het een aantal uitgewerkte voorbeelden hoe een goed ventilatiesysteem uit kan zien.

5.1.6. Toelichting op ISSO publicatie 62 “Gebalanceerde ventilatie in de woningbouw”

In navolging van ISSO 61 is ISSO 62 gepubliceerd. Deze publicatie vervangt ISSO 28 (“Gebalanceerde ventilatie in de woningbouw”) en is opgesteld in dezelfde MKK structuur als ISSO 61.

ISSO 62 is specifiek bedoeld als kwaliteitsdocument en hulpmiddel bij het realiseren van nieuwbouwwoningen met gebalanceerde ventilatie. Onder gebalanceerde ventilatie wordt verstaan vraaggestuurde ventilatie en mechanische luchttoe- en afvoer met warmterugwinning (HR-ventilatie).

6. Meetmethoden voor ventilatie

6.1. Ventilatiecomponenten

De bewuste ventilatie via mechanische ventilatie kan althans momentaan eenvoudig worden gemeten met behulp van een zogenaamde Flowfinder. Dit instrument compenseert voor zijn eigen weerstand. De meting is vrij snel, enkele minuten per toevoer of afvoer punt. Het gebruik van de mechanische ventilatie door de bewoner dient in dit geval bekend te zijn. Het vastleggen van de draaitijd van ventilatoren en de stand waarin ze staan kan ook met eenvoudige dataloggers geschieden.

Voor het vertrek waarin de mechanische toevoer of afvoer zich bevindt wordt de volumestroom vrij nauwkeurig bepaald. Alleen infiltratie wordt hierbij verwaarloosd. Ook eventuele luchtuitwisseling via grote openingen zoals bij spuien en open deuren kan langs deze weg niet worden gemeten. Ook kan de mechanische ventilatie worden bepaald door bijvoorbeeld in het kanalen systeem op strategische plaatsen de dynamische druk te meten. Hierbij verkrijgt men onder andere ook inzicht in de verdeling over het leidingsysteem en over het lek van de kanalen of leidingen. Indien men geïnteresseerd is in de luchtdoorlatendheid van kanalen kan ook via de zogenaamde opblaasmethode de dichtheid en het verlies langs deze weg worden bepaald.

Natuurlijke ventilatie is moeilijker te meten. Het kan worden gemeten via de constante concentratiemethode die hierna in dit hoofdstuk wordt beschreven. Een andere afgeleide manier is het bepalen van de afmetingen van de voorzieningen of het toetsen van de geïnstalleerde capaciteit. Op basis hiervan kan met behulp van rekenmodellen hoewel vrij grof toch een indruk worden verkregen van de optredende ventilatie. Als invoer hierbij zijn de meteo-gegevens en het gebruik van de voorzieningen van belang.

Ook voor het luchten of spuien kan eenzelfde strategie als hierboven voor de bewuste natuurlijke ventilatie is beschreven worden gekozen. Uit onderzoek is gebleken dat het gebruik van ramen en deuren redelijk nauwkeurig door bewoners via enquêtes kan worden bepaald.

6.2. Luchtdoorlatendheid

De luchtdoorlatendheid kan worden bepaald volgens NEN 2686 "Luchtdoorlatendheid van gebouwen, Meetmethode". De meetmethode wordt ook wel "opblaasmeting" genoemd. Een bekende volumestroom wordt een gebouw ingeblazen via een schot of meetdeur, waarbij alle bewuste ventilatievoorzieningen zijn gesloten. Het door die volumestroom ontstane drukverschil wordt gemeten. Dit proces herhaald zich een vijf tot zes keer. Daarmee ligt het verband tussen drukverschil en volumestroom vast. Op basis hiervan kan de luchtdoorlatendheid uitgedrukt in een q_{v10} waarde worden bepaald. De methode neemt ongeveer 2

uur in beslag. Circa een uur voor opbouw en afbreken van de meetopstelling en een uur voor de meting. De meting is mogelijk in een bewoonde woning. De woning kan hierbij tijdelijk niet worden verlaten. De meting kan zowel op overdruk als op onderdruk geschieden.

Omrekening van de uitkomst naar een infiltratiestroom kan op diverse wijzen geschieden:

- Via bijlage C van NEN 2687, een globale berekeningsmethode
- Via de meer geavanceerde methode met rekenmodellen.

6.3. Ventilatievoudmetingen

Met het ventilatievoud wordt normaliter bedoeld het ventilatievoud van een ruimte met buitenlucht.

Dit kan op verschillende manieren worden gemeten:

- afnamemethode
- constant injectiemethode
- constant concentratiemethode.

Al deze methoden hebben hun eigen voor- en nadelen. De basis van al deze methoden vormt steeds de massabalans van het tracergas in de ruimte namelijk:

$$V_r \cdot \frac{dc_i}{dt} = V_l \cdot c_s - V_l \cdot c_i(t)$$

met:

V_r	= volume van de ruimte (m^3)
C_i	= concentratie tracergas in de ruimte (kg/m^3)
t	= tijd (s)
C_s	= concentratie tracergas in de toevoerlucht (kg/m^3)
V_l	= toevoerluchtdebiet (m^3/h).

Computergestuurde injectie- en concentratiemeting laat het toe volledig automatisch het ventilatievoud te bepalen, ook in gebruik zijnde ruimten.

De afnamemethode

Dit is de meest simpele en voor de hand liggende methode. Het tracergas wordt in de ruimte gebracht en gelijkmatig verdeeld. Vanaf het tijdstip $t = 0$ (injectie van tracergas wordt gestopt) wordt de concentratieafname als functie van de tijd gemeten. Zet men het concentratieverloop logaritmisch uit tegen de tijd dan ontstaat bij een constante ventilatiehoeveelheid een rechte lijn waarvan de helling overeenkomt met het ventilatievoud namelijk:

$$n = \frac{\ln c_0 - \ln c_1}{t_1 - t_0}$$

met:

n	= ventilatievoud (l/h)
c ₀	= concentratie tracergas op t=0 (kg/m ³)
c ₁	= concentratie tracergas op t=t ₁ (kg/m ³)
t	= tijd.

Omdat de lucht die het tracergas verdringt zowel van binnen als van buiten afkomstig kan zijn, geeft deze methode alleen het totale ventilatievoud maar niet het aandeel van de frisse buitenlucht hierin.

De methode is alleen geschikt indien ze tijdens een korte meettijd kan worden uitgevoerd omdat de ventilatiestroom constant moet zijn. Veranderde windomstandigheden tijdens de meetperiode leiden bijvoorbeeld tot een globaal gemiddeld ventilatievoud.

De methode is alleen geschikt om per ruimte te worden uitgevoerd.

Constant Injectie Methode

Bij deze methode wordt continu tracergas geïnjecteerd in de diverse ruimten. Afhankelijk van de stroming in de ruimte stelt zich een bepaalde concentratie in de ruimte in. De verdunning van het geïnjecteerde tracergas vindt plaats door zowel de buitenlucht als de lucht die vanuit andere ruimten naar het vertrek stroomt. Door de concentratie van het tracergas over lange tijd te meten, kan men de invloed van bijvoorbeeld veranderende weersomstandigheden bepalen. Hetzelfde principe wordt gebruikt door de zg. passieve PFT sampler-methode. Hierbij worden door emittoren zeer geringe hoeveelheden tracergas geëmitteerd en waarbij de resulterende concentraties door absorptiebuisjes kunnen worden vastgelegd. Over enige dagen, weken of maanden kan de gemiddelde ventilatie globaal worden bepaald.

Deze methode is relatief goedkoop (€ 400,-- tot € 500,--/woning) en eenvoudig uitvoerbaar in bewoonde woningen zonder overlast voor bewoners. In combinatie met enquêtes ten aanzien van het ventilatiegedrag en metingen ten aanzien van de luchtdoorlatendheid kan een indicatie worden afgeleid over de verhouding bewuste/onbewuste ventilatie.

De samplers zijn ook leverbaar in een uitvoering waarin over een bepaalde geprogrammeerde tijd wordt gemeten. Hiermee kan bijvoorbeeld over daadwerkelijke gebruiksuren van een gebouw worden gemeten. Dit is bijvoorbeeld van belang bij kantoren en scholen.

Constant concentratiemethode

Als men het ventilatievoud ten gevolge van buitenlucht als functie van de tijd wil weten, dient de CC-methode te worden toegepast. De concentratie van het tracer-gas wordt door continue meten en (bij)injecteren per ruimte constant gehouden waarbij de per tijdseenheid geïnjecteerde tracergashoeveelheid een directe maat is voor de buitenluchtventilatiehoeveelheid. Door niet in alle ruimten maar slechts in één ruimte te injecteren, kan het ventilatievoud van deze specifieke ruimte (zowel via binnenlucht als buitenlucht) worden bepaald. Door het gebruik van een foto-akoestische gasanalyser in combinatie met een sampler/doserunit (bijvoorbeeld B&K 1302/1303) kunnen zeer geringe concentraties worden gemeten waardoor toepassing in bewoonde woningen en gebouwen mogelijk is.

Luchtstroming tussen twee zones

Indien de luchtuitwisseling tussen twee zones van belang is (bijvoorbeeld tussen keuken en woonkamer) dan dient in zone 1 het tracergas te worden geïnjecteerd. Het tracergas zal vervolgens naar zone 2 stromen en aldaar de concentratie verhogen en vervolgens zal deze weer afnemen door de ventilatie van deze ruimten. Uit het verloop van de concentratie van het tracergas laat zich per ruimte de toegevoerde en afgevoerde luchtdebieten alsmede de onderlinge luchtuitwisseling berekenen.

Om de aan deze methode klevende onnauwkeurigheden klein te houden, kan tegelijkertijd in zone 2 een ander tracergas worden geïnjecteerd, om de ventilatie aldaar vast te leggen.

Interzonale luchtstromingen in gebouwen

Indien de luchtuitwisseling tussen ruimten tot problemen kan leiden dan is het kwantitatief kennen van interzonale luchtuitwisseling als functie van de tijd belangrijk. Door het gebruik van de constant tracergasmethode met meerdere tracergassen tegelijkertijd kan op basis van de luchtstromingen van binnen naar buiten alsmede tussen diverse zones de interzonale luchtuitwisseling als functie van de tijd gemeten worden. De uitwerking van de metingen geschiedt op basis van de continuïteitsvergelijking voor ieder type tracergas dat gebruikt wordt nl.

$$V_{ra,j} \frac{dc_j}{dt} = \sum_{k=1}^n V_{k,jck} - \sum_{k=1}^n V_{j,kcj} + V_{a,jca} - V_{j,acj+mj}$$

De inzet van apparatuur voor deze methode, en tevens ook de “overlast” voor een bewoner, is echter groot. Vaak kan een acceptabel compromis zijn, het onderzoeken van iedere ruimte na elkaar. Voorwaarde is dan wel dat de volumedebieten nagenoeg constant zijn.

7. Technische ontwikkelingen

7.1. Trends in technische ontwikkelingen

De voornaamste redenen om ventilatiesystemen en componenten verder te ontwikkelen zijn:

- verminderen van het energiegebruik door ventilatie zowel door beperken van de infiltratieverliezen, de ventilatieverliezen als het beperken van het energiegebruik door ventilatoren (of andere hulpenergie)
- verbeteren en optimaliseren van het binnenmilieu
- verbeteren van het thermisch comfort en het onafhankelijk maken van de ventilatie van weersomstandigheden
- verandering in bouwtechnieken.

In principe dienen alle ontwikkelingen en trends gericht te zijn op het bereiken van een acceptabel binnenmilieu tegen een zo gering mogelijk energiegebruik. Het ventilatiesysteem moet daarbij een dusdanige betrouwbaarheid hebben dat de vereiste prestaties t.a.v. binnenmilieu en energie gedurende een bepaald percentage van de tijd van een jaar ook daadwerkelijk worden gerealiseerd. Dit laatste geeft een aantal randvoorwaarden wat betreft thermisch comfort, geluid, afhankelijkheid van weersomstandigheden en bedrijfszekerheid.

Een algemene trend die tot voor kort waar was te nemen was de ontwikkeling van geheel natuurlijke ventilatie naar natuurlijke toevoer met mechanische afzuiging in landen met gematigde klimaatomstandigheden en de ontwikkeling naar gebalanceerde ventilatiesystemen in landen met een kouder klimaat, alsmede in zeer energie-efficiënte woningen in het algemeen.

Er is een toenemende tendens om meer geavanceerde natuurlijke ventilatiesystemen verder door te ontwikkelen. Bij deze geavanceerde natuurlijke ventilatiesystemen streeft men vooral naar een betere beheersbaarheid van de volumestromen en het thermisch comfort enerzijds en het beperken van het energiegebruik anderzijds. Een belangrijk voordeel hierbij is dat natuurlijke ventilatie geen hulpenergie voor ventilatoren vraagt. Daarnaast worden allerlei alternatieven ontwikkeld om voorverwarming van natuurlijke ventilatielucht te bewerkstelligen en daarmee een energiebesparing te realiseren.

7.2. Beperking volumestromen

7.2.1. Regelingen algemeen

Regeling van volumestromen kan zowel bij natuurlijke als bij mechanische ventilatievoorzieningen plaatsvinden.

De regeling voor natuurlijke toevoer kan worden onderverdeeld in de volgende principes:

- Drukgestuurd
- Zelfregelend passief
- Zelfregelend actief
- Vocht gestuurd
- Temperatuur gestuurd
- Koppeling regeling toe- en afvoer

Ventilatoren kunnen op elke gewenste parameter gestuurd worden, bijvoorbeeld:

- Binnenmilieu
 - CO₂
 - Relatieve vochtigheid
 - TVOC (som van vluchtige organische verbindingen)
- Druk
- Aanwezigheid

7.2.2. Drukgestuurde roosters

Ventilatie van een vertrek wordt beïnvloed door het open of dicht staan van binnendeuren, door ventilatievoorzieningen in andere vertrekken, geopende ramen in andere vertrekken e.d. Hierdoor kunnen toevoervoorzieningen in de ene situatie als toevoer en in een andere situatie als afvoer werken.

Zelfregelende roosters op basis van drukverschillen kunnen een oplossing voor dit probleem geven. Er bestaan al langer zelfregelende roosters. Veel van dergelijke roosters hebben als eigenschap dat de capaciteiten worden gesmoord vanaf een drukverschil van 20 Pa. Bij dit drukverschil is de capaciteit al ca. 4 tot 5 maal zo groot als de nominale capaciteit bij 1 Pa. Bovendien treden drukverschillen groter dan 20 Pa niet vaker dan 5% van de tijd op jaarbasis op. Dergelijke roosters hebben dan ook dezelfde problemen m.b.t. comfort en richting van de luchtstroming als de gangbare roosters of klepramen.

Er zijn daarom zelfregelende roosters ontwikkeld met een breder regelgebied, lopend van 1 tot ca. 40 Pa. Binnen dit bereik varieert het debiet niet meer dan 10% van de ingestelde waarde. Zelfregelende roosters met een breed werkingsgebied hebben de volgende voordelen ten opzichte van de gebruikelijke handbediende roosters:

- verbetering van de luchtkwaliteit in de afzonderlijke vertrekken, met name die ruimten die het grootste deel van het jaar aan de lijszijde liggen;
- verbetering van het thermisch comfort, vooral voor de vertrekken aan de loefzijde;

- minder kans op het niet gebruiken van ventilatievoorzieningen doordat de natuurlijke toevoer minder weersafhankelijk wordt;
- vermindering van het energiegebruik door ventilatie.



Figuur 18. Zelfregelend rooster

7.2.3. Vochtgestuurde ventilatieopeningen

Een belangrijke reden om te ventileren is om vocht uit de woning te verwijderen en de relatieve vochtigheid binnen bepaalde grenzen te houden. Er zijn ventilatieopeningen op de markt, zowel voor toevoer als voor afvoer welke regelen op basis van relatieve vochtigheid. Meestal is de sensor bij dergelijke voorzieningen van een eenvoudig type zoals een strip van polyethyleen of polyamide. De strip reageert met op veranderingen in relatieve vochtigheid door lengteverandering. Via een mechanisme worden de lengteveranderingen van de strips omgezet naar bewegingen in een klep. Bij een toename van de relatieve vochtigheid wordt de klep geopend, bij afname gesloten. Doordat de sensor alleen met de binnenlucht in contact staat vindt er geen beïnvloeding plaats door de relatieve vochtigheid van de buitenlucht. Een dergelijk mechanisme is er ook voor afzuigroosters. Hier worden lengteveranderingen van de strippen zodanig overgebracht dat de doorsnede van het rooster wordt aangepast.

Energiebesparing door middel van vochtgestuurde ventilatieopeningen vindt vooral plaats in hoogbouw met een collectief afzuigstelsel, waarbij door middel van de vochtgestuurde openingen toch een individuele regeling van de volumestromen mogelijk is.

7.2.4. Sensorgestuurde ventilatie op basis van binnenmilieuparameters

Mechanische ventilatie kan geregeld worden op basis van een of meerdere binnenmilieuparameters. Deze parameters dienen dan gemeten te worden door sen-

soren die op hun beurt weer de ventilator aansturen. De binnenmilieuparameters die hiervoor het meest in aanmerking komen zijn:

- relatieve vochtigheid;
- kooldioxide;
- niet-geoxideerde gassen.

Dit zijn binnenmilieuparameters die gerelateerd zijn aan typische woonactiviteiten zoals koken, wassen, stofwisseling van mensen en dieren. Geuren, ook lichaamsgeuren bestaan voornamelijk uit niet-geoxideerde gassen. Kooldioxidesensoren werken veelal op basis van infrarood absorptie.

Sensoren voor niet-geoxideerde gassen werken op basis van geleiding van pure metaaloxiden. Er zijn ook regelsystemen die reageren op zowel niet-geoxideerde gassen als relatieve vochtigheid.

Het doel van sensorgestuurde ventilatie is om de ventilatie geheel af te stemmen op de werkelijke behoefte. Hierdoor kan het ventilatiedebiet dat nodig is uit oogpunt van een gezond binnenmilieu tot het minimum beperkt worden.

7.2.5. Sensorgestuurde ventilatie op basis van aanwezigheid

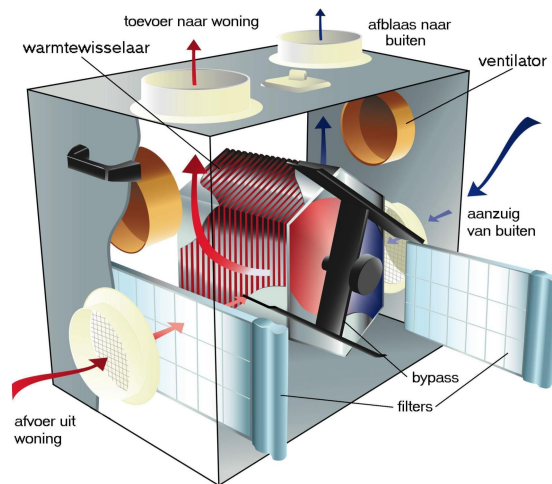
Ventilatie voor ruimten met wisselende aanwezigheid van personen kan geregeld worden door middel van aanwezigheidssensoren, bijvoorbeeld infrarood detectoren. Wanneer een persoon een ruimte betreedt wordt dit door de sensor geregistreerd. Door middel van een elektromechanisch of pneumatisch mechanisme wordt de ventilatievoorziening (dit kan zowel een toevoer- als een afvoerrooster zijn) geopend. Na vertrek wordt de voorziening weer gesloten of teruggeregeld. Dit kan met een bepaalde instelbare vertragingstijd gebeuren. Op deze manier kan bijvoorbeeld afzuiging in natte ruimten nog enige tijd na het gebruik doorgaan. In ruimten zonder daglicht kan dit overigens ook op vereenvoudigde wijze plaatsvinden via de lichtschakelaar. Door de verschillende mogelijkheden van openen en sluiten van roosters kunnen de drukken in het systeem sterk variëren. Derhalve dient er een ventilatorregeling te worden toegepast die deze drukken kan opvangen (bijvoorbeeld een frequentieregeling) of een ventilator met een zeer vlakke karakteristiek. Daarnaast dient ook het kanaalsysteem zeer luchtdicht te zijn. Doel van deze regeling is om de ventilatie af te stemmen op de werkelijke behoefte, in dit geval de aanwezigheid van personen.

7.3. Warmteterugwinning

Warmterugwinprincipes met hoge rendementen

In de woningbouw werden tot voor enige jaren geleden voornamelijk warmteterugwinapparaten toegepast met kruisstroomplatenwisselaars. Het energetisch rendement van deze warmtewisselaars is beperkt tot circa 65%. Er zijn nu echter een aantal nieuwe warmteterugwinprincipes ontwikkeld die een hoog rendement hebben en bovendien geschikt zijn voor toepassing in de woningbouw (bijvoorbeeld laminaire tegenstroomwisselaars). Het rendement is zeer hoog (hoger dan 90%).

mogelijk. Het hoge rendement zorgt er tevens voor dat naverwarming in principe niet meer nodig is: bij een buitentemperatuur van $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bedraagt de temperatuur van de ingeblazen lucht ca. $17\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Figuur 19. Warmteterugwinapparaat

7.3.2. Multifunctionele toestellen

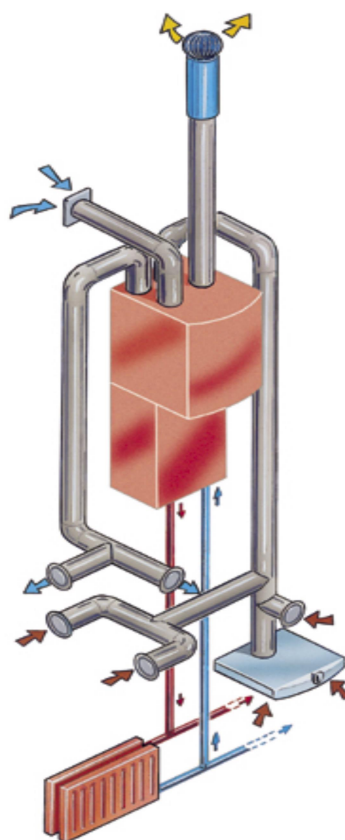
Multifunctionele toestellen zijn toestellen waarin de functies ruimteverwarming, warmtapwater bereiding en ventilatie worden gecombineerd. Er vindt warmteterugwinning plaats uit de afgezogen ventilatielucht en rookgassen. Daarnaast wordt ook de restwarmte, bijvoorbeeld ten gevolge van convectie- en stralingsverliezen, ventilatoren, pompen en elektronische componenten benut. In de meeste gevallen wordt de afgezogen ventilatielucht gebruikt als verbrandingslucht. Er zijn echter ook toestellen waar een deel van de toevoerlucht als verbrandingslucht wordt gebruikt.

Er zijn inmiddels een aantal verschillende types en principes van multifunctionele toestellen op de markt. De ruimteverwarming kan geschieden door middel van radiatoren maar ook door middel van luchtverwarming.

Een voordeel van multifunctionele toestellen is dat door de combinatie van functies ook het aantal benodigde kanalen kan worden beperkt. Voor een multifunctioneel toestel kan volstaan worden met twee kanalen naar buiten: een kanaal voor de buitenlucht aanzuig en een kanaal voor een mengsel van afgezogen ventilatielucht en rookgassen. Voor een vergelijkbaar systeem, bijvoorbeeld een gesloten cv-toestel in combinatie met een gebalanceerd ventilatiesysteem zijn drie of vier kanalen nodig:

- een ventilatieafvoer-,
- een buitenluchtaanzuig-,
- een verbrandingsluchtaanzuig- en
- een rookgasafvoerkanaal

waarbij deze laatste twee in het algemeen gecombineerd kunnen worden.



Figuur 20. Multifunctioneel toestel

De eerste generatie multifunctionele toestellen is geïntroduceerd in 1987. Het betreft toestellen waarbij de ruimteverwarming geschiedt door middel van luchtverwarming. De tweede generatie multifunctionele toestellen werd geïntroduceerd in begin jaren 90. Het betreft toestellen voor warmwaterverwarming. Deze tweede generatie toestellen zijn technisch goed uitontwikkeld en hebben inmiddels een redelijk marktaandeel.

7.4. Voorverwarming van ventilatielucht

7.4.1. Voorverwarming van ventilatielucht door zonne-energie

Voorverwarming van ventilatielucht door passieve zonne-energie is een interessante optie bij zowel natuurlijke ventilatie als mechanische ventilatie. In de woningbouw is vooral de voorverwarming van natuurlijk toegevoerde ventilatielucht van belang, niet alleen uit oogpunt van energie maar ook uit oogpunt van comfort. Het meest gebruikelijke systeem is voorverwarming van ventilatielucht via een serre een atrium. In woningen waar serres zijn toegepast als energetische maatregel

is het aandeel van de besparing door deze voorverwarming meer dan 50% van het totale besparingspotentieel van de serre. Voorwaarde hierbij is dat de benodigde ventilatielucht voor de woning ook grotendeels uit de serre wordt betrokken. Dit betekent dat bij natuurlijke toevoer de verblijfsruimten zoveel mogelijk aan de gevel met de serre moeten zijn gesitueerd. Voor een serre over twee woonlagen kan ca. 70 tot 85% van de benodigde ventilatielucht uit de serre worden betrokken. Daarnaast wordt ook de infiltratielucht door de serre opgewarmd. Combinatie met gebalanceerde ventilatie is ook mogelijk. Er kan dan de totale benodigde hoeveelheid ventilatielucht uit de serre worden betrokken. Het totale effect op de energiebesparing van voorverwarming en warmteterugwinning laat zich vertalen in een “gecombineerd” rendement. Zo bedraagt het warmteterugwinrendement van een platenwisselaar 65%; in combinatie met voorverwarming in een serre met ca. 5°C bedraagt het gecombineerde rendement 79%. Naarmate het rendement van de warmteterugwinning toeneemt neemt het effect van de extra energiebesparing af. Zo bedraagt het gecombineerde rendement van een hoogrendement warmteterugwinunit (90%) met voorverwarming via een serre 94%. Globaal kan gesteld worden dat gemiddeld over het stookseizoen de temperatuur in de serre zo'n 5°C boven de gemiddelde buitentemperatuur ligt.

7.5. Beperking van het gebruik van hulpenergie

7.5.1. Energiezuinige ventilatoren

Kleinere ventilatoren zoals die nu worden gebruikt in de woningbouw hebben in het algemeen een laag rendement. Gemiddeld bedraagt het rendement voor kleinere motoren ca. 50% en voor het ventilatorwiel 45% zodat het totaalrendement niet hoger is dan 22%. Indien deze ventilatoren worden teruggeregeld dan daalt het rendement nog verder. In de laagstand is het rendement beperkt tot ca. 9%. Voor grotere motoren zoals die gebruikt worden voor collectieve ventilatiesystemen is het totaalrendement iets minder slecht, ca. 35%. Ook bij grotere ventilatoren is vooral de rendementsdaling bij lagere toerentallen een probleem. Het energiegebruik van ventilatoren kan aanzienlijk beperkt worden door toepassing van gelijkstroommotoren.

Gelijkstroommotoren hebben een aantal belangrijke voordelen ten opzichte van de traditionele wisselstroommotoren:

- hoger rendement;
- beter geschikt voor diverse soorten regelingen, geen rendementsverliezen bij terugregeling;
- zeer veel combinaties met regel- en besturingssystemen mogelijk;
- levensduur is langer.

Het elektriciteitsverbruik van gelijkstroomventilatoren bedraagt ca. de helft van het verbruik voor wisselstroomventilatoren. Voor kleine woonhuisventilatoren betekent dit een besparing van ongeveer 100 kWh/jaar per ventilator.

Er zijn een tweetal technieken om gelijkstroommotoren aan te sturen :

- regeling door middel van signaal, dat wil zeggen, de spanning wordt eerst gelijkgericht en daarna gedeeld of geregeld door middel van thyristoren;
- regeling door middel van trafosturing, dat wil zeggen vanaf een trafo kunnen diverse voltage afgetakt en vervolgens gelijkgericht worden.

De meerkosten van gelijkstroomventilatoren zijn beperkt en hangen in hoge mate af van de aanwezige componenten. Zo is in de meeste warmteterugwinunits een trafo aanwezig waardoor de extra kosten beperkt zijn tot de kosten voor de benodigde gelijkrichters. Op dit moment worden gelijkstroomventilatoren vrijwel standaard in de woningbouw toegepast, niet alleen vanwege de energetische voordelen maar ook vanwege de uitgebreide regelmogelijkheden.

7.5.2. Frequentie gestuurde regeling van ventilatoren

Collectieve mechanische afvoer systemen hebben slechts beperkte regelmogelijkheden ten aanzien van de luchtvolumestromen. Als er al een regeling aanwezig is dan is deze vrijwel altijd beperkt tot dag/nachtregeling of een hoog/laagregeling waarbij gedurende de uren met de hoogste vocht- en/of geurproductie (douchen, koken) het systeem in de hoogstand wordt geschakeld. De schakeltijden zijn in het algemeen gebaseerd op een "gemiddeld" woongedrag. Bewoners hebben geen mogelijkheden om zelf de luchtvolumestromen van de afzuiging te regelen. Door toepassing van een frequentie gestuurde regeling bestaat de mogelijkheid om in een collectief systeem luchtdebieten individueel te regelen.

In principe wordt het toerental geregeld door frequentieomzetting van de spanningsbron of stroombron. De aanpassing van het toerental wordt bepaald door meting van een constante druk in het collectief afvoerkanaal. Indien bijvoorbeeld een afzuigkap wordt geopend of gesloten, zal de druk in het kanaal wijzigen en zal het toerental van de ventilator hierop aangepast worden.

Door het toerental van de ventilator te verlagen wordt ook de volumestroom gereduceerd, zonder extra weerstanden in het systeem aan te brengen en worden aldus onnodige energieverliezen voorkomen. Verlaging van het toerental van de ventilator betekent ook minder geluid en minder slijtage.

7.6. Hybride ventilatie

Bij mechanische ventilatie is zoals hierboven omschreven een vergaande mogelijkheid tot warmteterugwinning beschikbaar. Bij natuurlijke ventilatie tenderen de ontwikkelingen naar geavanceerde zelfregelende systemen. Beide wijzen van ventileren hebben echter ieder hun tekortkomingen, waarbij gedacht moet worden aan gebruiksmogelijkheden, milieuaspecten bedrijfszekerheid, binnenluchtkwaliteit e.d. Een nieuwe ontwikkeling op het gebied van ventilatie is hybride ventilatie waarbij de meest gunstige eigenschappen van natuurlijke en mechanische ventilatie worden gecombineerd.

Definitie van hybride ventilatie:

Hybride ventilatie is een systeem met natuurlijke en mechanische ventilatie, waarbij de overgang van natuurlijke op mechanische ventilatie wordt geregeld door een regeling die ervoor zorgt draagt dat een aanvaardbaar binnenmilieu ontstaat bij een minimaal energiegebruik.

Het principe van hybride ventilatie is als volgt: Het hybride ventilatiesysteem levert een prestatie ten aanzien van binnenluchtkwaliteit en comfort door gebruik te maken van zowel natuurlijke als mechanische ventilatie. De aansturing van het systeem gebeurt met behulp van een geavanceerd controlemechanisme. De natuurlijke ventilatie blijft werken zolang aan de vraag / eisen kan worden voldaan. Hybride ventilatie is erop gericht om zolang mogelijk gebruik te maken van natuurlijke drijvende krachten (drukverschil, thermische trek). Hulpenergie voor ventilatoren wordt hiermee tot een minimum beperkt. Essentieel is de ontwikkeling van een meet- en regelstrategie die het punt bepaald waarop de overschakeling van natuurlijk naar mechanisch moet plaats vinden. Hybride ventilatie moet dan ook gecombineerd worden met bepaalde sensortechnieken.

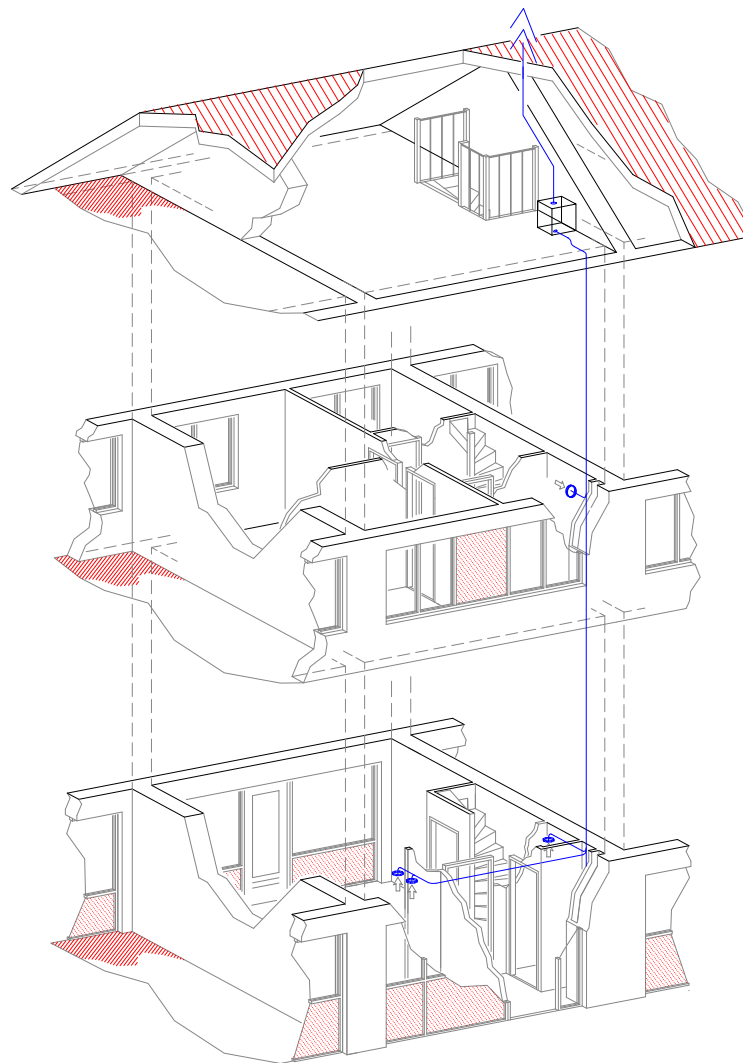
Het doel van hybride ventilatie is het handhaven van een verantwoorde binnenluchtkwaliteit met een zo laag mogelijk energiegebruik door gebruik te maken van het beste van twee ventilatiesystemen.

Het doel van het besturingssysteem van hybride ventilatie is het noodzakelijke ventilatiedebiet en ventilatiepatroon te verzorgen, bij het laagst mogelijke energieverbruik.

Bij hybride ventilatie bepalen niet de prestaties van de afzonderlijke componenten de werking van het systeem maar wordt door een samenspel van diverse componenten gekomen tot een ventilatieconcept waarbij door het totale systeem een prestatie wordt geleverd.

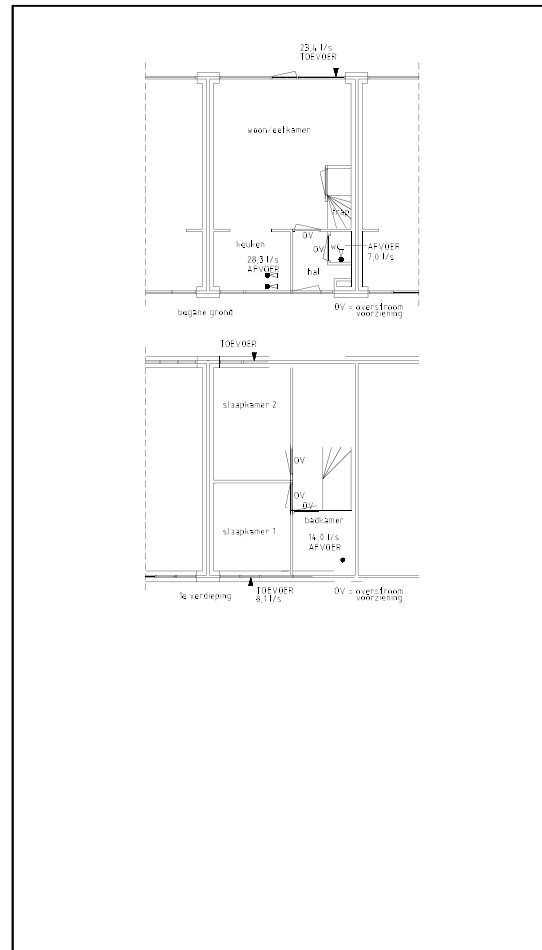
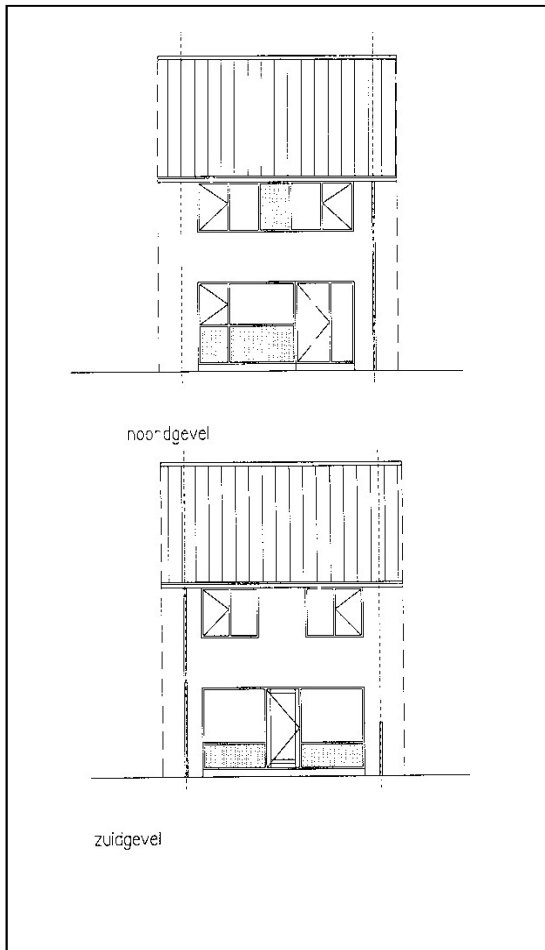
8. Voorbeelden ontwerp ventilatiesysteem

Voorbeeld 1: Tussenwoning / systeem C (instortkanalen)



Bouwkundige randvoorwaarden

I.0-1



Binnenluchtkwaliteit

I.3-1

Kentallen

Gebruikoppervlak	100,7	m ²
Verliesoppervlak	136,2	m ²
vloer	41,0	m ²
dak	50,2	m ²
bruto geveloppervlak	57,24	m ²
raamoppervlak	19,75	m ²
deuroppervlak	1,98	m ²
gevel	24% lichte constructies	
verblijfsgebied bg	31,5	m ²
verblijfsgebied 1 ^e	27,8	m ²

Ventilatieluchtoevoer

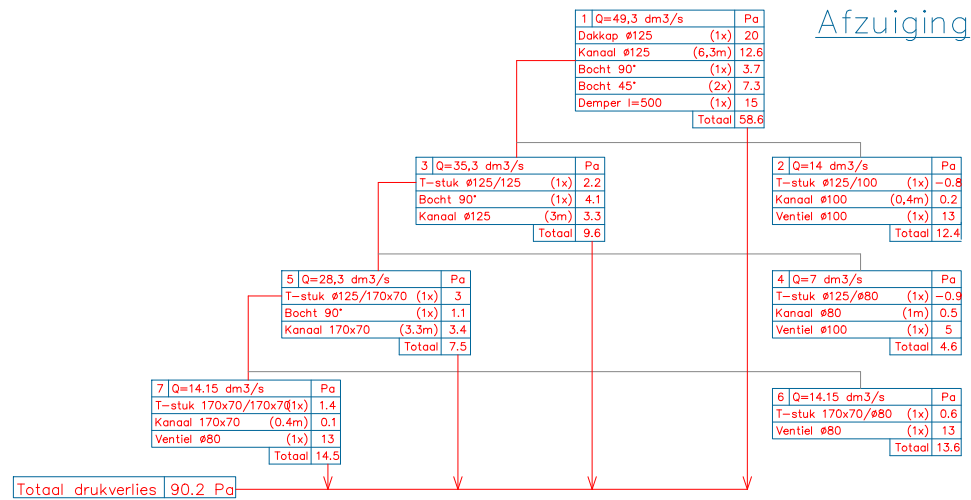
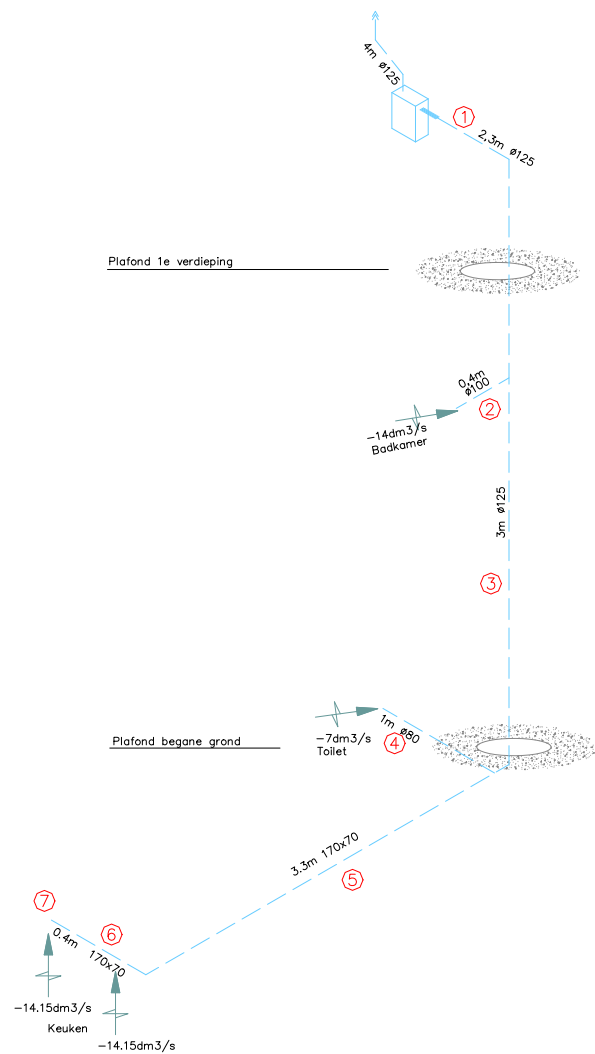
Verblijfsgebieden en verblijfsruimten	Eisen Bouwbesluit q _v [dm ³ /s]	Avloer	q _v [dm ³ /s]
Verblijfsgebied 1 woonkamer/keuken	0,9 x Avloer en ≥ 21, waarvan ≥ 50% direct van buiten	31,5	28,3
Verblijfsgebied 2 slaapkamer 1	0,9 x Avloer, waarvan ≥ 50% direct van buiten	27,8	25,0
slaapkamer 2	≥ 7	9,0	8,1
slaapkamer 3	> 7	12,0	10,8
badkamer	> 7	6,8	7,0

Ventilatieluchtafvoer

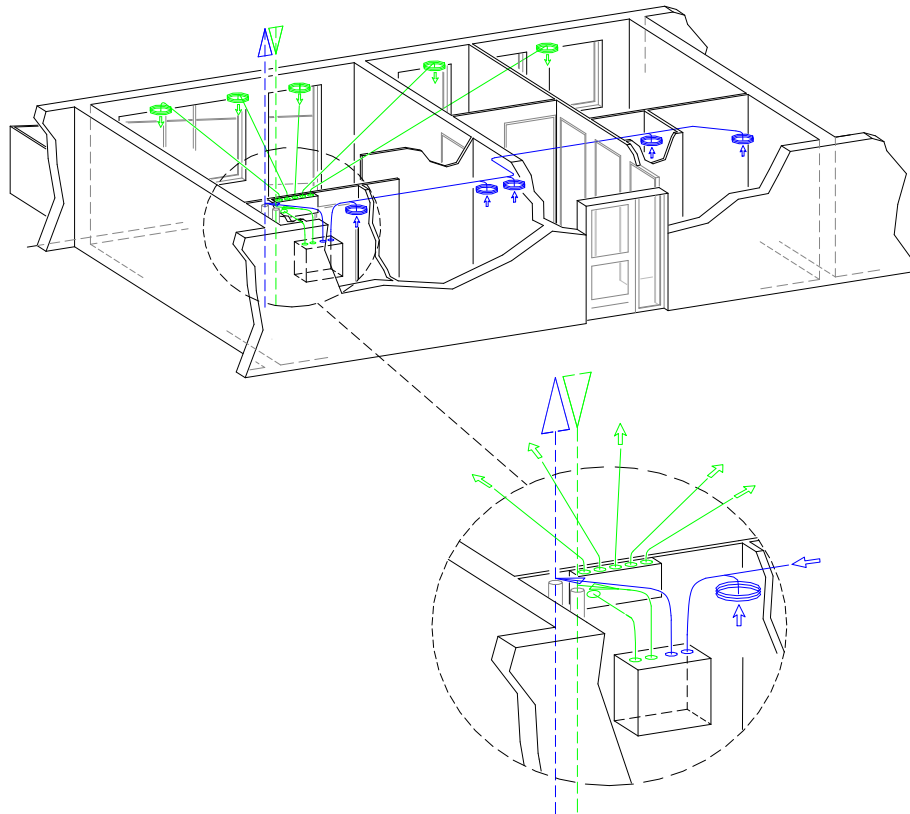
Ruimte	Eisen Bouwbesluit q _v [dm ³ /s]	q _v [dm ³ /s]
keuken	≥ 21	28,3
badruimte	≥ 14	14,0
toilet ruimte	> 7	7,0

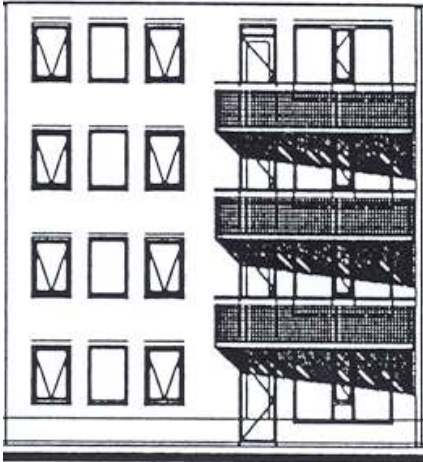
Ventilatiebalans

Ruimte	toevoer [dm ³ /s]	herkomst ventilatielucht	afvoer naar buiten [dm ³ /s]
VG 1 woonkamer/keuken	23,4	buiten	28,3
VG 2 slaapkamer 1	4,9	VG 2	
VG 2 slaapkamer 2	8,1	buiten	
VG 2 slaapkamer 3	10,8	buiten	
badruimte	7,0	VG 2	14,0
toilet ruimte		VG 2	7,0
totaal	49,3	buiten	49,3



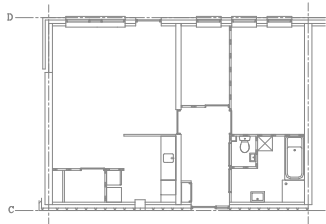
Voorbeeld 2: Appartement / systeem D





Kentallen

Gebruikoppervlak	70,0	m ²
Verliesoppervlak	49,0	m ²
vloer	72,5	m ²
dak	72,5	m ²
bruto geveleppervlak	24,5	m ²
raamoppervlak	10,0	m ²
deuroppervlak	4,2	m ²
gevel	44% lichte	constructies
verblijfsgebied	51,5	m ²



Ventilatiechichttoevoer

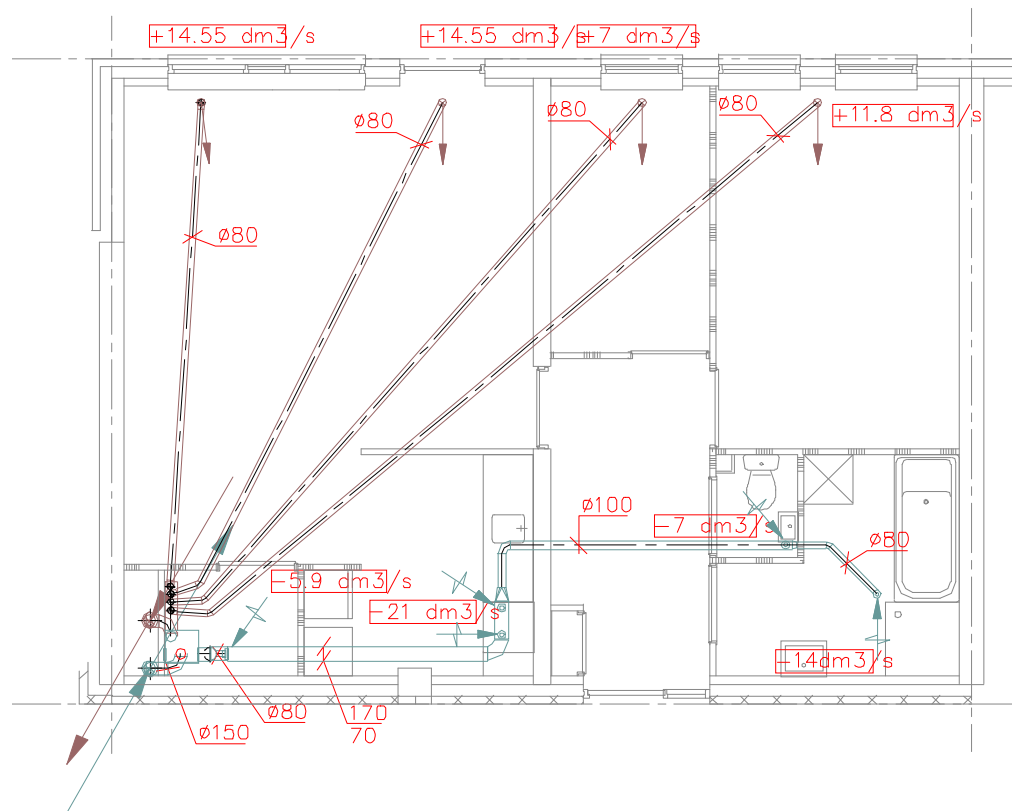
Verblijfsgebieden en verblijfsruimten	Eisen Bouwbesluit q _v [dm ³ /s]	Avloer	q _v [dm ³ /s]
	0,9 x Avloer en ≥ 21, waarvan ≥ 50% direct van buiten		
Verblijfsgebied 1 woonkamer/keuken	≥ 7	32,3	29,1
Verblijfsgebied 2 slaapkamer 1	≥ 7	13,1	11,8
slaapkamer 2	≥ 7	6,2	7,0

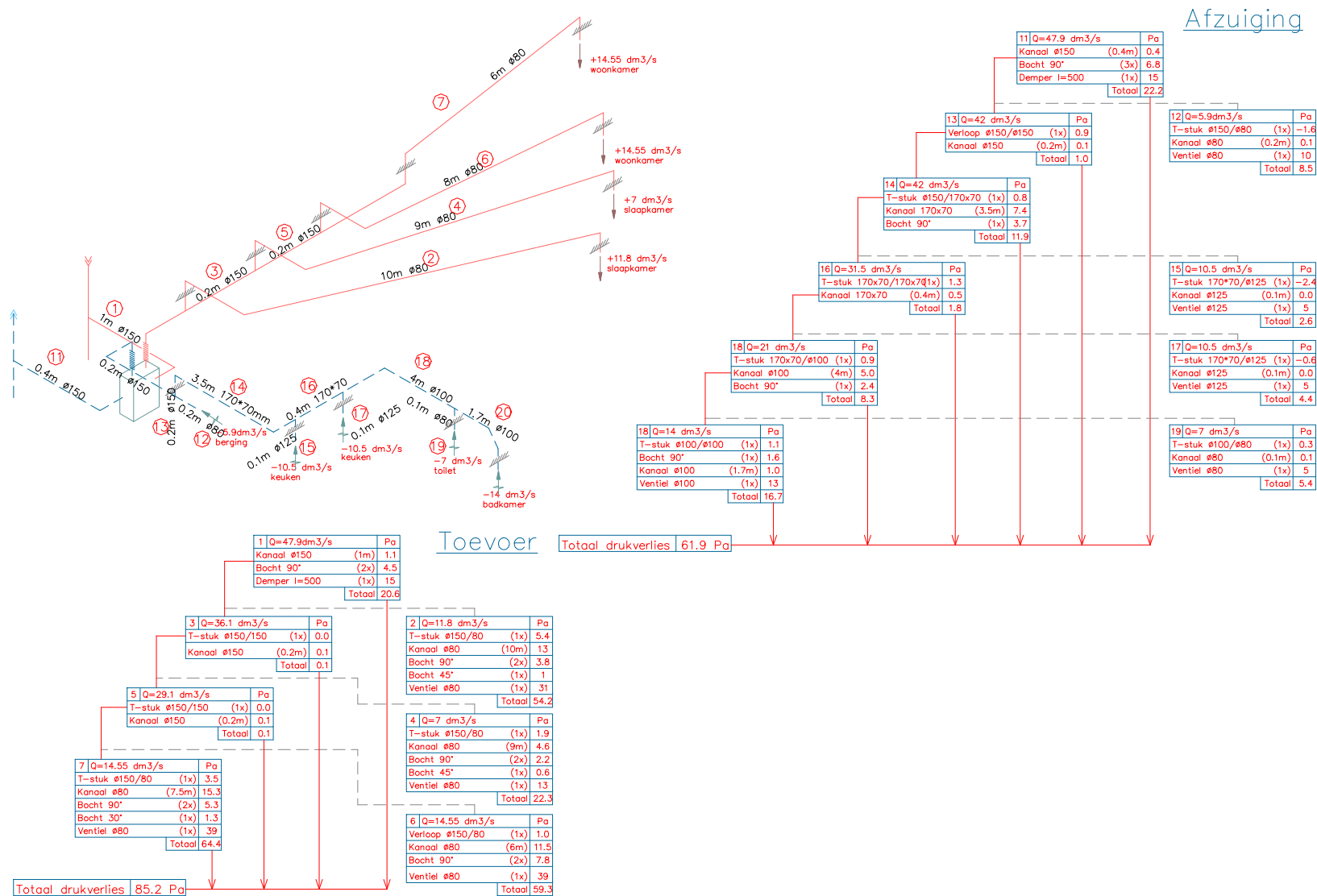
Ventilatiechichtafvoer

Ruimte	Eisen Bouwbesluit q _v [dm ³ /s]
keuken	≥ 21
badruimte	≥ 14
toilet ruimte	≥ 7

Ventilatiebalans

Ruimte	toevoer [dm ³ /s]	herkomst ventilatie lucht	afvoer naar buiten (dm ³ /s)
VG 1 woonkamer/keuken	29,1	buiten	21,0
VG 1 slaapkamer 1	11,8	buiten	
VG 1 slaapkamer 2	7,0	buiten	
badruimte			14,0
toilet ruimte			7,0
berging			5,9
total	47,9	buiten	47,9





9. Literatuurlijst

1. NEN 1087, Ventilatie van gebouwen – Bepalingsmethoden voor nieuwbouw, 2001
2. NPR 1088/C1, Ventilatie van woningen en woongebouwen - Aanwijzingen voor en voorbeelden van de uitvoering van ventilatievoorzieningen, 2000
3. NEN 2686/A2, Luchtdoorlatendheid van gebouwen – meetmethode, 2008
4. NEN 5138, Warmteterugwinning in woningen - Bepalingsmethoden voor energietisch rendement van warmteterugwinapparaten voor individuele ventilatiesystemen, 1999
5. NEN-EN-ISO 7730, Gematigde thermische binnencondities. Bepaling van de voorwaarden voor thermische behaaglijkheid, 2005.
6. NEN-EN-ISO 7726, Thermische binnencondities. Instrumenten en methoden voor het meten van fysische omgevingsgrootheden, 2001.
7. ISSO 17, Luchtkanalen drukverlies-, thermische en akoestische berekeningen, deel II, 1993
8. ISSO 61, Variantenboek woningventilatie, 2010
9. ISSO 62, Gebalanceerde ventilatie in de woningbouw, 2010
10. ISSO SBR, Handboek Vocht en Ventilatie. Basis voor Ontwerp, Uitvoering en Beheer, 2000
11. SBR 200, Bouwtechnische details voor energie-efficiënte woningbouw - Gietbouw.
12. SBR 360, luchtdicht bouwen - Uitvoerings- en ontwerpaanbevelingen, 1996
13. Fanger, P.O., Thermal Comfort, 1970.
14. Op 't Veld, P.J.M., de Gids, W.F. Techniekinventarisatie Ventilatie. Ontwikkelingen, trends en concepten, 1999.
15. Israëls, E. en F. Stofberg, Vademecum Energiebewust ontwerpen van nieuwbouwwoningen, 2010.
16. Inventarisatie binnenmilieuparameters. Karakteristieken, grenswaarden, meetmethoden; rapport 2000.0779; ing. W.F. de Gids, ir. P.J.M. Op 't Veld; TNO Bouw, Cauberg-Huygen R.I., 2003
17. Kennisbank Bouwfysica, ir. A.C. van der Linden, 2005.
18. BRL 5701, Nationale beoordelingsrichtlijn voor het KOMO-atteest voor 'ventilatie-roosters', 2003.
19. Oeffelen, E.C.M. van, Thermisch comfort bij toepassing van een ventilatiesysteem met natuurlijke toevoer in combinatie met lage temperatuur verwarming, 2007.
20. Roijen, E., Comfort bij decentraal ventileren, Nieuwe metingen geven meer inzicht in comfortaspecten, Verwarming en Ventilatie nummer 3, 2010.
21. Onderzoek naar de kwaliteit van ventilatiesystemen in nieuwbouw eengezinswoningen, Van Dijken en Boerstra. BBA Binnenmilieu, 2011.
22. Kwaliteit van mechanische ventilatiesystemen in nieuwbouw eengezinswoningen en bewonersklachten, RIVM Rapport 630789006/2011, Jongeneel e.a..RIVM, 2011.

23. Woonkwaliteit binnenmilieu in nieuwbouwwoningen, Adviesbureau Nieman, Utrecht, 2007.
24. Onderzoek handhaving bouwregelgeving: gezondheid in nieuwbouwwoningen, rapport 2004.1797-22: Slot en Op 't Veld, Cauberg-Huygen, Zwolle, i.o.v. Ministerie van VROM, 2005.
25. ISSO-kleintje Ventilatie, Woningen en woongebouwen, 2009.