

# **De bodem-lucht warmtewisselaar**

## **Dimensionering & verificatie**

**Bart MARIVOET**

# Inhoudsopgave

<b>Dankwoord</b>	<b>viii</b>
<b>Abstract</b>	<b>ix</b>
<b>Lijst van gebruikte afkortingen en symbolen</b>	<b>x</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1 Situering . . . . .	1
1.2 Probleemstelling . . . . .	2
1.3 Onderzoeksvraag . . . . .	2
<b>2 De grondbuis</b>	<b>4</b>
2.1 Nood aan ventilatie . . . . .	4
2.2 Definitie . . . . .	5
2.3 Randvoorwaarden . . . . .	6
2.3.1 De bodem . . . . .	6
2.3.2 De leiding . . . . .	15
2.3.3 Schikking van de grondbuis . . . . .	21
2.3.4 De lucht . . . . .	23
2.3.5 Het ventilatiesysteem . . . . .	24
2.4 Theoretisch . . . . .	30
2.4.1 Efficiëntie en NTU . . . . .	30
2.4.2 Invloed op het warmtetransport . . . . .	32
2.4.3 Invloed op het drukverlies . . . . .	36
2.5 Varianten . . . . .	37

<b>3</b>	<b>Ontwerpen van een berekeningstool</b>	<b>39</b>
3.1	Filosofie . . . . .	39
3.2	Opzet . . . . .	40
3.3	Kiezen van de buisafmetingen . . . . .	42
3.3.1	Opbouwen van alle combinaties . . . . .	42
3.3.2	Kiezen van een buis . . . . .	43
3.4	Berekenen van de uitgespaarde energie . . . . .	45
3.4.1	Bepalen van de grondtemperatuur . . . . .	45
3.4.2	De temperatuurswinst . . . . .	47
3.4.3	De uitgespaarde energie . . . . .	51
<b>4</b>	<b>Economisch en Ecologisch</b>	<b>53</b>
4.1	Economisch . . . . .	53
4.1.1	Kantoorgebouw . . . . .	54
4.1.2	Eengezinswoning . . . . .	57
4.2	Ecologisch voordeel . . . . .	60
<b>5</b>	<b>Metingen</b>	<b>63</b>
5.1	IDWE . . . . .	63
5.1.1	Resultaten . . . . .	66
5.1.2	Verschil simulatie - realiteit . . . . .	68
5.1.3	Apparatuur . . . . .	69
5.2	Volvo Trucks . . . . .	71
5.2.1	Resultaten . . . . .	71
5.2.2	Verschil simulatie - realiteit . . . . .	73
<b>6</b>	<b>Conclusie</b>	<b>75</b>
<b>A</b>	<b>Code van de berekeningstool</b>	<b>78</b>
A.1	De interface . . . . .	78
A.1.1	De GUI . . . . .	78
A.1.2	Code achter de interface: <code>gui.m</code> . . . . .	79
A.2	Kiezen van de buisafmetingen . . . . .	81
A.2.1	Opbouwen van alle combinaties: <code>buildmatrix.m</code> . . . . .	81
A.2.2	Kiezen van een buis: <code>buis.m</code> . . . . .	82
A.3	Berekenen van de uitgespaarde energie . . . . .	87

A.3.1	Bepalen van de grondtemperatuur: grond.m . . . . .	87
A.3.2	De energiewinst: energie.m . . . . .	87
A.4	Het rapport genereren . . . . .	90
A.4.1	De tekst zetten: writereport.m . . . . .	90
A.4.2	De grafiek maken: Pplot.m . . . . .	92
<b>B</b>	<b>Handleiding van de berekeningstool</b>	<b>94</b>
B.1	Installatie . . . . .	94
B.1.1	Installatie van MCRInstaller.exe . . . . .	94
B.1.2	EAHX . . . . .	94
	<b>Bibliografie</b>	<b>99</b>



# Lijst van figuren

2.1	Principetekening van een EAHX . . . . .	6
2.2	Grondbuis op de werf . . . . .	7
2.3	Praktijkvoorbeeld thermische inertie van grond . . . . .	8
2.4	Amplitude = f(diepte) . . . . .	13
2.5	$\rho \cdot c_p = f(\chi)$ . . . . .	14
2.6	$\lambda = f(\chi)$ . . . . .	14
2.7	$\alpha = f(\chi)$ . . . . .	15
2.8	Warmteweerstand buismaterialen . . . . .	16
2.9	Effect van een bacteriëndodend oppervlak . . . . .	17
2.10	Tegengaan van stilstaand condensatievocht . . . . .	18
2.11	Condensatieafvoer en inspectieput in het midden van grondbuis . . . . .	19
2.12	Filteren van aangezogen lucht . . . . .	20
2.13	Vervalreeks van $^{238}\text{U}$ . . . . .	20
2.14	Rechte opstelling van een grondbuis . . . . .	22
2.15	Serpentine-opstelling van een grondbuis . . . . .	22
2.16	Parallele opstelling grondbuis . . . . .	23
2.17	Een eenvoudige luchtbehandelingskast . . . . .	25
2.18	Schema van een blokwarmtewisselaar . . . . .	26
2.19	Schema van een warmtewiel . . . . .	28
2.20	Schema van een platenwarmtewisselaar . . . . .	28
2.21	Voorbeeld van een gebouwbeheersysteem . . . . .	29
2.22	Voorbeeld van een gebouwbeheersysteem . . . . .	29
2.23	De relatie tussen de efficiëntie ( $\epsilon$ ) en de NTU . . . . .	32
2.24	Contour plot van $NTU/L$ . . . . .	35
2.25	Contour plot van $\Delta p/L$ . . . . .	36
2.26	Hydraulisch schema van de bodem warmtewisselaar . . . . .	37

2.27	Plaatsing van de bodemwarmtewisselaar . . . . .	38
3.1	Schema van de informatiestroom binnen het programma . . . . .	41
3.2	Temperatuur = f(diepte) . . . . .	46
3.3	Het verloop de temperaturen doorheen het jaar . . . . .	52
4.1	Evolutie van de energieprijzen op basis van het verleden . . . . .	56
4.2	Afschrijving van een EAHX in een kantoorgebouw . . . . .	57
4.3	Afschrijving van een EAHX in een eengezinswoning . . . . .	59
4.4	Alternatieve afschrijving van een EAHX in een eengezinswoning . . .	60
4.5	Evolutie van de SO <sub>2</sub> - en NO <sub>x</sub> -emissies . . . . .	61
5.1	Buitenaanzicht gebouw IDEWE Roeselare . . . . .	64
5.2	Inplanting grondbuis IDEWE Roeselare . . . . .	65
5.3	Resultaten IDEWE Roeselare. . . . .	66
5.4	Vershil tussen buitentemperatuur en uittredetemperatuur IDEWE . .	67
5.5	Onregelmatigheden in de temperatuur op IDEWE Roeselare . . . . .	67
5.6	Plaatsing aanzuigkap IDEWE . . . . .	68
5.7	IDEWE Roeselare: Resultaten simulatie en metingen . . . . .	69
5.8	IDEWE Roeselare: Verschil simulatie - realiteit . . . . .	69
5.9	Overzicht van het meetbereik en fouten van de meetapparatuur . .	70
5.10	Opstelling EAHX Volvo Trucks Oostakker . . . . .	72
5.11	Resultaten Volvo Trucks Oostakker . . . . .	72
5.12	Temperatuurswinst EAHX Volvo Trucks Oostakker . . . . .	73
5.13	Volvo Oostakker: Resultaten simulatie en metingen . . . . .	73
5.14	Volvo Oostakker: Verschil simulatie - realiteit . . . . .	74
A.1	De grafische interface . . . . .	78
B.1	De interface van EAHX . . . . .	95

# Lijst van tabellen

2.1	Penetratiediepte voor dagelijkse en jaarlijkse temperatuurcycli . . . .	12
2.2	$Nu$ in functie van de soort stroming . . . . .	33
2.3	$\xi$ in functie van de soort stroming . . . . .	36
4.1	Rekengegevens aardgas, stookolie en elektriciteit . . . . .	54
4.2	Verschil uitgevoerde grondbuis - berekende grondbuizen . . . . .	55
4.3	Financiële voordeel op lange termijn bij veranderlijke prijzen . . . . .	56
4.4	Berekende grondbuizen eengezinswoning . . . . .	58
4.5	Samenstelling verbrandingsgassen . . . . .	60

# Dankwoord

*Als laatstejaarsstudent Master in de Industriële Wetenschappen en Technologie optie Bouwkunde heb ik mijn thesis geschreven over bodem–lucht warmtewisselaars. Voor mij was dit een nieuw begrip, wat me een extra impuls gaf om het onderwerp verder te onderzoeken. Hoe verder ik in mijn speurtocht naar de juiste informatie kwam, boeide het onderwerp ook steeds meer en meer.*

*Dit eindwerk is tot stand gekomen door veel opzoeken en uitpluizen door mijzelf, maar ook door hulp van vele andere personen. Zo wil ik zeker mijn promotoren, Dr. Ir. Kurt De Proft en Ir. Piet Delagaye (Ingenieursbureau Stockman), bedanken voor hun tijd en hun advies. Ook wil ik graag Dhr. Jean Michiels (Flow Transfer International) bedanken dat ik stage mocht lopen onder zijn deskundige leiding. Tijdens deze stage heb ik mogen proeven van de ventilatietechnieken in de praktijk, wat me de nodige inzichten verschaftte tijdens het schrijven van deze thesis.*

*Ook wil ik graag de gebouwbeheerders, Marc Remmerie van Volvo Trucks Oostakker en Jan Arno van IDEWE Roeselare, bedanken dat ik metingen mocht uitvoeren in hun nieuwe gebouwen. Mijn dank gaat ook uit naar Els De Ruyck (firma Omer Deloof), Filip Ausloos en Saskia Wouters (REHAU Incorporated) voor de praktische raadgeving en documentatie die ik van hen mocht ontvangen. De simulatie van de uitgespaarde energie van de bodem–lucht warmtewisselaars was niet gelukt zonder de meteorologische gegevens van Joris Synaeve, waarvoor ook mijn dank.*

*Tot slot wil ik nog iedereen in mijn omgeving danken voor hun steun bij het schrijven van deze thesis, maar in het bijzonder mijn ouders en mijn vriendin voor het ter beschikking stellen van haar thesis.*

Bart Marivoet

# Abstract

De bodem-lucht warmtewisselaar is niets nieuw, maar het wordt nog (te) weinig toegepast in België door onbekendheid en onzekerheid over het concept. Het doel van deze thesis is een duidelijk overzicht te geven van alle aspecten van een bodem-lucht warmtewisselaar. Eerst wordt de bodem-lucht warmtewisselaar beschreven door een analyse te maken van de factoren die invloed hebben op de werking ervan. Zo wordt de ondergrond beschreven met de thermische eigenschappen en processen die erin plaatshebben. Verder worden de materialen van de leiding, de schikking en het ventilatiesysteem dat de lucht moet transporteren besproken.

Na deze beschrijvende analyse volgt een theoretische afleiding die het mogelijk maakt een zo economisch mogelijke bodem-lucht warmtewisselaar te kiezen. Vervolgens werden deze bevindingen en berekeningen in een MatLAB-programma gegoten om studiebureaus en architecten in staat te stellen om op een eenvoudige manier een bodem-lucht warmtewisselaar te dimensioneren. Daarnaast werden er meetcampagnes opgezet in twee recente luchtbehandelingsinstallaties met een bodem-lucht warmtewisselaar in België om de raakvlakken met de realiteit niet uit het oog te verliezen.

Natuurlijk is het economische, en tegenwoordig ook meer en meer het ecologische, aspect van belang. Daarom maakt het programma op basis van klimaatgegevens van de afgelopen jaren een schatting van de energiebesparing. Deze energiebesparing maakt het mogelijk een schatting van de terugverdientijd en de uitstootvermindering te maken.

# Lijst van gebruikte afkortingen en symbolen

EAHX	Earth–Air Heat Exchanger ofwel grond–lucht warmtewisselaar. Ook wel grondbuis of aardwarmtewisselaar (AWW) geheten.
HVAC	Heating Ventilation and Air Conditioning
EPB	Eisen i.v.m. Energieprestatie en het Binnenklimaat. Alle woningen waarvoor vanaf 1 januari 2006 een aanvraag om te bouwen of verbouwen wordt ingediend, moeten een bepaald niveau van thermische isolatie en energieprestatie (isolatie, verwarmingsinstallatie, ventilatie, zonne-energie ...) behalen (Vlaams Energieagentschap, 2007).
$c_p$	Thermische capaciteit of specifieke warmtecapaciteit ( $\frac{J}{kg \cdot K}$ ) is een materiaalconstante die aangeeft hoeveel warmte moet toegevoegd worden per massa-eenheid om het materiaal 1K te laten stijgen.
$\lambda$	Thermische geleidbaarheid ( $\frac{W}{m \cdot K}$ ) is een materiaalconstante die aangeeft hoe goed het materiaal warmte geleidt.
$\rho$	Dichtheid ( $\frac{kg}{m^3}$ ) is een materiaalconstante die aangeeft hoeveel massa van dat materiaal aanwezig is in een bepaald volume.
$\alpha$	Thermische diffusiviteit ( $\frac{m^2}{s}$ , bij grond ook wel $\frac{m^2}{d}$ gebruikt) is een materiaalconstante die aangeeft hoe snel het materiaal de temperatuur van zijn omgeving aanneemt. Afhankelijk van de literatuur kan dit ook aangeduid worden als $\kappa$ .
$T(z, t)$	Bodemtemperatuur (°C) op tijdstip t (dagen) en diepte z (m)
$T_a$	Gemiddelde bodemtemperatuur (°C)
$t_0$	Tijdstip (d) waarop de laagste temperatuur valt. In 2007 was 22 december met -7.3° C de koudste dag (Synaeve, 2008).
$d$	Dempende diepte (m), een constante die rekening houdt met de penetratiediepte van de temperatuur in de grond.
$C$	Volumetrische warmtecapaciteit $\rho \cdot c_p$ ( $\frac{J}{m^3 K}$ ), zie thermische capaciteit.
$\dot{m}$	Massadebiet ( $\frac{kg}{s}$ )
$\dot{V}$	Volumedebiet ( $\frac{m^3}{s}$ )

$\dot{Q}$	Uitgewisselde warmte (W)
$\Delta T_{log,gem}$	Het logaritmische gemiddelde temperatuurverschil (K) of LMTD
LMTD	Log Mean Temperature Difference, een dimensieloze waarde om de temperatuur zijn drijvende kracht in warmtetransport te beschrijven. Als de temperaturen niet beschikbaar zijn wordt de NTU-methode gebruikt.
NTU	Number of Transfer Units, een dimensieloze waarde om de hoeveelheid van warmtetransport in warmtewisselaars te dimensioneren. Als er onvoldoende informatie beschikbaar is gebruikt men de LMTD-methode.
$\varepsilon$	De efficiëntie van een warmtewisselaar, dimensieloos.
$h$	Convectiecoëfficiënt ( $\frac{W}{m^2K}$ ) dewelke aangeeft hoeveel warmte er wordt overgedragen door convectie.
$Nu$	Het Nusselt getal, een dimensieloze coëfficiënt die het warmtetransport via convectie beschrijft. Genoemd naar Wilhelm Nusselt. Dit wordt meestal experimenteel bepaald of d.m.v. empirische formules uit experimenten. Zie tabel 2.4.2 voor een voorbeeld.
$Re$	Het Reynolds getal, een dimensieloos getal waarmee bepaald kan worden of de stroming laminair ( $Re < 2300$ ) of turbulent ( $2300 < Re < 5 \cdot 10^6$ ) is. Het is afhankelijk van de snelheid van het medium en de diameter van de droorstromingsopening: $Re = \frac{v \cdot D}{\nu}$ . Het is genoemd naar Osborne Reynolds (1842 - 1912), wie het in 1883 voorstelde (Reynolds, 1883).
$Pr$	Het Getal van Prandtl is een dimensieloos getal dat de verhouding tussen impulsoverdracht en warmteoverdracht weergeeft in een ratio ( $Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda}$ ). Het is genoemd naar Ludwig Prandtl (1875-1953) een Duitse professor in de stromingsleer.
$v$	Snelheid (m/s)
$\nu$	Kinematische viscositeit ( $1 Stokes = 0.0001 m^2/s$ ). Wordt berekend als: $\nu = \frac{\mu}{\rho}$
$\mu$	Dynamische of absolute viscositeit, soms ook aangegeven als $\eta$ ( $Pa \cdot s$ of $\frac{kg}{m \cdot s}$ )
$J$	Specifiek drukverlies (Pa/m). Een eenheid om aan te duiden wat het nodige drukverlies is om 1 bijkomende NTU te verkrijgen.
C.O.P	Coëfficiënt Of Performance, dit is de coëfficiënt dewelke de verhouding aangeeft tussen het opgenomen en het geleverde vermogen. Zo geeft 1 kW elektriciteit minimum 3 kW warmte of koude.

# Hoofdstuk 1

## Inleiding

### 1.1 Situering

Een grond–lucht warmtewisselaar of grondbuis is een eenvoudig toestel dat gebruikt wordt om lucht voor te verwarmen voordat deze opgewarmd wordt door de HVAC–installatie van een gebouw. Doordat de HVAC–installatie de lucht over een kleiner temperatuurbereik moet opwarmen heeft zal deze minder verbruiken.

De problematiek van opwarming van de aarde, uitstootvermindering (Kyoto) en de stijgende energieprijzen zet de mens aan energiezuiniger te bouwen. Natuurlijk wil men hiervoor niet inboeten aan comfort en moet men proberen om met minder energie hetzelfde resultaat te behalen. Dit kan gebeuren door optimalisatie van huidige systemen (vb. condensatieketels) of door gebruik van hernieuwbare of groene energie. Een grondbuis is een voorbeeld van dit laatste.

Men mag hieruit niet concluderen dat een grondbuis een recent idee is, want het werd al gebruikt door de Perzen en Grieken in het tijdperk voor Christus. Ook recenter, in de 16e eeuw, werd er gebruik gemaakt van de warmte van de bodem. Zo gebruikte men natuurlijke holtes in de heuvels van Vicenza, Italië. Tegenwoordig gaat men geen gebruik meer maken van natuurlijke holtes maar gaat de mens zelf hiervoor de benodigde constructie maken. In Canada heeft men hiervoor de *Puits Canadien* (warmtewinning) en in de Provence (Frankrijk) de *Puits Provençal* (koeltewinning). In België en Vlaanderen, waar men in de zomer koelte kan gebruiken en in de winter warmte, werd het systeem nog niet zo veel toegepast. Maar Duitsland, Zwitserland en Oostenrijk zijn pioniers in het gebruik van deze techniek die in de twee seizoenen voordeel levert.



## 1.2 Probleemstelling

De toepassing van grondbuizen in België is nog maar redelijk recent op gang gekomen wat tot gevolg heeft dat er weinig toegepaste literatuur beschikbaar is (pas sinds ± 2000). Dit zorgt voor terughoudendheid aan de kant van de architecten en zelfs studiebureau's die niet zeker zijn van de impact van een grondlucht warmtewisselaar op de energiefactuur. Als deze personen over voldoende informatie beschikken hebben deze meer slagkracht om de klant/bouwheer te overtuigen deze groene investering te maken.

Een tweede probleem is de dimensionering van een grondlucht warmtewisselaar. Grondbuizen worden tot de dag van vandaag toegepast op een weinig wetenschappelijke methode: Baat het niet, schaadt het niet. In de ontwerpfase wordt niet nagedacht over de afmetingen van de buis waardoor de winst van de grondbuis zeer klein is wat een heel lange afschrijving met zich meebrengt. Deze kleine winst speelt de twijfel voor de toepassing van grondbuizen weer in de hand, want ons in een doodlopende staat zet.

## 1.3 Onderzoeksvraag

Om de correcte toepassing van de grondlucht warmtewisselaar in de praktijk te bevorderen moet een duidelijk beeld verkregen worden van de factoren die een grondlucht warmtewisselaar beïnvloeden. Vandaar mijn centrale onderzoeksvraag:

*“Welke factoren hebben invloed op de efficiëntie van een grondlucht warmtewisselaar?”*

In dit onderzoek wordt in de literatuurstudie een theoretisch overzicht gegeven van de invloedsfactoren op de earth-air heat exchanger<sup>1</sup> wat deze thesis een duidelijk naslagwerk moet maken bij de keuze van een EAHX. Om de dimensionering in praktijk te vereenvoudigen werden de invloeden en hun relatie op de efficiëntie van de grondlucht warmtewisselaar besproken en geprogrammeerd in een berekenings-tool.

Om deze impact te beschrijven zijn er in het kader van deze thesis ook metingen gedaan op twee gebouwen en hun HVAC-installatie. De resultaten worden

---

<sup>1</sup>later afgekort als EAHX

dan vergeleken met resultaten die men uit de theorie verkrijgt ter controle. Hopelijk krijgen de ontwerpers van gebouwen en technische installaties meer vertrouwen in het grondbuis-gebeuren zodat het systeem meer geïmplementeerd wordt en er zo een minder zware ecologische druk op onze planeet uitgeoefend wordt terwijl de bouwheer/eigenaar een financieel voordeel heeft.

## Hoofdstuk 2

# De grondbuis

In dit hoofdstuk worden de verschillende principes van grondbuizen of grondlucht warmtewisselaars besproken. Hierbij worden de voor- en nadelen van de opstellingen, materialen, grondtypes en andere randvoorwaarden besproken.

### 2.1 Nood aan ventilatie

Door de toenemende welvaart stelt de mens hogere comforteisen aan hun verblijfplaatsen (woonhuizen, kantoorgebouwen, scholen, ...). Zo wil de mens dat de temperatuur, vochtigheid, belichting, verse lucht en andere comfortfactoren zo zijn dat het aangenaam vertoeven is in de ruimte. Technisch gezien kan men zeggen dat die factoren binnen de comfortveelhoek <sup>1</sup> moeten zitten. Als men een factor van de comfortveelhoek aanpast komt de andere in het gedrang. Zo komt de natuurlijke ventilatie (langs kieren en spleten) in gedrang als men meer gaat isoleren om een hoger thermisch comfort te bekomen. Om het wegvallen van deze natuurlijke ventilatie op te vangen is men overgegaan op gedwongen ventilatie. Hierin zijn verschillende types te onderscheiden, waarbij de toevoer steeds via droge ruimtes gebeurt (Vlaams Energieagentschap, 2007):

- Systeem A: Natuurlijke ventilatie via ventilatieroosters
- Systeem B: Mechanische toevoer van verse lucht, natuurlijke afvoer van verontreinigde lucht via ventilatieroosters

---

<sup>1</sup>De comfortveelhoek is een veelhoek op het Mollier-diagram dewelke de grenzen van vochtigheid en temperatuur afbakent binnen dewelke een persoon zich behaaglijk voelt.

- Systeem C: Mechanische afvoer van de verontreinigde lucht, natuurlijke toevoer van verse lucht via ventilatieroosters
- Systeem D: Mechanische toevoer en afvoer, ook balansventilatie genoemd

De verse, geïnjecteerde ventilatielucht is lucht op buitentemperatuur, die hoger of lager kan zijn dan die van het beoogde binnenklimaat. In dat geval is men genoodzaakt de temperatuur van deze vers aangezogen lucht aan te passen. Indien men dit niet zou doen zou de ruimte waarin de verse lucht geïnjecteerd wordt niet meer kunnen voldoen aan de comforteis van de aanwezige personen. Zo voelt koude lucht aan als tocht. Het verwarmen of koelen van deze lucht kan weeral op verschillende manieren verlopen:

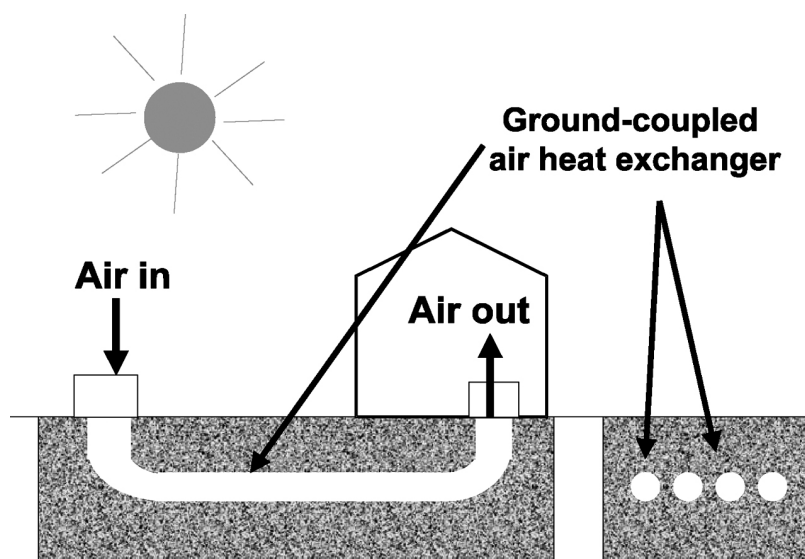
- Een klassieke luchtbehandelingskast
- Warmterecuperatiesysteem<sup>2</sup> (in geval van systeem D)
- Bodem-lucht warmtewisselaar

Om het aandeel van het energieverbruik dat naar de verwarming van de bewuste ventilatie gaat te bepalen, werd een statistische studie gedaan op 50 kantoren met E90, ventilatie type D en 200 woningen met E97.5 en mechanische ventilatie type C (van den Bossche, 2007). Bij de (nieuwbouw)woningen bedraagt het aandeel 19.8%, bij kantoren 12%, het aandeel van ventilatoren bedraagt respectievelijk 5.5% en 7%. Een EAHX gaat door een lichte stijging van dit laatste een sterke vermindering van het eerste aandeel pogen te verwezenlijken.

## 2.2 Definitie

Een EAHX op zich is niet meer dan één of meerdere buizen waardoor verse lucht aangezogen wordt om te gebruiken in het ventilatiesysteem van een gebouw. Deze buis kan begrepen zijn tussen de 100 en 1000mm diameter, vervaardigd uit kunststof, beton of metaal en wordt tussen de 1m en 6m diep ingegraven. Het principe wordt weergegeven in figuur 2.1. Dankzij de hoge thermische inertie van de grond worden de thermische schommelingen aan het grondoppervlak gedempt hoe dieper men in de grond gaat. Bovenop dit fenomeen is er nog een tijdsverschuiving tussen de temperatuurfluctuaties aan de oppervlakte en

<sup>2</sup>Heat Reclaim Ventilation (HRV), met vb. een platen- of wielwarmtewisselaar. Zie hoofdstuk 2.3.5



Figuur 2.1: Principetekening van een EAHX: Hier bestaat het systeem uit 4 parallelle buizen

dieper in de grond. De combinatie van deze twee processen zorgt ervoor dat de temperatuur dieper in de grond hoger in de winter en lager in de zomer is dan deze aan de oppervlakte.

Als men nu verse lucht aanzuigt door de EAHX wordt deze lucht gekoeld in de zomer en verwarmd in de winter. Als men dit zou combineren met andere passieve energiesystemen en een goed thermisch design van het gebouw kan men misschien het gebruik van (energievretende) airco-units ontwijken.

## 2.3 Randvoorwaarden

Als in de ontwerpfase van een bouwwerk de vraag rijst of een EAHX een goede investering zou zijn, dan liggen al enkele variabelen vast. De ontwerper zit gebonden aan de grootte van het perceel waarop het bouwwerk zal komen, wat hem een beperking in afmetingen van de EAHX geeft. Het doel van dit hoofdstuk is een overzicht te geven van de prestaties van een EAHX in functie van hun randvoorwaarden.

### 2.3.1 De bodem

De bodem is een randvoorwaarde die niet door de mens beïnvloedbaar is, net als de zon die erop schijnt. Dit maakt dat de gegevens van de grond meestal



Figuur 2.2: Grondbuis op de werf

uit experimenten moeten komen. Dat brengt echter het nadeel met zich mee dat de modellen wat ingewikkelder worden.

Dat de grond goede thermische eigenschappen moet bezitten om warmte op de EAHX over te dragen is legio. Zo gebruikten de Grieken (op het eiland Delos) al in het klassieke tijdperk de thermische inertie van de grond: het was gebruikelijk om vlees klaar te maken in een put in de grond. De thermische energie werd dan door de grond opgeslagen en daarna kon men voedsel klaarmaken zonder vuur te gebruiken. Dit systeem wordt nu nog in Marokko en Hawaï<sup>3</sup> gebruikt om respectievelijk schapen en varkens klaar te maken.



Figuur 2.3: Kaluā Pig wordt uit de Imu gehaald (Wikipedia: The free Encyclopedia, 2007)

---

<sup>3</sup>Kaluā is de traditionele manier van koken die een *Imu* of ondergrondse oven gebruikt. Een bekend gerecht is het Kaluā varken

## Warmtetransport doorheen de bodem

De mechanismen waarop warmteoverdracht kan plaatshebben zijn (Çengel, 1998) (in stijgende volgorde van belang voor de bodem):

- **Straling:** Energieoverdracht door elektromagnetische (infrarode) straling waarvan een warmte-effect kan worden waargenomen. Dit is enkel belangrijk bij zeer hoge temperaturen, dewelke niet plaatshebben in de bodem op de plaats waar deze bestudeerd wordt in deze thesis.
- **Convectie:** Overbrenging van materie en/of warme door bewegende gasen of vloeistoffen. In gasen of vloeistoffen is warmtetransport door convectie gewoonlijk veel belangrijker dan warmtetransport door geleiding.
- **Geleiding:** Wanneer een lichaam niet overal dezelfde temperatuur heeft, zal een warmtestroom ontstaan, die tracht het temperatuurverschil op te heffen. De materiaalconstante die aangeeft hoe goed een materiaal de warmte geleidt heet de warmtegeleidingscoëfficiënt  $\lambda$  (W/mK).

In de bodem is convectie verwaarloosbaar in de meeste gevallen, buiten bij snelle waterinfiltratie en -exfiltratie. Straling is dan weer enkel van belang in zeer droge gronden met grote poriën en met hoge oppervlaktetemperatuur, wat toch uitzonderlijk is in ons vlakke land.

Hieruit mag men besluiten dat de eigenschappen die het meeste invloed hebben op het thermische gedrag van grond de thermische geleiding en warmtecapaciteit zijn (Santamouris and Asimakopoulos, 1996). Hiervoor maakt men wel enkele veronderstellingen:

- De warmtecapaciteit van een bodem is afhankelijk van de minerale en organische opbouw, vochtigheidsgraad en gemiddelde dichtheid van de bodem. Algemeen kan men schrijven:

$$C = f_m C_m + f_o C_o + f_w C_w + f_g C_g \quad (2.1)$$

waar  $C$  voor de volumetrische warmtecapaciteit staat en  $f$  de volumefractie van elke component. De componenten zijn: mineralen (m), organisch materiaal (o), water (w) en gas (g) (Smith and Hinchee, 1993).

- De meeste bodemmineralen hebben een dichtheid van  $\pm 2650 \frac{kg}{m^3}$  en een warmtecapaciteit van  $\pm 2009 \frac{kJ}{m^3 K}$ . Het organische materiaal in de bodem



kan neutraal of verontreinigd zijn. De meeste neutrale organische bodemdeeltjes hebben een dichtheid van  $\pm 1300 \frac{kg}{m^3}$  en de warmtecapaciteit bedraagt  $\pm 2510 \frac{kJ}{m^3 K}$  (Hittel, 1982).

- Organische verontreinigingen kunnen afwijken van deze waarden maar, buiten voor sterk verontreinigde gronden, wordt er enkel een kleine fout gemaakt als wordt verondersteld dat de vervuilde organische deeltjes dezelfde volumetrische warmtecapaciteit hebben als niet-vervuilde deeltjes.
- Van water zijn deze waarden welbekend:  $\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$  en  $c_v = 4184 \frac{kJ}{m^3 K}$  (zie ook 2.3.1).
- De invloed van gas of lucht in de grond is te verwaarlozen als men weet dat het meestal ongeveer 1/1000 of minder van de warmtecapaciteit van de grond voorstelt.

Door deze veronderstellingen te maken kan men vergelijking 2.1 vereenvoudigen tot (Smith and Hinchee, 1993):

$$C = f_m C_m + F_o C_o + f_w C_w \quad (2.2)$$

Deze volumetrische warmtecapaciteit ( $C = \rho \cdot c_p$ ) kan men combineren met  $\lambda$ , die de geleiding van een materiaal karakteriseert, tot de thermische diffusiviteit:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (2.3)$$

Deze eigenschap geeft weer hoe snel een stof zich aanpast aan de temperatuur van de omgeving. Bijvoorbeeld: (U.S. Department of Agriculture, 1977) (zie ook tabel 2.1):

- Een steenachtig materiaal:  $\alpha \approx 2 \cdot 10^{-6} m^2/s$
- Droog hout:  $\alpha \approx 5.6 \cdot 10^{-4} m^2/s$

Men veronderstelt deze  $\alpha$  constant met de diepte en doorheen het jaar.

### Temperatuurvariaties in de bodem

Het leven op onze planeet is enkel mogelijk door een samenloop van veel factoren waarvan er een of meerdere afwezig zijn bij de andere planeten van ons

zonnestelsel. Een van deze voorwaarden is warmte. De warmte op onze aarde wordt voorzien door de ster waarrond onze planeet aarde draait. Deze ster, de zon geheten, zorgt niet voor een volledig constante temperatuur op onze aardbol. De temperatuur wisselt dagelijks (door het rijzen en ondergaan van de zon, de beweging van de aarde rond haar as) en jaarlijks (de seizoenen, de rotatie van de aarde rond de zon). De temperatuur in de grond is hoofdzakelijk afhankelijk van de stralingswarmte van de zon en van de luchttemperatuur.

Om een formule af te leiden die een voorspelling van de temperatuur  $T$  op diepte  $z$  geeft op basis van de oppervlaktetemperatuur op tijdstip  $t$ , mogen we stellen dat de aarde een semi-oneindige vaste stof<sup>4</sup> is. Via de warmtebalans (differentiaalvergelijking van Fourier) volgt (Marshall and Holmes, 1988)(Hittel, 1982):

$$\frac{\partial T(t, z)}{\partial t} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 T(t, z)}{\partial z^2} \quad (2.4)$$

De uitwerking van deze vergelijking wordt (Nofziger and Wu, 2003):

$$T(t, z) = T_a + A_0 \cdot e^{-\frac{z}{d}} \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot (t - t_0)}{T_{ref}} - \frac{z}{d} - \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.5)$$

waarbij men  $T_{ref}$  gelijk kan stellen aan 86400 seconden (= 24 uur) of 365 dagen. Hierbij moet men  $\alpha$  ook in de juiste eenheid zetten (respectievelijk  $\text{m}^2/\text{s}$  of  $\text{m}^2/\text{dag}$ ). Dan wordt de dempende diepte  $d$ :

$$d = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}}$$

waarin

$$\omega = \frac{2\pi}{T_{ref}}$$

Deze dempende diepte  $d$  is een constante die de vermindering van amplitude karakteriseert bij een vergroting van de afstand van het grondoppervlak.  $\omega$  is de frequentie van de temperatuurverandering, dewelke men jaarlijks kan bekijken ( $\omega = \frac{2\pi}{365} d^{-1}$ ) of dagelijks ( $\omega = \frac{2\pi}{86400} s^{-1}$ ) (Nofziger and Wu, 2003).

In tabel 2.1 wordt de penetratiediepte weergegeven voor enkele bodemtypes. Uit deze tabel kan men afleiden dat de EAHX, afhankelijk van de grondsoort en -vochtigheid, best op 1.5m tot 3.0m onder het oppervlak geplaatst wordt. Dit is onder de penetratiediepte van de jaarlijkse temperatuurvariaties, waardoor

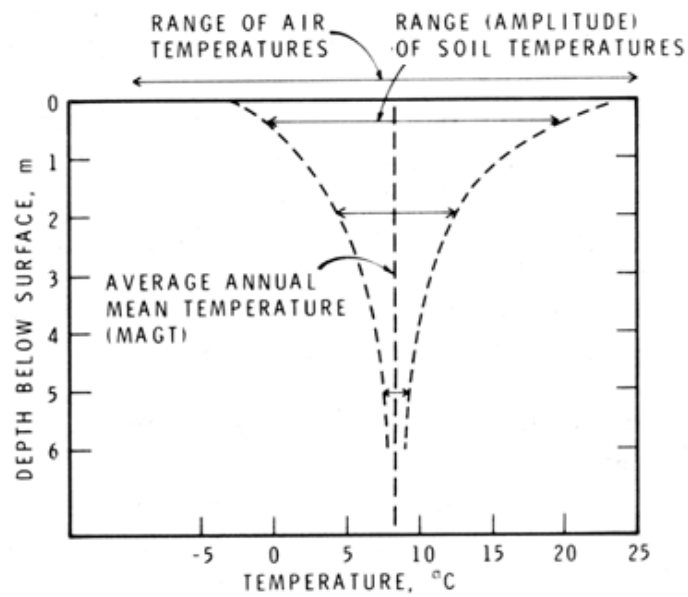
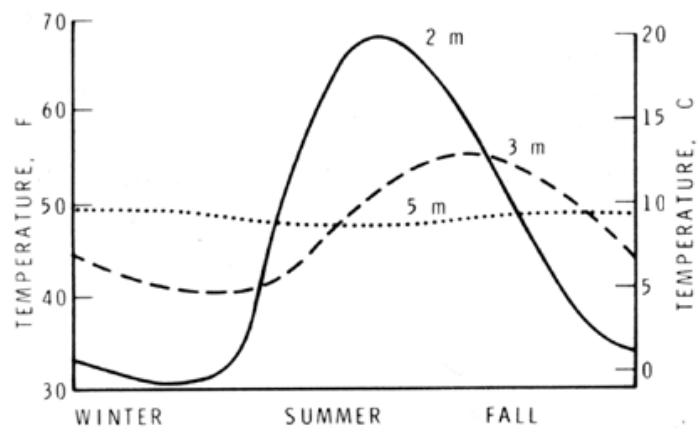
<sup>4</sup>Een semi-oneindige vaste stof is een vereenvoudigd lichaam dat één enkel vlak oppervlak heeft en in de andere richtingen oneindig uitgestrekt is. De aarde mag als een semi-oneindig vaste stof beschouwd worden om de temperatuur in de buurt van het oppervlak te bepalen (Çengel, 1998).

Bodemtype	$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	$d_{dag}$ (m)	$d_{jaar}$ (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
Kwartzsand, droog	$2.01 \cdot 10^{-7}$	0.0743	1.420	1650
Kwartzsand, 8% vochtig	$3.33 \cdot 10^{-7}$	0.0957	1.828	1750
Zand, droog	$5.06 \cdot 10^{-7}$	0.1180	2.254	1650
Zand, 15% vochtig	$3.75 \cdot 10^{-7}$	0.1016	1.940	1780
Leem, vochtig	$6.02 \cdot 10^{-7}$	0.1287	2.458	1800
Leem, 36% vochtig	$4.90 \cdot 10^{-7}$	0.1161	2.218	1650
Leem, verzadigd	$10.13 \cdot 10^{-7}$	0.1669	3.189	1800
Kalkhoudende aarde	$1.92 \cdot 10^{-7}$	0.0727	1.388	1670
Veen	$0.60 \cdot 10^{-7}$	0.0406	0.776	1500

Tabel 2.1: Penetratiediepte voor dagelijkse en jaarlijkse temperatuurcycli (REHAU AG, 2008)

de temperatuur  $\pm$  constant zal zijn op deze diepte. Dit is een conditie die men wenst bij het gebruik van een EAHX.

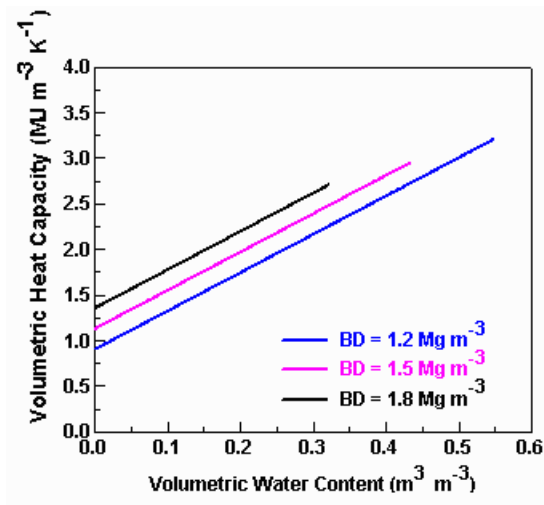
Op de figuren 2.4 kan men duidelijk de invloed van de diepte op de amplitude van de temperatuurschommeling zien. Merk de convergentie naar  $\pm 8^\circ\text{C}$  op oneindige diepte op.



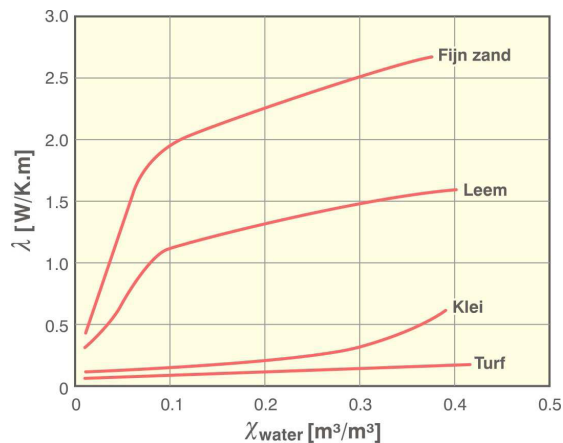
Figuur 2.4: De afname van amplitude in functie van de diepte (Williams and Gold, 1976)

### Invloed van water

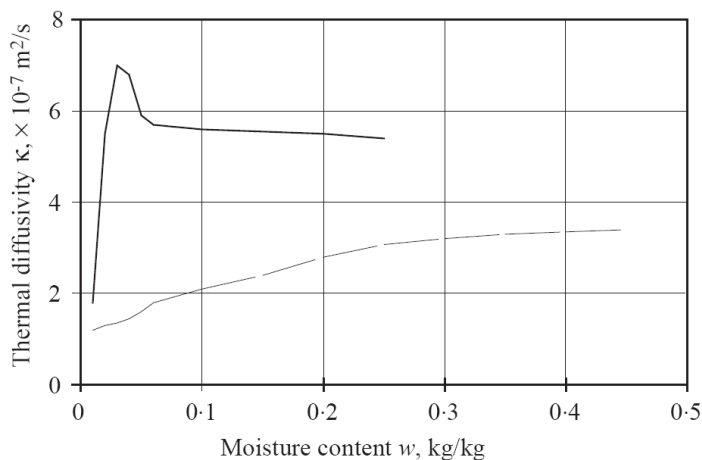
De thermische geleidbaarheid en de volumetrische warmtecapaciteit ( $\rho \cdot c_p$ ) stijgen als er water in de grond zit, dus dan stijgt de thermische diffusiviteit eveneens (zie vergelijking 2.3 en figuur 2.5). Op figuur 2.6 is duidelijk te zien dat  $\lambda$  stijgt met toenemend watergehalte ( $\pm 30\%$  voor  $\chi > 0.05 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}$ ), dus de EAHX zal efficiënter werken als deze in een vochtige grond zit. Deze conclusie kon men ook al trekken uit tabel 2.1.



Figuur 2.5: De volumetrische warmtecapaciteit van 3 bodemstalen met verschillende dichtheid in functie van het watergehalte (Nofziger and Wu, 2003).



Figuur 2.6:  $\lambda$  van 3 bodemtypes in functie van het watergehalte (BIM (Brussels Instituut voor milieubeheer), 2007).



Figuur 2.7:  $\alpha$  in functie van het watergehalte voor een zanderige (volle lijn) en een klei-bodem (streeplijn) (Abu-Hamdeh, 2003).

### 2.3.2 De leiding

#### Hydraulische eisen

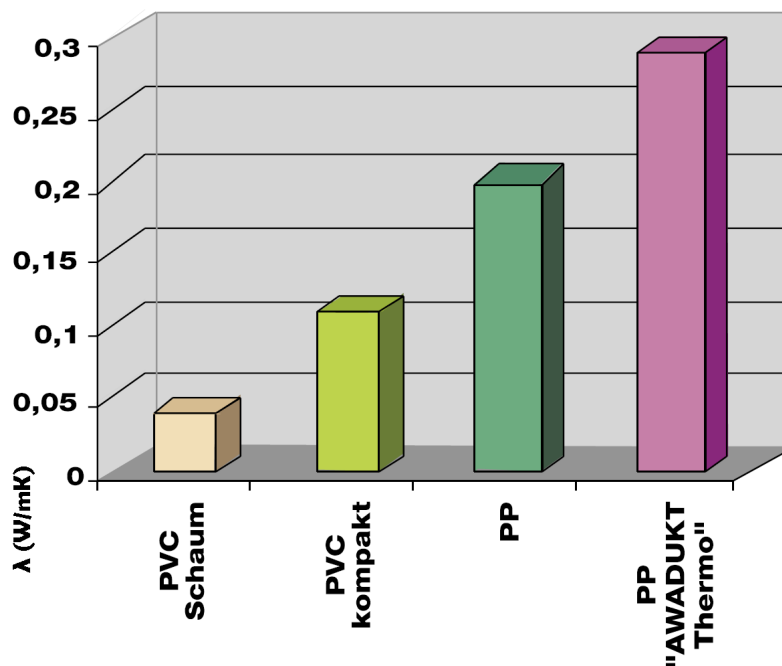
Doorheen de EAHX moet een debiet lucht komen zodat deze opgewarmd kan worden door de grond. Het gevraagde debiet hangt af van het ontwerp van het ventilatiesysteem. Het drukverlies dat overwonnen moet worden door het ventilatiesysteem hangt af van volgende elementen:

- Wrijvingsverliezen
  - Weerstandscoefficiënt van de leiding
  - Lengte van de leiding
  - Diameter van de leiding
  - Snelheid van het verplaatste medium
- Obstakels (Bochten, kranen, vernauwingen, ...)
- Soort stroming (Laminair & turbulent)
- In- en uitstroomopeningen (Filters, roosters, ...)

Bij de keuze van deze elementen tracht men een evenwicht te zoeken tussen de investeringskost en het energieverbruik van de ventilator.

### Thermische eisen

Buiten deze hydraulische criteria mag de grondbuis ook geen te hoge warmteweerstand  $\lambda$  bieden, opdat de warmte van de bodem op voldoende wijze doorgegeven kan worden aan de lucht. Deze warmteweerstand is afhankelijk van het materiaal waaruit de ondergrondse buis vervaardigd is. Beton- of gres-



Figuur 2.8: Warmteweerstand buismaterialen (REHAU AG, 2006).

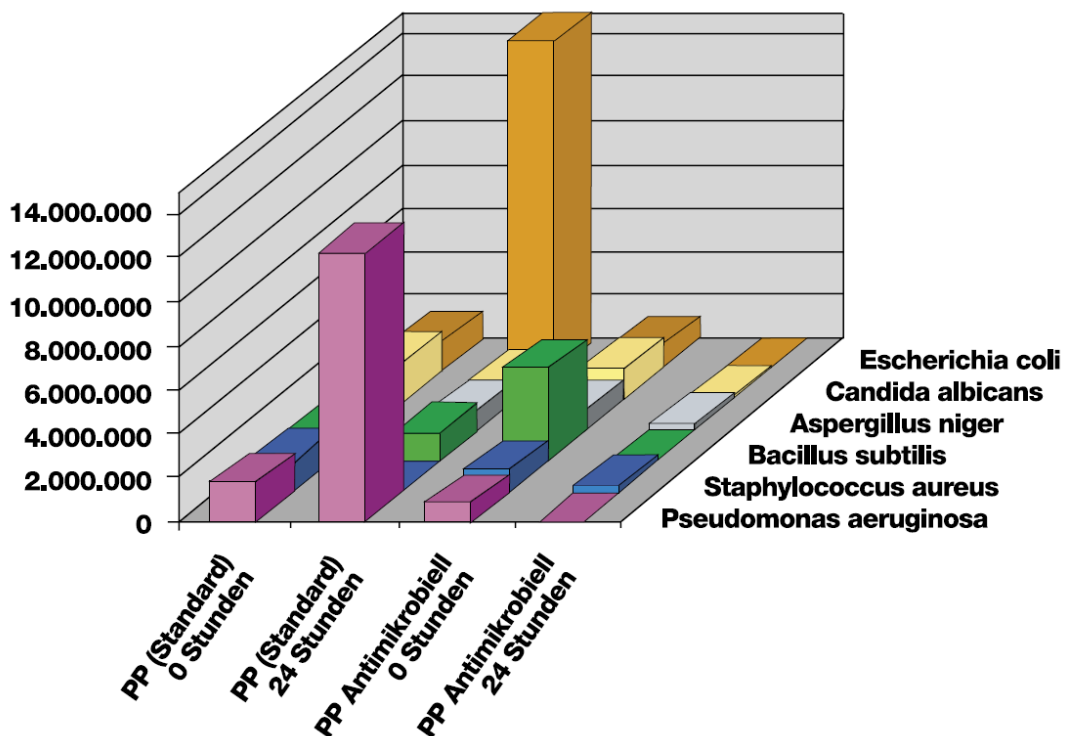
buizen hebben een veel hogere warmtegeleiding (respectievelijk 2 W/mK en 1.4 W/mK), maar bij deze materialen stelt zich het probleem van de luchtdichting. Ook door het hogere gewicht van deze materialen kunnen er zich grotere zettingen voordoen waardoor de initiële luchtdichting op termijn ook verloren gaat.

Een bijkomende eis voor een goede warmteoverdracht is dat de stroming turbulent is, dit zal in hoofdstuk 2.4 duidelijk worden.

### Hygiënische eisen

Aangezien de lucht die door de leiding gaat hygiënische lucht is, is het wenselijk dat deze vrij van bacteriën, deeltjes (stof en organisch) en geurtjes is. Dit kan men voorkomen door rekening te houden met volgende items.

**Bacteriën** Om bacteriëngroei tegen te gaan worden leidingen met bacteriëndodend oppervlak aangeraden. Zo kan men een bacteriëndodende filmlaag op basis van zilver aanbrengen aan de binnenzijde van een PP-buis. Het gebruik van zilver om bacteriëngroei tegen te gaan is niets nieuw: de Egyptenaren gebruikten zilverwerk om water in te bewaren en in de 11<sup>e</sup> eeuw schreef de Kerk voor dat kelken waaruit gedronken werd uit zilver vervaardigd moesten zijn. In figuur 2.9 is te zien wat het effect is van deze bacteriëndodende film.



Figuur 2.9: Effect van een bacteriëndodend oppervlak (SGS Institut Fresenius, 2008).

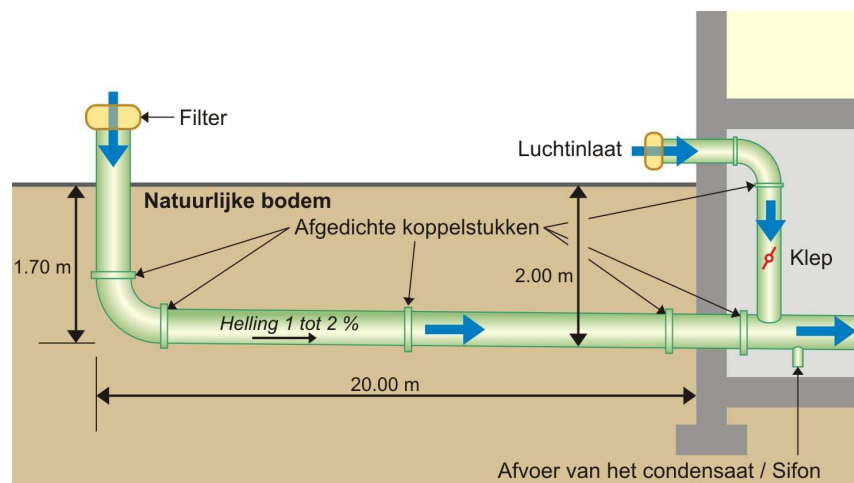
**Condensatiewater** Geurtjes kunnen voorkomen bij het ontstaan van schimmel in de leiding, dewelke kan ontstaan door vochtinfiltratie of stilstaand condensatievocht. Om infiltratie door het grondwater tegen te gaan moet de buis waterdicht zijn. Stilstaand condensatievocht kan dan weer vermeden worden door de leiding onder een helling te plaatsen, zoals weergegeven in figuur 2.10. Deze helling gaat het beste in de richting van de luchtafvoer (binnen het gebouw), waar men dan een verzamelpunt met een afvoer voorziet. Deze constructie zorgt dat controle van de afvoer van condensaat eenvoudig in de kelder kan gebeuren. Daarenboven heeft een helling weinig nut als de buis een geringde



of flexibele leiding is of een ruwe binnenkant heeft waardoor het water niet naar het verzamelpunt kan vloeien.

De hoeveelheid condensaat dat ontstaat is afhankelijk van het verschil in temperatuur tussen de aangezogen lucht en die aan het einde van de grondbuis. Aangezien warme lucht meer water kan bevatten dan koude lucht<sup>5</sup>, zal er waterdamp uit lucht moeten gaan die gekoeld wordt: deze condenseert en wordt vloeibaar. De hoeveelheid condensaat is dus rechtstreeks afhankelijk van de efficiëntie  $\varepsilon$ , zie vergelijking 2.15 later in dit hoofdstuk.

Om een inschatting te maken van de hoeveelheid condensaat dat ontstaat kan men het negatieve geval definiëren waarbij de aangezogen lucht van 35°C RV 100% (kan 9g waterdamp per kg lucht houden) heeft en de EAHX deze lucht afkoelt tot 20°C RV 100% (6g/kg). Dit komt overeen met een EAHX van  $\varepsilon$  75%<sup>6</sup>. In deze situatie ontstaat er 3g waterdamp per kilogram lucht. Als men deze waarde nu vermenigvuldigd met  $\dot{m}$  krijgt men de hoeveelheid waterdamp per seconde. Bij een  $\dot{V}$  van 7500 m<sup>3</sup>/h geeft dit 7.5 g/s wat neerkomt op 27 l/h, wat men niet mag onderschatten. Hou er wel rekening mee dat dit een fictief en zéér negatief voorbeeld is.



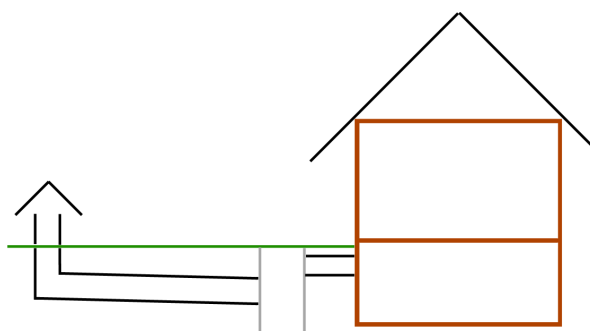
Figuur 2.10: Principe van de helling om stilstaand condensatievocht (en dus schimmels) tegen te gaan (BIM (Brussels Instituut voor milieubeheer), 2007).

Het nadeel aan de helling om het condensaat te laten aflopen is dat de waterdruk kan oplopen aan de aansluiting buis-huis. Hiertoe gaat men een verticale schacht plaatsen, met als nadeel dat een pompje aanwezig moet zijn om het

<sup>5</sup>Zo kan lucht van 25°C 20g waterdamp bevatten en lucht van 20°C maar 15g, beiden hebben dan een RV% van 100%.

<sup>6</sup>Bijvoorbeeld 8 buizen Ø250 en 35m lang, als men de grondtemperatuur op 15°C veronderstelt.

condensatievocht af te kunnen voeren. De andere mogelijkheid is een betere dichting van de aansluiting, wat een dure oplossing is en die enkel beschikbaar is voor relatief kleine diameters. Een andere oplossing die het nadeel van een diepe aansluiting aan het gebouw ontwijkt maakt gebruik van een inspectieput en condensatiewaterafvoer op een plaats in het midden van de leiding. Deze oplossing wordt geschetst in figuur 2.11.



Figuur 2.11: Condensatieafvoer en inspectieput in het midden van grondbuis. Dit principe werd toegepast op het gebouw van IDEWE Roeselare.

**Eisen voor aanzuiging** Om ervoor te zorgen dat de lucht die de grondbuis aanzuigt vers en vrij van deeltjes is, heeft de plaatsing van de luchtinlaat enkele eisen. Zo plaatst men de luchtinlaat best op voldoende afstand van luchtuitlaten, afvalcontainers, een straat of parkeerruimtes. Hiervoor geldt de normering van luchtbehandelingsinstallaties EN 13779. Deze stelt dat de luchtinlaat op 8 m van vervuillingsbronnen geplaatst moeten worden. Eveneens wordt vermeld dat de inlaat zich op 3 m boven de grond moet bevinden, wat moeilijk te realiseren is bij een EAHX. Om infiltratie van sneeuw en regen te voorkomen kan men de aanzuiging zijdelings laten gebeuren. Aanvoer van insecten, stofdeeltjes en bladeren zou onaangenaam zijn voor het binnencomfort, maar eveneens problemen opleveren met de bewegende onderdelen van de luchtbehandelingskast. Om dit te voorkomen kan men filters plaatsen aan de aanzuigopening. Het plaatsen van deze filter (figuur 2.12) mag geen akoestisch nadeel geven of tot een te groot drukverlies leiden.

### Eisen naar veiligheid

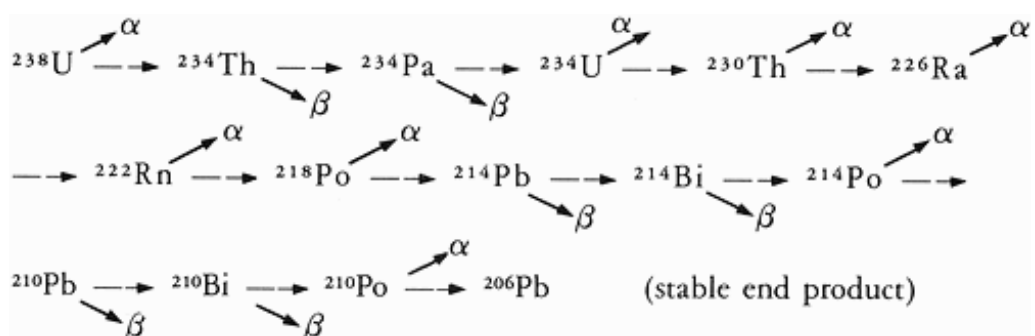
**Infiltratie van radon** Hierboven werd besproken dat de leiding in de bodem waterdicht moet zijn om infiltratie van grondwater te voorkomen. Een tweede



Figuur 2.12: Filter bovenaan een aanzuigkanaal, zijdelings geplaatst om het aanzuigen van neerslag te voorkomen (Fränkische Rohrwerke GmbH, 2007).

reden dat de leiding zeer goed gesloten moet zijn is de aanwezigheid van radon (Rn) in de bodem dat in de leiding kan infiltreren.

In alle materialen van natuurlijke oorsprong komen kleine hoeveelheden radioactieve stoffen voor en dat is voor bouwmaterialen niet anders. Een van deze radioactieve stoffen is  $^{238}\text{U}$  (NRG Nuclear Research & Consultancy Group, 2008). Deze stof is niet stabiel en zal een vervalreeks (zie figuur 2.13) doorlopen waarbij het  $\alpha$  en  $\beta$  stralen uitzendt totdat het een stabiel element (in dit geval  $^{206}\text{Pb}$ ) gevormd heeft.



Figuur 2.13: Vervalreeks van  $^{238}\text{U}$

Een van de vervalproducten die voorkomen bij het verval van  $^{238}\text{U}$  is  $^{222}\text{Rn}$ . Radon is een edelgas wat wil zeggen dat het niet reactief is met andere stoffen, wat dus ook impliceert dat het slecht opgenomen wordt in het lichaam. Het enige gevaar wat  $^{222}\text{Rn}$  geeft is dat het bij inademing een te verwaarlozen straling

afgeeft aan het lichaam. Grotere problemen komen voor wanneer  $^{222}\text{Rn}$  in aanraking met lucht komt (bijvoorbeeld door infiltratie van een grondbuis). Hier kan  $^{222}\text{Rn}$  vervallen naar vaste vervalproducten die men kan inademen waardoor deze tot beschadiging van het longweefsel kunnen leiden.

Men heeft er dus alle belang bij ervoor te zorgen dat de leiding in de bodem volledig gesloten is door een aangepaste sluiting.

## **Materiaal**

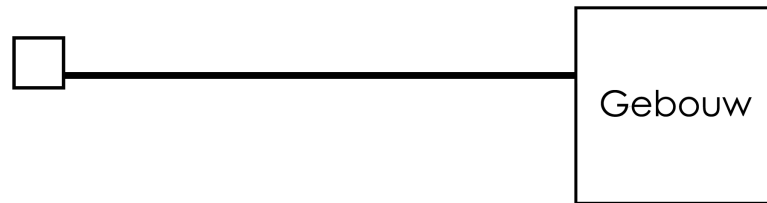
Natuurlijk wenst men dat het materiaal voldoende sterk is om de solliciterende gronddruk te kunnen weerstaan. Door deze eis kan men PVC uitsluiten, dit materiaal is wel voldoende sterk om op voldoende diepte te leggen, maar mist de nodige elasticiteit. PP heeft daarenboven een milieuvriendelijker (15 %) productieproces, wat de ecologische som van een EAHX ten goede komt (zelfs na veelvuldige recyclage van PVC). Nadeel aan PP is dat de recyclageprocessen minder eenvoudig zijn dan bij PVC. Als laatste argument kan men aanhalen dat PP gemaakt is van restafval bij kraakprocessen in de petrochemie, PVC daarentegen is voor 54% rechtstreeks afhankelijk van aardolie. PP zal dus niet direct bijdragen bij de uitputting van de aardoliereserves.

### **2.3.3 Schikking van de grondbuis**

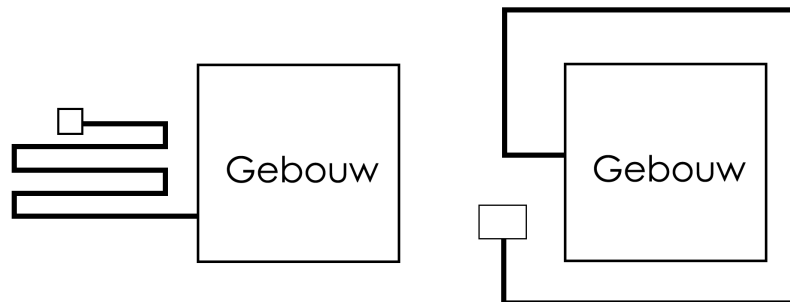
Zoals eerder aangehaald is een van de ontwerpgrenzen van de grondbuis de oppervlakte dat deze kan innemen op de bouwplaats. Niet enkel de volledige afmetingen van de bouwplaats spelen een rol, maar ook kelders en andere ondergrondse constructies. Een grondbuis kan verschillende vormen aannemen welke eveneens bepalend zijn voor de drukverliezen in de leiding.

De meest eenvoudige opstelling is één enkele buis van een bepaalde diameter. Deze oplossing is de meest economische in het opzicht van grondwerken en installatiekosten<sup>7</sup>. Later in hoofdstuk 2.4.2 ziet men dat een grote buis in strijd is met het thermisch rendement. Dit is dus enkel toepasbaar bij een relatief kleine diameter en een klein debiet zodat het drukverlies niet te hoog oploopt. Men kan deze in een rechte lijn uitvoeren wat een groot grondoppervlak vraagt of in een gebroken vorm, wat meer koppelwerk meebrengt. Deze vormen zijn de meest economische oplossingen voor eengezinswoningen (REHAU AG, 2006).

<sup>7</sup>De installatiekosten is sterk afhankelijk van de manuren die in de installatie kruijen. Manuren lopen sterk op als er veel koppelingen geplaatst moeten worden, welke hier afwezig zijn

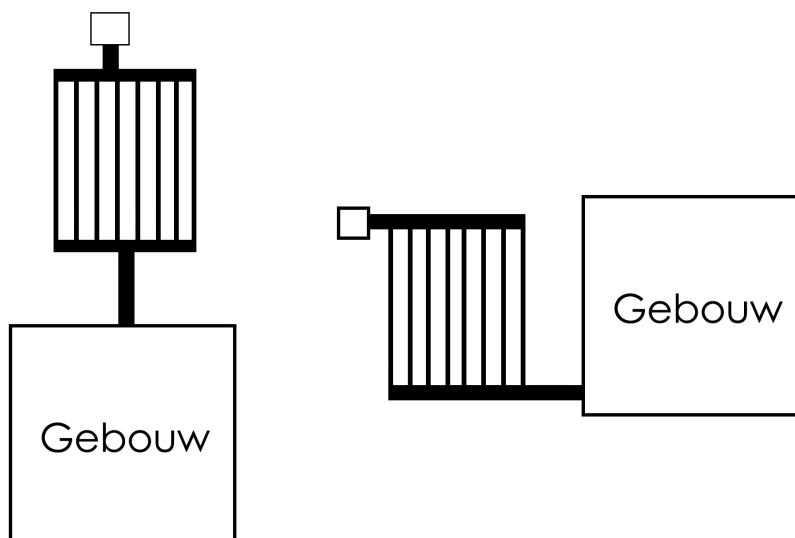


Figuur 2.14: Rechte lijn



Figuur 2.15: Serpentine-opstelling, dewelke men ook rond het gebouw kan leggen

Als men kiest voor de opstelling met meerdere buizen (in grotere gebouwen) kiest men best voor een parallelle opbouw. Men moet er rekening mee houden dat de afstand onderling tussen de buizen voldoende groot is, namelijk minimaal 1m (Garston and Watford, 1999). Indien men hier geen rekening mee houdt, gaan de buizen elkaar onderling thermisch beïnvloeden. De thermische energie die de collectorbuis (dit is de hoofdbuis waarop de andere kleinere buizen op aansluiten) nog overdraagt op de lucht wordt niet in rekening gebracht in de berekeningstool van hoofdstuk 3.



Figuur 2.16: Parallele opstelling

### 2.3.4 De lucht

Natuurlijk is de aangezogen lucht ook een randvoorwaarde, men zal immers trachten deze op te warmen. Door deze verandering van temperatuur zal er op sommige momenten ook een verandering van relatieve vochtigheid en dus massadichtheid plaatshebben. In een eerste reactie denkt men vaak dat de dichtheid van de lucht gaat dalen bij afname van vochtigheid, dit is onjuist. Doordat de moleculaire massa van lucht (29 g/mol) groter is dan die van water (18 g/mol), zal dit andersom gebeuren.

Volgens de evenwichtsvergelijkingen uit de fysica kan men schrijven dat:

$$\rho_{lucht} = \frac{p_d}{R_d \cdot T} + \frac{p_v}{R_v \cdot T} \quad (2.6)$$

waarbij:

- $p_d$  de partiële druk van droge lucht
- $R_d$  specifieke gasconstante voor droge lucht (287.05 J/kgK)
- $T$  de temperatuur waarbij men de dichtheid wil kennen
- $p_v$  de dampdruk van water
- $R_v$  de specifieke gasconstante van waterdamp (461.495 J/kgK)

De partiële dampdrukken zijn te bepalen volgens:

$$p = p_v + p_d \quad (2.7)$$

$$p_d = p - p_v \quad (2.8)$$

als men weet dat:

- $p$  de atmosferische druk (101325 Pa)
- $p_v = \psi \cdot p_{sat}$  waarbij  $\psi$  gelijk is aan de  $RV\%$

Deze  $p_{sat}$  kan men op meerdere methodes bepalen. Voor de prestaties van een EAHX in te schatten is een benaderende methode voldoende. Een goede benadering blijkt volgens (NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration, 2008) de methode van Murray (Francis W Murray, 1967):

$$p_{sat} = 6.1078 \cdot 10^2 \cdot \frac{7.5T - 2048.625}{T - 25.85} \quad (2.9)$$

Als men dit uittelt voor lucht van 21°C krijgt men:

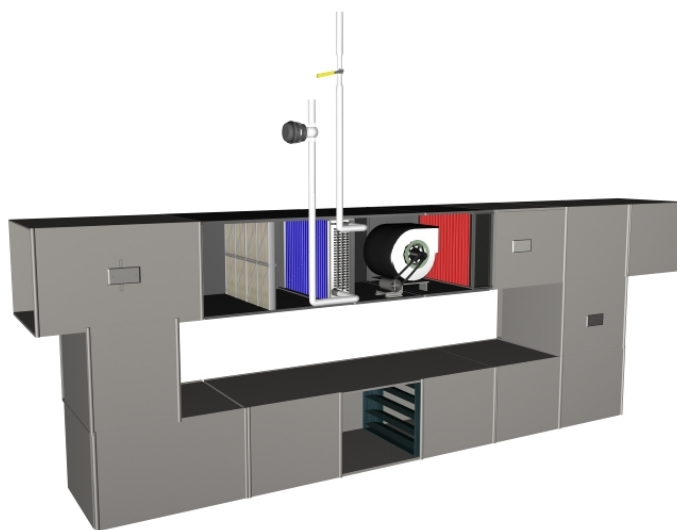
- $RV\ 0\%$ : 1.2000 kg/m<sup>3</sup>
- $RV\ 100\%$ : 1.8889 kg/m<sup>3</sup>

Dit verschil is dermate klein dat het niet in rekening gebracht hoeft te worden.

### 2.3.5 Het ventilatiesysteem

In dit deel wordt het ventilatiesysteem besproken, wat natuurlijk een onmisbaar onderdeel is van een gebouw waar men hygiëventilatie wil verkrijgen. Het hart van een ventilatiesysteem bestaat uit een luchtbehandelingskast. Deze luchtbehandelingskast filtert de vers aangezogen buitenlucht, verwarmt of koelt deze tot de gewenste temperatuur en wordt daarna door middel van een ventilator verspreid in het gebouw. De hoeveelheid van lucht die in gebouwdelen ververst moet worden, wordt volgens NBN D50-001 aangeduid in ventilatievouden. Afhankelijk van de bestemming van het gebouwdeel legt de norm ook bepaalde temperaturen op.

Een grondbuis zorgt ervoor dat de aangevoerde verse lucht reeds voorverwarmd is. In de luchtbehandelingskast worden er al voorzieningen getroffen



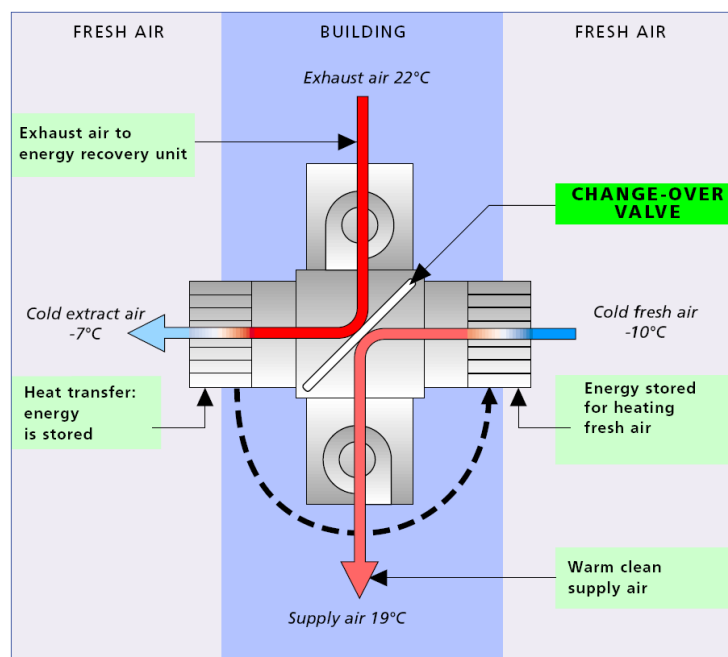
Figuur 2.17: Een eenvoudige luchtbehandelingskast (Computrols Inc., 2008).

zodat men een lager energieverbruik krijgt. Zo maakt men gebruik van warmtewisselaars en mengkranen. De mengkranen zorgen voor een menging en dus temperatuurverhoging van de aangezogen lucht door fysiek contact met de verbruikte lucht, terwijl bij warmtewisselaars er geen contact is tussen verse en gebruikte lucht. Warmtewisselaars in luchtbehandelingskasten komen voor in meerdere vormen die zich onderscheiden op de manier waarop de warmteoverdracht plaatsheeft. Zo worden hier de blokwarmtewisselaar, wielwarmtewisselaar en platenwarmtewisselaar besproken, dewelke veel voorkomen.

### **De blokwarmtewisselaar**

De blokwarmtewisselaar (figuur 2.18) is een redelijk dure oplossing, maar wel met het grootste rendement ( $\approx \pm 90\%$ ). Bij een blokwarmtewisselaar gaat de extractielucht eerst door een grote thermische capaciteit, waaraan het zijn warmte afgeeft. Als deze massa volledig opgewarmd is, draait de wisselklep zich om en zal de verse lucht door deze opgewarmde massa gaan zodat deze voorverwarmd wordt. De klep draait nadien weer als de massa's ongeveer de temperatuur hebben bereikt van de lucht die erdoor gaat.





Figuur 2.18: Schema van een blokwarmtewisselaar (GEA Happel, 2008).

### De wielwarmtewisselaar

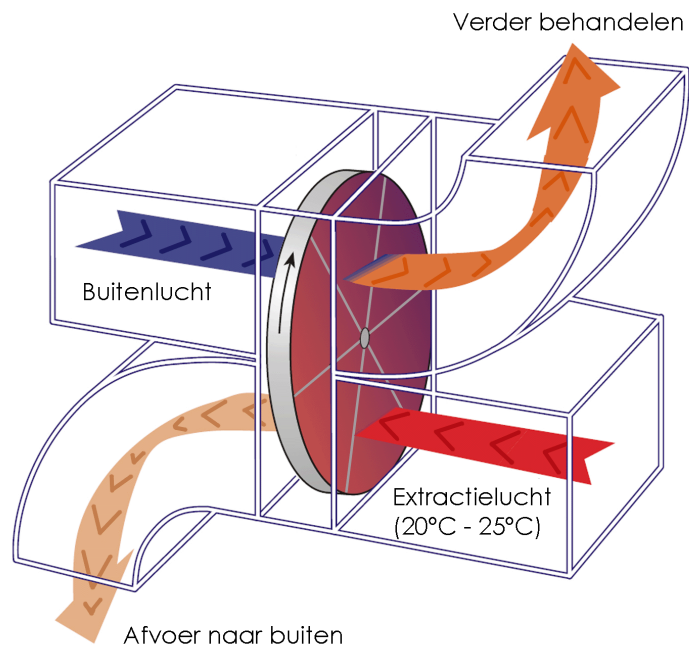
De wielwarmtewisselaar (figuur 2.19) heeft als nadeel dat deze niet luchtdicht is vanwege de bewegende delen, maar deze heeft wel een rendement van  $\pm 80\%$  wat hoger is dan een platenwarmtewisselaar. Het warmtewiel, dat bestaat uit geribbeld metaalplaat, draait langzaam met een toerental tussen 5 en 10 omwentelingen per minuut. Dankzij de geribbelde metaalplaat ontstaan er kleine kanaaltjes waardoor de warme lucht in een halve omwenteling van het wiel haar warmte kan afgeven. In de halve omwenteling die hierop volgt kan de koude lucht de warmte opnemen van de kanaalwand. Dit hele proces werkt natuurlijk ook in een zomersituatie waar de afgevoerde lucht koeler is door een airco-installatie dan de aangezogen lucht.

### De platenwarmtewisselaar

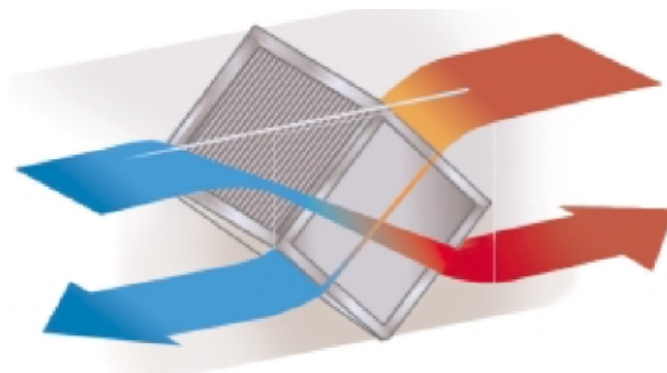
Een platenwarmtewisselaar (figuur 2.20) is een statische warmtewisselaar die bestaat uit een aantal dunne, geribbelde platen. Deze platen worden tegen elkaar aangedrukt in een frame en de randen worden dichtgelast. Men kan deze ook d.m.v. een pakking sluiten maar dit zal nooit luchtdicht zijn en blijven. De te behandelen lucht wordt door de even kanalen geleid en de extractielucht door

de oneven kanalen. Doordat er een temperatuurverschil is, zal er warmtetransport plaatsvinden via de geribbelde platen. Men zorgt ervoor zodat de snelheid hoog genoeg is dat de stroming van de lucht doorheen deze smalle kanalen turbulent is, aangezien dit leidt tot een betere warmtewisseling. De platenwarmtewisselaar heeft typisch een rendement van  $\pm 65\%$ . Vaak schrijven instellingen waar de pulsielucht zeer zuiver moet zijn platenwarmtewisselaars voor. Dit omdat deze een volledige scheiding van extractie- en pulsielucht garanderen, terwijl de andere systemen hier besproken geen volledige luchtdichtheid garanderen.

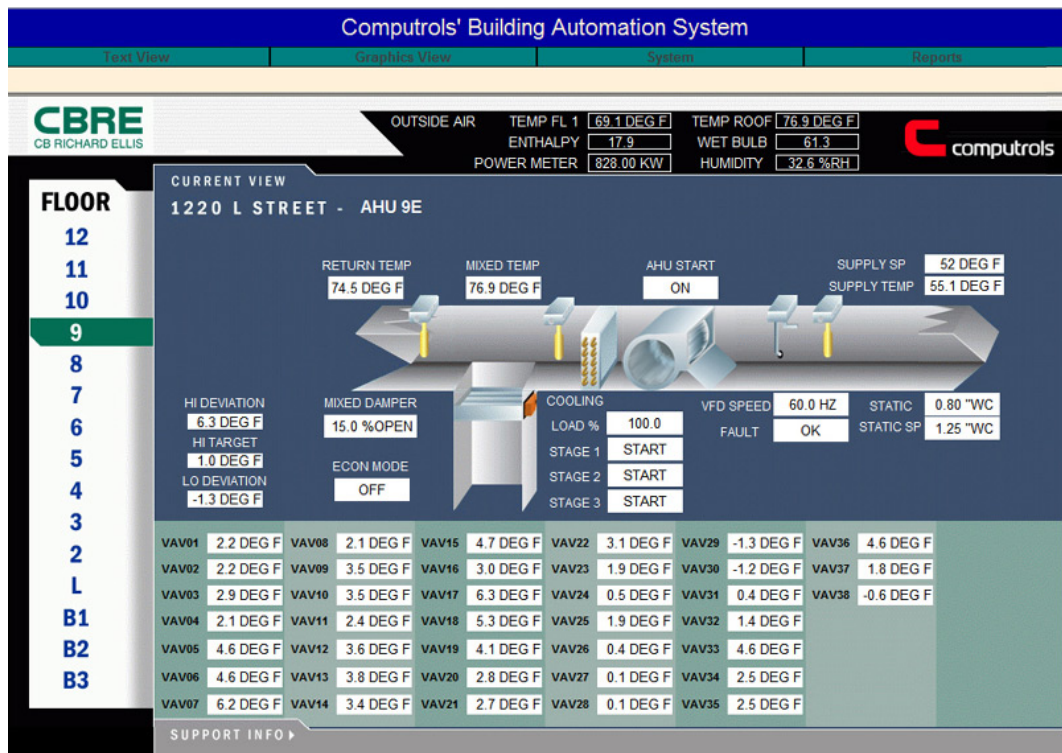
Er zullen dagen in het jaar voorkomen dat de aangezogen lucht de doeltemperatuur van het binnenklimaat heeft. Het zou overbodig zijn om deze twee luchtmassa's door de warmtewisselaar te sturen aangezien dit geen effect heeft op de temperatuur. In zulke gevallen is het aan te raden dat de lucht via een by-pass over de warmtewisselaar gaat. Zo ondervindt de lucht een kleinere drukval, wat een besparing is van ventilatorenergie. In moderne installaties gebeurt dit automatisch door het gebouwbeheersysteem, dat dan eveneens zorgt voor een lager regime van de ventilator(en) omdat deze een kleiner drukverschil moeten overwinnen. Het gebouwbeheersysteem is het systeem dat binnen- en buitencondities in het oog houdt om zo in te spelen op de processen uitgevoerd in de luchtbehandelingskast. Dit gaat soms zo ver in grote installaties dat het gebouwbeheersysteem de by-pass regelt over verschillende warmtewisselaars. Zo werken er veel warmtewisselaars bij grote temperatuursverschillen, en weinig of een bij een klein temperatuursverschil.



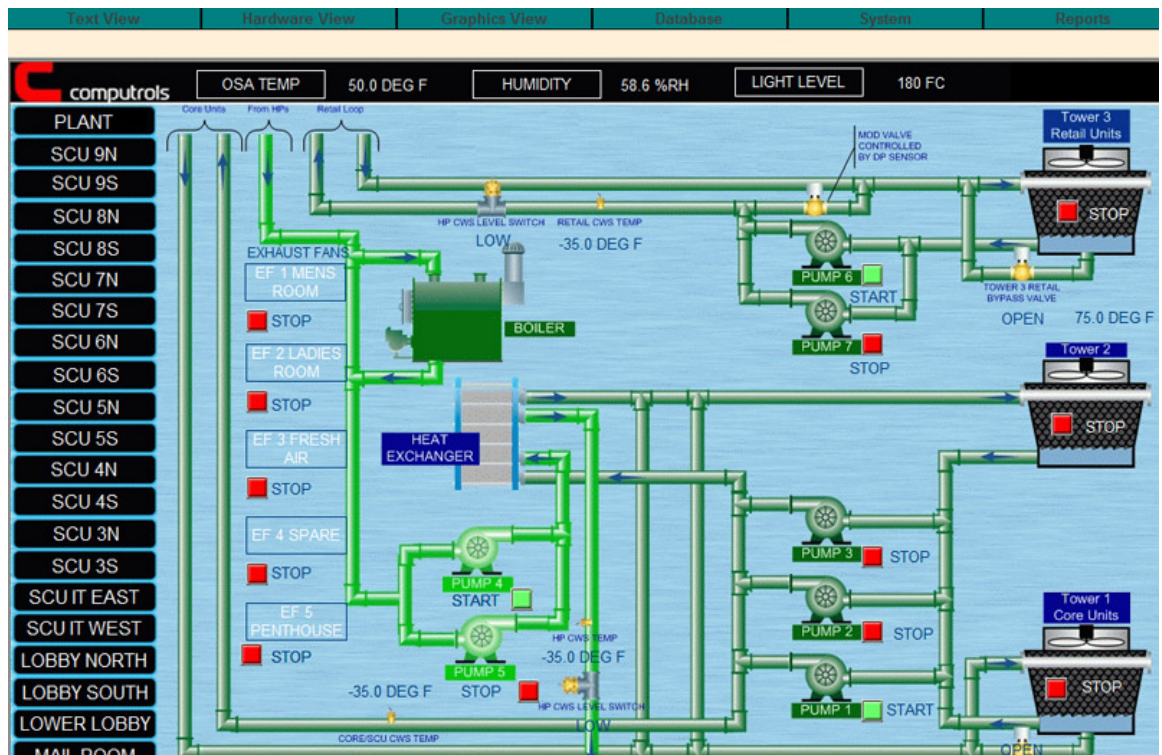
Figuur 2.19: Schema van een warmtewiel (Uptime Technology, 2008).



Figuur 2.20: Schema van een platenwarmtewisselaar (GEA Happel, 2008).



Figuur 2.21: Voorbeeld van een gebouwbeheersysteem (Computrols Inc., 2008).



Figuur 2.22: Voorbeeld van een gebouwbeheersysteem (Computrols Inc., 2008).

## 2.4 Theoretisch

Nu alle randvoorwaarden die invloed zouden kunnen hebben op de EAHX en haar prestaties besproken zijn, worden de effecten van deze randvoorwaarden in dit hoofdstuk besproken door middel van berekeningen. De invloed zal weergegeven worden op een grafische manier.

In de bodem-lucht warmtewisselaar vindt warmtewisseling plaats tussen, zoals de naam al zegt, de bodem rond de EAHX en de lucht erin. De lucht geeft warmte af of absorbeert deze door de wanden van de buis aan de omliggende aarde. Als men het contact tussen de bodem en de buis perfect veronderstelt<sup>8</sup> en de geleiding van de bodem is zeer groot t.o.v. de warmteweerstand van de buis<sup>9</sup>, dan mag men de vereenvoudiging aannemen dat de oppervlaktetemperatuur van de binnenkant van de buis constant is.

De warmteoverdracht van de wand van de EAHX naar de lucht erin gebeurt door convectie. Er zijn twee soorten convectie: gedwongen en vrije/natuurlijke convectie. In dit geval (door de ventilator) is er sprake van gedwongen convectie. Het warmtetransport tussen een vaste wand en een daarlangs stromend fluïdum wordt beschreven met de warmteoverdrachtscoëfficiënt of convectiecoëfficiënt  $h$  ( $W/m^2K$ ) (Winkler Prins, 1975). aangezien een medium geen warmte kan opnemen als deze geen warmte geleidt, is de warmtegeleiding  $\lambda$  ook van belang. Ook hier is straling niet van belang aangezien er geen zeer grote temperatuursverschillen zijn tussen de lucht en de wand van de buis.

### 2.4.1 Efficiëntie en NTU

Men kan de warmteuitwisseling met de lucht die door de buis stroomt (met een bepaalde  $\dot{m}$ ) schrijven als:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{lucht} \cdot c_{p,lucht} \cdot (T_{lucht,uit} - T_{lucht,in}) \quad (2.10)$$

Dezelfde warmteuitwisseling kan ook beschreven worden door de convectie te beschrijven tussen wand en lucht:

$$\dot{Q} = h \cdot A \cdot \Delta T_{log,gem} \quad (2.11)$$

<sup>8</sup>door een zeer goede verdichting van de grond rond de EAHX kan men dit bereiken.

<sup>9</sup> $\lambda_{bodem} > \lambda_{buis}$

waarbij  $\Delta T_{log,gem}$ :

$$\begin{aligned}\Delta T_{log,gem} &= \frac{(T_{lucht,in} - T_{wand})(T_{lucht,uit} - T_{wand})}{\ln\left(\frac{(T_{lucht,in} - T_{wand})}{(T_{lucht,uit} - T_{wand})}\right)} \\ &= \frac{T_{lucht,in} - T_{lucht,uit}}{\ln\left(\frac{(T_{lucht,in} - T_{wand})}{(T_{lucht,uit} - T_{wand})}\right)}\end{aligned}\quad (2.12)$$

Substitueren we 2.12 in 2.11 krijgen we:

$$\dot{Q} = h \cdot A \cdot \frac{T_{lucht,in} - T_{lucht,uit}}{\ln\left(\frac{(T_{lucht,in} - T_{wand})}{(T_{lucht,uit} - T_{wand})}\right)}\quad (2.13)$$

Door gebruik te maken van de vergelijkingen 2.10 en 2.13 verkrijgt men de in deze toepassing interessantste term:

$$T_{lucht,uit} = T_{wand} + (T_{lucht,in} - T_{wand}) \cdot e^{-\frac{hA}{\dot{m}_{lucht} \cdot c_{p,lucht}}}\quad (2.14)$$

Wat uit deze vergelijking af te leiden valt en wat tevens triviaal is, is dat als de buis oneindig lang is ( $A = \infty$ ) de lucht de temperatuur zal hebben van de wand van de buis. Zo een grondbuis is ideaal. De efficiëntie van een EAHX is dan de verhouding tussen zijn gerealiseerde temperatuurverschil en het door de ideale EAHX gerealiseerde temperatuurverschil:

$$\varepsilon = \frac{\Delta T_{grondbuis}}{\Delta T_{ideaal}} = \frac{T_{lucht,uit} - T_{lucht,in}}{T_{wand} - T_{lucht,in}}\quad (2.15)$$

Met behulp van vergelijking 2.14 kan dit omgeschreven worden tot:

$$\varepsilon = 1 - e^{-\frac{hA}{\dot{m}_{lucht} \cdot c_{p,lucht}}}\quad (2.16)$$

In dit geval kan men de exponent gelijkstellen aan de NTU<sup>10</sup>-factor.:

$$NTU = \frac{h \cdot A}{\dot{m}_{lucht} \cdot c_{p,lucht}}\quad (2.17)$$

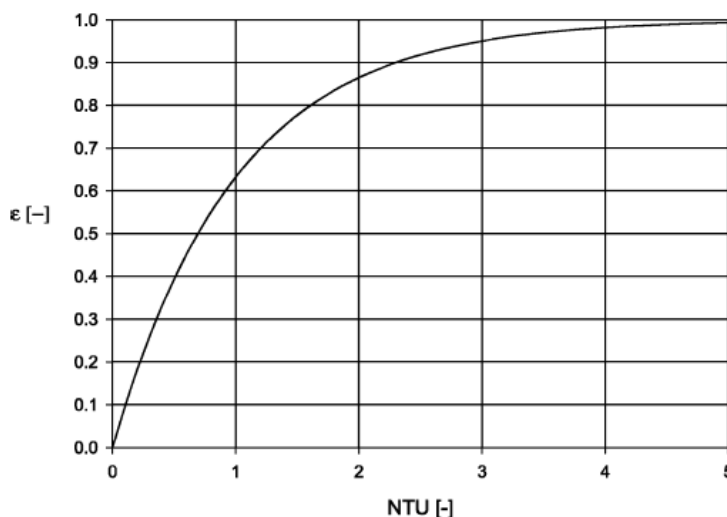
Waardoor men 2.16 kan schrijven als:

$$\varepsilon = 1 - e^{-NTU}\quad (2.18)$$

De efficiëntie van de EAHX wordt dus bepaald door de dimensieloze NTU-

<sup>10</sup>NTU staat voor Number of Transfer Units, dit is een methode om de hoeveelheid uitgewisselde warmte bij warmtewisselaars te berekenen

factor. De relatie tussen NTU en  $\varepsilon$  is weergegeven in figuur 2.23. Hoe hoger de NTU, hoe hoger de efficiëntie van de grondbuis. Het valt toch op te merken dat de stijging van  $\varepsilon$  stagneert bij een NTU hoger dan 3. In de delen hierna worden de verschillende factoren besproken die een invloed hebben op de efficiëntie van de EAHX. Zoals te zien is in vergelijking 2.17, is de NTU afhankelijk van:



Figuur 2.23: De relatie tussen de efficiëntie ( $\varepsilon$ ) en de NTU (De Paepe and Janssens, 2003)

- $A$ : De oppervlakte van de grondbuis dewelke bepaald wordt door de diameter, de lengte en het aantal buizen.
- $\dot{m}_{lucht}$ : Het massadebiet lucht dat door de EAHX stroomt.
- $c_{p,lucht}$ : de specifieke warmtecapaciteit van lucht, dewelke constant verondersteld mag worden in deze toepassing.
- $h$ : De convectiecoëfficiënt van de lucht in de buis.

De eerste 2 parameters zijn in voorgaande hoofdstukken (respectievelijk 2.3.2 en 2.3.5) beschreven en de derde is constant. Dat laat ons bij de laatste parameter, de convectiecoëfficiënt.

## 2.4.2 Invloed op het warmtetransport

Warmtetransport door een laag van het medium (hier lucht) gebeurt door geleiding als het medium stilstaat en door convectie als deze in beweging is (Çengel,

1998). In een EAHX is het de bedoeling dat de medium in beweging is, anders heeft men geen luchtdebiet wat nodig is om de ventilatie in het gebouw te voorzien. De hoeveelheid warmte die van de wand door convectie overgedragen wordt aan het medium wordt bepaald door de convectiecoëfficiënt. De relatie tussen de warmtegeleiding en warmteconvectie wordt gegeven door het getal van Nusselt ( $Nu$ ) (Çengel, 1998):

$$h = \frac{Nu \cdot \lambda}{D} \quad (2.19)$$

Waarbij  $D$  de dikte van de vloeistoflaag is, wat in het geval van een EAHX de binnendiameter van de buis is. Een  $Nu$  van 1 wil zeggen dat het volledige warmtetransport door geleiding gebeurt. Hoe groter  $Nu$ , hoe efficiënter de convectie plaatsheeft, men heeft er dus alle belang bij om voor een turbulente stroming te zorgen in de buis. Volgens (VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurswesen, 1997) en (Azziz and Kraus, 2001) is  $Nu$  voor een stroming in een buis gelijk aan:

Stroming	Voorwaarden	$Nu$
Laminair	$Re < 2300$	3.66
Turbulent	$2300 < Re < 5 \cdot 10^6$ $0.5 < Pr < 10^6$	$\frac{\xi/8(Re-1000) \cdot Pr}{1+12.7\sqrt{\xi/8} \cdot (Pr^{2/3}-1)}$

Tabel 2.2: Empirische formules van  $Nu$  voor de stroming in een buis (met  $\xi = (1.82 \cdot \log(Re) - 1.64)^{-2}$ )

Het Reynolds-getal  $Re$  wordt bepaald volgens onderstaande formule:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (2.20)$$

Waarbij  $\nu$  de enige constante is.  $D$  en  $\dot{m}$  beïnvloeden  $v$ , waardoor deze  $Re$ ,  $Nu$  en dus  $h$  beïnvloeden. Als men  $A$  opgesplitst in  $\pi DL$  kan men  $L$  afzonderen daar deze lineair onafhankelijk is van NTU. Wat overblijft is enkel nog afhankelijk is van  $D$  en  $\dot{m}$ :

$$\frac{NTU}{L} = \frac{hA}{L \cdot \dot{m}_{lucht} c_{p,lucht}} \quad (2.21)$$

$$= \frac{Nu \cdot \lambda_{lucht}}{D} \frac{\pi DL}{\rho_{lucht} \dot{V} c_{p,lucht} L} \quad (2.22)$$

$$= Nu \cdot \pi \cdot \frac{\lambda_{lucht}}{c_{p,lucht} \rho_{lucht}} \frac{1}{\dot{V}} \quad (2.23)$$



$$= Nu \cdot \pi \cdot \frac{\lambda_{lucht}}{c_{p,lucht}} \frac{1}{\dot{m}} \quad (2.24)$$

Voor laminaire stromingen mag men  $Nu$  constant veronderstellen, dus is  $\frac{NTU}{L}$  onafhankelijk van diameter  $D$ . In figuur 2.24 worden deze contours gegeven voor turbulente stromingen daar in een EAHX men een turbulente stroming wil krijgen om een beter warmtetransport te verkrijgen. Hierbij moet de verandering van  $Nu$  in rekening gebracht worden door de Gnielinski-vergelijking<sup>11</sup> (Azziz and Kraus, 2001):

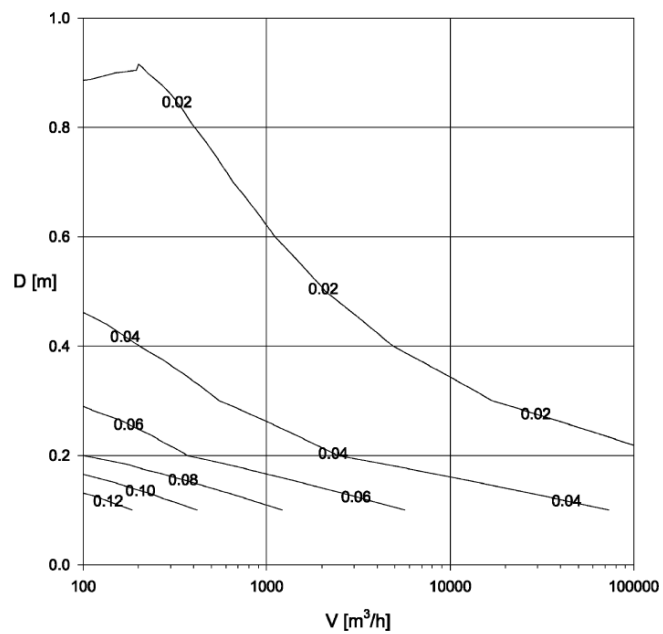
$$Nu = \frac{\xi/8(Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12.7\sqrt{\xi/8} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \quad (2.25)$$

Uit figuur 2.24 kan men duidelijk afleiden dat een kleinere  $D$  de efficiëntie verhoogt, maar een hoger debiet verlaagt dit. Hieruit kan men besluiten dat het een positieve invloed heeft op de efficiëntie om meerdere kleine buizen te hebben waarover het debiet verdeeld wordt. Als men hier zeer ver in gaat, komt men uit op een auto-radiator.

Eerder werd al aangehaald dat de lengte  $L$  een lineair onafhankelijke invloed heeft op de  $NTU$ . Een lange buis is dus positief voor de efficiëntie, maar niet voor het drukverlies (waar  $L$  ook een lineair onafhankelijke is).

---

<sup>11</sup>Dewelke volgens Bejan (2003) de meest juiste correlatie bezit. Reeds weergegeven in tabel 2.4.2



Figuur 2.24:  $NTU/L$  voor grote debieten en kleine buisdiameters (Turbulente stroming)

### 2.4.3 Invloed op het drukverlies

Zoals op het einde van de vorige paragraaf aangehaald, kunnen de veranderingen die invloed hebben op de efficiëntie ook invloed uitoefenen op het drukverlies. Dit drukverlies moet om redenen in 2.3.2 aangehaald natuurlijk niet te hoog oplopen. Het drukverlies bij een hydraulisch gladde wand<sup>12</sup> bij turbulente stromingen is:

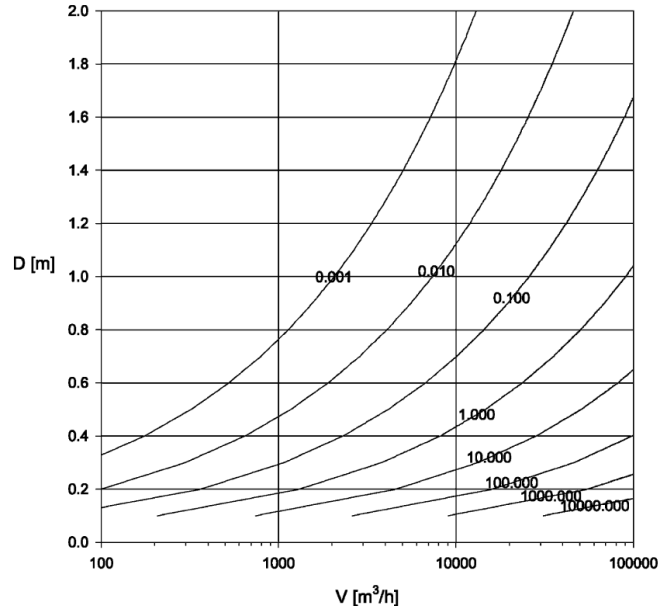
$$\Delta p = \xi \frac{L}{D} \rho_{lucht} \frac{v_{lucht}^2}{2} \quad (2.26)$$

waarbij:

Stroming	$\xi$
$Re < 2300$	$\frac{64}{Re}$
$2300 < Re$	$(1.82 \log(Re) - 1.64)^{-2}$

Tabel 2.3:  $\xi$  in functie van de soort stroming

Zoals reeds vermeld werd, is  $L$  de enige lineaire onafhankelijke, aangezien  $D$  een invloed heeft op  $Re$ . In figuur 2.25 wordt dan ook  $\Delta p/L$  uitgezet.



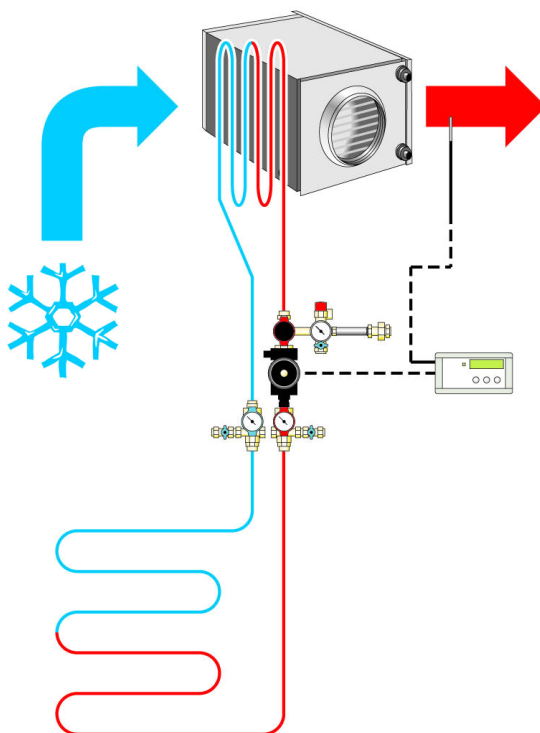
Figuur 2.25: Contour plot van  $\Delta p/L$

<sup>12</sup>Een hydraulisch gladde wand:  $Re \cdot \frac{k}{d} \leq 23$  waarbij  $k$  de ruwheid voorstelt

Uit deze figuur 2.25 zou men kunnen concluderen dat het gebruik van grote buizen met een klein debiet het beste is. Dit zou men in praktijk kunnen omzetten in een aantal (om het debiet te verdelen) grote buizen. Dit is in strijd met de conclusie van het warmtetransport, waar men meerdere kleine buizen wenste. Bovendien zou het economisch door het grote grondverzet en grondwerken tot een zeer lange terugverdientijd leiden. Wat wel volgens beide benaderingen een positieve invloed heeft is het aantal buizen. De diameter en het aantal buizen zullen technisch een economisch geoptimaliseerd moeten worden.

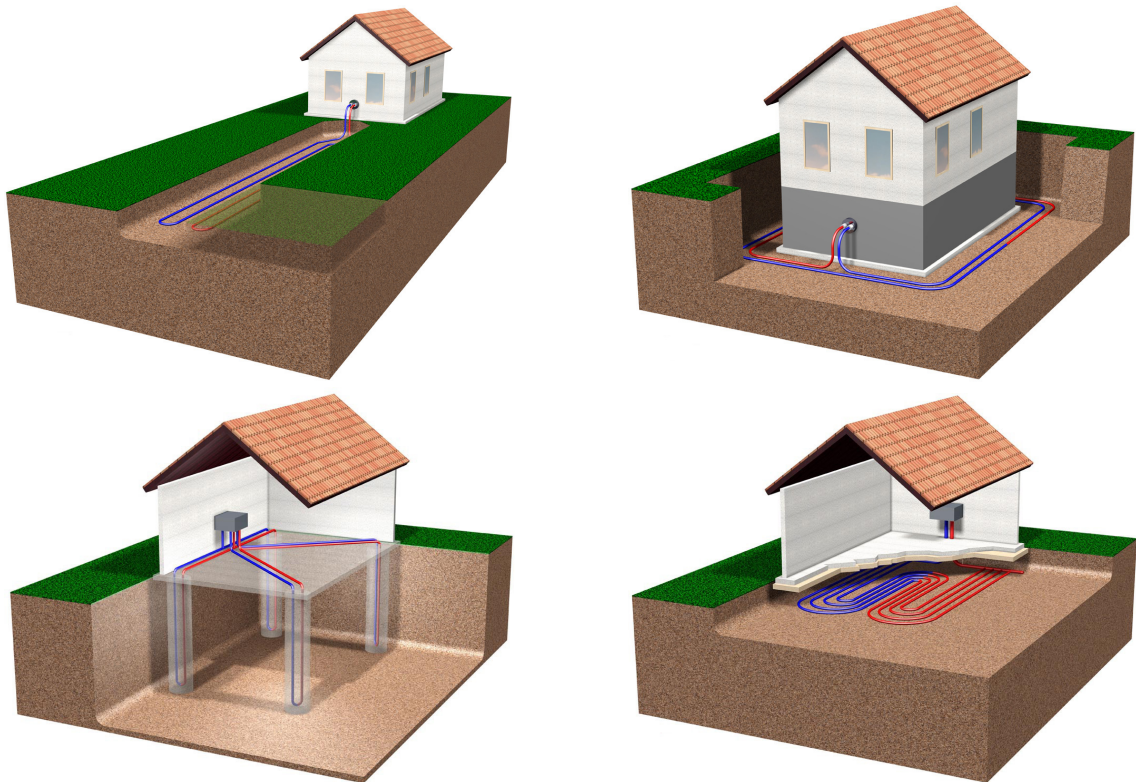
## 2.5 Varianten

Variaties op het thema EAHX bestaan er ook en een ervan is de BodemWarmte-Wisselaar of BWW. Dit systeem is gelijkaardig, maar in plaats van lucht doorheen een ondergrondse leiding te sturen, stuurt men er water door. Dit water wordt opgewarmd door de thermische capaciteit van de bodem, waarna het haar warmte afgeeft aan de lucht via een water-lucht warmtewisselaar.



Figuur 2.26: Hydraulisch schema van de bodem warmtewisselaar

Voordeel is natuurlijk dat men het hele probleem van condensatie en schimmelvorming uitsluit op deze manier. Men hoeft dan ook niet zo kritisch te zijn



Figuur 2.27: Plaatsing van de bodemwarmtewisselaar (Sole-Erdwärmetauscher, 2008)

over de plaatsing van de leiding. Zo mag dit een buigbare leiding (zelfde type als drinkwaterleiding) zijn waar geen helling noch inspectieput nodig is, zonder in te boeten aan hygiëne. De leiding kan geplaatst worden in een greppel in de tuin, in een cirkel rondom het huis, onder de funderingsplaat of zelfs in de (geboorde) paalfundering. Een bijkomend voordeel is dat men dit hydraulisch circuit onafhankelijk kan sturen van het aerolisch circuit. De aansturing gebeurt d.m.v. een temperatuurgestuurde circulatiepomp, zoals aangegeven in figuur 2.26.

Nadeel aan het principe is dat er twee keer warmteoverdracht moet plaats vinden, dewelke twee keer niet perfect is, wat een prestatieverlies oplevert.

## Hoofdstuk 3

# Ontwerpen van een berekeningstool

In dit hoofdstuk wordt een poging ondernomen om een eenvoudig rekenprogramma te maken wat door studiebureaus, architecten of bouwheren later gebruikt kan worden om een eerste indruk te krijgen van investeringen en afschrijvingen bij het al dan niet plaatsen van een grondbuis. Het is de bedoeling dit ook te toetsen aan de metingen van hoofdstuk 5. De theoretische stappen in het berekenings- en selectieproces van een grondbuis zal hier steeds geïllustreerd worden met de bijhorende code van het programma. Uit voorgaande paragrafen is gebleken dat men een optimum moet zoeken tussen thermische en hydraulische prestaties. Dit is makkelijk in wiskundige vorm weer te geven, wat met MATLAB-functies makkelijk op te lossen is. De volledige code is achteraan in Bijlage A gegeven.

De bedoeling van deze tool is dat deze gebruikt kan worden op de werkvloer en daarvoor dient deze eenvoudig te bedienen zijn. Hiervoor wordt geopteerd voor een GUI<sup>1</sup>.

### 3.1 Filosofie

In de publicatie *Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers* van M. De Paepe and A. Janssens wordt een selectieprocedure beschreven die een

---

<sup>1</sup>Graphical User Interface of een grafische interface met knoppen en vakjes. Hiertegenover staat een text-based interface waar de interactie met de gebruiker met lijnen tekst gebeurt.

grondbuis selecteert op basis van zijn efficiëntie. Het probleem is dat deze selectieprocedure geen realistisch resultaat geeft bij het dimensioneren van een EAHX voor een kantoorgebouw. Men verkrijgt met die methode wel een grondbuis met de gevraagde efficiëntie, maar wel met een te groot drukverlies over de EAHX. Dit impliceert een slechte C.O.P.-waarde wat op zijn beurt weer een directe invloed heeft op de terugwinning van de investering.

Om een buis te kiezen waar men een maximaal thermisch rendement wilt bekomen per toegevoegde eenheid elektriciteit én de investeringskost, gaan we gebruik maken van de C.O.P.-waarde en de efficiëntie  $\varepsilon$ . Men wil namelijk een EAHX bouwen waar men zo veel mogelijk warmte uit krijgt voor een minimum aan elektrische energie opgenomen door de ventilator (dus een zo hoog mogelijke C.O.P.). Een inefficiënte EAHX is een EAHX die niet de volle capaciteit van zijn afmetingen benut. Aangezien de kostprijs van een EAHX rechtstreeks afhankelijk is van de afmetingen (enerzijds door de materiaalkost, anderzijds door de benodigde grondwerken), wil men dus ook een zo hoog mogelijke  $\varepsilon$ .

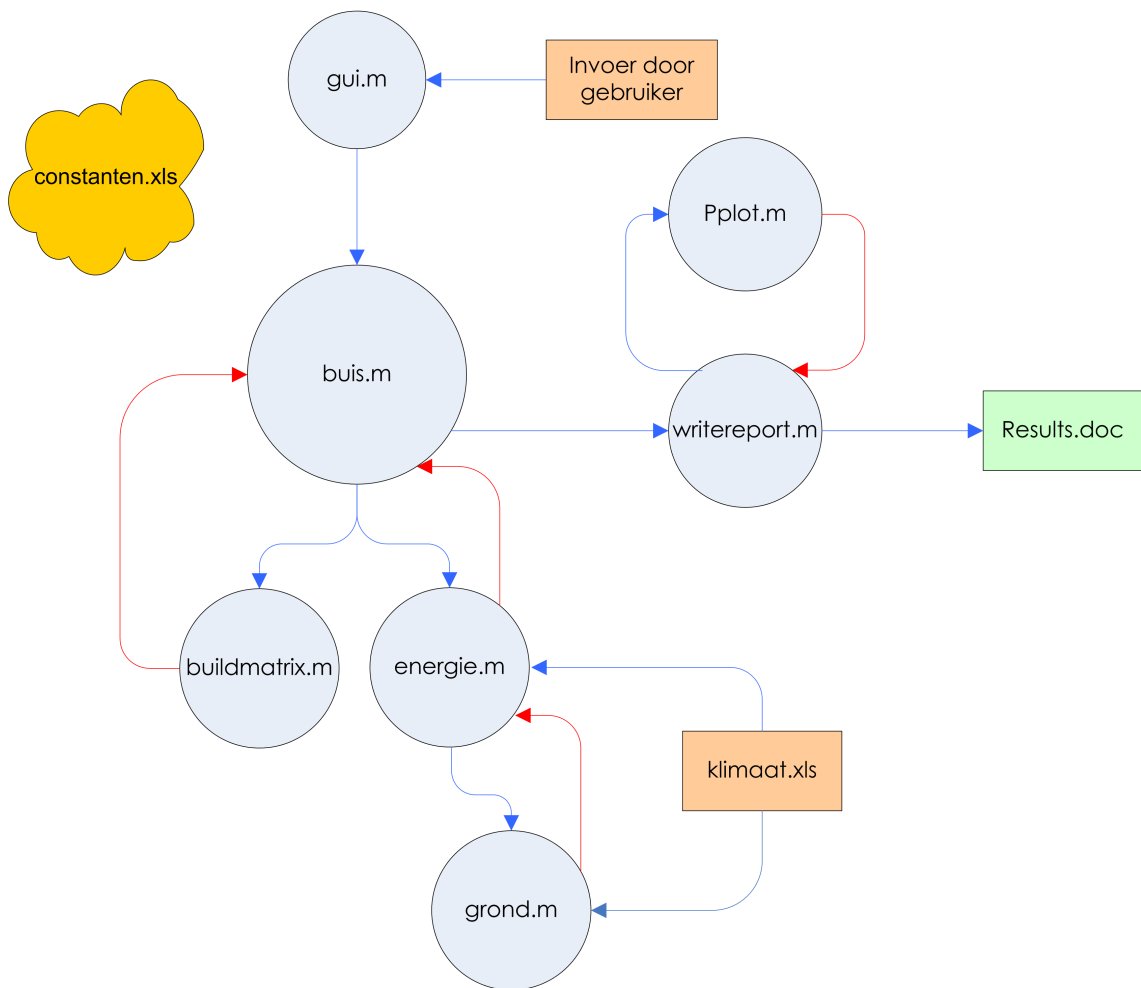
Zo zal vb één zeer grote buisdiameter een zeer klein drukverlies impliceren, wat een hoge C.O.P.-waarde geeft maar de efficiëntie is erg laag doordat er onvoldoende warmte overgedragen kan worden. De overgedragen warmte is nl. afhankelijk van de diameter van de buis, zie vergelijking 2.14 en 2.19. Tussen deze twee eigenschappen moet een consensus gevonden worden, waarbij men rekening houdt met de randvoorwaarden,  $L_{max}$  en  $\Delta p_{max}$ , die door de gebruiker ingegeven werden.

## 3.2 Opzet

Om de volgende delen, waarin de verschillende functies uitgelegd worden die tezamen tot het resultaat komen, beter te begrijpen wordt hier de informatiestroom (figuur 3.1) beschreven.

Om te beginnen geeft de gebruiker de randvoorwaarden in, waaraan het resultaat moet voldoen, in de interface. `buis.m` ontvangt deze gegevens en geeft  $L_{max}$  door aan `buildmatrix.m`, dewelke samen met de constanten uit `constanten.xls` voor een hele hoop debieten ( $\dot{V}$ ) en diameters ( $D$ ) de convectiecoëfficiënt ( $h$ ) en het drukverlies ( $\Delta p$ ) berekent. `buis.m` kiest op basis van de randvoorwaarden die de gebruiker ingaf ( $\Delta p$ ) een aantal mogelijke afmetingen en aantallen die technisch voldoen.

Voor deze geselecteerde mogelijkheden wordt het vermogen berekend door



Figuur 3.1: Schema van de informatiestroom binnen het programma, hierin stellen de rode lijnen de feed-back weer die een functie geeft na een input die in het blauw voorgesteld wordt.

`energie.m` met behulp van de thermische diffusiviteit ( $\alpha$ ) en de diepte ( $z$ ). Opdat het vermogen berekend kan worden moeten de buitentemperatuur en de bodemtemperatuur gekend zijn. De buitentemperatuur wordt uit `klimaat.xls` gehaald en de bodemtemperatuur wordt berekend door `grond.m`. Deze laatste heeft de buitentemperatuur (uit `klimaat.xls`),  $z$  en  $\alpha$  nodig. Het vermogen wordt voor elke dag van het jaar berekend om zo een totaal uit te komen. `buis.m` geeft dit vermogen samen met de afmetingen ( $D$ , aantal buizen) en hydraulische gegevens ( $\Delta p$ ,  $s$  en de daaruit afgeleide C.O.P.-waarde) door aan `writereport.m` wat de resultaten in een document (`results.doc`) giet. `writereport.m` laat `Pplot.m` nog een diagram tekenen per combinatie van de temperatuurswinst. Dan is het de taak van de gebruiker om een economische oplossing (naar materiaalkost



toe) te kiezen, op basis van de weergegeven vermogens en C.O.P.-waardes.

### 3.3 Kiezen van de buisafmetingen

#### 3.3.1 Opbouwen van alle combinaties

De routine `buildmatrix.m` maakt eerst meerdere matrices op basis van  $\dot{V}$  en  $D$ , wat de keuze van een buis in een latere fase van het programma vergemakkelijkt. De diameters zijn gebaseerd op het leveringsprogramma van REHAU, de volumedebieten zijn gekozen naar de realiteit.

```
Dmatrix = [0.2 0.25 0.315 0.4 0.5 0.8 1.1 1.2];
Vmatrix = [50:50:30000];
```

Hiermee kan men ( $600 \cdot 8 \Rightarrow$ ) 4800 combinaties maken. Voor elk van deze combinaties worden volgende eigenschappen berekend:

- $\Delta p$ , het drukverlies in `dPmatrix`
- $h$ , de convectiecoëfficiënt in `Hmatrix`
- $v$ , de snelheid in `speedmatrix`
- De stroming (laminair of turbulent) in `stroming`

In onderstaande dubbele lus maakt het programma de berekening:

```
for r = 1 : 1 : 8
for k = 1 : 1 : 600

V = Vmatrix(1,k)/3600;           % m3/s (omgezet van m3/h)
D = Dmatrix(1,r);               % m
speed = V/((pi*D^2)/4);         % m/s
speedmatrix(r,k) = speed;
Re = (speed*D)/nuv;
```

Om  $Nu$  te berekenen moet men de aard van de stroming kennen. Afhankelijk van de stroming moet men op een andere manier  $Nu$  berekenen (zoals aangehaald in tabel 2.4.2). Bij een turbulente stroming wordt  $Nu$  bepaald volgens Gnielinski (zie vergelijking 2.25), anders  $Nu = 3.66$ .

Daarna bepaalt men het drukverlies met de lengte die de gebruiker ingaf (zie vergelijking 2.26). De resulterende matrices (dPmatrix, Hmatrix, speedmatrix) hebben 600 kolommen en 8 rijen. Zo kan men van elke combinatie later in het programma een waarde opzoeken.

```

if Re < 2300
    Nu = 3.66;
    xi = (64/Re);
    stroming(r,k) = 0;    % 0 is laminaire stroming
elseif Re > 2300
    xi = (1.82*log10(Re)-1.64)^(-2);
    Nu = (xi/8*(Re-1000)*Pr)/(1+12.7*sqrt(xi/8)*(Pr^(2/3)-1));
    h = Nu*lambda/D;
    stroming(r,k) = 1;    % 1 is turbulente stroming
end

dP = xi*L/D*rho*speed^(2)/2;

Hmatrix(r,k) = h;
Rematrix(r,k) = Re;
Numatrix(r,k) = Nu;
ximatrix(r,k) = xi;
dPmatrix(r,k) = dP;
end
end

```

### 3.3.2 Kiezen van een buis

Het doel van het programma is de gebruiker enkele mogelijke combinaties voor te schotelen waarbij het drukverlies en de lengte binnen zijn eisen werd gehouden en toch een zo efficiënt mogelijk is. Men zal dus pogen het drukverlies zo kort mogelijk bij de ingegeven  $\Delta p_{max}$  te houden, en de lengte van de grondbuis zo lang mogelijk (dus gelijk aan  $L_{max}$ ). Hiervoor gaat men voor alle mogelijke diameters kijken wat het drukverlies is voor 1 of meerdere parallelle buizen<sup>2</sup>. Het maximaal aantal buizen kan de gebruiker beperken opdat de volledige EAHX

<sup>2</sup>Waarbij men de veronderstelling maakt dat elk van de parallelle buizen met hetzelfde debiet doorspoeld zal worden.

nog wel op het terrein kan liggen (cfr: minimale tussenafstand), en de kostprijs niet de hoogte inschiet.

```
for rij = 1:1:Dk
    for aantal = 1 : 1 : maxbuizen
        Vdeel = v/aantal;
        kolom = find(Vmatrix <= Vdeel, 1, 'last');
        speed = speedmatrix(rij,kolom);
        D = Dmatrix(rij);
        dP = aantal*dPmatrix(rij,kolom);
```

Er wordt ook maar een maximum aantal oplossingen aan de gebruiker weergegeven. Dit aantal kan door de gebruiker ook in de GUI ingegeven worden. Aangezien de routine bij de kleinste diameter begint (kleine diameters zijn goed voor de warmteoverdracht, zie 2.4.2) zullen deze de beste prestaties leveren.

```
if dP < dPmax & stroming(rij,kolom) == 1
    if resultaten-1 < maxopl

        Opp = D * pi * (Lmax);
        [Pwarm,Pkoel] = vermogen(z,rij,kolom,Vdeel/3600,resultaten-1,BU);

        hcoeff = Hmatrix(rij,kolom);
        NTU = hcoeff*aantal*Opp/(v/3600 * rho * cp);
        EFF = 1-exp(-NTU);

        Pfan = aantal*Vdeel/3600*dP/ep*BU*365/1000;
        COP = (aantal*Pwarm+aantal*Pkoel)/Pfan;

        Netto = aantal*Pwarm+aantal*Pkoel-Pfan;
```

Als de combinatie aan de eisen voldoet ( $\Delta p < \Delta p_{max}$  en turbulente stroming), dan gaat men voor deze combinatie het vermogen (zie 3.4), de efficiëntie, de C.O.P.-waarde en de nettowinst berekenen. Voor deze gegevens wordt de veronderstelling gemaakt dat de installatie elke dag (365) van het jaar draait. Deze resultaten slaat men dan op in de matrix `resultaat`, welke later in een document weergegeven wordt.

## 3.4 Berekenen van de uitgespaarde energie

Nu het programma een aantal mogelijke buizencombinaties heeft gevonden, wenst men natuurlijk te weten hoe groot de hoeveelheid energie is die deze combinatie kan uitsparen. Als men deze kent, kan de gebruiker de afweging tussen de investering en de besparing maken voor elke combinatie en zo de meest economische kiezen. Deze afweging wordt in hoofdstuk 4 besproken.

### 3.4.1 Bepalen van de grondtemperatuur

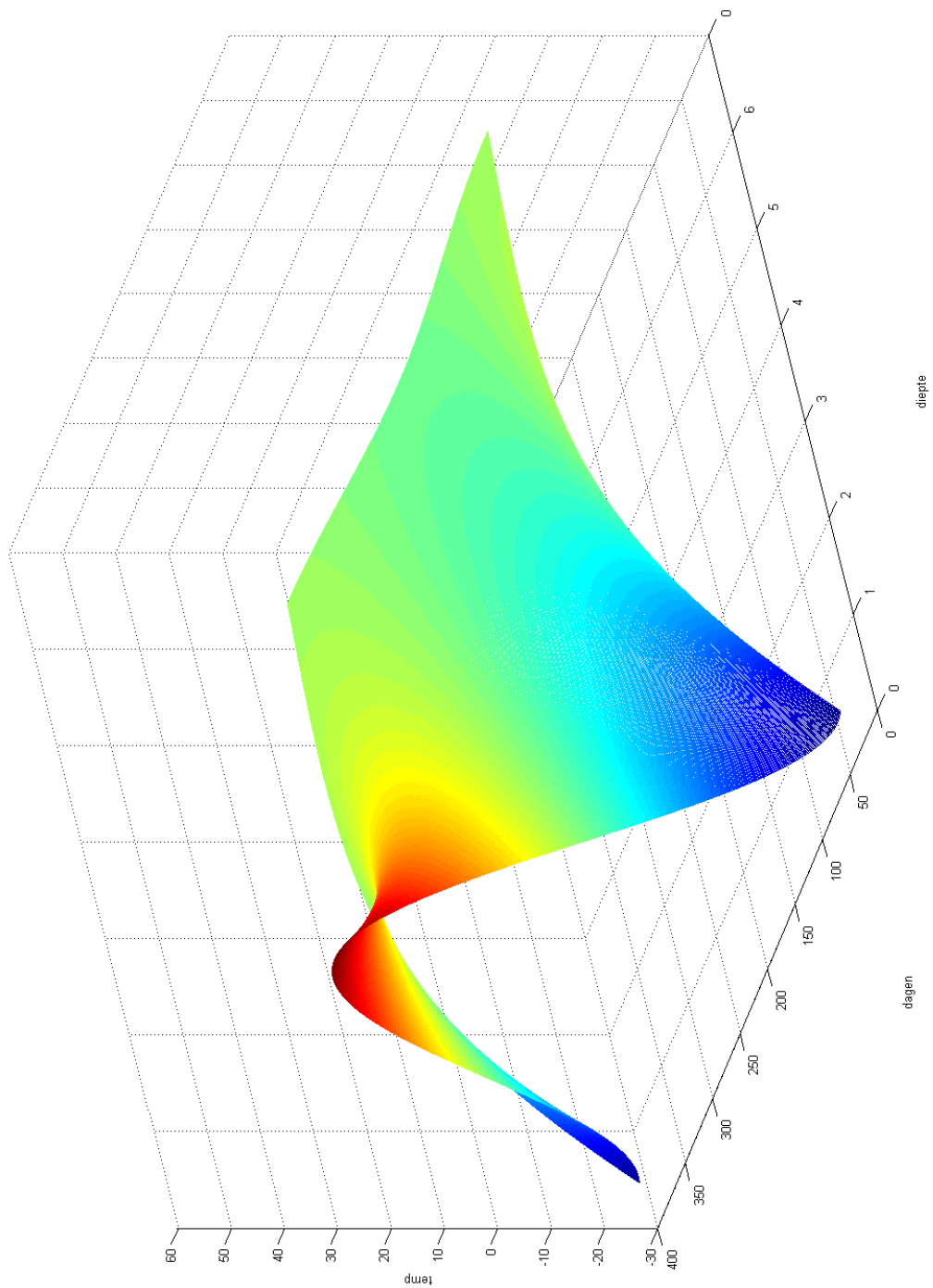
Dat de temperatuur in de bodem afhankelijk is van de temperatuur aan de oppervlakte werd al aangehaald in hoofdstuk 2.3.1. Het programmeren van vergelijking 2.5 met de dagen en de diepte als veranderlijke heeft als resultaat figuur 3.2.

In de meteorologische gegevens uit `klimaat.xls` (dewelke men inleest in de vector `dagtemps`) haalt men wanneer de koudste en de warmste dag plaatsvond, en welke temperaturen er toen bereikt werden. Op basis van deze gegevens kan met de functie `grond.m` de temperatuur op een bepaalde diepte berekend worden, waarbij:

- `z`: de diepte waarop men de bodemtemperatuur wil weten
- `t`: de dag waarop men de bodemtemperatuur wil weten
- `alpha`: de thermische diffusiviteit (in  $\text{m}^2/\text{s}$ )
- `tmax` en `tmin`: de maximum en minimum temperatuur van een jaar
- `t0`: De dag waarop de laagste temperatuur behaald werd
- `Tavg`: De gemiddelde jaartemperatuur

```
function T = grond(t,z,tmax,tmin,t0)
```

```
alpha = alpha*60 *60 *24;  
Tavg = mean(dagtemps);  
Tamp = tmax - tmin;  
omega = 2*pi/365;  
d = sqrt(2*alpha/omega);  
Tavg = Tavg +2;
```



Figuur 3.2: De relatie tussen de oppervlaktetemperatuur en de temperatuur op een diepte.

De laatste regel kan men verklaren doordat de gemiddelde grondtemperatuur gelijk is aan de gemiddelde luchttemperatuur + 2°C (Buol, 2003) (Nofziger and Wu, 2003). De temperatuur wordt dan bepaald volgens vergelijking 2.5:

$$T = T_{avg} + T_{amp} \cdot \exp(-z/d) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot (t - t_0) / 365 - z/d - \pi/2);$$

### 3.4.2 De temperatuurswinst

Om de uitgewisselde warmte  $\dot{Q}$  te bepalen moet men de temperaturen weten voor en na de grondbuis. De temperatuur voor de grondbuis is gekend (dit is de omgevingstemperatuur) en staat in de matrix  $dagtemp$ s. De temperatuur aan het einde van de EAHX kan berekend worden door formule 2.14 te gebruiken<sup>3</sup>:

$$T_{lucht,uit} = T_{wand} + (T_{lucht,in} - T_{wand}) \cdot e^{-\frac{hA}{\dot{m}_{lucht} \cdot c_{p,lucht}}}$$

Alles wat dan nog rest is het berekenen van de uitgewisselde warmte  $\dot{Q}$  met vergelijking 2.10:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Deze hele procedure wordt dankzij een lus voor elke dag berekend, waarbij men de convectiecoëfficiënt  $h$  en de diameter  $D$ <sup>4</sup> nog uit de matrices die eerder in het programma gevuld werden haalt:

```

h = Hmatrix(rij, kolom);
D = Dmatrix(rij);

for dag = 1:1:365
    Tdag = dagtemps(dag);
    Tgrond = grond(dag, z, tmax, tmin, t0);
    Omtrek = pi*D;
    Opp = L*Omtrek;
    Tuit = Tgrond + (Tdag - Tgrond)*exp(-(h*Opp)/((V*rho)*cp));
    Q = V * rho * cp * (Tuit - Tdag);
    T = Tuit - Tdag;

```

Men splitst het vermogen (en de dagen) op in 2 soorten: dagen waarop gekoeld moet worden en dagen waarop er verwarming nodig is. Dit stelt ons in

<sup>3</sup>waarbij men mag veronderstellen dat de wand van de buis de temperatuur van de grond heeft door de grote inertie van de bodem

<sup>4</sup>De oppervlakte van een open cilinder is:  $2\pi \cdot r \cdot h$  of  $\pi \cdot D \cdot h$

staat om de uitgespaarde energie op de koel- en verwarmingsinstallatie afzonderlijk te bepalen.

```
if Tdag < 20
    warmdagen = warmdagen +1;
    Qwarm(dag) = Q;
    Qkoel(dag) = 0;
    Twinst(dag) = T;
    Tverlies(dag) = 0;
elseif Tdag > 22
    koeldagen = koeldagen +1;
    Qkoel(dag) = -Q;
    Qwarm(dag) = 0;
    Twinst(dag) = 0;
    Tverlies(dag) = -T;
else
    Qwarm(dag) = 0;
    Qkoel(dag) = 0;
    Tverlies(dag) = 0;
    Twinst(dag) = 0;
end
```

### Kanteltemperatuur

Belangrijk in de berekening van de vermogenswinst van een grondbuis is de bepaling van de temperatuurintervallen waarop de grondbuis gebruikt gaat worden. Men gaat namelijk twee half-open intervallen bepalen  $(-\infty : x]$  en  $[y : \infty[$ ) waarin de grondbuis ingeschakeld zal zijn voor respectievelijk het verwarmen en het koelen van de omgevingslucht. Binnen het interval  $[x : y]$  is het voordeliger om de lucht volledig op te warmen door de luchtbehandelingskast. Deze intervallen zullen in deze paragraaf bepaald worden d.m.v. een afweging van de warmte- of koeltewinst van de grondbuis tegenover het elektrische vermogen opgenomen door de ventilator. Dit resulteert in een bepaalde elektrische kost van de ventilator/EAHX die men kan afwegen tegen de kost voor het klassiek verwarmen van de lucht<sup>5</sup>.

Deze temperaturen zullen later dan ook bepalen wanneer de EAHX uitgeschakeld zal worden d.m.v. een by-pass. Hier zal in de berekening met het

<sup>5</sup>Elektrisch of met fossiele brandstoffen

programma ook rekening gehouden worden.

Technisch gezien zoekt men dus de temperatuur waarop de kostprijs om de lucht doorheen de grondbuis te laten gaan groter is als die om de lucht volledig op te warmen.

$$EUR_{ventilator} \geq EUR_{kv} \quad (3.1)$$

Waarbij men de kostprijs kan berekenen als:

$$Kostprijs = \frac{P_{benodigd}}{\eta} \cdot \#uur \cdot EUR/kWh \quad (3.2)$$

Het vermogen van de ventilator kan men als volgt berekenen:

$$P_{ventilator,elektrisch} = \frac{P_{ventilator}}{\eta_{motor}} \quad (3.3)$$

$$= \frac{\dot{V} \cdot \Delta p}{\eta_{ventilator}} / \eta_{motor} \quad (3.4)$$

$$= \frac{\dot{V} \cdot \Delta p}{\eta_{ventilator} \cdot \eta_{motor}} \quad (3.5)$$

$$= \frac{\dot{V} \cdot \Delta p}{\eta_{tot}} \quad (3.6)$$

Waarbij  $\eta_{ventilator}$  het rendement van de ventilator is. Zo zal men veel meer vermogen aan de as van de motor meten dan dat er vermogen naar de lucht omgezet werd ( $\eta_{ventilator} = \pm 55\%$ ).  $\eta_{motor}$  is dan weer het rendement van de motor zelf, zo zal men door koper- en ijzerverliezen in de motor een bepaald elektrisch vermogen verliezen. Het uit het net opgenomen vermogen is dan iets groter dan het geleverde vermogen aan de as van de motor ( $\eta_{motor} = \pm 95\%$ ).

Het vermogen dat nodig is om de lucht op te warmen/af te koelen kan men berekenen met de formule<sup>6</sup>:

$$P_{kv} = c_{p,lucht} \cdot \rho_{lucht} \cdot \Delta Temp \cdot \dot{V} \quad (3.7)$$

$$= C_{lucht} \cdot \Delta Temp \cdot \dot{V} \quad (3.8)$$

Nu kan men vergelijking 3.2 verder uitwerken:

$$EUR_{ventilator} \geq EUR_{kv} \quad (3.9)$$

$$P_{ventilator} \cdot \Delta h \cdot \frac{EUR}{kWh_{elek}} \geq P_{kv} \cdot \Delta h \cdot \frac{EUR}{kWh_{kv}} \quad (3.10)$$

<sup>6</sup>Waarbij  $_{kv}$  staat voor koelen of verwarmen



$$\frac{\dot{V} \cdot \Delta p}{\eta_{tot}} \cdot \Delta h \cdot \frac{EUR}{kWh_{elek}} \geq C \cdot \dot{V} \cdot \Delta T_{emp} \cdot \Delta h \cdot \frac{EUR}{kWh_{kv}} \quad (3.11)$$

$$\frac{\Delta p}{\eta_{tot}} \cdot \frac{EUR}{kWh_{elek}} \geq C \cdot \Delta T_{emp} \cdot \frac{EUR}{kWh_{kv}} \quad (3.12)$$

In deze vergelijkingen mag men niet vergeten de C.O.P. te integreren in de kostprijs.

Nu gaan we deze vergelijking omschrijven naar een, voor deze toepassing, meetbare eenheid. We zijn geïnteresseerd in een bepaalde buitentemperatuur bij dewelke het klassieke verwarmings- of koelingsysteem en de ventilator van de EAHX evenveel kosten. Deze buitentemperatuur is te vinden in  $\Delta T$ , dit is het verschil tussen buitentemperatuur en gewenste binnentemperatuur.

$$\Delta T \leq \frac{\Delta p \cdot \frac{EUR}{kWh_{elek}}}{\eta_{tot} \cdot C \cdot \frac{EUR}{kWh_{kv}}} \quad (3.13)$$

Om deze vergelijking verder te vereenvoudigen kan men  $\kappa$  gelijkstellen aan de verhouding van de energiekosten:

$$\kappa = \frac{\frac{EUR}{kWh_{elek}}}{\frac{EUR}{kWh_{kv}}} \quad (3.14)$$

Zo wordt 3.13:

$$\Delta T \leq \kappa \cdot \frac{\Delta p}{\eta_{tot} \cdot C} \quad (3.15)$$

Aangezien de binnentemperatuur meestal 21°C (= 293.15K) is kan men dit integreren in 3.15:

$$|T_{buiten} - T_{binnen}| \leq \kappa \cdot \frac{\Delta p}{\eta_{tot} \cdot C} \quad (3.16)$$

$$|T_{buiten} - 293.15K| \leq \kappa \cdot \frac{\Delta p}{\eta_{tot} \cdot C} \quad (3.17)$$

Dit geeft ons een interval waarin de EAHX best uitgeschakeld wordt:

$$293.15K - \kappa \cdot \frac{\Delta p}{\eta_{tot} \cdot C} \leq T_{buiten} \leq \kappa \cdot \frac{\Delta p}{\eta_{tot} \cdot C} + 293.15K \quad (3.18)$$

Dit lijkt (met de huidige energieprijzen<sup>7</sup>) een zeer klein interval te zijn ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ). Men zal de by-pass dan voornamelijk moeten gebruiken in situaties waarin de luchttemperatuur dicht bij de gewenste temperatuur is dan de grondtempe-

<sup>7</sup>gas: 0.0481 €/kWh, elektriciteit: 0.202€/kWh, stookolie: 0.0448€/kWh

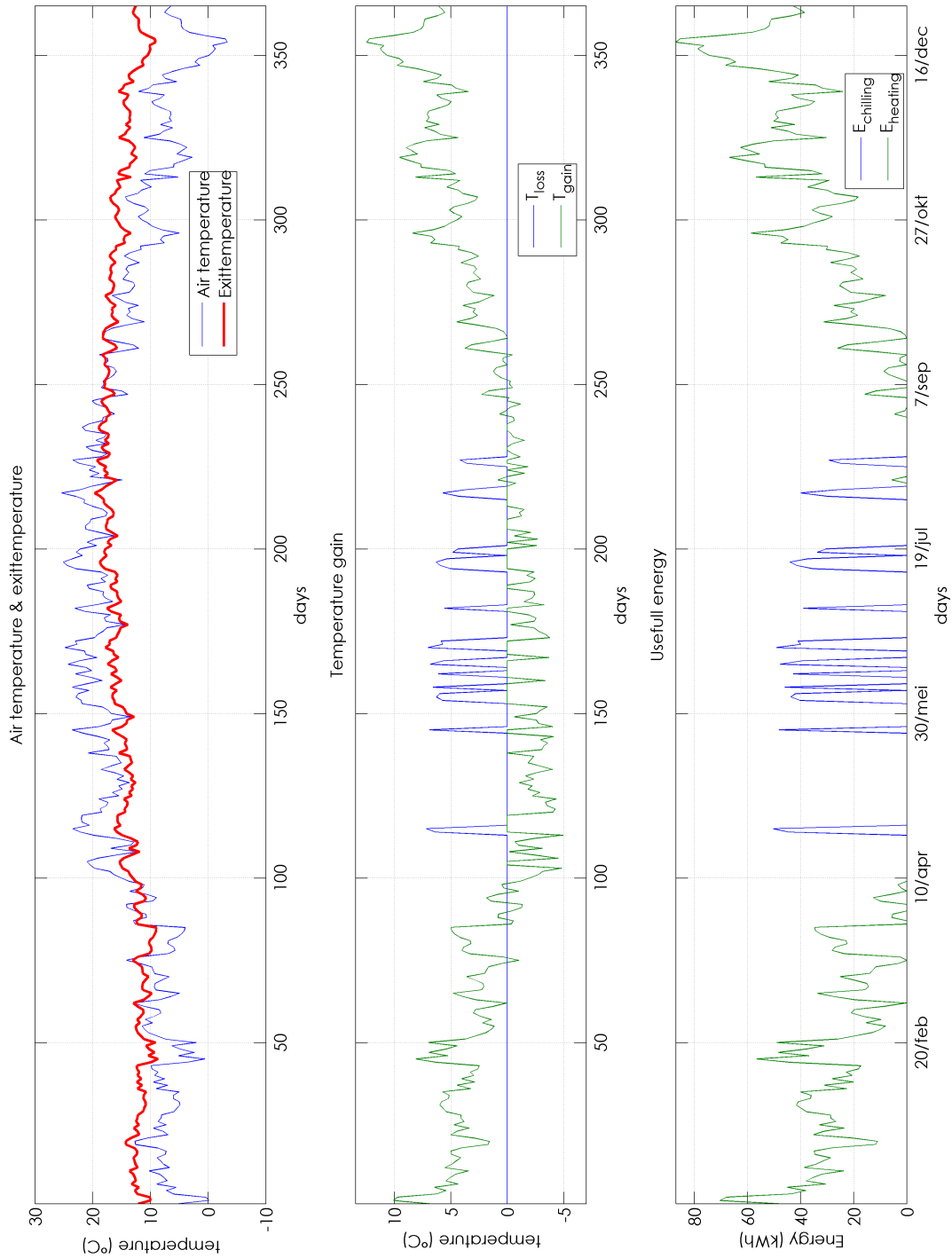
ratuur.

### 3.4.3 De uitgespaarde energie

Voor de berekening van de uitgespaarde energie gaat men op alle dagen waarop de EAHX voor een meerverbruik zorgt de EAHX uitsluiten. Dit kan men vertalen naar het uitsluiten van alle dagen waarop de grondbuis een negatief vermogen heeft. Voor de dagen dat de EAHX een positieve invloed heeft op het verbruik vermenigvuldigt men het uitgewisselde vermogen met het aantal bedrijfsuren  $BU$  ( $\approx$  kantooruren) dat de ventilatievoorziening zal draaien per dag.

```
for i = 1:1:365
    if Qkoel(i) > 0
        Qtotkoel = Qtotkoel + Qkoel(i);
        Qkoel2(i) = Qkoel(i);
        PkoelM(i) = Qkoel(i)*BU;
    else
        Qkoel2(i) = 0;
        PkoelM(i) = 0;
    end
    if Qwarm(i) > 0
        Qtotwarm = Qtotwarm + Qwarm(i);
        Qwarm2(i) = Qwarm(i);
        PwarmM(i) = Qwarm(i)*BU;
    else
        Qwarm2(i) = 0;
        PwarmM(i) = 0;
    end
end
end
```

Als men de grondtemperatuur, dagtemperatuur, uitgangstemperatuur en de hiervan afgeleide temperatuurswinst plot krijgt men de volgende figuur (3.3). De dagen waarop de temperatuurswinst onder 0 gaat in figuur 3.3, zijn dagen waarop de EAHX een tegengestelde werking heeft. Als men deze periodes elimineert is dan weer duidelijk te zien dat de EAHX vooral profijt heeft in de koude en warme momenten van het jaar en dat deze vooral uitgeschakeld zal zijn in de tussenseizoenen.



Figuur 3.3: Dagtemperatuur, uitgangstemperatuur en afgeleide temperatuurswinst/-verlies voor een buis op 3m diepte

## Hoofdstuk 4

# Economisch en Ecologisch

In dit hoofdstuk worden de voordelen, waarvan het bestaan hiervoor al duidelijk werd, weergegeven in getallen. Zo gaat men kijken naar de opbrengst op financieel (in 4.1) en ecologisch gebied (in 4.2). Dit eerste is waarschijnlijk het belangrijkste argument voor de bouwheer om al dan niet over te gaan tot de integratie van een grondbuis. Het ecologische argument is helaas voor een heel aantal bedrijven of bouwheren van minder belang, maar bij toepassing van een EAHX gaan het financiële hand in hand met het ecologische en niet tegenovergesteld zoals bij zoveel *groene* maatregelen.

De berekening van deze economische en ecologische voordelen gebeurt theoretisch op basis van een grondbuis berekend met het berekeningsprogramma en met prijzen die op dit ogenblik gelden. Dat er een verschil is tussen theorie en praktijk, is waarschijnlijk geen nieuw gegeven. Deze correlatie tussen theorie en praktijk zal zo klein mogelijk gemaakt worden door aannames op basis van metingen gebeurd in deze thesis.

### 4.1 Economisch

In deze paragraaf gaat men twee realistische voorbeelden bekijken, een kantoorgebouw en een eengezinswoning. Men bekijkt de installatiekost met de afschrijving en maakt een keuze welke combinatie een economische oplossing zou zijn.

### 4.1.1 Kantoorgebouw

Als beschreven voorbeeld neemt men het gebouw van IDEWE Roeselare<sup>1</sup>. Men gaat de afschrijving bekijken van de installatie hoe deze uitgevoerd is en hoe de berekeningstool dit voorstelt.

De afschrijving van een EAHX kan men eenvoudigweg bepalen door de investeringskost met de opbrengst te vergelijken. Zo kan men een termijn opstellen waarin de investering teruggewonnen zal zijn en de EAHX enkel nog opbrengt. Voor de berekening van het financiële voordeel dat het gebruik van een EAHX brengt worden de waardes aangenomen uit tabel 4.1.

	Stookolie
Gemiddelde verbrandingswaarde(Emis, 2008a)	43.7645 MJ/kg
Massadichtheid(Emis, 2008a)	0.85 kg/l
Energie per eenheid	14.302 kWh/l
Prijs per eenheid(FOD Economie, 2008b)	0.6413 €/l
Prijs per kWh	0.0448 €/kWh
	Aardgas
Gemiddelde verbrandingswaarde(Emis, 2008c)	39.826 MJ/kg
Massadichtheid(Emis, 2008c)	0.808 kg/m <sup>3</sup>
Energie per eenheid	11.063 kWh/m <sup>3</sup>
Prijs per eenheid	0.532 €/m <sup>3</sup>
Prijs per kWh(FOD Economie, 2008c)	0.0481 €/kWh
	Elektriciteit
Prijs per kWh(FOD Economie, 2008a)	0.202 €/kWh

Tabel 4.1: Rekengegevens aardgas, stookolie en elektriciteit

De investeringskost van een EAHX bestaat uit het materiaal van de buis, de aanzuigconstructie en de installatie van dit alles. De installatie van de grondbuis bestaat uit het koppelen van de buiselementen aan elkaar, maar ook met de aanzuigconstructie en het gebouw. Eveneens is het wenselijk dat de EAHX afgesloten kan worden zodat deze economisch teweerk gaat, waardoor er bijkomende by-passklep benodigd is. Een laatste punt zijn de grondwerken nodig voor de plaatsing van de EAHX, deze kosten zijn het laagste indien de grondbuis geplaatst wordt bij nieuwbouw. Indien dit niet het geval is heeft men een extra kost door de heraanleg van het terrein.

De uitgevoerde EAHX wordt in tabel 4.2 vergeleken met 2 andere mogelijke

<sup>1</sup>Een aanzuiging van 6000 m<sup>3</sup>/h door buizen van 40m op een diepte van 2.25m, een ventilatorrendement van 80% en een vochtige zandbodem.

combinaties die werden berekend met de berekeningstool<sup>2&3</sup>. Oplossing A is een oplossing dewelke een logische economische keuze zou zijn voor dit type gebouw, maar dewelke het nadeel heeft van een hoog drukverlies. Dit brengt een hoge elektrische kost en dus een lage C.O.P. met zich mee. Oplossing B daarentegen heeft een zeer goede opbrengst maar helaas een hoge investeringskost.

	Uitgevoerd	Oplossing A	Oplossing B
Aantal buizen	1	2	10
Diameter	Ø800	Ø400	Ø315
Drukverlies	5.5 Pa	87.7 Pa	77.7 Pa
Snelheid	3.32 m/s	6.63 m/s	2.14 m/s
$\epsilon$	35%	58%	77%
Koelenergie	764 kWh	1258 kWh	1676 kWh
Verwarmingsenergie	9277 kWh	15278 kWh	20300 kWh
Opbrengst per jaar	€468	€772	€1028
Ventilatorcost per jaar	€7	€209	€60
Kostprijs materiaal	€6884	€8347	€19959
Kostprijs grondwerken	€1188	€2772	€12028
Kostprijs	€8071	€11119	€31985
Afschrijving	17 jaar	19 jaar	33 jaar

Tabel 4.2: Verschil uitgevoerde grondbuis - berekende grondbuizen

Uit tabel 4.2 blijkt dat de grondbuis die geplaatst werd aan het gebouw een goede terugverdientijd<sup>4</sup> heeft (als de energieprijzen constant zijn). Aangezien men over zulke termijnen spreekt zijn de evoluties van de energieprijzen van een niet verwaarloosbaar belang. De voorspelling van prijsevoluties zelf is een wetenschap op zich, waar men hier niet dieper op in zal gaan. Maar hoogstwaarschijnlijk zullen de prijzen meer dan lineair stijgen door de toenemende vraag en de afname in aanbod<sup>5</sup>.

Om een eenvoudige projectie te maken gaat men uit van een constante stijging van de energieprijzen. Uit gegevens van de afgelopen jaren blijkt dat er een stijging van 3.2% per kWh gas en 2.2% per kWh elektriciteit (FOD Economie, 2008a) per jaar was. Als men deze lijn in de toekomst verder trekt krijgt een

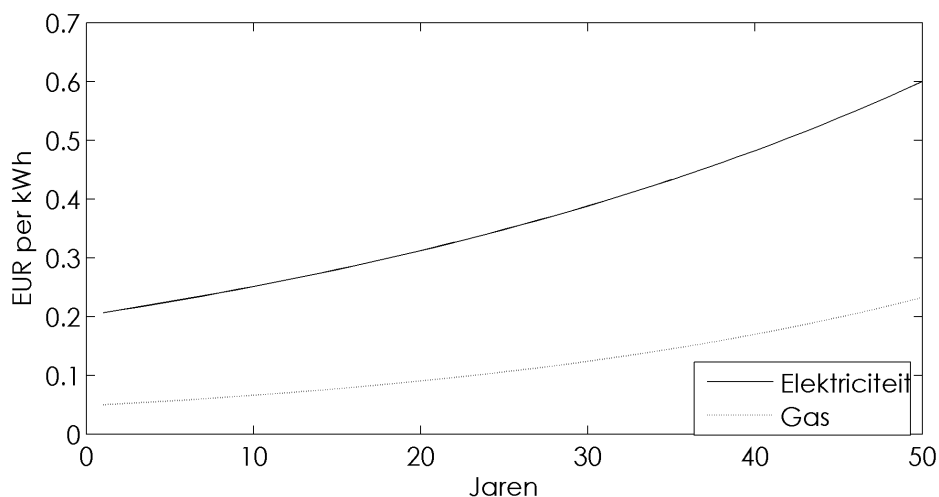
<sup>2</sup>Grondwerken gebeuren aan 11 EUR/m<sup>3</sup>.

<sup>3</sup>De kostprijs werd vereenvoudigd tot enkel de buizen en collectoren uit (REHAU AG, 2007).

<sup>4</sup>Hierbij berekent men de kost van de ventilator op volgende manier:  $\frac{\dot{V} \cdot \Delta p}{\eta}$  . bedrijfsuren/dag . 365 . €/kWh

<sup>5</sup>Er wordt geschat dat over respectievelijk 40 en 61 jaar de economisch aanboorbare olie- en aardgasreserves uitgeput zullen zijn (World Resources Institute, 1994).

prijsverloop als in figuur 4.1.



Figuur 4.1: Evolutie van de energieprijzen op basis van het verleden

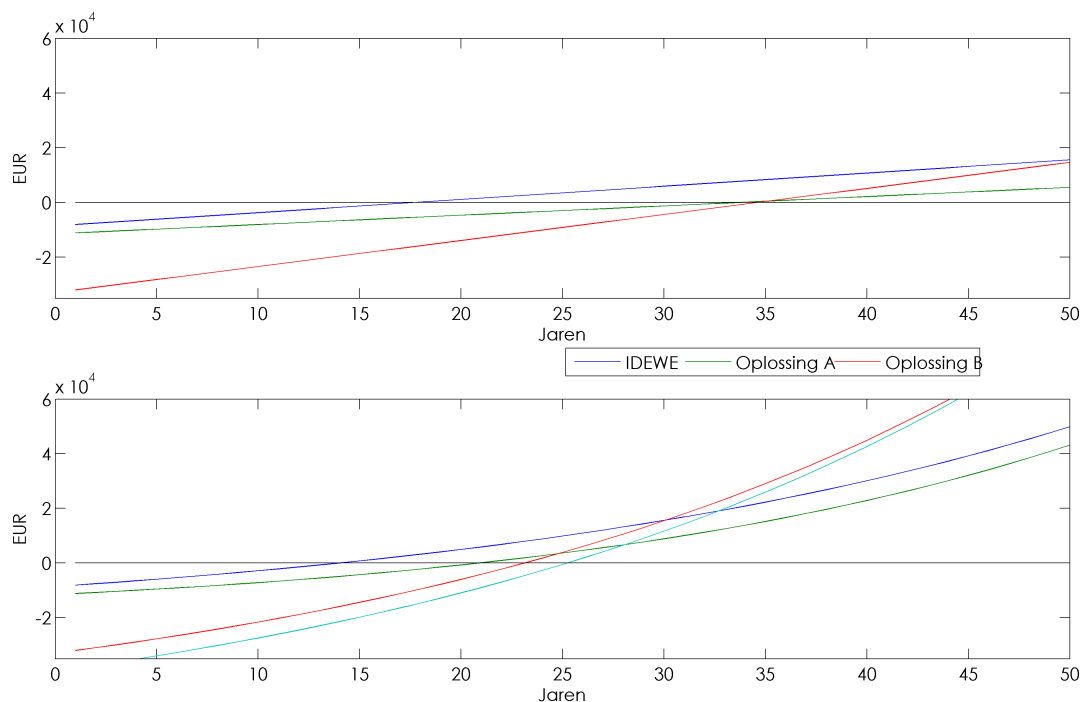
De tijdspanne waarin de EAHX zich terugverdient, rekening houdend met de prijsevoluties, bedraagt dan respectievelijk 14, 15 en 23 jaar. Natuurlijk is de winst bij de oplossing B nadat deze afgeschreven is vele malen groter. Dit kan men zien in tabel 4.3 en figuur 4.2.

	Uitgevoerd	Oplossing A	Oplossing B
20 jaar	€4980	€-683	€-5959
30 jaar	€15681	€8897	€15500
40 jaar	€30114	€22901	€44958
50 jaar	€49876	€43180	€85392

Tabel 4.3: Financiële voordeel op lange termijn bij veranderlijke prijzen

Bij de keuze van een EAHX is het dus ook belangrijk te weten hoeveel jaar de bestaande installatie en bestemming van het gebouw behouden blijven. Op korte termijn is de geïnstalleerde grondbuis zeker een goede investering, op langere termijn moet hij zijn duurdere collega's laten voorbijgaan. In dit voorbeeld is het van weinig belang welke combinatie men gekozen heeft als het gebouw na 30 jaar van bestemming verandert waardoor de huidige ventilatie-installatie niet meer voldoende is.

Bouwtechnisch wordt de levensduur van een kantoorgebouw (waarover men hier spreekt) geschat op 50 á 55 jaar (Matthieu Zuidema, 2006). In dit geval opteert men best (als men naar de evoluerende prijzen kijkt) voor een EAHX met



Figuur 4.2: Afschrijving van een EAHX in een kantoorgebouw. Boven: zonder prijsverandering. Onder: met lineaire prijsverandering.

een grotere efficiëntie. Als men de uit dit voorbeeld efficiëntste grondbuis (Oplossing B) had gekozen in plaats van de geïnstalleerde, had de eigenaar van het gebouw op het einde van de kantoorlevensduur zo'n €39000 méér uitgespaard<sup>6</sup>. Als deze eigenaar nadien een gelijkaardig (maar moderner) gebouw plaatst en daar voor €39000 investeert in een EAHX<sup>7</sup> zal deze na 50 jaar nogmaals zoveel of meer uitgespaard hebben. Wat men niet uit het oog mag verliezen is dat buiten al deze financiële voordelen er ook een groot ecologisch voordeel ontstaat, wat men in het volgende hoofdstuk 4.2 bespreekt.

#### 4.1.2 Eengezinswoning

Bij eengezinswoningen komt ook meer en meer ventilatie kijken. Met de EPB-regeling is het nodig voor een bepaalde ventilatie te zorgen. Dit kan via verschillende systemen, aangehaald in 2.1. Voorlopig wordt nog veel het systeem

<sup>6</sup>Al moet men zeer voorzichtig zijn met deze algemene prijsevoluties over een periode van die duur toe te passen.

<sup>7</sup>12 Ø315 met  $\varepsilon = 80\%$ , die €1003 opbrengen per jaar (met huidige prijzen en zelfde ventilatie- en bodemgegevens).



A toegepast, maar eens ventilatie in de woningbouw ingeburgerd geraakt, zal men ook meer met mechanische types gaan werken. Bij lage-energie huizen of passief-huizen maakt men sowieso gebruik van een systeem D, omdat men dan met een warmtewisselaar de warmte van de uitgeblazen lucht recupereert. Een EAHX gaat enkel bij systeem B of D. Hier wordt een standaard woning besproken van  $\pm 110 \text{ m}^2$  wat dus een ventilatiedebiet  $\dot{V}$  van  $400 \text{ m}^3/\text{h}$  geeft. Men veronderstelt dat de buizen van 30 m in een vochtige leembodem ( $\alpha = 6.02 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ) op 2.5m diepte liggen.

Het resultaat is te zien in tabel 4.4:

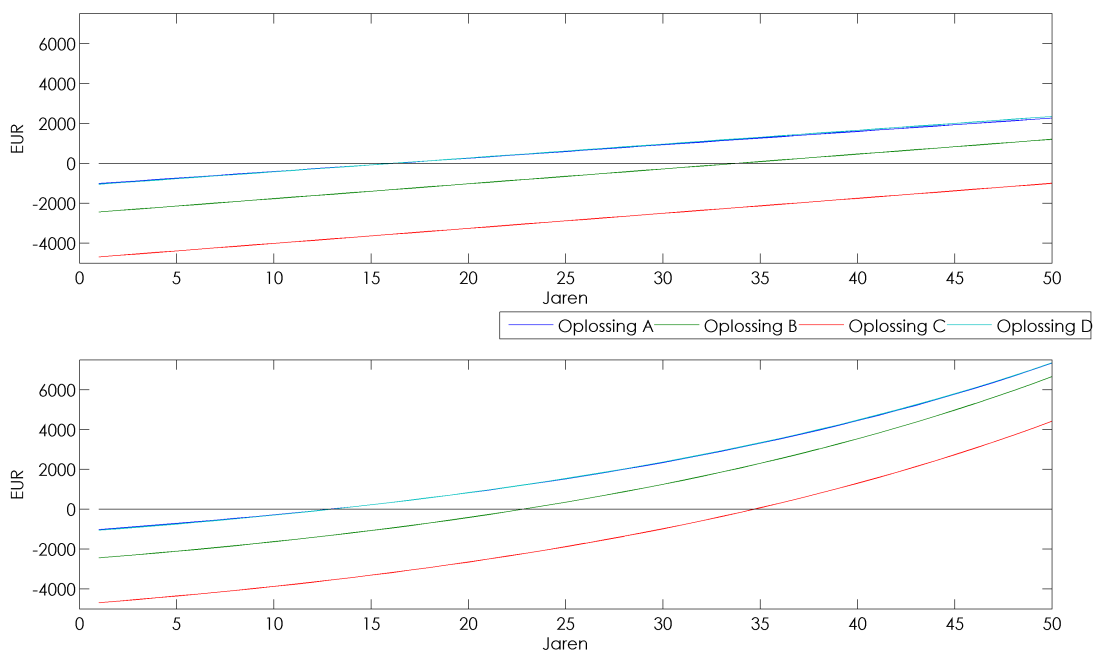
	Oplossing A	Oplossing B	Oplossing C	Oplossing D
Aantal buizen	1	2	3	1
Diameter	Ø150	Ø150	Ø150	Ø200
Drukverlies	98 Pa	57.5 Pa	25.7 Pa	24.8 Pa
Snelheid	6.29 m/s	3.14 m/s	1.57 m/s	3.54 m/s
$\epsilon$	89%	92%	89%	82%
Koelenergie	89 kWh	93 kWh	90 kWh	83 kWh
Verwarmingsenergie	1483 kWh	1542 kWh	1494 kWh	1380 kWh
Opbrengst per jaar	€74	€77	€75	€69
Ventilatorcost per jaar	€4.5	€2.6	€1	€1
Kostprijs materiaal	€600	€1200	€1800	€635
Kostprijs grondwerken	€412	€1237	€2888	€412
Kostprijs	€1012	€2437	€4688	€1047
Afschrijving	14 jaar	33 jaar	62 jaar	15 jaar

Tabel 4.4: Berekende grondbuizen eengezinswoning

Weeral moet men opmerken dat deze afschrijvingsperiode met constante prijzen werd berekend. Mutatis mutandis 4.1.1 kan men figuur 4.3 genereren. Hieruit kan men aflezen dat de afschrijvingstermijnen dan respectievelijk 12.5 jaar, 23 jaar, 35 jaar en 13 jaar bedragen bij een constante prijsstijging.

Rekening houdend met de levensduur van een eengezinswoning, of nog meer de tijd dat een persoon in dat huis blijft ( $\pm 55$  jaar), opteert men hier best voor een oplossing met één buis, daar deze een beperkt grondverzet vereisen. Na 35 jaar heeft oplossing A voor een besparing van €3444 gezorgd wat geen betere investering is dan een gewone financiële investering over die termijn. Hier werd dus voornamelijk een uitstootbesparing gerealiseerd.

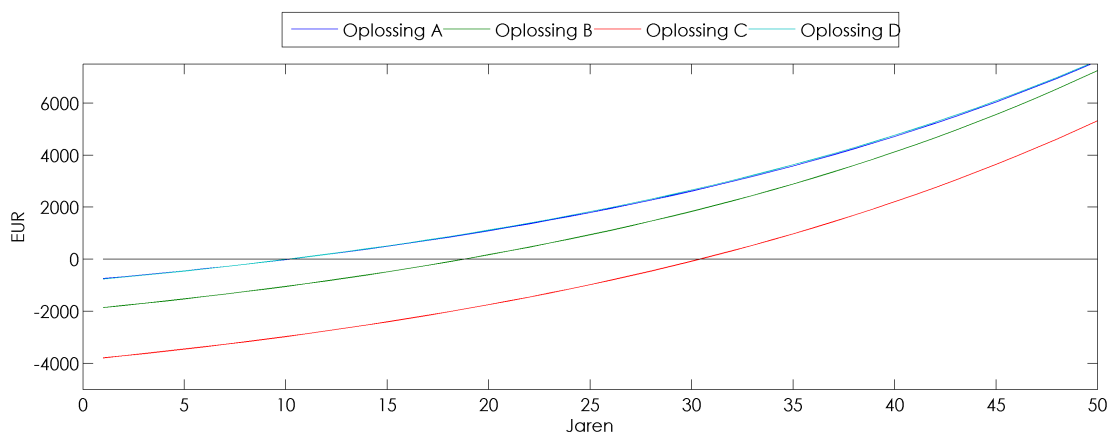
Alternatieve oplossing voor het plaatsen van een EAHX is geen gebruik te maken van de anti-bacteriële PP buizen, maar te kiezen voor normale PP buizen



Figuur 4.3: Afschrijving van een EAHX in een eengezinswoning. Boven: zonder prijsverandering. Onder: met lineaire prijsverandering.

(dewelke  $\pm 50\%$  goedkoper zijn dan anti-bacteriële buizen) en een antibacteriële filter ( $\pm \text{€}50$ ) te plaatsen op de plaats waar de verdere luchtbehandeling plaatsheeft. Op deze manier is het wel mogelijk een grondbuis in een eengezinswoning financieel haalbaar te maken, zie figuur 4.4. De periode waarop de grondbuis dan afgeschreven is bedraagt dan respectievelijk 10 jaar, 19 jaar, 30 jaar en 10.5 jaar. Men moet wel onderzoeken of deze manier eenzelfde kwaliteit van lucht kan leveren.

Een opmerking die eveneens bij de kantoorgebouwen gemaakt kan worden is dat de bedragen van de grondwerken geëlimineerd of ten minste verminderd kunnen worden doordat bij nieuwbouw men een EAHX kan leggen onder het kelderniveau. De meerkost benodigd voor deze nog kleine uitgraving is dan zeer miniem. Hierbij moet men wel opletten dat de krachten voldoende ver van de buizen worden afgedragen (geen buis in de invloedzone van een funderingsstrook), zodat deze niet bezwijken door overbelasting.



Figuur 4.4: Alternatieve afschrijving van een EAHX in een eengezinswoning met lineaire prijsverandering.

## 4.2 Ecologisch voordeel

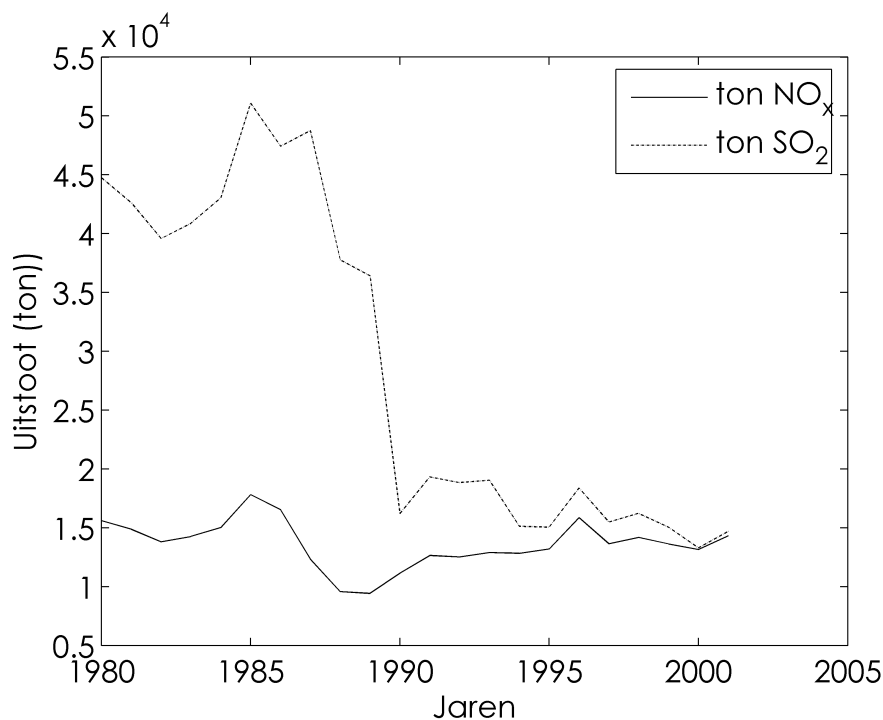
Een besparing van stookkosten betekent natuurlijk ook een kleinere uitstoot van verbrandingsgassen. Zo komt er bij de verbranding van aardgas  $\text{CO}_2$  en  $\text{N}_2$  vrij, bij stookolie komt daar nog eens  $\text{SO}_2$  bij. Verdere oxidatie van dit laatste vormt (in de nabijheid van een katalysator zoals vb  $\text{NO}_2$ )  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , wat zorgt voor zure regen. De uitstoot van  $\text{SO}_2$  is zeer sterk gedaald de laatste jaren door ontzwaveling van de stookolie.

	%	$\text{m}^3$ per $\text{m}^3$ aardgas	kg per $\text{m}^3$ aardgas
$\text{CO}_2$	12	1.3116	2.6
$\text{N}_2$	88	9.6184	12.0
	%	$\text{m}^3$ per $\ell$ stookolie	kg per $\ell$ stookolie
$\text{CO}_2$	12.4	1.2626	2.5
$\text{N}_2$	87.6	8.9203	11.15
$\text{SO}_2$	0.02	0.0020	$5.19 \cdot 10^{-3}$

Tabel 4.5: Samenstelling verbrandingsgassen (Dittmann, 2004)

$\text{CO}_2$  en  $\text{N}_2$  zijn geen atmosfeer-vreemde stoffen, maar dat een teveel aan  $\text{CO}_2$  een invloed heeft op het klimaat is al meermaals bewezen. Dat hier, door het gebruik van een EAHX, een vermindering optreedt is dus goed nieuws. De uitstoot van  $\text{N}_2$  heeft geen rechtstreekse gevolgen daar de atmosfeer voor 78% uit  $\text{N}_2$  bestaat.

Het probleem bij  $\text{N}_2$  is dat het bij verbranding, en de daarbijhorende hoge



Figuur 4.5: Evolutie van de SO<sub>2</sub>- en NO<sub>x</sub>-emissies door gebouwenverwarming in Vlaanderen (Emis, 2008b).

temperaturen, kan overgaan in een NO<sub>x</sub><sup>8</sup>. De belangrijkste aantastingen die NO<sub>x</sub>'en kunnen aanrichten worden hier overlopen:

- NO<sub>x</sub>'en ontstaan op volgende manier:  

$$N_2 + O_2 \rightarrow 2NO$$

$$2NO + O_2 \rightarrow 2NO_2$$
 Bij 1500°C levert dit 0,3% NO op, bij 1930°C 1% en bij 2300°C 2%.
- Vormen van salpeterzuur en salpeterigzuur, welke oorzaken zijn van zure regen:  

$$2NO_2 + H_2O \rightarrow HNO_3 + HNO_2$$
- Aantasten van de ozonlaag in de stratosfeer. Deze reactie vergroot eveneens het broeikas effect, daar NO<sub>2</sub> 294 de broeikaswerking van CO<sub>2</sub> heeft:  

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$$
- Als deze reactie kort bij het aardoppervlak gebeurt ontstaat er smog:  

$$NO_2 + O_2 \rightarrow NO + O_3$$

<sup>8</sup>De term NO<sub>x</sub> is een verzamelnaam voor stikstofoxiden die wel schadelijk zijn. Hier spreekt men over de mono-stikstofoxiden NO<sub>2</sub> en NO.

De hoeveelheid  $\text{NO}_x$ 'en die uitgestoot worden door een stookinstallatie hangen af van zeer veel factoren (vb: temperatuur, constructie van de brander, ...). Richtwaarden voor HR-gasketels zijn  $\pm 0.40 \text{ g/m}^3$  aardgas (Abbringh, 1989).

## Hoofdstuk 5

# Metingen

### 5.1 IDEWE

In dit deel wordt het kantoorgebouw en de gemeten temperaturen van IDEWE/IBEVE Roeselare besproken. IDEWE is een externe dienst voor preventie en bescherming op het werk, IBEVE is het Instituut voor Bedrijfsveiligheid. De instelling is met zijn 400 medewerkers de grootste in België. Hier zal het kantoor in Roeselare besproken worden.

ArchitectenStudio uit Sint-Niklaas ontwierp het gebouw voor IDEWE en Ingenieursbureau Stockman uit Gent maakte de studie van de technische installaties. Het gebouw bestaat uit  $\pm 1200 \text{ m}^2$  welke over een kelder, een gelijkvloers en 2 verdiepingen verdeeld is. Vanaf het ontwerp hield men rekening met energiezuinigheid van het gebouw. Denk maar aan de afscherming van de beglazing van de bovenste verdieping door het dak.

De hygiëneventilatie gebeurt door middel van een luchtbehandelingskast met energierecuperatie, dewelke in de technische ruimte in de kelder opgesteld is. De aanzuiging van  $6000 \text{ m}^3/\text{h}$  gebeurt via een kunststoffen grondbuis (REHAU AWADUKT Thermo) met lengte van  $\pm 40 \text{ m}$  en  $\text{Ø}800 \text{ mm}$ . De grondbuis sluit aan op de kelderwand (waarin de luchtbehandelingskast zich bevindt) via een PP buisstuk dat mee ingegoten is in de betonnen kelderwand. De luchtgroep zelf bevat een warmtewiel om warmte en vocht te recupereren uit de bedorven lucht. De hygiënelucht wordt door middel van een stoombevochtiger bevochtigd. De verdeling van de hygiënische lucht gebeurt via de hoofdschacht en via kanalen naar de pulsieroosters.

De volledige HVAC-installatie (verwarming en koeling) heeft een prijskaartje



Figuur 5.1: Buitenaanzicht gebouw IDEWE Roeselare

van €300000, waarvan €15500 (5.2%) voor de grondbuis.

De metingen zijn begonnen op 7 februari 2008 om 12u00 en gestopt op 25 maart 2008 om 10u15. De zes loggers werden op de volgende plaatsen geplaatst:

- Voor de grondbuis, aan de aanzuigvoorziening
- Na de grondbuis, juist bij het binnenkomen van de luchtbehandelingskast
- Na het warmtewiel in de luchtbehandelingskast
- Op elke verdieping van het gebouw in een lokaal

Op deze manier kan men het effect van de grondbuis (verschil tussen meetsonde 1 en 2) en van het warmtewiel (verschil tussen meetsonde 2 en 3) bepalen. De andere loggers werden geplaatst met de bedoeling om de temperatuurevolutie in het gebouw te analyseren. Ze geven ons ook de kans om te zoeken of er een relatie is tussen buiten- en binnenklimaat.





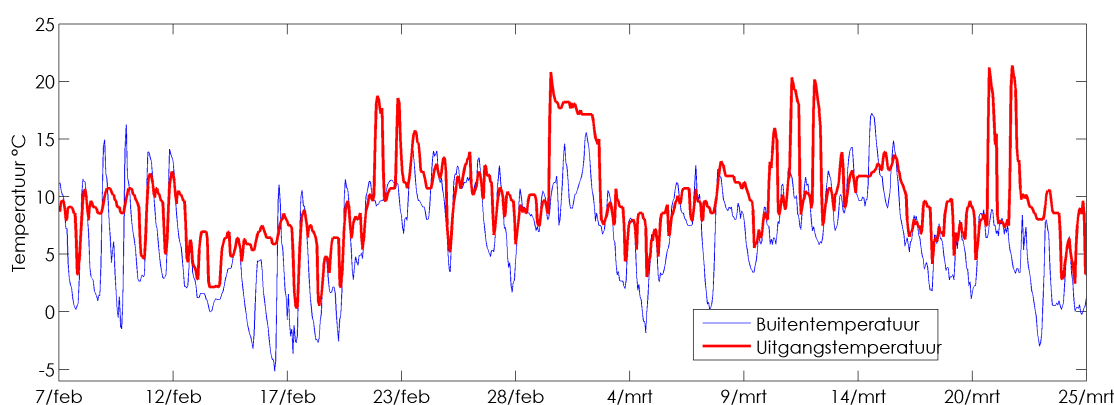
### 5.1.1 Resultaten

Het resultaat van deze metingen is op zijn minst zeer goed te noemen. De uitgangstemperatuur is hoofdzakelijk korter bij de gewenste temperatuur, wat een positief effect heeft op het verbruik van de installatie. De pieken in de uitgangstemperatuur in figuur 5.5 zijn echter onverklaarbaar. Deze kunnen niet geïnduceerd zijn door de buitentemperatuur daar deze niet zo hoog piekt. De oorzaak kan gezocht worden bij interne (in de luchtbehandelingskast) warmtestromen (vb onderhoudswerken).

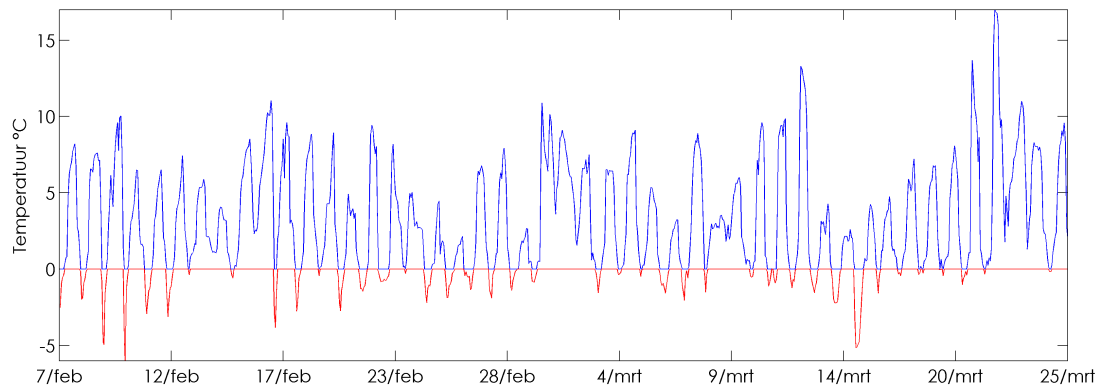
Als men dan het totaal aan energiewinst (door formule 2.10 toe te passen) uitrekent, bekomt men 6210 kWh waarin geen rekening gehouden werd met de pieken. Als men de pieken (boven 13°C) afvlakt op 9°C, bekomt men nog een energiewinst van 4830 kWh. Dit kan men omzetten naar een besparing van  $(4830 \text{ kWh} / 11.063 \text{ kWh/m}^3 =) 437 \text{ m}^3$  of  $(4830 \text{ kWh} \cdot 0.0481 \text{ EUR/kWh} =) \pm\text{€}230$ . Procentueel kan men een vermindering van 13.7% tellen, als men weet dat de energie benodigd voor de verwarming van de ventilatielucht zonder EAHX 35180 kWh bedraagt.

Het ecologische voordeel bedraagt 573.17 m<sup>3</sup> CO<sub>2</sub> en 4203.42 m<sup>3</sup> N<sub>2</sub>, wat overeenkomt met resp. 1.13 ton CO<sub>2</sub> en 5.26 ton N<sub>2</sub>.

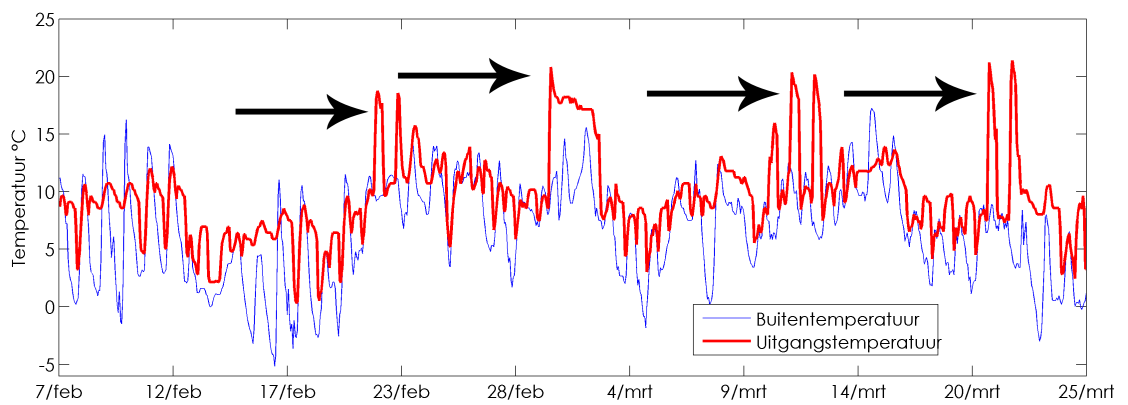
Het warmtewiel in de installatie zorgde voor een besparing van 8060 kWh, ofwel 22.9%.



Figuur 5.3: Resultaten IDEWE Roeselare.

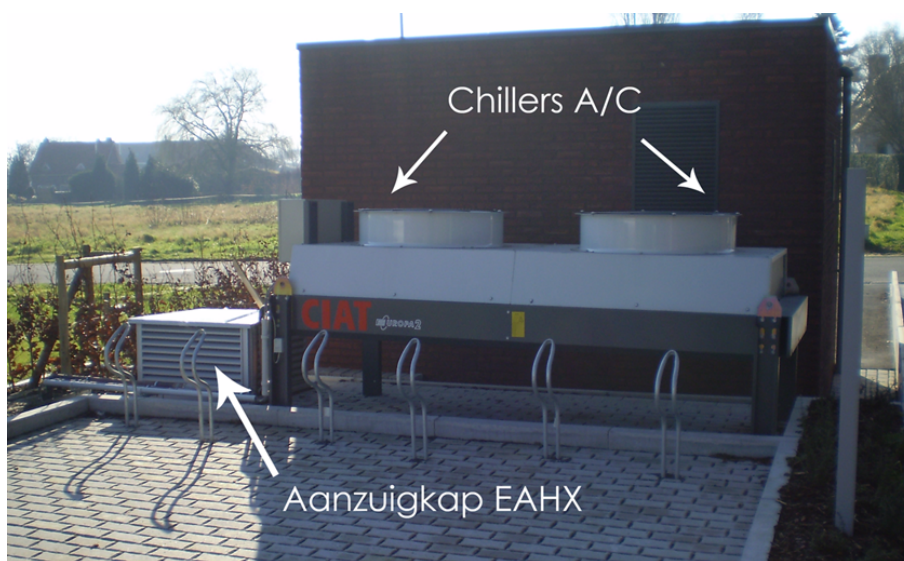


Figuur 5.4: Verschil tussen buitentemperatuur en uittredetemperatuur IDEWE



Figuur 5.5: Onregelmatigheden in de temperatuur op IDEWE Roeselare

Een opmerking die gemaakt moet worden over de constructie bij IDEWE is dat de aanzuigkap van de grondbuis niet optimaal geplaatst was. Nu staat deze aanzuigkap (zie figuur 5.6) kort bij de chillers, wat een keuze was van de architect om alle technische onderdelen te groeperen. Tijdens de zomerperiode zullen deze de onttrokken warmte van het gebouw afgeven aan de omgevingslucht, deze extra warme omgevingslucht zal de EAHX weer opzuigen, wat geen ideale situatie is. Hierbij mag men niet vergeten dat chillers hun warmte naar boven afgeven, dus de invloed toch beperkt blijft.



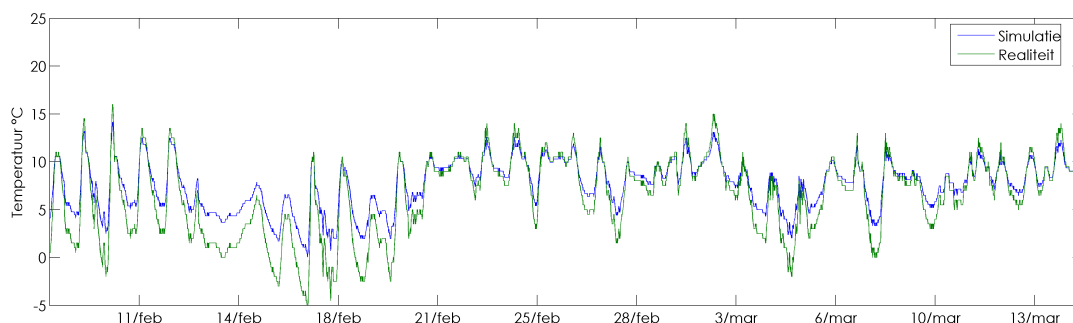
Figuur 5.6: Plaatsing aanzuigkap IDEWE

### 5.1.2 Verschil simulatie - realiteit

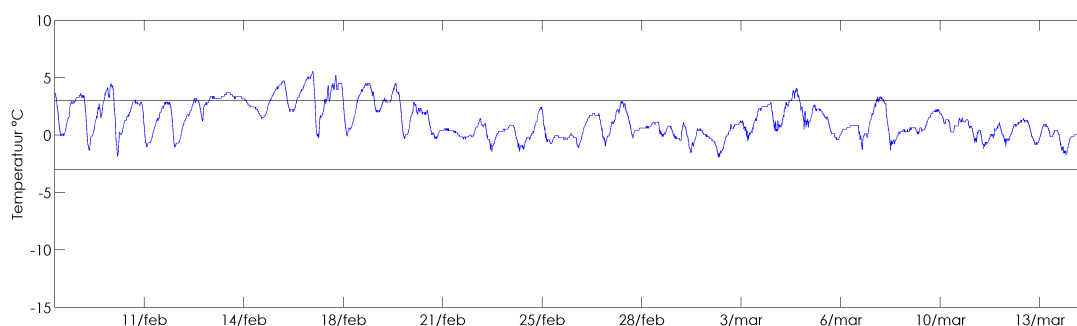
Natuurlijk is men geïnteresseerd in hoe correct de berekeningstool de temperatuurswinst inschat. Hiervoor maakte de berekeningstool een simulatie van de periode waarop gemeten werd met de buitentemperatuurgegevens verkregen uit de meting. Deze werden dan samen met de reële uittredetemperaturen in een grafiek gestoken waarvan het resultaat zichtbaar is in figuur 5.7.

Men kan opmerken dat er toch een zeer grote gelijkens in verloop, doch kan men stellen dat er een verschil is in amplitude: de gesimuleerde grondbuis zal grote temperatuurvariaties beter dempen. Deze afwijking is een logisch gevolg van de onbekendheid van de bodem en het freatisch oppervlak<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>De gesimuleerde temperatuur werd met  $\alpha = 2.0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  gegenereerd. De sonderingen (Databank Ondergrond Vlaanderen, 2008) duiden leemachtig zand aan als laag tussen 2m en 3m.



Figuur 5.7: IDEWE Roeselare: Resultaten simulatie en metingen



Figuur 5.8: IDEWE Roeselare: Verschil simulatie - realiteit

Als men het verschil tussen realiteit en simulatie maakt en weergeeft in functie van de tijd krijgt men figuur 5.8. De afwijking blijft binnen de perken (horizontalen op  $3^{\circ}\text{C}$  en  $-3^{\circ}\text{C}$ ), wat toelaat om te stellen dat het programma een realistische schatting geeft.

### 5.1.3 Apparatuur

De temperatuur op de ventilatie-installatie van IDEWE Roeselare werd gemeten door *Lascar Electronics EasyLog USB-2* loggers. Deze apparaten kunnen de relatieve vochtigheid en temperatuur meten. De apparatuur is ingesteld om elke 5 minuten waarden op te slaan voor deze veranderlijken. Dit stelt de apparatuur in staat om 56 dagen te meten voordat het interne geheugen vol zit. De afwijkingen van de logger zijn weergegeven in figuur 5.9.

Specification		Min.	Typ.	Max.	Unit
Relative Humidity	Measurement range	0		100	%RH
	Repeatability (short term)		$\pm 0.2$		%RH
	Accuracy (overall error) (20-80%RH)		$\pm 3.5^{**}$		%RH
	Response time		5		sec
	Long term stability		1		%RH/Yr
Temperature	Measurement range	-35 (-31)		+80 (176)	$^{\circ}\text{C}$ ( $^{\circ}\text{F}$ )
	Repeatability		$\pm 0.2$ ( $\pm 0.4$ )		$^{\circ}\text{C}$ ( $^{\circ}\text{F}$ )
	Accuracy (overall error)		$\pm 1$ ( $\pm 2$ )	$\pm 2.5$ ( $\pm 5$ )	$^{\circ}\text{C}$ ( $^{\circ}\text{F}$ )
	Response time		20		sec
Dew Point	Accuracy (overall error) (25 $^{\circ}\text{C}$ , 40-100%RH)		$\pm 2$ ( $\pm 4$ ) <sup>***</sup>		$^{\circ}\text{C}$ ( $^{\circ}\text{F}$ )
Logging rate		every 10s		every 12hr	-
Operating temperature range		-35 (-31)		+80 (176)	$^{\circ}\text{C}$ ( $^{\circ}\text{F}$ )
1/2AA 3.6V Lithium Battery Life*			1		Year

\* Depending on sample rate, ambient temperature and use of alarm LEDs

\*\* This specifies the overall error in the logged readings, for relative humidity measurements between 20 and 80%RH.

\*\*\* This specifies the overall error in the calculated dew point, for relative humidity measurements between 40 and 100%RH at 25 $^{\circ}\text{C}$ .

Figuur 5.9: Overzicht van het meetbereik en fouten van de meetapparatuur (Lascar Electronics, 2006)

## 5.2 Volvo Trucks

Om de ambitieuze doelstelling van Volvo als eerste Belgische CO<sub>2</sub>-neutrale fabriek te kunnen vervullen, werd gekozen om het nieuwe kantoorgebouw te laten voldoen aan de eisen van een 'passief' gebouw. Door het ontwerp van het gebouw en zijn bijhorende installaties te richten naar een minimale energiebehoefte, kan de resterende energiebehoefte met inzet van duurzame en hernieuwbare energietechnieken quasi gratis ingevuld worden. Door gebruik van simulaties werden o.a. het thermisch en het visueel comfort geoptimaliseerd. Het project maakt deel uit van het totaalproject "Volvo-owned bedrijfsterrein". Resultaat is een gebouw met E-peil E30 en K-peil K10 (wettelijk minimum: E100 en K45)

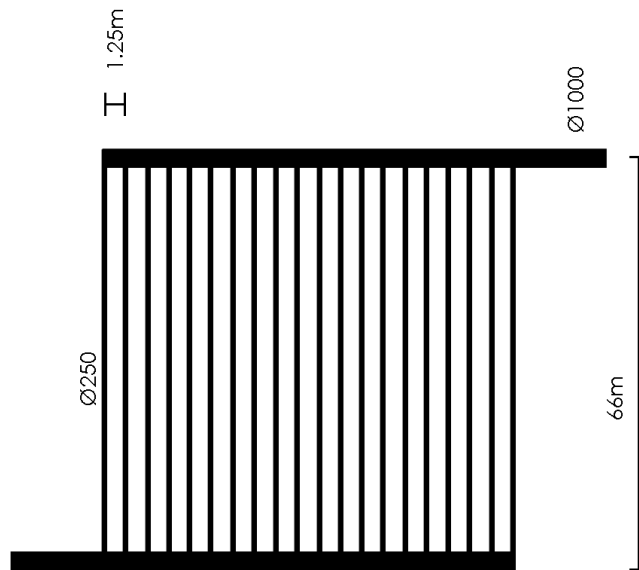
Technische informatie: compact gebouw ( $C=2,7$ ), NZ-oriëntatie, superisolatie ( $U_{max}=0,15$  W/m<sup>2</sup>K), driedubbele beglazing ( $U=0,5$  W/m<sup>2</sup>K), luchtdichte bouwschil ( $n=0,6/h$ ), buitenzonnewering ( $f=0,2$ ). Verder werd er voldoende thermische massa aan het gebouw gegeven door bijvoorbeeld gebruik te maken van een groendak.

Het gebouw bestaat 2 bouwlagen van 60m x 20m, met daaronder een kelder waar een archiefruimte en een technisch lokaal voorzien zijn. De voorziene bezetting van het kantoorgebouw is  $\pm 100$  mensen. De hygiënische ventilatie van 7000 m<sup>3</sup>/h wordt aangezogen door een buis  $\varnothing 1000$  die de lucht onderverdeelt in 20 buizen van  $\varnothing 250$ , waarna deze weer samenkomen in één buis  $\varnothing 1000$ . De buizen van  $\varnothing 250$  liggen 1.25m uit elkaar op een diepte van 1.75m en zijn 66m lang (zie figuur 5.10 en figuur 2.2b).

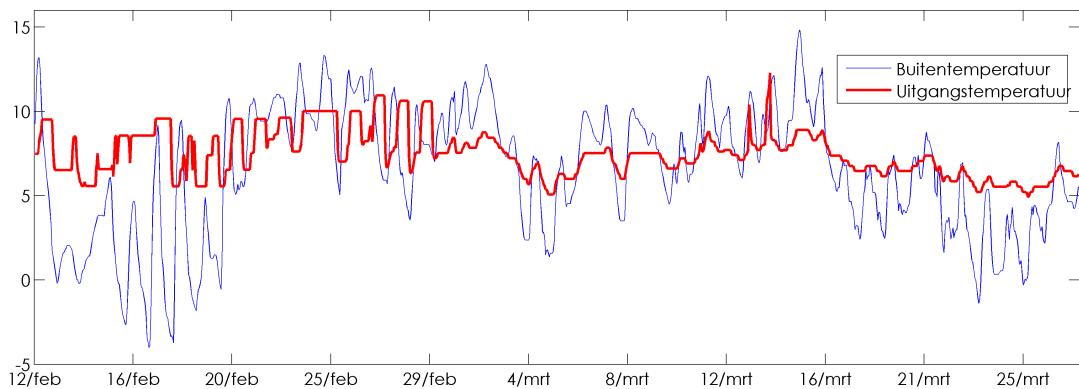
### 5.2.1 Resultaten

Een opmerking die gemaakt moet worden bij de resultaten weergegeven in figuren 5.11 en 5.12, is dat deze resultaten van kort na de indienststelling zijn. Tijdens deze fase werden nog enkele manuele testen uitgevoerd, en dit tot 29/feb.

Ondanks dit kan men toch duidelijk zien dat de uitgangstemperatuur duidelijk hoger is dan de buitentemperatuur in de periodes 12/feb - 20/feb en 16/mrt - 27/mrt. Tijdens de periode 29/feb - 4/mrt was het nefast voor het verbruik van de HVAC-installatie dat de EAHX ingeschakeld was. In deze periodes heeft men dus besloten de lucht door de EAHX te laten aanzuigen, wat een extra elektrische kost gaf, om de lucht af te koelen terwijl deze verwarmd moest worden. In zulke situaties wordt de EAHX beter uitgeschakeld.



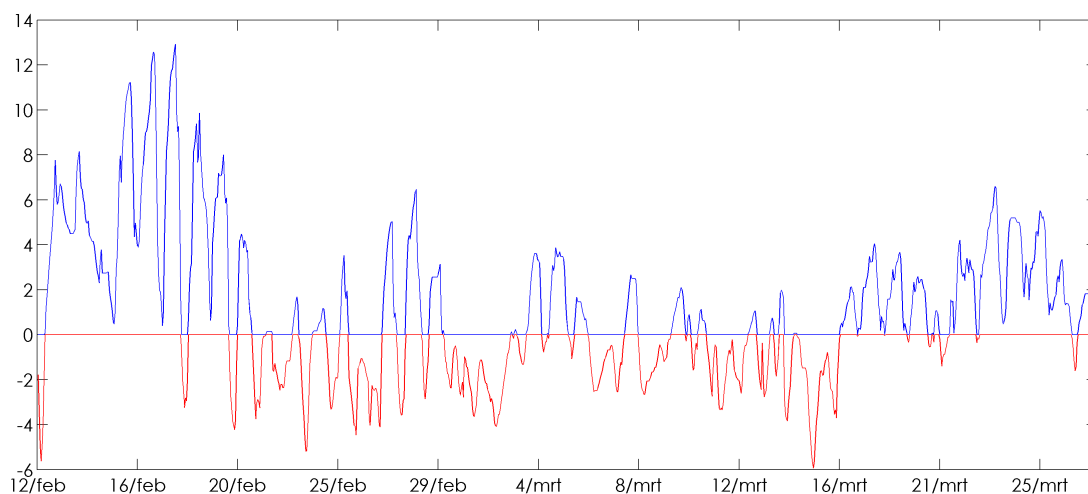
Figuur 5.10: Opstelling EAHX Volvo Trucks Oostakker



Figuur 5.11: Resultaten Volvo Trucks Oostakker

Analoog aan 5.1.1 kan men het totaal aan energiewinst uitrekenen. De energiebesparing door de EAHX bedraagt 4764 kWh op een verbruik van 37735 kWh zonder EAHX, wat overeenkomt met 12.62 %. De EAHX zorgt dus voor een besparing van 430 m<sup>3</sup> wat met de huidige prijzen  $\pm$ €230 betekent.

Deze resultaten liggen kort bij die van de installatie in Roeselare, terwijl deze, theoretisch gezien, toch een beter resultaat moeten leveren door de vele malen grotere oppervlakte van de EAHX. De uitleg hiervoor heb ik reeds aangehaald en wordt bevestigd door de gebouwbeheerder: deze gegevens zijn

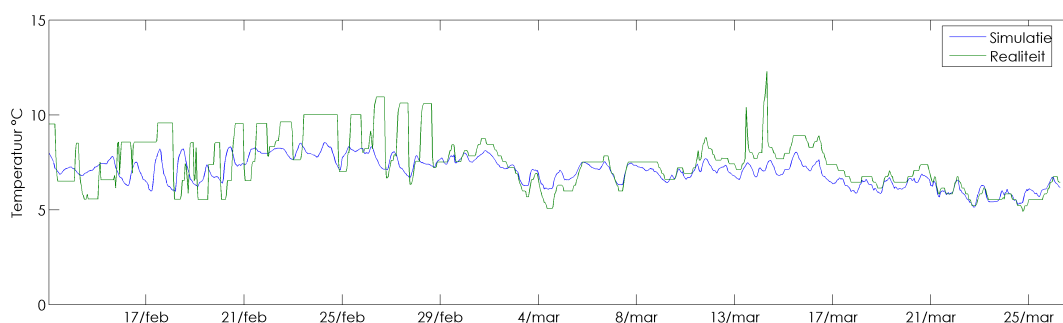


Figuur 5.12: Temperatuurswinst EAHX Volvo Trucks Oostakker

nog maar van juist na de ingebruikname. Het gebouwbeheersysteem heeft nog enkele kinderziekten die oplost moeten worden. Een andere uitleg die gegeven kan worden is de bodemsoort. Bij de berekening en dimensionering door de fabrikant werd een bodem met  $\alpha = 10.45 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  gegeven, wat een grote penetratiediepte impliceert (3.23m). Als deze bodem inderdaad deze eigenschappen heeft, liggen de warmte-opnemende buizen veel te ondiep (1.75m). Deze zouden dubbel zo diep moeten liggen!

### 5.2.2 Verschil simulatie - realiteit

Analoog aan de metingen op de installatie van IDEWE Roeselare, kan men hier ook het verschil tussen simulatie en realiteit tonen.

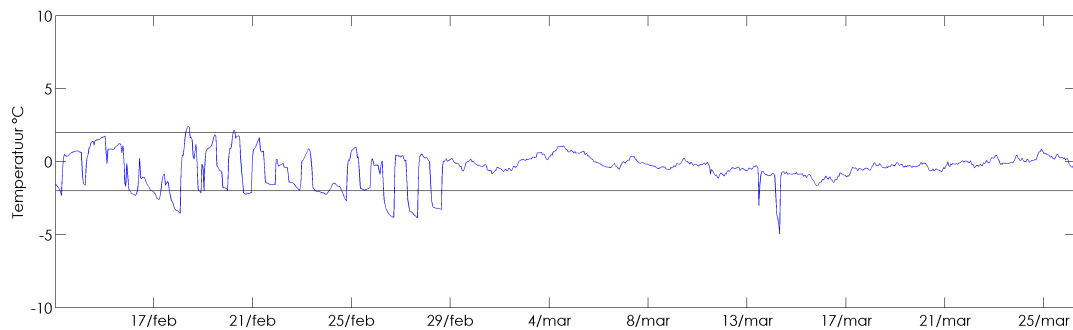


Figuur 5.13: Volvo Oostakker: Resultaten simulatie en metingen

Hier zijn de resultaten nog beter, toch als men na 29/feb kijkt. Na deze datum



werd het gebouw gebruikt en draait de grondbuis 24/7. Ook kan men, na vergelijking met figuur 5.7 stellen dat het verloop van de temperatuur veel minder grillig is. Dit kan men verklaren doordat de EAHX bij IDEWE een vele lagere efficiëntie heeft (35% tegenover 96%). Ook na analyse van figuur 5.14 kan men stellen dat het programma hier een zeer goede schatting maakt van de prestaties van de EAHX (de horizontalen liggen op 2°C en -2°C). Men kan dus stellen dat de invloed van de collectorbuizen (waar de simulatie geen rekening mee houdt) te verwaarlozen is op het geheel. De simulatie werd gemaakt met  $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , gebaseerd op de sonderingen (Databank Ondergrond Vlaanderen, 2008) die een fijn bruin humushoudend zand aanduiden.



Figuur 5.14: Volvo Oostakker: Verschil simulatie - realiteit

## Hoofdstuk 6

# Conclusie

Na een studie gemaakt te hebben van de bodem-lucht warmtewisselaar en alles wat erbij komt kijken kan ik over het algemeen stellen dat dit een goede tot zeer goede investering is voor kantoorgebouwen of andere gebouwen met een groot volume. Voor eengezinswoningen is er helaas geen gelijkaardig financieel voordeel aan een bodem-lucht warmtewisselaar verbonden. Dit komt mede door de hoge investeringskost dewelke voor het grootste deel uit grondwerk en materiaalkost van de buizen bestaat. De kost van de buizen met anti-bacteriële laag is zeer hoog tegenover buizen die deze laag niet hebben. Als men met normale PP-buizen werkt en in de luchtbehandelingskast een anti-bacteriële filter plaatst, wordt het financieel voordeliger. Niettegenstaande dat het financiële voordeel in beide toepassingen pas na een aantal jaar komt, mag men het niet-tastbare voordeel niet uit het oog verliezen. Zo brengt een EAHX vanaf de dag na de indiensttreding een ecologisch voordeel op, wat onze nakomelingen ons enkel in dank kunnen afnemen.

Aangezien een EAHX een redelijk grote investering impliceert, kan men onderzoeken of een gemeenschappelijke EAHX (zoals reeds gedaan wordt bij warmtekracht-koppelingen) economisch meer haalbaar is. Men kan in deze gevallen de initiële kost van de EAHX delen over verschillende gebouwen zoals het ventilatiedebiet zich verhoudt. Bij geventileerde, niet verwarmde gebouwen (metro stations, parkeergarages, ...) kan een EAHX voor een iets kleine temperatuursverbetering zorgen, zonder dat het energie kost. Zo worden deze nu minder aangename omgevingen iets aangener er ervaren. Voordeel is dat men hier toch al op grote dieptes moet werken voor de constructie, dus heeft de grondbuis geen groot bijkomend grondverzet nodig.

In het tweede deel van deze thesis wordt een berekeningstool ontwikkeld

die, naar de gebruiker zijn randvoorwaarden, een zo efficiënt mogelijke grondbuis voorstelt. Bij de resultaten wordt eveneens een richtwaarde gegeven van de uitsparing op jaarbasis die de EAHX verwezenlijkt. Deze richtwaarde is sterk afhankelijk van de bodemsoort, het freatisch oppervlak en de thermische diffusiviteit dewelke afhankelijk is van de combiantie van deze eigenschappen. Deze thermische diffusiviteit kan men door eenvoudige experimenten bepalen. Verder kan men onderzoeken wat de invloed op de prestaties van de EAHX is van een andere grondlaag tussen het grondoppervlak en de grondbuis. Gelijkaardig kan men onderzoeken wat een warmte-aantrekkend lichaam bovenop het grondoppervlak (zoals een asfalt) heeft op de temperatuurwinst of -verlies van een EAHX. Een verdere uitbreiding van het berekeningsprogramma kan gemaakt worden door de temperaturen per uur te simuleren. Dit kan een veel juister beeld geven daar de temperatuur 's ochtends of 's middags sterk kan verschillen (tot 10°C).

Dat de implementatie van grondbuizen in de realiteit nog wat op zich laat wachten, heeft meerdere oorzaken. Een eerste oorzaak is de onbekendheid van een EAHX bij de bouwheer, architect of het studiebureau. Als een van deze twee laatste wel op de hoogte is van dit systeem blijft het moeilijk de bouwheer te overtuigen om deze investering te maken. De mogelijkheid een richtwaarde te geven van energiebesparing per jaar is een mogelijk argument waarvoor in deze thesis een aanzet gegeven is. De vermelding en een korte uitleg van het systeem op de website van het Vlaams Energieagentschap, [energiesparen.be](http://energiesparen.be), zou een positieve impuls geven aan de toepassing in de praktijk van de grondbuis. Als een grondbuis een positieve impact zou kunnen betekenen op het E-peil, heeft de bouwheer weer een argument meer om tot de toepassing van een EAHX in zijn gebouw over te gaan. Dit is helaas niet realiseerbaar doordat men geen certificaat kan voorleggen met het rendement van de grondbuis. Als de overheid of het WTCB hiervoor een standaardprocedure zou voorleggen zou de toepassing van de grondbuis ook op deze manier aangemoedigd kunnen worden.

Eerder in deze thesis wordt aangehaald dat het eventueel mogelijk zou zijn om airconditioning-units overbodig te maken wanneer een grondbuis toegepast wordt. Helaas is dit niet waar en levert een EAHX, in ons klimaat, voornamelijk voordeel bij dagen waarop er verwarmd moet worden. Misschien is hier een verschuiving waarneembaar over enkele jaren als ons klimaat opwarmt zoals voorspeld wordt. In de periodes waarop de EAHX de ventilatielucht afkoelt ontstaat condensaat, waardoor de samenstelling van de lucht wijzigt. In deze thesis

werd weinig aandacht besteed aan deze wijziging, nochtans zou het interessant kunnen zijn om de invloed van de veranderlijke (relatieve) vochtigheid doorheen het parcours van de grondbuis te onderzoeken.

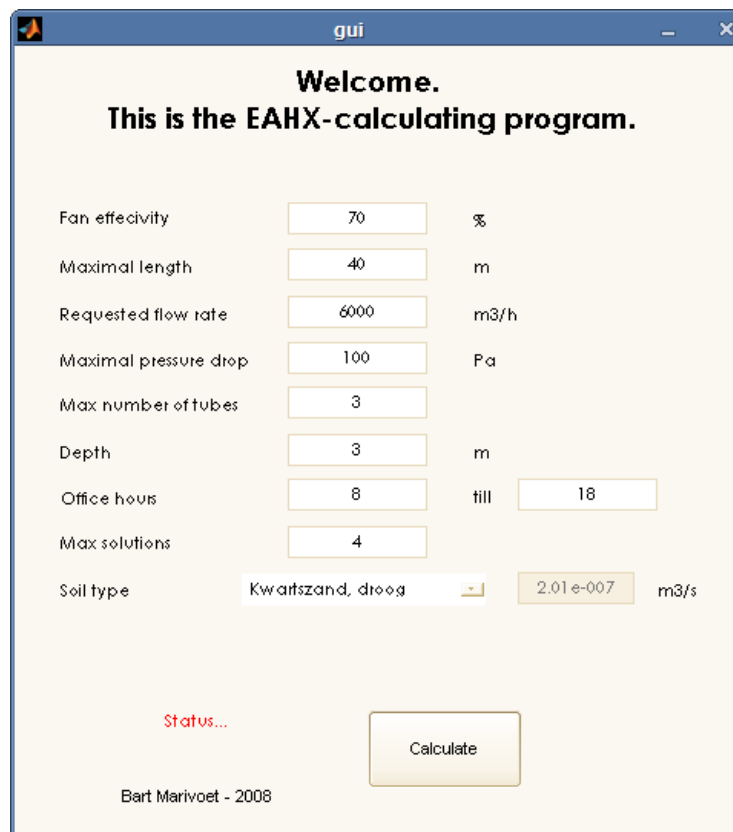
Algemeen zou ik aan elke bouwheer aanraden om de toepassing van een bodem-lucht warmtewisselaar in overweging te nemen omdat deze oplossing zowel baten aan de financiële als de ecologische kant teweeg brengt. Verder zou ik het Vlaams Energieagentschap kunnen aanmoedigen deze ecologische oplossing te regulariseren zodat meer gebouwen deze eenvoudige techniek toepassen.

# Bijlage A

## Code van de berekeningstool

### A.1 De interface

#### A.1.1 De GUI



Figuur A.1: De grafische interface

### A.1.2 Code achter de interface: gui.m

```
function calc_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to calc (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
grond = get(handles.popupmenu1,'Value');

switch grond
    case 1
        bodemtype = 2.01*10(-7);
    case 2
        bodemtype = 3.33*10(-7);
    case 3
        bodemtype = 5.06*10(-7);
    case 4
        bodemtype = 3.75*10(-7);
    case 5
        bodemtype = 6.02*10(-7);
    case 6
        bodemtype = 4.90*10(-7);
    case 7
        bodemtype = 10.13*10(-7);
    case 8
        set(handles.txtBodem,'Enable','On')
        bodemtype = str2num(get(handles.txtBodem,'String'));
end

set(handles.txtBodem,'String',num2str(bodemtype));

cp = xlsread( 'constanten.xls', 'constanten' , 'B1');
rho = xlsread( 'constanten.xls', 'constanten' , 'B2');
nuv = xlsread( 'constanten.xls', 'constanten' , 'B3');
lambda = xlsread( 'constanten.xls', 'constanten' , 'B4');
Pr = xlsread( 'constanten.xls', 'constanten' , 'B5');
assignin('base','cp',cp);
assignin('base','rho',rho);
assignin('base','nuv',nuv);
```

```
assignin('base','lambda',lambda);
assignin('base','Pr',Pr);

maxopl = str2num(get(handles.boxMaxSol,'String')) + 1;
v = str2num(get(handles.boxV,'String'));
Lmax = str2num(get(handles.boxLmax,'String'));
dPmax = str2num(get(handles.boxdPmax,'String'));
maxbuizen = str2num(get(handles.boxMaxbuizen,'String'));
ep = str2num(get(handles.boxEp,'String'));
ep = ep/100;
z = str2num(get(handles.boxDepth,'String'));
alpha = bodemtype;
KuurBegin = str2num(get(handles.boxKuurBegin,'String'));
KuurEinde = str2num(get(handles.boxKuurEinde,'String'));
%aantal bedrijfsuren (BU) die de installatie draait per dag
BU = KuurEinde-KuurBegin;
assignin('base','alpha',alpha);
assignin('base','depth',z);
assignin('base','maxopl',maxopl);
assignin('base','TuitM',zeros(365,maxopl-1));
assignin('base','Tverlies',zeros(365,maxopl-1));
assignin('base','Twinst',zeros(365,maxopl-1));
assignin('base','PkoelM',zeros(365,maxopl-1));
assignin('base','PwarmM',zeros(365,maxopl-1));

set(handles.txtStatus,'String','Getting climate');
dagtemps = xlsread('klimaat.xls','klimaat','B1:B366');
assignin('base','dagtemps',dagtemps);

set(handles.txtStatus,'String','Making combinations...');
buis(v,Lmax,dPmax,maxbuizen,ep,BU);

set(handles.txtStatus,'String','Generating report, please wait...');
writereport;
set(handles.txtStatus,'String','Done. Please open Results.doc')
```

## A.2 Kiezen van de buisafmetingen

### A.2.1 Opbouwen van alle combinaties: buildmatrix.m

```
function matrices = buildmatrix(L)

% definieren van constanten
% =====
cp = evalin('base','cp');
rho = evalin('base','rho');
nuv = evalin('base','nuv');
lambda = evalin('base','lambda');
Pr = evalin('base','Pr');

Dmatrix = [0.15 0.2 0.25 0.315 0.4 0.5 0.8 1.1 1.2]; %Diam in m
Vmatrix = [50:50:30000]; % volumedebieten in m3/h

for r = 1 : 1 : 9

for k = 1 : 1 : 600

V = Vmatrix(1,k)/3600;           % m3/s (omgezet van m3/h)
D = Dmatrix(1,r);               % m
speed = V/((pi*D^2)/4);         % m/s
speedmatrix(r,k) = speed;
Re = (speed*D)/nuv;

if Re < 2300
    Nu = 3.66;
    xi = (64/Re);
    stroming(r,k)=0;           % 0 is laminaire stroming
elseif Re > 2300
    xi = (1.82*log10(Re)-1.64)^(-2);
    %volgens Gnielinski
    Nu = (xi/8*(Re-1000)*Pr)/(1+12.7*sqrt(xi/8)*(Pr^(2/3)-1));
    h = Nu*lambda/D;
    stroming(r,k)=1;           % 1 is turbulente stroming
end

end
```



```
dP = xi*L/D*rho*speed^(2)/2;

Hmatrix(r,k) = h;
Rematrix(r,k) = Re;
Numatrix(r,k) = Nu;
ximatrix(r,k) = xi;
dPmatrix(r,k) = dP;
end
end

%export values for use in other functions
assignin('base','dPmatrix',dPmatrix);
assignin('base','Vmatrix',Vmatrix);
assignin('base','Dmatrix',Dmatrix);
assignin('base','Hmatrix',Hmatrix);
assignin('base','speedmatrix',speedmatrix);
assignin('base','stroming',stroming);
assignin('base','rho',rho);
assignin('base','cp',cp);
disp('Matrices OK')
```

## A.2.2 Kiezen van een buis: buis.m

```
function resultaat = buis(v,Lmax,dPmax,maxbuizen,ep,BU)
% berekening optimale diameter voor een max lengte en debiet

buildmatrix(Lmax);          %matrices met alle V D dP v maken
assignin('base','Lmax',Lmax);

%get constants
Vmatrix = evalin('base','Vmatrix');
Dmatrix = evalin('base','Dmatrix');
dPmatrix = evalin('base','dPmatrix');
stroming = evalin('base','stroming');
z = evalin('base','depth');
Hmatrix = evalin('base','Hmatrix');
speedmatrix = evalin('base','speedmatrix');
```

```

cp = evalin('base','cp');
rho = evalin('base','rho');
maxopl = evalin('base','maxopl');
alpha = evalin('base','alpha');

h = waitbar(0,'Finding the right tube...');
resultaten = 2;      %reduction because of the title lines

%write titles for results and input tables in report
resultaat1(1,:) = {'
    '# of tubes (-)'
    'Flow per tube (m3/h)'
    'DN (mm)'
    'Pressure drop (Pa)'
    'Speed (m/s)'
    'Pchill (kWh)'
    'Pheat (kWh)'
    'Eff (%)'};
resultaat2(1,:) = {'
    'Chilldays'
    'Heatdays'
    'C.O.P. chill'
    'C.O.P. heat'
    'Fan (kWh)'};
input1(1,:) = {'Heat capacity (kJ/kgK)'
    'Density of air (kg/m3)',
    'Fan efficiency (%)'
    'Max tube length (m)'};
input1(2,:) = {num2str(cp)
num2str(rho)
num2str(ep*100)
num2str(Lmax)};
input2(1,:) = {'Air flow (m3/h)'
'Max pressure drop (Pa)'
'Max # tubes (-)'
'alpha (m2/s)'
'Depth (m)'};
input2(2,:) = {num2str(v)

```

```
num2str(dPmax)
num2str(maxbuizen)
num2str(alpha)
num2str(z)};

%to calculate the status
[Dr Dk] = size(Dmatrix);
Z = Dk*maxbuizen;
A = 0;

for rij = 1:1:Dk           %voor alle mogelijke diameters kijken
    %voor 1 buis tot en met het maximaal aantal toegestane buizen kijken
    for aantal = 1 : 1 : maxbuizen

        %eigenschappen huidige buis bepalen
        %elke grondbuis wordt door hetzelfde debiet doorspoeld
        Vdeel = v/aantal;
        kolom = find(Vmatrix <= Vdeel, 1, 'last');
        speed = speedmatrix(rij,kolom);
        D = Dmatrix(rij);
        dP = aantal*dPmatrix(rij,kolom);

        %voortgang weergeven
        A = A + 1;
        status = A/Z - 0.2;      %20% om het rapport te maken
        waitbar(status,h)

        %stroming turbulent en het drukverlies binnen de eisen
        if dP < dPmax && stroming(rij,kolom) == 1
            if resultaten-1 < maxopl
                %vermogen v 1 buis berekenen
                Opp = D * pi * (Lmax);
                [Pwarm,Pkoel] = energie(z,rij,kolom,Vdeel/3600,resultaten-1,BU);

                %efficiëntie berekenen
                hcoeff = Hmatrix(rij,kolom);
                NTU = hcoeff*aantal*Opp/(v/3600 * rho * cp);
                EFF = 1-exp(-NTU);
```

```

%C.O.P. berekenen
koeldagen = evalin('base','koeldagen');
warmdagen = evalin('base','warmdagen');
%koelen
Pfankoel = aantal*Vdeel/3600*dP/ep*BU*koeldagen/1000;
COPkoel = aantal*Pkoel(resultaten-1)/Pfankoel;
%verwarmen
Pfanwarm = aantal*Vdeel/3600*dP/ep*BU*warmdagen/1000;
COPwarm = aantal*Pwarm(resultaten-1)/Pfanwarm;

%Nettowinst
Nettochill = aantal*Pkoel(resultaten-1)-Pfankoel;
Nettoheat = aantal*Pwarm(resultaten-1)-Pfanwarm;

%resultaten opslaan
resultaat1(resultaten,:) = {[num2str(resultaten-1) '.']
    num2str(aantal)
    num2str(round(Vdeel))
    num2str(Dmatrix(rij)*1000)
    num2str(round2(dP,0.1))
    num2str(round2(speed,0.01))
    num2str(round(aantal*Pkoel(resultaten-1)))
    num2str(round(aantal*Pwarm(resultaten-1)))
    num2str(round(EFF*100))};
resultaat2(resultaten,:) = {[num2str(resultaten-1) '.']
    num2str(koeldagen)
    num2str(warmdagen)
    num2str(round2(COPkoel,0.01))
    num2str(round2(COPwarm,0.01))
    num2str(round(Pfanwarm+Pfankoel))};
resultaten = resultaten + 1;
    end
end
end
end

zin = ['Found ' num2str(resultaten-2) ' combinations'];

```

```
disp(zin)
waitbar(0.9,h)

%export all to generate a report
assignin('base','toreport1',resultaat1);
assignin('base','toreport2',resultaat2);
assignin('base','resultaten',resultaten-2);
assignin('base','input1',input1);
assignin('base','input2',input2);
assignin('base','rij',rij);
assignin('base','kolom',kolom);
close(h)
```

## A.3 Berekenen van de uitgespaarde energie

### A.3.1 Bepalen van de grondtemperatuur: grond.m

```
function T = grond(t,z,tmax,tmin,t0)
% z = diepte waarop men de temp wil weten
% t = dag waarop men de temp wil weten
% alpha = therm diffusiviteit (m2/s)
% tmax en tmin de max en min temp van een jaar op die plaats
% t0 = koudste dag valt op (dagen) ... -> 22 dec (in 2007 althans)
alpha = evalin('base','alpha');
dagtemps = evalin('base','dagtemps');
alpha = alpha*60 *60 *24; %m2/s -> m2/dag
Tavg = mean(dagtemps);
Tamp = tmax - tmin;
omega = 2*pi/365;
d = sqrt(2*alpha/omega);
Tavg = Tavg +2; % gemiddelde grondtemp = gemiddelde luchttemp + 2graden

T = Tavg + Tamp*exp(-z/d)*sin(2*pi*(t-t0)/365 -z/d -pi/2);
```

### A.3.2 De energiewinst: energie.m

```
function [Pwarm,Pkoel] = vermogen(z,rij,kolom,V,figuur,BU)
% z = diepte waarop men de temp wil weten
% alpha = therm diffusiviteit (m2/s)
% V komt als m3/s binnen

warmdagen = 0;
koeldagen = 0;
Qtotwarm = 0;
Qtotkoel = 0;
dagtemps = evalin('base','dagtemps');
tmax = max(dagtemps);
tmin = min(dagtemps);
t0 = find(dagtemps == tmin, 1, 'last');
Hmatrix = evalin('base','Hmatrix');
Dmatrix = evalin('base','Dmatrix');
```

```
rho = evalin('base','rho');
cp = evalin('base','cp');
Lmax = evalin('base','Lmax');
h = Hmatrix(rij,kolom);
D = Dmatrix(rij);

TuitM = evalin('base','TuitM');
Tverlies = evalin('base','Tverlies');
Twinst = evalin('base','Twinst');
PkoelM = evalin('base','PkoelM');
PwarmM = evalin('base','PwarmM');

for dag = 1:1:365
    Tdag = dagtemps(dag);
    Tgrond = grond(dag,z,tmax,tmin,t0);
    Omtrek = pi*D;
    Opp = Lmax*Omtrek;
    Tuit = Tgrond + (Tdag - Tgrond)*exp(-(h*Opp)/((V*rho)*cp));
    % W = J/s = m3/s * kg/m3 * J/kgK * K
    Q = V * rho * cp * (Tuit -Tdag);
    T = Tuit - Tdag;
    if Tdag < 20
        warmdagen = warmdagen +1;
        Qwarm(dag) = Q;
        Qkoel(dag) = 0;
        Twinst(dag,figuur) = T;
        Tverlies(dag,figuur) = 0;
    elseif Tdag > 22
        koeldagen = koeldagen +1;
        Qkoel(dag) = -Q;
        Qwarm(dag) = 0;
        Twinst(dag,figuur) = 0;
        Tverlies(dag,figuur) = -T;
    else
        Qwarm(dag) = 0;
        Qkoel(dag) = 0;
        Tverlies(dag,figuur) = 0;
    end
end
```

```
        Twinst(dag,figuur) = 0;
    end
    TuitM(dag,figuur) = Tuit;    %in matrix steken om te plotten
    TgrondM(dag) = Tgrond;    %in matrix steken om te plotten
end

%enkel positieve inwerking van de warmtebuis tellen
%in andere gevallen moet deze by-passed zijn
for i = 1:1:365
    if Qkoel(i) > 0
        Qtotkoel = Qtotkoel + Qkoel(i);
        Qkoel2(i) = Qkoel(i);
        PkoelM(i,figuur) = Qkoel(i)*BU;
    else
        Qkoel2(i) = 0;
        PkoelM(i,figuur) = 0;
    end
    if Qwarm(i) > 0
        Qtotwarm = Qtotwarm + Qwarm(i);
        Qwarm2(i) = Qwarm(i);
        PwarmM(i,figuur) = Qwarm(i)*BU;
    else
        Qwarm2(i) = 0;
        PwarmM(i,figuur) = 0;
    end
end

end

%alles omzetten van W(h) naar kW(h)
Qtotwarm = Qtotwarm/1000;
Qtotkoel = Qtotkoel/1000;
Qkoel = Qkoel/1000;
Qkoel2 = Qkoel2/1000;
Qwarm = Qwarm/1000;
Qwarm2 = Qwarm2/1000;
PwarmM(:,figuur) = PwarmM(:,figuur)/1000;
PkoelM(:,figuur) = PkoelM(:,figuur)/1000;
Pwarm(figuur) = sum(PwarmM(:,figuur));
Pkoel(figuur) = sum(PkoelM(:,figuur));
```



```
%alles beschikbaar maken in workspace om te plotten
assignin('base','TgrondM',TgrondM);
assignin('base','TuitM',TuitM);
assignin('base','Qkoel',Qkoel/1000);
assignin('base','Qwarm',Qwarm/1000);
assignin('base','Qkoel2',Qkoel2/1000);
assignin('base','Qwarm2',Qwarm2/1000);
assignin('base','PkoelM',PkoelM);
assignin('base','PwarmM',PwarmM);
assignin('base','warmdagen',warmdagen);
assignin('base','koeldagen',koeldagen);
assignin('base','Tverlies',Tverlies);
assignin('base','Twinst',Twinst);
```

## A.4 Het rapport genereren

### A.4.1 De tekst zetten: writereport.m

```
disp('Start writing report')
reportFilename = 'Results.doc';
if exist(reportFilename, 'file')
    delete(reportFilename);
end
wr = wordreport(fullfile(pwd, reportFilename));

% Define generic name for heading styles ('Heading 1', 'Heading 2', ...)
% If you are NOT using an English version of Word, put here the generic
% name for your language ('Titre ' in french for example)
% This generic name is replaced with the english one if the first attempt
% to add a title goes wrong
headingString = 'Kop ';
normalString = 'Standaard';
try
    % Set style to 'Heading 1' for top level titles
    wr.setstyle([headingString '1']);
```

```

    % Define title
    textString = 'Earth-Air Heat Exchanger Optimization';
    % Insert title in the document
    wr.addtext(textString, [0 2]); % two line breaks after text
catch
    % Error when trying to insert first heading. The generic name for
    % heading styles must be wrong, probably due to Microsoft Office
    % language. Resetting to default: ENGLISH (see above for more details)
    warning('Resetting generic name to default ''Heading ''');
    headingString = 'Heading ';
    normalString = 'Normal';
    wr.setstyle([headingString '1']);
    textString = 'Earth-Air Heat Exchanger Optimization';
    wr.addtext(textString, [0 2]); % two line breaks after text
end

wr.setstyle([headingString '1']);
wr.addtext('Input data:', [1 1]); %line break before and after text

toreport1 = evalin('base','toreport1');
toreport2 = evalin('base','toreport2');
input1 = evalin('base','input1');
input2 = evalin('base','input2');
resultaten = evalin('base','resultaten');

[nbRows, nbCols] = size(input1);
wr.addtable(nbRows, nbCols, input1, [1 1]); %line break before table

[nbRows, nbCols] = size(input2);
wr.addtable(nbRows, nbCols, input2, [0 1]); %line break after table

wr.setstyle([headingString '1']);
wr.addtext('Results:', [1 1]); %line break before and after text

[nbRows, nbCols] = size(toreport1);
wr.addtable(nbRows, nbCols, toreport1, [1 1]); %line break before table

```

```
[nbRows, nbCols] = size(toreport2);
wr.addtable(nbRows, nbCols, toreport2, [1 1]); %line break before table

for i = 1:1:resultaten
    wr.addpagebreak();
    wr.setstyle([headingString '2']);
    wr.addtext(['Solution ' num2str(i)], [1 1]);

    Pplot(i);
    wr.setstyle([normalString]);
    wr.addfigure();
end

close(1:1:resultaten)

%---
wr.addpagenumbers('wdAlignPageNumberRight');
%---
wr.close();
%---
disp('Done writing report')
```

#### A.4.2 De grafiek maken: Pplot.m

```
function k = Pplot(figuur)

%importeren van de resultaten
dagtemps = evalin('base','dagtemps');
TuitM = evalin('base','TuitM');
Tverlies = evalin('base','Tverlies');
Twinst = evalin('base','Twinst');
PkoelM = evalin('base','PkoelM');
PwarmM = evalin('base','PwarmM');

figure('Position',[100 900 700 800])
k = figure(figuur);

title(figuur)
```

```
jaar = 1:1:365;

subplot(3,1,1)
plot(jaar,dagtemps)
hold on
plot(jaar,TuitM(:,figuur),'r','LineWidth',2)
title('Air temperature & exittemperature')
xlabel('days')
ylabel('temperature (řC)')
legend('Air temperature','Exittemperature', 'Location','SouthOutside')
grid
axis([1 365 -10 30])

subplot(3,1,2)
plot(jaar,Tverlies(:,figuur),jaar,Twinst(:,figuur))
title('Temperature gain')
grid
xlabel('days')
ylabel('temperature (řC)')
axis([1 365 -7 max(Twinst(:,figuur)+1)])
legend('T_{loss}','T_{gain}', 'Location','SouthOutside')

subplot(3,1,3)
plot(jaar,PkoelM(:,figuur),jaar,PwarmM(:,figuur))
title('Usefull energy')
grid
xlabel('days')
ylabel('Energy (kWh)')
axis([1 365 0 max(PwarmM(:,figuur)+10)])
legend('E_{chilling}','E_{heating}', 'Location','SouthOutside')
set(gca,'XTickLabel',
{'20/feb','10/apr','30/mei','19/jul','7/sep','27/okt','16/dec'})
```

## Bijlage B

# Handleiding van de berekeningstool

### B.1 Installatie

Aangezien het EAHX-programma in MATLAB geprogrammeerd werd, is het afhankelijk van bepaalde componenten van dit laatste. Het geschreven programma werkt dus niet op een computer zonder een MATLAB-installatie. Nu heeft de ontwikkelaar van MATLAB (Mathworks) een installatie-bestand samengesteld waarin al deze nodige componenten zijn vervat. Na de installatie van deze redistribu-table is elke pc in staat het programma te draaien.

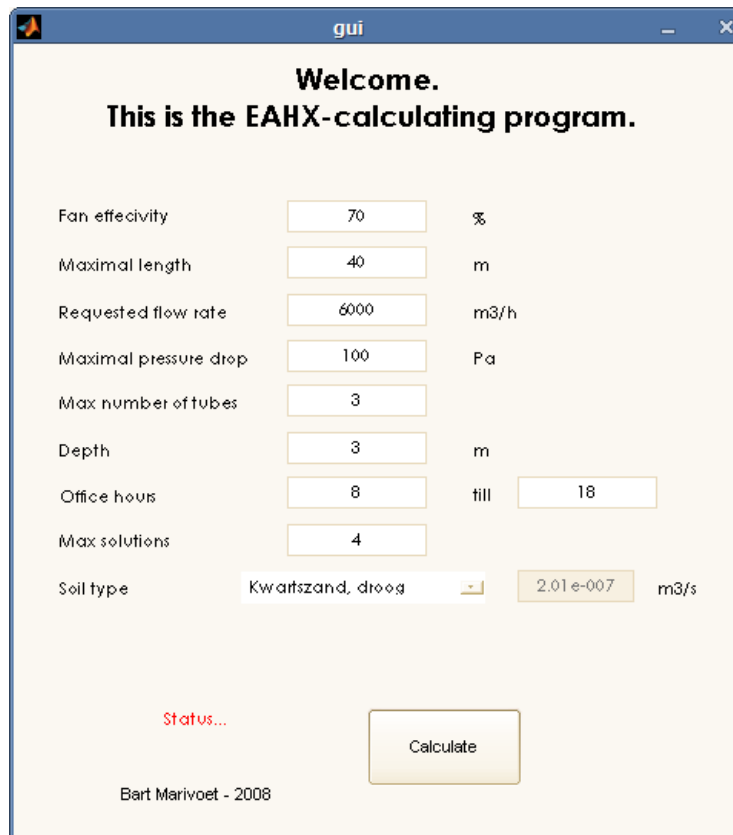
#### B.1.1 Installatie van `MCRInstaller.exe`

Na het dubbelklikken zal er een extractie plaatsvinden van alle nodige installatie-bestanden, daarna verschijnt er een installatiescherm. Na enkele malen op volgende te klikken (standaardinstellingen zijn voldoende) begint de installatie.

#### B.1.2 EAHX

Hierna kan men het programma opstarten door op "Run EAHX" te dubbelklikken. De eerste keer dat men het programma opstart neemt een langere tijd in beslag omdat er nog enkele bestanden gedeprimeerd moeten worden. Daarna verschijnt de interface zoals in B.1.

De verschillende invoermogelijkheden:



The screenshot shows a window titled 'gui' with a yellow background. At the top, it says 'Welcome. This is the EAHX-calculating program.' Below this are several input fields with labels and units:

Parameter	Value	Unit
Fan efficiency	70	%
Maximal length	40	m
Requested flow rate	6000	m <sup>3</sup> /h
Maximal pressure drop	100	Pa
Max number of tubes	3	
Depth	3	m
Office hours	8	till 18
Max solutions	4	
Soil type	Kwartszand, droog	2.01e-007 m <sup>3</sup> /s

At the bottom, there is a red 'Status...' label, a 'Calculate' button, and the text 'Bart Marivoet - 2008'.

Figuur B.1: De interface van EAHX

- Fan effectivity: Het rendement van de ventilator. Op basis van dit getal kan men de verbruikte energie van de ventilator berekenen die nodig is om het drukverlies van de grondbuis te overwinnen.
- Maximal length: De maximale lengte die beschikbaar is op het terrein of door andere omstandigheden.
- Requested flow rate: Het benodigde ventilatiedebiet voor de ventilatie-installatie van het gebouw.
- Maximal pressure drop: Het maximale drukverlies dat de gebruiker wenst in de warmtebuis (collectorbuizen niet meegerekend).
- Max number of tubes: Het maximaal aantal buizen dat de gebruiker wenst (hiermee kan men de investeringskost drukken).
- Depth: De diepte waarop de aslijn van de buis gelegen zal zijn. Hoe dieper hoe warmer, maar hoe hoger de installatiekost

- Office hours: Op basis van deze uren wordt de benodigde energie van de ventilator en de gewonnen energie van de grondbuis berekend.
- Max solution: Met dit getal kan de gebruiker aangeven hoeveel van de best presterende grondbuizen er voorgesteld moeten worden. Hoe hoger dit getal hoe lager de prestaties van de bijkomende buizen.
- Soil type: Hiermee kan men het type van bodem kiezen waarin de grondbuis zit. Er zijn een aantal gegevens beschikbaar (zie tabel tab:penetratie), de gebruiker heeft ook de mogelijkheid om zelf een waarde in te geven.

Buiten deze invoergegevens zijn er nog twee Excel-bestanden met invoergegevens van het programma:

- `constanten.xls` bevat enkele constanten van lucht:
  - $c_{p,lucht}$ : specifieke warmtecapaciteit lucht
  - $\rho_{lucht}$ : dichtheid lucht
  - $\nu_{lucht}$ : kinematische viscositeit lucht
  - $\lambda_{lucht}$ : warmtegeleiding lucht
  - $Pr_{lucht}$ : Prandtl-getal lucht
- `klimaat.xls` bevat de gemiddelde temperaturen tussen 8u en 18u voor elke dag van het jaar. Deze gegevens zijn van februari 2007 tot februari 2008 (Synaeve, 2008).

Deze bestanden horen in dezelfde map te staan als het EAHX-programma.

# Bibliografie

- Abbringh, R.: 1989, *Schadelijke emissies van gas in het milieu*, Rijksuniversiteit Groningen
- Abu-Hamdeh, N. H.: 2003, *Thermal Properties of Soils as affected by Density and Water Content*, *Biosystems Engineering* 86 (1), pagina 97-102
- Azziz, A. and Kraus, A. D.: 2001, *Extended Surface Heat Transfer*, John Wiley and Sons, ISBN 0471436631
- Bejan, A. and Kraus, A. D.: 2003, *Heat Transfer Handbook*, Wiley-IEEE, ISBN 0471390151
- BIM (Brussels Instituut voor milieubeheer): 2007, *Praktische aanbeveling ENE22: Installatie van een aardwarmtewisselaar*, Infofiches eco-bouwen
- Buol, S. W.: 2003, *Soil Genesis and Classification*, Blackwell Publishing, ISBN 0813828732
- Çengel, Y.: 1998, *Heat Transfer: A Practical Approach*, McGraw-Hill, ISBN 0070115052
- Computrols Inc.: 4/01/2008, *A Building Automation Company*, <http://www.computrols.com>
- Databank Ondergrond Vlaanderen: 21/04/2008, *DOV JSP Viewer*, <http://dov.vlaanderen.be/>
- De Paepe, M. and Janssens, A.: 2003, *Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers*, *Energy and Buildings* 35(4), pagina 389-397
- de Vries, D.: 1963, *Thermal Properties of Soils*, North-Holland Publishing Company
- de Vries, D.: 1975, *Heat Transfer in Soils: Heat and Mass Transfer in the Biosphere*, Scripta Book Co.
- Dittmann, H.-J.: 2004, *Öl- und Gasfeuerung*, Gentner Verlag, Überreicht durch: Viessmann
- Emis: 21/03/2008a, *Conventionele verbrandingswaarden van petroleum-producten (en gassen) volgens het Ministerie van Economische Zaken*, <http://www.emis.vito.be>
- Emis: 21/03/2008b, *Evolutie van de SO<sub>2</sub>- en NO<sub>x</sub>-emissies door gebouwenver-*



- warming in Vlaanderen*, <http://www.emis.vito.be>
- Emis: 21/03/2008c, *Verbrandingswaarden van gassen*, <http://www.emis.vito.be>
- Farouki, O. T.: 1986, *Thermal Properties of Soils: Series on rock and soil mechanics*, Trans Tech Publications
- FOD Economie: 14/04/2008a, *Evolutie van de energieprijzen*, [http://mineco.fgov.be/energy/energy\\_statistics](http://mineco.fgov.be/energy/energy_statistics)
- FOD Economie: 21/03/2008b, *Officieel tarief van de aardolieproducten in EURO*, <http://mineco.fgov.be/>
- FOD Economie: 21/03/2008c, *Tarieven voor de openbare gasdistributie (in euro)*, <http://economie.fgov.be/>
- Francis W Murray: 1967, *On the Computation of Saturation Vapor Pressure*, Journal of Applied Meteorology 1967(6), pagina 203-204
- Fränkische Rohrwerke GmbH: 28/12/2007, *Ideales Wohnklima mit weniger Energiekosten: Erdwärmetauscher Terra-Air-home*, <http://www.fraenkische.de>
- Garston and Watford: 1999, *Early design guidance for low energy cooling technologies*, Technical Report Annex 28, 1999:2, (BRE) Building Research Establishment & (IEA) International Energy Agency: Energy Conservation in Buildings & Community Systems Programme, Institute for Research in Construction
- GEA Happel: 28/03/2008, *GEA Air Treatment Division*, <http://www.gea-happel.be/>
- Hittel: 1982, *Introduction to soil physics*, Academic Press, ISBN 0123485207
- Lascar Electronics: 2006, *EL-USB-2 Manual*, Issue 3
- Marshall and Holmes: 1988, *Soil Physics 2<sup>nd</sup> Edition*, Cambridge University Press, ISBN 0713133643
- Matthieu Zuidema: 2006, *Toenemende kantorenvraag tot 2015*, Facillity - Tijdschrift van het Economisch Instituut voor de Bouwnijverheid (EIB), jaargang 3, nummer 11
- NASA: National Aeronautics and Space Administration: 12/04/2008, *Surface meteorology and Solar Energy*, <http://eosweb.larc.nasa.gov>
- NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration: 13/04/2008, *Algorithms, Comparisons and Source References*, <http://www.noaa.gov/>
- Nofziger and Wu: 2003, *Soil temperature variations with time and depth*, Technical report, Oklahoma State University, Department of Plant and Soil Sciences
- NRG Nuclear Research & Consultancy Group: 14/01/2008, *Radon, radioactief gas uit natuurlijke bron*, <http://www.nrg-nl.com>
- REHAU AG: 2006, *AWADUKT Thermo Luft-Erdwärmetauschersystem für die kontrollierte Lüftung*, Lieferprogramm 342100
- REHAU AG: 2007, *AWADUKT Thermo Antimikrobiell Luft-Erdwärmetauschersystem*

- für die kontrollierte Lüftung*, PREISLISTE 342300/1 DE
- REHAU AG: 2008, *Bemessungssoftware AWADUKT Thermo*, REHAU AG
- Reynolds, O.: 1883, *An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels*, Philosophical Transactions of the Royal Society, pagina 935-982
- Santamouris, M. and Asimakopoulos, D.: 1996, *Passive Cooling of Buildings*, Earthscan, ISBN 1873936591
- SGS Institut Fresenius: 14/01/2008, *Laboranalytik*, <http://www.institut-fresenius.de>
- Smith, L. A. and Hinchee, R. E.: 1993, *In Situ Thermal Technologies for Site Remediation*, CRC Press, ISBN 0873716043
- Sole-Erdwärmetauscher: 31/03/2008, *NETEC Energietechnik*, <http://www.sole-ewt.de/>
- Synaeve, J.: 6/02/2008, *Weerstation Gent-Dampoort*, [www.jorissynaeve.net/weerstation](http://www.jorissynaeve.net/weerstation)
- Uptime Technology: 3/01/2008, *Continuïteit en Datacentertechniek: Koelen van datacenters*, <http://www.uptimetechnology.nl>
- U.S. Department of Agriculture, Forest Service, F. P. L.: 1977, *Thermal conductive properties of wood, green or dry, from -40°C to +100°C : A literature review*, Technical Report FPL 9, USDA Forest Service General Technical Report
- van den Bossche, P.: 2007, *Ventilatie: warmteterugwinning op ventilatielucht*, WTCB, Afdeling Energie en Klimaat
- VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurswesen: 1997, *VDI-Wärmeatlas*, Springer Verlag and Heidelberg GmbH, ISBN 3540627197
- Vlaams Energieagentschap: 29/10/2007, *Energiesparen*, Vlaamse Overheid, <http://www.energiesparen.be>
- Wikipedia: The free Encyclopedia: 30/10/2007, *Kalua*, Wikimedia Foundation Inc., <http://en.wikipedia.org/wiki/Imu>
- Williams and Gold: 1976, *Ground Temperatures*, Technical Report CBD-180, (NRC-IRC) National Research Council Canada, Institute for Research in Construction
- Winkler Prins: 1975, *Technische Encyclopedie*, Argus Elsevier, ISBN 9010013502
- World Resources Institute: 1994, *World Resources: People and the Environment*, World Resources Institute, ISBN 019521045X