

Onderzoeksrapport

Afstudeeropdracht Klimaatmodel bedskamer

Naam student: Klaas Groenewegen
Studentnr.: 09071601
School: Haagse Hogeschool te Delft
Opleiding: Werktuigbouwkunde
Stagebedrijf: Deerns Nederland B.V.
Stageperiode: 27-08-2012 t/m 20-12-2012

Datum: 20-12-2012

Voorwoord

Dit onderzoeksrapport is geschreven in het kader van de voltijdopleiding Werktuigbouwkunde aan de Haagse Hogeschool te Delft en betreft een afstudeeropdracht die is uitgevoerd voor het bedrijf Deerns Nederland B.V.

De afstudeeropdracht dient als 'meesterproef' voor de student waarmee aangetoond wordt of hij of zij beschikt over de competenties van een beginnende beroepsbeoefenaar met de titel Bachelor of Engineering.

Graag wil ik dhr. M. Timmer van het bedrijf Deerns bedanken voor de wekelijkse begeleiding die ik heb gekregen. Zijn kennis en visie met betrekking tot de opdracht hebben mij, met name in de eerste weken, goed op weg geholpen. Tevens wil ik dhr. F. Kouwenhoven, dhr. A. Stuit en dhr. H. Liberg bedanken voor hun hulp bij het oplossen van enkele vraagstukken die ten tafel zijn gekomen. Daarnaast bedank ik dhr. A. Taal van de Haagse Hogeschool voor het geven van feedback op de ingeleverde rapporten en het beschikbaar stellen van zijn hulp.

Rijswijk, december 2012

Inhoud

Samenvatting.....	5
Lijst van tabellen.....	6
Lijst van figuren	7
Verklarende woordenlijst	8
Symbolenlijst	9
1. Inleiding	10
2. Opdracht.....	11
2.1 Probleemstelling	11
2.2 Opdrachtoomschrijving.....	11
2.3 Pakket van eisen	11
2.4 Op te leveren producten.....	12
2.5 Stappenplan	12
3. Analyse van een bedskamer	13
3.1 Een bedskamer	13
3.2 Klimaatbeheersing	13
3.3 Energiebeheersing in een bedskamer	14
3.4 Processchema	15
3.5 Overschrijdingsuren	16
4. Luchtbehandeling	17
4.1 Mollier-diagram	17
4.2 Luchtbehandelingskast	19
4.2.1 Filteren	19
4.2.2 Verwarmen	20
4.2.3 Koelen en ontvochtigen	21
4.2.4 Bevochtigen	23
4.2.5 Bepaling uittrede temperatuur en luchtvochtigheid.....	26
4.3 Referentiegegevens	27
4.4 Warmteterugwinning.....	28
5. Warmtestromen	29
5.1 Interne warmtelast	29
5.2 Externe warmtelast.....	31
5.3 Transmissiewarmteverlies	32
5.4 Infiltratiewarmteverlies	32
6. Nabehandeling	33
7. Validatieberekeningen luchtbehandeling	34
7.1 Berekening wintersituatie: Luchtbehandeling.....	35

7.2 Berekening wintersituatie: Warmtestromen.....	35
7.3 Berekening wintersituatie: Nabehandeling.....	36
7.4 Berekening wintersituatie: Warmteterugwinning.....	37
7.5 Berekening zomersituatie: Luchtbehandeling.....	38
7.6 Berekening zomersituatie: Warmtestromen.....	38
7.7 Berekening zomersituatie: Nabehandeling.....	39
8. Kosten.....	40
8.1 Energiekosten.....	40
8.2 Validatieberekening energiekosten.....	42
8.3 Investeringskosten.....	43
8.4 Validatieberekening investeringskosten.....	45
9. Rekenmodel.....	47
10. Variantenanalyses.....	48
10.1 Oriëntatie van de gevel.....	49
10.2 Warmteweerstand van de gevel.....	50
10.3 Glaspercentage.....	52
10.4 Zontoetredingsfactor absoluut.....	53
10.5 Warmtedoorgangscoefficiënt van het glas.....	55
10.6 Luchtvochtigheid.....	57
10.7 Investeringskosten.....	59
11. Conclusie.....	62
12. Aanbevelingen.....	63
Literatuurlijst.....	64

Samenvatting

Gedurende de afstudeerstage bij het bedrijf Deerns is onderzoek verricht naar de invloed van bepaalde ontwerputgangspunten en ruimte-eisen die betrekking hebben op het energiegebruik in een bedskamer van een ziekenhuis. Dit onderzoek is verricht om inzicht te verkrijgen over de mate waarin een bepaalde ruimte-eis of bepaald ontwerputgangspunt meespeelt in de kosten die nodig zijn om de leefomgeving van een bedskamer op het gewenste niveau te houden.

Om een beeld te kunnen schetsen van de verschillende invloeden is een analyse uitgevoerd over een bedskamer en is geconstateerd welke factoren een rol spelen op onder andere de temperatuur en luchtvochtigheid in de kamer. Met behulp van deze factoren is vastgesteld welke warmtestromen aanwezig zijn in een ruimte.

Vervolgens is onderzoek verricht naar de luchtbehandeling in een luchtbehandelingskast. Hierbij zijn luchtcondities met elkaar vergeleken via een Mollier-diagram om op die manier inzicht te krijgen in de energiestromen in een luchtbehandelingskast. Aan de hand van de warmtestromen in de bedskamer en de energiestromen voor luchtbehandeling is een rekenmodel in Excel opgezet, waarmee aan de hand van diverse ontwerputgangspunten en ruimte-eisen, wordt berekend wat de kosten zullen zijn voor het creëren van een gewenste leefomgeving.

Met behulp van het rekenmodel zijn variantenanalyses uitgevoerd waardoor duidelijk is geworden wat voor invloed het aanpassen van een ontwerputgangspunt of ruimte-eis heeft op de kosten die nodig zijn om een gewenste leefomgeving te behouden. Aan de hand van de resultaten van de variantenanalyses is Deerns vervolgens beter in staat om opdrachtgevers in een vroeg stadium te kunnen adviseren.

Zo kan uit de uitkomsten van de variantenanalyses geconcludeerd worden dat een aanpassing op de zontoetredingsfactor (ZTA-waarde) de grootste invloed uitoefent op de energiekosten, gevolgd door het percentage glas aan de gevel. Dit zijn dus factoren die nauwlettend in de gaten gehouden dienen te worden in een vroege adviserende fase. Naast de zontoetredingsfactor en het percentage glas, zijn ook de oriëntatie van de gevel, de warmteweerstand van de gevel, de warmtedoorgangscoefficiënt van het glas en de luchtvochtigheid meegenomen in de analyses.

Wat de luchtvochtigheid betreft, is een lage relatieve luchtvochtigheid in de winter en een hoge relatieve luchtvochtigheid in de zomer de meest gunstige situatie als puur naar de energiekosten wordt gekeken. Naarmate deze eisen strenger worden, zullen de energiekosten stijgen.

Naast de energiekosten is ook naar investeringskosten gekeken. Zo kan aan de hand van het benodigde luchtdebiet een globale indicatie worden gegeven van de investeringskosten die betrekking hebben op de distributie van de energie; in dit geval de luchtkanalen waarin lucht wordt getransporteerd. Dit onderdeel is onderzocht, met als doel om aan te tonen in welke mate de investeringskosten stijgen bij een toenemend luchtdebiet. De uitkomst hiervan kan tevens worden gebruikt in een vroege adviserende fase naar de opdrachtgever toe.

Uiteindelijk kan met behulp van het rekenmodel en aan de hand van de eisen van de opdrachtgever, een indicatie worden gegeven van de benodigde energiekosten voor het creëren van de gewenste leefomgeving en het aantal uur dat de temperatuur bij die eisen wordt overschreden.

Lijst van tabellen

Tabel 1 Verklarende woordenlijst	8
Tabel 2 Symbolenlijst.....	9
Tabel 3 Invloedsfactoren bij luchtbevochtigers	23
Tabel 4 Voelbare warmteafgifte per persoon.....	29
Tabel 5 ZTA-waarden.....	31
Tabel 6 Prijzen van de naverwarmer en leidingen.....	43
Tabel 7 Prijzen van roosters en kanalen.....	45
Tabel 8 Vergelijking tussen verschillende oriëntaties bij standaard invoerwaarden	49
Tabel 9 Vergelijking tussen verschillende oriëntaties na verhoging luchtdebiet.....	49
Tabel 10 Vergelijking tussen verschillende Rc-waarden bij standaard invoerwaarden.....	50
Tabel 11 Vergelijking tussen verschillende Rc-waarden na verhoging luchtdebiet.....	51
Tabel 12 Vergelijking tussen verschillende percentages glas bij standaard invoerwaarden	52
Tabel 13 Vergelijking tussen verschillende percentages glas na verhoging luchtdebiet	52
Tabel 14 Vergelijking tussen verschillende ZTA-waarden bij standaard invoerwaarden	53
Tabel 15 Vergelijking tussen verschillende ZTA-waarden na verhoging luchtdebiet.....	54
Tabel 16 Vergelijking tussen verschillende U-waarden bij standaard invoerwaarden	55
Tabel 17 Vergelijking tussen verschillende U-waarden na verhoging luchtdebiet	55
Tabel 18 Verhouding luchtvochtigheid t.o.v. de energiekosten bij min. luchtvochtigheid	57
Tabel 19 Verhouding luchtvochtigheid t.o.v. de energiekosten bij max. luchtvochtigheid.....	58
Tabel 20 Investeringskosten bij verschillende luchtdebieten	59
Tabel 21 Totale investerings- en energiekosten (lagere debieten).....	60
Tabel 22 Totale investerings- en energiekosten (hogere debieten)	60
Tabel 23 Samenvatting resultaten variantenanalyses	62
Tabel 24 Literaire bronnen	64
Tabel 25 Digitale bronnen	64
Tabel 26 Geraadpleegde experts	64

Lijst van figuren

Figuur 1 Plattegrond bedskamer.....	13
Figuur 2 Black-box bedskamer	14
Figuur 3 Processchema.....	15
Figuur 4 Behaaglijkheidsgebied voor een bedskamer in een ziekenhuis	17
Figuur 5 Black-box luchtbehandelingskast.....	19
Figuur 6 Verwarmproces in het Mollier-diagram.....	20
Figuur 7 Droog koelproces in het Mollier-diagram	21
Figuur 8 Nat koelproces in het Mollier-diagram	22
Figuur 9 Stoombevochtiging in het Mollier-diagram	23
Figuur 10 Ts-diagram voor stoombevochtiging.....	24
Figuur 11 Grenzen in het Mollier-diagram	26
Figuur 12 Buitenluchtcondities volgens NEN 5060	27
Figuur 13 Principewerking warmtewiel.....	28
Figuur 14 Factoren die invloed hebben op de inblaastemperatuur	33
Figuur 15 Berekende waarden voor LBK in een wintersituatie.....	35
Figuur 16 Berekende waarden voor de warmtestromen.....	36
Figuur 17 Berekende waarden voor LBK in een zomersituatie	38
Figuur 18 Berekende waarden voor de warmtestromen.....	39
Figuur 19 Installatie in de bedskamer	43
Figuur 20 Invoerblad rekenmodel Excel.....	47
Figuur 21 Energiekosten bij diverse oriëntaties.....	50
Figuur 22 Energiekosten bij diverse Rc-waarden	51
Figuur 23 Energiekosten bij diverse percentages glas	53
Figuur 24 Energiekosten bij diverse ZTA-waarden.....	54
Figuur 25 Energiekosten bij diverse U-waarden	56
Figuur 26 Verhouding luchtvochtigheid t.o.v. de energiekosten bij min. luchtvochtigheid	57
Figuur 27 Verhouding luchtvochtigheid t.o.v. de energiekosten bij max. luchtvochtigheid	58
Figuur 28 Totale kosten bij diverse luchtdebieten.....	61

Verklarende woordenlijst

Tabel 1 Verklarende woordenlijst

Begrip	Omschrijving
Bedskamer	Een ruimte in een ziekenhuis waar patiënten herstellen na een operatie of behandeling.
Levensduurkosten	De totale kosten die gerelateerd zijn aan het gebruik van het product; derhalve afschrijvingen, onderhouds- en exploitatiekosten omvattend.
Variantenanalyse	Voorspellingen op grond van variatie in veronderstellingen.
Voelbare warmte	Energie in de vorm van warmte waarbij een temperatuurverandering plaats vindt die direct voelbaar is voor personen.
Latente warmte	Energie in de vorm van warmte waarbij geen directe temperatuurverandering, plaats vindt, maar bijvoorbeeld de luchtvochtigheid verandert.
Leefomgeving	Fysieke omgeving in woon- en verblijfssituatie.
Klimaatbeheersing	Het reguleren van de toestand van lucht in een bepaald gebied.
Interne warmtelast	Warmteproductie door factoren die zich in de betreffende ruimte bevinden.
Externe warmtelast	Warmteproductie door factoren die zich buiten de betreffende ruimte bevinden.
LBK	Luchtbehandelingskast.
Warmteweerstand	Het warmte-isulerend vermogen van een materiaal laag.
WTW	Warmteterugwinning.
ZTA-waarde	Zontoetredingsfactor absoluut.
U-waarde	Warmtedoorgangscoefficiënt

Symbolenlijst

Tabel 2 Symbolenlijst

Symbol	Dimensie	Omschrijving
W	J/s	Vermogen
T	K of °C	Temperatuur
x	kg/kg	Absolute luchtvochtigheid
P_b	Pa	Atmosferische druk
P_d	Pa	Partiële waterdampdruk
P_{dv}	Pa	Verzadigde dampspanning
φ	%	Relatieve luchtvochtigheid
θ_l	K of °C	Drogeboltemperatuur
ρ	kg/m ³	Dichtheid
H	kJ/kg	Enthalpie
s	kJ/kg*K	Entropie
C_p	kJ/kg*K	Soortelijke warmte
Q	J/s	Warmtestroom
$\dot{Q}_m$	kg/s	Massastroom
Δ	-	Verschil
$\ln$	-	Natuurlijke logaritme
BW	MJ/m ³	Calorische bovenwaarde
d	m	Binnendiameter
A	m ²	Oppervlakte
η	-	Rendement
π	-	Pi
b	m	Breedte
$\dot{Q}_v$	m ³ /s	Volumestroom
v	m/s	Snelheid
ϕ_{zg}	W	Intredende warmte v/d zon
z	-	Zonweringsfactor
ZTA	-	Zontoetredingsfactor
q_{zg}	W/m ²	Totale zoninstraling
T_{toe}	°C	Aanvoerluchttemperatuur
T_{ret}	°C	Retourluchttemperatuur
T_u	°C	Buitenluchttemperatuur
X_{toe}	kg/kg	Vochtgehalte aanvoerlucht
X_{ret}	kg/kg	Vochtgehalte retourlucht
X_u	kg/kg	Vochtgehalte buitenlucht
$Q_{bedskamer}$	W	Totale warmte in bedskamer
Q_{intern}	W	Interne warmtelast
Q_{extern}	W	Externe warmtelast
$Q_{inblaas}$	W	Warmtevermogen inblaaslucht
$Q_{transmissie}$	W	Transmissiewarmteverlies
$Q_{infiltratie}$	W	Infiltratiewarmteverlies
$q_{w,verlichting}$	W	Warmteafgifte verlichting

1. Inleiding

Naar de keuze voor een bepaalde klimaatinstallatie wordt steeds kritischer gekeken. De reden hiervan is dat de eisen die aan een leefomgeving worden gesteld steeds strenger worden en de opdrachtgever toch lage aanschaf- en levensduurkosten wenst. In een vroege fase tijdens het ontwerpproces zijn nog niet veel details bekend. Toch zullen juist dan keuzes gemaakt moeten worden ten aanzien van de installatie.

Ingenieursbureau Deerns, waarover een beschrijving is te vinden in bijlage 1, adviseert haar opdrachtgevers in de vroege ontwerpfase op basis van kentallen, maar ook op basis van simulaties en berekeningen. Voor een veel voorkomende ruimte, bijvoorbeeld een bedskamer van een ziekenhuis, is het van belang inzicht te verwerven welke invloeden ontwerputgangspunten en ruimte-eisen hebben op het energiegebruik van deze ruimte. Op basis van variantenanalyses is Deerns vervolgens beter in staat opdrachtgevers hieromtrent te adviseren.

Alle invloeden die betrekking hebben tot de leefomgeving van een bedskamer zullen geanalyseerd worden. Denk hierbij aan de interne en externe invloeden die een rol spelen op onder andere de temperatuur en luchtvochtigheid in de kamer. Aan de hand van de gewenste leefomgeving wordt bepaald op welke manier deze op een zo efficiënt mogelijke wijze bereikt kan worden.

In dit rapport zal duidelijk worden gemaakt hoe het proces is verlopen vanaf de probleemstelling tot de eindconclusie. Zo zal te vinden zijn op welke manier geanalyseerd is en hoe diverse onderzoeken, zoals die naar luchtbehandeling en de kostenbepaling, hebben plaatsgevonden. Aan de hand van variantenanalyses zijn conclusies getrokken over de invloeden die bepaalde factoren uitoefenen op de leefomgeving en de energiekosten.

2. Opdracht

In dit hoofdstuk zullen de probleemstelling en opdrachtoomschrijving worden omschreven en toegelicht. Vervolgens volgt een pakket van eisen dat de opdrachtgever stelt aan het eindproduct en een lijst met producten die opgeleverd dienen te worden aan het einde van de afstudeerperiode. In een stappenplan wordt globaal omschreven hoe te werk wordt gegaan.

2.1 Probleemstelling

De keuze voor een bepaalde klimaatinstallatie is afhankelijk van de gewenste eisen die gesteld worden aan de leefomgeving, wettelijk bepaalde eisen en de kosten van een dergelijke installatie. In een vroege fase tijdens het ontwerpproces zijn nog niet veel details bekend. Toch zullen juist dan keuzes gemaakt moeten worden ten aanzien van de installatie. Deerns adviseert haar opdrachtgevers op basis van kentallen, maar ook op basis van simulaties en berekeningen. Voor een veel voorkomende ruimte, bijvoorbeeld een bedskamer van een ziekenhuis, is het van belang inzicht te verwerven welke invloeden ontwerpuitgangspunten en ruimte-eisen hebben op het energiegebruik van deze ruimte. Op basis van variantenanalyses is Deerns vervolgens beter in staat opdrachtgevers hieromtrent te adviseren.

2.2 Opdrachtoomschrijving

Analyseer alle invloeden die betrekking hebben tot de leefomgeving in een bedskamer. Denk hierbij aan de interne en externe invloeden die een rol spelen op onder andere de temperatuur en luchtvochtigheid in de kamer. Bepaal aan de hand van de gewenste leefomgeving op welke manier deze op een zo efficiënt mogelijke wijze bereikt kan worden.

De opdrachtoomschrijving kan daarmee als volgt samengevat worden:

‘Ontwerp een rekenmodel dat betrekking heeft tot de leefomgeving van een bedskamer in een ziekenhuis en neem de energiekosten hier in mee. Op basis van de uitkomsten moet een advies kunnen worden gegeven aan de opdrachtgever wat betreft ontwerpuitgangspunten en ruimte-eisen. Het model moet tevens dienen om financiële gevolgen van keuzes in kwaliteit van leefomgeving te onderbouwen.’

Breidt het model zodanig uit dat deze eenvoudig aangepast kan worden naar elke andere bedskamer met één gevelzijde en neem daarbij de gewenste leefomgeving en de ontwerpuitgangspunten als input en het energiegebruik als output.

2.3 Pakket van eisen

Aan dit project zijn verschillende eisen verbonden die door de opdrachtgever Deerns zijn vastgesteld. In het uiteindelijk op te leveren product, dat op 20 december 2012 aangeleverd wordt, moeten de volgende punten worden meegenomen:

- Alle interne en externe invloeden die een rol spelen op de leefomgeving van een bedskamer.
- De energiekosten die nodig zijn voor het bereiken en behouden van een gewenste leefomgeving.
- Een uitleg over de opbouw van het rekenmodel in Microsoft Excel.
- Een gebruiksvriendelijk rekenmodel dat eenvoudig gebruikt moet kunnen worden door medewerkers van Deerns.

2.4 Op te leveren producten

Gedurende de afstudeerperiode zullen de volgende onderdelen worden opgeleverd aan de opdrachtgever Deerns:

- Eén of meerdere tussenrapportages met daarin de voortgang van het project.
- Een volledig uitgewerkt onderzoeksrapport aan het einde van de afstudeerperiode.
- Een goed werkend rekenmodel in Excel dat aan de hand van de gewenste eisen aan de leefomgeving en ontwerputgangspunten, de energiekosten en het aantal overschrijdingsuren weergeeft.

2.5 Stappenplan

Om tot een goed eindproduct te kunnen komen zal structureel gewerkt moeten worden. Hiervoor is een stappenplan opgesteld dat gevolgd zal worden:

- Als eerst zal de bedskamer geanalyseerd worden. Op die manier wordt duidelijk met welke facetten rekening gehouden moet worden.
- Vervolgens wordt grondig onderzoek verricht naar die verschillende facetten en zal worden aangegeven in welke mate deze een rol spelen.
- Aan de hand van het onderzoek zal met behulp van de nodige formules een aantal vergelijkingen worden opgesteld voor de energiestromen in een bedskamer, waarmee uiteindelijk gewerkt gaat worden in een rekenmodel.
- Vervolgens wordt aandacht besteed aan diverse kosten, waarbij onderzoek wordt gedaan naar investeringskosten en de energiekosten.
- Alle benodigde formules en vergelijkingen worden verwerkt in het programma Excel en er zal een gebruiksvriendelijk model worden gebouwd waarmee, door één of meerdere variabelen aan te passen, geconcludeerd kan worden welke gevolgen die aanpassing heeft op de energiekosten en het aantal toegestane overschrijdingsuren.
- Aan de hand van het rekenmodel zullen variantenanalyses worden uitgevoerd waarmee aangetoond kan worden welke invloed verschillende factoren hebben op de investerings- en energiekosten.

3. Analyse van een bedskamer

Om goed te kunnen begrijpen wat er gedurende de afstudeerstage uitgevoerd moet worden, is het belangrijk om een analyse uit te voeren. Door deze analyse uit te voeren ontstaat een duidelijker beeld van de doelstelling. Tijdens de analyse is een bedskamer onder de loop genomen en is vastgesteld welke factoren een rol spelen bij de energiehuishouding.

3.1 Een bedskamer

Een bedskamer is een ruimte in een ziekenhuis waar patiënten verblijven en herstellen na een operatie of behandeling, alvorens zij naar huis mogen. Bedskamers zijn er in verschillende afmetingen. Afhankelijk van het aantal personen dat er in kan verblijven, wordt het ook wel een 1-bedskamer, 2-bedskamer of 4-bedskamer genoemd. Tijdens het onderzoek, dat gedurende de afstudeerperiode is uitgevoerd, is de 1-bedskamer als referentie gebruikt.

Een 1-bedskamer is voorzien van minstens een zorgterminal met verpleegbed, een eenvoudig aanrecht met wasbak en een sanitaire ruimte. De oppervlakte van de kamer bedraagt ongeveer 17 m², exclusief de oppervlakte van de sanitaire ruimte. In figuur 1 is een plattegrond te zien van een 1-bedskamer. Over het algemeen is een bedskamer gepositioneerd met één zijde aan de gevel, welke voorzien is van glas. De overige zijden worden begrensd door aanliggende kamers of andere ruimten. Een bedskamer wordt, in tegenstelling tot bijvoorbeeld een kantoorgebouw, 7 dagen per week, 365 dagen per jaar in gebruik genomen en daarom zal de klimaatinstallatie hier op geregeld moeten worden.

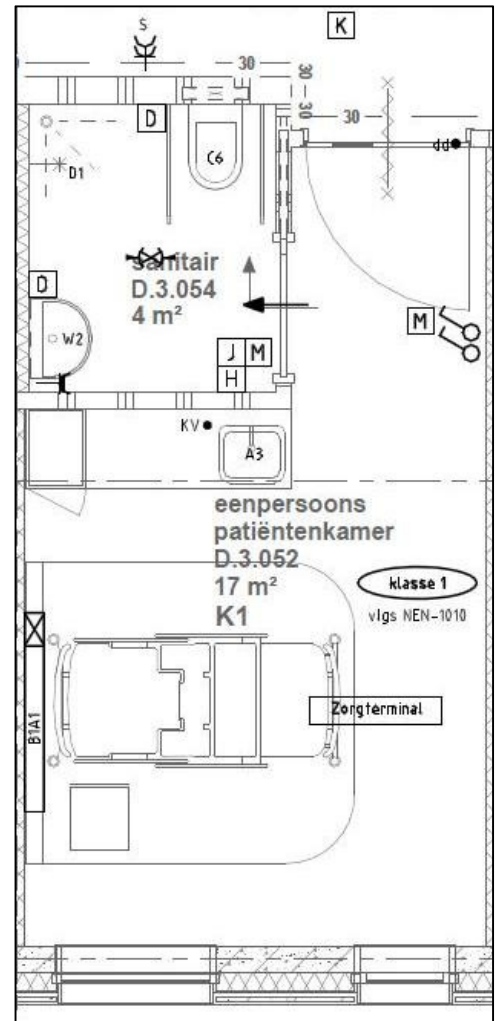
3.2 Klimaatbeheersing

Bij een bedskamer worden, net als bij andere ruimten in een ziekenhuis of ander gebouw, eisen gesteld aan de leefomgeving waarin de persoon, in dit geval een patiënt, zich bevindt. Zo is het belangrijk dat de temperatuur en luchtvochtigheid in de ruimte op een voldoende niveau zijn. Om dit goed te kunnen regelen, zal gebruik gemaakt moeten worden van een klimaatinstallatie.

In hoofdlijn wordt er onderscheid gemaakt in vier installatietypen ^[1]:

- Verwarming + natuurlijke ventilatie.
- Verwarming + mechanische ventilatie.
- Verwarming + mechanische ventilatie + beperkte koeling.
- Volledige luchtbehandeling.

Voor het rekenmodel, dat gedurende de afstudeerperiode wordt ontworpen, is in overeenstemming met de opdrachtgever besloten dat de investerings- en energiekosten worden berekend aan de hand van een volledige luchtbehandeling om op die manier inzicht te krijgen in de invloeden die een rol spelen op de leefomgeving.

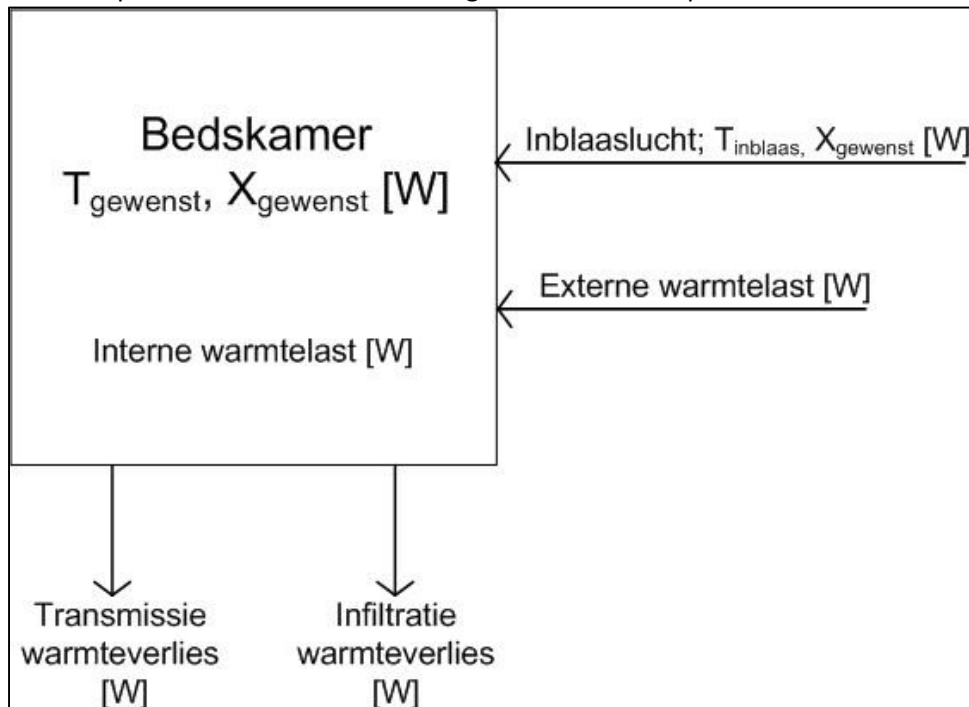


Figuur 1 Plattegrond bedskamer

3.3 Energiebeheersing in een bedskamer

Om er voor te kunnen zorgen dat de temperatuur en luchtvochtigheid in de bedskamer op een gewenst niveau blijven, is het belangrijk om te weten hoe de energiestromen in de ruimte verlopen. Hiervoor zullen alle invloeden die betrekking hebben op de temperatuur en luchtvochtigheid onderzocht moeten worden, om vervolgens een energiebalans op te kunnen stellen.

Zo zijn er invloeden van binnenuit de kamer die zorgen voor energietoevoer. Deze worden de interne factoren genoemd. Naast de interne factoren zijn er ook invloeden van buitenaf die zorgen voor energietoevoer; de externe factoren (zoninstraling). Doormiddel van transmissie door wanden en infiltratie vindt energieoverdracht plaats. Ventilatieverlies treedt niet op bij een volledige luchtbehandeling. In figuur 2 is een bedskamer als black-box aangenomen en zijn de energiestromen aangegeven. Deze situatie betreft een wintersituatie, waarbij de buitentemperatuur lager is dan de gewenste binnentemperatuur en om die reden warmtetransmissie naar buiten optreedt. Belangrijk om te realiseren is dat de warmtelasten alleen direct invloed uitoefenen op de temperatuur in de ruimte (voelbare warmte) en niet op de luchtvochtigheid (latente warmte). Dat betekent dat de conditie van de inblaaslucht de gewenste luchtvochtigheid moet bevatten en deze vanaf dit punt als constante wordt aangehouden. De temperatuur van de inblaaslucht is variabel.



Figuur 2 Black-box bedskamer

Aan de hand van bovenstaande kan het volgende geconcludeerd worden:

'Het voelbare warmtevermogen van de toegevoerde ventilatielucht moet gelijk zijn aan het warmtevermogen van de interne en externe factoren, de transmissie en infiltratie bij elkaar opgeteld, waarbij gezorgd moet worden dat de temperatuur en luchtvochtigheid in de kamer op het gewenste niveau blijven.'

$$Q_{\text{bedskamer}} = (Q_{\text{intern}} + Q_{\text{extern}} + Q_{\text{transmissie}} + Q_{\text{infiltratie}}) - Q_{\text{inblaas}}$$

$$Q_{\text{bedskamer}} = \text{totale warmtestroom in de bedskamer [W]}$$

$$Q_{\text{intern}} = \text{interne warmtelast [W]}$$

$$Q_{\text{extern}} = \text{externe warmtelast [W]}$$

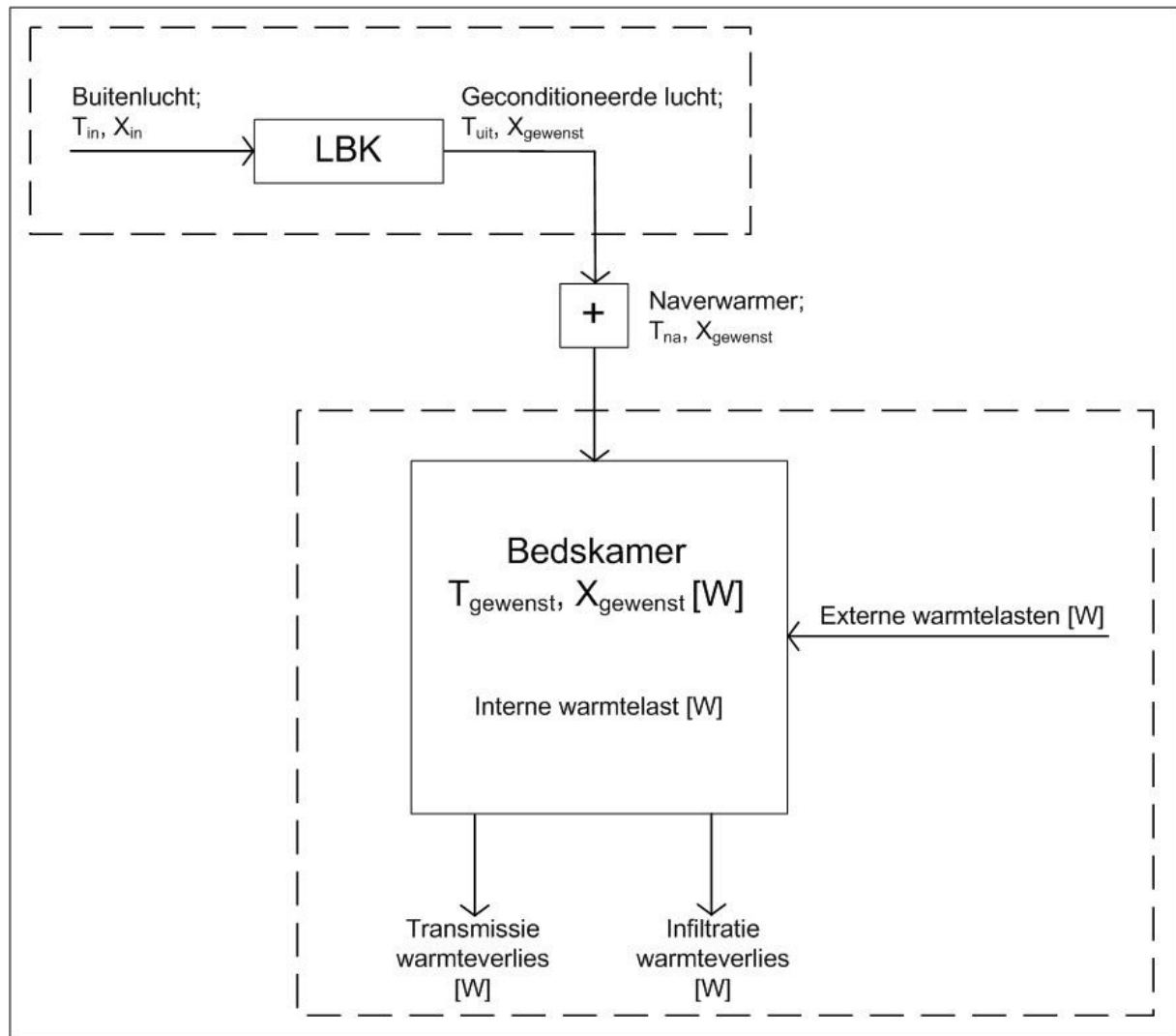
$$Q_{\text{transmissie}} = \text{transmissiewarmteverlies [W]}$$

$$Q_{\text{infiltratie}} = \text{infiltratiewarmteverlies [W]}$$

$$Q_{\text{inblaas}} = \text{warmtevermogen van de inblaaslucht [W]}$$

3.4 Processchema

Nu globaal bekend is geworden welke thermische energiestromen in een bedskamer plaatsvinden, kan aan de hand van een processchema worden aangegeven welk proces doorlopen zal moeten worden om te komen tot het gewenste resultaat; in dit geval een gewenste temperatuur en luchtvochtigheid in de bedskamer. Om de thermische energiebalans op peil te houden wordt gebruik gemaakt van een volledige luchtbehandeling. Hierbij wordt lucht via een luchtbehandelingskast aangevoerd. In figuur 3 staat het proces dat doorlopen moet worden. Dit proces bevat twee hoofdprocessen, namelijk de luchtbehandeling in de luchtbehandelingskast en de klimaatbeheersing in de bedskamer. Hiertussen zal een extra nabehandeling voor lucht plaatsvinden.



Figuur 3 Processchema

Beide hoofdprocessen zullen in dit rapport volledig onderzocht en uitgewerkt worden. Eerst zal de luchtbehandeling in de luchtbehandelingskast aan bod komen. Vervolgens wordt uitgebreid onderzoek verricht naar de warmtestromen die plaatsvinden in een bedskamer. Aan de hand van deze gegevens kan worden bepaald hoeveel energie het kost om de temperatuur en luchtvochtigheid op het gewenste niveau te houden. Vervolgens zal onderzocht worden wat voor invloed de hoeveelheid benodigde energie heeft op de investerings- en energiekosten.

3.5 Overschrijdingsuren

Bij het bepalen van de benodigde energie zal rekening worden gehouden met zogenaamde overschrijdingsuren. Overschrijdingsuren zijn uren waarop de gewenste temperatuur overschreden wordt. Dit zou kunnen komen door grote warmtelasten in combinatie met weinig koelvermogen. Door een eis te stellen aan het aantal uur dat de temperatuur overschreden mag worden, kunnen piekbelastingen, waarbij de buitentemperatuur erg hoog ligt en veel zoninstraling plaats vindt, 'geaccepteerd' worden en op die manier zorgen dat het energieverbruik dat nodig is om te koelen beperkt wordt. Het aantal uur dat de temperatuur overschreden mag worden is afhankelijk van meerdere factoren, waaronder de tijdsduur dat mensen aanwezig zijn in een ruimte. Voor meer informatie over de bepaling van het aantal toegestane overschrijdingsuren, raadpleeg de norm NEN-EN-ISO 7730.

Voor kantoren geldt dat de temperatuur jaarlijks 150 uur overschreden mag worden^[1]. Voor ziekenhuizen is het aantal overschrijdingsuren niet gedefinieerd. Om dit aantal vast te leggen, wordt een eenvoudige vergelijking uitgevoerd.

In een kantoor bevinden zich gemiddeld 9 uur per dag, 5 dagen in de week, mensen. Dit komt neer op 45 uur per week. Gedurende deze 45 uur is de warmte invloed van buitenaf (zoninstraling en temperatuur) het grootst.

In een ziekenhuis bevinden zich gemiddeld 24 uur per dag, 7 dagen in de week, patiënten. Dit komt neer op 168 uur per week. Gedurende deze 168 uur is de warmte invloed van buitenaf tevens op 45 uur het grootst, aangezien 's-avonds de temperatuur daalt en 's-nachts geen zoninstraling plaats vindt. Om die reden zal voor het bepalen van het aantal toegestane overschrijdingsuren in een ziekenhuis ook gebruik worden gemaakt van 9 uur per dag. Echter, het aantal dagen dat er gebruik wordt gemaakt van een kamer is 7 in plaats van 5 per week.

Aan de hand van deze gegevens wordt het aantal toegestane overschrijdingsuren voor ziekenhuizen bepaald. Uitgaande van 150 overschrijdingsuren per jaar voor kantoren, zal voor ziekenhuizen het aantal toegestane overschrijdingsuren uitkomen op:

$$(150 \cdot 7)/5 = 210$$

Gedurende een jaar, dat 8760 uur bevat, mag de temperatuur in een bedskamer 210 uur overschreden worden. Deze waarde zal gehanteerd worden in de berekeningen die worden uitgevoerd in dit rapport.

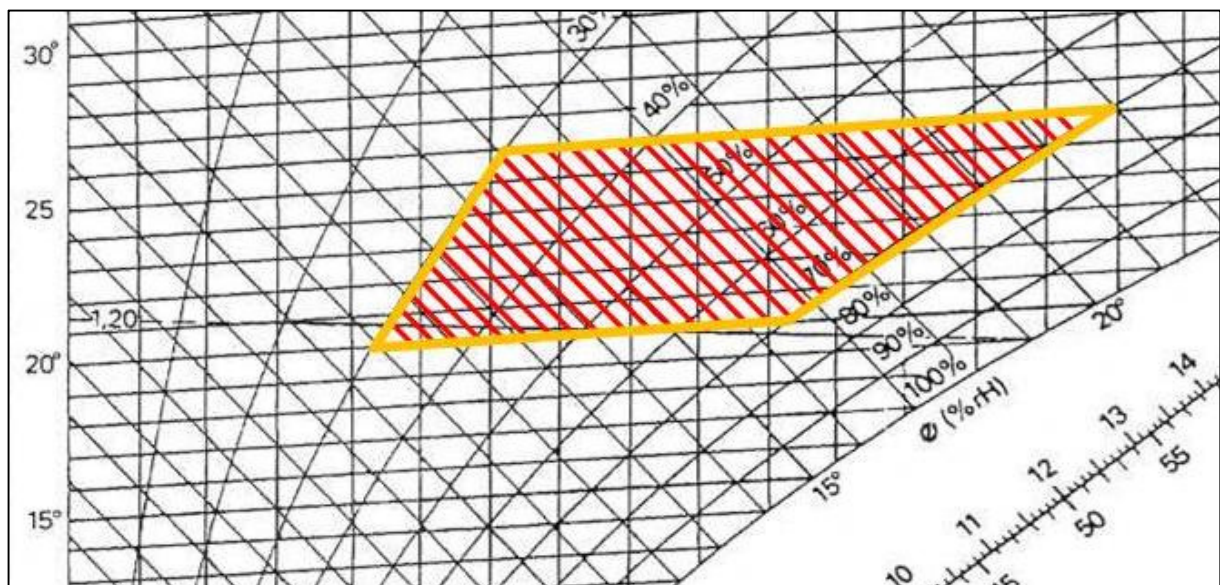
4. Luchtbehandeling

Luchtbehandeling vindt plaats om verontreinigingen uit de lucht te halen en om ruimtes thermisch behaaglijk te maken. De thermische behaaglijkheid is afhankelijk van de temperatuur en de luchtvochtigheid en kan worden omvat als gebied, waar de grenzen worden afgebakend door een minimale en een maximale temperatuur en een minimale en maximale relatieve luchtvochtigheid. Deze grenzen worden bepaald aan de hand van eisen die zijn gesteld aan een (leef)omgeving. Voor de utiliteitsbouw bijvoorbeeld, ligt het behaaglijkheidsgebied over het algemeen tussen de 20 en 24 °C en de relatieve luchtvochtigheid tussen de 30 en 65% ^[1]. Zo wordt voor een bedskamer van een ziekenhuis, afhankelijk van de eisen van de opdrachtgever, een gebied gehanteerd dat ligt tussen de 20 en 26 °C en 30 en 70% luchtvochtigheid. Deze grenzen zijn gebaseerd op enkele grote projecten die zijn uitgevoerd door Deerns.

4.1 Mollier-diagram

Een goede manier om verschillende luchtcondities met elkaar te vergelijken is via een Mollier-diagram. Het Mollier-diagram is een grafische weergave van de relatie tussen luchttemperatuur, luchtvochtigheid en enthalpie. De werkwijze van het diagram wordt verder niet toegelicht, omdat de lezers van dit rapport de werkwijze dienen te kennen en te begrijpen. Voor uitleg over dit diagram, zie het ISSO handboek voor installatietechniek of het boek Toegepaste Energieleer ^[2].

In figuur 4 is het behaaglijkheidsgebied aangegeven in een gedeeltelijke weergave van een Mollier-diagram. Zo is te zien dat het behaaglijkheidsgebied zich bevindt tussen de 20 en 26 °C en de relatieve luchtvochtigheid tussen de 30 en 70%.



Figuur 4 Behaaglijkheidsgebied voor een bedskamer in een ziekenhuis

Om met het Mollier-diagram te kunnen rekenen, is het van belang dat de werking ervan bekend is. Op pagina 18 worden de toegepaste formules toegelicht. Deze formules zijn afkomstig uit digitale documentatie van TVVL ^[7], waarvan een formuleblad is te vinden in bijlage 7.

Omrekening van relatieve luchtvochtigheid (RV in %) naar absolute luchtvochtigheid (X in kg/kg):

Om met het Mollier-diagram te kunnen rekenen, zal de absolute luchtvochtigheid bekend moeten zijn. Deze kan met behulp van enkele formules worden afgeleid van de relatieve luchtvochtigheid. De relatieve luchtvochtigheid RV geeft de mate van verzadiging van de waterdamp aan. Bij een relatieve luchtvochtigheid van 0% is er geen waterdamp aanwezig in de lucht en bij 100% is de lucht verzadigd van waterdamp.

De absolute luchtvochtigheid x is een massapercentage dat de hoeveelheid waterdamp per hoeveelheid lucht weergeeft en wordt berekend met onderstaande formule. De getallen achter de betreffende formules verwijzen naar de locatie in het rekenmodel waar deze in zijn verwerkt.

$$x = (0,622 \cdot p_d) / (p_b - p_d) \text{ [kg/kg]}$$

$$x = \text{absolute luchtvochtigheid [kg/kg]}$$

$$p_b = \text{barometerdruk [kPa]}$$

$$p_d = \text{partiele waterdampdruk [kPa]}$$

$$p_d = (\varphi/100) \cdot p_{dv}$$

$$\varphi = \text{relatieve luchtvochtigheid [\%]}$$

$$p_{dv} = \text{verzadigde dampspanning [kPa]}$$

$$p_{dv} = 0,813 \cdot e^{\left(\frac{\theta_l}{17,6}\right)} - 0,2$$

$$\theta_l = \text{drogeboltemperatuur [}^\circ\text{C]}$$

Bepaling van de dichtheid van de lucht:

De dichtheid van de lucht is onder andere afhankelijk van de temperatuur en de luchtvochtigheid van de lucht. Omdat deze waarden nogal verschillen over een jaar gezien, is het belangrijk dat wordt gerekend met de juiste dichtheid en niet zomaar wordt uitgegaan van een luchtdruk van 1,2 kg/m³. De luchtdruk wordt berekend met behulp van onderstaande formule:

$$\rho_{lucht} = 219,6 \cdot ((1 + x) / ((\theta_l + 273,15) \cdot (0,622 + x))) \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\rho_{lucht} = \text{dichtheid van de lucht [kg/m}^3\text{]}$$

$$x = \text{absolute luchtvochtigheid [kg/kg]}$$

$$\theta_l = \text{drogeboltemperatuur [}^\circ\text{C]}$$

Berekening voor het bepalen van de energie-inhoud (enthalpie) bij diverse luchtcondities:

De buitenlucht die in de luchtbehandelingskast treedt bevat een bepaalde hoeveelheid energie per kilogram, uitgedrukt in kJ/kg. Deze wordt de enthalpie genoemd. Het is belangrijk dat de enthalpie van de buitenluchtcondities bekend is. Aan de hand van de enthalpie kan de gevraagde hoeveelheid energie uiteindelijk worden berekend. De enthalpie van de lucht bij een bepaalde temperatuur en luchtvochtigheid wordt berekend met onderstaande formule:

$$H = c_{pl} \cdot \theta_l + 2500,8 \cdot x + c_{pw} \cdot x \cdot \theta_l \text{ [kJ/kg]}$$

$$H = \text{enthalpie [kJ/kg]}$$

$$c_{pl} = \text{soortelijke warmte van lucht [kJ/kg} \cdot \text{K]}$$

$$\theta_l = \text{drogeboltemperatuur [}^\circ\text{C]}$$

$$x = \text{absolute luchtvochtigheid [kg/kg]}$$

$$c_{pw} = \text{soortelijke warmte van warmtedamp [kJ/kg} \cdot \text{K]}$$

4.2 Luchtbehandelingskast

Om te zorgen dat de lucht continue beschikt over de gewenste condities, die liggen in het behaaglijkheidsgebied, zal deze behandeld moeten worden. Over het algemeen gebeurt dit in een luchtbehandelingskast. In figuur 5 is een luchtbehandelingskast als black-box aangenomen en zijn de in- en output aangegeven. Buitenlucht met een bepaalde conditie (temperatuur T_{in} en absolute luchtvochtigheid X_{in}) wordt aangezogen en geconditioneerde lucht met een gewenste conditie (temperatuur T_{uit} en absolute luchtvochtigheid X_{uit}) treedt uit de kast. Een schematisch overzicht van een luchtbehandelingskast is te vinden in bijlage 8 met daarin aangegeven de verklarende componenten.



Figuur 5 Black-box luchtbehandelingskast

Er zijn 5 processen die verricht kunnen worden in een luchtbehandelingskast:

- Filteren
- Verwarmen
- Koelen
- Ontvochtigen
- Bevochtigen

4.2.1 Filteren

In de eerste fase van een luchtbehandelingskast wordt de toegevoerde lucht gereinigd. Dit gebeurt doormiddel van filters. Deze filters verwijderen onder andere stoffen als zwaveldioxide, stikstofoxiden, ammoniak, methaan en koolstofmonoxide uit de lucht.

In combinatie met een warmtewiel of twincoilsysteem vind zowel in de eerste fase van een luchtbehandelingskast reiniging plaats, als in de eerste fase van het behandelen van retourlucht in een luchtafvoerkast.

Na het filteren van de lucht wordt de enthalpie van de lucht bepaald met behulp van een enthalpieschakeling. Hierdoor wordt bekend wat de specifieke temperatuur en relatieve luchtvochtigheid van de lucht op dat moment is en daarmee wordt bepaald of de lucht gekoeld of verwarmd en bevochtigd of ontvochtigd moet worden.

4.2.2 Verwarmen

Een verwarmproces vindt plaats wanneer de temperatuur van de buitenluchtconditie lager is dan de gewenste inblaastemperatuur van de luchtbehandelingskast.

Het verwarmen wordt gedaan door een verwarmingsbatterij waar de lucht langs stroomt. Zo wordt bij een verwarmproces door de batterij warmte overgedragen aan de langsstromende lucht, waardoor deze opwarmt. Een verwarmingsbatterij wordt in een luchtbehandelingskast altijd voor de koelbatterij geplaatst. Dit is belangrijk, omdat een verwarmingsbatterij erg koude buitenlucht verwarmt alvorens deze langs de koelbatterij stroomt. Andersom zou de koelbatterij kapot kunnen vriezen als daar koude lucht langs stroomt.

Het vermogen dat nodig is om te verwarmen wordt bepaald door de massastroom van de lucht, het temperatuurverschil tussen de buitenlucht en het punt waarnaar verwarmd moet worden en de soortelijke warmte van de lucht.

De massastroom is direct afhankelijk van de hoeveelheid lucht waarmee geventileerd wordt in de bedskamer en daarmee afhankelijk van de inhoud van de kamer en de ventilatievoud.

Het verwarmproces dat betrekking heeft op het veranderen van de conditie van de buitenlucht die in de luchtbehandelingskast plaats vindt, wordt hieronder in formulevorm uitgeschreven en toegelicht.

Berekening voor het bepalen van het vermogen dat nodig is om te verwarmen:

Tijdens een verwarmproces stijgt de temperatuur en daalt de relatieve luchtvochtigheid van de lucht. De absolute luchtvochtigheid blijft gelijk (zie figuur 6).

Om te kunnen bepalen hoeveel energie het kost om de buitenlucht te verwarmen naar de gewenste conditie, zal berekend moeten worden welk vermogen daar voor nodig is. Zo wordt het vermogen van alle buitenluchtcondities die verwarmd moeten worden naar een bepaalde temperatuur, berekend met de volgende formule:

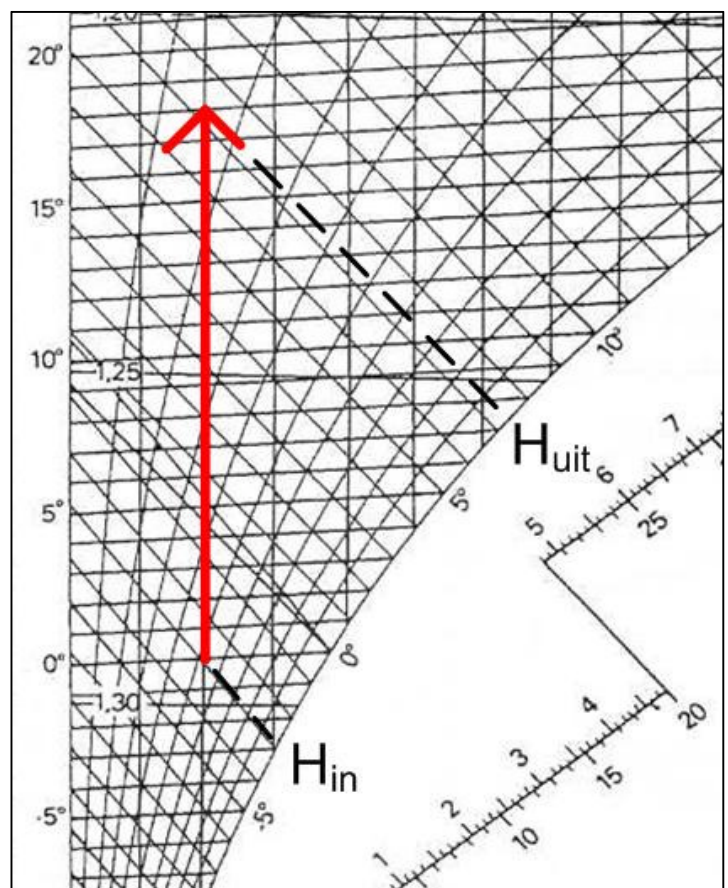
$$Q_{\text{verw.}} = \phi_m \cdot \Delta H \text{ [W]}$$

$$Q_{\text{verw.}} = \text{verwarmingsvermogen [W]}$$

$$\phi_m = \text{massastroom [kg/s]}$$

$$\Delta H = \text{enthalpieverschil [kJ/kg]}$$

Hierbij is de massastroom afhankelijk van de volumestroom (het luchtdebiet) en de dichtheid van de lucht bij de betreffende buitenluchtconditie. De enthalpie van de begin- en eindconditie wordt berekend met de formule die is uitgeschreven in paragraaf 4.1 op pagina 18.



Figuur 6 Verwarmproces in het Mollier-diagram

4.2.3 Koelen en ontvochtigen

Een koelproces vindt plaats wanneer de temperatuur van de buitenluchtconditie hoger is dan de gewenste inblaastemperatuur van de luchtbehandelingskast of wanneer de absolute luchtvochtigheid te hoog is. Het koelen geschiedt, net als bij verwarmen, door een batterij waar de lucht langs stroomt. Zo wordt bij een koelproces door een koelbatterij koude overgedragen aan de langsstromende lucht, waardoor deze afkoelt. Afhankelijk van de conditie van de buitenlucht die gekoeld moet worden, zal er *droge* of *natte* koeling plaats vinden. Bij droge koeling verandert slechts de temperatuur en bij natte koeling veranderen de temperatuur en absolute luchtvochtigheid.

Berekening voor het bepalen van het vermogen dat nodig is voor droge koeling:

Op alle situaties, waarbij de buitentemperatuur boven de gewenste inblaastemperatuur ligt en de absolute luchtvochtigheid zich op een acceptabel niveau bevindt, zal droge koeling worden toegepast. De temperatuur zal dalen en de relatieve luchtvochtigheid stijgen. De absolute luchtvochtigheid blijft gelijk, omdat de oppervlaktetemperatuur van de koelbatterij boven de dauwpunttemperatuur ligt (zie figuur 7).

Het koelvermogen voor droge koeling wordt met behulp van de volgende formule berekend:

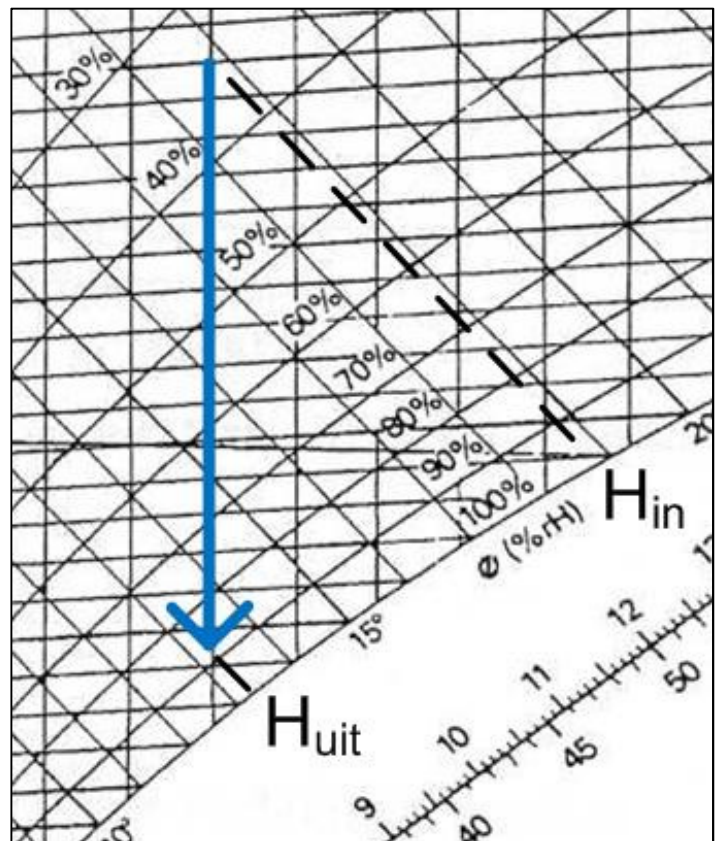
$$Q_{koelen} = \dot{\Phi}_m \cdot \Delta H \text{ [W]}$$

$$Q_{koelen} = \text{koelvermogen [W]}$$

$$\dot{\Phi}_m = \text{massastroom [kg/s]}$$

$$\Delta H = \text{enthalpieverschil [kJ/kg]}$$

Hierbij is de massastroom afhankelijk van de volumestroom (het luchtdebiet) en de dichtheid van de lucht bij de betreffende buitenluchtconditie. De enthalpie van de begin- en eindconditie wordt berekend met de formule die is uitgeschreven in paragraaf 4.1 op pagina 18.



Figuur 7 Droog koelproces in het Mollier-diagram

Berekening voor het bepalen van het vermogen dat nodig is voor natte koeling:

Op alle situaties, waarbij de buitentemperatuur boven de gewenste inblaastemperatuur ligt en de absolute luchtvochtigheid zich boven een acceptabel niveau bevindt, zal natte koeling worden toegepast. Natte koeling wordt toegepast om het vochtgehalte in de lucht terug te brengen naar een acceptabel niveau; dit wordt ook wel ontvochtiging genoemd. Bij een hoge luchtvochtigheid kunnen bacteriën en geuren ontstaan, die tevens een bedreiging kunnen vormen voor de gezondheid. De bovengrens voor de relatieve luchtvochtigheid ligt rond de 75%

Ontvochtiging van lucht treedt op zodra de oppervlaktetemperatuur van de koelbatterij lager ligt dan de dauwpunttemperatuur van de langsstromende lucht. In dat geval daalt de temperatuur naar de verzadigingslijn (waar de lucht de maximale hoeveelheid water heeft opgenomen), en gaat van daaruit verder dalen langs de verzadigingslijn (zo wordt er vocht onttrokken uit de lucht) naar de gewenste temperatuur (zie figuur 8).

Nadat er voldoende vocht onttrokken is aan de lucht zal er mogelijk nog verwarmd moeten worden tot de gewenste temperatuur. Dit wordt over het algemeen gedaan door een decentrale verwarmder. Hier wordt op pagina 33 verder in gegaan. Hieruit kan geconcludeerd worden dat natte koeling relatief veel energie kost, omdat voor dit proces gekoeld, ontvochtigd en in sommige gevallen ook weer verwarmd moet worden om de gewenste temperatuur en luchtvochtigheid te bereiken.

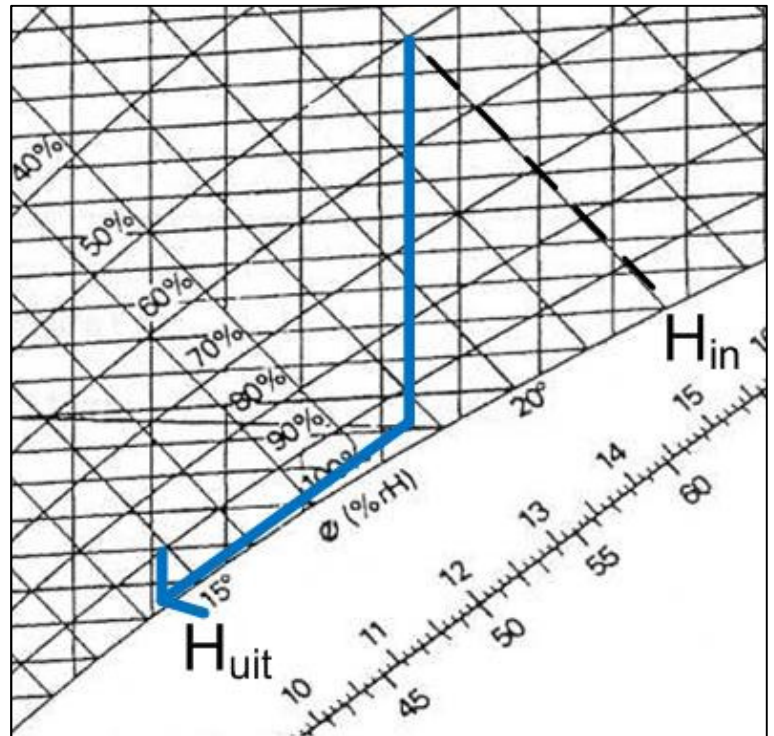
Het koelvermogen voor natte koeling wordt met behulp van de volgende formule berekend:

$$Q_{koelen} = \dot{\Phi}_m \cdot \Delta H \text{ [W]}$$

$$Q_{koelen} = \text{koelvermogen [W]}$$

$$\dot{\Phi}_m = \text{massastroom [kg/s]}$$

$$\Delta H = \text{enthalpieverschil [kJ/kg]}$$



Figuur 8 Nat koelproces in het Mollier-diagram

Hierbij is de massastroom wederom afhankelijk van de volumestroom (het luchtdebiet) en de dichtheid van de lucht bij de betreffende buitenluchtconditie. De enthalpie van de eindconditie wordt nu echter berekend met de volgende formule:

$$H = c_{pl} \cdot \theta_d + 2500,8 \cdot x + c_{pw} \cdot x \cdot \theta_d \text{ [kJ/kg]}$$

$$H = \text{enthalpie [kJ/kg]}$$

$$c_{pl} = \text{soortelijke warmte van lucht [kJ/kg} \cdot \text{K]}$$

$$\theta_d = \text{dauwpunttemperatuur [}^\circ\text{C]}$$

$$x = \text{absolute luchtvochtigheid [kg/kg]}$$

$$c_{pw} = \text{soortelijke warmte van warmtedamp [kJ/kg} \cdot \text{K]}$$

Waarbij de dauwpunttemperatuur wordt berekend met de volgende formule:

$$\theta_d = 17,6 \cdot \ln \cdot ((p_b \cdot x) / (0,622 + x)) + 0,2 / 0,813 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$p_b = \text{barometerdruk [kPa]}$$

$$\ln = \text{natuurlijke logaritme [-]}$$

$$x = \text{absolute luchtvochtigheid [kg/kg]}$$

4.2.4 Bevochtigen

Binnen de utiliteitsbouw wordt bevochtiging toegepast voor de gezondheid van de mens en ter voorkoming van statische elektriciteit. Bij een lage luchtvochtigheid stijgt de kans op infectie van luchtwegen, als gevolg van uitdroging. Ter voorkoming van problemen ligt de ondergrens van de relatieve luchtvochtigheid tussen de 20 en 40% ^[1].

Voor het bevochtigen zijn twee hoofdgroepen te onderscheiden:

- Waterbevochtigers
- Stoombevochtigers

De waterbevochtigers zijn er in twee uitvoeringsvormen, namelijk met een open waterreservoir (waarbij gedeeltelijke verdamping optreedt) en een gesloten waterreservoir (volledige verdamping). De uitvoeringsvorm met een open waterreservoir heeft als grote nadeel de hygiënische onbetrouwbaarheid. Doordat het systeem niet gesloten is, kunnen bacteriën zich snel gaan nesten.

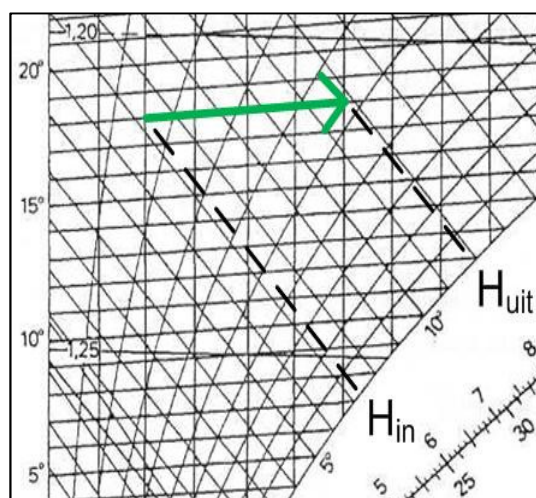
Stoombevochtigers werken met een droge bevochtigungssectie, waardoor de hygiënische bezwaren van een open waterreservoir zich niet voordoen. De benodigde stoom kan ter plaatse worden opgewekt (meestal elektrisch) of via een centraal net worden aangevoerd (meestal gasgestookt).

Naast het hygiënische aspect spelen de investerings- en exploitatiekosten een belangrijke rol bij de keuze van een bevochtiger. In tabel 3 zijn de verschillende factoren uitgezet tegen de uitvoeringsvormen ^[1].

Tabel 3 Invloedsfactoren bij luchtbevochtigers

Factor	Uitvoeringsvormen			
	Waterbevochtigers		Stoombevochtigers	
	<i>Open reservoir</i>	<i>Gesloten reservoir</i>	<i>Elektrisch</i>	<i>Gasgestookt</i>
Investeringskosten	Vrij laag	Hoog	Laag	Vrij laag
Energiekosten	Laag	Laag	Hoog	Laag
Exploitatiekosten	Vrij laag	Laag	Vrij laag	Laag
Hygiëne	Slecht	Redelijk	Goed	Goed
Volledige waterbehandeling	Nee	Ja	Ja	Ja

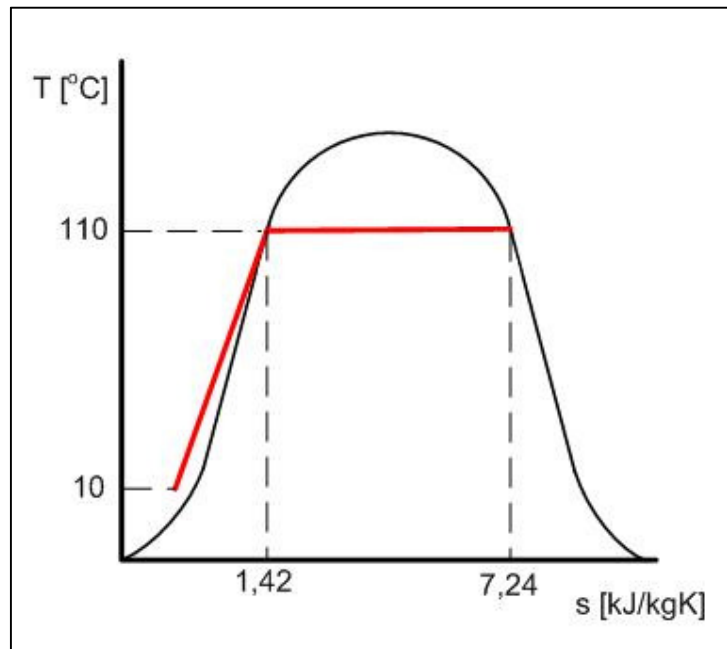
In de gezondheidszorg wordt voornamelijk met stoom bevochtigd. De reden hiervan is het hoge rendement, een goede regelbaarheid en een steriele vochtinbreng. Vooral het laatste punt is een belangrijke doorslag voor deze keuze. In bepaalde ruimten van een ziekenhuis, zoals bijvoorbeeld een operatiekamer, mag pertinent niet met water bevochtigd worden, omdat hierbij kans op legionella ontstaat. De keus voor stoombevochtiging is hiermee voorlopig bepaald. Wel zou plaatselijk met water bevochtigd kunnen worden, echter in de meeste gevallen is er toch al een stoomketel aanwezig en wordt daarom gekozen voor volledige stoombevochtiging. Bij stoombevochtiging blijft de temperatuur van de lucht constant (zie figuur 9).



Figuur 9 Stoombevochtiging in het Mollier-diagram

Berekening voor het bepalen van het vermogen dat nodig is om te bevochtigen:

De bevochtiging van lucht gebeurt door stoombevochtiging. Om deze stoom te kunnen produceren zal water verwarmd moeten worden tot een bepaalde temperatuur om vervolgens volledig omgezet te worden in stoom. In een stoomketel van een luchtbehandelingskast wordt stoom geproduceerd bij een overdruk van 0,5 bar. In figuur 10 is het proces weergegeven in een Ts-diagram. De rode lijn betreft de conditie van het water/de stoom.



Figuur 10 Ts-diagram voor stoombevochtiging

In een stoomketel wordt leidingwater toegevoerd van $\pm 10^\circ\text{C}$. Dit water wordt bij een druk van 1,5 bar verwarmd tot het punt waarbij het verzadigt (110°C). Vanaf dat punt treedt het verzadigde water het coëxistentiegebied in en is er een mengsel van verzadigd water en verzadigde stoom; dit wordt ook wel natte stoom genoemd. Vervolgens blijft er energie in de vorm van warmte toegevoerd worden totdat de lijn van verzadigde stoom wordt bereikt. Hierbij is al het water volledig omgezet in stoom.

Voor het berekenen van het vermogen om te bevochtigen zijn vier stappen nodig:

- Bepalen van de massastroom stoom die nodig is.
- Vermogen berekenen voor het verwarmen van water tot het verzadigingspunt.
- Vermogen berekenen voor het omzetten van verzadigd water naar verzadigde stoom.
- Massastroom stoom vermenigvuldigen met het totale vermogen

De massastroom stoom die nodig is wordt bepaald met behulp van de volgende formule:

$$\phi_{m, \text{stoom}} = \phi_v \cdot \Delta x \cdot \rho \text{ [kg/h]}$$

$$\phi_{m, \text{stoom}} = \text{massastroom stoom [kg/h]}$$

$$\phi_v = \text{volumestroom ventilatielucht [m}^3\text{/h]}$$

$$\Delta x = \text{verschil in absolute luchtvochtigheid [kg/kg]}$$

$$\rho = \text{dichtheid van lucht [kg/m}^3\text{]}$$

Het vermogen dat nodig is om water te verwarmen tot het verzadigingspunt wordt berekend met de volgende formule:

$$Q_{\text{verw.}} = \phi_m \cdot c_p \cdot \Delta T \text{ [W]}$$

$$Q_{\text{verw.}} = \text{verwarmingsvermogen [W]}$$

$$\phi_m = \text{massastroom water [kg/s]}$$

$$c_p = \text{soortelijke warmte van water [J/kg} \cdot \text{K]}$$

$$\Delta T = \text{temperatuurverschil [K]}$$

Het vermogen dat nodig is om verzadigd water om te zetten in verzadigde stoom is afhankelijk van de druk en de temperatuur van het water. Aan de hand van die gegevens kan via stoomtabellen ^[2] worden opgezocht wat de entropie of enthalpie van het begin en eindpunt is. De stoomtabellen zijn te vinden in bijlage 6. Vervolgens kan het vermogen worden berekend met de volgende formule:

$$\begin{aligned}Q_{omzetten} &= \dot{\phi}_m \cdot \Delta H \text{ [W]} \\Q_{omzetten} &= \text{vermogen [W]} \\ \dot{\phi}_m &= \text{massastroom water [kg/s]} \\ \Delta H &= \text{enthalpieverschil [kJ/kg]}\end{aligned}$$

4.2.5 Bepaling uittrede temperatuur en luchtvochtigheid

De temperatuur van de uittredende lucht van de luchtbehandelingskast moet zodanig gekozen worden dat deze geschikt is om mee te koelen en (met behulp van een naverwarmer) te verwarmen. De ondergrens van de temperatuur wordt over het algemeen in de zomersituatie vastgesteld op 16°C. De reden hiervan is dat lucht met een lagere inblaastemperatuur bij een desbetreffende snelheid wordt ervaren als tocht en omdat er condensvorming kan optreden bij de kanalen.

In een luchtbehandelingskast zorgt een ventilator voor opwarming van de langstromende lucht met 1,5°C. Dit betekent dat de lucht verwarmd of gekoeld dient te worden tot $16 - 1,5 = 14,5^\circ\text{C}$.

Naast de ondergrens wordt ook een bovengrens gehanteerd. Deze bovengrens wordt aangehouden in een wintersituatie, waarbij de temperatuur van de inblaaslucht hoger is dan in de zomersituatie. De bovengrens wordt vastgesteld op 18°C waarbij verwarmd of gekoeld moet worden naar 16,5°C.

De ventilator van de luchtbehandelingskast verwarmt na met 1,5°C naar 18°C.

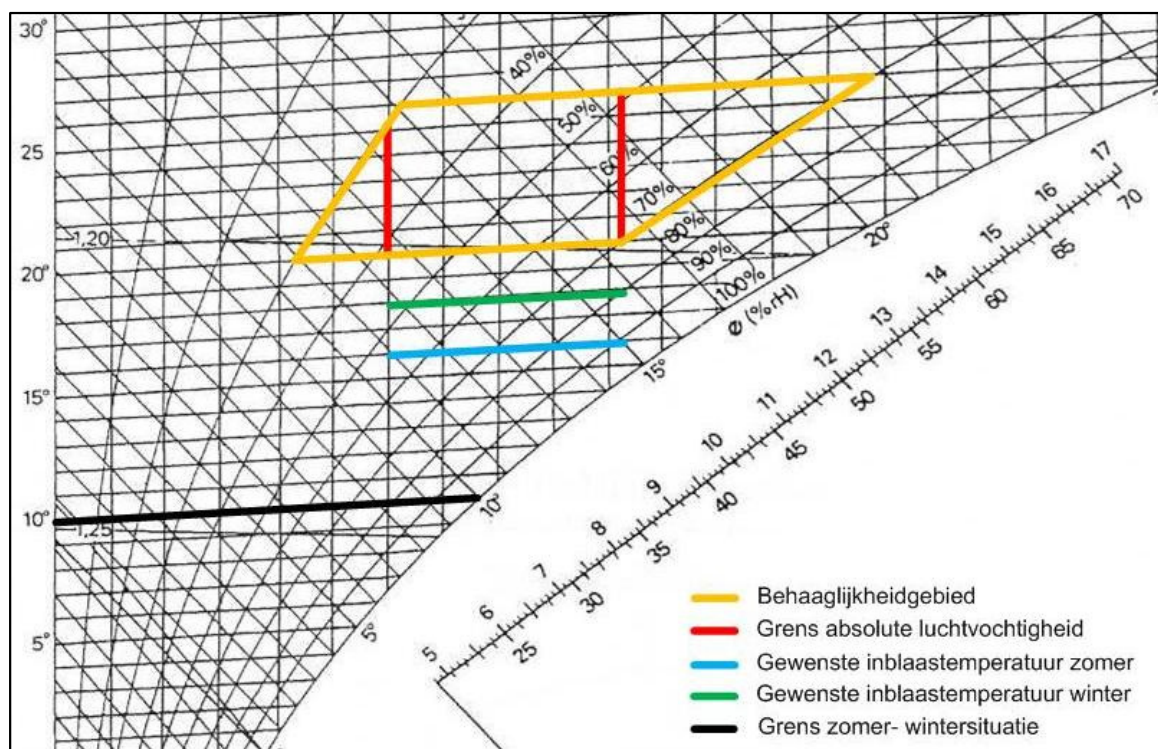
Voor een wintersituatie worden alle buitenluchtcondities aangehouden met een temperatuur onder de 10°C. Alle situaties daarboven worden als zomersituatie beschouwd.

Wintersituatie < 10°C > Zomersituatie

De reden hiervoor is dat een buitenluchtconditie met een temperatuur lager dan 10°C dermate laag is, dat voldaan kan worden met een inblaastemperatuur van 18°C om de bedskamer op de gewenste temperatuur te houden. Tevens zorgt dit ervoor dat er minder vermogen nodig is om eventueel decentraal na te verwarmen. Dat zou investeringskosten kunnen besparen.

De absolute luchtvochtigheid moet, afhankelijk van de gewenste relatieve luchtvochtigheid, zo worden gekozen, dat deze ligt tussen een minimum en een maximum. Ervanuit gaande dat de relatieve luchtvochtigheid tussen de 30 en 70% moet liggen, bij een temperatuur van 20 tot 26°C, zal deze volgens het Mollier-diagram tussen de 6 en 10,3 g/kg moeten liggen.

De grenzen zijn weergegeven in figuur 11.



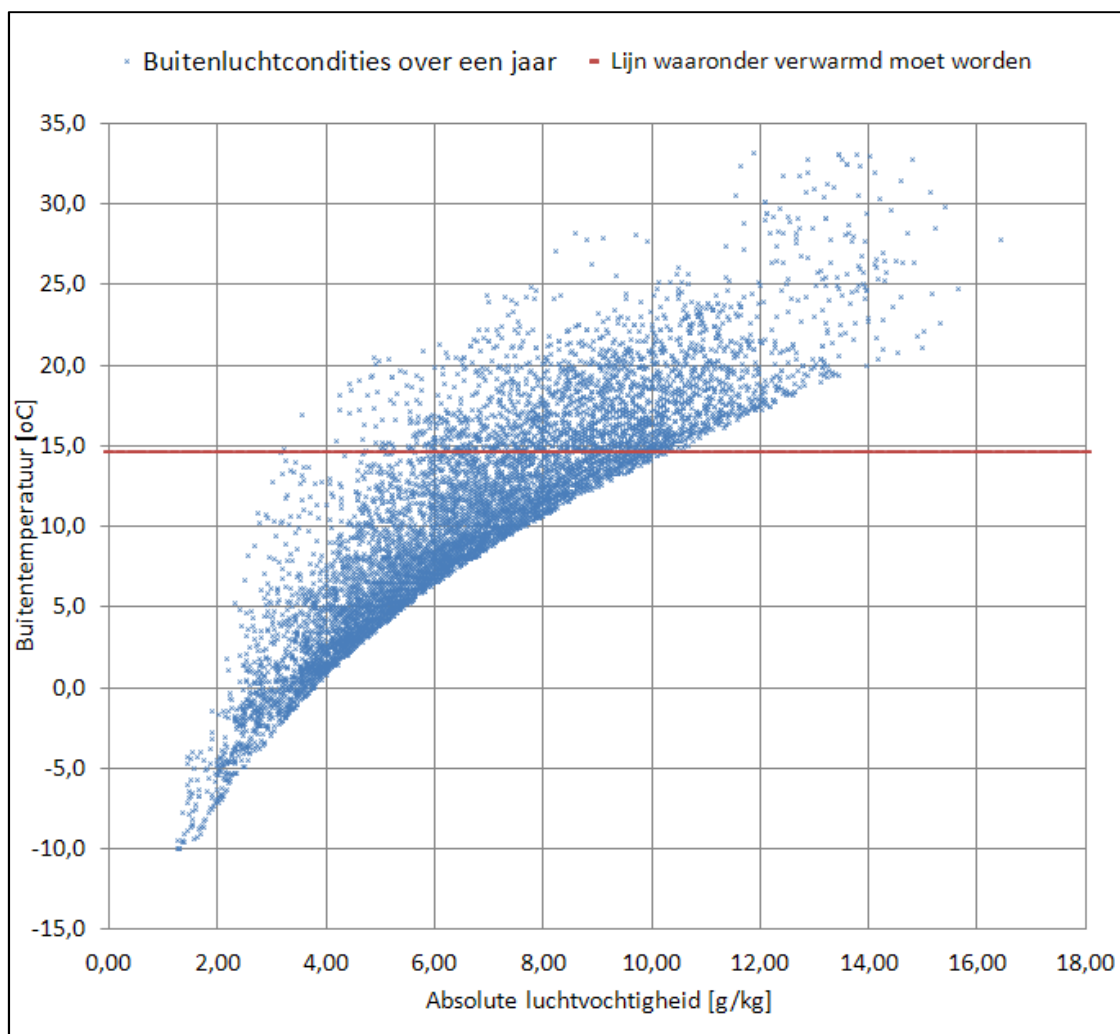
Figuur 11 Grenzen in het Mollier-diagram

4.3 Referentiegegevens

Om te kunnen bepalen hoeveel energie het kost per jaar om een bedskamer op de juiste condities te krijgen en te houden, wordt gebruik gemaakt van een klimaatbestand dat over een heel jaar, op elk uur gemeten, onder andere de buitenluchttemperatuur en de daarbij behorende relatieve luchtvochtigheid bevat. Voorheen werd hiervoor gebruik gemaakt van een referentiejaar, namelijk dat van 1964/1965. Deze bleek echter in deze tijd niet representatief, gelet op de recente klimaattrend, en is daarom vervangen door de Nederlandse norm NEN 5060. De NEN 5060 is samengesteld uit waarden van meerdere voorgaande referentie jaren en vertegenwoordigt de nieuwste referentie die wordt gebruikt voor de bepaling van de energieprestatie van gebouwen.

Om een beeld te kunnen schetsen van de buitenluchtcondities over een heel jaar, zijn deze verwerkt in een grafiek. Hierbij is de buitenluchttemperatuur in graden Celsius uitgezet tegen de absolute luchtvochtigheid in g/kg. Om de absolute luchtvochtigheid te verkrijgen, is de relatieve luchtvochtigheid omgerekend met behulp van formules die te vinden zijn op pagina 18.

Aan de hand van de buitenluchttemperaturen en relatieve luchtvochtigheden (omgezet in de absolute luchtvochtigheden) volgens de NEN 5060 is een grafiek opgesteld waaruit kan worden opgemaakt dat veruit de meeste condities verwarmd dienen te worden. De grafiek is te vinden in figuur 12. Het werkelijke aantal uur dat er verwarmd wordt, zal in het rekenmodel te vinden zijn.



Figuur 12 Buitenluchtcondities volgens NEN 5060

4.4 Warmteterugwinning

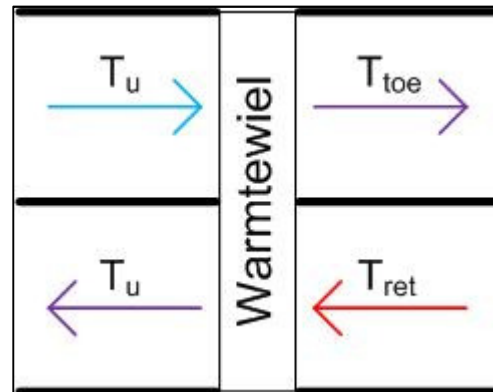
Warmteterugwinning wordt toegepast om energie te besparen, door warmte en/of vocht die in de retourlucht zit te hergebruiken om op die manier de benodigde energie te verminderen.

In een luchtbehandelingskast wordt over het algemeen onderscheid gemaakt tussen twee systemen voor energierugwinning:

- Warmtewiel
- Twincoilsysteem

Een warmtewiel is in staat om zowel warmte als vocht uit de retourlucht over te brengen. Een twincoilsysteem kan alleen warmte overbrengen. Het toepassen van warmtewielen in luchtbehandelingskasten is daarom vanuit energetisch oogpunt een van de meest efficiënte vormen van energierugwinning. Om die reden wordt, mits het mogelijk is, een warmtewiel geadviseerd. Het enige nadeel van een warmtewiel is de omvang. De opstelling van de aanvoer- en afvoerkast bij het gebruik van een warmtewiel nemen meer ruimte in beslag, in zowel de breedte als de hoogte. Bij renovaties zal daarom nog wel eens een twincoilsysteem worden toegepast. In dit rapport zal gerekend worden met een warmtewiel en niet verder worden ingegaan op een twincoilsysteem.

Het rendement van een warmtewiel, voor zowel de warmte- als de vochtoverdracht, ligt gemiddeld rond de 75%. Om te kunnen rekenen met een warmtewiel, zal gebruik worden gemaakt van de benodigde formules. Aan de hand van de buitenluchttemperatuur en -vochtigheid en de retourluchttemperatuur en -vochtigheid kan worden berekend welke temperatuur en vochtigheid de aanvoerlucht zal hebben. Dit wordt berekend met behulp van de volgende formules:



Figuur 13 Principewerking warmtewiel

$$\eta_{wtw,warmte} = \frac{T_{toe} - T_u}{T_{ret} - T_u}$$

$\eta_{wtw,warmte}$ = het rendement voor de warmteoverdracht [-]

T_{toe} = de aanvoertemperatuur [°C]

T_u = de buitenluchttemperatuur [°C]

T_{ret} = de retourluchttemperatuur [°C]

$$\eta_{wtw,vocht} = \frac{x_{toe} - x_u}{x_{ret} - x_u}$$

$\eta_{wtw,vocht}$ = het rendement voor de vochtoverdracht [-]

x_{toe} = de luchtvochtigheid van de aanvoerlucht [g/kg]

x_u = de luchtvochtigheid van de buitenlucht [g/kg]

x_{ret} = de luchtvochtigheid van de retourlucht [g/kg]

Warmteterugwinning wordt in het rekenmodel alleen toegepast in de situaties waarbij de buitenlucht kouder is dan de gewenste uitgaande temperatuur uit de luchtbehandelingskast. De reden dat warmteterugwinning niet in de zomersituatie wordt toegepast, is omdat de verschillen tussen de aanwezige binnentemperatuur en de buitentemperatuur dermate klein zijn, dat het zeer weinig oplevert.

5. Warmtestromen

In dit hoofdstuk zal uitgebreid worden omschreven hoe de warmtestromen in een bedskamer worden bepaald en berekend. Aan de hand van deze uitkomsten kan worden geconcludeerd of deze een positieve of negatieve bijdrage leveren op de temperatuur in de leefomgeving. Er zijn vier factoren die een rol spelen:

- Interne warmtelast
- Externe warmtelast
- Warmtetransmissieverlies
- Infiltratiewarmteverlies

5.1 Interne warmtelast

De interne warmtelast kan worden omvat als de hoeveelheid warmte die wordt geproduceerd door factoren die zich in een ruimte bevinden. Dit betreft stralingswarmte door personen, apparaten en verlichting. In de winter zorgt de interne warmtelast voor een positief effect, door de warmte-energie die wordt uitgestraald. In de zomer zorgt deze last echter voor een negatief effect, omdat de warmte-energie dan niet gewenst is en er daardoor een groter vermogen nodig is om te koelen.

Interne warmtelast door personen

De warmteafgifte per persoon is afhankelijk van de activiteiten die worden uitgevoerd. Aan deze verschillende activiteiten wordt een waarde gehangen, de zogenaamde clo-waarde. De clo-waarde is een factor die de warmteweerstand van kleding voorstelt. Aan de hand van de activiteit en de clo-waarde wordt een bepaalde warmteafgifte per persoon bepaald ^[1]. Deze zijn te vinden in tabel 4.

Tabel 4 Voelbare warmteafgifte per persoon

Activiteiten:	p _p in Watt per persoon			
	Clo = 0,4	Clo = 0,6	Clo = 0,8	Clo = 1,0
Rustig liggen, lezen.	90	80	75	70
Zittend, algemeen kantoorwerk.	100	90	85	80
Staand, algemeen laboratoriumwerk.	110	100	95	90
Zittend, lichte montagewerkzaamheden.	115	105	100	95
Staand, lichte montagewerkzaamheden.	150	140	130	120

De interne warmtelast door personen wordt daarop berekend met de volgende formule:

$$q_{w, \text{personen}} = n_p \cdot p_p \text{ [W]}$$

$$q_{w, \text{personen}} = \text{totale warmteafgifte door personen [W]}$$

$$n_p = \text{aantal personen aanwezig [-]}$$

$$p_p = \text{voelbare warmteafgifte per persoon [W]}$$

Voor een patiënt in een bedskamer kan worden gesteld dat de warmteweerstand van de kleding laag is, net als de activiteit. De warmteafgifte van de patiënt wordt daarom gesteld op een gemiddelde van 90 Watt.

Naast de patiënt, die vaak 24 uur per dag in de kamer verblijft, is ook regelmatig extra warmteafgifte van een verpleegkundige of visite. De activiteit van deze persoon is vaak net wat hoger dan die van de patiënt, maar de warmteweerstand van de kleding is dat meestal ook. Hiervoor wordt tevens een gemiddelde aangehouden van 90 Watt. Echter, een verpleegkundige of visite is er slechts een aantal uur per dag. Over een dag wordt aangenomen dat er vier uur iemand bij de patiënt is.

Invullen van de formule levert een gemiddelde warmteafgifte op van:

$$q_{w, \text{personen}} = (1 \cdot 90) + (1 \cdot (90/24) \cdot 4) = 105 \text{ W}$$

Interne warmtelast door verlichting

De warmte die verlichting uitstraalt in een bedskamer draagt tevens bij aan de warmtehuishouding. In de winter zal dit een positieve bijdrage zijn en in de zomer wederom een negatieve bijdrage.

De interne warmtelast door verlichting wordt berekend met de volgende formule:

$$q_{w, \text{verlichting}} = q_l \cdot A_{\text{vloer}} [W]$$

$$q_{w, \text{verlichting}} = \text{totale warmteafgifte door verlichting} [W]$$

$$q_l = \text{convectieve warmteafgifte verlichting} [W/m^2]$$

$$A_{\text{vloer}} = \text{vloeroppervlakte van de ruimte} [m^2]$$

De warmteafgifte door verlichting is afhankelijk van de hoeveelheid verlichting die wordt toegepast in de ruimte en de eis aan de sterkte van het licht. De sterkte van het licht voor bepaalde ruimten is bepaald middels NEN-EN 12464-1. In bijlage 4 is de norm te vinden. Deze stelt dat de sterkte van het licht in een bedskamer 200 lux moet bedragen. De warmteafgifte per 100 lux bedraagt 3 W/m^2 vloeroppervlak.

Invullen van de formule levert een gemiddelde warmteafgifte op van:

$$q_{w, \text{verlichting}} = 2 \cdot 3 \cdot 17 = 102 \text{ W}$$

Verlichting staat, afhankelijk van de tijd in het jaar, gemiddeld 10 tot 16 uur per dag aan. In het rekenmodel is dit verwerkt als een gemiddelde van 13 uur per dag. Zo is bepaald dat de verlichting aan staat van 9 uur 's ochtends en uit gaat om 10 uur 's avonds. Afhankelijk van de tijd in het jaar zal de verlichting langer respectievelijk korter aan staan op een dag.

Interne warmtelast door apparatuur

Naast de interne warmtelast die door personen en verlichting wordt geproduceerd, wordt er ook warmte geproduceerd door apparatuur die aanwezig is in een bedskamer. De hoeveelheid en soort apparatuur in een bedskamer verschilt. Voor een bedskamer wordt over het algemeen door Deerns met 100 W warmtelast gerekend. Hierin zijn diverse apparaten meegenomen, zoals medische apparatuur, een televisie en overige apparatuur.

$$q_{w, \text{apparatuur}} = 100 \text{ W}$$

Totale interne warmtelast

De totale interne warmtelast in de bedskamer is daarmee vastgesteld op:

$$q_{w, \text{personen}} + q_{w, \text{verlichting}} + q_{w, \text{apparatuur}} = 105 + 102 + 100 = 307 \text{ W}$$

De interne warmte bedraagt 307 Watt in een situatie waarbij de verlichting aan staat.

5.2 Externe warmtelast

Een andere factor die een belangrijke invloed heeft op de energiehuishouding in een ruimte is zoninstraling. Deze factor wordt de externe factor genoemd, omdat het invloed uitoefent van buitenaf. Zonnestraling is er, afhankelijk van de tijd in het jaar, zo'n 8 tot 16 uur per dag. De sterkte van de zonnestraling is afhankelijk van meerdere factoren waar in dit rapport verder niet op in wordt gegaan. Hiervoor kan de norm NEN 5060 geraadpleegd worden.

Afhankelijk van de oriëntatie van de gevel t.o.v. de zon varieert de zoninstraling. Warmteoverdracht van de zon naar de bedskamer vindt plaats door zonnestraling op de gevel.

Om met zoninstraling te kunnen rekenen in het model, is gebruik gemaakt van gegevens uit het referentiejaar '64/'65. In dat jaar is over elk uur de directe en diffuse zoninstraling over 8 verschillende oriëntaties gemeten.

Gezien de recente klimaattrend, zou het referentiejaar '64/'65 niet meer representatief kunnen zijn. Om dit te kunnen controleren is met behulp van de NEN 5060, waarin tabellen zijn opgenomen met de maandgemiddelde totale zoninstraling, gemiddeld over alle uren in een maand, een vergelijking getrokken met de waarden uit het referentiejaar dat is toegepast. Hieruit is gebleken dat de maandgemiddelden overeenkomen, met een afwijking van enkele procenten.

De tabellen zijn te vinden in bijlage 5.

Voor een jaarlijkse energiebalans zou gerekend kunnen worden met de maandgemiddelden volgens de NEN5060. Echter, omdat er geen gegevens beschikbaar zijn met de metingen over elk uur, kan niet gerekend worden met de werkelijke zoninstraling per uur en om die reden kunnen de overschrijdingsuren niet bepaald worden.

Aan de hand van die conclusie is besloten om te rekenen met de gegevens uit het referentiejaar '64/'65.

De warmte t.g.v. zoninstraling wordt berekend met de volgende formule:

$$\phi_{zg} = z \cdot A \cdot ZTA \cdot q_{zg} [W]$$

$$\phi_{zg} = \text{intredende warmte van de zon} [W]$$

$$z = \text{zonweringsfactor door gedeeltelijke beschaduwing} [-]$$

$$A = \text{oppervlakte glas} [m^2]$$

$$ZTA = \text{zontoetredingsfactor} [-]$$

$$q_{zg} = \text{totale zoninstraling} [W/m^2]$$

De intredende warmte van de zon is afhankelijk van de oriëntatie van de gevel t.o.v. de zon en deze waarde wordt gehaald uit het referentiejaar in het rekenmodel.

De zonweringsfactor door gedeeltelijke beschaduwing ligt over het algemeen tussen de 0,7 en 0,9^[1]. Voor het rekenmodel wordt de gemiddelde waarde, 0,8 gebruikt.

De zontoetredingsfactor ZTA is afhankelijk van het type glas dat wordt toegepast en het gebruik van buitenzonwering. Deze waarde is variabel en afhankelijk van de wens van de opdrachtgever en adviseur. In tabel 5 staan mogelijke opties^[1]

Tabel 5 ZTA-waarden

ZTA-waarden voor veel voorkomende glassoorten	ZTA-waarde
Enkel blank glas	0,82
Dubbel glas blank	0,70
Blank glas met reflecterende werking	0,63
Absorberend glas	0,55
HR++ glas	0,52
Enkel glas met buitenzonwering	0,17
Dubbel blank glas met buitenzonwering	0,10

5.3 Transmissiewarmteverlies

Het gehele jaar vindt warmtestroming plaats door muren, het plafond, de vloer en eventueel deur(en) die zich in een ruimte bevinden. Deze warmtestroming kan een positieve of negatieve invloed hebben op de energiehuishouding. Om de hoeveelheid warmtestroming te berekenen wordt gebruik gemaakt van een transmissiewarmteverliesberekening. Het totale transmissiewarmteverlies is de som van de positieve en negatieve warmtestromen door de vlakken die een ruimte begrenzen. Dit verlies volgt uit de volgende formule:

$$\phi_{trans} = (\sum H_t) \cdot (\theta_i - \theta_e) [W]$$

$$\phi_{trans} = \text{transmissiewarmteverlies} [W]$$

$$H_t = \text{specifiek warmteverlies ten gevolge van transmissie} [W/K]$$

$$\theta_i = \text{binnentemperatuur} [^{\circ}C]$$

$$\theta_e = \text{buitentemperatuur} [^{\circ}C]$$

$$H_t = A \cdot U [W/K]$$

$$A = \text{oppervlakte} [m^2]$$

$$U = \text{warmtedoorgangscoefficient} [W/m^2 \cdot K]$$

$$U = 1/(R_i + R_c + R_e) [W/m^2 \cdot K]$$

$$R_i = \text{warmteovergangsweerstand aan het binnenoppervlak} [m^2 \cdot K/W]$$

$$R_c = \text{warmteovergangsweerstand van de constructie} [m^2 \cdot K/W]$$

$$R_e = \text{warmteovergangsweerstand aan het buitenoppervlak} [m^2 \cdot K/W]$$

Voor de warmteovergangsweerstanden aan het binnen- en buitenoppervlak wordt over het algemeen een waarde aangehouden van 0,13 respectievelijk 0,04 m²·K/W.

De warmteovergangsweerstand van de constructie is de grote variabele en afhankelijk van het soort materiaal dat wordt toegepast. Deze is variabel in het rekenmodel.

5.4 Infiltratiewarmteverlies

Alle lucht die de ruimte binnenkomt op een andere manier dan door mechanische toevoer of door ventilatievoorzieningen wordt gedefinieerd als infiltratie. Het infiltratiewarmteverlies wordt berekend met de volgende formule:

$$\phi_{infiltratie} = q_{infiltratie} \cdot A \cdot \rho \cdot c_p \cdot (\theta_i - \theta_e) [W]$$

$$\phi_{infiltratie} = \text{infiltratiewarmteverlies} [W]$$

$$q_{infiltratie} = \text{parameter voor de mate van infiltratie} [m^3/s/m^2]$$

$$A = \text{oppervlakte} [m^2]$$

$$\rho = \text{soortelijke massa van lucht} [kg/m^3]$$

$$c_p = \text{soortelijke warmte van lucht} [J/kg \cdot K]$$

$$\theta_i = \text{binnentemperatuur} [^{\circ}C]$$

$$\theta_e = \text{buitentemperatuur} [^{\circ}C]$$

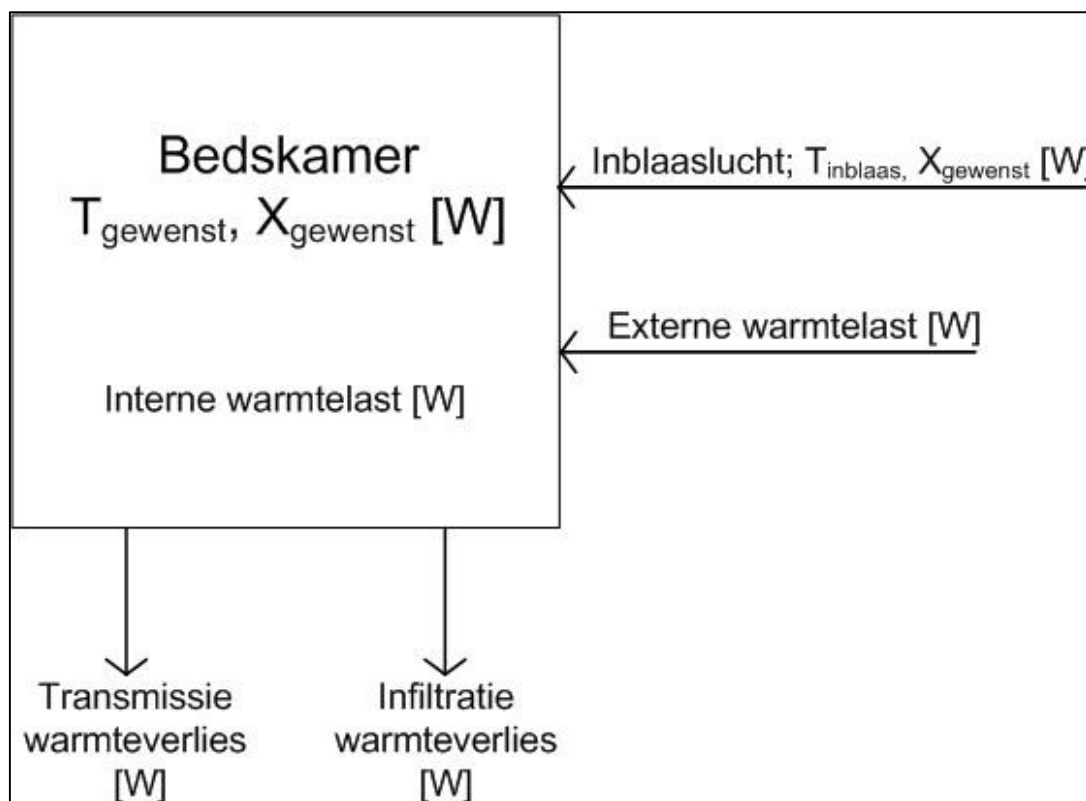
De parameter voor de mate van infiltratie is afhankelijk van het type en grootte van het gebouw of de ruimte ^[1].

6. Nabehandeling

De conditie van de lucht die uit de luchtbehandelingskast treedt zal een temperatuur hebben van 16 of 18°C en een absolute luchtvochtigheid die ligt tussen de 6 en 10,3 g/kg. Afhankelijk van de gewenste temperatuur in de bedskamer, hoeft er nu alleen nog maar naverwarmd te worden. Het naverwarmen van de lucht gebeurt via een zogenaamde naverwarmer. Dit gebeurt decentraal. Een naverwarmer is een verwarmbatterij die volgens hetzelfde principe werkt als de verwarmbatterij in de luchtbehandelingskast. Een naverwarmer wordt toegepast om de lucht die uit de luchtbehandelingskast komt te verwarmen naar de benodigde temperatuur om de bedskamer op de gewenste conditie te houden.

De hoeveelheid energie die nodig is om te verwarmen is vanaf dit punt afhankelijk van de interne en externe factoren die invloed hebben op de warmtehuishouding van de ruimte.

In figuur 14 zijn de factoren aangegeven die invloed hebben op de inblaastemperatuur. Hiermee kan worden berekend hoeveel vermogen het kost om na te verwarmen en wordt de benodigde inblaastemperatuur bepaald.



Figuur 14 Factoren die invloed hebben op de inblaastemperatuur

$$T_{inblaas} = (Q/c_p \cdot \phi_m) + T_{gewenst} [^{\circ}C]$$

$$T_{inblaas} = \text{benodigde inblaastemperatuur } [^{\circ}C]$$

$$Q = \text{inblaasvermogen } [W]$$

$$c_p = \text{soortelijke warmte van lucht } [J/kg \cdot K]$$

$$\phi_m = \text{massastroom van lucht } [kg/s]$$

$$T_{gewenst} = \text{ontwerpbinrentemperatuur } [^{\circ}C]$$

Het inblaasvermogen wordt berekend aan de hand van onderstaande vergelijking.

$$(Q_{transmissie} + Q_{infiltratie} - Q_{intern} - Q_{extern}) - Q_{inblaas} = 0$$

7. Validatieberekeningen luchtbehandeling

Aan de hand van de gegevens uit de NEN 5060 en de omschreven formules in dit rapport is een rekenmodel opgezet in Excel. De opbouw van het rekenmodel is te vinden in bijlage 2. Om het rekenmodel te kunnen valideren, is een aantal berekeningen uitgewerkt. De volledig uitgeschreven versies zijn te vinden in bijlage 3. In dit hoofdstuk zal een samenvatting worden gegeven van de gevonden waarden. Voor de berekeningen zijn de volgende inputwaarden gebruikt:

- Luchtdebiet:	150 m ³ /h
- Oriëntatie van de gevel:	zuidzijde
- Oppervlakte van de gevel:	13,3 m ²
- Percentage glas:	40%
- Warmteweerstand van de gevel:	3 m ² *K/W
- Warmtedoorgangscoefficiënt van het glas:	1,1 W/m ² *K
- Zontoetredingsfactor door glas i.c.m. buitenzonwering:	0,17
- Grens zomer-wintersituatie:	10 °C
- Inblaastemperatuur uit de LBK in de winter:	18 °C
- Inblaastemperatuur uit de LBK in de zomer:	16 °C
- Ontwerptemperatuur bedskamer:	22 °C
- Temperatuur bovengrens in de zomer:	26 °C
- Absolute luchtvochtigheid in de winter:	6 g/kg
- Absolute luchtvochtigheid in de zomer:	10,3 g/kg
- Interne warmtelast met verlichting:	307 W

Van input naar output wordt de onderstaande stapvolgorde gehanteerd:

- Luchtbehandelingskast:
 - Bepalen of er verwarmd of gekoeld moet worden.
 - Bepalen of er bevochtigd of ontvochtigd moet worden of geen van beide.
 - Benodigde energie berekenen om te verwarmen of te koelen (koelen mogelijk in combinatie met ontvochtigen en naverwarmen).
 - Benodigde energie berekenen om te bevochtigen (indien van toepassing).
- Warmtestromen in de bedskamer:
 - Warmtetransmissieverlies berekenen.
 - Infiltratiewarmteverlies berekenen.
 - Interne warmtelast berekenen.
 - Externe warmtelast berekenen.
- Naverwarming:
 - Bepalen of er naverwarmd moet worden.
 - Berekenen hoeveel energie dat zou kosten.
 - Bepalen wat de inblaastemperatuur wordt.
- Warmteterugwinning:
 - Bepalen of warmte en/of vocht teruggewonnen kan worden.
 - Berekenen hoeveel dat is.

7.1 Berekening wintersituatie: Luchtbehandeling

De eerste hoofdstap die wordt ondergaan is de luchtbehandeling in de luchtbehandelingskast. Buitenlucht met een bepaalde temperatuur en luchtvochtigheid wordt aangezogen en lucht met de gewenste temperatuur en luchtvochtigheid wordt uitgeblazen. Voor deze eerste validatieberekening is gerekend met het eerste punt uit het 'referentiejaar'. Dit is op 1 januari om 01:00 uur en betreft een wintersituatie. De buitentemperatuur bedraagt $-0,9^{\circ}\text{C}$ en de relatieve luchtvochtigheid 83%. De gewenste inblaastemperatuur van de luchtbehandelingskast is 18°C en de gewenste absolute luchtvochtigheid 6 g/kg.

Aan de hand van het rekenmodel is berekend dat het 0,95 kWh aan energie kost om de temperatuur gedurende een uur te verwarmen van $-0,9^{\circ}\text{C}$ naar 18°C . Om te bevochtigen tot 6 g/kg, kost het over een uur 0,6 kg stoom. Bij een overdruk van 0,5 bar zou dit voor een stoomketel 0,44 kWh aan energie kosten om deze stoom te produceren. Over de berekende waarden is nog geen rendement meegenomen voor het daadwerkelijk opwekken van de energie. Tevens is er nog geen warmterugwinning toegepast. In de black-box in figuur 15 zijn de input en uitput ingevuld.



Figuur 15 Berekende waarden voor LBK in een wintersituatie

7.2 Berekening wintersituatie: Warmtestromen

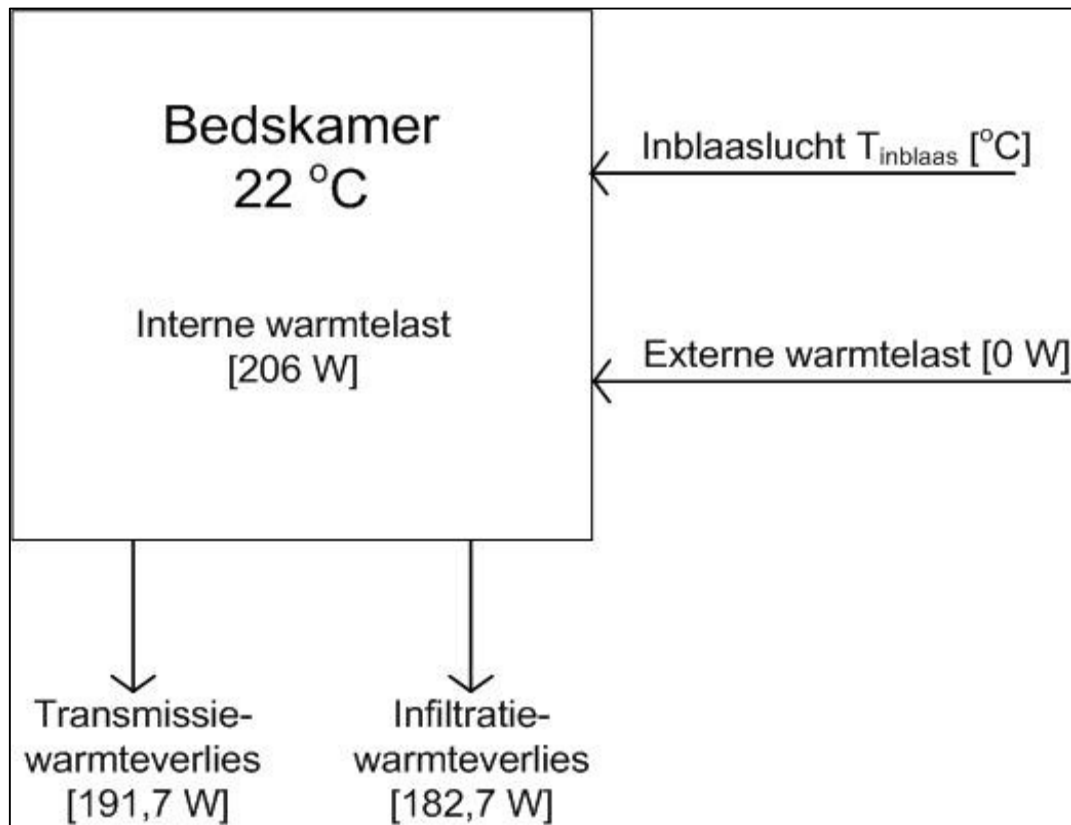
Bij de tweede hoofdstap wordt specifiek gekeken naar de factoren die invloed hebben op de temperatuur in de bedskamer. Deze factoren kunnen afzonderlijk een positieve of negatieve invloed uitoefenen op de warmtehuishouding. De volgende vier factoren spelen een rol:

- Warmtetransmissieverlies
- Infiltratiewarmteverlies
- Interne warmte
- Externe warmte

De som van deze vier factoren minus het vermogen van de inblaaslucht moet nul zijn en wordt opgelost met onderstaande vergelijking:

$$(Q_{transmissie} + Q_{infiltratie} - Q_{intern} - Q_{extern}) - Q_{inblaas} = 0$$

Het vermogen aan warmte dat in de bedskamer wordt toe- of afgevoerd door transmissie, infiltratie, interne warmte en externe warmte moet gecompenseerd worden met het vermogen aan warmte van de inblaaslucht. In de black-box in figuur 16 zijn de berekende waarden aangegeven.



Figuur 16 Berekende waarden voor de warmtestromen

7.3 Berekening wintersituatie: Nabehandeling

Nu is berekend hoeveel invloed de verschillende factoren hebben op de energiehuishouding in de bedskamer, kan berekend worden of er met een hogere of lagere temperatuur dan de ruimtetemperatuur ingeblazen moet worden om de bedskamer op de juiste temperatuur te houden. Dat kan gecontroleerd worden met de volgende vergelijking:

$$(Q_{transmissie} + Q_{infiltratie} - Q_{intern} - Q_{extern}) - Q_{inblaas} = 0$$

$$(191,7 + 182,7 - 206 - 0) - Q_{inblaas} = 0$$

$$168,4 - Q_{inblaas} = 0$$

$$168,4 = Q_{inblaas}$$

De temperatuur waarmee wordt ingeblazen bedraagt dan:

$$T_{inblaas} = (168,4 / (1004 \cdot (150/3600) \cdot 1,2)) + 22 = 25,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Het vermogen dat nodig is om decentraal na te verwarmen:

$$Q = (150/3600) \cdot 1,2 \cdot 1004 \cdot (25,4 - 18) = 371 \text{ W}$$

Na berekening komt naar voren dat het 371 Wh aan energie kost om de temperatuur uit de luchtbehandelingskast gedurende een uur te verwarmen van 18 graden Celsius naar de benodigde inblaastemperatuur van 25,4 °C om een ruimtetemperatuur te behouden van 22 °C.

7.4 Berekening wintersituatie: Warmteterugwinning

Doormiddel van warmteterugwinning van een warmtewiel kunnen de warmte en het vocht van de aanwezige lucht worden hergebruikt om energiekosten te besparen. Het verschil in energiekosten wordt berekend volgens onderstaande stappen.

Als eerst wordt de temperatuur berekend van de uittredende lucht met behulp van het rendement van het warmtewiel en de temperatuur van de retourlucht en de buitenlucht. De buitenlucht bedraagt $-0,9^{\circ}\text{C}$. De retourlucht is afhankelijk van de temperatuur in de kamer op dat moment en bedraagt 22°C . Invullen van de formule levert:

$$T_{toe} = 0,75 \cdot 22,9 - 0,9 = 16,3^{\circ}\text{C}$$

Met behulp van een warmtewiel kan de buitenluchttemperatuur dus verhoogd worden van $-0,9^{\circ}\text{C}$ naar $16,3^{\circ}\text{C}$. De gewenste temperatuur uit de luchtbehandelingskast bedraagt $16,5^{\circ}\text{C}$, waarna de ventilator deze verhoogd naar 18°C . Dit betekent dat er nog maar weinig extra energie nodig is om deze temperatuur te verkrijgen. Deze extra energie bedraagt:

$$Q = (150/3600) \cdot 1,2 \cdot 1004 \cdot (16,5 - 16,3) = 10 \text{ Wh}$$

Net als warmte kan ook vocht worden overgebracht met behulp van een warmtewiel. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de luchtvochtigheid van de buitenlucht en de retourlucht en het rendement van het warmtewiel. Invullen van de formule levert:

$$x_{toe} = 0,75 \cdot 3,07 + 2,93 = 5,2 \text{ g/kg}$$

Met behulp van een warmtewiel kan de luchtvochtigheid van de buitenlucht dus verhoogd worden van $2,93 \text{ g/kg}$ naar $5,2 \text{ g/kg}$. De gewenste luchtvochtigheid uit de luchtbehandelingskast bedraagt 6 g/kg . Dit betekent dat er veel minder energie nodig is om deze luchtvochtigheid te verkrijgen. Deze extra energie bedraagt:

$$\dot{m}_{stoom} = 150 \cdot (0,006 - 0,0052) \cdot 1,295 = 0,155 \text{ kg/h}$$

$$Q_{stoom} = (0,155/3600) \cdot 2650 = 0,11 \text{ kWh}$$

Conclusie van de eerste berekening

Op 1 januari om 01:00 uur kost het, bij gebruik van een warmtewiel, over een uur gezien, in totaal $0,01 + 0,37 = 0,38 \text{ kWh}$ aan warmte om de buitenluchttemperatuur te verhogen van $-0,9^{\circ}\text{C}$ naar $25,3^{\circ}\text{C}$ om een ruimtetemperatuur te behouden van 22°C . Daarnaast kost het $0,11 \text{ kWh}$ aan energie om de absolute luchtvochtigheid te verhogen van $2,93 \text{ g/kg}$ naar 6 g/kg .

In bijlage 3 is de volledige validatieberekening te vinden, waar tevens een controle is uitgevoerd aan de hand van het rekenmodel in Excel.

7.5 Berekening zomersituatie: Luchtbehandeling

Voor een tweede validatieberekening wordt gerekend met de waarden van 20 juni om 14:00 uur. De buitentemperatuur bedraagt 32,7 °C en de relatieve luchtvochtigheid 47%. Dit betreft een zomersituatie. Aan de hand van het rekenmodel is berekend dat het 1,44 kWh aan energie kost om de temperatuur gedurende een uur te koelen van 32,7 °C naar 16 °C, waarbij tegelijkertijd wordt ontvochtigd van 14,8 g/kg naar 10,3 g/kg. Over de berekende waarde is nog geen rendement meegenomen voor het daadwerkelijk opwekken van de energie. In de black-box in figuur 17 zijn de input en uitput ingevuld.



Figuur 17 Berekende waarden voor LBK in een zomersituatie

7.6 Berekening zomersituatie: Warmtestromen

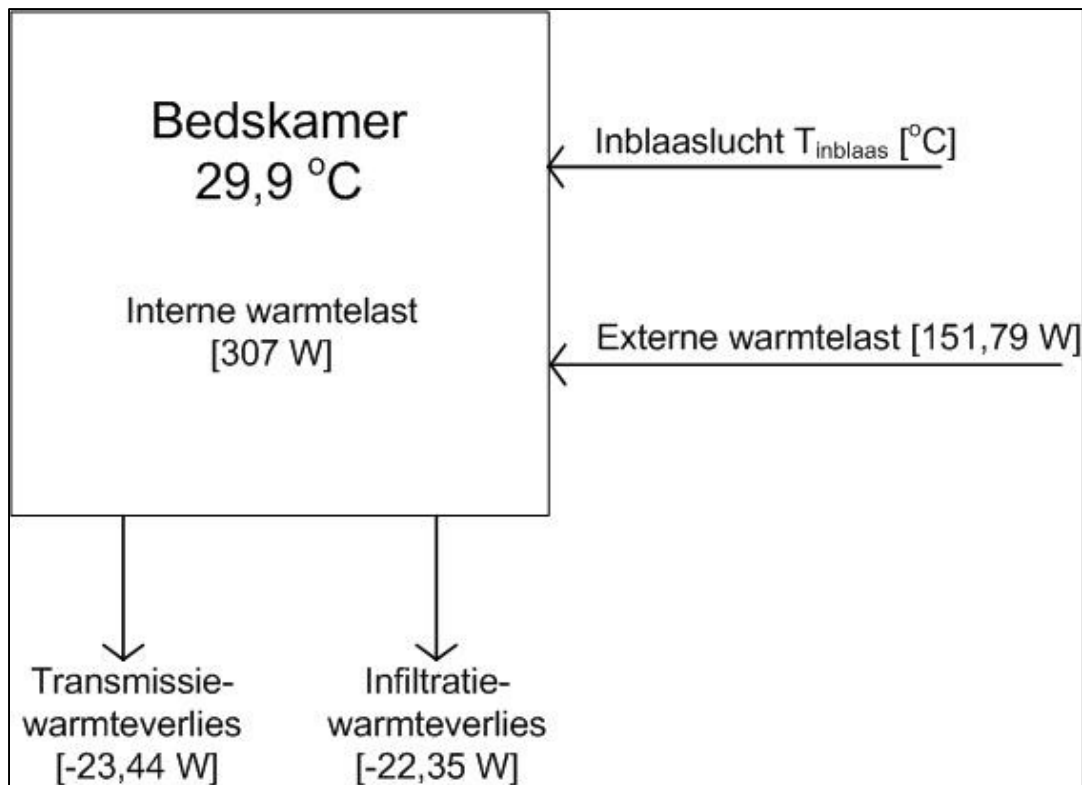
Bij de tweede hoofdstap wordt specifiek gekeken naar de factoren die invloed hebben op de temperatuur in de bedskamer. Deze factoren kunnen afzonderlijk een positieve of negatieve invloed uitoefenen op de warmtehuishouding. De volgende vier factoren spelen een rol:

- Warmtetransmissieverlies
- Infiltratiewarmteverlies
- Interne warmte
- Externe warmte

De som van deze vier factoren minus het vermogen van de inblaaslucht moet nul zijn en wordt opgelost met onderstaande vergelijking:

$$(Q_{transmissie} + Q_{infiltratie} - Q_{intern} - Q_{extern}) - Q_{inblaas} = 0$$

Het vermogen aan warmte dat in de bedskamer wordt toe- of afgevoerd door transmissie, infiltratie, interne warmte en externe warmte moet gecompenseerd worden met het vermogen aan warmte van de inblaaslucht. In de black-box in figuur 18 zijn de berekende waarden aangegeven



Figuur 18 Berekende waarden voor de warmtestromen

7.7 Berekening zomersituatie: Nabehandeling

Nu is berekend hoeveel invloed de verschillende factoren hebben op de energiehuishouding in de bedskamer, kan berekend worden of er met een hogere of lagere temperatuur dan de kamertemperatuur ingeblazen moet worden om de bedskamer op de juiste temperatuur te houden. Dat kan gecontroleerd worden met de volgende vergelijking:

$$(Q_{transmissie} + Q_{infiltratie} - Q_{intern} - Q_{extern}) - Q_{inblaas} = 0$$

Invullen levert:

$$(-23,44 - 22,35 - 307 - 151,79) - Q_{inblaas} = 0$$

Na berekening kan geconcludeerd worden dat de temperatuur van de inblaaslucht lager moet zijn dan de gewenste temperatuur in de bedskamer, namelijk 11,9°C. Echter, de laagste temperatuur waarmee ingeblazen kan worden is 16°C. Dit betekent dat er geen nabehandeling hoeft plaats te vinden.

De temperatuur waarmee ingeblazen wordt bedraagt 16°C. Dit zorgt er voor dat de temperatuur in de bedskamer op 26,1°C komt. De grens van 26°C in de zomer wordt overschreden en daarom zal een overschrijdingsuur worden genoteerd.

Conclusie van de tweede berekening

Op 20 juni om 14:00 uur kost het, over een uur gezien, in totaal 1,44 kWh aan energie om de buitenluchttemperatuur te verlagen van 32,7°C naar 16°C om een ruimtetemperatuur te krijgen van 26,1°C. In bijlage 3 is de volledige validatieberekening te vinden, waar tevens een controle is uitgevoerd aan de hand van het rekenmodel in Excel.

8. Kosten

Om te kunnen concluderen hoeveel geld het kost om de leefomgeving van een bedskamer op de juiste condities te houden, zullen diverse kosten berekend moeten worden.

De totale kosten die hier betrekking op hebben bestaan uit de exploitatie- en investeringskosten.

De investeringskosten zijn zo volledig mogelijk uitgewerkt in dit rapport.

De exploitatiekosten bestaan uit de energie- en onderhoudskosten. De energiekosten worden tevens zo volledig mogelijk uitgewerkt. De onderhoudskosten worden echter niet meegenomen, omdat voor de betrouwbaarheid van die waarden, naar een groter geheel, zoals een heel ziekenhuis moet worden gekeken. Als voorbeeld kan hiervoor een luchtbehandelingskast worden aangenomen. Deze wordt gebruikt om de lucht in de bedskamer te conditioneren, maar tevens gebruikt voor het conditioneren voor vele andere ruimten. Om die reden is het lastig te definiëren in welke mate onderhoudskosten een rol spelen voor één bedskamer.

8.1 Energiekosten

De energiekosten zijn de kosten die nodig zijn om de benodigde hoeveelheid energie te kunnen leveren. Om deze te kunnen bepalen zal een vertaalslag gemaakt moeten worden van de benodigde energie om het klimaat te regelen naar de kosten om die energie op te wekken. De kosten zijn afhankelijk van de benodigde hoeveelheid energie, het type opwekinstallatie en de prijs per m³ gas of kWh stroom, afhankelijk van de soort opwekking.

Er zijn drie processen die plaats vinden en van elk proces moet bekend zijn hoe de benodigde energie opgewekt gaat worden:

- Verwarmen
- Koelen
- Bevochtigen

Verwarmen

Zoals aangegeven op pagina 20 wordt er verwarmd met behulp van een verwarmingsbatterij. Hierbij zorgt de batterij er voor dat de langsstromende lucht wordt verwarmd. Door een verwarmingsbatterij loopt warm water. Om dat warme water te verkrijgen wordt leidingwater verwarmd met behulp van een warmwaterketel. In deze ketel wordt door middel van aardgasverbranding warmte gecreëerd. De reden dat gedurende dit project is gerekend met een warmwaterketel is het feit dat deze op dit moment nog veel wordt geadviseerd door Deerns. Het rendement $[\eta]$ van een warmwaterketel die over het algemeen wordt geadviseerd in grote projecten bedraagt 93%.

Aan de hand van de benodigde energie om te verwarmen kan nu worden berekend hoeveel geld in euro's het kost om die energie op te wekken. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van onderstaande opgestelde formule:

$$\epsilon_{\text{energie}} = (Q_{\text{benodigd}}/BW/\eta) \cdot \epsilon_{\text{aardgas}} \text{ [€]}$$

$$\epsilon_{\text{energie}} = \text{de kosten voor het opwekken van de benodigde energie [€]}$$

$$Q_{\text{benodigd}} = \text{de benodigde hoeveelheid energie [kWh]}$$

$$BW = \text{de calorische bovenwaarde van aardgas [kWh/m}^3\text{]}$$

$$\eta = \text{rendement opwekinstallatie [-]}$$

$$\epsilon_{\text{aardgas}} = \text{de kostprijs van aardgas per kubieke meter [€/m}^3\text{]}$$

De calorische bovenwaarde [BW] van aardgas bedraagt $35,1 \text{ MJ/m}^3 = 9,75 \text{ kWh/m}^3$ [3].

Voor de kostprijs van aardgas [$\epsilon_{aardgas}$] wordt een waarde gehanteerd van 0,45 euro per kubieke meter. Deze waarde wordt door Deerns als standaard aangehouden tijdens calculaties en is gebaseerd op kentallen van grote ziekenhuisprojecten. Er wordt geen rekening gehouden met eventuele prijsstijgingen en inflatie, omdat in dit rapport vergelijkingen worden uitgevoerd tussen bepaalde ontwerputgangspunten en ruimte-eisen aan de hand van de energiekosten. Eventuele prijsstijgingen hebben vrijwel geen invloed op de resultaten van de vergelijkingen.

Koelen

Het koelen gebeurt door een koelbatterij, zoals aangegeven op pagina 21. Hierbij zorgt de batterij er voor dat de langsstromende lucht wordt gekoeld. Door een koelbatterij loopt koud water. Dat water wordt gekoeld met behulp van een compressiekoelmachine. Hierbij wordt door middel van een compressor koude gecreëerd die wordt overgedragen aan het water. De compressiekoelmachine die door Deerns wordt geadviseerd heeft een COP van 3. Dat houdt in dat er per 1 kWh elektriciteit, 3 kWh aan koude kan worden geleverd. De reden dat er geen compressiekoelmachine met een hogere COP wordt geadviseerd, komt doordat de investeringskosten hiervan veel hoger liggen.

Aan de hand van de benodigde energie om te koelen kan nu worden berekend hoeveel geld in euro's het kost om die energie op te wekken. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van onderstaande opgestelde formule:

$$\epsilon_{energie} = (Q_{benodigd}/COP) \cdot \epsilon_{stroom} \text{ [€]}$$

$$\epsilon_{energie} = \text{de kosten voor het opwekken van de benodigde energie [€]}$$

$$Q_{benodigd} = \text{de benodigde hoeveelheid energie [kWh]}$$

$$COP = \text{de Coefficient Of Performance van de opwekinstallatie [-]}$$

$$\epsilon_{stroom} = \text{de kostprijs van stroom per kWh [€/kWh]}$$

Voor de kostprijs van stroom [ϵ_{stroom}] wordt een waarde gehanteerd van 0,10 euro per kilowattuur. Deze waarde wordt door Deerns als standaard aangehouden tijdens calculaties en is gebaseerd op kentallen van grote ziekenhuisprojecten. Tevens wordt hierbij geen rekening gehouden met eventuele prijsstijgingen en inflatie.

Bevochtigen

Het bevochtigen van lucht gebeurt in een bevochtigingssectie van de luchtbehandelingskast. Hierbij wordt stoom aan de langsstromende lucht gevoegd. Zoals aangegeven op pagina 23 wordt stoom opgewekt met behulp van een stoomketel. Hierin wordt leidingwater verwarmd tot het verzadigingspunt bij 1,5 bar, waarna de natte stoom wordt omgezet in droge stoom. De stoomketel die door Deerns wordt geadviseerd heeft een rendement van 65%.

Aan de hand van de benodigde energie om te bevochtigen kan nu worden berekend hoeveel geld in euro's het kost om die energie op te wekken. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van onderstaande opgestelde formule:

$$\epsilon_{energie} = (Q_{benodigd}/BW/\eta) \cdot \epsilon_{aardgas} \text{ [€]}$$

$$\epsilon_{energie} = \text{de kosten voor het opwekken van de benodigde energie [€]}$$

$$Q_{benodigd} = \text{de benodigde hoeveelheid energie [kWh]}$$

$$BW = \text{de calorische bovenwaarde van aardgas [kWh/m}^3\text{]}$$

$$\eta = \text{rendement opwekinstallatie [-]}$$

$$\epsilon_{aardgas} = \text{de kostprijs van aardgas per kubieke meter [€/m}^3\text{]}$$

In paragraaf 8.2 zal met behulp van validatieberekeningen worden aangetoond wat de energiekosten zijn op twee verschillende momenten in het jaar.

8.2 Validatieberekening energiekosten

Om de uitgedrukte kosten in het rekenmodel te kunnen valideren, is in deze paragraaf een tweetal berekeningen uitgewerkt waarmee de energiekosten worden berekend. Hierbij is gerekend met dezelfde situaties als bij de validatieberekeningen voor de luchtbehandeling die te vinden zijn vanaf pagina 34.

Wintersituatie

Op 1 januari om 01:00 uur kost het, over een uur gezien, in totaal 0,38 kWh aan energie om de buitenluchttemperatuur te verhogen van $-0,9^{\circ}\text{C}$ naar $25,3^{\circ}\text{C}$ om daarbij een ruimtetemperatuur te behouden van 22°C . Daarnaast kost het 0,11 kWh aan energie om de absolute luchtvochtigheid te verhogen van 2,93 g/kg naar 6 g/kg.

Om te berekenen hoeveel geld in euro's het kost om 0,38 kWh aan warmte te produceren, wordt gebruik gemaakt van de volgende formule:

$$\epsilon_{\text{energie}} = (Q_{\text{benodigd}}/BW/\eta) \cdot \epsilon_{\text{aardgas}} [\text{€}]$$

Invullen levert:

$$\epsilon_{\text{energie}} = (0,38/9,75/0,93) \cdot 0,45 = \text{€ } 0,02$$

Hieruit volgt dat het 2 eurocent kost om op 1 januari om 01:00 's-nachts, gedurende een uur, de temperatuur in de bedskamer op het gewenste niveau te houden.

Vervolgens wordt berekend hoeveel geld in euro's het kost om 0,11 kWh aan vocht te produceren:

$$\epsilon_{\text{energie}} = (0,11/9,75/0,65) \cdot 0,45 = \text{€ } 0,01$$

Hieruit volgt dat het 1 eurocent kost om op 1 januari om 01:00 's-nachts, gedurende een uur, de luchtvochtigheid in de bedskamer op het gewenste niveau te houden.

De totale kosten om op 1 januari om 01:00 's-nachts de luchtconditie op het gewenste niveau te houden, bedragen $0,02 + 0,01 = \text{€ } 0,03$.

Zomersituatie

Op 20 juni om 14:00 uur kost het, over een uur gezien, in totaal 1,44 kWh aan energie om de buitenluchttemperatuur te verlagen van $32,7^{\circ}\text{C}$ naar 16°C om een ruimtetemperatuur te krijgen van $26,1^{\circ}\text{C}$.

Om te berekenen hoeveel geld in euro's het kost om 1,44 kWh aan koude te produceren, wordt de formule ingevuld:

$$\epsilon_{\text{energie}} = (1,44/3) \cdot 0,1 = \text{€ } 0,05$$

Hieruit volgt dat het 5 eurocent kost om op 20 juni om 14:00 overdag, gedurende een uur, een ruimtetemperatuur in de bedskamer te krijgen van $26,1^{\circ}\text{C}$. Deze temperatuur ligt hoger dan de bovengrens van de temperatuur in de zomer, daarom wordt dit uur als overschrijdingsuur gerekend.

8.3 Investeringskosten

De investeringskosten zijn de materiële kosten en de montagekosten van de benodigde onderdelen en worden afgebakend tot net buiten de bedskamer. In figuur 19 is aangegeven welke componenten meespelen voor de investeringskosten van een bedskamer.

De kosten zitten in de volgende onderdelen, waarvan met cijfers is aangegeven welk onderdeel dit is in de figuur:

- Naverwarmer (1)
- Leidingen (2)
- Roosters (3)
- Luchtkanalen (4)

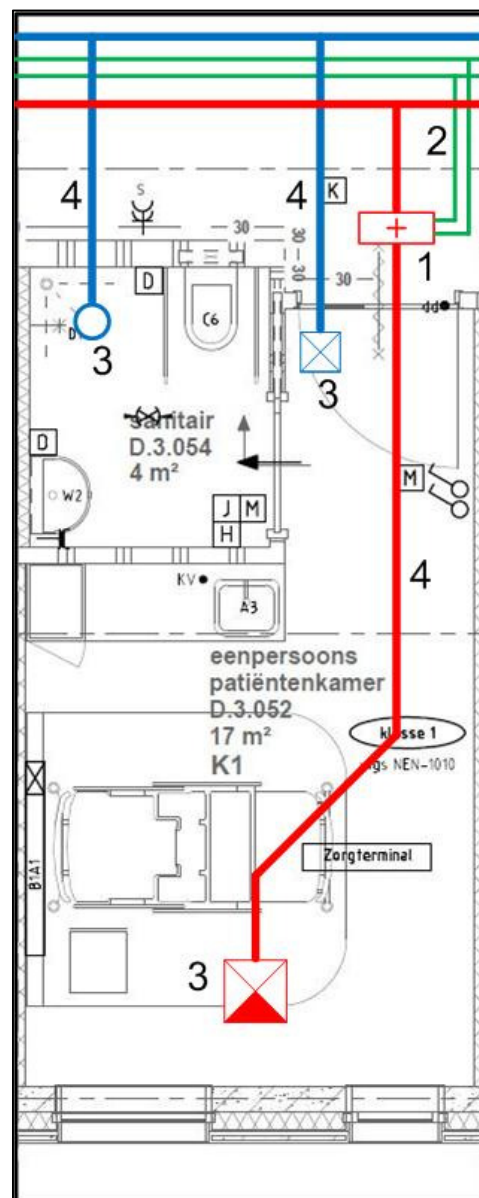
Naverwarmer (1) en leidingen (2)

Zoals aangegeven in hoofdstuk 6, op pagina 33, is een naverwarmer een verwarmbatterij die wordt gebruikt om de lucht, afkomstig uit de luchtbehandelingskast, te verwarmen naar de benodigde temperatuur om de bedskamer op de gewenste conditie te houden. Over het algemeen wordt een naverwarmer geplaatst net voor de ingang naar de bedskamer. Dit heeft te maken met eventuele onderhoudswerkzaamheden die plaats kunnen vinden buiten de bedskamer.

Naverwarmers vallen in een bepaalde vermogensrange. Zo kunnen de kleinste naverwarmers een vermogen leveren tot 800 Watt. Uit berekeningen is gebleken dat een piekvermogen van 800 Watt niet zal worden bereikt in een bedskamer en om die reden kan in alle gevallen gebruik worden gemaakt van de kleinste naverwarmer.

Naast de kosten van de naverwarmer zelf, spelen ook de kosten van leidingen een rol. Leidingen zorgen voor de aan- en afvoer van water naar en van de naverwarmer. De diameter van deze leidingen is afhankelijk van de massastroom van het water en daarmee afhankelijk van het gevraagde vermogen van de naverwarmer.

In tabel 6 zijn de kosten verwerkt van de naverwarmer en diverse leidingen die daar bij toegepast worden. De complete naverwarmer heeft een vaste prijs. De prijs van de leidingen is opgegeven per meter bij verschillende binnendiameters. De prijzen zijn inclusief montagekosten en exclusief BTW.



Figuur 19 Installatie in de bedskamer

Tabel 6 Prijzen van de naverwarmer en leidingen

Onderdeel	Prijs
Naverwarmer 800 Watt (incl. afsluiters)	€511,-
Leiding t.b.v. water voor naverwarmer 15 mm geïsoleerd	€35,-/m ¹
Leiding t.b.v. water voor naverwarmer 20 mm geïsoleerd	€47,-/m ¹
Leiding t.b.v. water voor naverwarmer 50 mm geïsoleerd	€86,-/m ¹

Roosters (3) en luchtkanalen (4)

De lucht uit de luchtbehandelingskast wordt naar verschillende ruimten geleid met behulp van kanalen en zal uiteindelijk via een toevoerrooster in de bedskamer worden geblazen. Tegelijkertijd wordt lucht afgezogen via één of meerdere afvoerrooster(s) en wederom met behulp van kanalen teruggevoerd naar een afvoerkast. De investeringskosten van de roosters en kanalen zijn afhankelijk van het luchtdebiet dat de kamer ingeblazen wordt. Naarmate het luchtdebiet toeneemt, nemen de afmetingen van de roosters en kanalen toe.

Er zijn twee soorten roosters die worden toegepast, namelijk toevoerroosters en afvoerroosters. De afmeting van het toevoerrooster wordt bepaald door het luchtdebiet en de 'richting van inblazen'. Zoals in figuur 19 is te zien, wordt lucht ingeblazen in een bedskamer vanuit drie van de vier zijdes van het toevoerrooster (het rode vlak is dicht). De reden dat niet richting de gevel wordt geblazen is om extra warmteverlies tegen te gaan. Om te zorgen dat de inblaassnelheid niet te hoog wordt, door het dichtzetten van een vlak, zal het rooster groter gedimensioneerd moeten worden. Naast het feit dat lucht wordt ingeblazen door een toevoerrooster, wordt lucht afgevoerd via afvoerroosters. In de praktijk wordt altijd één afvoerrooster geplaatst in de sanitaire ruimte. Zo kan, wanneer er gedoucht wordt, meteen warme vochtige lucht worden afgezogen. Er zitten echter grenzen aan de hoeveelheid lucht die dit rooster kan afvoeren. Zo mag dit afvoerrooster maximaal 100 m³/h afvoeren. De reden hiervan is dat er geen groter luchtdebiet onder de deur van de bedskamer naar de sanitaire ruimte kan worden getrokken, zonder hierbij hinder in de vorm van geluid of tocht te veroorzaken. Dit betekent dat, als er met een groter luchtdebiet dan 100 m³/h wordt ingeblazen, er een extra afvoerrooster geplaatst dient te worden in de bedskamer.

Wat de luchtkanalen betreft, wordt onderscheid gemaakt in ronde en rechthoekige kanalen.

Afhankelijk van het luchtdebiet dat door de kanalen moet gaan, kan worden bepaald welk type, financieel en bouwkundig gezien, het best kan worden toegepast.

Aan de hand van gegevens, afkomstig van de calculatieafdeling van Deerns, is bekend geworden dat ronde kanalen, tot een inwendige diameter van 315 mm, een stuk goedkoper zijn dan rechthoekige kanalen. Bij een grotere diameter nemen de kosten flink toe en kunnen prijstechnisch gezien beter rechthoekige kanalen worden toegepast. Bouwkundig gezien speelt ongeveer hetzelfde verhaal. Ronde kanalen vanaf 315 mm nemen vaak teveel ruimte in, wat er voor kan zorgen dat een plafond lager komt te hangen; dit is vaak niet wenselijk. Bij het gebruik van rechthoekige kanalen kan de breedte in worden gewerkt, waardoor de hoogte beperkt kan worden.

Om te kunnen bepalen welke type kanaal het beste toegepast kan worden en welke afmetingen deze moet hebben, zal een berekening worden uitgevoerd. Om de afmetingen te kunnen bepalen is het van belang dat het luchtdebiet bekend is en de snelheid die de lucht mag hebben in de kanalen. Een ontwerpuitgangspunt van de snelheid van de lucht waarmee wordt ingeblazen bedraagt 3,5 m/s. Uit ervaring van Deerns is gebleken dat men bij deze snelheid geen hinder in de vorm van tocht of geluid ondervindt. Afhankelijk van het luchtdebiet dat gehanteerd wordt, kan nu worden berekend of kan worden voldaan met een rond luchtkanaal of dat moet worden overgestapt naar een rechthoekig kanaal. Hiervoor wordt de volgende opgestelde formule gebruikt:

$$d = 2 \cdot \sqrt{(\Phi_v/v/\pi)} \quad [m]$$

d = binnendiameter van de buis [m]

Φ_v = luchtdebiet [m³/s]

v = luchtsnelheid [m/s]

Als de binnendiameter [d] kleiner blijkt dan 315 mm, kan gebruik worden gemaakt van een rond kanaal als medium om de lucht te verplaatsen. Indien de binnendiameter groter blijkt dan 315 mm, zal overgestapt moeten worden naar rechthoekige kanalen.

De afmeting van rechthoekige kanalen wordt dan berekend volgens:

$$b = \sqrt{(\Phi_v/v)} \text{ [m]}$$

b = breedte/hoogte van het kanaal [m]

Φ_v = luchtdebiet [m^3/s]

v = luchtsnelheid [m/s]

Hierbij wordt, voor de eenvoud, gerekend met een vierkant luchtkanaal. De oppervlakte van het kanaal, bij een lengte van één meter, wordt dan berekend volgens:

$$\text{opp.} = 4 \cdot b \text{ [m}^2\text{]}$$

In tabel 7 zijn de kosten aangegeven van diverse roosters, onderdelen daarvan en luchtkanalen. Deze prijzen zijn inclusief montagekosten en exclusief BTW.

Tabel 7 Prijzen van roosters en kanalen

Onderdeel	Prijs
Geperforeerd toevoerrooster 180 m^3/h	€216,-
Geperforeerd toevoerrooster 216 m^3/h	€230,-
Geperforeerd toevoerrooster 366 m^3/h	€242,-
Inregelklep voor toevoerrooster	€80,-
Geperforeerd retourrooster 180 m^3/h	€136,-
Afvoerventiel 100 m^3/h	€93,-
Rechthoekig kanaal per meter, plaatmateriaal geïsoleerd	€73,90/ m^2
Rechthoekig kanaal per meter, plaatmateriaal zonder isolatie	€60,-/ m^2
Rond kanaal, tot een diameter van 315 mm	€64,-/ m^1

Aan de hand van een variantenanalyse zal worden aangetoond wat voor invloed een verandering van het luchtdebiet heeft op de totale investeringskosten van een bedskamer. Deze analyse is te vinden op pagina 59.

8.4 Validatieberekening investeringskosten

Om de uitgedrukte kosten in het rekenmodel te kunnen valideren, is in deze paragraaf een aantal berekeningen uitgewerkt waarmee de afmetingen van kanalen worden bepaald. Hierbij is gerekend met dezelfde situaties als bij de validatieberekeningen voor de luchtbehandeling.

Als eerst is bekeken of kan worden voldaan met een rond kanaal. Daarvoor wordt gebruik gemaakt van de volgende formule:

$$d = 2 \cdot \sqrt{(\Phi_v/v/\pi)} \text{ [m]}$$

Het luchtdebiet bedraagt 150 m^3/h en de snelheid van de lucht waarmee de bedskamer wordt ingeblazen is 3,5 m/s .

Invullen van de formule levert:

$$d = 2 \cdot \sqrt{(150/3600)/3,5/\pi)} = 0,123 \text{ m} = 123 \text{ mm}$$

Bij een luchtdebiet van $150 \text{ m}^3/\text{h}$ kan gebruik worden gemaakt van een rond kanaal met een diameter van 123 mm. Afhankelijk van een gestandaardiseerde afmeting, wordt het kanaal iets groter gedimensioneerd.

Om te kunnen controleren of er situaties voorkomen in een bedskamer, waarbij rechthoekige kanalen toegepast dienen te worden, wordt een berekening uitgevoerd die een maximaal luchtdebiet weergeeft.

$$\phi_v = (d/2)^2 \cdot \pi \cdot v \cdot 3600 \text{ [m}^3/\text{h]}$$

Invullen levert:

$$\phi_v = (0,315/2)^2 \cdot \pi \cdot 3,5 \cdot 3600 = 982 \text{ [m}^3/\text{h]}$$

Vanaf een luchtdebiet van $982 \text{ m}^3/\text{h}$ kan niet meer worden voldaan met een rond kanaal. Dit luchtdebiet zal nooit gehaald worden in een bedskamer en daarom kan worden vastgesteld dat in een bedskamer altijd ronde kanalen toegepast kunnen worden.

9. Rekenmodel

In dit hoofdstuk zal globaal worden toegelicht hoe het rekenmodel werkt. De opbouw van het tabblad 'berekeningen' in het rekenmodel, waarin alle berekeningen worden uitgevoerd, wordt in bijlage 2 toegelicht. Het invoerblad ziet eruit als de afbeelding in figuur 20.

			
Betreft: Rekenmodel bedskamer met één gevelzijde Project: Afstudeeropdracht Beheerder: Klaas Groenewegen Datum: 20-12-2012			
Invoer		Uitvoer	
150	Luchtdebiet [m3/h]	€ 103,37	Energiekosten per jaar (met warmtewiel) [€]
		216	Overschrijdingsuren bovengrens zomer [h]
	Bouwkundige gegevens van de gevel		
Zuid	Oriëntatie van de gevel t.o.v. de zon [-]		
13,3	Oppervlakte van de totale gevel [m2]	1392	Totale warmtestroom [kWh]
40%	Percentage glas aan de gevel [%]	605	Totale koudestroom [kWh]
3	Rc-waarde van de gevel [m2*K/W]	28	Kuub gas voor bevochtiging [m3]
1,1	U-waarde van het glas [W/m2*K]		
0,17	ZTA-waarde van het glas [-]		
	Wensen temperatuur uit LBK		
10	Grens zomer-wintersituatie [oC]	6319	Aantal uur verwarmen
16	Temperatuur inblaasluft uit LBK bij zomersituatie [oC]	2400	Aantal uur koelen
18	Temperatuur inblaasluft uit LBK bij wintersituatie [oC]	41	Aantal uur niet verwarmen of koelen
		8760	Aantal uur in een jaar
	Wensen luchtconditie in bedskamer		
22	Ontwerptemperatuur bedskamer [oC]		
26	Bovengrens temperatuur in de zomer [oC]		
6	Gewenste absolute luchtvochtigheid bij wintersituatie [g/kg]		
10,3	Gewenste absolute luchtvochtigheid bij zomersituatie [g/kg]		
	Interne warmtelast		
307	Totale interne warmtelast incl. verlichting [W]		

Figuur 20 Invoerblad rekenmodel Excel

Aan de linkerzijde staan de invoerwaarden. Deze reeds weergegeven invoerwaarden worden als 'standaard' aangehouden tijdens de validatieberekeningen en de variantenanalyses. Het aanpassen van een of meerdere invoerwaarden zal invloed uitoefenen op de energiekosten en/of het aantal overschrijdingsuren. De invoerwaarden zijn verdeeld over bepaalde groepen, zoals het luchtdebiet waarmee wordt ingeblazen, de bouwkundige gegevens van de gevel, de wensen van de temperatuur uit de LBK, de wensen van de luchtconditie in de bedskamer en de interne warmtelast.

Rechts staat de uitvoer. Hierin worden de energiekosten per jaar weergegeven die nodig zijn om een bedskamer op de gewenste condities (Invoer; wensen bedskamer) te krijgen. Tevens wordt het aantal overschrijdingsuren weergegeven, dus het aantal uur dat de gewenste temperatuur in de kamer (in de zomer) niet bereikt kan worden.

Daaronder worden de totale warmtestroom en koudestroom weergegeven, net als het aantal kuub gas dat nodig is om een jaar lang te bevochtigen.

10. Variantenanalyses

Aan de hand van variantenanalyses zullen conclusies getrokken worden over de effecten van ontwerpuitgangspunten en ruimte-eisen voor een bedskamer. Zo is er op basis van een aantal ontwerpuitgangspunten, met behulp van het rekenmodel in Excel, een aantal analyses gedaan waarbij continue is gewerkt vanuit een 'standaard'. Dezelfde standaard invoerwaarden zijn aangehouden voor de validatieberekeningen voor luchtbehandeling (zie pagina 34).

- Luchtdebiet:	150 m ³ /h
- Oriëntatie van de gevel:	zuidzijde
- Oppervlakte van de gevel:	13,3 m ²
- Percentage glas:	40%
- Warmteweerstand van de gevel:	3 m ² *K/W
- Warmtedoorgangscoefficiënt van het glas:	1,1 W/m ² *K
- Zontoetredingsfactor door glas i.c.m. buitenzonwering:	0,17
- Grens zomer-wintersituatie:	10 °C
- Inblaastemperatuur uit de LBK in de winter:	18 °C
- Inblaastemperatuur uit de LBK in de zomer:	16 °C
- Ontwerptemperatuur bedskamer:	22 °C
- Temperatuur bovengrens in de zomer:	26 °C
- Absolute luchtvochtigheid in de winter:	6 g/kg
- Absolute luchtvochtigheid in de zomer:	10,3 g/kg
- Interne warmtelast met verlichting:	307 W

In dit hoofdstuk worden analyses uitgevoerd over onderstaande factoren, waardoor duidelijk wordt wat voor invloed het aanpassen van deze variabelen heeft op de energiekosten en het aantal overschrijdingsuren per jaar voor één bedskamer.

- De oriëntatie van de gevel t.o.v. de zon.
- De warmteweerstand (Rc-waarde) van de gevel.
- Het percentage glas in de gevel.
- De zontoetredingsfactor absoluut (ZTA-waarde).
- De warmtedoorgangscoefficiënt (U-waarde) van glas
- De relatieve luchtvochtigheid.
- Investeringskosten voor energiedistributie.

Bij elke analyse wordt eerst in een tabel aangegeven wat voor invloed een aanpassing heeft op de energiekosten en het aantal overschrijdingsuren, waarna vervolgens het aantal overschrijdingsuren wordt teruggebracht naar een acceptabel niveau dat ligt onder de 210 uur per jaar en wederom wordt gekeken welke invloed dat heeft op de uiteindelijke energiekosten.

Met een gele markering wordt in de tabellen aangegeven welke situatie de 'standaard' is en met een oranje markering worden de situaties aangegeven waarbij teveel overschrijdingsuren optreden en daarom het luchtdebiet zal moeten worden opgevoerd.

De uiteindelijke energiekosten worden geplot in een grafiek en vervolgens genoteerd in een tweede tabel, waarbij met een groene markering wordt aangegeven met welk verhoogd luchtdebiet kan worden voldaan aan een acceptabel aantal overschrijdingsuren.

10.1 Oriëntatie van de gevel

Als eerst is gekeken welke invloed de oriëntatie van de gevel t.o.v. de zon heeft op het energieverbruik en het aantal overschrijdingsuren per jaar voor één bedskamer. Hierbij zijn acht verschillende oriëntaties aangehouden. Aan de hand van de standaard invoerwaarden, te vinden op pagina 48, is bekeken welke invloed de betreffende oriëntaties hebben op de energiekosten en het aantal overschrijdingsuren.

Tabel 8 Vergelijking tussen verschillende oriëntaties bij standaard invoerwaarden

Oriëntatie [-]	Energiekosten [€]	Luchtdebiet [m ³ /h]	Overschrijdingsuren [-]
Noord	€ 107,42	150	10
Noordoost	€ 106,85	150	7
Oost	€ 105,46	150	18
Zuidoost	€ 105,11	150	89
Zuid	€ 103,37	150	216
Zuidwest	€ 103,70	150	371
West	€ 105,10	150	301
Noordwest	€ 106,70	150	73

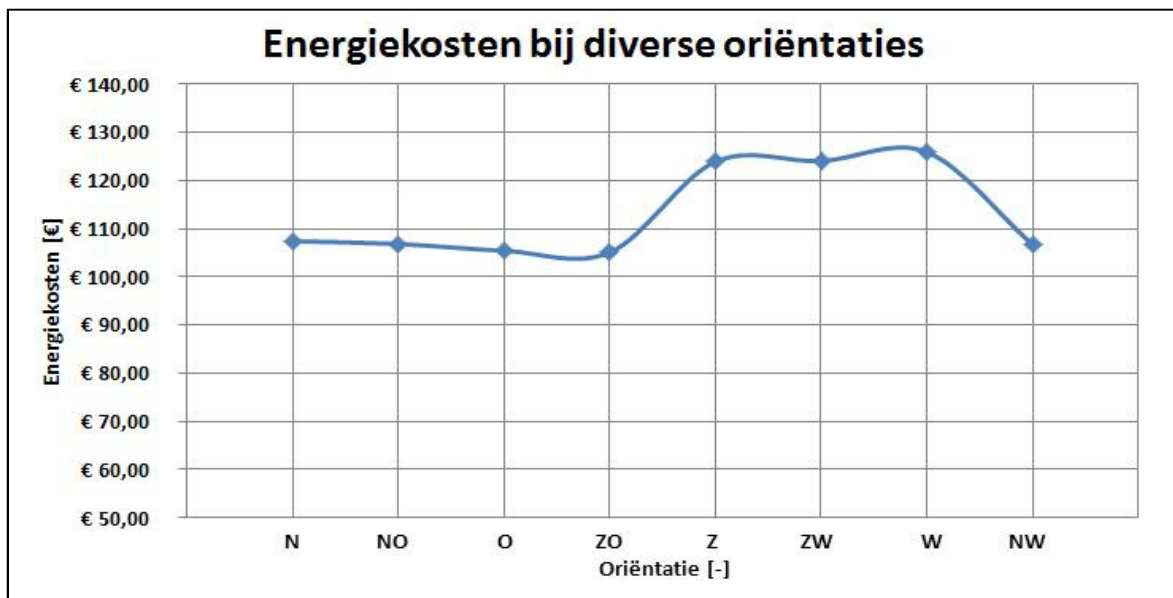
Uit de waarden van tabel 8 is te constateren dat bij drie oriëntaties het aantal overschrijdingsuren een grotere waarde bedraagt dan de toegestane waarde van 210 (oranje gemarkeerd). Het aantal overschrijdingsuren zal dus terug moeten worden gebracht. Dit zal gedaan worden door het luchtdebiet op te voeren, waardoor het koelvermogen toeneemt en daardoor het aantal uur dat de temperatuur wordt overschreden, afneemt. Het luchtdebiet wordt met stappen van 25 m³/h verhoogd. Dit in verband met de regelbaarheid.

Tabel 9 Vergelijking tussen verschillende oriëntaties na verhoging luchtdebiet

Oriëntatie [-]	Energiekosten [€]	Luchtdebiet [m ³ /h]	Overschrijdingsuren [-]
Noord	€ 107,42	150	10
Noordoost	€ 106,85	150	7
Oost	€ 105,46	150	18
Zuidoost	€ 105,11	150	89
Zuid	€ 123,93	175	48
Zuidwest	€ 124,06	175	128
West	€ 125,92	175	108
Noordwest	€ 106,70	150	73

In tabel 9 is weergegeven wat de nieuwe waarden zijn. Hierin is te zien dat het aantal overschrijdingsuren op de drie oriëntaties kan worden teruggebracht naar een acceptabel niveau door het luchtdebiet met 25 m³/h te verhogen naar 175 m³/h.

In figuur 21 is een grafiek geplot, waarin is weergegeven in welke mate de energiekosten stijgen, waarbij wordt voldaan aan het maximaal aantal overschrijdingsuren van 210 per jaar. Uit de grafiek kan worden geconcludeerd dat de energiekosten bij een zuid, zuidwest of west oriëntatie flink toenemen. Deze extra kosten zitten in het vermogen dat nodig is om te koelen en daarmee het aantal overschrijdingsuren terug te brengen onder de 210 uur per jaar



Figuur 21 Energiekosten bij diverse oriëntaties

10.2 Warmteweerstand van de gevel

Vervolgens is gekeken welke invloed de warmteweerstand (R_c -waarde) van de gevel heeft op het energieverbruik en het aantal overschrijdingsuren per jaar. Hierbij zijn zeven verschillende R_c -waarden vergeleken. Volgens het huidige bouwbesluit is de eis aan de warmteweerstand van de gevel bij nieuwbouw $3,0 \text{ m}^2\text{K/W}$. De plus-eis voor duurzaam bouwen stelt een eis van $4,0 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Tabel 10 Vergelijking tussen verschillende R_c -waarden bij standaard invoerwaarden

R_c -waarde gevel [$\text{m}^2\text{K/W}$]	Energiekosten [€]	Luchtdebiet [m^3/h]	Overschrijdingsuren [-]
1	€ 123,42	150	179
2	€ 108,73	150	203
3	€ 103,37	150	216
4	€ 100,60	150	228
5	€ 98,91	150	238
6	€ 97,77	150	239
7	€ 96,95	150	239

Uit de waarden van tabel 10 kan geconcludeerd worden dat, naarmate de warmteweerstand (R_c -waarde) van de gevel hoger wordt, de energiekosten afnemen. Dit is logisch te verklaren door het feit dat er bij een hogere R_c -waarde in de wintersituaties minder transmissieverlies naar buiten optreedt en daardoor minder energie nodig is om te verwarmen.

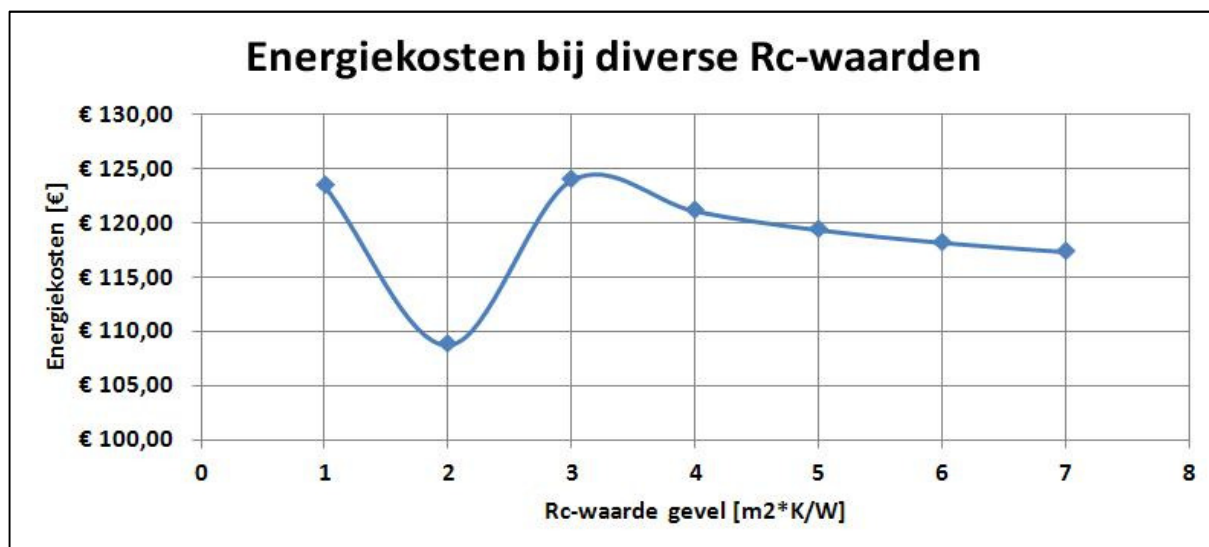
Dat het aantal overschrijdingsuren juist toeneemt is te verklaren door het volgende:

Een hogere R_c -waarde is positief in de wintersituatie, omdat er minder warmteverlies naar de buitenomgeving optreedt. In de zomer is dit tevens positief, omdat dan minder warmte van buiten naar binnen treedt. Echter, een bepaalde tussenperiode, waarbij de buitentemperatuur lager ligt dan de binnentemperatuur en de interne warmte en externe warmte voor veel warmtetoevoer zorgen, is een lagere R_c -waarde juist gunstiger, omdat er dan meer warmtetransmissie naar buiten optreedt en daardoor minder koelvermogen nodig is. Om een conclusie te kunnen trekken over de verhouding tussen beide waarden, zullen de overschrijdingsuren terug worden gebracht naar een waarde onder de 210 uur per jaar door het luchtdebiet te verhogen en vervolgens opnieuw te kijken wat voor invloed dit heeft op de relatie tussen beiden.

Tabel 11 Vergelijking tussen verschillende Rc-waarden na verhoging luchtdebiet

Rc-waarde gevel [m ² *K/W]	Energiekosten [€]	Luchtdebiet [m ³ /h]	Overschrijdingsuren [-]
1	€ 123,42	150	179
2	€ 108,73	150	203
3	€ 123,93	175	48
4	€ 121,09	175	49
5	€ 119,35	175	51
6	€ 118,18	175	51
7	€ 117,33	175	54

In tabel 11 is weergegeven wat de nieuwe waarden zijn. Hierin is te zien dat de overschrijdingsuren kunnen worden teruggebracht naar een acceptabel niveau door het luchtdebiet met 25 m³/h te verhogen naar 175 m³/h. In figuur 22 is een grafiek geplot met het resultaat.



Figuur 22 Energiekosten bij diverse Rc-waarden

Uit de grafiek is op te maken dat een Rc-waarde van 2 m²*K/W voor de gevel de meest positieve uitkomst geeft voor de energiekosten. Dit komt doordat er met een hogere Rc-waarde niet meer kan worden voldaan aan het aantal overschrijdingsuren en daarom het luchtdebiet van 150 m³/h verhoogd moet worden. Deze verhoging in het luchtdebiet resulteert in grotere energiekosten. Belangrijk om te realiseren is dat het aantal overschrijdingsuren bij verschillende Rc-waarden maar weinig verschillen onderling. Om die reden heeft een kleine aanpassing aan een ander ontwerpuitgangspunt al een grote invloed op de uitkomst van de warmteweerstand van de gevel. Wanneer een vergelijking wordt uitgevoerd waarbij altijd hetzelfde luchtdebiet wordt aangehouden, kan geconcludeerd worden dat, naarmate de Rc-waarde van de gevel toeneemt, de energiekosten afnemen.

10.3 Glaspercentage

Vervolgens is gekeken welke invloed de hoeveelheid glas in de gevel heeft op het energieverbruik en het aantal overschrijdingsuren per jaar. Hiervoor is de hoeveelheid glas aangegeven als percentage van de oppervlakte van de gevel.

Tabel 12 Vergelijking tussen verschillende percentages glas bij standaard invoerwaarden

Glaspercentage [%]	Energiekosten [€]	Luchtdebiet [m ³ /h]	Overschrijdingsuren [-]
20	€ 97,11	150	4
30	€ 100,10	150	54
40	€ 103,37	150	216
50	€ 106,78	150	411
60	€ 110,30	150	564
70	€ 113,89	150	705
80	€ 117,52	150	832

Uit de waarden van tabel 12 kan worden geconcludeerd dat, naarmate het percentage glas toeneemt, zowel de energiekosten als het aantal overschrijdingsuren toenemen. De reden dat de energiekosten toenemen, komt doordat het warmtetransmissieverlies groter wordt bij een toename van het percentage glas. Hierdoor zal er meer verwarmd moeten worden in de winter.

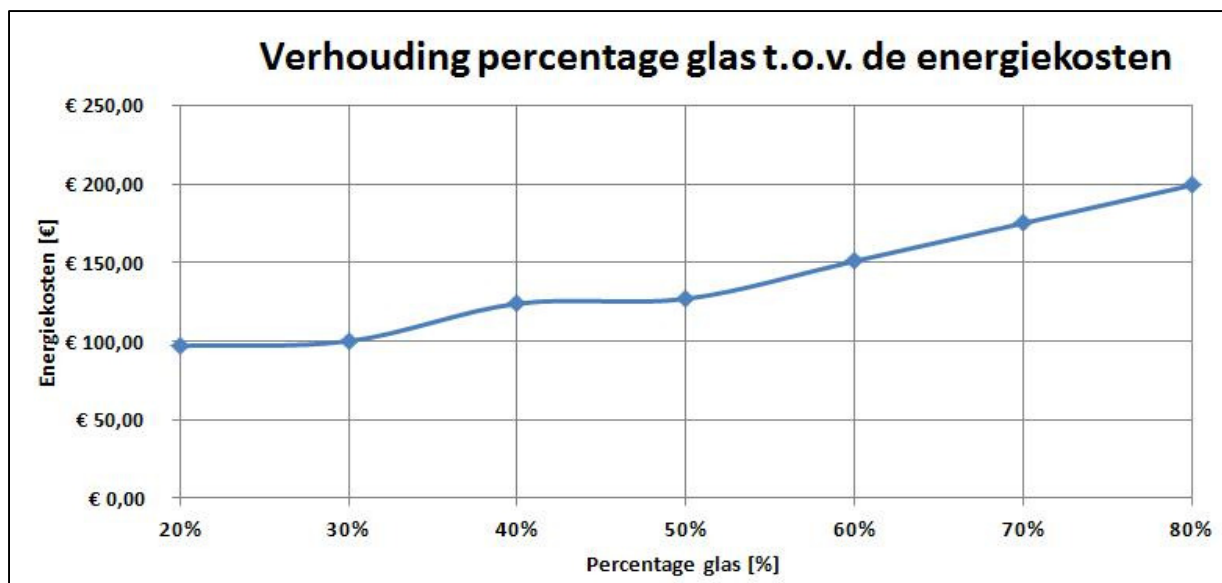
Het aantal overschrijdingsuren neemt sterk toe, omdat meer zonnestraling naar binnen kan treden en deze zorgt voor een grote warmtelast in de zomer.

Om een conclusie te kunnen trekken over de verhouding tussen beide waarden, zullen de overschrijdingsuren wederom terug worden gebracht naar een waarde onder de 210 uur per jaar door het luchtdebiet te verhogen en vervolgens opnieuw te kijken wat voor invloed dit heeft op de relatie tussen beiden.

Tabel 13 Vergelijking tussen verschillende percentages glas na verhoging luchtdebiet

Glaspercentage [%]	Energiekosten [€]	Luchtdebiet [m ³ /h]	Overschrijdingsuren [-]
20	€ 97,11	150	4
30	€ 100,10	150	54
40	€ 123,93	175	48
50	€ 127,01	175	179
60	€ 150,97	200	153
70	€ 175,10	225	136
80	€ 199,32	250	127

In tabel 13 is weergegeven wat de nieuwe waarden zijn. Hierin is te zien hoe de overschrijdingsuren kunnen worden teruggebracht naar een acceptabel niveau door het luchtdebiet te verhogen in stappen van 25 m³/h. In figuur 23 is een grafiek geplot met het resultaat.



Figuur 23 Energiekosten bij diverse percentages glas

Uit de grafiek is op te maken dat de energiekosten sterk toenemen naarmate het percentage glas toeneemt. Deze extra kosten zitten in het vermogen dat nodig is om te koelen en daarmee het aantal overschrijdingsuren terug te brengen onder de 210 uur per jaar.

10.4 Zontoetredingsfactor absoluut

De zontoetredingsfactor absoluut (ZTA-waarde) is afhankelijk van het type glas dat wordt toegepast en het gebruik van buitenzonwering. Aan de hand van de mogelijkheden uit tabel 5 op pagina 31 wordt bepaald welke invloed een aanpassing heeft op de energiekosten en het aantal overschrijdingsuren. Opvallend zijn de grote stappen die worden gemaakt. Dit heeft te maken met het type zonwering dat wordt toegepast.

Tabel 14 Vergelijking tussen verschillende ZTA-waarden bij standaard invoerwaarden

ZTA-waarde [-]	Energiekosten [€]	Luchtdebiet [m ³ /h]	Overschrijdingsuren [-]
0.82	€ 95,28	150	1869
0.70	€ 95,92	150	1690
0.63	€ 96,38	150	1555
0.55	€ 96,98	150	1413
0.52	€ 97,24	150	1348
0.17	€ 103,37	150	216
0.10	€ 106,31	150	11

Uit de waarden van tabel 14 kan geconcludeerd worden dat, naarmate de ZTA-waarde groter wordt, de energiekosten afnemen. Dit komt doordat er minder energie nodig is om te verwarmen, aangezien de warmtelast van de zon in de ruimte toeneemt.

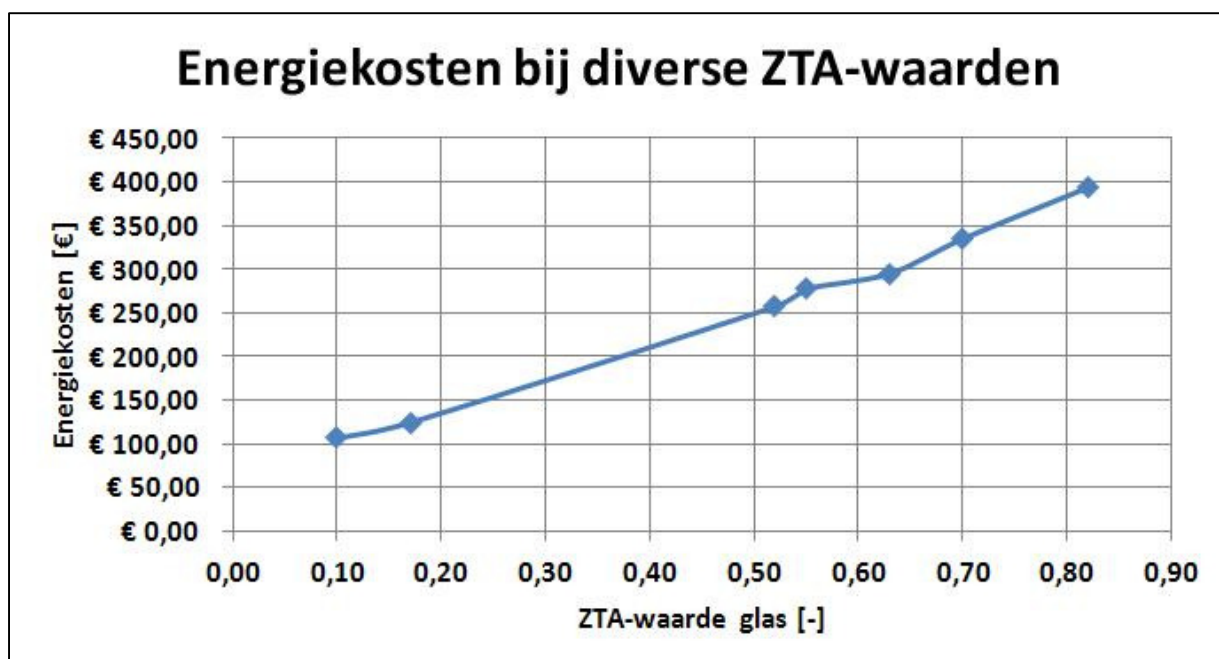
Het aantal overschrijdingsuren neemt juist sterk toe, tevens door de warmtelast van de zon die erg toeneemt.

Om een conclusie te kunnen trekken over de verhouding van beide waarden, zullen de overschrijdingsuren wederom terug worden gebracht naar een waarde onder de 210 uur per jaar door het luchtdebiet te verhogen en vervolgens opnieuw te kijken wat voor invloed dit heeft op de relatie tussen beiden.

Tabel 15 Vergelijking tussen verschillende ZTA-waarden na verhoging luchtdebiet

ZTA-waarde [-]	Energiekosten [€]	Luchtdebiet [m ³ /h]	Overschrijdingsuren [-]
0.82	€ 393,36	525	154
0.70	€ 334,43	450	168
0.63	€ 294,74	400	200
0.55	€ 277,06	375	135
0.52	€ 256,97	350	157
0.17	€ 123,93	175	48
0.10	€ 106,31	150	11

In tabel 15 is weergegeven wat de nieuwe waarden zijn. Hierin is te zien hoe de overschrijdingsuren kunnen worden teruggebracht naar een acceptabel niveau door het luchtdebiet met stappen van 25 m³/h te verhogen. In figuur 24 is een grafiek geplot met het resultaat.



Figuur 24 Energiekosten bij diverse ZTA-waarden

Uit de grafiek is op te maken dat de energiekosten vrijwel lineair toenemen naarmate de ZTA-waarde toeneemt. Uit de waarden kan tevens geconcludeerd worden dat de energiekosten sterk toenemen als geen buitenzonwering wordt toegepast (ZTA-waarden vanaf 0,52).

Buitenzonwering wordt dus sterk aanbevolen op de momenten dat zoninstraling plaats vindt.

10.5 Warmtedoorgangscoefficiënt van het glas

De warmtedoorgangscoefficiënt (U-waarde) van glas is afhankelijk van het type glas dat wordt toegepast. Aan de hand van enkele mogelijkheden wordt bepaald welke invloed een aanpassing heeft op de energiekosten en het aantal overschrijdingsuren.

Tabel 16 Vergelijking tussen verschillende U-waarden bij standaard invoerwaarden

U-waarde [W/m ² *K]	Energiekosten [€]	Luchtdebiet [m ³ /h]	Overschrijdingsuren [-]
1,1	€ 103,37	150	216
1,4	€ 110,75	150	200
1,7	€ 118,20	150	185
2,0	€ 125,71	150	175
2,3	€ 133,28	150	157
2,6	€ 140,91	150	141
2,9	€ 148,59	150	137
3,2	€ 156,32	150	121

Uit de waarden van tabel 16 kan geconcludeerd worden dat, naarmate de warmtedoorgangscoefficiënt groter wordt, de energiekosten toenemen. Dit komt doordat er meer energie nodig is om te verwarmen, aangezien er in de winter meer warmte 'ontsnapt' door het glas.

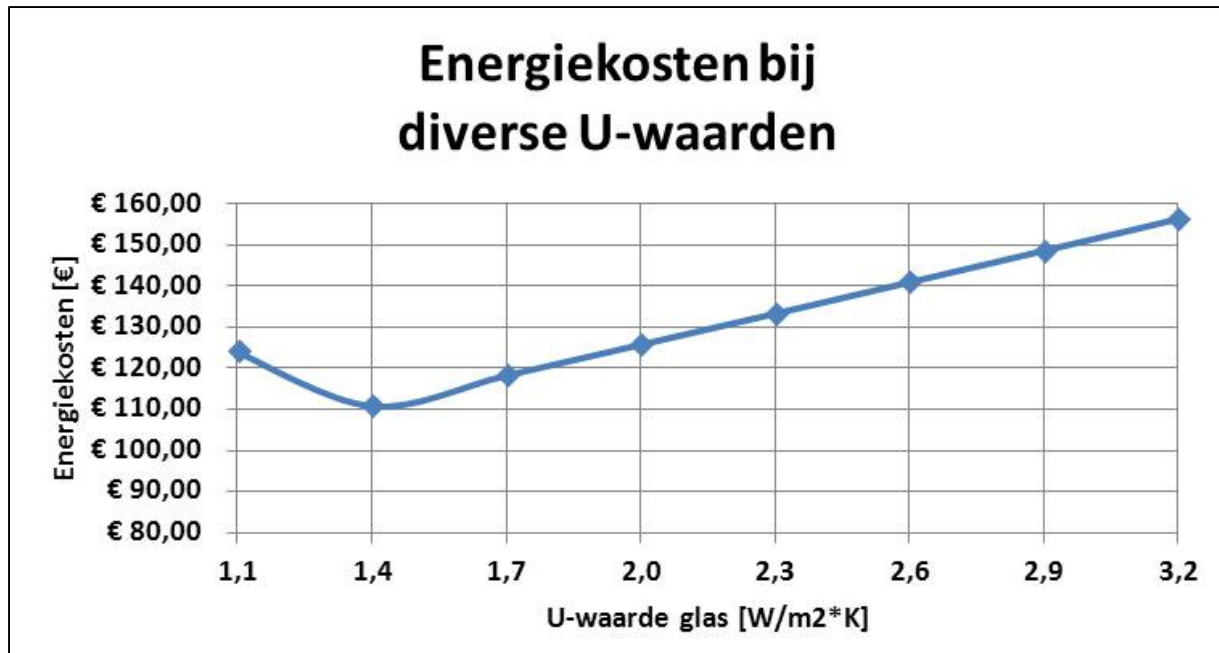
Het aantal overschrijdingsuren neemt tevens af, omdat in het voorjaar en najaar meer warmte ontsnapt, waardoor de temperatuur minder snel wordt overschreden.

Om een conclusie te kunnen trekken over de verhouding van beide waarden, zullen de overschrijdingsuren wederom terug worden gebracht naar een waarde onder de 210 uur per jaar door het luchtdebiet te verhogen en vervolgens opnieuw te kijken wat voor invloed dit heeft op de relatie tussen beiden.

Tabel 17 Vergelijking tussen verschillende U-waarden na verhoging luchtdebiet

U-waarde [W/m ² *K]	Energiekosten [€]	Luchtdebiet [m ³ /h]	Overschrijdingsuren [-]
1,1	€ 123,93	175	48
1,4	€ 110,75	150	200
1,7	€ 118,20	150	185
2,0	€ 125,71	150	175
2,3	€ 133,28	150	157
2,6	€ 140,91	150	141
2,9	€ 148,59	150	137
3,2	€ 156,32	150	121

In tabel 17 is weergegeven wat de nieuwe waarden zijn. Hierin is te zien hoe de overschrijdingsuren kunnen worden teruggebracht naar een acceptabel niveau door het luchtdebiet met stappen van 25 m³/h te verhogen. In figuur 25 is een grafiek geplot met het resultaat.



Figuur 25 Energiekosten bij diverse U-waarden

Uit de grafiek is op te maken dat de energiekosten vrijwel lineair toenemen naarmate de U-waarde toeneemt. Wat opvalt is dat een warmtedoorgangscoefficiënt van $1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ de meeste gunstige lijkt te zijn. Dit komt doordat het aantal overschrijdingsuren bij $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ te hoog blijkt te zijn, waardoor het luchtdebiet omhoog moet. Dit zorgt voor hogere energiekosten.

10.6 Luchtvochtigheid

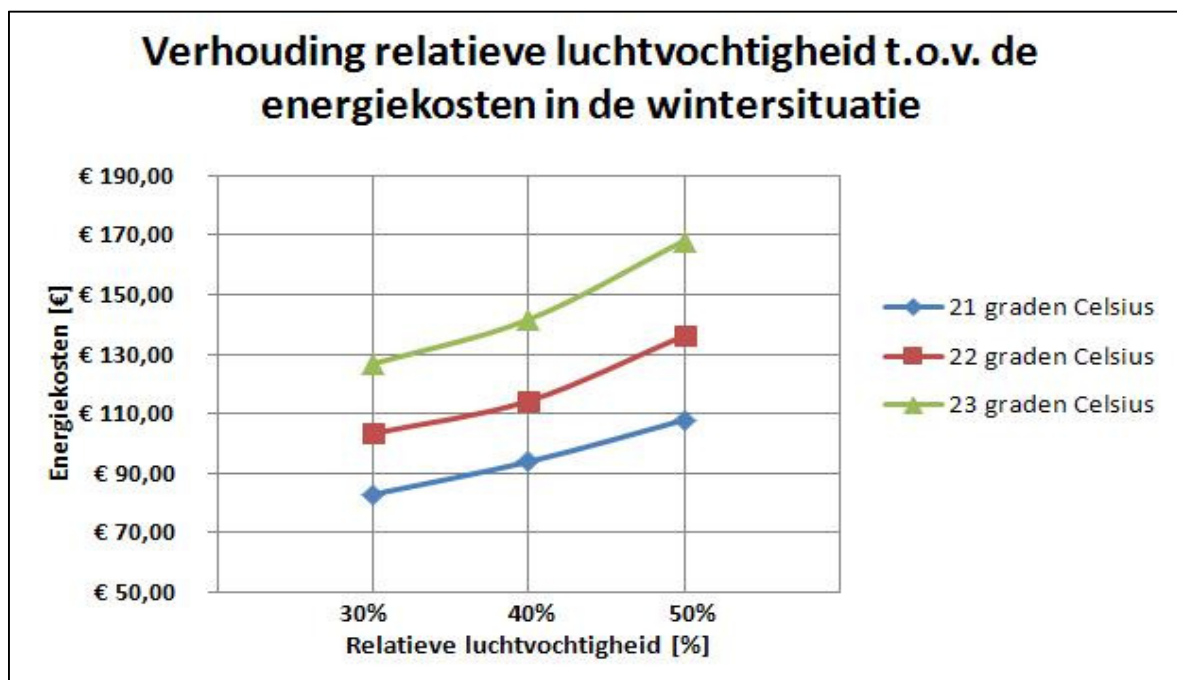
Uiteindelijk is gekeken welke invloed een aanpassing van de eis aan de luchtvochtigheid heeft op het energieverbruik per jaar. Hierbij wordt gekeken naar een situatie waarin bevochtigd moet worden (voornamelijk in de winter) en naar een situatie waarin ontvochtigd moet worden (voornamelijk in de zomer). In tabel 18 is weergegeven wat de energiekosten zijn bij een bepaalde ontwerptemperatuur in combinatie met een minimale eis die aan de relatieve luchtvochtigheid wordt gesteld (winter).

Tabel 18 Verhouding luchtvochtigheid t.o.v. de energiekosten bij min. luchtvochtigheid

Ontwerp-temperatuur [°C]	Relatieve luchtvochtigheid [%]	Luchtdebiet [m ³ /h]	Energiekosten [€]
21	30%	150	€ 82,94
21	40%	150	€ 93,85
21	50%	150	€ 107,84
22	30%	150	€ 103,37
22	40%	150	€ 114,28
22	50%	150	€ 136,20
23	30%	150	€ 126,84
23	40%	150	€ 141,66
23	50%	150	€ 168,09

Uit de tabel is duidelijk op te merken dat de energiekosten stijgen naarmate de ontwerptemperatuur toeneemt. Dit komt door de extra energie die nodig is om te verwarmen.

De waarden uit de tabel zijn in een grafiek geplot, te zien in figuur 26.



Figuur 26 Verhouding luchtvochtigheid t.o.v. de energiekosten bij min. luchtvochtigheid

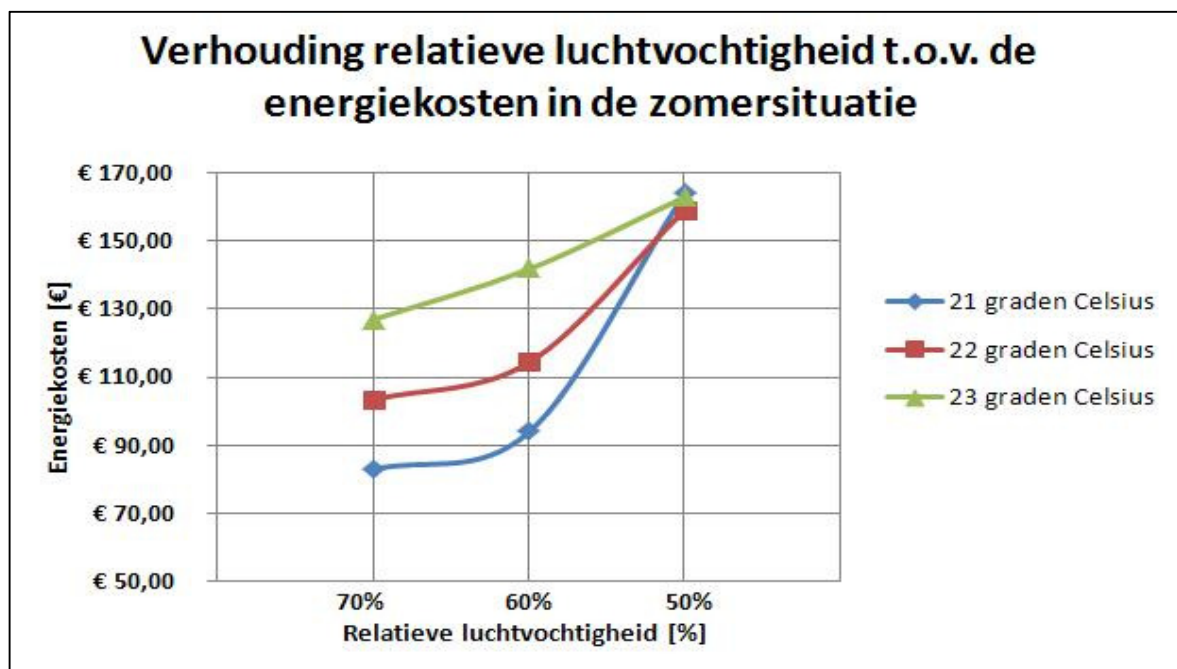
Uit de grafiek is af te leiden dat, naarmate de eis aan de luchtvochtigheid in de wintersituatie strenger (hoger) wordt, de energiekosten gaan stijgen. Dit is te verklaren door het feit dat er meer bevochtigd moet worden om een hogere luchtvochtigheid te verkrijgen. Afhankelijk van de gewenste ruimtetemperatuur, van 21°C t/m 23°C, zal er een kleinere respectievelijk grotere toenemende stijging plaats vinden.

Hetzelfde is gedaan voor de maximale luchtvochtigheid. In tabel 19 is weergegeven wat de energiekosten zijn bij een bepaalde ontwerptemperatuur in combinatie met een 'maximale' eis die aan de relatieve luchtvochtigheid wordt gesteld (zomer).

Tabel 19 Verhouding luchtvochtigheid t.o.v. de energiekosten bij max. luchtvochtigheid

Ontwerp-temperatuur [°C]	Relatieve luchtvochtigheid [%]	Luchtdebiet [m ³ /h]	Energiekosten [€]
21	70%	150	€ 82,94
21	60%	150	€ 104,23
21	50%	150	€ 163,65
22	70%	150	€ 103,37
22	60%	150	€ 113,86
22	50%	150	€ 158,90
23	70%	150	€ 126,84
23	60%	150	€ 129,86
23	50%	150	€ 162,72

Opmerkelijk is dat de energiekosten toenemen, naarmate de ontwerptemperatuur hoger ligt, terwijl er gekoeld wordt. Dit heeft te maken met het feit er in de warmere maanden altijd teruggekoeld wordt naar de 16 graden die uit de luchtbehandelingskast treedt alvorens deze decentraal wordt naverwarmd door een naverwarmer. De extra kosten zitten in dat laatste. De waarden uit de tabel zijn in een grafiek geplott, te zien in figuur 27.



Figuur 27 Verhouding luchtvochtigheid t.o.v. de energiekosten bij max. luchtvochtigheid

Uit de grafiek is af te leiden dat, naarmate de eis aan de luchtvochtigheid in de zomersituatie strenger (lager) wordt, de energiekosten gaan stijgen. Dit is te verklaren door het feit dat er 'dieper' gekoeld moet worden om te ontvochtigen. Dit betekent dat er meer koelvermogen nodig is. Er is duidelijk te zien dat er een grotere toenemende stijging in de energiekosten plaats vindt, naarmate de ontwerptemperatuur lager wordt.

10.7 Investeringskosten

Om te kunnen concluderen welke invloed het aanpassen van het luchtdebiet heeft op de investeringskosten voor een bedskamer, zijn zeven verschillende luchtdebieten vergeleken met elkaar aan de hand van de investeringskosten, aangegeven op pagina 43 en 45. De uitkomsten zijn weergegeven in tabel 20.

Tabel 20 Investeringskosten bij verschillende luchtdebieten

Investeringskosten per bedskamer bij diverse luchtdebieten [€]							
	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h
Onderdeel:	100	125	150	175	200	225	250
Naverwarmer	€ 511,-	€ 511,-	€ 511,-	€ 511,-	€ 511,-	€ 511,-	€ 511,-
Leiding * lengte	€ 35,-	€ 35,-	€ 35,-	€ 35,-	€ 35,-	€ 35,-	€ 35,-
Toevoerrooster	€ 216,-	€ 216,-	€ 230,-	€ 242,-	€ 242,-	€ 242,-	€ 242,-
Kanaal * lengte	€ 320,-	€ 320,-	€ 320,-	€ 320,-	€ 320,-	€ 320,-	€ 320,-
Inregelklep	€ 80,-	€ 80,-	€ 80,-	€ 80,-	€ 80,-	€ 80,-	€ 80,-
Afvoerrooster(s)	€ 93,-	€ 229,-	€ 229,-	€ 229,-	€ 229,-	€ 229,-	€ 229,-
Kanaal * lengte	€ 30,-	€ 60,-	€ 60,-	€ 60,-	€ 60,-	€ 60,-	€ 60,-
Totaal:	€ 1285,-	€ 1451,-	€ 1465,-	€ 1477,-	€ 1477,-	€ 1477,-	€ 1477,-

Uit de tabel kan worden geconcludeerd dat het grootste prijsverschil te vinden is bij de 100 m³/h variant. De reden dat deze prijs een stuk lager ligt, komt door het feit dat er een afvoerrooster minder nodig is (voor toelichting, zie pagina 44). Het verschil tussen de investeringskosten bij de overige luchtdebieten is verwaarloosbaar klein. De reden daarvan is de prijs van de kanalen die hetzelfde is. Slechts de prijs van het rooster varieert soms iets.

Toch mag niet zomaar worden geconcludeerd dat de investeringskosten bij verschillende luchtdebieten zo weinig afwijken. Dit heeft te maken met de kosten van kanalen die oplopen naarmate naar een groter geheel wordt gekeken. Om deze toename te kunnen vinden wordt buiten de grenzen van de bedskamer gekeken en zal worden berekend wat de kosten zullen zijn bij een aantal van 500 bedskamers. Hierbij is uitgegaan van 10 verdiepingen met op elke verdieping 50 kamers. De lengte van een verdieping is 90 meter. Aan de hand van de prijzen uit de tabellen op pagina 43 en 45 zal worden berekend wat de kosten van de kanalen bedragen bij grotere luchtdebieten. Hiervoor wordt in deze paragraaf gerekend met een luchtdebiet van 100 m³/h.

Eerst wordt de afmeting van een vierkant kanaal berekend voor de luchtvoorziening op een verdieping:

$$b = \sqrt{((\varnothing_v \cdot a)/v)} \text{ [m]}$$

Invullen levert:

$$b = \sqrt{((100/3600) \cdot 50)/5)} = 0,53 \text{ m}$$

Uitgaande van een vierkant kanaal, zullen de breedte en hoogte van het hoofdkanaal 0,53 meter zijn. Vervolgens wordt de oppervlakte van het kanaal berekend en deze bedraagt per meter:

$$opp. = 4 \cdot b \text{ [m}^2\text{]}$$

Invullen levert:

$$opp. = 4 \cdot 0,53 = 2,11 \text{ m}^2 \text{ per meter kanaal}$$

De lengte van één verdieping is 90 meter. Dat betekent dat de oppervlakte van het kanaal op één verdieping is:

$$90 \cdot 2,11 = 189,7 \text{ m}^2$$

En op 10 verdiepingen:

$$10 \cdot 189,7 = 1897 \text{ m}^2$$

Aan de hand van de prijs per m² kanaal (zie pagina 45) kan nu worden berekend wat de investeringskosten van geïsoleerde (toevoerlucht) en niet geïsoleerde (retourlucht) kanalen zal zijn.

$$\text{€}_{\text{kanaal,geïsoleerd}} = 1897 \cdot 73,90 = \text{€ } 140.188,-$$

$$\text{€}_{\text{kanaal,niet geïsoleerd}} = 1897 \cdot 60 = \text{€ } 113.820,-$$

Dezelfde berekeningen zijn uitgevoerd voor andere luchtdebieten. De investeringskosten van de kanalen zijn uiteindelijk opgeteld bij de investeringskosten per bedskamer (tabel 20).

In tabel 21 en 22 zijn de kosten weergegeven bij zeven verschillende luchtdebieten. Hiermee wordt een indicatie gegeven van de invloed die het aanpassen van het luchtdebiet heeft op de totale kosten. Hierbij worden de eenmalige investeringskosten meegenomen en de energiekosten over een periode van 30 jaar (geen rekening gehouden met eventuele prijswijzingen, omdat het hier slechts om een vergelijking gaat).

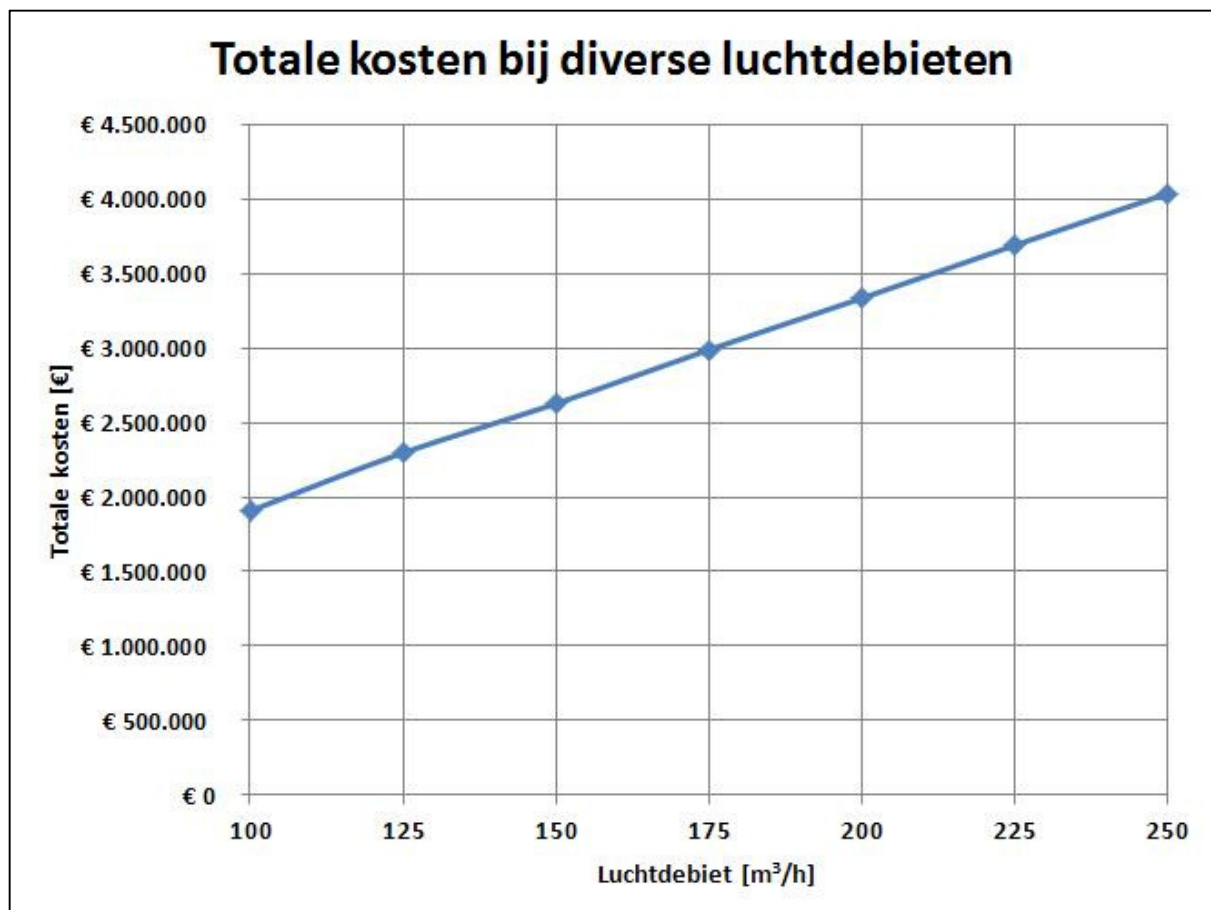
Tabel 21 Totale investerings- en energiekosten (lagere debieten)

Totale kosten [€]				
Onderdeel:	100 [m ³ /h]	125 [m ³ /h]	150 [m ³ /h]	175 [m ³ /h]
Investeringskosten	€ 923.337,-	€ 1.039.484,-	€ 1.076.454,-	€ 1.129.664,-
Energiekosten per jaar	€ 32.800,-	€ 41.930,-	€ 51.685,-	€ 61.965,-
Energiekosten over 30 jaar	€ 984.000,-	€ 1.257.900,-	€ 1.550.550,-	€ 1.858.950,-
Totale kosten:	€ 1.907.337,-	€ 2.297.386,-	€ 2.627.004,-	€ 2.988.614,-

Tabel 22 Totale investerings- en energiekosten (hogere debieten)

Totale kosten [€]			
Onderdeel:	200 [m ³ /h]	225 [m ³ /h]	250 [m ³ /h]
Investeringskosten	€ 1.153.756,-	€ 1.176.543,-	€ 1.182.543,-
Energiekosten per jaar	€ 72.680,-	€ 83.760,-	€ 95.145,-
Energiekosten over 30 jaar	€ 2.180.400,-	€ 2.512.800,-	€ 2.854.350,-
Totale kosten:	€ 3.334.156,-	€ 3.689.343,-	€ 4.036.893,-

De waarden uit de bovenstaande tabellen zijn verwerkt in een grafiek, waarin een indicatie wordt gegeven van de invloed die het aanpassen van het luchtdebiet heeft op de totale kosten (zie figuur 28).



Figuur 28 Totale kosten bij diverse luchtdebieten

Aan de hand van de grafiek kan een globale indicatie worden gegeven over de mate waarin de totale kosten, dus de investeringskosten (die betrekking hebben op de distributie van de energie) en de energiekosten over een looptijd van 30 jaar, toenemen naarmate het luchtdebiet toeneemt. De uitkomst hiervan kan tevens worden gebruikt in de adviserende fase naar de opdrachtgever toe.

11. Conclusie

Met behulp van variantenanalyses die zijn uitgevoerd, is duidelijk geworden welke invloed het aanpassen van een ontwerpuitgangspunt of ruimte-eis heeft op de energiekosten die nodig zijn om de leefomgeving in een bedskamer op de gewenste condities te houden.

Opdrachtgevers kunnen, op basis van uitkomsten van de analyses, vervolgens beter geadviseerd worden over de mogelijke invloed die het aanpassen van een bepaald ontwerpuitgangspunt of een ruimte-eis heeft op de kosten.

Tijdens de analyses is gekeken naar de invloed van diverse factoren afzonderlijk en zijn geen combinaties van factoren geanalyseerd. Met behulp van het rekenmodel in Excel kunnen mogelijke combinaties wel 'gemodelleerd' worden, waarbij aan de hand van de invoerwaarden wordt berekend hoeveel overschrijdingsuren en welke energiekosten deze combinatie levert. Zo kan met behulp van het rekenmodel in Excel, aan de hand van de eisen van de opdrachtgever, een indicatie worden gegeven van de benodigde energiekosten voor het creëren van de gewenste leefomgeving en het aantal uur dat de temperatuur bij die eisen wordt overschreden. Aan de hand van de resultaten van de variantenanalyses en de eisen van de opdrachtgever met betrekking tot de leefomgeving, zou advies kunnen worden gegeven aan de opdrachtgever wat betreft ontwerpuitgangspunten en ruimte-eisen.

De uitkomsten van de variantenanalyses zijn in een tabel verwerkt, waarin wordt aangegeven welke invloed het aanpassen van een waarde kan hebben op de energiekosten. In de eerste kolom van tabel 23 zijn de verschillende ontwerpuitgangspunten aangegeven, in de tweede kolom de range waarin deze geplaatst kunnen worden en in de derde kolom de kostenrange. Zo kan aan de hand van de tabel worden geconcludeerd dat een aanpassing aan de zontoetredingsfactor (ZTA-waarde) de grootste invloed kan uitoefenen op de energiekosten, gevolgd door het percentage glas in de gevel. Dit zijn dus factoren die nauwlettend in de gaten gehouden dienen te worden in een vroege adviserende fase.

Tabel 23 Samenvatting resultaten variantenanalyses

Ontwerpuitgangspunten	Range	Kostenrange
Rc-waarde van de gevel [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]	(1 t/m 7)	€ 108,- tot € 124,-
Oriëntatie van de gevel [-]	(noord t/m noordwest)	€ 105,- tot € 126,-
U-waarde van glas [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]	(1,1 t/m 3,2)	€ 110,- tot € 157,-
Percentage glas in de gevel [%]	(20 t/m 80)	€ 97,- tot € 200,-
ZTA-waarden van glas [-]	(0,1 t/m 0,82)	€ 106,- tot € 394,-
Ruimte-eisen m.b.t. luchtvochtigheid	Range	Kostenrange
Minimale luchtvochtigheid in winter [%]	(30 t/m 50)	€ 83,- - € 163,-
Maximale luchtvochtigheid in zomer [%]	(70 t/m 50)	€ 83,- - € 168,-

Wat de luchtvochtigheid betreft, is een lage relatieve luchtvochtigheid (30%) in de winter en een hoge relatieve luchtvochtigheid (70%) in de zomer de meest gunstige situatie als puur naar de energiekosten wordt gekeken. Naarmate de eisen aan de luchtvochtigheid strenger worden, zullen de energiekosten stijgen.

Uiteindelijk kan met behulp van het rekenmodel en aan de hand van de eisen van de opdrachtgever, een indicatie worden gegeven van de benodigde energiekosten voor het creëren van de gewenste leefomgeving en het aantal uur dat de temperatuur bij die eisen wordt overschreden. Aan de hand van deze resultaten kan een advies worden gegeven aan de opdrachtgever wat betreft ontwerpuitgangspunten en ruimte-eisen.

12. Aanbevelingen

Gedurende de uitvoering van het onderzoek is een aantal aandachtspunten naar voren gekomen waar in de toekomst beter naar gekeken zou kunnen worden om het rekenmodel mogelijk te kunnen optimaliseren of uit te breiden.

Voor de berekening van de externe warmtelast is gebruik gemaakt van de gemeten waarden voor directe en diffuse zonnestraling uit een KNMI-file van '64/'65. Hiervoor is gekozen, omdat er van de nieuwste klimaatfile NEN 5060 geen directe gegevens beschikbaar zijn met de metingen over elk uur. Aan de hand van een vergelijking is aangetoond dat de maandelijkse gemiddelden van de file '64/'65 slechts enkele procenten afwijken van de maandelijkse gemiddelden zoals deze in de nieuwste klimaatfile NEN 5060 te vinden zijn. Voor een nauwkeuriger resultaat zou de zonnestraling met behulp van complexe berekeningen alsnog volgens de NEN 5060 voor elk uur berekend kunnen worden om zodanig een exactere uitkomst te genereren.

Tijdens dit onderzoek is er voor gekozen om te rekenen met stoombevochtiging, omdat dit tot op heden veel wordt toegepast in ziekenhuizen vanwege het hoge rendement, een goede regelbaarheid en een steriele vochtinbreng. Vooral het laatste punt is een doorslag voor deze keuze, omdat er bij stoombevochtiging geen kans op het ontstaan van legionella is. Om die reden wordt adiabatische bevochtiging vermeden.

Echter, de technieken op het gebied van adiabatische bevochtiging zijn mogelijk verbeterd en om die reden zou onderzocht kunnen worden of het mogelijk is deze toch toe te passen in ziekenhuizen om op die manier energiekosten te kunnen besparen.

Om een werkelijk beeld te kunnen schetsen van de exploitatiekosten, is het belangrijk dat de onderhoudskosten van de installaties meegenomen worden. Tijdens dit onderzoek zijn deze kosten niet meegenomen, omdat voor de betrouwbaarheid van die waarden, naar een groter geheel, zoals een heel ziekenhuis moet worden gekeken. Op die manier zouden deze kosten gemakkelijker meegenomen kunnen worden.

Gedurende het onderzoek is constant gerekend met een aantal toegestane overschrijdingsuren van 210 uur per jaar. Dit aantal is geen vastgestelde eis, maar een aanname op basis van een vergelijking. Opdrachtgevers kunnen zelf eisen stellen aan het aantal uur dat de temperatuur overschreden mag worden. Aan de hand van dat gegeven zouden variantenanalyses uitgevoerd kunnen worden, waarbij verschillende aantallen overschrijdingsuren worden vergeleken met elkaar. Hierdoor kunnen mogelijk conclusies getrokken worden over de invloed van de eis aan het aantal toegestane overschrijdingsuren.

Voor het rekenmodel, dat gedurende de afstudeerperiode is ontworpen, zijn diverse investerings- en energiekosten berekend bij het gebruik van een volledige luchtbehandeling. Naast een volledige luchtbehandeling zijn ook andere systemen mogelijk om de lucht mee te conditioneren, zoals bijvoorbeeld een klimaatplafond of vloerverwarming. Door onderzoek te verrichten naar het gebruik van andere systemen zou mogelijk een vergelijking getrokken kunnen worden tussen verschillende systemen, om op die manier een zo optimaal mogelijk systeem te kunnen aanbevelen.

Literatuurlijst

Tabel 24 Literaire bronnen

Nr.	Titel + ISBN	Auteur(s)	Omschrijving
[1]	ISSO Handboek installatietechniek ISBN: 90-5044-094-0	Ir. W.H. Knoll Ir. E.J. Wagenaar Ir. A.M. van Weele	Handboek met veel informatie over installatietechnische systemen.
[2]	Toegepaste energieleer ISBN: 90-395-2301-0	Ir. A.C. Taal	Studieboek over energie. Onder andere stromings- en warmteleer en energieomzettingen.
[3]	Toegepaste energietechniek ISBN: 90-395-2304-5	Ir. J. Ouwehand Ir. T.J.G. Papa Ir. A.C. Taal Ing. E. Post	Studieboek over energietechnieken. Onder andere warmwaterketels, motoren, turbines, stoominstallaties en STEG installaties worden uitgebreid behandeld.
[4]	Microsoft Excel voor professionals ISBN: 978-90-5940-546-2	W. de Groot	Handboek dat veel informatie bevat over het gebruik van Microsoft Excel.

Tabel 25 Digitale bronnen

Nr.	Bron	Link	Omschrijving
[5]	Blackboard	http://www.blackboard.hhs.nl	Informatie over luchtbehandeling en het afstuderen.
[6]	Reinier de Graaf Groep	http://www.rdg.nl	Informatie over het jaarlijkse energieverbruik.
[7]	TVVL	http://www.tvvl.nl	Informatie over het rekenen aan vochtige lucht m.b.v. Mollier-diagram.

Tabel 26 Geraadpleegde experts

Nr.	Geraadpleegde experts	Functie
[8]	Dhr. A. Taal	Docent en toegewezen als coach vanuit school aan de student.
[9]	Dhr. M. Timmer	Projectmanager bij Deerns en toegevoegd als begeleider vanuit het bedrijf aan de student.
[10]	Dhr. F. Kouwenhoven	Ontwerpleider W bij Deerns.
[11]	Dhr. A. Stuit	Ontwerpleider W bij Deerns.
[12]	Dhr. T. Beentje	Senior technicus E bij Deerns.
[13]	Dhr. H. Liberg	Werknemer expertisegroep en exploitatie bij Deerns.