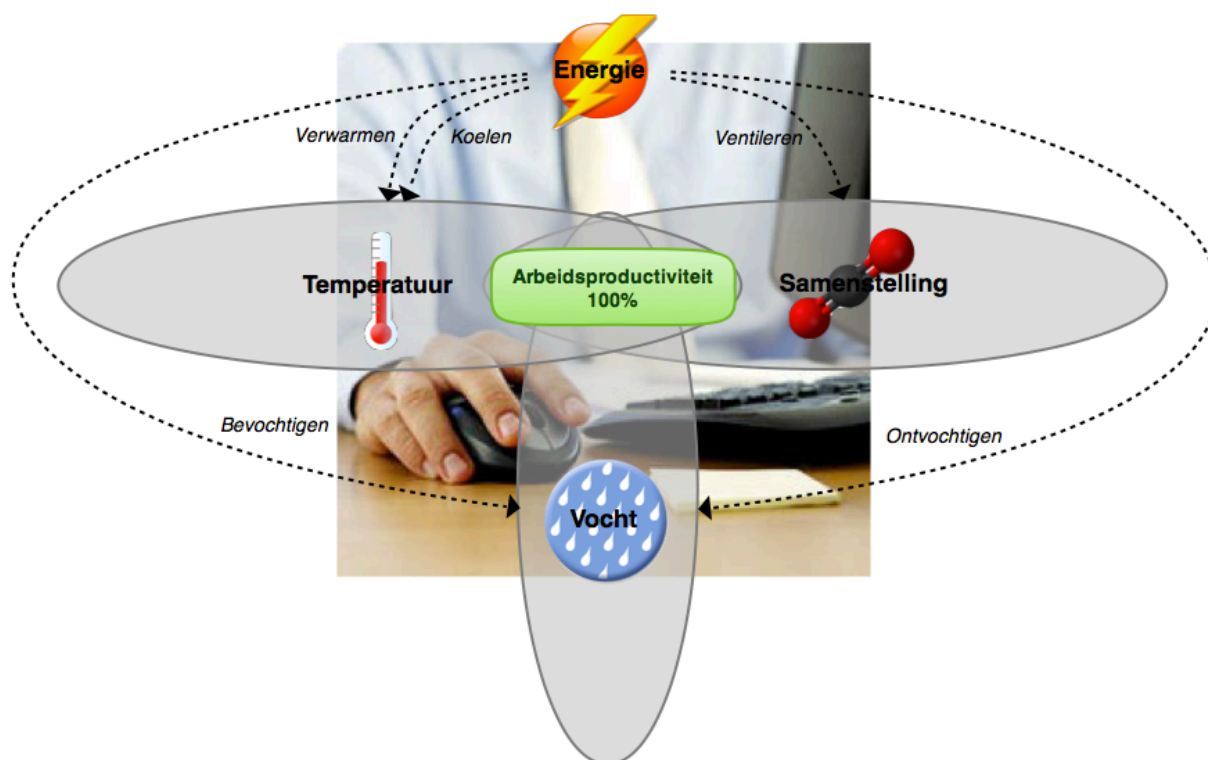


# Scriptie

“Binnenklimaat en energie als parameters van arbeidsproductiviteit”



**Auteur** Reimer van der Woude

**Datum** 15 juni 2012



---

# Scriptie

## “Binnenklimaat en energie als parameters van arbeidsproductiviteit”

<b>Auteur</b>	Reimer van der Woude	ra.vanderwoude@student.avans.nl
<b>Functie</b>	Stagiair	
<b>Begeleiders</b>	Marc Schouten Wilfred Kleinjan	Marc@SchoutenInstallatieAdvies.nl WE.Kleinjan@Avans.nl
<b>Datum</b>	15 juni 2012	
<b>Periode</b>	februari 2012 – juni 2012	
<b>Versie</b>	2.0	

---

## Samenvatting

In het kader van een afstudeeropdracht voor de HBO-opleiding milieukunde is een stageperiode van twintig weken doorlopen bij Schouten Installatieadvies (SIA). De hoofdvraag van de stageopdracht luidde als volgt: "Is het mogelijk een concept te ontwikkelen waarmee de kosten en baten van het verhogen van de arbeidsproductiviteit in kantoorgebouwen middels verbeterde klimaatbeheersing inzichtelijk worden gemaakt?" Hierbij lag de nadruk op binnenluchtkwaliteit, waarmee ventilatie en ook de temperatuur en luchtvochtigheid onlosmakelijk verbonden zijn.

Om deze vraag te beantwoorden is allereerst de arbeidsproductiviteit onder de loep genomen, welke hoofdzakelijk afhankelijk blijkt van comfort. Dit wordt tot op het moment van schrijven hoofdzakelijk bepaald middels de Fanger-methode, die het percentage ontevreden gebouwgebruikers voorspelt op basis van de klimaatregulering. Er blijken echter nog twee factoren mee te spelen bij de optimalisatie van comfort, die veel variatie teweeg brengen in persoonlijke voorkeur in verhouding tot het gemiddeld optimale binnenklimaat: gedrags- en psychologische adaptatie. Deze menselijke aanpassingen worden niet gewaardeerd in de Fanger-bepaling, wat betekent dat dit geen uitsluitend inzicht geeft in de waardering van het binnenklimaat. Wanneer de arbeidsproductiviteit vergroot dient te worden, pleegt zodoende te worden gericht op deze drie factoren. De twee vormen van adaptatie blijken in hogere mate aanwezig onder gebruikers van een natuurlijk geventileerd gebouw. Omdat in een dergelijk gebouw het klimaat slecht regelbaar is, wordt in dit onderzoek gericht op het nabootsen van een natuurlijk geventileerd gebouw. Hiermee kan het klimaat goed gereguleerd worden en kan ook adaptieve behaaglijkheid mee worden genomen in de productiviteitsbepaling.

Voor de genoemde parameters bij de regulatie van het binnenklimaat gelden de volgende waarden. Voor de CO<sub>2</sub>-concentratie kan geen optimale grens worden aangegeven: de productiviteit blijft stijgen bij een concentratie onder die van de buitenlucht. De luchtvochtigheid dient te allen tijde tussen 30 – 70% te zijn, hoewel idealiter tussen 40 – 60%. De optimale temperatuur is minder rechtlijnig, maar alle theorie in acht nemend kan gesteld worden dat de optimale productiviteitstemperatuur ongeveer 1°C onder de thermisch neutrale temperatuur ligt, tussen 21 – 24°C, waar bij koudere buitentemperaturen ook koudere binnentemperaturen gelden. Iedere graad afwijking van de optimale productiviteitstemperatuur resulteert in een afname van productiviteit van 4,75%.

Omdat voor iedereen de neutrale temperatuur anders is vanwege fysiologische en gedragsmatige verschillen, biedt het gebruik van persoonlijke (micro)klimaatssystemen uitkomst. Deze systemen halen verse lucht van buiten, conditioneren het tot een behaaglijke temperatuur en blazen dit direct in bij de werknemer, via een unit dat op ieder bureau wordt geplaatst. Teneinde deze in te kunnen zetten, dient het macroklimaat centraal gereguleerd te worden op de algemene temperatuur (21 – 24°C). Afhankelijk van de wensen van de gebruiker kan deze worden ingesteld op verwarming of koeling tot plus én minus 3°C ten opzichte van de ruimtetemperatuur. Voor optimale arbeidsproductiviteit dient de gebruiker te worden geïnformeerd over het gebruik en de waarden die het meest productief uitpakken. Naast de oplossing voor thermische regulering, wordt bovendien de verse lucht van buiten geconditioneerd en direct aan de persoon geleverd, waardoor lage CO<sub>2</sub>-concentraties gerealiseerd worden. Kanttekening hierbij is de leveringseffectiviteit van 40%, wat betekent dat de overige 60% van de totaal ingeademde lucht uit het macroklimaat komt. Bovendien wordt met de korte responstijd van de klimatisering, vanwege de directe levering van warmte, koude en verse lucht aan de gebruiker, het gevoel van maximale controle gegeven. Dit psychologisch effect levert een productiviteitsstijging op van nog eens ten minste 5%.

Een referentiegebouw "E-sites" wordt met de huidige configuratie van conventionele klimaatsystemen vergeleken met de situatie zoals deze zou zijn na toevoeging van microklimaatregeling, waarvan in Nederland alleen de i-Climate geschikt is. Voor de toepassing van de microklimaatssystemen is het van belang dat de werknemers op een geschikte manier van elkaar gescheiden worden, om ongemakken te voorkomen: kleinere werkgroepen geven namelijk een hogere klimaatwaardering. Deze werkgroepen kunnen worden gescheiden middels lage inzetwanden. In de vergelijking zijn de belangrijkste veranderingen zodoende de inzet van scheidingswanden, de toepassing van persoonlijke klimaatsystemen die een drastische verlaging van het inblaasdebiet vanwege de directe levering van buitenlucht tot gevolg heeft en de extra verwarming- en koelcapaciteit benodigd voor de hoge conditionering van de inblaaslucht. De overige gebouwconfiguraties worden zoveel mogelijk gelijk gelaten voor een goede vergelijking.



De totale investeringskosten van het implementeren van de persoonlijke klimaatsystemen inclusief bouwkundige voorzieningen en het toepassen van scheidingswanden zijn ruim €310.000, tegenover een kleine €91.000 voor het referentiegebouw. Dit resulteert tevens in hogere jaarlijkse kosten (€46.000 tegenover €32.000), hoofdzakelijk vanwege een hogere rente op de lening. Door deze maatregelen wordt in op jaarbasis in totaal ruim €136.000 aan productiviteit gewonnen, uitgaand van een jaarsalaris van €34.500 over 50 FTE. Zodoende kan de investering binnen twee jaar worden terugverdiend. De financiële analyse is gebaseerd op conservatieve waarden en bovendien kon een aantal productiviteitsbesparingen niet mee worden genomen vanwege onbetrouwbare data of onjuist vergelijkingsmateriaal. De verwachting is dat de totale, jaarlijkse winst die te behalen is een tweevoud hoger ligt.

Alle relevante berekeningen zijn in de vorm gegoten van de Excel-file "Binnenklimaat en productiviteit", waarin een aantal gebouwspecificaties ingevoerd kan worden. Vervolgens berekent het de gewonnen productiviteit en zet dit af tegen de investeringskosten. Dit dient ter ondersteuning van de besluitvorming bij het al dan niet realiseren van een verhoogde arbeidsproductiviteit.

# Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Theoretische achtergrond</b>	<b>8</b>
2.1	Binnenklimaat	8
2.1.1	Thermisch behagen	8
2.1.2	Verontreiniging	9
2.1.3	Vocht	9
2.2	Ventilatie	10
2.2.1	Ventilatievoud	10
2.2.2	Ventilatietypen	10
2.3	Wetgeving ventilatie	11
2.3.1	Arbidsomstandighedenbesluit	11
2.3.2	Bouwbesluit	11
2.3.3	Richtlijnen	12
2.3.4	Overzicht regelgeving en richtlijnen	12
2.4	Arbeidsproductiviteit	13
2.4.1	CO <sub>2</sub> -concentratie	14
2.4.2	Thermische perceptie	15
2.4.3	Fanger	15
2.4.4	Adaptieve thermische behaaglijkheid	16
2.4.5	Metabolisme	16
2.4.6	Kledingisolatie	17
2.4.7	Luchtsnelheid	17
2.5	Energieprestatie	17
2.5.1	Energieprestatiecoëfficiënt	17
2.5.2	Energieprestatie gebouwen	17
<b>3</b>	<b>Comfort en arbeidsproductiviteit</b>	<b>18</b>
3.1	Thermische behaaglijkheid	18
3.1.1	Adaptatie	18
3.1.1.1	Fysiologische adaptatie	18
3.1.1.2	Gedragsadaptatie	18
3.1.1.3	Psychologische adaptatie	20
3.1.2	Specifieke behaaglijkheidstemperaturen	20
3.1.2.1	Neutrale temperatuur	20
3.1.2.2	Voorkeurstemperatuur	22
3.1.3	Microklimaat	22
3.2	Kwantificatie arbeidsproductiviteit	24
3.2.1	Temperatuur	24
3.2.2	Ventilatie	24
3.2.3	Subjectieve arbeidsproductiviteit	25
3.2.4	Microklimaat	26
3.2.5	Casus	27
3.3	Ontwerpeisen	27
3.3.1	Gebouw	27
3.3.2	Klimaatsysteem	27
3.3.3	Gebruik	28
<b>4</b>	<b>Praktische uitwerking</b>	<b>29</b>
4.1	Referentiegebouw	29
4.1.1	Ontwerp	29
4.1.2	Installaties	29
4.1.2.1	Ventilatie	29
4.1.2.2	Temperatuurregeling	29
4.2	Optimaal gebouw	29
4.2.1	Ontwerp	30



---

4.2.2	Installaties	30
4.2.2.1	Ventilatie	30
4.2.2.2	Temperatuurregeling	30
4.3	Ventilatieberekening	30
4.3.1	Referentiegebouw	31
4.3.1.1	Kantoortuin	31
4.3.1.2	Bijeenkomstruimten	31
4.3.2	Optimaal gebouw	31
4.3.2.1	Kantoortuin	31
4.3.2.2	Vergaderruimten	31
4.3.3	Overzicht ventilatieberekeningen	31
4.4	Thermische simulatie	32
4.5	Energieprestatie	32
<b>5</b>	<b>Financiële analyse</b>	<b>33</b>
5.1	Investing	33
5.1.1	Scheidingswanden	33
5.1.2	Persoonlijke ventilatie	33
5.1.3	Infiltratiesysteem	33
5.2	Monetarisatie arbeidsproductiviteit	34
5.2.1	Regulatie	34
5.2.1.1	CO <sub>2</sub> -concentratie	34
5.2.1.2	Temperatuur	34
5.2.1.3	Bespaarde ziektekosten	36
5.2.2	Adaptatie	36
5.2.2.1	Scheidingswanden	37
5.2.2.2	Variabele lichtsnelheid	37
5.2.2.3	Responstijd	37
5.2.2.4	Persoonlijke beïnvloeding	37
5.3	Exploitatiefase	37
5.3.1	Onderhoud	37
5.3.2	Energie	37
5.3.2.1	Temperatuur	38
5.3.2.2	Ventilatie	38
5.4	Terugverdientijd	39
<b>6</b>	<b>Beslismodel</b>	<b>40</b>
<b>7</b>	<b>Conclusie</b>	<b>41</b>
<b>8</b>	<b>Aanbevelingen</b>	<b>43</b>
	<b>Literatuur</b>	<b>44</b>
<b>Bijlage I</b>	<b>Chemische achtergrondconcentraties buitenlucht op zeeniveau</b>	
<b>Bijlage II</b>	<b>Samenvatting NEN-cursus "Bouwbesluit 2012 en normen"</b>	
<b>Bijlage III</b>	<b>Bepalingsschema gebouwtype</b>	
<b>Bijlage IV</b>	<b>Technische details i-Climate</b>	
<b>Bijlage V</b>	<b>Bink Builder 3D-model "E-sites"</b>	
<b>Bijlage VIa</b>	<b>Gegevens ventilatieberekening referentiegebouw</b>	
<b>Bijlage VIb</b>	<b>Gegevens ventilatieberekening optimaal gebouw</b>	
<b>Bijlage VIIa</b>	<b>Resultaat warmteberekening van kantoortuin "E-sites"</b>	
<b>Bijlage VIIb</b>	<b>Resultaten warmteberekeningen bijeenkomstruimten "E-sites"</b>	

# 1 Inleiding

Volgens een onderzoek door TNO (Venema et al. 2007) had 8,2% van de Europeanen tussen 15 en 64 jaar door het werk veroorzaakte of verergerde gezondheidsproblemen. Van hen bleef 25,9% langer dan een maand thuis vanwege problemen met de luchtwegen. Tevens werd geconcludeerd dat een goede luchtkwaliteit het ziekteverzuim met een kwart kan doen afnemen en de productiviteit van de werknemers bovendien tot 20% verbeterd wordt. Omdat arbeidsproductiviteit als kostbaar goed wordt beschouwd in het bedrijfsleven, staan de gebouwgebruikers centraal bij de ontwerpen van Schouten Installatie Advies (SIA). De conventionele oplossing voor de vaak slechte binnenluchtkwaliteit van gebouwen is het toepassen van een verhoogde ventilatiecapaciteit. Dit leidt echter tot een aanzienlijk hoger energieverbruik van het gebouw, wat het energielabel negatief beïnvloedt. Teneinde te kunnen adviseren op kostenbesparende gebouwen vanwege de duurzaamheid en de optimale gebruikskwaliteit hiervan, is de hoofdvraag in het kader van een afstudeeropdracht voor de HBO-opleiding milieukunde van Avans Hogeschool geformuleerd: "Is het mogelijk een concept te ontwikkelen waarmee de kosten en baten van het verhogen van de arbeidsproductiviteit in kantoorgebouwen middels verbeterde luchtkwaliteit inzichtelijk worden gemaakt?" Hierbij is het eveneens van belang dat het energieverbruik beperkt blijft. Om deze hoofdvraag in te perken wordt luchtkwaliteit in dit project bepaald door de CO<sub>2</sub>-concentratie, temperatuur en luchtvochtigheid. Het concept dat ontwikkeld wordt in dit onderzoek, in de vorm van een Excel-file, geeft voor een willekeurig gebouw de score op het gebied van arbeidsproductiviteit weer ten gevolge van de drie genoemde parameters, met hierbij een kosten en batenanalyse.

Teneinde een dergelijk model op te stellen, is het allereerst van belang relevante, beschikbare literatuur te bestuderen om een verband te onderzoeken tussen arbeidsproductiviteit en luchtkwaliteit, waarna de arbeidsproductiviteit tevens wordt gekwantificeerd. De hieruit voortvloeiende maatregelen worden omgezet naar een praktische, installatietechnische uitwerking. Een financiële raming wordt vervolgens opgesteld, waarin de investering die nodig is om in het referentiegebouw de productiviteit te maximaliseren, vergeleken met de financiële winst die hiermee te behalen is. Met alle onderzochte aspecten kan het concept gevormd worden, waarmee het inzicht in de mogelijke productiviteitsverhoging ten opzichte van de referentiesituatie kan worden verkregen door SIA.

Deze scriptie vangt aan met de basistheorie in hoofdstuk 2, dat dient ter onderbouwing van de in dit project gemaakte keuzes. In hoofdstuk 3 wordt de relatie tussen comfort en arbeidsproductiviteit onderzocht, waarbij de nadruk ligt op het vinden van de optimale waarden voor de binnenklimaatparameters. Met behulp van deze informatie wordt in hoofdstuk 4 een praktische uitwerking gegeven aan het theoretisch optimaal klimaat. Hoofdstuk 5 bevat de financiële raming, waarna de Excel-file wordt toegelicht in hoofdstuk 6. De conclusies en aanbevelingen worden gegeven in de hoofdstukken 7 en 8 respectievelijk.

## 2 Theoretische achtergrond

Arbeidsproductiviteit wordt bepaald door het complete milieu van de werknemer, waardoor het aantal spelende factoren zeer omvangrijk is (figuur 1). Veel hiervan zijn door de werkgever niet of nauwelijks te verlichten, zoals de persoonlijke en sociale factoren. De organisatorische factoren zijn wel te beïnvloeden en wordt door ieder bedrijf afzonderlijk bepaald. Voor een installatietechnisch adviesbureau als SIA zijn vooral de overige factoren van belang, samen te vatten onder de werkmiddelen en binnenklimaat, of werkomgeving.



Figuur 1: Factoren van invloed op productiviteit (Boerstra & Leijten, 2003)

Dit hoofdstuk vormt de theoretische basis die benodigd is om het onderzoek op te starten. Allereerst wordt het binnenklimaat en de daarop werkende factoren gedefinieerd. Daarna wordt specifiek op ventilatie ingegaan, dat bovendien onderhevig is aan wetgeving. De arbeidsproductiviteit wordt in paragraaf 4 behandeld. Vervolgens komt ook de energieprestatie van een gebouw aan bod. Het referentiegebouw dat gedurende dit project gebruikt wordt staat beschreven in paragraaf 5 en ten slotte worden de uitgangspunten voor dit onderzoek beschreven.

### 2.1 Binnenklimaat

Het binnenklimaat van gebouwen valt onder de bouwfysica en kan onderverdeeld worden in de categorieën licht, akoestiek en lucht. Omdat dit project draait rond de luchtkwaliteit, worden de andere aspecten buiten beschouwing gelaten. Gedurende dit onderzoek wordt voor deze parameters dan ook uitgegaan van behaaglijke constanten.

De totale luchtkwaliteit wordt gevormd door zowel de verontreiniging, temperatuur en het vochtgehalte van de binnenlucht en is afhankelijk van externe condities, ontwerp van het gebouw en de installaties en de gebruikers. Volgens Leaman & Bordass (1997) zijn er positieve associaties gevonden tussen arbeidsproductiviteit en het gevoel van controle over geluid, verwarming, koeling, ventilatie en verlichting in volgorde van sterkte van het verband.

#### 2.1.1 Thermisch behagen

Of iemand zich comfortabel voelt met betrekking tot de temperatuur in een ruimte wordt bepaald door de vochtgehalte, snelheid en temperatuur van de omgevingslucht. Ook de gemiddelde stralingstemperatuur, kleding en de mate van inspanning zijn belangrijke factoren. Naast deze algemene factoren zijn ook de lokale verschillen van belang, zoals koude ramen, de verticale temperatuurgradiënt en te veel warmte van instralend zonlicht. Hierin vervullen verwarming en ventilatie de grootste rollen. Andere aanwezige warmtebronnen in een utiliteitsgebouw naast de verwarmingsinstallatie zijn de werknemers, zonnestraling en elektrische apparatuur.



Een te hoge temperatuur ( $> 25^{\circ}\text{C}$ ) heeft voornamelijk op de korte termijn een nadelige uitwerking en uit zich bijvoorbeeld in hoofdpijn, vermoeidheid, duizeligheid en verslechtering van de motoriek. Een te lage temperatuur ( $< 11^{\circ}\text{C}$ ) leidt eveneens tot verslechtering van de motoriek en eventueel problemen met de luchtwegen.

### 2.1.2 Verontreiniging

De term 'binnenluchtverontreiniging' impliceert een relativiteit. In dit geval is verontreinigde binnenlucht een bepaalde hoeveelheid lucht die hogere concentraties van bepaalde stoffen bevat dan buitenlucht. In bijlage I is ter vergelijking een tabel opgenomen met hierin de samenstelling van droge buitenlucht op zeeniveau (Van Deventer, 2001). De binnenlucht kent de volgende drie soorten verontreiniging:

- fysische;

Bijvoorbeeld fijn stof, asbest, minerale wol.

- biologische;

Bijvoorbeeld mijten, schimmels, pollen, bacteriën en afscheidingen van biologische bronnen.

- chemische.

Bijvoorbeeld  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ , VOS, formaldehyde, radon en PAK's.

Verder wordt onderscheid gemaakt tussen primaire en secundaire verontreiniging, waarbij secundaire luchtverontreiniging het ontstaan van chemische verbindingen tussen primaire verontreinigingen is.

De bepalende factor in vervuilde lucht is in kantooromgevingen veelal  $\text{CO}_2$ , omdat de gebouwgebruikers dit in grote hoeveelheden uitademen en het bovendien een goede en bovendien absolute, gedefinieerde indicatie geeft van de hoeveelheid reukstoffen in de lucht.  $\text{CO}_2$  is zodoende in dezen de belangrijkste indicator om te bepalen of lucht vervuild is. Dit wordt dan ook wel de 'hygiënische grenswaarde' genoemd. De achtergrondconcentratie van  $\text{CO}_2$  in buitenlucht op zeeniveau is ongeveer 360 ppm tot 450 ppm in een stedelijke omgeving. De gemiddelde, licht actieve persoon ademt  $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$  uit, wat voor ongeveer  $0,02 \text{ m}^3$  uit  $\text{CO}_2$  bestaat.

De schadelijkheidsgrens van  $\text{CO}_2$  ligt bij 30.000 ppm en vanaf concentraties hoger dan 80.000 ppm kunnen krampen, bewusteloosheid en zelfs de dood intreden. Boven 1.000 ppm  $\text{CO}_2$  wordt de lucht reeds als slecht ruikend ervaren. Omdat  $\text{CO}_2$  een geurloos gas is, betekent dit dat de ventilatie dusdanig slecht is dat de geproduceerde afvalstoffen, zoals geur door biologische afscheiding, slecht afgevoerd worden. Naast  $\text{CO}_2$  zijn in een kantooromgeving fijn stof ( $\leq 10 \mu\text{m}$ ) en ozon ( $\text{O}_3$ ) de belangrijkste luchtvervuiling.

De primaire oorsprong van fijn stof zijn de processen verbranding (fossiele brandstoffen), wrijving (vermalen) en verdamping (zeewater). Secundair fijn stof wordt gevormd wanneer de smogvormende stoffen  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ , VOS en ozon samenkomen. Ozon komt van nature sporadisch voor in de biosfeer, maar wordt wel bewerkstelligd door antropogene aantasting van de ozonlaag. In de binnenlucht geldt dat de printapparatuur in een utiliteitsgebouw de grootste oorzaak is van ozon en fijn stof.

Een bijdrage aan hart- en luchtwegaandoeningen, functiestoornis en vroegtijdige sterfte wordt door Brunekreef & Holgate (2002) toegerekend aan fijn stof. Voor dit type vervuiling is geen veilige, maximale waarde toegekend, omdat ieder deeltje potentieel schadelijk is. Des te hoger echter de concentratie fijn stof en individuele gevoeligheid, zo ook het gezondheidsrisico. Ook ozon tast voornamelijk de luchtwegen aan en kan astma versterken.

Voor de andere stoffen zijn veel verschillende gevolgen van verontreinigde lucht aan te wijzen, zowel op de korte als op de lange termijn. Het doel van dit project is echter om de luchtkwaliteit zo hoog mogelijk te houden en verdere uitweiding zodoende overbodig.

### 2.1.3 Vocht

Er vanuit gaande dat keuken- en douchefaciliteiten niet aanwezig zijn in het gemiddelde kantoorpand, zijn de belangrijkste bronnen van vocht de bouwmaterialen (alleen in het eerste jaar na oplevering) en de aanwezige personen. Een lichte arbeid verrichtend persoon produceert ongeveer 70 gram vocht per uur door per- en respiratie. Door middel van ventilatie kan de luchtvochtigheid worden geregeld.

Een veel gebruikte grootheid voor het vochtgehalte in de lucht is de relatieve luchtvochtigheid (RH; relative humidity). Deze geeft het percentage vocht dat de lucht bevat in relatie tot de hoeveelheid vocht die de lucht maximaal kan bevatten bij de gegeven luchttemperatuur. De absolute luchtvochtigheid wordt uitgedrukt in massa per volume en is dus afhankelijk van de druk.

De absolute luchtvochtigheid in Nederland is in de winter het laagst en piekt in de zomer. De onderdrempel van relatieve luchtvochtigheid in Nederland ligt rond 30%, wat net op de grens van behaaglijkheid ligt. Bij kou buiten wordt er binnen echter verwarmd, waardoor de lucht gedroogd wordt. Hierdoor kan het van belang zijn de lucht 's winters te bevochtigen.

Het belangrijkste gevolg van te vochtige lucht is schimmel- en bacteriegroei. Bij onvoldoende ventilatie kan condensatie optreden, gedreven door verzadiging van de lucht met waterdamp. Met name op koude oppervlakken ontstaat hierdoor schimmel. Verder kunnen de gebouwgebruikers hun lichaamswarmte nauwelijks kwijt door verminderde transpiratie. Bovendien wordt een te hoge of te lage temperatuur beter waargenomen. Wanneer de lucht te weinig vocht bevat, is er bij de gebouwbezitters kans op slijmvliesirritatie en 'droge' ogen.

## 2.2 Ventilatie

Door middel van onder andere ventilatie kan de kwaliteit van de binnenlucht geregeld worden. Omdat de gemiddelde werknemer gedurende een lange periode aanwezig is in het gebouw, is het van groot belang dat deze voorzien wordt van gezonde en behaaglijke lucht.

In de eerste plaats dient ventilatie om afvalstoffen zoals CO<sub>2</sub>, vocht en reukstoffen, met name vanwege het metabolisme van de mens, af te voeren. Uit onderzoek van Ragas et al. (2011) is aangetoond dat de aanvoer van verse lucht het risico op besmettingen door pathogene bronnen aanzienlijk verkleint. Gedurende de zomer wordt het thermisch comfort in stand gehouden middels ventilatie, door de afvoer van warmte. In de winter is het echter van belang de warmte binnen te houden, waarbij ventilatie ook een rol kan spelen, door het terugwinnen van de warmte uit de gespuide lucht. Ten slotte dient ventilatie ten behoeve van de vochtregulatie.

### 2.2.1 Ventilatievoud

De mate waarin een kantoor wordt geventileerd kan worden uitgedrukt in het ventilatievoud  $n$  van de ruimte. Deze grootheid geeft aan hoe vaak de ruimte per uur van een volume verse lucht gelijk aan de ruimte wordt voorzien. Zo wordt de lucht in een ruimte met  $V = 100 \text{ m}^3$  en  $n = 2$ , ieder uur tweemaal verversst; er wordt  $200 \text{ m}^3$  verse lucht per uur aangevoerd.

Zoals vermeld is de snelheid van de lucht van belang voor het comfort. Hoge luchtsnelheden voelen koud aan en worden als onprettig ervaren. Wanneer een relatief hoog ventilatievoud nodig is, dient de capaciteit van bron en spui ofwel vergroot, ofwel gedecentraliseerd te worden. Ook de richting van de bron speelt een rol.

### 2.2.2 Ventilatietypen

Vijf typen ventilatie worden onderscheiden in Boerstra et al. (2007) door combinaties van natuurlijke en mechanische afvoer, namelijk:

- Natuurlijke ventilatie;

Natuurlijke ventilatie is de eenvoudigste vorm, waarbij ramen of roosters worden toegepast. Dergelijke roosters kunnen standaard worden uitgevoerd of bijvoorbeeld reagerend op winddruk. De variatie van de aanvoer komt de gezondheid ten goede.

- Mechanische toevoer, natuurlijke afvoer;

Bij dit type ventilatie wordt buitenlucht het gebouw in geforceerd door middel van mechanische ventilatoren, waardoor een natuurlijke afvoerende stroom ontstaat. Dit type wordt in de praktijk zeer weinig toegepast.

- Natuurlijke toevoer, mechanische afvoer;

Middels gevelopeningen zoals ramen en roosters wordt verse lucht aangevoerd terwijl de binnenlucht naar buiten wordt gebracht door mechanische ventilatoren. Eventueel kan een onderdruk worden gecreëerd met de afvoer, waardoor de natuurlijke toevoer vergroot wordt.

- Balansventilatie;

Bij balansventilatie is zowel de toe- als de afvoer mechanisch en kan eenvoudig geregeld worden. Dit type wordt vaak voorzien van een warmtewisselaar. Hiermee wordt de warmte uit de afgezogen binnenlucht gebruikt om de aangezogen buitenlucht voor te verwarmen.

- Hybrideventilatie.

De toe- en afvoer bij de hybrideventilatie geschiedt natuurlijk. Door middel van sensoren wordt de luchtkwaliteit continu gemeten en wanneer deze inadequaaf is, worden ventilatoren ingeschakeld.

Aan (half-)natuurlijke ventilatie zit een aantal nadelen. Zo grenzen niet alle ruimtes in een utiliteitsgebouw aan een gevel, heeft tocht met name bij koud weer of harde wind plaats en kunnen eventuele geluiden of geuren van buiten hinderlijk zijn. Balansventilatie wordt veel toegepast vanwege de relatieve zekerheid van aanvoer van verse lucht en de mogelijkheid tot het terugwinnen van warmte. Bovendien kan de buitenlucht eventueel nog verder gefilterd worden. De installatie kan echter overlast vormen door geluidproductie en het systeem vergt veel onderhoud. Wanneer dit laatste niet regelmatig gebeurt kan de installatie zelf een bron van verontreiniging vormen.

## 2.3 Wetgeving ventilatie

Een ventilatiesysteem is onderhevig aan allerhande normen en richtlijnen. Deze geven de minimale vereisten waaraan de binnenluchtkwaliteit en de installaties ten minste moeten voldoen; de verwachting is dan ook dat deze normen ruim gehaald zullen worden in dit onderzoek. Naast kwalitatieve eisen gelden ook installatie- en onderhoudseisen, welke niet van belang worden geacht in dit onderzoek.

De kwalitatieve eisen worden gesteld in het Arbeidsomstandighedenbesluit en Bouwbesluit. Hiernaast zijn er enkele richtlijnen voor de kwaliteit binnenlucht vastgesteld.

### 2.3.1 Arbeidsomstandighedenbesluit

Het Arbeidsomstandighedenbesluit<sup>1</sup> (Arbobesluit) geeft nadere uitwerkingen op de Arbeidsomstandighedenwet (Arbowet). Voor dit onderzoek is Art. 6.1 'Temperatuur' lid 1 Arbobesluit van belang en luidt:

“Rekening houdend met de aard van de werkzaamheden die door de werknemers worden verricht en de fysieke belasting die daar het gevolg van is, veroorzaakt de temperatuur op de arbeidsplaats geen schade aan de gezondheid van de werknemers.” Deswege is er geen norm vastgelegd in het Arbobesluit.

De voor dit onderzoek relevante leden van Art. 6.2 'Luchtverversing' zijn 2, 3, 4 en 6 en luiden:

“2. Luchtverversingsinstallaties zijn altijd bedrijfsklaar.

3. Luchtverversingsinstallaties functioneren zodanig dat werknemers niet aan hinderlijke tocht worden blootgesteld.

4. Luchtverversingsinstallaties zijn voorzien van een controlesysteem dat storingen in de installatie signaleert voor zover dat noodzakelijk is voor de gezondheid van de werknemers.

6. Een arbeidsplaats in een gebouw als bedoeld in artikel 1, eerste lid, onder c, van de Woningwet wordt slechts gebruikt indien het gebouw voldoet aan de bij of krachtens het Bouwbesluit gegeven voorschriften met betrekking tot de van toepassing zijnde gebruiksfunctie in de zin van dat besluit.” Lid 6 bepaalt dat de voorschriften inzake luchtverversing in het Bouwbesluit gehandhaafd worden.

### 2.3.2 Bouwbesluit

Gezien de looptijd van dit onderzoek (tot juli 2012), wordt rekening gehouden met het nieuwe Bouwbesluit 2012<sup>1</sup>, welke in april van dat jaar in werking treedt. Hierbij dient duidelijk onderscheid gemaakt te worden tussen een verblijfsgebied en een verblijfsruimte. De kenmerkende activiteit, in dit geval behorend bij de kantoorfunctie, is het uitvoeren van administratief werk. Een verblijfsruimte is een ruimte waarin de kenmerkende activiteit van een gebruiksfunctie in plaatsvindt, terwijl het verblijfsgebied de verzamelnaam is voor ten minste een verblijfsruimte in combinatie met andere ruimten op dezelfde bouwlaag. Voor een gedetailleerde beschrijving van de veranderingen in het nieuwe Bouwbesluit 2012 ten opzichte van Bouwbesluit 2003 wordt verwezen naar bijlage II. Dit is een samenvatting van de NEN-cursus “Bouwbesluit 2012 en normen” van 16 mei 2012 in het NEN-gebouw te Utrecht.

<sup>1</sup> Geldend op 27 februari 2012

Art. 3.28, lid 1 Bouwbesluit beslaat nieuwbouw (conform NEN 1087) en beschrijft: "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." Volgens lid 2 van dit aansturingsartikel dient te worden voldaan aan lid 3, 4 en 6 van Art. 3.29 Bouwbesluit (Luchtverversing verblijfsgebied, verblijfsruimte, toiletruimte en badruimte). Alleen lid 3 is van belang in de lijn van dit onderzoek en luidt: "Een verblijfsgebied en een verblijfsruimte heeft een voorziening voor luchtverversing met een volgens NEN 1087 bepaalde capaciteit van ten minste de in tabel 3.28 aangegeven capaciteit per persoon." Uit tabel 3.28 valt op te maken dat het gaat om 6,5 dm<sup>3</sup>/s per persoon. Volgens Art. 3.34 lid 1 geldt dat deze lucht direct van buiten dient te komen. Ten behoeve van het thermisch comfort geldt Art. 3.30 Bouwbesluit, welke stelt dat de toevoer van verse lucht in de leefzone van een verblijfsgebied niet groter mag zijn dan 0,2 m/s. De ventilatie moet minstens vier standen hebben voor regelbaarheid (Art. 3.31 Bouwbesluit). Ten opzicht van de capaciteit is de laagste stand maximaal 10%, de hoogste 100% en ten minste twee standen tussen de laagste stand en 30% van de capaciteit. De aan- en afvoer liggen op ten minste twee meter van de perceelgrens.

Volgens aansturingsartikel 3.37 Bouwbesluit welke slaat op bestaande bouw, lid 2 dient te worden voldaan aan lid 2, 3 en 6 van Art. 3.38 Bouwbesluit (Luchtverversing verblijfsgebied, verblijfsruimte, toiletruimte en badruimte), waarvan alleen lid 2 van belang is en als volgt luidt: "Een verblijfsruimte heeft een voorziening voor luchtverversing met een volgens NEN 8087 bepaalde capaciteit van ten minste de in tabel 3.37 aangegeven capaciteit per persoon. Daarbij wordt uitgegaan van het aantal personen waarvoor de verblijfsruimte is bestemd." Uit tabel 3.37 valt op te maken dat het gaat om 3,44 dm<sup>3</sup>/s per persoon.

### 2.3.3 Richtlijnen

Relevante aanbevelingen voor de thermische behaaglijkheid middels NEN-EN-ISO 7730, in het geval van lichte, hoofdzakelijke zittende activiteit bij een RH = 50%, zijn 's zomers een luchttemperatuur tussen 23 – 26°C en 's winters tussen 20 – 24°C, waarbij het verticale verschil tussen 0,1 en 1,1 m van de vloer kleiner moet zijn dan 3°C. De oppervlaktetemperatuur van de vloer zelf dient tussen de 19 – 26°C te liggen.

De per 1 januari 2011 vervallen Beleidsregel 6.2 Arbeidsomstandighedenwetgeving geeft een grenswaarde van 1200 ppm CO<sub>2</sub> in de binnenlucht. Een goede luchtkwaliteit bevat niet meer dan 1000 ppm, hoewel door gevoelige personen de lucht bij 800 ppm CO<sub>2</sub> reeds als slecht ruikend wordt ervaren. Deze richtlijn is dan ook opgesteld op basis van de geurstoffen die evenredig in concentratie oplopen, omdat gezondheidseffecten pas bij extreem hoge concentraties (3 volumeprocent) plaats vinden.

Voor de relatieve luchtvochtigheid gelden over het algemeen de grenzen 30-70%, reeds genoemd. De voorkeur gaat volgens Boerstra et al. (2009) echter uit naar een kleiner bereik van 40-60%.

Omdat, naast de gebouwgebruikers zelf, de printapparatuur de grootste vervuillingsbron is in de kantooromgeving, zijn er richtlijnen opgesteld in Boerstra et al. (2009) betreffende de plaatsing hiervan. Bij apparatuur dat < 5.000 kopieën per maand maakt is het voldoende dit op tenminste enkele meters van de werkplek te stallen met de afvoerrichting van de gebouwgebruikers af. Tot 50.000 kopieën per maand dient de apparatuur in een separate ruimte te worden geplaatst, waar afdoende geventileerd wordt. Bij een hogere intensiteit wordt aanbevolen een ruimte in te richten voor printen en kopiëren, waarin specifieke afzuiging en koeling plaatsvindt.

### 2.3.4 Overzicht regelgeving en richtlijnen

In tabel 1 is ten behoeve van de leesbaarheid een overzicht van deze paragraaf opgenomen.

Tabel 1: Overzicht relevante regelgeving en richtlijnen

Regelgeving	Strekking	Plaatsing
Luchtverversing <i>nieuwbouw</i>	Minimum aanvoer van 6,5 dm <sup>3</sup> /s buitenlucht per pers.	Art. 3.29, lid 3 Bouwbesluit + Art. 3.34, lid 1 Bouwbesluit
<i>bestaande bouw</i>	Minimum aanvoer van 3,44 dm <sup>3</sup> /s buitenlucht per pers.	Art. 3.38, lid 2 Bouwbesluit + Art. 3.34, lid 1 Bouwbesluit
<i>nieuwbouw</i>	Snelheid aanvoer < 0,2 m/s	Art. 3.30 Bouwbesluit
	Regelbaarheid: 4 standen	Art. 3.31 Bouwbesluit
	Aan- en afvoer op 2 m van perceelgrens	
Richtlijnen		
Temperatuur	Zomer 23 - 26 °C Winter 20 - 24 °C	NEN-EN-ISO 7730 (p. 186)
	Verticaal verschil < 3 °C	NEN-EN-ISO 7730 (p. 186)
	Vloertemperatuur 19 - 26 °C	NEN-EN-ISO 7730 (p. 186)
CO <sub>2</sub> -concentratie	< 1200 ppm	Beleidsregel 6.2 Arbowet
Luchtvochtigheid	30 - 70%	Arbo-informatieblad 24
Printapparatuur <i>laagvolume</i> <i>middenvolume</i> <i>hoogvolume</i>	Enkele meters van de werkplek Separate ruimte met adequate ventilatie Reproruimte met specifieke koeling en ventilatie	Arbo-informatieblad 24

## 2.4 Arbeidsproductiviteit

De gebouwgebruikers staan bij SIA centraal. Gedurende dit project zijn dat de werknemers in een kantoor. In een kantoorgebouw is het klimaat vaak hetgeen waar het meest over geklaagd wordt. Er wordt gedurende dit onderzoek vanuit gegaan dat een werknemer per week veertig uur aanwezig is, van maandag tot en met vrijdag. De gebouwbezetting is gemiddeld 80%.

Het salaris van arbeidskrachten is voor veel bedrijven de grootste financiële afschrijving, waar het gebouwonderhoud relatief weinig kost. Volgens Clements-Croome (2000) is deze verhouding zelfs 25 staat tot 1. Hieruit volgt dat een investering in het verbeteren van de gebouwprestatie op het gebied van binnenklimaat veel winst kan opleveren in de vorm van productiviteit van de werknemers. Op deze manier zijn er twee voordelen te behalen, want productiviteit geeft ook voldoening aan de werknemer.

Heerwagen (1998) haalt in zijn onderzoek de psychologie aan, waarin wordt laten zien dat de prestatie van een arbeider gereflecteerd kan worden aan de hand van formule 1.

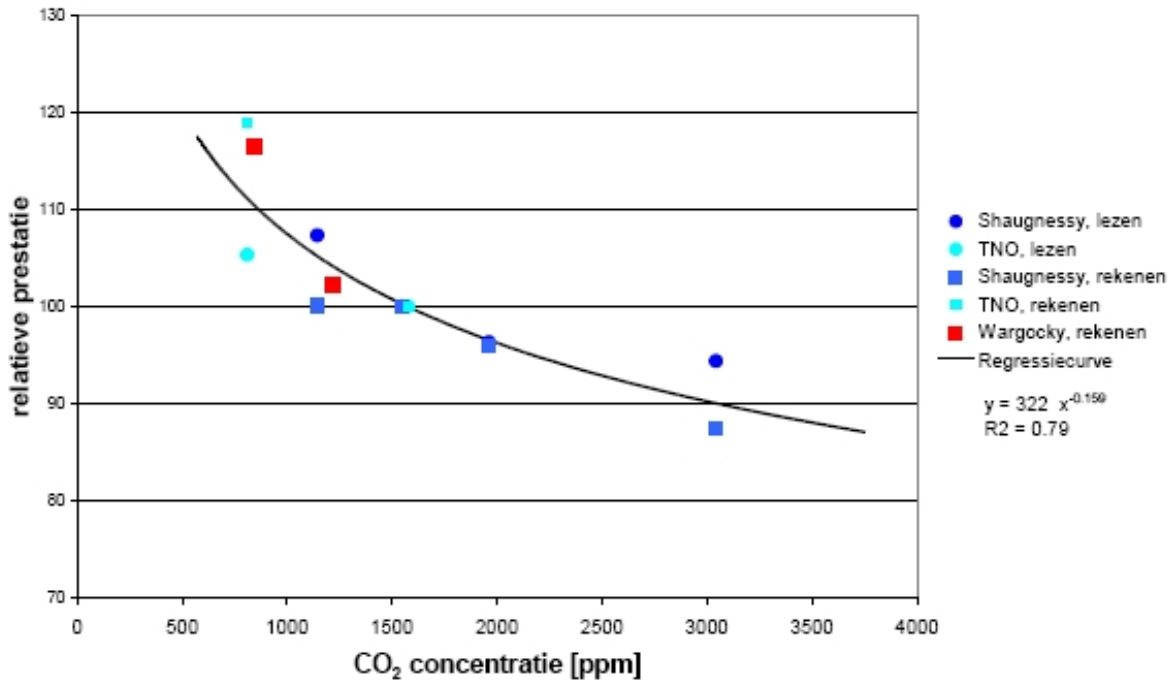
$$P = \text{motivatie} \cdot \text{mogelijkheid} \cdot \text{gelegenheid} \quad (1)$$

Of, in tekst, dient een werknemer een taak te willen uitvoeren en de taak moet mogelijkerwijs uitvoerbaar zijn. Hiernaast dienen voorzieningen aanwezig te zijn om de taak uit te kunnen voeren. In dezen is de motivatie de belangrijkste factor. De motivatie wordt namelijk onder andere beïnvloed door het fysische en sociale milieu, waarin het gebouw voorziet. De omgeving bepaalt de zintuigwaarneming van de mens, die op zijn beurt de arbeidsproductiviteit bepaalt. Er zijn vele andere factoren die de motivatie beïnvloeden en nog meer wisselwerkingen hiertussen, maar hier wordt verder niet op ingegaan.

Volgens Leaman & Bordass (2005) wordt de arbeidsproductiviteit ingevolge het binnenmilieu hoofdzakelijk bepaald door drie klimaatgerelateerde parameters, te weten comfort, responstijd van het klimaatsysteem en het type ventilatie, waarin ook het gebouwontwerp een rol speelt. In deze paragraaf wordt allereerst de relatie tussen prestatie en de optimale CO<sub>2</sub>-concentratie beschreven. Vervolgens wordt de specifiekere perceptie van het klimaat besproken, waaruit het Fanger-model volgt. Ten slotte worden zowel de begrippen adaptieve thermische behaaglijkheid en draught rate geïntroduceerd.

## 2.4.1 CO<sub>2</sub>-concentratie

Zoals vermeld ligt de schadelijkheidsgrens van CO<sub>2</sub> op een in de praktijk niet voorkomend niveau. In de afgelopen twee decennia heeft veel onderzoek plaatsgevonden naar de relatie tussen luchtkwaliteit en prestatie. In een literatuuronderzoek in Nederland en België door Jacobs et al. (2007) wordt een drietal vooraanstaande onderzoeken (Shaughnessy (2006), TNO (De Gids, 2007) en Wargocki et al., (2005)) op dit gebied met elkaar vergeleken. De onderzoeken zetten de relatieve lees- en/of rekenprestatie op scholen uit tegen de CO<sub>2</sub>-concentratie in de lucht. Door deze onderzoeken te integreren in een grafiek, volgt figuur 2. De 'normale prestatie' (= 100%) is hierbij gedefinieerd als het aantal fouten dat de scholieren maken onder normaal oplopende CO<sub>2</sub>-concentraties. Deze waarde is echter met een gemiddelde van 1563 ppm aan de hoge kant. De gangbare grenswaarde op scholen is 1200 ppm, waarbij de grafiek 104% zou aangeven.

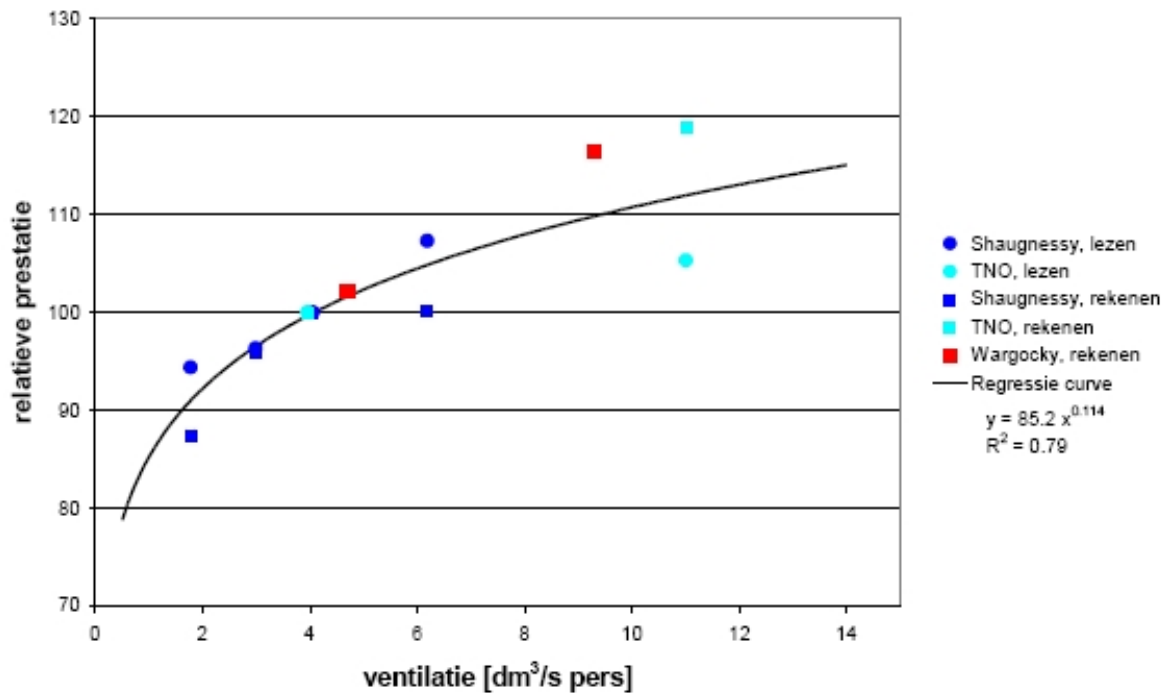


Figuur 2: Relatieve prestatie als functie van de CO<sub>2</sub>-concentratie (Jacobs et al. 2007)

De grafiek toont duidelijk aan dat de drie studies nauw overeenkomen, wat volgens Jacobs et al. (2007) voldoende bewijs levert dat de CO<sub>2</sub>-concentratie in de binnenlucht de prestatie beïnvloedt. Tevens kan verondersteld worden dat zelfs onder de 600 ppm nog altijd een forse verbetering in prestatie te realiseren is.

De drie onderzoeken richtten zich bovendien op de relatie tussen relatieve prestatie en ventilatiedebiet, waarvan de geïntegreerde resultaten zijn weergegeven in figuur 3. Ook dit figuur toont een direct verband tussen de hoeveelheid ventilatie en de relatieve prestatie op lees- en rekentoetsen. Het Bouwbesluit 2012 geeft een minimale ventilatiecapaciteit van 6,5 dm<sup>3</sup>/s. Uit figuur 3 valt af te leiden dat dit inderdaad het meeste resultaat boekt. Boven deze waarde is nog wel aanzienlijk terrein te winnen, maar blijkt minder effectief. Er valt echter geen maximale prestatie (rc = 0) af te leiden uit de grafiek, wat betekent dat een optimale luchtverversing boven 15 dm<sup>3</sup>/s ligt. Deze grafiek laat echter ongeveer dezelfde trend zien als die in figuur 2, waaruit volgt dat dit verband niet zozeer aan de ventilatie ligt, dan wel aan de verlaagde CO<sub>2</sub>-concentratie bij een hoger ventilatiedebiet.

Gedurende dit onderzoek kan dan ook geen optimale CO<sub>2</sub>-concentratie worden aangewezen, waaruit volgt dat de richtwaarde 'zo laag mogelijk' dient te zijn, doch hoger dan buitenluchtconcentratie (> 450 ppm).



Figuur 3: Relatieve prestatie als functie van het ventilatiedebiet (Jacobs et al. 2007)

## 2.4.2 Thermische perceptie

Omdat in dit onderzoek de werknemers centraal staan, is de absolute CO<sub>2</sub>-bepaling slechts een hulpmiddel om te bepalen of men zich behaaglijk voelt op de werkplaats. Uiteindelijk is de waargenomen luchtkwaliteit de belangrijkste waarde.

Tot de jaren '70 werden echter slechts statische getallen aangehouden voor luchtkwaliteit. Daarna begon Rijksgebouwendienst normen op te stellen voor uitgangspunten voor binnenklimaat condities in nieuwbouw met kantoorfunctie, gebaseerd op Fanger's methode.

## 2.4.3 Fanger

De Fanger-methode is ontworpen om de tevredenheid van de gebouwgebruikers over het klimaat te voorspellen. Het model simuleert het stemmen van de gebouwgebruikers op de zevenpuntsschaal (van koud naar heet) van thermische sensatie of voorkeur op basis van de warmtebalans over het menselijk lichaam, waarvan het gemiddelde wordt genomen (PMV; predicted mean vote). Uit dezelfde simulatie kan tevens het percentage ontevreden worden berekend (PPD; predicted percentage dissatisfied). De index PMV/PPD vormt vervolgens een tevredenheidspercentage. Aangetoond is dat het best haalbare resultaat 95% tevredenheid oplevert, hoewel dit in praktijk extreme maatregelen vergt. Veelal wordt naar het domein  $-0,5 < PMV < 0,5$  op de zevenpuntsschaal gestreefd, wat tot 80% tevredenheid wordt geplot. Over het algemeen wordt aangehouden dat gedurende 10% van de gebruiksduur van een gebouw het klimaat ontoereikend mag zijn ( $-1 < PMV < 1$ ), echter alleen onder extreme omstandigheden (hittegolven of defecte klimaatsystemen). Deze methode staat beschreven in de NEN-EN-ISO 7730, hoewel deze  $-2 < PMV < 2$  zelfs als acceptabel beschouwt.

Een veel gebruikte manier om PMV en PPD te berekenen is middels Visual Basic-programmeertaal. In het model wordt de warmtebalans opgesteld aan de hand van zes parameters. Met de index en vijf bekende parameters kan dus de zesde bepaald worden. Voor een kantoorfunctie gelden de gemiddelden:

Activiteitenniveau (metabolisme)		1.2 met (= 69,6 W/m <sup>2</sup> )
Kleding (isolatie)	winter	1,0 clo (R = 0.155 m <sup>2</sup> K/W)
	zomer	0,4 clo
Stralingstemperatuur	winter	binnenlucht temperatuur – 2°C
	zomer	binnenlucht temperatuur + 2°C
Luchtsnelheid	winter	0,15 m/s
	zomer	0,25 m/s
Luchtvochtigheid		50%
Temperatuur	winter	20 – 24°C
	zomer	23 – 26°C

Op basis hiervan publiceerde de Rijksgebouwendienst in 1991 een ontwikkelde methode waarmee het binnenklimaat accurater kon worden geschat door middel van 'temperatuur overschrijdingstijd'. Hierbij mocht de binnentemperatuur niet langer dan honderd uur per jaar boven 25°C uitkomen en maximaal 10-20 uur boven 28°C. Tot op heden is dit de meest gebruikte bepalingmethode voor het binnenklimaat. Gebrekkig aan deze methode is echter dat de bepaling berust op een gemiddelde, die 'slechts' maximaal 95% tevreden stelt. Bovendien werden de resultaten in een statisch milieu gemeten, terwijl deze in werkelijkheid veel dynamiek vertoont. Zeker in combinatie met persoonlijke voorkeuren, bleek de daadwerkelijke gevoelstemperatuur hier aanmerkelijk ver naast te zitten.

Belangrijk hierbij is zodoende het gedrag van de gebouwgebruikers. Opvallend is dat personen in een hoofdzakelijk natuurlijk geventileerd gebouw waarbij ze bovendien zelf de mate van ventilatie grotendeels kunnen bepalen (alfa-type gebouw), zich volgens De Dear & Brager (1998) actiever bezighouden met het regelen van de persoonlijke temperatuur middels kleding en metabolisme in verhouding tot personen in een kunstmatig geklimatiseerde omgeving (bèta-type gebouw). Middels de tabel in bijlage III (Voskamp et al. 2010) kan worden bepaald welk gebouwtype gehanteerd dient te worden. Dit betekent dat de breedte van de comfort-zone op basis van temperatuur en tocht bij laatstgenoemde groep kleiner is. Conclusie hierbij is dat er rekening gehouden moet worden met twee comfortzones. Met name wanneer de externe temperatuur hoog is, worden binnen alfagebouwen aanzienlijk hogere temperaturen geaccepteerd dan Fanger's model berekent. Uit een onderzoek van Araujo & Araujo (1999) is gebleken dat personen in een alfagebouw een buffer van 4,9°C acceptabel vinden, waar dit in bètagebouwen slechts 2,4°C beslaat. Bovendien voelt men zich algeheel comfortabeler in een alfagebouw. Hieruit volgt dat er voor beide type gebouwen een verschillende behaaglijkheid bepalingmethode gebruikt behoort te worden. Fanger's model met de PMV-methode leent zich vrij goed voor centraal geventileerde gebouwen, maar gaat minder op voor natuurlijk geventileerde gebouwen. Veel Nederlandse gebouwen hebben een combinatie van beide: natuurlijke en mechanische ventilatiemogelijkheden. Hierin blijkt Fanger onvoldoende inzicht te bieden.

Fanger baseert zich op gesloten, statische klimaten, terwijl het klimaat in werkelijke gebouwen continu varieert en bovendien wordt de perceptie van het binnenklimaat zodoende beïnvloed door additionele factoren, waarmee het Fanger-model geen rekening houdt. De dynamiek in thermische perceptie vanwege verwachtingspatronen, gebaseerd op de buitentemperatuur en op die van voorgaande dagen blijkt een belangrijke factor te zijn.

Nieuwe methoden, waarmee de zogenoemde adaptieve thermische behaaglijkheid bepaald kan worden, werden ontwikkeld door onder andere De Dear & Brager. Deze worden beschreven in Arets et al. (2004).

#### 2.4.4 Adaptieve thermische behaaglijkheid

De nieuwe modellen baseren zich op het feit dat de mens zich dusdanig aanpast bij veranderende omstandigheden dat hun comfort hersteld wordt. Volgens de Dear et al. (1997) zijn de drie vormen van adaptatie gedragsmatig (kleding, beïnvloeding klimaat of andere werkuren), fysiologisch (lichaamsregulering of genetische verandering) en psychologisch (ervaringen en verwachtingen).

#### 2.4.5 Metabolisme

Het metabolisme is hoofdzakelijk een fysiologisch verschijnsel, maar kan tevens uitgelegd worden als een (onbewuste) gedragsadaptatie. Uit onderzoek van De Dear & Brager (1997) is echter gebleken dat het metabolisme bij variërende binnentemperaturen onder normale omstandigheden gelijk blijft aan  $M = 1,2$  met (lichte activiteit), waarbij de eenheid 'met' wordt gedefinieerd als de warmteproductie



van de mens in rust, per m<sup>2</sup> huidoppervlak (1 met = 58,2 Watt). Een gemiddeld persoon heeft een huidoppervlak van  $A = 1,7 \text{ m}^2$ , wat onder lichte activiteit neerkomt op  $1,2 \text{ met} \cdot 58,2 \text{ W/m}^2 \cdot 1,7 \text{ m}^2 \approx 120 \text{ W}$ . Het daadwerkelijk stralingsoppervlak is echter kleiner wanneer men zit. Door de houding te veranderen kan de warmteafgifte worden gereguleerd.

Wanneer de warmteproductie en –ontvangst gelijk is aan de warmteafgifte van het lichaam, bevindt de persoon zich in homeostase.

#### **2.4.6 Kledingisolatie**

Kleding speelt zoals gezegd een rol bij de gedragsadaptatie. Een eenheid is in het leven geroepen om de mate van kledingisolatie uit te drukken. Hierbij komt 1 clo neer op een warmteweerstand  $R$  van  $0,155 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Dit is de mate van isolatie waarmee een persoon met een driedelig pak, in rust het thermisch evenwicht bereikt bij een omgevingstemperatuur van  $21^\circ\text{C}$  en een luchtsnelheid van  $10 \text{ cm/s}$ .

#### **2.4.7 Luchtsnelheid**

Evenals de Fanger-methode, wordt de behaaglijkheid van de ventilatievoorziening gekwantificeerd naar geschatte tevredenheid. De draught rate (DR; of draft rate) geeft het aantal ontevreden procentueel aan. In de NEN-EN-ISO 7730 wordt een  $\text{DR} < 15\%$  acceptabel genoemd.

### **2.5 Energieprestatie**

In dit project is de samenhang tussen het verhogen van de binnenluchtkwaliteit ten behoeve van de arbeidsproductiviteit en het energieverbruik van belang. Het minimale niveau op het gebied van energieverbruik waaraan een gebouw moet voldoen is vastgelegd in de 'energieprestatiecoëfficiënt' (EPC). De 'energieprestatie gebouwen' (EPG) beschrijft de methode waarmee de EPC van een gebouw bepaald kan worden.

#### **2.5.1 Energieprestatiecoëfficiënt**

In 1995 is de EPC in Nederland geïntroduceerd. Het doel hiervan is om de CO<sub>2</sub>-uitstoot die gepaard gaat met de gebruiksfase van gebouwen te beperken. Bovendien maakt het de gebouwenmarkt eerlijker door middel van een energieprestatiecertificaat die overhandigd kan worden bij een transactie. De coëfficiënt is een index die de efficiëntie van een gebouw weergeeft met betrekking tot het energieverbruik gedurende de gebruiksfase, waarbij  $\text{EPC} = 0$  staat voor een gebouw dat geen energie verbruikt en een negatief getal voor energieleverende gebouwen. Voor nieuwe utiliteitsgebouwen geldt een maximale EPC van 1,1.

#### **2.5.2 Energieprestatie gebouwen**

Momenteel wordt de energieprestatie van woningen en utiliteitsbouw op gescheiden wijze gedaan. Hiervoor zijn dan ook twee protocollen, respectievelijk ISSO 82 en ISSO 75 voor bestaande bouw. Ook nieuwbouw wordt op een separate wijze beoordeeld, waardoor nog eens twee protocollen nodig zijn, voor woningen en utiliteit respectievelijk NEN 5182 en NEN 2916.

In het nieuwe Bouwbesluit van kracht per 1 april 2012, zijn ook nieuwe Europese normen opgenomen. Een hiervan is de energieprestatiebepaling. Deze zal in het Bouwbesluit uitgevoerd dienen te worden conform NEN 7120, waarin de vier bovengenoemde protocollen geïntegreerd zijn tot de 'energieprestatie gebouwen' (EPG). Samenhangend met de EPG zijn ook de NVN 7125 (energieprestatienorm voor maatregelen op gebiedsniveau; EMG) en de NEN 8088-1 (ventilatiernorm) gepubliceerd. In het eerste kwartaal na ingang van het nieuwe bouwbesluit (t/m 30 juni) is de overgangsfase van de oude normeringen naar de EPG, waarin beide bepalingmethoden gebruikt mogen worden (NEN 7120, 2011).

Om de bepalingmethode eenvoudiger te maken zijn er softwarepakketten ontwikkeld door marktpartijen, waarin slechts de gebouwspecificaties ingevoerd hoeven te worden. Het programma voert de berekeningen uit en geeft de resultaten overzichtelijk weer. Zo is ENORM van DGMR tot 1 april gratis te gebruiken en tot 1 juli is ook de software Uniec2.0 gratis. Binnen SIA wordt gebruik gemaakt van Dywag EPC, waarvan de overgangsupdate (Dywag EPG) momenteel in ontwikkeling is. De eerste pilotversies worden begin april verwacht, versie 1 op 1 juli.

### 3 Comfort en arbeidsproductiviteit

Dit hoofdstuk bevat de resultaten en conclusies van de literatuurstudie waarmee de relatie tussen arbeidsproductiviteit en luchtkwaliteit bepaald wordt. Omdat dit onderzoek de doelstelling heeft om gebouwgebruikers optimaal te laten presteren ten gevolge van het binnenklimaat, is het van belang de werknemers te beschouwen zoals ze zijn; individuen met een eigen, persoonsgebonden comfortniveau, en niet langer als een statische groep die een bepaald bereik van een set parameters als behaaglijk beschouwt.

De werkwijze om tot een ontwerp te komen dat een optimaal comfort biedt, dient zich dan ook te richten op het persoonsgebonden en dynamische deel van de vergelijking, wat hoofdzakelijk met de thermische behaaglijkheid van doen heeft. Zodoende wordt de comfortbuffer per parameter zo groot mogelijk gemaakt. Vervolgens is het van belang het klimaat te optimaliseren, door het klimaat tot binnen deze buffers te reguleren. In dit hoofdstuk wordt allereerst de thermische behaaglijkheid geoptimaliseerd voor een vergrote comfortzone, waarna de regulatie hiervan en van de lucht en het vochtgehalte volgen. Hierbij komt tevens de samenhang met arbeidsproductiviteit terug. De uiteindelijke ontwerpisen die volgen uit de theorie teneinde een arbeidsproductief gebouw te verkrijgen worden samengevat in de laatste paragraaf.

#### 3.1 Thermische behaaglijkheid

Omdat uit diverse onderzoeken naar statische klimaten is gebleken dat met de Fanger-methode een maximale tevredenheid van 95% ( $PMV = 0$ ) te bereiken is, zij het met extreme klimaatsystemen, kan geconcludeerd worden dat de overige vijf procent niet te waarderen is in een dergelijk gesloten klimaat en dat een alfagebouw met minder energie-intensieve ventilatie wel maximaal kan scoren. Bovendien wordt met Fanger meestal een acceptatiegrens berekend ( $-0,5 < PMV < 0,5$ ), waarbij slechts 80% aangeeft tevreden te zijn.

Allereerst worden de parameters die van invloed zijn op de persoonlijke, thermische perceptie beschreven. Hiervan wordt vervolgens het bereik vastgesteld waarin het groepscomfortniveau maximaal is ( $PMV = 0$ ). Dit aan de hand van een onderzoek door De Dear & Brager (1998), waarin de verschillen in thermische beleving tussen 44 alfa- en 109 bètagebouwen worden beschreven.

##### 3.1.1 Adaptatie

De verschillen in de klimaatperceptie worden volgens de Dear et al. (1997) veroorzaakt door een aantal variabelen die onder drie noemers te vatten is, te weten fysiologische, gedrags- en psychologische adaptatie.

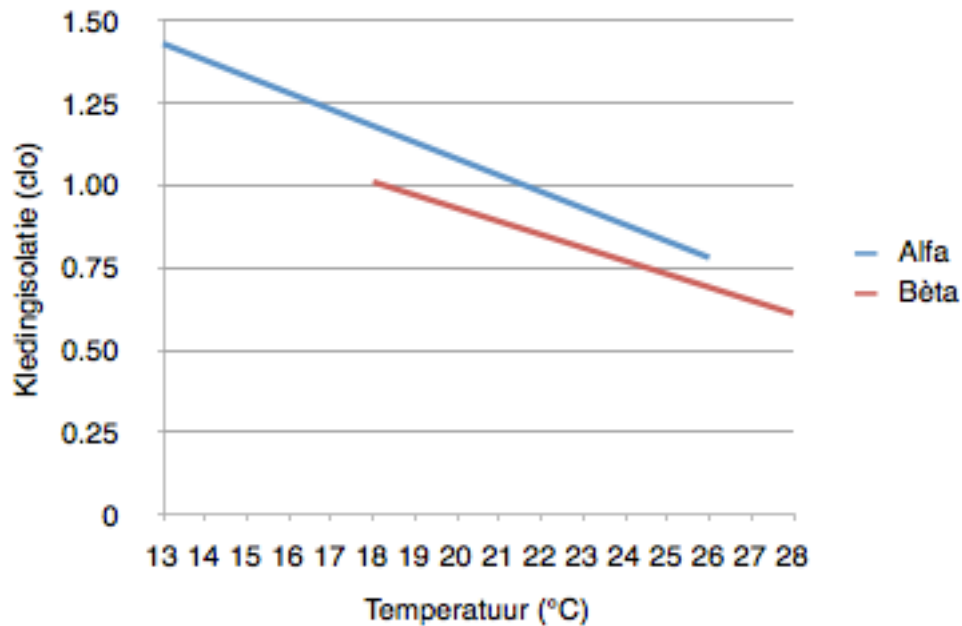
###### 3.1.1.1 Fysiologische adaptatie

Genetica bepaalt in grote mate welk bereik een individu als behaaglijk ervaart, door bijvoorbeeld lichaamsbouw en metabolisme en transpiratie. Ook beschikt het menselijk lichaam over de capaciteit zich in bepaalde mate te acclimatiseren aan een klimaat waaraan het gedurende een langere periode wordt blootgesteld. Deze vorm van adaptatie is onbewust en kan dan ook niet of nauwelijks beïnvloed worden.

###### 3.1.1.2 Gedragsadaptatie

Bewuste gedragsadaptatie is daarentegen het gemakkelijkst te beïnvloeden. Door actief bezig te zijn met het klimaat kan een gebouwgebruiker in grote mate de eigen behaaglijkheid bepalen, met behulp van onder andere kleding en het openen van ramen. Hierdoor kan een individu een groter bereik van de variabelen verdragen. Een onbewuste reactie om het gevoel te reguleren is bijvoorbeeld door het metabolisme aan te passen.

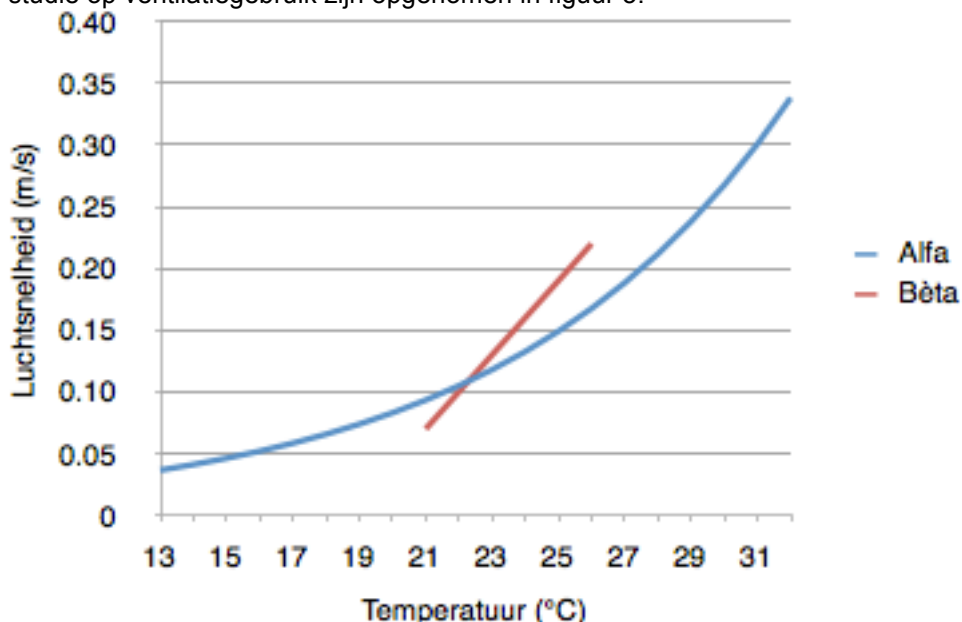
In De Dear & Brager (1998) is onder andere onderzoek gedaan naar de verschillen in gedragsadaptatie. De belangrijkste vorm hiervan bleek de persoonlijke isolatie. Afhankelijk van de temperatuur werd de hoeveelheid kleding (inclusief de stoel) gevarieerd door de gebouwgebruikers. De resultaten zijn weergegeven in figuur 4.



Figuur 4: Vergelijking van gedragsadaptatie middels kleding in alfa- en bètagebouwen, afhankelijk van binnentemperatuur (De Dear & Brager, 1998)

Een bètagebouw heeft een kleiner waargenomen temperatuurdomein, omdat temperaturen < 18°C normaliter niet voorkomen onder dergelijk strikt gereguleerde gebouwen. Kanttekening bij de figuur is dat de variantie in het geval van bètagebouwen groter is, waaruit geconcludeerd kan worden dat personen in een alfagebouw zich actiever bezig houden met het binnenklimaat. Gemiddeld past de gebruiker van een natuurlijk geventileerd gebouw de kleding aan met 0,05 clo per graad temperatuurverschil, waar dit 0,04 clo per graad is in een bètagebouw.

Een andere vorm van gedragsadaptatie is middels het gebruik van ventilatie. De resultaten van de studie op ventilatiegebruik zijn opgenomen in figuur 5.



Figuur 5: Vergelijking van gedragsadaptatie middels luchtsnelheid in alfa- en bètagebouwen, afhankelijk van binnentemperatuur (De Dear & Brager, 1998)

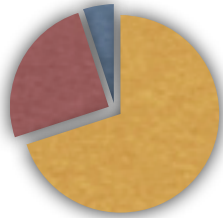
In bètagebouwen is de ventilatie meestal centraal gereguleerd en geeft zodoende geen psychologisch gevoel van behagen. Wel is in dit type gebouwen de luchtsnelheid in hoge mate regelbaar. Wanneer alleen de temperatuur als parameter wordt gezien, wordt pas geventileerd boven de behaaglijkheidsgrens van 21°C en de luchtsnelheden komen meestal niet boven 0,2 m/s conform

Bouwbesluit. Vanwege de goede regelbaarheid van een gesloten klimaat is het domein van waargenomen temperaturen klein. In een alfagebouw daarentegen is de regelbaarheid aanzienlijk minder, maar het comfortbereik hoger. Bij hogere temperaturen zijn ook hogere luchtsnelheden gewenst. Bij een binnentemperatuur > 26°C (drempelwaarde comforttemperatuur) zijn luchtsnelheden boven de drempelwaarde van behaaglijke luchtsnelheid (0,2 m/s) waargenomen.

### 3.1.1.3 Psychologische adaptatie

De moderne mens creëert onbewust een verwachting van het weer, op basis uiteraard van het weerbericht, maar vooral ook de drie voorgaande dagen blijken een rol te spelen. Belangrijkste conclusie hieruit is dat men binnen een lagere temperatuur accepteert als het buiten relatief koud is en vice versa. De psychologische adaptatie is, zo blijkt uit recente studies (De Dear & Brager 1998), een zeer belangrijk aspect bij het optimaliseren van de klimaatperceptie. Door gebouwgebruikers zelf de mogelijkheid te geven tot het regelen van het klimaat, zijn deze actiever met het klimaat bezig en passen ze in de praktijk vaker hun gedrag aan het klimaat aan. De thermische perceptie verandert positief, wat vooral kan worden toegeschreven aan een psychologische parameter.

Omdat in de Fanger-methode wel rekening werd gehouden met klimaatregulatie en gedragsadaptatie maar niet met psychologische adaptatie, kan uit het dynamisch deel van de behaaglijkheidsbepaling worden geconcludeerd dat de overige 5% van de PMV-bepaling wordt vertegenwoordigd door de psychologische invloed (figuur 6).



- Regulatie
- Gedragsadaptatie
- Psychologische adaptatie

*Figuur 6: Indicatieve vertegenwoordiging van de invloeden op PMV*

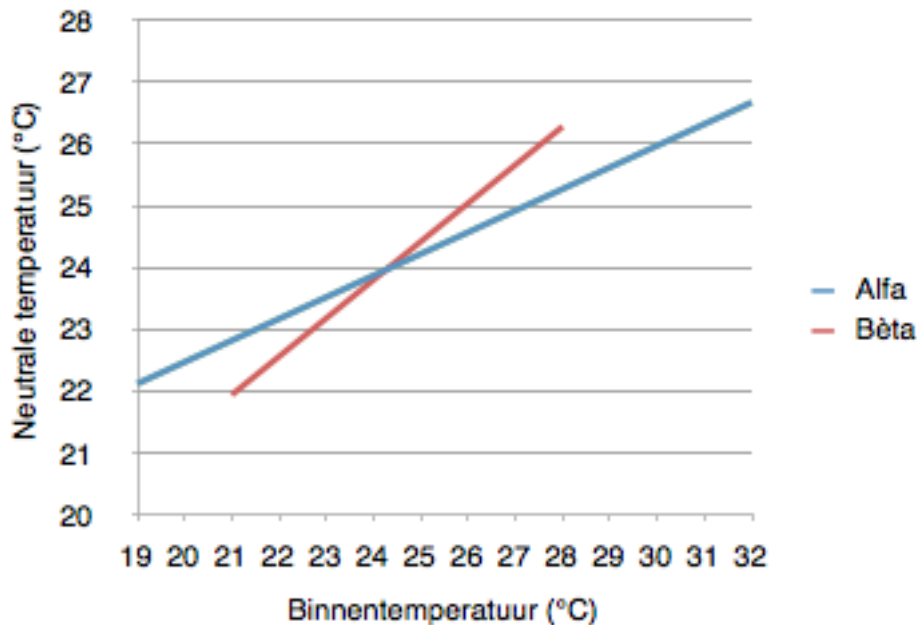
Deze psychologische factor kan worden gemaximaliseerd door de gebruikers het gevoel te geven dat ze het klimaat zelf kunnen beïnvloeden.

## 3.1.2 Specifieke behaaglijkheidstemperaturen

In deze paragraaf worden de optimale waarden voor thermische behaaglijkheid bepaald, hoofdzakelijk aan de hand van onderzoek door De Dear & Brager (1998). De gevonden waarden zullen worden nagestreefd in dit project.

### 3.1.2.1 Neutrale temperatuur

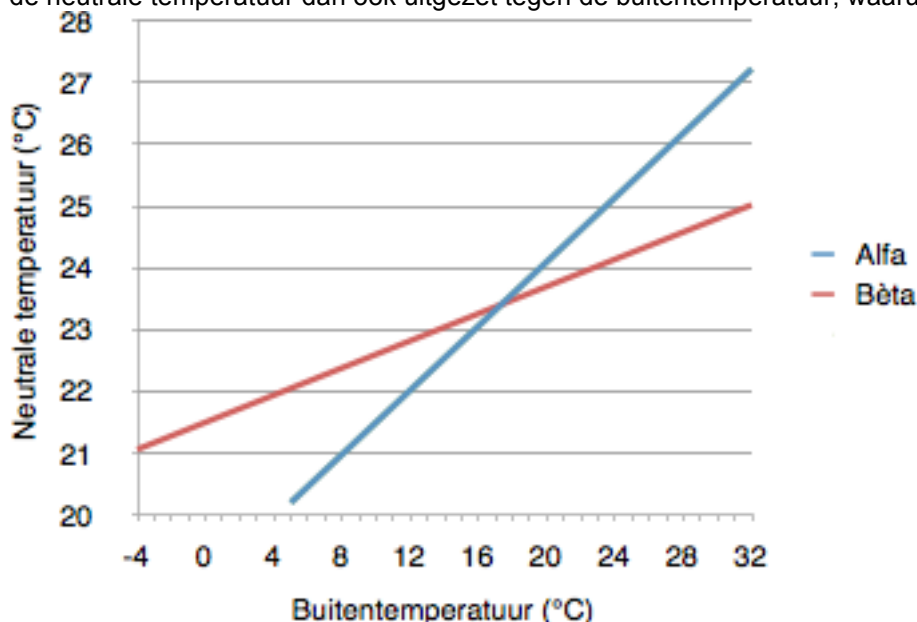
In het onderzoek van De Dear & Brager (1998) werd per halve graad Kelvin temperatuurstijging, de verandering in thermische beleving geanalyseerd. Hieruit werd direct geconcludeerd dat gebruikers van een bètagebouw tweemaal zo gevoelig voor temperatuurschommelingen waren als die van een alfagebouw. Vervolgens werd een lineaire regressie gemaakt van de relatie tussen binnentemperatuur (x-waarde) en de beleving hiervan (y-waarde). Door deze op te lossen voor  $y = 0$  (homeostase; neutrale sensatie), waarbij de warmteafgifte gelijk is aan de warmteproductie en -opname van het lichaam, is de neutrale temperatuur afhankelijk van de binnentemperatuur bepaald (figuur 7).



*Figuur 7: Vergelijking tussen alfa- en bètagebouwen van neutrale sensatietemperatuur, afhankelijk van de binnentemperatuur (De Dear & Brager, 1998)*

Hieruit volgt dat de neutrale temperatuur boven de binnentemperatuur ligt bij lagere temperaturen en andersom. Wanneer in een alfagebouw de temperatuur bijvoorbeeld 19°C is, ligt de neutraliteit rond 22°C, maar als deze temperatuur eenmaal gehaald is, ligt de neutraliteit weer ruim een graad hoger. De neutrale temperatuur is ongeveer gelijk aan de binnentemperatuur rond 24°C in beide bouwtypen.

Het idee achter adaptieve behaaglijkheid is dat de huidige en voorafgaande buitentemperatuur de sensatie van het binnenklimaat (neutrale temperatuur) beïnvloedt. De Dear & Brager (1998) hebben de neutrale temperatuur dan ook uitgezet tegen de buitentemperatuur, waaruit figuur 8 volgt.

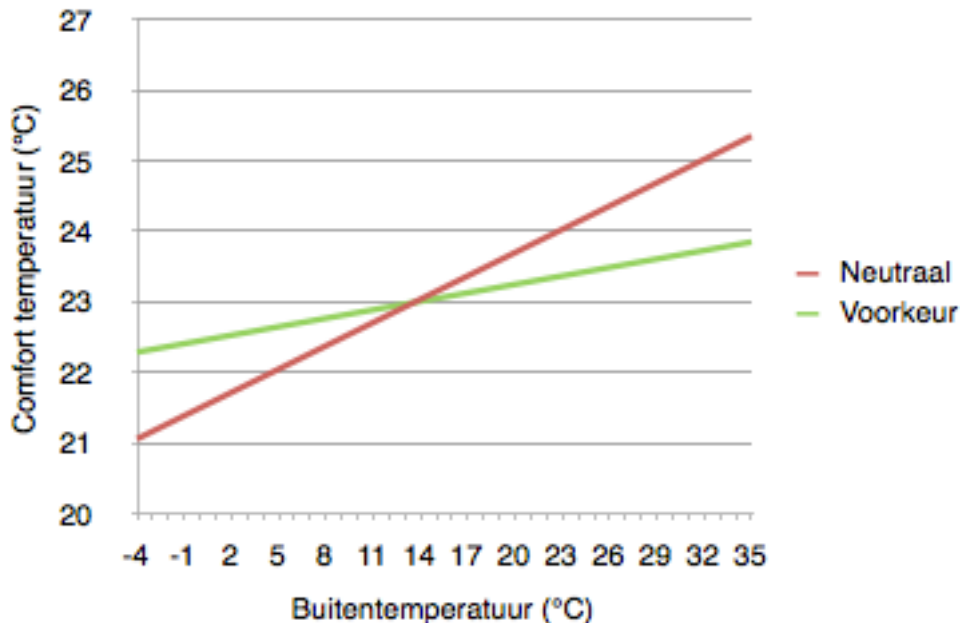


*Figuur 8: Vergelijking tussen alfa- en bètagebouwen van neutrale sensatietemperatuur, afhankelijk van de buitentemperatuur (De Dear & Brager, 1998)*

In deze figuur wordt inderdaad correlatie gevonden tussen de buitentemperatuur en de neutrale sensatietemperatuur. Ook hierin komt terug dat het temperatuurdomein van behaaglijkheid in het geval van alfagebouwen (20 – 27°C) groter is dan bij bètagebouwen (21 – 25°C).

### 3.1.2.2 Voorkeurstemperatuur

Uiteindelijk draait dit project om een maximale arbeidsproductiviteit te faciliteren middels het binnenklimaat. Het feit dat de gebruikers zich in homeostase bevinden is echter geen garantie dat men een maximale behaaglijkheid beleeft, laat staan een optimale productiviteit. De data van de 153 onderzochte gebouwen bevatten in een aantal gevallen ook gegevens van voorkeurstemperaturen. Deze werden vergeleken met de neutraliteitstemperatuur in beide bouwtypen, waarbij de verwachting was dat gebruikers een iets hogere temperatuur dan neutraal prefereren bij een kouder buitenklimaat en andersom.



Figuur 9: Vergelijking tussen neutrale en voorkeurstemperaturen in bètagebouwen, afhankelijk van buitemtemperatuur (De Dear & Brager, 1998)

Alleen in bètagebouwen kon dit verband worden aangetoond. Wanneer de buitemtemperatuur 0°C is, blijkt de voorkeurstemperatuur bijna een graad boven de neutrale temperatuur te liggen, zoals te zien is in figuur 9. Bij 28°C ligt de voorkeur juist een graad onder de neutrale temperatuur. Deze voorkeurstemperatuur geeft een betere definitie van optimale condities dan de neutrale temperaturen en ligt bij benadering over de hele lijn van buitemtemperaturen rond 23°C.

### 3.1.3 Microklimaat

Uit subparagraaf 3.1.1 is geconcludeerd dat persoonlijke invloed een grote rol speelt in het welbevinden van de werknemers. In combinatie met de conclusie uit paragraaf 3.1.2, dat een alfagebouw in grotere behaaglijkheidsdomeinen voor met name de temperatuurparameter resulteert, kan worden gesteld dat het optimale ontwerpscenario bestaat uit een alfagebouw met ramen die individueel gebruikt kunnen worden.

Dit type gebouw is echter niet eenvoudig te gebruiken. De werkplekken dienen dusdanig ontworpen te zijn, dat het openen van gevelopeningen uitwerking heeft op individueel niveau en anderen niet hindert. Bovendien is het door bijvoorbeeld lage buitemperaturen, hoge windsnelheden of geluidsoverlast niet altijd wenselijk om ramen te openen. Dit probleem kan omzeild worden door een bètagebouw met een macroklimaatstelsel (collectief) te ontwerpen in combinatie met een microklimaatstelsel (individueel). Dit sluit het gebruik van ramen niet per definitie uit, wanneer de relevante parameters van de buitenlucht dichtbij het comfortniveau liggen, gezien de vergroting van het comfortbereik door natuurlijker omstandigheden. Zo kan er gekozen worden voor:

- Macro- en microklimaatssystemen ingeschakeld

Hiermee wordt op gecontroleerde wijze een alfaklimaat nagebootst en is nodig wanneer de buiten- en optimale productiviteitstemperatuur ver uit elkaar liggen.

- Alleen microklimaatstelsel ingeschakeld in combinatie met geopende ramen

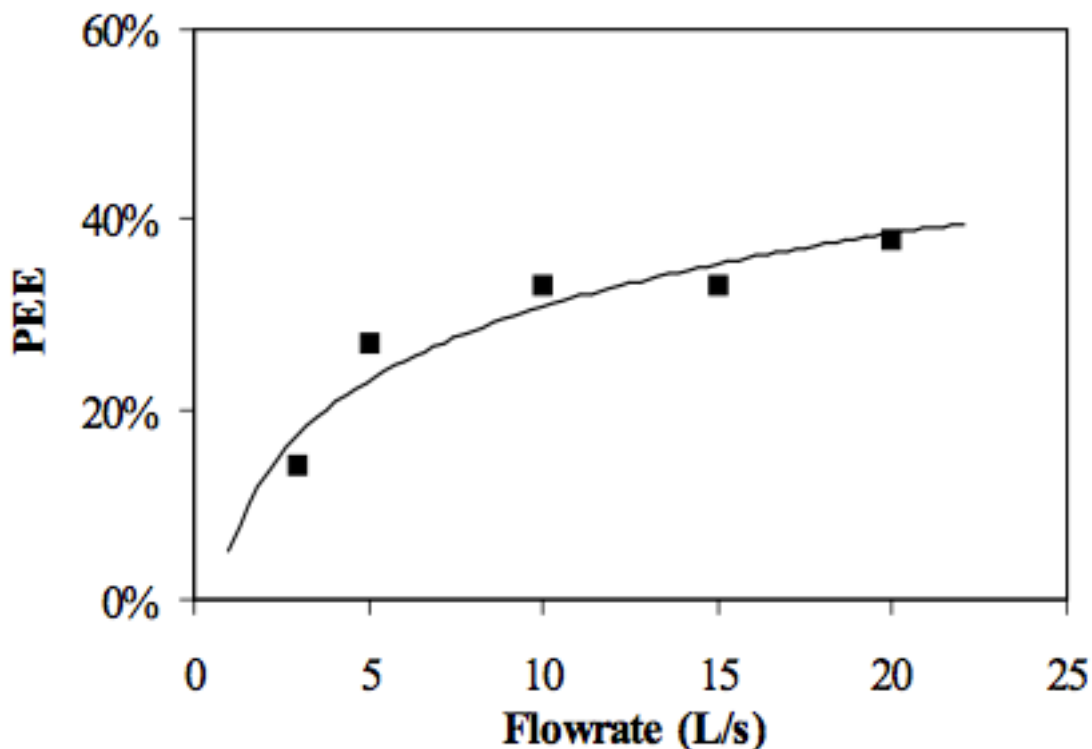
Op deze manier wordt (geconditioneerde) lucht ingeblazen middels het PV-systeem. Het drukverschil dat hierdoor ontstaat veroorzaakt exfiltratie via de ramen. Op deze manier wordt het energie-

intensieve, centrale klimaatsysteem ontlast, maar is alleen mogelijk wanneer de optimale temperatuur en buitentemperatuur bijeen liggen.

Ton Branderhorst van i-Climate is een autoriteit op het gebied van microklimaatsystemen: op het moment van schrijven is hij de enige ondernemer in Nederland met een microklimaatsysteem dat op de markt is gebracht. Met behulp van de door hem ontwikkelde i-Climate kan de gebruiker zijn persoonlijke microklimaat instellen, waarmee het percentage ontevreden en aanzienlijk slinkt.

In iedere ruimte dient de temperatuur centraal geregeld te worden tot de gemiddeld optimale temperatuur afhankelijk van de buitentemperatuur. Hiernaast wordt de i-Climate ingezet om verse lucht aan te voeren op werkplekniveau en bovendien de persoonsgebonden temperatuurvoorkeur te regelen door middel van warmte- of koudestraling op het lichaam, of koeling middels verhoogde inblaassnelheden. De warmte en koude wordt geleverd middels een water-warmtewisselaar. Voor optimale productiviteit wordt de warmte op de romp en op de handen afgegeven, welke iets warmer dienen te zijn dan de rest van het lichaam volgens Wyon (2000). Voor de koeling- en verwarmingscapaciteit van de i-Climate wordt verwezen naar bijlage IV (Branderhorst, T., 2012b). Hierin is  $\Delta T$  het verschil tussen de ruimtetemperatuur en de gemiddelde temperatuur van de aan- en afvoerstream van het water.

Volgens Branderhorst (2012a) is een individuele temperatuur regeling van  $\pm 3^\circ\text{C}$  te realiseren. Meer is in de praktijk ook niet gewenst, omdat hierdoor storende temperatuurgradiënten op het lichaam kunnen ontstaan volgens Olesen et al. (1979). De ingeblazen lucht wordt gericht en bovendien naar vraag ingeblazen, waardoor de inblaassnelheden veelal relatief laag zijn. Het totale debiet over het geheel van kantoren wordt daarmee drastisch verlaagd omdat niet het hele kantoor geventileerd hoeft te worden. Bovenop de verbetering in arbeidsproductiviteit levert dit zodoende een energiebesparing op. Wel dient hierbij opgemerkt te worden dat de leveringseffectiviteit van de ingeblazen lucht volgens figuur 10 (Yang et al. 2003) op een krappe 40% ligt bij een toevoer van  $20 \text{ dm}^3/\text{s}$ . De i-Climate is echter 9 jaar na dit onderzoek ontwikkeld waardoor met dank aan verbeteringen in de techniek het maximale inblaasdebiet verlaagd kon worden tot  $10 \text{ dm}^3/\text{s}$ , zonder aan effectiviteit in te leveren. Bij een conventioneel, centraal ventilatiesysteem komt slechts 1% van de verse lucht in de longen terecht.



Figuur 10: Persoonlijke blootstellingseffectiviteit aan buitenlucht (personal exposure effectiveness; PEE) (Yang et al. 2003)

## 3.2 Kwantificatie arbeidsproductiviteit

De arbeidsproductiviteit kan volgens Dorgan & Dorgan (1999) worden gekwantificeerd door de hoeveelheid werk dat daadwerkelijk uitgevoerd wordt door de werknemers, te vergelijken met de hoeveelheid die uitgevoerd zou kunnen worden onder optimale omstandigheden. Met andere woorden wordt de potentiële arbeidsproductiviteit als 100% gesteld, maar dit wordt negatief beïnvloed wanneer de genoemde parameters buiten de comfortbuffers liggen. De effectieve prestatie kan berekend worden aan de hand van onder andere verkoopcijfers, aantal typefouten of tijd die nuttig besteed wordt aan het werk. Ook kan gekozen worden voor een subjectieve bepaling, door middel van bijvoorbeeld persoonlijke evaluatie of een vergelijking tussen tevredenheidsscores van de klant of werknemer. Probleem bij een bepaling van de arbeidsproductiviteit ingevolge de luchtkwaliteit, is de samenhang van de arbeidsproductiviteit met meerdere factoren, zoals opleiding, ervaring, salaris, stress en het management. Bij een 'meting' van de invloed van luchtkwaliteit op arbeidsproductiviteit dient hier dan ook rekening mee gehouden te worden door bijvoorbeeld nulmetingen (bepalen standaard productiviteit) uit te voeren per geselecteerde testgroep.

De optimale klimaatparameters teneinde maximale productiviteit te behalen verschillen per soort werk dat verricht wordt. In dezen is kantoorwerk van belang, wat hoofdzakelijk mentaal en administratief werk inhoudt. Bij computerwerk zijn kleine letters en aandacht voor detail aan de orde. Vanwege de intensieve focus op het scherm wordt de knipperfrequentie van de ogen verlaagd (Wyon & Wargocki, 2004), waardoor deze droger worden. Dit maakt de ogen gevoeliger voor vervuilingen in de lucht, bewegingssnelheid van de lucht en temperatuurverschillen. Een ander discomfort bij computergebruikers is de zithouding die gedurende een werkdag relatief statisch is. Dit resulteert in een verlaging van de regelbaarheid van de warmtebalans en dus in hoge thermische gevoeligheid van de werknemer.

In deze paragraaf worden de effecten van temperatuur en ventilatiedebiet op arbeidsproductiviteit beschreven. Ook verbeteringen aan de subjectieve arbeidsproductiviteit is van belang, vanwege de psychologische adaptatie. Ten slotte wordt een casus beschreven waarin een verbetering van de arbeidsproductiviteit is gemonetariseerd.

### 3.2.1 Temperatuur

Door Wargocki et al. (2006) wordt een aantal algemene conclusies getrokken over de effecten van temperatuur op de prestatie van werknemers. Zo leidt thermisch onbehagen tot afleiding van de werknemers en tot klachten over de installaties. Warmte zorgt ervoor dat zintuigen minder geprikkeld worden, waardoor de mentale prestatie verslechtert. Een koude omgevingstemperatuur verlaagt de vingertemperatuur, wat onder andere typewerk negatief beïnvloedt. Geleidelijke temperatuurschommelingen zijn onbehaaglijk, terwijl snelle mits kleine schommelingen vanwege natuurlijke ventilatie als natuurlijk worden ervaren.

Specifieker concluderen zij dat bij temperaturen hoger dan 22°C, een temperatuurverlaging van iedere graad Celsius de prestatie met 1% verhoogt. Bij een onderzoek naar prestatie in een callcenter was de spreektijd 5 – 7% korter bij een temperatuur onder 25°C. Bij temperaturen boven 25,4°C duurde het rapporteren, tussen de gesprekken door, 16% langer. Individuele invloed op de temperatuur van plus en minus 3°C zou leiden tot 7% prestatieverbetering in een kantooromgeving. Bij  $-0,5 < PMV < 0$  (iets koud) is de mentale productiviteit (denkwerk) volgens Roelofsen (2001) maximaal, namelijk 5% hoger dan  $0 < PMV < 0,5$ . Wyon (2000) staft dit: de mentale productiviteit is volgens hem het hoogst wanneer de operationele temperatuur 1°C onder de neutrale temperatuur ligt. Ten slotte vond hij in zijn onderzoek dat iedere graad temperatuurverschil in een kantooromgeving resulteert in een afname van de administratieve productiviteit (bv. typewerk) met 5 – 7,5 % en van de mentale productiviteit met 2,5 – 4 %. In deze casus wordt uitgegaan van mentaal en administratief werk 1:1.

### 3.2.2 Ventilatie

Volgens Wargocki et al. (2006) resulteert het verdubbelen van de centrale buitenluchttoevoer van 6,5 naar 13 l/s per persoon in een reductie van ziekte en ziekteverlof met 10% en bovendien in het verzet van anderhalf procent meer werk. Tussen 3 en 30 liter per seconde kan als vuistregel voor typewerk een prestatieverhoging van 1% worden aangehouden bij iedere verdubbeling van de luchttoevoer. Hierboven stijgt de lijn minder snel en is de vuistregel niet meer van toepassing. Aangezien het Bouwbesluit 2012 een ventilatie-eis beschrijft van 6,5 dm<sup>3</sup>/persoon, kan een verviervoudiging zodoende ruim 2% productiviteitsverhoging opleveren. Door met nieuwe filters het ventilatiedebiet van



2,5 liter per persoon te verhogen tot 25 liter per persoon, steeg de productiviteit (door verkorte spreektijd) met 6%, terwijl dezelfde maatregel met gebruikte filters een uitwerking had van -8%. Geadviseerd wordt iedere 6 maanden de filters te vervangen. Bij een vergelijking tussen met 12 l/s/p geventileerde gebouwen en gebouwen met 24 l/s/p aan ventilatie, bleek in laatstgenoemde het korte termijn ziekteverlof 35% lager.

### 3.2.3 Subjectieve arbeidsproductiviteit

Wanneer in een kantoor situatie werd gevraagd naar hun ervaringen met arbeidsproductiviteit afhankelijk van comfort (Raw et al., 1993), zegt men duidelijk dat ze productiever zijn naarmate ze zich meer comfortabel voelen. Omdat dit gevoel van comfort direct wordt beïnvloed door de mate van ervaren controle op het klimaat kan de conclusie getrokken worden dat een controleerbaar klimaat inderdaad leidt tot een verbetering van de (subjectieve) arbeidsproductiviteit. Dit is van belang omdat eerder werd vastgesteld dat een verhoging van het psychologisch welbevinden leidt tot minder gevoeligheid voor de relevante parameters. Het toepassen van een persoonlijk ventilatiesysteem (PV), waarmee een nog hoger debiet per persoon gerealiseerd kan worden, leidt op zichzelf volgens Wargocki et al. (2006) niet tot een directe verbetering in objectieve prestatie, maar wel tot een significante verhoging van de subjectieve arbeidsproductiviteit, wat bijdraagt aan het psychologisch welbevinden.

De binnenklimaatperceptie wordt volgens Leaman & Bordass (1997) bovendien beïnvloed door de afmetingen van de ruimte. Een grote aaneengesloten ruimte geeft het gevoel van een mindere binnenluchtkwaliteit. Een diepte van ongeveer twaalf meter lijkt optimaal volgens hun onderzoek. Bovendien vonden zij dat de perceptie van comfort het grootst was bij inrichting van individuele werkplekken. Bij werkplekken van twee tot acht personen bleef de comfortperceptie, hoewel steeds verder afnemend, positief. Bij meer dan acht personen per werkgroep werd de perceptie negatief ondervonden. Scheidingswanden zijn een manier om een grote kantoortuin onder te verdelen in kleinere groepen. Zo kan ervoor gekozen worden om groepen die veel communicatie onderling nodig hebben bij elkaar te zetten of om individuele werkers apart te zetten. Voor ieder bedrijf is dit verschillend en kan ook binnen een bedrijf, over tijd, nog flink variëren. Om deze reden kan gekozen worden voor akoestische (geluidisolierend), mobiele wanden (figuur 11; Buren Systems International, 2008). Deze zijn gemakkelijk uit te schuiven of te verplaatsen.

Het verhuizen naar een nieuw gebouw levert bovendien op zich al een stijging van de productiviteit op van 4,3% volgens Kroner & Stark-Martin (geciteerd in Boerstra & Leijten, 2003). Deze is echter maar van tijdelijke aard en wordt niet meegenomen.



Figuur 11: Voorbeeld van inrichting met lage scheidingswanden

Normaliter nemen ook de kosten voor de inrichting van professionele werkplekken, voor bijvoorbeeld bureautafels, een grote post met zich mee. Door te kiezen voor integratie van akoestische scheidingsmuren in de bureaus zoals te zien in figuur 12 (Buren Systems International, 2008) kan op de scheidingsmuren worden bespaard.



*Figuur 12: Voorbeeld van scheidingsintegratie in bureaus*

### **3.2.4 Microklimaat**

Wyon & Sandberg (1996) ondersteunen de eerder getrokken conclusie, over een verbeterde klimaatperceptie door psychologische adaptatie, aan de hand van een experiment onder tweehonderd werknemers die hun reguliere kantoor kleding droegen en voorzien waren van persoonlijke klimaatsystemen. Wanneer zij hun microklimaat (temperatuur, lichtsnelheid en hoeveelheid verse lucht) konden regelen met behulp van een eigen unit resulteert dit, volgens een studie van Kroner et al. (geciteerd in Boerstra & Leijten 2003:2), in een productiviteitsstijging van 12,5%. Dit wordt ondersteund door Clements-Croome (2000): een verhoging van productiviteit met 5-15% werd vastgesteld bij een individuele temperatuurregeling tot plus én minus 3°C. Dit is de totaalstijging vanwege comfortabelere temperatuur, versere lucht en de psychologische verbetering door de persoonlijke invloed. Met een bereik van  $\pm 3$ , 2,3 of 2°C, werden volgens Wyon & Sandberg (1996) comfortpercentages behaald van respectievelijk 99, 95 of 90% van de werknemers. Bij een temperatuurregeling van  $\pm 2^\circ\text{C}$  werd een stijging in productiviteit waargenomen van 3 (mentaal werk) en 7% (administratief werk) door Wyon (1996) door de persoonlijke beïnvloeding. In het algemeen stelt hij dat als het geheel van het binnenklimaat goed is, dit een productiviteitswinst oplevert van tenminste 10%. Een individueel regelbare temperatuur met behulp van het persoonlijk klimaatsysteem levert nog eens een verhoging van tenminste 5% op.

### 3.2.5 Casus

Dorgan & Dorgan (1999) vergelijken in hun onderzoek drie studies naar ruim vijf miljoen bedrijven in de Verenigde Staten, met in totaal 83,7 miljoen werknemers. De eerste besloeg de gezondheidskosten en verbeterde productiviteit ingevolge luchtkwaliteit. De tweede was uitgebreid met ziekten die veroorzaakt werden door luchtkwaliteit, waardoor een ziektekostenbesparing kon worden gerealiseerd. De derde studie richtte zich op de gastenindustrie, zoals horeca en toerisme. De bestaande situaties van de kantoorgebouwen werden vergeleken met de situatie na toepassing van verbeteringen genoemd in de ASHRAE standards 62-1999 en 55-1992 (normen), evenals niet-verplichte onderdelen, beslaande bevochtiging, filtratie en onderhoud. De investeringskosten van deze maatregelen zouden in totaal \$123 miljard bedragen; onderhoud kost \$5,6 miljard per jaar. De onderzochte voordelen van het verbeteren van de luchtkwaliteit waren financieel, gezondheid, tevredenheid en kwaliteit. De voordelen zouden \$79,8 miljard per jaar opleveren aan verbeterde arbeidsproductiviteit en nog eens \$11,9 miljard aan bespaarde ziektekosten waardoor dit, rekening houdend met een rentepercentage van 3% over de investering, neerkomt op een winst van \$1.132 miljard over twintig jaar, of \$13.500 per werknemer. In deze onderzoeken was een randvoorwaarde dat er conservatieve waarden gerapporteerd werden, dus Dorgan & Dorgan (1995) zijn van mening dat de genoemde voordelen zeker drie- tot zesmaal hoger uit kunnen vallen. Door de binnenluchtkwaliteit te verbeteren worden in kantoren van de horeca- en toerismesector ook de verkoopcijfers aanzienlijk verhoogd, hoewel dit buiten het bereik van dit project valt.

## 3.3 Ontwerpeisen

Uit paragraaf 3.1 en 3.2 is een aantal maatregelen naar voren gekomen waarmee de arbeidsproductiviteit middels de bouwprestatie verhoogd kan worden. De hieruit volgende ontwerpeisen van een geoptimaliseerd binnenmilieu kunnen worden onderverdeeld in bouwontwerp, klimaatsysteem ontwerp en de wijze van gebruik.

### 3.3.1 Gebouw

Bij het ontwerp van een arbeidsproductief gebouw dient rekening te worden gehouden met hoofdzakelijk een alfaklimaat. Gevelopeningen, bij voorkeur te openen ramen, zijn dus vereist. Omwille het psychologisch welbevinden is het gewenst om grote kantoortuinen te verdelen in werkplekken van drie tot zes personen, door lage scheidingswanden toe te passen.

### 3.3.2 Klimaatsysteem

Het gebouw dient op natuurlijk wijze beleefd, doch individueel regelbaar te worden en behoort onafhankelijk van het buitenklimaat bruikbaar te zijn. Een combinatie van alfa- en bètaklimaat leent zich hier het best voor. Door in de mogelijkheden te voorzien om ramen te openen en luchtsnelheden willekeurig te variëren wordt een relatief natuurlijk klimaat nagebootst. De temperatuur dient per ruimte collectief geregeld te worden op 21 – 24°C (winter – zomer), volgens subparagraaf 3.2.1. De nauwkeurige, individuele temperatuur- en luchtvolumeregeling maakt, mede dankzij de snelle reactietijden van het systeem, de werkplek maximaal regelbaar en zodoende behaaglijk. Dit door verse buitenlucht te verwarmen of onder hogere snelheid in te blazen en door ont- of bevochtiging (40-60%). Voorwaarde hierbij is dat men wordt geïnstrueerd hoe het systeem gebruikt dient te worden.

Zodoende worden tussen 12 – 25°C de voordelen van het alfagebouw gerealiseerd, zonder dat er op regelmogelijkheden wordt ingeleverd. Wanneer de buitentemperatuur hierbuiten valt, wordt het gebouw echter dusdanig geklimatiseerd dat er volgens Van der Linden et al. (2005) niet meer gesproken kan worden van klimaattype alfa. In dit geval speelt gedragsadaptatie nog wel een rol, maar het psychologisch effect is hier nihil. In dit geval wordt het gebouw als bèta geclassificeerd. Hiermee kan het optimale temperatuurbereik worden vastgesteld.

Volgens paragraaf 3.1.2 is de neutrale temperatuur afhankelijk van zowel de huidige binnen- als buitentemperatuur. Over het hele jaar ligt de buitentemperatuur in Nederland met uitzondering van extremen, tussen 0 en 25°C. Bij  $12^{\circ}\text{C} > T_{\text{buiten}} > 25^{\circ}\text{C}$  geldt de bètaregressie en tussen deze waarden geldt de alfaregressie weergegeven in figuur 8. Door een compromis te sluiten tussen het effect van binnen- en buitentemperatuur kan uit de grafiek in figuur 8 kan worden afgelezen dat de meest neutrale temperatuur dan tussen 22 – 25°C ligt en het meest productieve temperatuurbereik zodoende 21 – 24°C is. In tabel 2 is de centraal ingestelde binnentemperatuur weergegeven afhankelijk van het domein van buitentemperaturen. Ook de bijbehorende actie (verwarmen of koelen), neutrale en

optimale temperaturen staan hierin vermeld. Vanwege de zoninstraling en interne last (bijvoorbeeld warmteafgifte van werknemers en apparaten) wordt bij  $T_{\text{buiten}} > 17^{\circ}\text{C}$  hoofdzakelijk uitgegaan van koeling.

Tabel 2: Vergelijking van de effecten van binnen- en buitentemperatuur op de neutrale temperatuur

$T_{\text{neutraal}}$ afhankelijk van $T_{\text{buiten}}$			Actie	$T_{\text{neutraal}}$ afhankelijk van $T_{\text{binnen}}$		
$T_{\text{buiten}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{\text{neutraal}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{\text{optimaal}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )		$T_{\text{centraal}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{\text{neutraal}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{\text{optimaal}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
0 – 10	21,5 – 22,6	20,5 – 21,6	verwarmen	21	21,9	20,9
10 – 15	22,6 – 22,8	21,6 – 21,8	verwarmen	22	23,2	22,2
15 – 20	22,8 – 24,1	21,8 – 23,1	koelen	23	23,5	22,5
20 – 30	24,1 – 24,8	23,1 – 23,8	koelen	24	23,8	22,8

### 3.3.3 Gebruik

Door de collectieve verwarming en koeling vraaggestuurd uit te voeren, hoeft de gebruiker zich hier niet in te verdiepen. Zodra de temperatuur buiten het op dat moment gewenste temperatuurbereik dreigt te vallen, wordt het systeem automatisch ingeschakeld. Men dient bewust gemaakt te worden van de mogelijkheid tot het openen van ramen, ten behoeve van de psychologische adaptatie, en voornamelijk het gebruik van de individuele klimaatsystemen behoort duidelijk te zijn.

Een nadeel van de temperatuurregeling is dat de gebruikers hun systeem in zullen stellen op de voorkeurstemperatuur en niet op de meest productieve temperatuur, een graad onder neutraal. Deze temperatuur is echter niet bekend van alfagebouwen. Met name bij lagere buitentemperaturen  $< 12^{\circ}\text{C}$  zit hier een verschil in, van maximaal  $1,9^{\circ}\text{C}$ . Bij buitentemperaturen  $> 20^{\circ}\text{C}$  kiest de gemiddelde gebruiker middels zijn persoonlijk klimaatsysteem zelf voor de meest productieve temperatuur, omdat deze dan nagenoeg gelijk is aan de voorkeurstemperatuur.

Volgens subparagraaf 3.2.1 kan gesteld worden dat een afwijking van de meest productieve temperatuur, weergegeven in tabel 2, resulteert in een verlaging van de mentale arbeidsproductiviteit van 2,5 – 4%, of van de administratieve arbeidsproductiviteit van 5 – 7%, per graad Celsius. Uitgaande van de gemiddelden van beide waarden en een gelijke verdeling van typ- en denkwerk is dit 4,75% per  $^{\circ}\text{C}$ . In het geval van een bètaklimatisering is de gemiddelde insteltemperatuur ( $T_{\text{voorkeur}}$ ) bekend en resulteert in een verlies van 9,025% en 1,425% respectievelijk voor  $T_{\text{buiten}} < 10^{\circ}\text{C}$  en  $> 20^{\circ}\text{C}$ . Voor het alfaklimaat is geen voorkeurstemperatuur bekend; wel is duidelijk dat gebruikers een grotere tolerantie hebben voor afwijkende temperaturen, waaruit afgeleid kan worden dat ook de voorkeurstemperatuur minder strak gedefinieerd zal zijn. Door op het systeem aan te geven wat de optimale temperatuur op dat moment is en deze bij inschakeling standaard te hanteren, wordt de gebruiker gemotiveerd bewuster om te gaan met de eigen productiviteit. Als gevolg hiervan wordt geen productiviteitsverlies gerekend. Dit is bij  $T_{\text{buiten}} < 12^{\circ}\text{C}$  niet reëel, omdat de voorkeurstemperatuur dan aanzienlijk verschilt van de optimale temperatuur. Een vergelijking tussen de buiten-, centrale, optimale en voorkeurstemperatuur en het verlies van productiviteit is opgenomen in tabel 3.

Tabel 3: Productiviteitsverlies afhankelijk van binnen- en buitentemperatuur

$T_{\text{buiten}}$ $^{\circ}\text{C}$	Klimaatype	$T_{\text{binnen}}$ $^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{optimaal}}$ $^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{voorkeur}}$ $^{\circ}\text{C}$	Productiviteit %
$< 10$	bèta	21	21	$< 22,9$	-9,025%
10 – 15	alfa	22	21,9	-	$\pm 0$
15 – 20	alfa	23	22,5	-	$\pm 0$
$> 20$	bèta	24	23,2	$> 23,5$	-1,425%

## 4 Praktische uitwerking

In dit hoofdstuk worden twee situaties met elkaar vergeleken. Allereerst het standaardgebouw waarop installatietechnisch is geadviseerd door SIA. Op basis deze situatie worden de eerder gevonden maatregelen toegepast teneinde de arbeidsproductiviteit te maximaliseren ("optimaal gebouw"). De niet-ventilatiegerelateerde onderdelen zijn ongemoeid gelaten in het verbeterde ontwerp teneinde het doel van dit project na te streven.

### 4.1 Referentiegebouw

Gedurende dit project wordt als uitgangspunt het oorspronkelijke kantoorgebouw van "E-sites" gebruikt. Dit gebouw is begeleid in het installatieadvies door SIA en zal gebouwd worden aan de Reduitlaan te Breda.

#### 4.1.1 Ontwerp

Het kantoor bestaat uit drie bouwlagen, met ongeveer 50 werkplekken verdeeld over de 1<sup>e</sup> en 2<sup>e</sup> verdieping, waar de begane grond slechts als receptie dient. De gemiddelde bezetting is 80% tussen 8 - 18 uur op werkdagen. De voor dit onderzoek relevante gegevens worden in deze paragraaf samengevat en komen uit het programma van eisen (PvE) en uit de EPC-berekening. Hierbij wordt het gebouw vereenvoudigd tot een gelijke eerste en tweede verdieping, teneinde het overzicht te behouden. In het daadwerkelijke ontwerp verschillen deze licht van elkaar in de opdeling van de bijeenkomstruimten; de open kantoorvloer is gelijk. Ook is de referentie volledig bèta geklimatiseerd. Het vereenvoudigde Bink Builder 3D-model is opgenomen in bijlage V.

#### 4.1.2 Installaties

De voor dit project relevante installaties zijn ventilatie en verwarming. Deze subparagraaf beschrijft de toepassingen in het referentiegebouw.

##### 4.1.2.1 Ventilatie

Het PvE geeft inblaassnelheden voor de ventilatie (§ 2.8.1) in de leefzone van 0,15 m/s 's winters en in de zomer van 0,25 m/s (> 16°C om discomfort te vermijden). Dit geschiedt middels natuurlijke toevoer en mechanische afvoer (afzuigventilator) in combinatie met CO<sub>2</sub>-gestuurde toevoerklap, welke op een bepaalde maximale CO<sub>2</sub>-concentratie in te stellen is (meestal 800 ppm). Vanuit de zijgevel links en rechts van het gebouw wordt lucht aangevoerd en door warmtepompunits afhankelijk van de vraag verwarmd of gekoeld en tevens gedroogd. De levering geschiedt met behulp van roosters. Aan de noordzijde wordt de afgezogen lucht gespuid. Wanneer 's avonds bij sluitingstijd het alarmsysteem ingeschakeld wordt, schakelt de ventilatie uit, behalve als de dagtemperaturen dusdanig hoog zijn dat nachtventilatie bijdraagt aan koeling van het gebouw. Iedere 24 uur wordt de ventilatie 15 minuten ingeschakeld buiten gebruiksperiodes. Wanneer het alarm wordt uitgeschakeld gaan de ventilatoren in bedrijf wanneer de CO<sub>2</sub>-concentratie toeneemt tot de ingestelde waarde. De ventilatie-eis is conform Bouwbesluit 2003 1,3 dm<sup>3</sup>/s/m<sup>2</sup> over 282,5 m<sup>2</sup> per kantoorverdieping en zo 1322 m<sup>3</sup>/h per open kantoorvloer, waar het ontwerp in 1350 m<sup>3</sup>/h voorziet. Het nieuwe Bouwbesluit eist 6,5 dm<sup>3</sup>/s (= 23,4 m<sup>3</sup>/h) per persoon. Vermenigvuldigd met de veertig aanwezige werknemers is de eis 936 m<sup>3</sup>/h en zodoende kan gesteld worden dat het ontwerp in dezen tevens aan Bouwbesluit 2012 voldoet. Voor de bijeenkomstruimten geldt een totaal debiet van 650 m<sup>3</sup>/h per kantoorvloer, waar het Bouwbesluit 2003 612 m<sup>3</sup>/h eist.

##### 4.1.2.2 Temperatuurregeling

Voor de winter wordt een minimale buitentemperatuur gedefinieerd van minus tien graden Celsius bij RH = 90% en in de zomer gelden extremen van 28°C bij RH = 50%. In deze gevallen wordt de kantoorfunctie op respectievelijk 20 en 24°C gehouden. Hiervoor zijn voor koeling en verwarming respectievelijk 65 en 80 kW ingeschat, middels de warmtepompunits. Hiermee wordt ook de infiltratielucht geconditioneerd.

## 4.2 Optimaal gebouw

In deze paragraaf worden de arbeidsproductiviteit verhogende maatregelen, zoals deze in hoofdstuk 3 zijn gevonden, toegepast op het referentiegebouw E-sites. Zodoende wordt een optimaal gebouw gecreëerd op het gebied van arbeidsproductiviteit. Hierbij worden alleen de indeling en klimaatsystemen gewijzigd; het algehele ontwerp blijft gelijk aan dat van E-sites.

## 4.2.1 Ontwerp

Grote kantoortuinen wekken de indruk dat de luchtkwaliteit minder is en heeft daarom, al is het niet per definitie waar, een negatief psychologisch effect. Bovendien is afleiding door geluid en beweging in ruime mate aanwezig. Een werkplek dient echter wel de mogelijkheid te bieden tot werkgerelateerd evenals sociaal contact, zonder anderen te storen. Privacy en rust spelen dus een belangrijke rol. Aan deze eisen kan het best voldaan worden met een groot aaneengesloten oppervlak met werkplekken van vier tot zes personen, gescheiden met lage, mobiele tussenmuren en kantoormeubilair. Voor intensief werkoverleg met zowel directe collega's als klanten is het van belang in aparte ruimtes te voorzien, om rust te garanderen.

## 4.2.2 Installaties

Deze subparagraaf beschrijft de maatregelen met betrekking tot ventilatie en thermostaat.

### 4.2.2.1 Ventilatie

Zoals eerder geconcludeerd is een CO<sub>2</sub>-concentratie zoals in de buitenlucht ook wenselijk op de werkplek. Om dit te benaderen is het op individueel niveau direct aanleveren van buitenlucht de meest effectieve manier gezien de mogelijkheden tot beïnvloeding. Met 25 werkplekken per kantoortuin dienen er in totaal 50 units aanwezig te zijn. Het inblaasdebiet van de i-Climate is gemiddeld 8 dm<sup>3</sup>/s en voldoet hiermee aan Bouwbesluit 2012. Vermenigvuldigd met een bezetting van 20 personen per verdieping is dit 576 m<sup>3</sup>/h. Dit is tevens de gemiddelde hoeveelheid afgezogen lucht per kantoortuin.

Voor de vergaderruimten geldt dat een persoonlijk klimaatsysteem weinig toevoegt. Het apparaat belemmert het zicht en er wordt geen arbeid verricht dat volledige concentratie vereist. Elkaars aanwezigheid stimuleert bovendien om te presteren. Het zal hierom voldoende zijn de reeds toegepaste collectieve ventilatie aan te houden.

De collectieve afzuiging is gemiddeld zodoende de som van twee verdiepingen met 576 m<sup>3</sup>/h per kantoortuin en 650 m<sup>3</sup>/h voor de vergaderruimten, ofwel 2452 m<sup>3</sup>/h. Hiernaast bestaat de mogelijkheid tot het openen van de vele ramen.

### 4.2.2.2 Temperatuurregeling

De collectieve verwarming/koeling wordt voor een optimale vergelijking tussen het huidige en het nieuwe ontwerp op dezelfde manier uitgevoerd, dus middels warmtepomp.

Het vermogen van de i-Climate is afhankelijk van de ruimtetemperatuur en de aan- en afvoerstromen van het water. In de zomer is het macroklimaat maximaal 24°C; de maximale persoonlijke temperatuur is dan 27°C. Dit is de meest extreme verwarmingssituatie. Met een aan- en afvoertemperatuur van respectievelijk 45°C en 35°C is  $\Delta T = 40 - 24^\circ\text{C} = 16^\circ\text{C}$ . Volgens de koel- en verwarmingsgrafiek van de i-Climate geldt hierbij een capaciteit van 160 W/m<sup>2</sup>, ofwel ruim 211 W per unit. Met 40 units in gebruik vertaalt dit zich in een totaal ventilatieverwarmingcapaciteit van 8,448 kW. 's Winters wordt gerekend met een macroklimaat van minimaal 21°C, met de mogelijkheid tot individuele koeling tot 18°C (meest extreme koelsituatie). Met een aanvoertemperatuur van 10°C en een afvoer van 16°C, geldt  $\Delta T = 21 - 13^\circ\text{C} = 8^\circ\text{C}$ , waarmee een koelcapaciteit van 95 W/unit te behalen is. Met 40 actieve units komt dit neer op 3,802 kW. In het geval van koelen is het vermogen dus relatief klein en is vooral het verhogen van de inblaassnelheid troef voor het verlagen van de gevoelstemperatuur. Gemiddeld werd gerekend met een inblaassnelheid van 8 liter per seconde, wat opgeschroefd kan worden naar 10 liter per seconde.

De berekende, maximale capaciteiten dienen te worden opgeteld bij dat van de macroklimaatregeling. Het totale vermogen wordt hiermee ongeveer 88,5 kW warmte en 69 kW koude voor het gehele gebouw.

## 4.3 Ventilatieberekening

Teneinde de ventilatie door te rekenen is een CO<sub>2</sub>-balans voor zowel de kantoortuin en de bijeenkomstruimten voor beide situaties. In een evenwichtsituatie (constante aanvoer/productie, afvoer en adequate mixing) wordt de concentratie CO<sub>2</sub> beïnvloed door de aangevoerde lucht, respiratie van de werknemers en afzuiging van 'gebruikte' lucht. In deze paragraaf worden zowel de invoer als het resultaat besproken.

### 4.3.1 Referentiegebouw

In deze subparagraaf worden de ventilatieberekeningen zoals opgenomen in bijlage VIa van de kantoortuinen en bijeenkomstruimten verklaard.

#### 4.3.1.1 Kantoortuin

De uitgangspunten van de ventilatieberekeningen zijn als volgt:

Om 8 uur 's ochtends ( $t_0$ ) geldt  $[CO_2] = 400$  ppm. Het oppervlak van een kantoortuin is  $282,5$  m<sup>2</sup>, de hoogte is 3 m.

Met een afzuiging van  $1350$  m<sup>3</sup>/h is de toevoer van lucht gelijk hieraan vanwege het evenwicht in luchtdruk. Bij de oorspronkelijke ventilatieberekening voor "E-sites" is gerekend met een CO<sub>2</sub>-productie van  $20$  dm<sup>3</sup>/h per persoon; een vrij hoog uitgangspunt. De uitgedemde lucht bestaat volgens West (2000) voor vier volumepercent uit CO<sub>2</sub>. Met deze gegevens kan de CO<sub>2</sub>-concentratie  $[CO_2]$  gesimuleerd worden als functie van de tijd.

De maximale theoretische concentratie in de oude situatie zou bij maximale ventilatiecapaciteit  $697$  ppm zijn, maar slechts onder de voorwaarde dat er optimaal gemixt wordt. Door matige mixing wordt lucht met een relatief lage CO<sub>2</sub>-concentratie afgezogen en is de concentratie op leefniveau juist hoger. Bij het persoonlijk systeem is de mixing op leefniveau continu, wat een dergelijke berekening representatiever maakt.

Ten slotte is de CO<sub>2</sub>-sturing van belang. Er wordt pas geventileerd boven  $800$  ppm, wat betekent dat dit als minimale CO<sub>2</sub>-concentratie kan worden aangehouden en zodoende de ventilatie niet op volle capaciteit zal draaien.

#### 4.3.1.2 Bijeenkomstruimten

Door alle bijeenkomstruimten per verdieping samen te nemen (ventilatiecapaciteiten zijn naar afmeting per ruimte verdeeld) is er een capaciteit van  $650$  m<sup>3</sup>/h ontworpen over  $102$  m<sup>2</sup>. Met een maximale bezetting van  $80\%$  van  $20$  werkplekken, levert dit een maximale CO<sub>2</sub>-concentratie op van  $893$  ppm.

### 4.3.2 Optimaal gebouw

In deze subparagraaf wordt de ventilatie doorgerekend in de nieuwe situatie. Deze tekst dient ter ondersteuning van de berekeningen die zijn opgenomen in bijlage VIb.

#### 4.3.2.1 Kantoortuin

De buitenluchttoevoer ( $[CO_2] = 400$  ppm) is gemiddeld  $0,48$  m<sup>3</sup> per minuut per werknemer. Volgens de berekening (overeenkomstig sub-subparagraaf 4.3.1.1) stagneert de CO<sub>2</sub>-concentratie van het macroklimaat in de kantoortuin bij  $1094$  ppm, wat zodoende als maximale concentratie in de ruimte wordt aangehouden. Omdat de PEE van de totaal ingeblazen lucht ongeveer  $40\%$  is, kan gesteld worden dat de werknemer hiernaast ongeveer  $60\%$  lucht uit het macroklimaat inademt, dat respectievelijk voor  $400$  ppm en maximaal  $1094$  ppm uit CO<sub>2</sub> bestaat. Concluderend heeft de ingeademde lucht een maximale CO<sub>2</sub>-concentratie van  $816$  ppm. Door de inblaassnelheid per werkplek te maximaliseren ( $10$  dm<sup>3</sup>/s) kan de totale CO<sub>2</sub>-concentratie van de ademlucht tot een maximum van  $733$  ppm verlaagd worden.

#### 4.3.2.2 Vergaderruimten

In de aparte vergader- en overlegruimtes zijn de persoonlijke systemen niet praktisch omdat deze de communicatie belemmeren. Bovendien zijn vergaderingen op zich al dynamisch en bieden veel afwisseling. Hiermee wordt een natuurlijker klimaat ondervonden doordat men zich vrijer kan bewegen en zich niet continu voluit hoeft te concentreren. Hierom kan volstaan worden met eenzelfde macroklimaatstelsel als in de referentiesituatie. Deze ruimten hebben dan een maximale CO<sub>2</sub>-concentratie van  $893$  ppm.

### 4.3.3 Overzicht ventilatieberekeningen

Tabel 4 geeft de resultaten van deze paragraaf overzichtelijk weer.

Tabel 4: Ventilatieberekeningen ruimten per gemiddelde werkdag

Ruimte Situatie Klimaatype	Kantoortuin			Bijeenkomst Beide
	Referentie	Optimaal Macroklimaat	Microklimaat	
t min	[CO <sub>2</sub> ] ppm	[CO <sub>2</sub> ] ppm	[CO <sub>2</sub> ] ppm	[CO <sub>2</sub> ] ppm
0	400	400	400	400
60	637,3	743,9	606,3	835,7
120	684,6	917,5	710,5	885,8
180	694,0	1005,1	763,1	891,6
240	695,8	1049,3	789,6	892,2
300	696,2	1071,7	803,0	892,3
360	696,3	1082,9	809,8	892,3
420	696,3	1088,6	813,2	892,3
480	696,3	1091,5	814,9	892,3
540	696,3	1093,0	815,8	892,3
600	696,3	1093,7	816,2	892,3

#### 4.4 Thermische simulatie

Het thermisch klimaat kan in een 3D-omgeving worden gesimuleerd aan de hand van het programma Dywag (DYnamisch WArmtgebruik Gebouwen), van Bink software. Binnen dit model worden de relevante parameters (ontwerp, installaties en interne last) van het betreffende gebouw ingevoerd, waarna het binnenklimaat theoretisch nagebootst wordt. Aan de hand hiervan kan de benodigde capaciteit van de koeling en verwarming worden bepaald.

Alvorens de Dywag-modules installaties en interne last kunnen worden gebruikt, worden de algemene ontwerpgegevens geïmporteerd vanuit het Bink Builder 3D-model. Het betreffende gebouw dient te worden getekend, waarna de fysische gegevens (materialen) ingevoerd worden. Het 3D-model wordt vervolgens ingelezen in Dywag. De voor dit project interessante gegevens zijn vervolgens ingevoerd in de warmteberekening en voor de overige input zijn forfaitaire waarden gebruikt.

De resultaten van de berekening zijn opgenomen in de bijlagen, onderverdeeld in de kantoortuin (bijlage VIIa) en de afzonderlijke vergaderruimten (bijlage VIIb). Hieruit kan worden afgelezen dat de ontworpen capaciteit voor thermische klimatisering voldoende is om het gebouw gedurende een gemiddeld jaar, extremen inclusief, op temperatuur te houden. Alleen voor de "brainstorm unit" lijkt de capaciteit te laag. Dit is te verklaren doordat het totaal van de capaciteit evenredig is verdeeld over de ruimten op basis van vloeroppervlak, terwijl het vloerplan in deze ruimte is vereenvoudigd voor de overzichtelijkheid. De overige ruimten hebben bovendien een overcapaciteit, wat het tekort in de brainstorm unit compenseert.

De arbeidsproductieve situatie is niet afzonderlijk gesimuleerd, omdat er niets verandert aan de capaciteit voor de verwarming van het macroklimaat.

#### 4.5 Energieprestatie

Wettelijk moet voldaan worden aan EPC = 1,1. Met de stijgende energieprijzen, die in de toekomst naar verwachting nog harder zullen stijgen met het oog op tekorten van fossiele brandstof en internationale conflicten, is het ook van financieel belang om rekening te houden met het energieverbruik.

Momenteel heeft het referentiegebouw een EPC = 0,875. In vergelijking tot het referentiegebouw is het voornaamste verschil de decentralisatie van de ventilatie in de kantoortuinen. Hiermee is het afzuigdebiet meer dan gehalveerd, waardoor geconcludeerd kan worden dat een verhoging van de arbeidsproductiviteit middels ventilatie niet hoeft te leiden tot een hoger energieverbruik en de energieprestatiecoëfficiënt zelfs lager uitvalt, ondanks de hogere conditionering van de inblaaslucht. Met de persoonlijke ventilatiesystemen is tevens de conditionering van lucht vergroot, zij het met een lager debiet. Hiertoe is de verwarmingscapaciteit uitgebreid met 8,5 kW en de koelcapaciteit met 4 kW. Voor- en nadelen tegen elkaar afwegend zal dit de score in balans houden.



## 5 Financiële analyse

In deze analyse worden de investeringskosten berekend die nodig zijn om het referentiegebouw op arbeidsproductiviteit ingevolge luchtkwaliteit te optimaliseren en vergeleken met de referentiesituatie. Dit wordt eveneens op het gebied van de onderhouds- en energiekosten uitgevoerd en uiteindelijk afgezet tegen de kwantificatie van de gewonnen arbeidsproductiviteit.

### 5.1 Investering

De verschillen in investeringskosten bestaan voornamelijk uit de toe te passen scheidingswanden en de persoonlijke ventilatiesystemen. Op het infiltratiesysteem kan juist bespaard worden. De warmtepompinstallatie inclusief alle toebehoren zijn gelijk voor beide situaties en kosten tezamen €78.300.

#### 5.1.1 Scheidingswanden

Om de perceptie van comfort door een goed binnenklimaat te bevorderen, zonder de mogelijkheid tot communicatie tussen werkgroepen te belemmeren, worden scheidingswanden toegepast. Omdat werkgroepen regelmatig kunnen veranderen, van zowel grootte als samenstelling, lijken akoestische (geluidgeïsoleerde), verplaatsbare, niet-constructieve systeemwanden een bruikbare oplossing.

Om tot een conservatieve financiële analyse te komen, wordt in dezen uitgegaan van acht werkgroepen per kantoorruimte: zeven groepen van drie personen en een groep van vier personen, waarbij de kantoorruimte wordt opgedeeld door een wand met de lengte mee te plaatsen (34 meter) en drie wanden met de breedte mee te plaatsen (driemaal 9 meter). Ook een hoogte van 2 meter is een overschatting. Bovendien worden de werkgroepen op deze manier volledig van elkaar gescheiden, waar er in de praktijk eenvoudig tussen de groepen doorgelopen zal kunnen worden (figuur 11).

Zodoende is er 122 m<sup>2</sup> aan extra scheidingswanden nodig per verdieping. Archidat bv. (2012) geeft objectieve, indicatieve kosten van bouwmaterialen. Voor een dergelijke binnenwand van spaanplaat met een dikte van 100 mm wordt €60 per vierkante meter gerekend, waarmee het totaal op €14.640 wordt geschat.

Om de kosten te drukken kan ook worden gekozen om een aantal muren te vervangen door meubilair, zoals archiefkasten. Door scheiding te integreren in het bureau kan tevens worden bespaard (figuur 12).

#### 5.1.2 Persoonlijke ventilatie

Het persoonlijk ventilatiesysteem i-Climate kost volgens Branderhorst (2012a) ongeveer €3.000 per werkplek. Met de toepassing van 50 stuks is dit een investering van €150.000. Door Maassen en Maaijen (2011) wordt gerekend met een levensduur van de persoonlijke klimaatsystemen van 16 jaar. Door gevoelige onderdelen te vervangen, bedraagt de tweede cyclus slechts de helft van de aanvankelijke aanschafkosten.

Naast de apparatuur zelf is er ook een bouwkundige voorziening nodig, namelijk die voor de circulatiekanalen, aangesloten op het centrale koeling- en verwarmingsysteem. Deze kosten bedragen ongeveer €1.700 per unit, ofwel €85.000 voor E-sites, naar Maassen & Maaijen (2011).

Omdat de investering gebruikelijkerwijs gedaan wordt met een lening, dient een rentepercentage mee te worden genomen in de analyse. Normaliter wordt hiervoor 3% aangehouden. Gezien de huidige financiële crisis lijkt 5% echter niet onredelijk.

#### 5.1.3 Infiltratiesysteem

In de referentiesituatie van "E-sites" wordt de inblaaslucht aangezogen via luchtkanalen en roosters door een drukverschil te creëren middels een afzuigventilator. In het oorspronkelijk ontwerp wordt €5.000 gerekend voor de dakventilatoren en €7.500 voor de bouwkundige voorzieningen. De afzuigventilator is ook in het arbeidsproductieve ontwerp toegepast, maar op de luchtkanalen en roosters wordt bespaard door het toepassen van de bouwkundige voorzieningen van de i-Climate. Voor de vergaderruimten worden dezelfde bouwkundige kosten gerekend als in de referentiesituatie: €2.438.

De capaciteit van het afzuigstelsel kan ruim gehalveerd worden. Dit levert echter qua investering een minieme besparing op en wordt verwaarloosd.

## 5.2 Monetarisatie arbeidsproductiviteit

Door de verbeteringen in productiviteit te verrekenen met de loonkosten van de werknemers kan de monetaire opbrengst van de geïmplementeerde maatregelen bepaald worden. Dit gebeurt aan de hand van de vergelijking tussen het bètaklimaat van de referentiesituatie en het alfklimaat van het productieve gebouw.

Er wordt in deze berekening uitgegaan van een modaal salaris, dat in Nederland door het CPB (2011) op €34.500 bruto geschat is voor 2015, wat neerkomt op €16,50 per uur. Als dit bedrag wordt uitbetaald in de veronderstelling dat men acht uur per dag 100% productief aan het werk is, is het productiviteitsverlies te bepalen door het werkelijke productiviteitspercentage te vermenigvuldigen met het salaris, waaruit het financieel verlies volgt. Met 50 FTE zijn de totale loonkosten €1.725.000 op jaarbasis. Dit is een conservatieve waarde, omdat het gemiddelde salaris van kantoorgebruikers hoger ligt dan bij niet-kantoorgebruikers.

De paragraaf is opgedeeld in de categorieën voor tevredenheid: regulatie en adaptatie en hiernaast zijn ook bespaarde ziektekosten meegenomen in de berekening van de productiviteitswinst.

### 5.2.1 Regulatie

De meetbare parameters bestaan uit de CO<sub>2</sub>-concentratie, temperatuur en luchtvochtigheid.

#### 5.2.1.1 CO<sub>2</sub>-concentratie

In relatie tot de oude situatie blijft de productiviteit ten gevolge van de CO<sub>2</sub>-concentratie nagenoeg gelijk vanwege de CO<sub>2</sub>-sturing en onvoldoende luchtmix in de referentiesituatie, dat resulteert in minder efficiënte afzuiging in een grote, collectief geventileerde ruimte. Dit heeft bovendien tot gevolg dat de lucht op leefniveau een hogere CO<sub>2</sub>-concentratie zal hebben dan de berekende, gemiddelde concentratie. Met de nieuwe situatie wordt echter een aanzienlijk lager ventilatiedebiet aangehouden.

#### 5.2.1.2 Temperatuur

Met de verliespercentages van arbeidsproductiviteit door temperatuur (tabel 3) kan, door middel van vermenigvuldiging met de gemiddelde, jaarlijkse tijdsduur van de verschillende buitentemperatuurbereiken het productiviteitsverlies per jaar bepaald worden. Door hetzelfde te doen met de referentiesituatie kan een financiële vergelijking gemaakt worden. Hiertoe wordt gebruik gemaakt van graaddagen, met data (KNMI; 2012) over de afgelopen 36 maanden uit de Bilt, Utrecht (zie tabel 5).

Tabel 5: Graaddagen De Bilt, Utrecht

T <sub>buiten</sub> (°C)	< 10	10 – 15	15 – 20	> 20
Actie	verwarmen	verwarmen	koelen	koelen
<b>Maand</b>	<i>graaddagen</i>	<i>graaddagen</i>	<i>graaddagen</i>	<i>graaddagen</i>
januari	227,7	154,3	0	0
februari	219,3	140,3	0	0
maart	121,7	135,7	2	0
april	53,3	107,7	14,7	4
mei	22,3	74,3	29	9
juni	2,7	32	52,3	17,7
juli	0	12,3	78,3	27,3
augustus	0,3	16,7	75,3	19
september	7	44,3	31,7	5
oktober	42,3	101	9,3	1,3
november	95,7	129,7	0,7	0
december	232,3	154,3	0	0
<b>jaarlijks</b>	<b>1024,7</b>	<b>1102,7</b>	<b>293,3</b>	<b>83,3</b>

Door vervolgens het totaal aantal graaddagen per maand te delen door het aantal dagen, wordt het gemiddeld aantal graaddagen per dag verkregen. Het percentage graaddagen per maand wordt bepaald en vermenigvuldigd met het productiviteitsverlies. Voor de maand januari bijvoorbeeld: Het jaarsalaris per FTE omgerekend naar het januari-salaris is €2928,13 (in werkelijkheid natuurlijk een uniform maandsalaris). Er zijn in totaal 382 graaddagen over januari, waarvan 59,6% in het temperatuurbereik  $< 10$ . Door het maandsalaris te vermenigvuldigen met 59,6% en met 91% vanwege het productiviteitsverlies door een te koud klimaat, wordt de financiële afschrijving berekend op de dagen met  $T_{\text{buiten}} < 10^{\circ}\text{C}$ . Hiernaast zijn er ook graaddagen met  $10^{\circ}\text{C} < T_{\text{buiten}} < 15^{\circ}\text{C}$ , waarop geen afschrijving plaatsvindt, dus wordt de optelsom voor januari  $\text{€}2928,13 \cdot 0,596 \cdot 0,91 + \text{€}2928,13 \cdot 0,404 = \text{€}2770,63$ , ofwel 94,621% van het maandsalaris. Jaarlijks wordt volgens tabel 6 97,26% productiviteit behaald. Zoals verwacht ligt de productiviteit in de zomermaanden hoger dan in de wintermaanden.

Tabel 6: Productiviteit als functie van temperatuur onder verbeterde klimaatomstandigheden

Maand	Werkdagen	Salaris €	Verdiend €	Productiviteit %
-	-			
januari	22,14	2.928,13	2.770,63	94,621%
februari	20,18	2.668,38	2.521,52	94,496%
maart	22,14	2.928,13	2.804,15	95,766%
april	21,43	2.833,68	2.756,86	97,289%
mei	22,14	2.928,13	2.881,52	98,408%
juni	21,43	2.833,68	2.820,34	99,530%
juli	22,14	2.928,13	2.918,47	99,670%
augustus	22,14	2.928,13	2.920,22	99,730%
september	21,43	2.833,68	2.811,04	99,201%
oktober	22,14	2.928,13	2.855,13	97,507%
november	21,43	2.833,68	2.725,42	96,180%
december	22,14	2.928,13	2.769,35	94,577%
<b>totaal</b>	<b>260,89</b>	<b>34.500</b>	<b>33.554,64</b>	<b>97,260%</b>

In de oude situatie is de klimatisering ingesteld op 20 en  $24^{\circ}\text{C}$  voor winter en zomer respectievelijk, maar zonder hierbij rekening te houden met de buitentemperatuur. De voorkeur ligt over het gehele domein van buitentemperaturen bij benadering  $23^{\circ}\text{C}$  in bètagebouwen. Deze is echter niet van belang omdat deze niet ingesteld kan worden door de gebruikers. Zomer en winter zijn in dit geval gedefinieerd als het aantal stook- en –koeldagen. De optimale temperaturen en het hieruit volgend productiviteitsverlies zijn berekend in tabel 7, op dezelfde manier als in subparagraaf 3.3.3.

Tabel 7: Productiviteitsverlies kantoortuin afhankelijk van binnen- en buitentemperatuur

$T_{\text{buiten}}$ $^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{binnen}}$ $^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{neutraal}}$ $^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{optimaal}}$ $^{\circ}\text{C}$	Productiviteit %
$< 10$	20	21,8	20,8	-3,80%
10 – 15	20	22,4	21,4	-6,65%
15 – 20	24	23,6	22,6	-6,65%
$> 20$	24	24,1	23,1	-4,27%

Uitgegaan van het percentage graaddagen per categorie en per dag maal het bijbehorend productiviteitsverlies en het aantal werkdagen per maand volgt tabel 8, met hierin de maandelijkse en jaarlijkse productiviteit.

Tabel 8: Productiviteit als functie van temperatuur in de oude situatie

Maand	Werkdagen	Salaris €	Verdiend €	Productiviteit %
januari	22,14	2.928,13	2.783,15	95,049%
februari	20,18	2.668,38	2.537,31	95,088%
maart	22,14	2.928,13	2.772,56	94,687%
april	21,43	2.833,68	2.670,71	94,249%
mei	22,14	2.928,13	2.751,90	93,981%
juni	21,43	2.833,68	2.658,65	93,823%
juli	22,14	2.928,13	2.749,52	93,900%
augustus	22,14	2.928,13	2.745,53	93,764%
september	21,43	2.833,68	2.655,48	93,712%
oktober	22,14	2.928,13	2.756,95	94,154%
november	21,43	2.833,68	2.679,42	94,556%
december	22,14	2.928,13	2.783,55	95,062%
<b>totaal</b>	<b>260,89</b>	<b>34.500</b>	<b>32.545,74</b>	<b>94,335%</b>

Conclusie bij de vergelijking van productiviteit, met betrekking tot temperatuur, in de referentie en de nieuwe situatie is zodoende dat door de beschreven maatregelen jaarlijks 2,925% minder verlies op arbeidskosten is gerealiseerd. Met 50 FTE wordt dan jaarlijks €50.445 bespaard.

Deze uitkomst ligt financieel gezien binnen de verwachtingen en is zelfs aan de conservatieve kant. In werkelijkheid zullen de richttemperaturen voor het binnenmilieu fluctueren en niet altijd gehaald worden. Dit geldt voor beide situaties, maar in een ruimte met persoonlijke ventilatie is een temperatuuroverschrijding nog te compenseren. Dit is een verklaring voor de hoge productiviteitspercentages. Naar verwachting zal in de praktijk de productiviteitspercentages in beide gevallen lager liggen en zal het verschil tussen beide groter zijn en zo ook de relatieve besparing.

### 5.2.1.3 Bespaarde ziektekosten

De meerderheid van de literatuur toont in meer of mindere mate aan dat een verhoging van het ventilatiedebiet resulteert in minder afwezigheid door luchtwegklachten. Een vooraanstaand, veel geciteerd onderzoek is dat van Milton (2000). Hierin werden 40 gebouwen met ruim 3.700 werknemers onderzocht in 115 afzonderlijk, centraal geventileerde ruimten op korte termijn-ziekteverlof, gecorrigeerd voor etniciteit, loonschaal, rol binnen het bedrijf, vóórkomen van binnenmilieuklachten, overbezetting van een ruimte, luchtvochtigheid en overige redenen van absentie zoals vakantie. Dit om het effect van het ventilatiedebiet te isoleren uit de resultaten. Twee daggemiddelde ventilatiesnelheden werden ingesteld, te weten 11-13 l/s/p (gemiddeld) en 23-25 l/s/p (hoog). Hierbij waren de gemeten CO<sub>2</sub>-concentraties vergelijkbaar met die berekend middels de voor dit onderzoek opgestelde CO<sub>2</sub>-balans voor centraal conventioneel geventileerde gebouwen: respectievelijk 800-900 ppm en rond 600 ppm. Hiermee werd het gemiddeld jaarlijks korte termijn-ziekteverlof van 4,87% verlaagd naar 3,19%; een verlaging van 35%, in een lineair verband. Met ongeveer 2.087 werkuren jaarlijks, worden zodoende ongeveer 35 werkuren per werknemer gewonnen bij een verlaging van de CO<sub>2</sub>-concentratie van gemiddeld 862,95 ppm naar 634,74 ppm.

Het daggemiddelde van 741 ppm in de kantoortuin voorzien van persoonlijke ventilatiesystemen, ligt in het midden tussen de twee uitersten. Een conservatieve conclusie is dan ook dat er 15% van de totale kortdurende ziektekosten kunnen worden bespaard ten opzichte van een volgens Milton (2000) 'gemiddeld' geventileerde situatie, wat neerkomt op ruim 15 werkuren. Vermenigvuldigd met het gemiddeld uurloon en het aantal werknemers komt dit uiteindelijk uit op een besparing van €12.596 op korte termijn-ziektekosten, of omgerekend in productiviteit ruim 0,7%. Een vergelijking met de referentiesituatie zou een verlies opleveren, maar dit zou echter geen representatief beeld geven om de in sub-subparagraaf 4.3.1.1 genoemde redenen. De matige mixing van de lucht zal in de praktijk juist vaker tot ziekteverzuim leiden vanwege het inademen van reeds uitgedemde lucht.

### 5.2.2 Adaptatie

Middels de Fanger-methode werd gericht op een tevredenheidspercentage van 80% van de regulatiescore, waarbij adaptatie niet werd gewaardeerd. Nu het tevredenheidspercentage is

verhoogd zowel door het temperatuurbereik te vergroten en beter af te stemmen op seizoensvariëaties als door persoonlijke invloed is op de regulatie grote winst geboekt. Deze regulatiescore is echter ruwweg driekwart van de totale tevredenheidsscore inclusief gedrags- en psychologische adaptatie. Door de mogelijkheid het klimaat te kunnen personaliseren houdt men zich actiever bezig met de regulatie en past men zichzelf, zowel bewust als onbewust, ook meer aan.

De adaptatie wordt in gang gezet door de psyche. Naarmate een natuurlijker systeem wordt nagebootst, neemt de adaptatie toe. Binnen de afbakening van dit onderzoek zijn relevante oplossingen om een klimaat natuurlijker beleefd te laten worden, door kleinere werkgroepen aan te houden en door te variëren met de snelheid van de inblaasluucht middels het persoonlijk klimaatsysteem dat bovendien snelle responstijden faciliteert. Deze drie maatregelen dienen om de gevoel van invloed op het klimaat te vergroten en zodoende de maximale psychologische adaptatiescore te verkrijgen.

### **5.2.2.1 Scheidingswanden**

Om het ervaren comfort te vergroten worden de scheidingswanden toegepast. Hiermee wordt de ervaren luchtkwaliteit verbeterd, de privacy vergroot en de afleiding geminimaliseerd.

### **5.2.2.2 Variabele luchtsnelheid**

Met de mogelijkheid om het PV-systeem in te stellen op een variabele luchtsnelheid, wordt een natuurlijker klimaat nagebootst. De variatie zorgt voor een minder statische omgeving en stimuleert mentale productiviteit. Dit hoeft niet per definitie te leiden tot variabele debieten; door de inblaasopening te vergroten of verkleinen kan een variabele snelheid worden gerealiseerd.

### **5.2.2.3 Responstijd**

De mogelijkheid om de temperatuur en inblaasdebiet en -snelheid van verse lucht te regelen is dus bevorderlijk. Wanneer men deze mogelijkheid heeft, gebruikt men deze vaak pas als men zich reeds oncomfortabel voelt. Een persoonlijk systeem schakelt na instellen direct over op de nieuwe instellingen en kan het microklimaat onmiddellijk aanpassen. Het effect van de instelling wordt zodoende direct merkbaar, wat ook de psychologie positief bevordert: door het verschil dusdanig snel te voelen, wordt het gevoel van invloed vergroot. Wanneer het klimaat in een centraal gereguleerde ruimte onbehaaglijk wordt en het systeem wordt ingeschakeld door de gebruiker, worden de ingestelde waarden pas na enkele, zo niet tientallen minuten bereikt. Bovendien gebeurt dit dusdanig geleidelijk dat het gevoel van invloed op de klimatisering nihil is.

### **5.2.2.4 Persoonlijke beïnvloeding**

Door alle in deze subparagraaf genoemde maatregelen wordt door de persoonlijke invloed op het klimaat een louter psychologisch voordeel op productiviteit behaald van ongeveer 5% van administratief en mentaal werk bij een regeling van  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ . Voor  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  is de verhoging niet bekend, maar zodoende kan gesteld worden dat het conservatief is deze 5% aan te houden in dit onderzoek. Van de personeelskosten kan zodoende op jaarbasis €86.250 worden gewonnen.

## **5.3 Exploitatiefase**

Aan de gebruiksfase zijn zowel kosten als baten verbonden. Dezelfde gebruiksduur van zestien jaar wordt gehanteerd.

### **5.3.1 Onderhoud**

De PV-systemen hoeven nauwelijks onderhouden te worden. Volgens Maassen en Maaijen (2011) wordt voor onderhoud van de PV-systemen in het geval van "E-sites" gerekend met €3,50 per unit per jaar. Met 50 geïnstalleerde units komt dit jaarlijks neer op €175. Voor de overige installaties geldt dat de onderhoudskosten gelijk blijven en dus ter vergelijking niet berekend hoeven worden.

### **5.3.2 Energie**

De verschillen tussen de energiekosten van beide situaties worden bepaald door de koeling/verwarmingcapaciteit en ventilatiedebieten.

### 5.3.2.1 Temperatuur

De wijze van warmte- en koudelevering blijft in de voor arbeidsproductiviteit geoptimaliseerde situatie gelijk aan die van de referentiesituatie van E-sites. Ook de capaciteit hiervan is niet gewijzigd voor een optimale vergelijking tussen de twee situaties.

### 5.3.2.2 Ventilatie

Door het PV-systeem in gebruik te nemen, is meer conditionering van de inblaaslucht nodig. Voor een optimale vergelijking tussen de twee situaties wordt deze verwarming en koeling gecombineerd met de warmtepomp in het referentiegebouw, waardoor niet hoeft te worden voorzien in een extra installatie. Voor verwarming is een extra 8,5 kW berekend en voor koeling 4 kW extra, bovenop de 80 en 65 kW respectievelijk. In de referentiesituatie werd de inblaaslucht echter ook al tot ongeveer 16°C geconditioneerd middels de warmtepompen om klachten te voorkomen. De capaciteit die hiervoor nodig was is onbekend en dus verwaarloosd. In de praktijk zal de schatting dus gunstiger uitvallen.

Aan de hand van de vergrote capaciteit van de verwarming en koeling kunnen de extra energiekosten bepaald worden op basis van het verwarming-/koelingschema in tabel 5. Wederom wordt uitgegaan van het percentage van de tijd dat iedere referentietemperatuur voorkomt. Door het gemiddeld vermogen te vermenigvuldigen met het aantal ingeschakelde uren van het klimaatsysteem (10 uur per werkdag = 2609 uur op jaarbasis) wordt het energieverbruik ingeschat. Volgens Europe's Energy Portal (2012) is de elektriciteitsprijs voor huishoudens in Nederland ongeveer €0,22/kWh. De totale meerprijs voor het verwarmen en koelen van zowel het micro- als het macroklimaat is volgens tabel 9 zodoende €2.825 op jaarbasis, conservatief gerekend. In de praktijk is vanwege de hogere afname dan bij huishoudens een korting op de energieprijzen waarschijnlijk.

Tabel 9: Verwarming- en koelingschema afhankelijk van de buitentemperatuur

T <sub>buiten</sub> (°C)	< 10	10 – 15	15 – 20	> 20	Totaal
Actie	verwarmen	verwarmen	koelen	koelen	-
Gemiddeld vermogen	80%	50%	30%	80%	-
Graaddagen jaarlijks	1024,7	1102,7	293,3	83,3	<b>2504</b>
Percentage tijdsduur	41%	44%	12%	3%	<b>100%</b>
Vermogen referentie	64 kW	40 kW	19,5 kW	52 kW	-
Verbruik referentie	68,48 MWh/y	45,92 MWh/y	6,1 MWh/y	4 MWh/y	<b>124,5 MWh/y</b>
Kosten referentie	€15.066/y	€10.102/y	€1.342/y	€880/y	<b>€27.390/y</b>
Vermogen arbeidsproductief ontwerp	70,8 kW	44,25 kW	20,7 kW	55,2 kW	-
Verbruik arbeidsproductief ontwerp	75,76 MWh/y	50,8 MWh/y	6,48 MWh/y	4,3 MWh/y	<b>137,34 MWh/y</b>
Kosten referentie	€16.667/y	€11.176/y	€1.426/y	€946/y	<b>€30.215</b>
<b>Meerprijs</b>	<b>€1.601</b>	<b>€1.074</b>	<b>€84</b>	<b>€66</b>	<b>€2.825</b>

In de gebruiksfase van het klimaatsysteem wordt volgens Maassen & Maaijen (2011), met het ruim gehalveerde debiet van de inblaaslucht, tot wel 40% bespaard op de klimatisering in de kantoortuin. Deze forse besparing wordt teweeggebracht doordat het mechanisch inblaasdebiet ruim gehalveerd wordt. Bovendien hoeft er hierdoor minder lucht geconditioneerd te worden, zij het in hogere mate. In de referentiesituatie van "E-sites" wordt echter alleen mechanisch afgezogen: de infiltratie vindt plaats middels luchtkanalen en roosters. Hierom wordt geen energiebesparing gerekend, hoewel dit in een vergelijking met een gebouw dat mechanische luchtaanvoer heeft aanzienlijk zou schelen.

Niet meegenomen in de berekening is het aantal uren dat (een deel van) de klimaatregeling uitgeschakeld kan worden. Dit kan eveneens een grote besparing opleveren omdat het nabootsen van een natuurlijke klimaat resulteert in een ruimere comfortgrenzen per parameter.

## 5.4 Terugverdientijd

Bij de terugverdientijd wordt uitgegaan van een lening die tien jaar vaststaat tegen 5% en vervolgens wordt afbetaald. Bij een tweede investeringscyclus wordt het bedrijf geacht voldoende kapitaal te bezitten. Mits goed onderhouden is de levensduur van de klimaatsystemen van het referentiegebouw 30 jaar, tegenover de 16 jaar voor de i-Climate. De tweede investering is zoals gezegd slechts €1500 per unit.

De totale kapitale investering (CAPEX), operationele uitgaven (OPEX) en de bruikbare, gekwantificeerde arbeidsproductiviteit zijn weergegeven in tabel 10. Ook de meerprijs het toepassen van de arbeidsproductieve maatregelen zijn hierin opgenomen.

Tabel 10: Vergelijking kosten van referentie en arbeidsproductief gebouw

Levensduur (jaren)	30	16
<b>Investering en exploitatie</b>	<b>Referentiegebouw</b>	<b>Optimaal gebouw</b>
<b>CAPEX</b>	<b>-€90.800</b>	<b>-€310.377</b>
PV-systeem	€0	-€150.000
Mechanische afzuiging	-€5.000	-€5.000
Bouwkundige voorzieningen	-€7.500	-€87.438
Temperatuurregeling	-€65.800	-€65.800
Bouwkundige voorzieningen	-€12.500	€12.500
Scheidingswanden	€0	-€14.640
<b>OPEX (jaarlijks)</b>	<b>-€32.099</b>	<b>-€45.905</b>
Onderhoud	-€169	-€171
Energie	-€27.390	-€30.215
Rente (10 jaar)	-€4.540	-€15.519
<b>Productiviteit (jaarlijks)</b>		
Thermisch comfort	€0	€40.356
Persoonlijke regeling	€0	€86.250

Hieruit valt op te maken dat er voor de eerste 16 jaar eenmalig ongeveer €220.000 meer wordt geïnvesteerd dan bij de referentie. Ook vallen de jaarlijkse kosten ongeveer €14.000 hoger uit. Door de winst in productiviteit mee te nemen in de analyse wordt duidelijk dat het persoonlijk ventilatieconcept ondanks de hoge investering een forse winst met zich meebrengt, in het geval van "E-sites" netto ruim €112.000 op jaarbasis. Dit betekent dat de investering zich, inclusief de rente over 10 jaar, zich reeds in twee jaar heeft terugverdiend. Voor langere perioden wordt verwezen naar tabel 11, waarin de kosten en baten van beide situatie zijn weergegeven tot een maximum van 30 jaar, waarna het conventionele systeem aan vervanging toe is.

Tabel 11: Vergelijking kosten en baten van de referentie en optimale situaties

Tijd (jaren)	0	10	16	20	30
Referentie	-€90.800	-€457.192	-€759.575	-€732.784	-€1.053.775
Optimaal	-€310.377	€341.444	€825.650	€1.073.453	€2.035.651
Winst	-€219.577	€798.636	€1.585.225	€1.806.237	€3.089.427

Deze resultaten zijn conservatief, wat met name te maken heeft met het reeds goede binnenklimaat van E-sites. Volgens Wyon (1996) levert een goed binnenklimaat een productiviteitswinst van tenminste 10% op in vergelijking met het gemiddelde gebouw. Met individuele regeling van 2°C komt hier nog eens 5% bij door de psychologische adaptatie, met 3°C zelfs meer. Met 50 FTE jaarlijks zou dit neerkomen op het dubbele van de in tabel 10 berekende productiviteitswinst: €258.750.

## 6 Beslismodel

Op basis van alle in dit onderzoek naar voren gekomen informatie, is de Excel-file “Binnenklimaatmodel en productiviteit” opgesteld, met hierin alle relevante berekeningen uitgewerkt in deze scriptie. Met behulp van deze tool kan het effect en de terugverdientijd van arbeidsproductiviteit verhogende maatregelen worden geanalyseerd en vergeleken met de referentiesituatie.

Allereerst dienen in de eerste sheet “Referentiegebouw” de achtergrondgegevens (afmetingen, klimatisering, kosten en gebruik) van het referentiegebouw te worden ingevoerd. Vervolgens worden de arbeidsproductieve maatregelen bepaald en per ruimte ingevoerd op de tweede sheet “Productieve ruimten”.

Ten slotte kunnen er zes resultaatssheets af worden gelezen, in volgorde van belangrijkheid:

### 3. Financiën

Omdat uiteindelijk de financiële haalbaarheid het belangrijkste aspect is, is dit de eerst weergegeven resultaatssheet. Deze is gebaseerd op de onderstaande sheets.

### 4. Productiviteit

De productiviteit wordt bepaald op basis van regulatie, bestaande uit de effecten van de maximale CO<sub>2</sub>-concentratie en het thermisch behagen op de productiviteit. Voor adaptatie is de persoonlijke invloed opgenomen. De gebruikte graaddagen verwijzen naar een verborgen sheet, omdat deze geen relevant resultaat weergeeft.

### 5. Energie

Het energieverbruik voor verwarming en koeling en de hierbij horende kosten worden vergeleken voor de referentie en de aangepaste situatie.

### 3. CO<sub>2</sub>\_overzicht

De CO<sub>2</sub>-concentraties per ruimte worden hier overzichtelijk weergegeven om snel inzicht in de verschillen tussen beide situaties te verkrijgen.

### 4. CO<sub>2</sub>\_Referentie

Deze sheet geeft voor de ruimten van de referentiesituatie de CO<sub>2</sub>-resultaten weer.

### 5. CO<sub>2</sub>\_PV-systeem

De CO<sub>2</sub>-resultaten van de ruimten die voorzien worden van een PV-systeem staan hier uitgewerkt.

In principe is deze Excel-file toepasbaar voor elk willekeurig gebouw, mits de eerste twee sheets nauwkeurig worden ingevoerd. De resultaten dienen wel juist geïnterpreteerd te worden. Zo kan bijvoorbeeld de CO<sub>2</sub>-concentratie in een grote, centraal geventileerde ruimte niet voor exact aangenomen worden. Dit is slechts een indicatieve waarde en de praktijk geeft grote lokale fluctuaties.



## 7 Conclusie

Behorend bij deze scriptie is de Excel-file "Binnenklimaatmodel en productiviteit" opgesteld. Door op twee sheets het referentiegebouw in te voeren en de maatregelen per ruimte aan te geven die genomen worden om het gebouw hoger te laten scoren op arbeidsproductiviteit, geeft het model de productiviteitswinst weer ingevolge de meetbare binnenklimaatparameters CO<sub>2</sub>-concentratie en temperatuur evenals de winst door psychologische factoren. Bovendien worden de effecten van de maatregelen op ziekteverzuim en energieverbruik weergegeven.

Het psychologisch welbevinden dient hiertoe reeds in acht genomen te worden bij het ontwerp van het gebouw. De beleving van een natuurlijk klimaat zorgt voor een groter comfortbereik inzake de meetbare binnenklimaatparameters. Dit door te voorzien in te openen ramen, een variabele luchtsnelheid en het opsplitsen van grote kantoortuinen in werkgroepen van drie tot zes personen. Naast de natuurlijke beleving is ook individuele controle en korte responstijden van invloed op de beleving van het klimaat. Dit kan het best worden gerealiseerd door middel van persoonlijke klimaatsystemen, zoals de Nederlandse i-Climate. Een persoonlijk klimaatsysteem wordt altijd toegepast in combinatie met centrale klimatisering, macroklimaatregeling.

Het geheel van klimaatsystemen dat wordt toegepast dient de volgende waarden aan te houden voor een optimale arbeidsproductiviteit:

- CO<sub>2</sub>-concentratie zo laag mogelijk;
- Temperatuur 21-24°C (winter-zomer; afhankelijk van buitentemperatuur);
- Relatieve luchtvochtigheid 40-60%.

Bij de vergelijking van het referentiegebouw "E-sites" met de situatie na toepassing van arbeidsproductiviteitverhogende maatregelen blijkt de theoretische CO<sub>2</sub>-concentratie van de ademlucht in de kantoortuinen, waar i-Climates zijn geïnstalleerd op iedere werkplek ppm hoger ligt dan bij de referentiesituatie, met 741 tegenover 663 ppm. "E-sites" heeft dus van oorsprong al een goede luchtkwaliteit. Bovendien zal in realiteit de concentratie CO<sub>2</sub> in de referentiesituatie hoger liggen. Door inadequate mixing van de lucht in de ruimte, zijn in de praktijk grote lokale verschillen aanwezig, met name op ademniveau. Om deze redenen wordt het verschil in productiviteit op basis van CO<sub>2</sub>-concentratie niet gewaardeerd.

De temperatuur binnen "E-sites" wordt geregeld middels een warmtepomp met een koel- en verwarmingsvermogen van respectievelijk 65 en 80 kW. De wijze van warmteopwekking is gelijk gehouden teneinde een objectieve vergelijking te kunnen maken. Wel is de thermostaat anders ingesteld. De referentie hield in de winter 22°C en in de zomer 24°C aan als stook- of koeltemperatuur, waar een betere benadering van de meest productieve temperatuur afhankelijk is van de buitentemperatuur: bij buitentemperaturen (°C) in de domeinen [ $\leftarrow$ , 10 >U [10, 15 >U [15, 20 >U [20,  $\rightarrow$ ] wordt respectievelijk gestookt naar 21 en 22°C en gekoeld naar 23 en 24°C. Hiertoe zijn de reeds ontworpen vermogens afdoende. Hiermee wordt een productiviteitsverbetering gerealiseerd van bijna 3%. Met een modaal jaarsalaris van €34.500 levert dit met 50 FTE een jaarlijkse besparing op van ruim €50.000.

Uit de literatuur is gebleken dat individuele klimaatcontrole, inclusief een temperatuurregulatie van plus en minus 2°C ten opzichte van het macroklimaat resulteert in een stijging van de arbeidsproductiviteit met 5%. Voor de regeling van  $\pm 3^\circ\text{C}$  is geen waarde bekend en wordt de 5% conservatief aangehouden. Monetair betekent dit op jaarbasis ruim €86.000 winst ten opzichte van de referentie.

Om in de regulering van 3°C te kunnen voorzien dient de warmtepomp te worden uitgebreid met een extra vermogen van 8,5 en 4 kW voor verwarming en koeling, respectievelijk. Dit heeft nauwelijks invloed op de investering. De kosten die dit met zich meebrengt heeft dan ook te maken met het energieverbruik, dat met ruim €30.000 een krappe €3.000 meer kost dan de referentie. Overige jaarlijkse kostenposten zijn onderhoud (beide ongeveer €170) en de rente over tien jaar, dat met ruim €15.500 meer dan driemaal zoveel bedraagt dan de referentie.

Implementatie van de genoemde maatregelen neemt een aanzienlijke stijging van de investeringskosten met zich mee en zodoende ook de jaarlijkse lasten op basis van het rentetarief.



---

Het energieverbruik zal nagenoeg gelijk blijven of iets stijgen. Het energielabel hoeft hierbij echter niet in het geding te komen. Door de productiviteitsscore mee te nemen in de financiële analyse blijkt dat korte terugverdiertijden aan de orde zijn, in het geval van “E-sites” is dit binnen twee jaar.

De berekende winst in arbeidsproductiviteit wordt verwacht in de praktijk tweemaal zo hoog uit te vallen, doordat in de financiële berekening slechts conservatieve waarden aangehouden en onbetrouwbare gegevens überhaupt niet meegenomen zijn. Bovendien scoort het referentiegebouw “E-sites” zelf al vrij goed, waardoor de vergelijking minder positief uitvalt.

## 8 Aanbevelingen

Teneinde een maximale arbeidsproductiviteit te realiseren dienen de binnenmilieuparameters aangehouden te worden zoals beschreven in deze scriptie. Hiernaast wordt het toepassen van een microklimaatstelsel geadviseerd om het psychologisch comfort te stimuleren. Hierbij is het van belang dat de gebruikers van het stelsel worden geïnformeerd over de mogelijkheden van de unit en van de optimale productiviteitstemperaturen. Ook de invloed van kleding op het comfort dient duidelijk gemaakt te worden; een kledingvoorschrift is zodoende niet bevorderlijk voor de klimaatperceptie.

Een dynamische omgeving blijkt bovendien de zintuigen op een niet-storende manier te prikkelen. Variabele lichtsnelheid en afwisselende achtergrondgeluiden blijken een positieve uitwerking te hebben op de arbeidsproductiviteit. Door hierin te voorzien middels onder andere de persoonlijke klimaatstelsels wordt nog meer winst verwacht.

Naast luchtkwaliteit, temperatuur, en luchtvochtigheid zijn er vele andere factoren die de productiviteit beïnvloeden. De belangrijkste meetbare parameters zijn licht en geluid, waar nog grote winst te behalen valt. Een natuurlijker omgeving kan worden gecreëerd door te voorzien in natuurlijke lichtinval evenals groenvoorziening. Met behulp van kunstmatig kleurlicht kan de productiviteit ook verhoogd worden. Om tot een set maatregelen te komen die een gebouw vanaf de ontwerpfase tot aan de sloopfase productiever maken, wordt geadviseerd om ook de invloed van deze overige factoren op arbeidsproductiviteit te kwantificeren en te combineren met de resultaten uit deze scriptie. Hiermee kan SIA uiteindelijk advies uitbrengen naar opdrachtgevers met de specifieke wens van een optimale werkomgeving.

Het evalueren van het gebouwklimaat onder de gebruikers blijkt eveneens een positief psychologisch effect te hebben op arbeidsproductiviteit. Wanneer het verbeteren van de werkomstandigheden een veelbesproken onderwerp is en de werknemers zien dat er top-down veel aandacht aan het welzijn van de werknemers wordt besteed, zal dit bottom-up over worden genomen door de gebouwgebruikers.

Optimaal gebruik van het klimaatstelsel kan uiteindelijk leiden tot een nieuwe vorm van werken. Door als werkgever niet langer per uur uit te betalen, maar voor het daadwerkelijk uitgevoerde werk zal de werknemer gestimuleerd worden om de klimaatstelsels optimaal te gebruiken.

## Literatuur

- Araujo, V.M.D., Araujo, E.H.S. (1999). "The applicability of NEN-EN-ISO 7730 for the assessment of the thermal conditions of users of the buildings in natal-Brazil", Proceedings Indoor Air 1999, vol.2, pp 148-153.
- Archidat bv. (2012). *Kosten verplaatsbare binnenwand, dicht wandelement, dikte 100mm*. <http://www.bouwkosten-online.nl/bouwkosten-online/utiliteitsbouw> Geraadpleegd 11 juni 2012.
- Arets, M.J.P., Boerstra, A.C., Kurvers, S.R., Linden, A.C. van der, Raue, A.K. (2004). "Thermische behaaglijkheid: Eisen voor de binnentemperatuur in gebouwen". ISSO publicatie 74. Rotterdam: Stichting ISSO.
- Boerstra, A.C., Dijken, F. van, Hulsman, L.P., Marinus, E., Snepvangers, C.A.M. (2009). "Arbo-informatieblad 24: Binnenmilieu", 2<sup>e</sup> editie. Den Haag: Sdu Uitgevers.
- Boerstra, A.C., Gelderblom, A., Hegger, C., Jochems, D., Kerkhoff, R., Odink, J., Peeters, E., Slob, R., Strien, R. van (2007). "Handboek Binnenmilieu 2007". Rotterdam: RIVM.
- Boerstra, A.C. & Leijten, J.L. (2003). Binnenmilieu en productiviteit: eindelijk harde cijfers. In: BBA Binnenmilieu, *Verwarming & Ventilatie* (pp. 393-397).
- Branderhorst, T. (2012a). Persoonlijke mededeling.
- Branderhorst, T. (2012b). *i-Climate technische omschrijving i-105 MK II (single)*, versie 6.2. Waalwijk: i-Climate bv.
- Brunekreef, B., Holgate, S.T. (2009). "Air Pollution and Health". Londen: The Lancet.
- Buren Systems International (2008). *Catalogus scheidingswanden kantoor – administratief*, 11. <http://www.burensystems.com/11.pdf> Geraadpleegd 6 juni 2012.
- Centraal Planbureau, (2011). *Actualisatie Economische Verkenning 2011-2015*. Den Haag: Centraal Planbureau. <http://www.cpb.nl/sites/default/files/publicaties/download/actualisatie-economische-verkenning-2011-2015-verwerking-regeerakkoord.pdf> Geraadpleegd 1 juni 2012.
- Clements-Croome, D. (2000). Indoor environment and productivity. In: Clements-Croome, D. (2006). *Creating the Productive Workplace* (pp. 25-54). Abingdon: Taylor & Francis.
- Dear, R.J. De, Brager & G.S., Cooper, D. (1997). *Developing an adaptive model of thermal comfort and preference*. Final Report ASHRAE RP/884.
- Dear, R.J. De & Brager, G.S. (1998). *Developing an adaptive model of thermal comfort and preference*. Berkeley: University of California.
- Deventer, W.T. van (2001). "Milieutechnologie: Van schoonmaaktechnologie naar schone technologie". Groningen: Wolters-Noordhoff.
- Dorgan, C.E. & Dorgan, C.B. (1999). Assessment of link between productivity and indoor air quality. In: Clements-Croome, D. (2006). *Creating the Productive Workplace*, (pp. 113–135). Abingdon: Taylor & Francis.
- Europe's Energy Portal (2012). *Retail (end-user) energy prices for households*. <http://energy.eu> Geraadpleegd 6 juni 2012
- Excel voor Mac 2011* (2010). Microsoft Corporation.
- Heerwagen, J.H. (1998). *Productivity and well-being: What are the links?* Cincinnati: American Institute of Architects Conference on Highly Effective Facilities.
- Jacobs, P., Dijken, F. van, Boerstra, A.C. (2007). "Goede ventilatie bevordert welzijn en laat verbetering van leerprestaties zien" [http://www.schoolfacilities.nl/index.php?Itemid=358&id=1916&option=com\\_content](http://www.schoolfacilities.nl/index.php?Itemid=358&id=1916&option=com_content) Geraadpleegd op 29 februari 2012.
- KNMI (2012). *Graaddagen afgelopen 36 maanden*. <http://degreedays.net> Geraadpleegd 6 juni 2012.
- Leaman, A. & Bordass, B. (1997). Future buildings and their services: Strategic considerations for designers and clients. *Building research and information*, jaargang 25, uitgave 4.
- Leaman, A. & Bordass, B. (2005). Productivity in buildings: the 'killer' variables. In: Clements-Croome, D. (2006). *Creating the Productive Workplace* (pp. 151-180). Abingdon: Taylor & Francis.
- Linden, A.C. van der, Boerstra, A.C., Raue, A.K., Kurvers, S.R. & Dear, R.J. De (2005). *Adaptive temperature limits: A new guideline in The Netherlands. A new approach for the assessment of building performance with respect to thermal indoor climate*. Amsterdam: Elsevier bv.
- Maassen, W.H. & Maaijen, H.N. (2011). De Dubo-versneller, *TVVL magazine* 7 & 8, (pp. 16-19).
- Milton, D.K., Glencross, P.M. & Walters, M.D. (2000). *Risk of sick leave associated with outdoor air supply rate, humidification, and occupant complaints*. Boston: Harvard School of Public Health.
- Olesen, B.W., Schøler, M. & Fanger P.O. (1978). *Discomfort caused by vertical air temperature differences*. Kopenhagen: Danish Building Institute.

- Ragas, M.J., Oldenkamp, R., Preeker, N.L., Wernicke, J., Schlink, U. (2011). Cumulative risk assessment of chemical exposures in urban environments. *Environment International*, jaargang 37, nummer 5, pp. 872 – 881.
- Raw G., Roys M. & Leaman A. (1993) Sick Building Syndrome, Productivity and Control. *Property Journal*, August (pp. 17-19).
- Roelofsen, P. (2002). The impact of office environments on employee performance: the design of the workplace as a strategy for productivity enhancement. *Journal of Facilities Management*, jaargang 3, uitgave 1. (pp. 247-264).
- Venema, A., Van den Heuvel, S., Geuskens, G. (2009). “*Health and safety at work Results of the Labour Force Survey 2007 ad hoc module on accidents at work and work-related health problems*”. Hoofddorp: TNO.
- Voskamp, P., Peereboom, K. & van Scheijndel, P.A.M. (2010). “Handboek Ergonomie”. Deventer: Kluwer Uitgeverij.
- Wargocki, P., Seppänen, O., Andersson, J., Boerstra, A., Clements-Croome, D., Fitzner, K. & Hanssen, S.O. (2006). Indoor climate and productivity in offices: How to integrate productivity in life-cycle cost analysis of building services. *Rehva Guidebook no. 6*. Brussels: Rehva.
- West, J.B. (2000). *Respiratory Physiology: The Essentials*. Philadelphia: Lippincott Williams and Wilkins.
- Wyon, D.P. (1996). Individual microclimate control: required range, probable benefits and current feasibility. In: *Proceedings of Indoor Air '96* (pp. 1067-1072). Nagoya: Institute of Public Health.
- Wyon, D.P. (2000). Indoor air quality effects on office work. In: Clements-Croome, D. (2006). *Creating the Productive Workplace* (pp. 25-54). Abingdon: Taylor & Francis.
- Wyon, D.P. & Sandberg, M. (1996). Discomfort due to vertical thermal gradients. *Indoor Air Journal*, Vol. 6 (pp. 48-54). Berkeley: Wiley-Blackwell.
- Wyon, D.P. en Wargocki, P., (2004). “Room temperature effects on office work” in Clements-Croome, D. (2006). *Creating the Productive Workplace* (pp. 181–192). Abingdon: Taylor & Francis.
- Yang, J., Kaczmarczyk, J., Melikov A., Fanger P.O. (2003). *The impact of a personalized ventilation system on indoor air quality at different levels of room air temperature*. Copenhagen: International Centre for Indoor Environment and Energy.



## Bijlage I Chemische achtergrondconcentraties buitenlucht op zeeniveau

Stof	Volume%
N <sub>2</sub>	78,09
O <sub>2</sub>	20,94
Ar	0,93
CO <sub>2</sub>	$3,6 \cdot 10^{-2}$
Ne	$1,8 \cdot 10^{-3}$
Terpenen	$1,4 \cdot 10^{-3}$
He	$5,2 \cdot 10^{-4}$
CH <sub>4</sub>	$1,3 \cdot 10^{-4}$
Kr	$1 \cdot 10^{-4}$
H <sub>2</sub>	$5 \cdot 10^{-4}$
CO	$5 \cdot 10^{-4}$
N <sub>2</sub> O	$4 \cdot 10^{-5}$
H <sub>2</sub> S	$2 \cdot 10^{-5}$
Xe	$8 \cdot 10^{-6}$
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	$5 \cdot 10^{-6}$
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	$3 \cdot 10^{-6}$
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	$3 \cdot 10^{-6}$
O <sub>3</sub>	$2 \cdot 10^{-6}$
NH <sub>3</sub>	$8 \cdot 10^{-7}$
NO	$2 \cdot 10^{-7}$
NO <sub>2</sub>	$2 \cdot 10^{-7}$
SO <sub>2</sub>	$2 \cdot 10^{-8}$
Rn	$6 \cdot 10^{-18}$
<b>Totaal</b>	<b>100</b>

(Van Deventer, 2001)



---

## **Bijlage II Samenvatting NEN-cursus “Bouwbesluit 2012 en normen”**

## Bijlage III Bepalingsschema gebouwtype

Vraag 1	Heeft het gebouw/de werkruimte een geheel gesloten gevel?	Ja	Gebouw/klimaatype Bèta
		Nee	Ga verder met vraag 2
Vraag 2	Is er per twee personen minimaal één te openen raam beschikbaar? Per travee dient het te openen oppervlak minimaal 0,5 m <sup>2</sup> te zijn en het raam moet zijn voorzien van een windvaste raamuitzetter met een regelbare kierstand.	Ja	Ga verder met vraag 5
		Nee	Ga verder met vraag 3
Vraag 3	Heeft het gebouw/de werkruimte actieve koeling?	Ja	Ga verder met vraag 4
		Nee	Ga verder met vraag 5
Vraag 4	Kan per maximaal twee personen de temperatuur in de winter (verwarming) én in de zomer (koeling) individueel worden beïnvloed? De temperatuurinstelling moet een regelbereik hebben van $\pm 3$ °C rond de instelwaarde en de ingestelde waarde moet na maximaal 30 minuten bereikt zijn.	Ja	Ga verder met vraag 5
		Nee	Gebouw/klimaatype Bèta
Vraag 5	Zijn er mogelijkheden om de kleding af te stemmen op het weer en op het binnenklimaat (geen 'dress code')?	Ja	Gebouw/klimaatype Alfa
		Nee	Gebouw/klimaatype Bèta

(Voskamp et al., 2010)

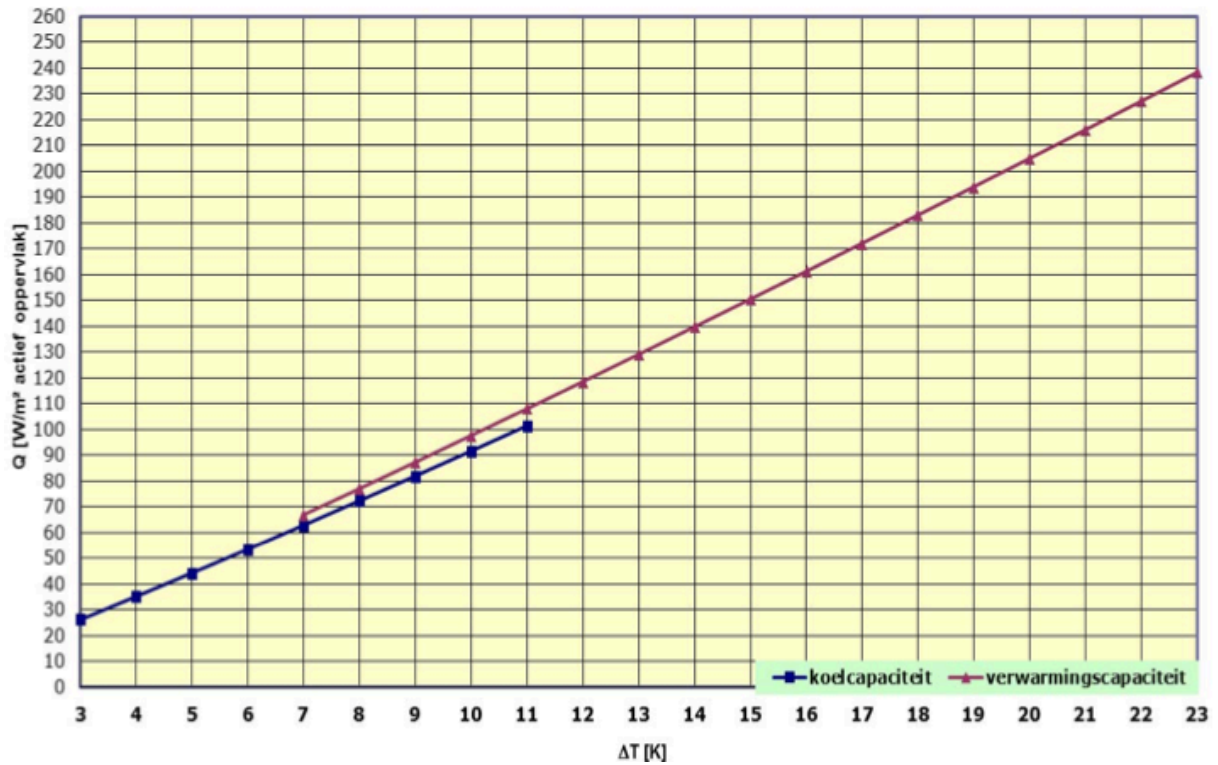


## Bijlage IV Technische details i-Climate

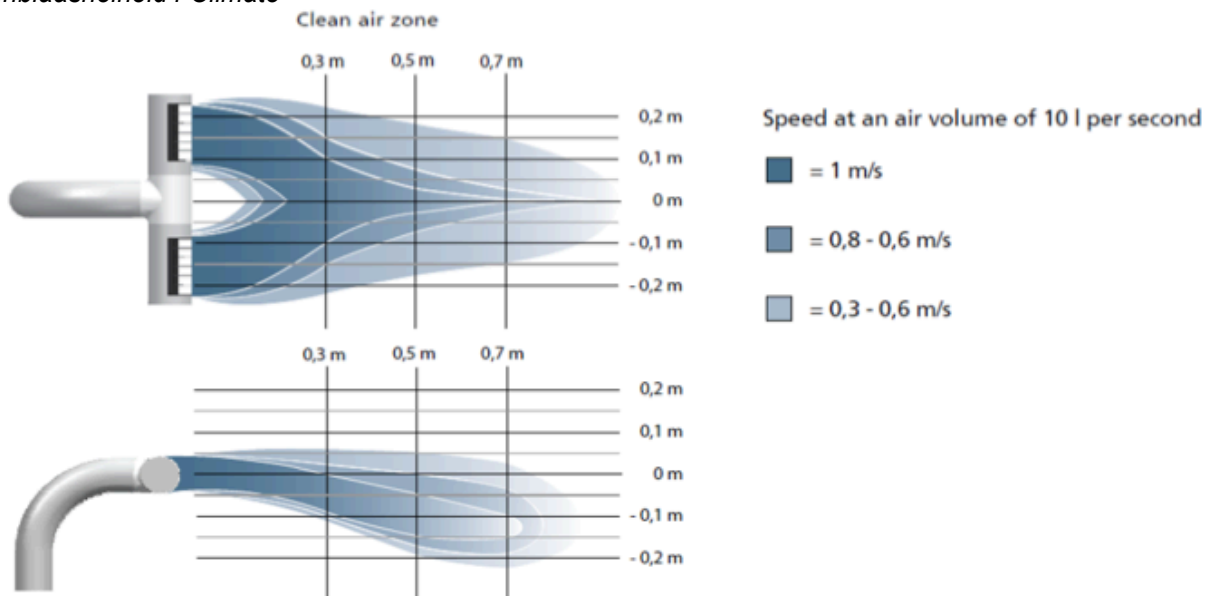


koel- en verwarmingscapaciteit

i-Climate  
stralingspanelen 1,32 m<sup>2</sup> per werkplek

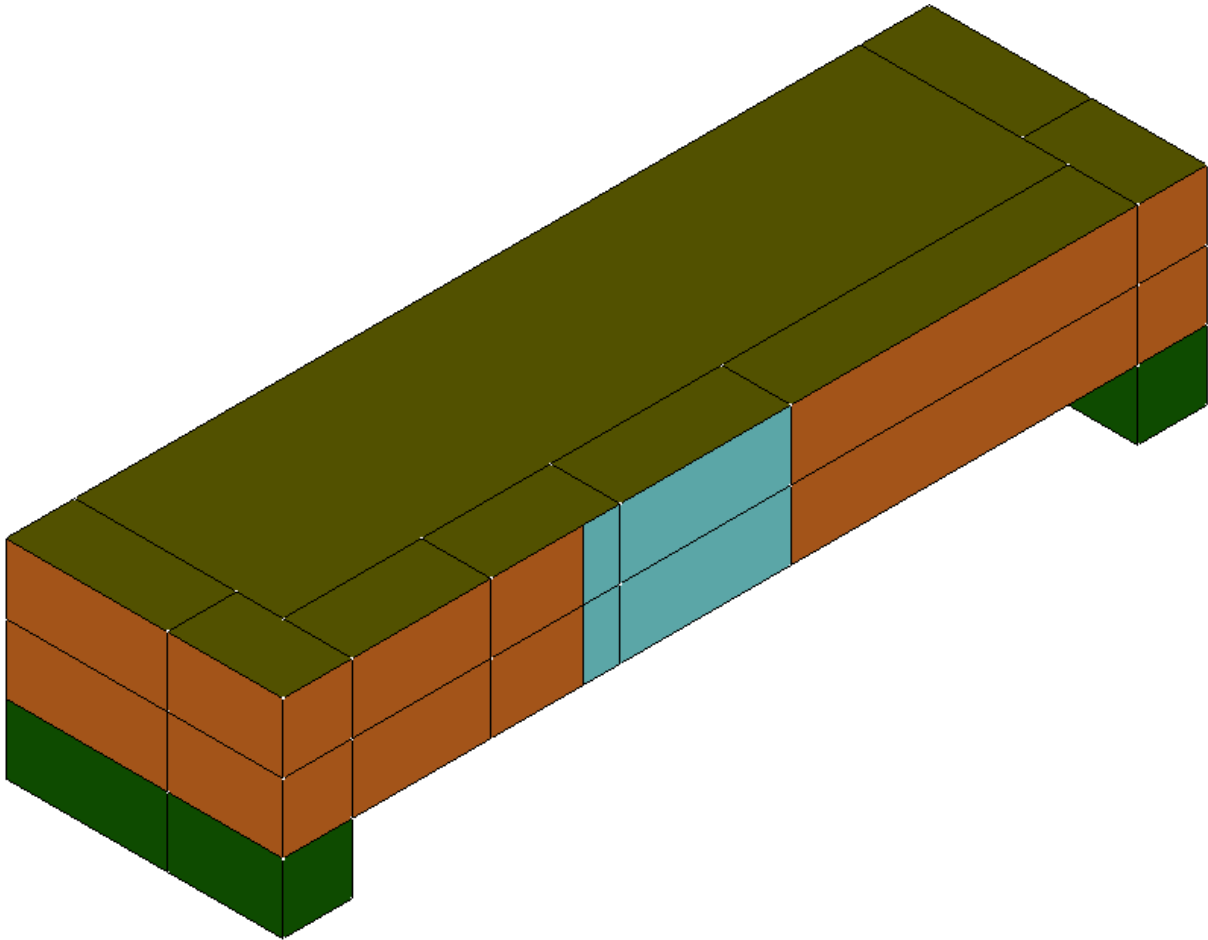


### Inblaasnelheid i-Climate



(Branderhorst, T., 2012b)

**Bijlage V Bink Builder 3D-model “E-sites”**



## Bijlage VIa Gegevens ventilatieberekening referentiegebouw

### Kantoorruimte per verdieping

Uitgangspunten		Toevoer	Afvoer
<i>Gegevens kantoorruimte</i>		<i>Luchttoevoer</i>	<i>Collectieve afzuiging</i>
Oppervlak	282.5 m <sup>2</sup>	q	18.75 dm <sup>3</sup> /s/p
Hoogte	3 m	q	22.5 m <sup>3</sup> /min
V	847.5 m <sup>3</sup>	[CO <sub>2</sub> ]	400 ppm
		qCO <sub>2</sub>	0.0090 m <sup>3</sup> /min
<i>op t=0</i>		<i>Respiratie</i>	
[CO <sub>2</sub> ]	400 ppm	Werknemers	20 -
VCO <sub>2</sub>	0.3390 m <sup>3</sup> /min	[CO <sub>2</sub> ]	40000 ppm
		q	0.1667 m <sup>3</sup> /min
Gebruikstijd	600 minuten per werkdag	CO <sub>2</sub>	0.0067 m <sup>3</sup> /min
Bezetting	80% 25 werknemers		
			q
			22.5 m <sup>3</sup> /min

### Bijeenkomststruimten per verdieping

Uitgangspunten		Toevoer	Afvoer
<i>Gegevens bijeenkomststruimten totaal</i>		<i>Luchttoevoer</i>	<i>Collectieve afzuiging</i>
Oppervlak	102 m <sup>2</sup>	q	11.2847 dm <sup>3</sup> /s/p
Hoogte	3 m	qtot	10.8333 m <sup>3</sup> /min
V	306 m <sup>3</sup>	[CO <sub>2</sub> ]	400 ppm
		qCO <sub>2</sub>	0.0043 m <sup>3</sup> /min
<i>op t=0</i>		<i>Respiratie</i>	
[CO <sub>2</sub> ]	400 ppm	Werknemers	16 -
VCO <sub>2</sub>	0.1224 m <sup>3</sup>	[CO <sub>2</sub> ]	40000 ppm
		q	0.1333 m <sup>3</sup> /min
Gebruikstijd	600 minuten per werkdag	CO <sub>2</sub>	0.0053 m <sup>3</sup> /min
Bezetting	80% 20 werknemers		
			q
			10.8333 m <sup>3</sup> /min

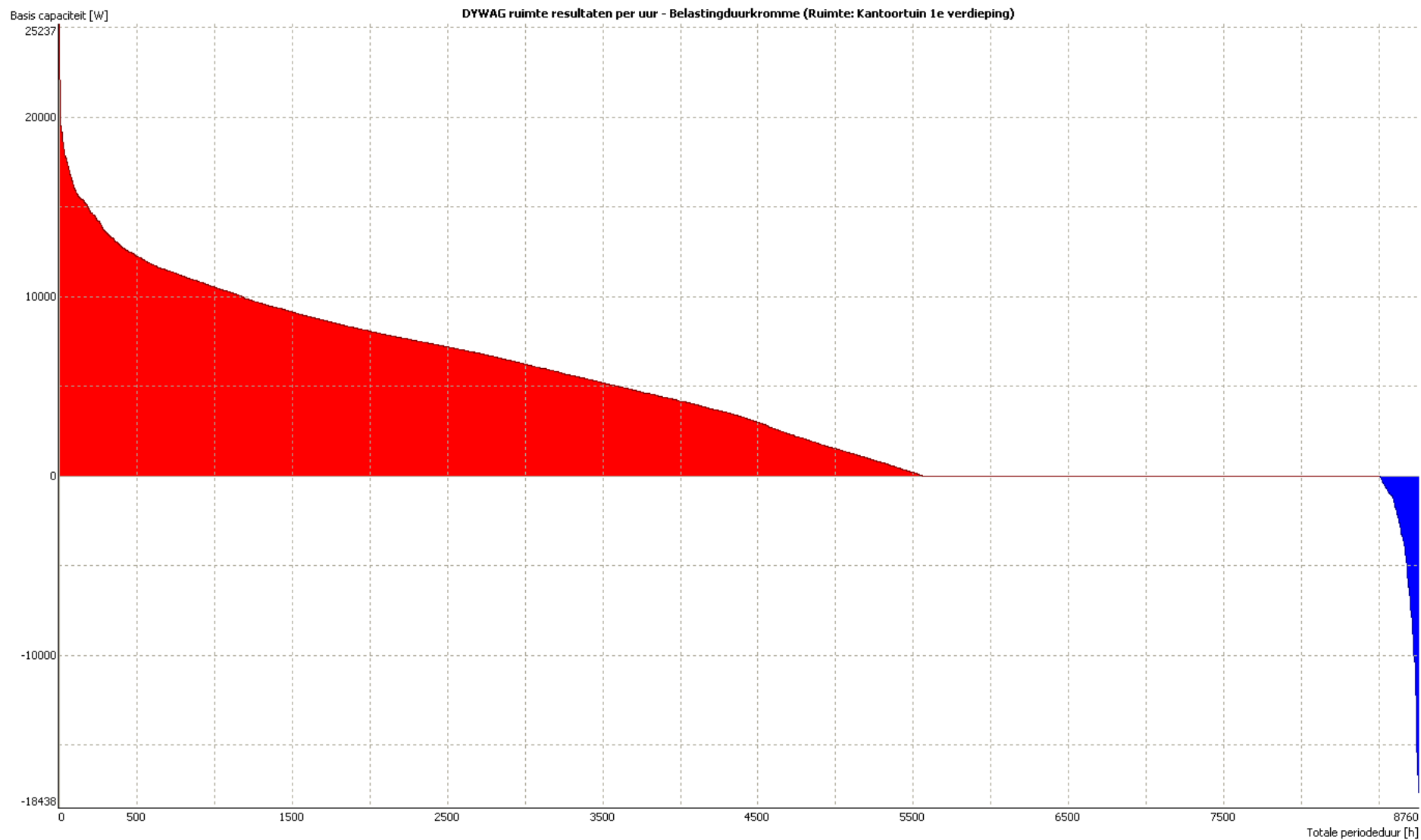


## Bijlage VIb Gegevens ventilatieberekening optimaal gebouw

Kantoortuin per verdieping

Uitgangspunten		Toevoer		Afvoer	
<i>Gegevens kantoortuin</i>					
Oppervlak	282.5 m <sup>2</sup>	<i>PV-systeem</i>		<i>Collectieve afzuiging</i>	
Hoogte	3 m	q	8 dm <sup>3</sup> /s/p	q	9.6 m <sup>3</sup> /min
V	847.5 m <sup>3</sup>	qtot	9.6 m <sup>3</sup> /min		
		[CO2]	400 ppm		
		qCO2	0.00384 m <sup>3</sup> /min		
<i>op t=0</i>					
[CO2]	400 ppm	<i>Respiratie</i>			
VCO2	0.3390 m <sup>3</sup>	Werknemers	20 -		
		[CO2]	40000 ppm		
		q	0.1667 m <sup>3</sup> /min		
Gebruikstijd	600 minuten per werkdag	qCO2	0.0067 m <sup>3</sup> /min		
Bezetting	80% 25 werknemers				

## Bijlage VIIa      Resultaat warmteberekening van kantoorruimte “E-sites”





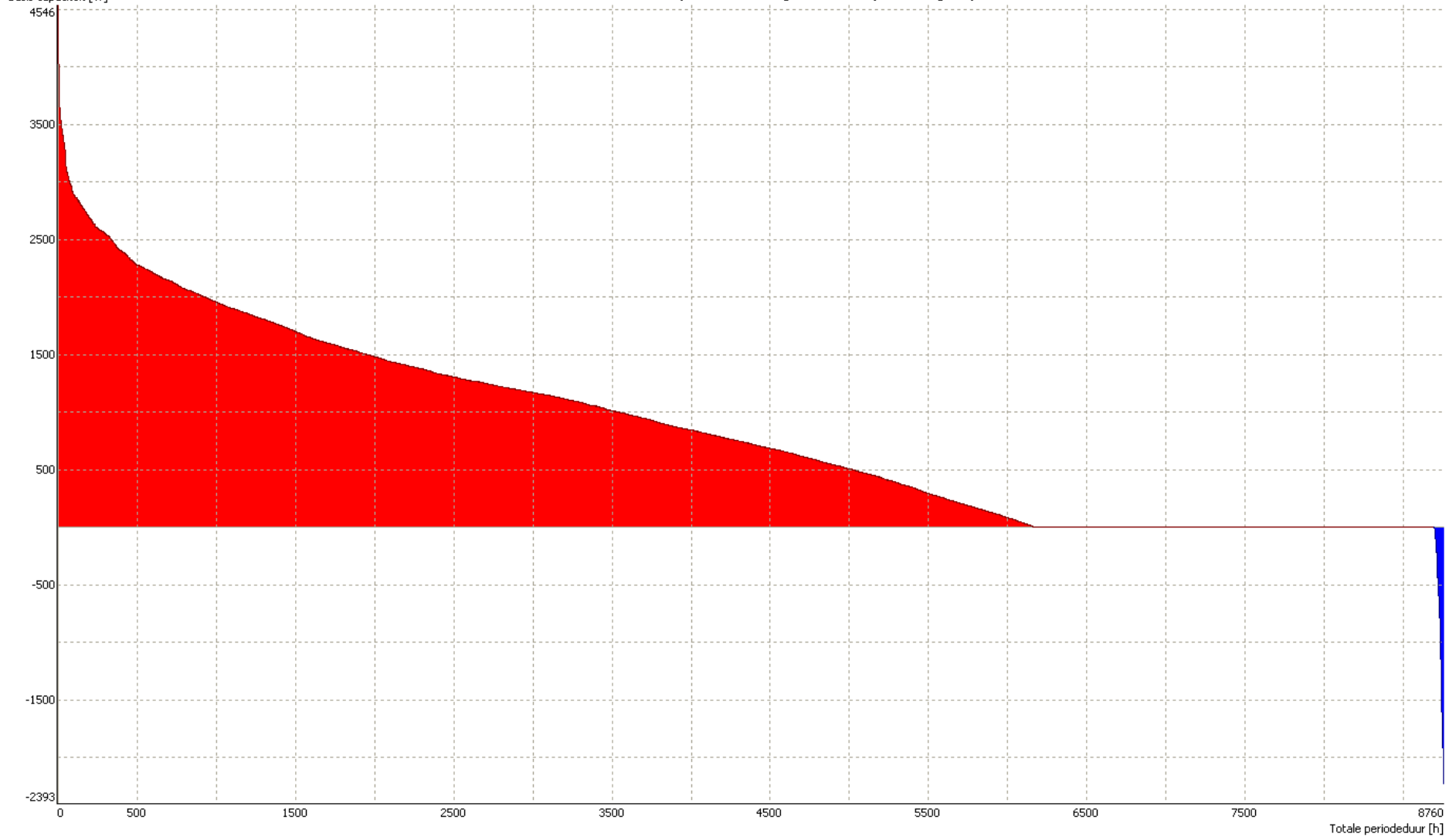
## Bijlage VIIb

## Resultaten warmteberekeningen bijeenkomstruimten "E-sites"

Big unit (45 m<sup>2</sup>)

Basis capaciteit [W]

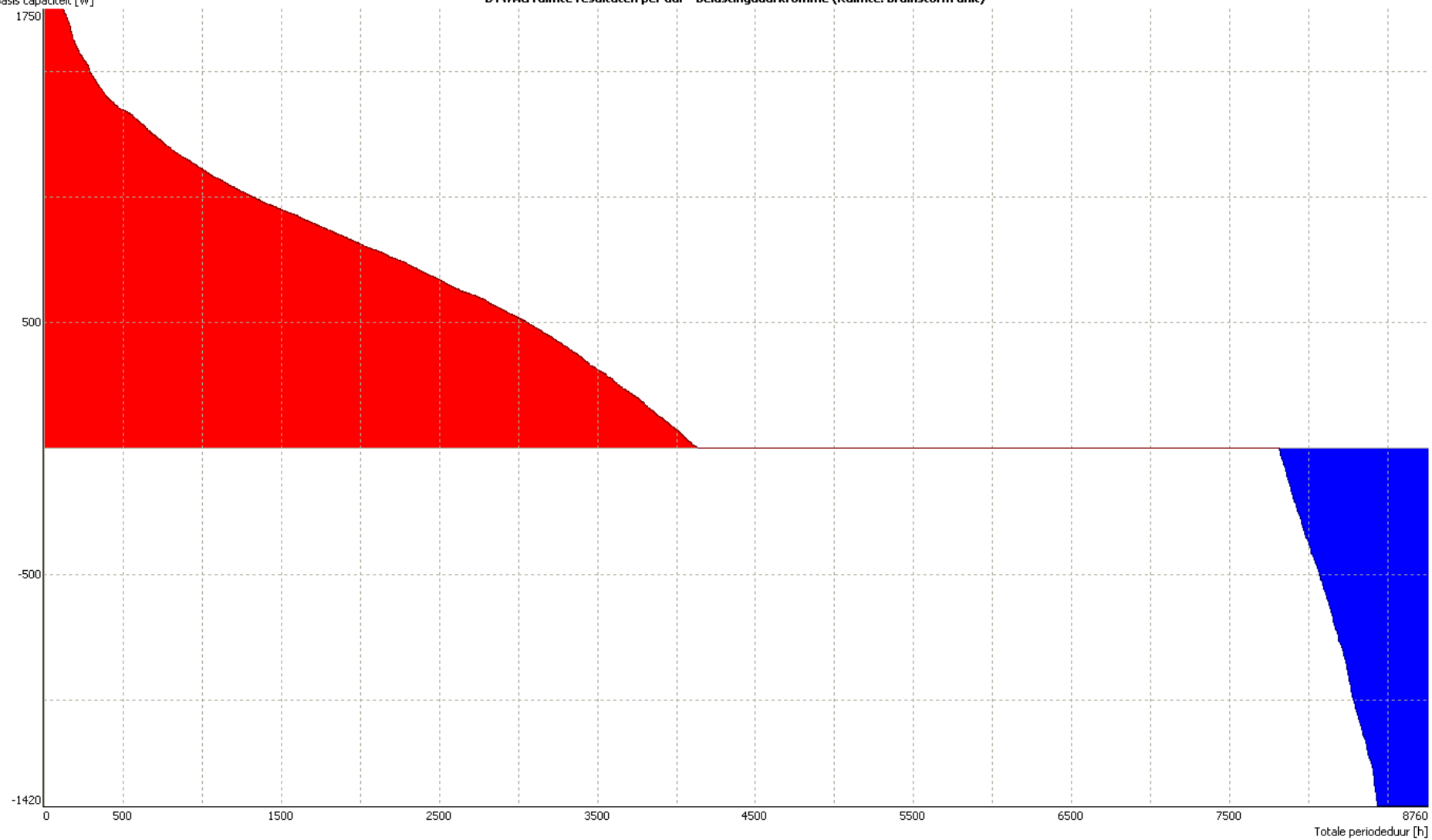
DYWAG ruimte resultaten per uur - Belastingduurkromme (Ruimte: Big unit)



### Brainstorm unit (22,2 m<sup>2</sup>)

Basis capaciteit [W]

DYWAG ruimte resultaten per uur - Belastingduurkromme (Ruimte: Brainstorm unit)

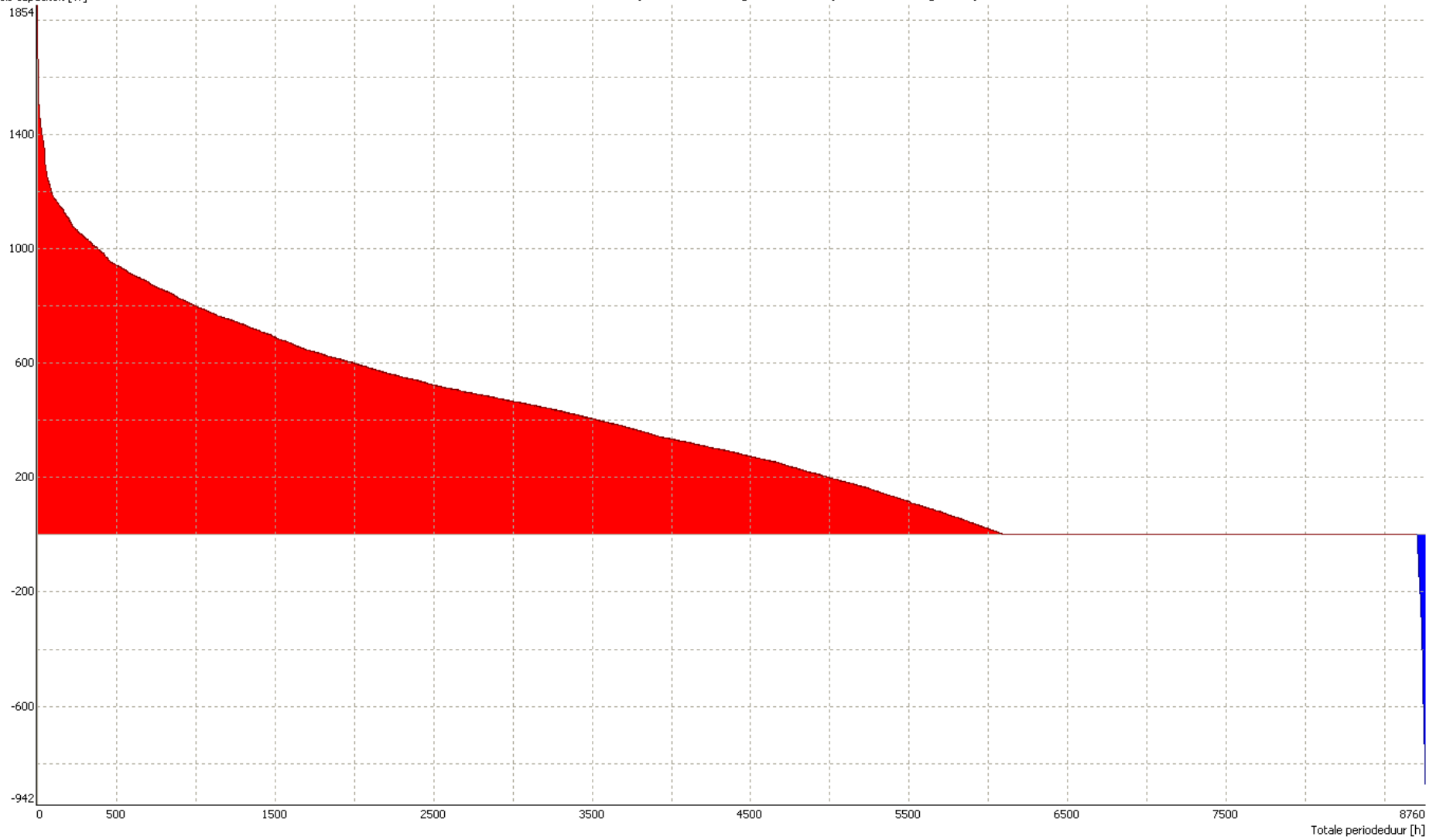




# Ontvangst unit (18 m<sup>2</sup>)

Basis capaciteit [W]

DYWAG ruimte resultaten per uur - Belastingduurkromme (Ruimte: Ontvangst unit)





### Sales unit (16,8 m<sup>2</sup>)

Basis capaciteit [W]

DYWAG ruimte resultaten per uur - Belastingduurkromme (Ruimte: Sales unit)

