



Rijksdienst voor Ondernemend
Nederland

Onderzoek Klimaatcascade en geo-klimaatconcept

EOS-LT Earth, Wind & Fire

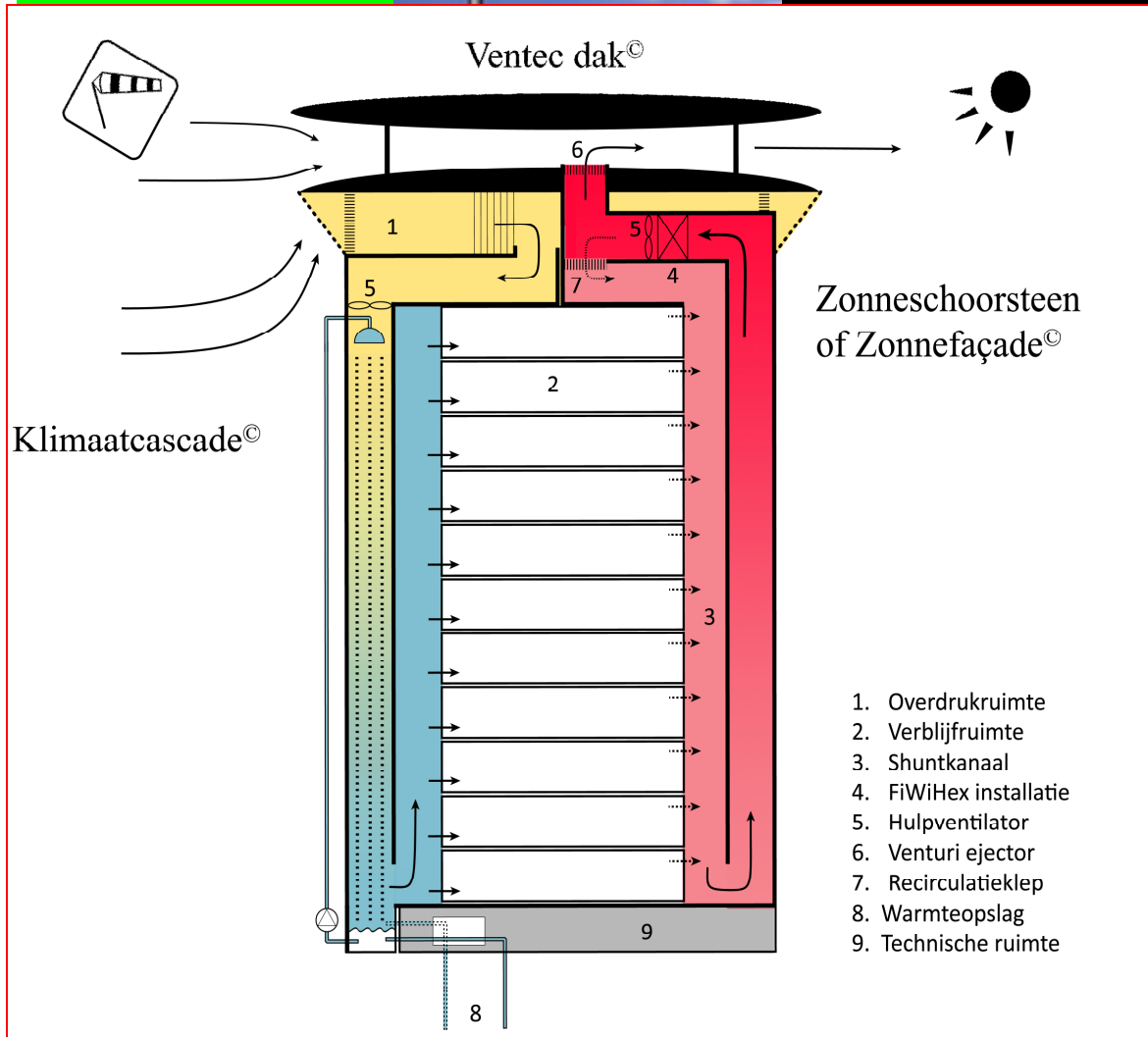
Datum Maart 2012

TU Delft, Ben Bronsema

In opdracht van Agentschap NL (nu Rijksdienst voor
Ondernemend Nederland)

Publicatienr RVO-165-1501/RP-DUZA
www.rvo.nl

Dit rapport is tot stand gekomen in opdracht van het ministerie van
Economische Zaken.



Technische Universiteit Delft

“EARTH, WIND AND FIRE”

AIRCONDITIONING ZONDER VENTILATOREN

(III) Thema Earth:
Onderzoek Klimaatcascade[©] en Geo-Klimaatconcept[©]

Auteur Ben Bronsema –REHVA Honorary Fellow
Maart 2012

Earth, Wind & Fire – Airconditioning zonder Ventilatoren
(III) Onderzoek Geo-Klimaatconcept[®]



VOORWOORD

Het onderzoek “*Earth, Wind & Fire – Airconditioning zonder Ventilatoren*” is gestart medio 2007, en heeft maart 2012 geresulteerd in de volgende deelrapporten

- (I) Onderzoek Zonneschoorsteen en Zonnefaçade[©]
- (II) Onderzoek Natuurlijke Ventilatie, Wind en Ventecdak[©]
- (III) Onderzoek Klimaatcascade[©] en Geo-Klimaatconcept[©]
- (IV) BINNENMILIEU: Symbiose van Architectuur en Klimaattechniek

Deze deelrapporten geven een gedetailleerd verslag van de drie deelonderzoeken en richtlijnen voor het ontwerp van respectievelijk de Zonneschoorsteen en Zonnefaçade[©], het Ventecdak[©] en de Klimaatcascade[©]. Met behulp van deze responsieve bouwdelen, geïntegreerd in de architectuur en de constructie van een gebouw, kan een substantiële besparing op het gebouw gebonden energiegebruik worden gerealiseerd, met als einddoel een energieneutraal gebouw en zelfs een energieleverend gebouw. Dit wordt gedemonstreerd met de in deelrapport (IV) opgenomen Case Study.

Het vooronderzoek Klimaatcascade[©] en Geo-Klimaatconcept[©] is gestart begin 2009 en werd maart 2010 afgesloten met een tussenrapportage concept F. Op basis hiervan is het onderzoek voortgezet, zowel in de breedte als in de diepte. In verband met de omvang zijn de algemene hoofdstukken uit dit concept Klimaatcascade[©] over Installatietechniek en Architectuur en de beschouwingen over de uitgangspunten voor een gezond, behaaglijk en productief binnenmilieu verplaatst naar deelrapport (IV).

De verdieping van het onderzoek omvatte voornamelijk het modelleren, simuleren, kalibreren en valideren van de psychometrische prestaties van een Klimaatcascade[©]. De interactie tussen lucht en miljoenen vallende waterdruppels met verschillende groottes en valsnelheden is een gecompliceerd proces, waarvoor in de wetenschappelijke lectuur nauwelijks aanknopingspunten te vinden zijn. In een buitengewoon productief samenspel van simulaties en metingen in een fysieke testopstelling is een gevalideerd model ontwikkeld voor het ontwerp en de prestatieberekening van een Klimaatcascade[©].

Het Excel rekenmodel uit de tussenrapportage werd via verschillende tussenversies sterk verbeterd, waardoor de globale druppelgrootteverdeling in het sproeispectrum kon worden aangegeven. Met behulp van geavanceerde numerieke CFD simulaties, uitgevoerd door een specialist op dit gebied, konden op basis hiervan sproeiers voor de fysieke testopstelling worden geselecteerd, waarna een goed beeld kon worden gegenereerd van de psychometrie in een Klimaatcascade[©]. Het Excel rekenmodel en het CFD simulatiemodel zijn in een fysieke testopstelling gevalideerd. Beide modellen blijken de psychometrische prestaties van een Klimaatcascade[©] met een hoge mate van nauwkeurigheid te kunnen berekenen.

Essentieel voor het onderzoek was de fysieke testopstelling waarin de psychometrische prestaties onder extreme zomer- en wintercondities konden worden gemeten. Hiermee werd het bewijs geleverd dat een Klimaatcascade[©] een robuust en universeel bouwdeel kan zijn voor koeling/droging en verwarming/bevochtiging van ventilatielucht in gebouwen.

Op basis van de fysica achter het Excel rekenmodel is een dynamisch simulatiemodel in ESP-r ontwikkeld, waarmee de energieprestaties van een Klimaatcascade[©] in een referentiejaar kunnen worden voorspeld.

Het was een voorrecht en een genoegen dit onderzoek uit kunnen voeren met de zeer capabele en enthousiaste medewerkers van de TU Delft, Spraying Systems GmbH, de TU Eindhoven en Peutz. In het bijzonder worden genoemd Dr. Regina Bokel en Dr. Ir. Wim van der Spoel van de TU Delft, Dr.-Ing. J. Stefan Markus van Spraying Systems GmbH, Dipl.-Ing. Marija Trcka en Dr. Daniel Costola van de TU Eindhoven, en Ing. Harry Bruggema van Peutz.

Delft, maart 2012,
Ing. Ben Bronsema

Earth, Wind & Fire – Airconditioning zonder Ventilatoren
(III) Onderzoek Geo-Klimaatconcept[®]

INHOUDSOPGAVE

1. EARTH, WIND & FIRE – IN HET KORT	11
1.1 CONSIDERANS	11
1.2 GEBOUWGEBONDEN ENERGIEGEBRUIK VAN GEBOUWEN	11
1.3 EARTH, WIND & FIRE: NAAR EEN ENERGIENEUTRAAL GEBOUW	11
1.4 VENTECDAK [®]	12
1.5 KLIMAATCASCADE [®]	13
1.6 ZONNESCHOORSTEEN OF ZONNEFAÇADE [®]	13
1.7 EEN GEBOUW ALS KLIMAATMACHINE	13
1.8 POSITIONERING EN DEMARCATIES VAN HET ONDERZOEK	14
1.9 ORGANISATIESTRUCTUUR EN FINANCIERING	14
1.10 ONTWIKKELTRAJECT	15
1.11 RESULTATEN	17
1.12 DE TRIAS ENERGETICA	17
1.13 DEELSTUDIES	17
1.14 VOOR WELKE GEBOUWEN IS HET EARTH, WIND & FIRE CONCEPT BEDOELD?	17
1.15 VOOR WELKE ARCHITECTUUR KOMT HET EARTH, WIND & FIRE CONCEPT IN AANMERKING?	18
1.16 IS HET EARTH, WIND & FIRE EEN TOTAALCONCEPT?	18
1.17 IS HET EARTH, WIND & FIRE CONCEPT ALLEEN GESCHIKT VOOR NIEUWBOUW?	18
1.18 POSITIONERING VAN EARTH, WIND & FIRE IN DE KLIMAATTECHNIEK	18
1.19 SPIN-OFF EFFECTEN	18
1.20 VERANTWOORDING	19
1.21 PUBLICATIES	19
2. ARCHITECTUUR EN KLIMAATTECHNIEK.....	21
2.1 HISTORISCHE ONTWIKKELING	21
2.2 DE STATUS-QUO ANNO 2011	21
2.3 INTEGRATIE VAN DOMEINEN	21
2.6 ONDERZOEK EARTH, WIND & FIRE	22
2.7 UITDAGINGEN EN KANSSEN VOOR DE ARCHITECTUUR	22
2.8 DRIE SUBCONCEPTEN	23
2.9 INTRODUCTIE THEMA EARTH	23
2.8 INTRODUCTIE THEMA WIND	24
2.9 INTRODUCTIE THEMA FIRE	24
2.10 POSITIONERING EN SYSTEEMGRENZEN VAN HET ONDERZOEK	25
2.11 ENERGIEGEBRUIK EN DE KWALITEIT VAN HET BINNENMILIEU	25
2.12 FAALKOSTEN	26
3. KORTE INHOUD	27
3.1 LUCHTREINIGING EN ARCHITECTONISCHE INPASSING.....	27
3.2 PSYCHOMETRISCHE PRESTATIES EN REKENMODEL	28
3.3 LUCHTVERPLAATSING EN FYSISCH/CHEMISCHE ASPECTEN	31
3.4 MODELLEREN, SIMULEREN, KALIBREREN EN VALIDEREN	32
4. BEGRIPPEN, EENHEDEN EN SYMBOLEN	37
4.1 BEGRIPPEN	37
4.2 EENHEDEN EN SYMBOLEN RUIMTE EN TIJD	40
4.3 EENHEDEN EN SYMBOLEN WARMTE	41
4.4 EENHEDEN EN SYMBOLEN KLIMAATREGELING	41
4.5 EENHEDEN EN SYMBOLEN STROMINGSLEER	42
5. LUCHTREINIGING.....	43
5.1 SAMENVATTING	43
5.2 ALGEMEEN	43
5.3 DE KLIMAATCASCADE [®] ALS LUCHTWASSER	43

5.4	STOFFILTERS	44
5.5	HOOGWAARDIGE LUCHTFILTERS	44
5.6	ELEKTROSTATISCH LUCHTFILTER	44
5.7	CONCLUSIE	46
5.8	LUCHTFILTERPROTECTIE	46
6.	HET GEO-KLIMAATCONCEPT[®]	49
6.1	SAMENVATTING	49
6.2	DE KLIMAATCASCADE [®]	49
6.3	PRINCIPE	50
6.4	ENKEL CORRIDOR GEBOUW	51
6.5	ATRIUMGEBOUW	53
6.6	DUBBEL CORRIDOR GEBOUW –ZIE FIGUUR 6.8	56
6.7	HET GEO-KLIMAATCONCEPT [®] IN BESTAANDE GEBOUWEN	57
6.8	VERDERE UITWERKING	58
7.	KLIMAATCASCADE VOOR ADIABATISCHE KOELING	61
7.1	SAMENVATTING	61
7.2	WERKING	61
7.3	PASSIVE DOWNDRAUGHT EVAPORATIVE COOLING (PDEC)	62
7.4	BIBLIOGRAFIE	62
8.	KLIMAATCASCADE VOOR DIABATISCHE KOELING	67
8.1	INLEIDING EN SAMENVATTING	67
8.2	WERKING	67
8.3	DRIJVENDE KRACHTEN	67
8.4	CONCEPTUEEL PSYCHOMETRISCH ONTWERP KLIMAATCASCADE [®]	68
8.5	TEMPERATUURTRAJECTEN KLIMAATCASCADE [®]	70
8.6	TEMPERATUURTRAJECTEN WARMTEWISSELAAR	71
8.7	ENERGIEASPECTEN	72
8.8	POMPVERMOGENS EN JAARLIJKS ENERGIEGEBRUIK	74
8.9	KOUDEFACOR	74
8.10	DE KLIMAATCASCADE [®] VERSUS CONVENTIONELE KOELING	76
8.11	DEFINITIEVE ENERGIEBEREKENINGEN	77
9.	DE KLIMAATCASCADE ALS WARMTEWISSELAAR	79
9.1	INLEIDING	79
9.2	SAMENVATTING	79
9.3	KARAKTERISERING VAN HET SPROEIPATROON IN EEN KLIMAATCASCADE [®]	80
9.4	KARAKTERISERING VAN HET BESPROEIDE WANDOPPERVLAK	83
9.5	WARMTE- EN STOF OVERDRACHT IN EEN KLIMAATCASCADE [®]	85
9.6	VALSNELHEID WATERDRUPPELS	86
9.7	WERKZAME OPPERVLAK VAN DE DRUPPELVERZAMELING IN DE SPROEIZONE	93
9.8	VERGROTING VAN DE WERKZAME OPPERVLAKTE DOOR EEN FIJNER SPROEIPATROON	95
9.9	WERKZAME OPPERVLAK VAN DE BINNENWANDEN	97
9.10	WARMTEOVERGANGSCOËFFICIËNT IN DE SPROEIZONE	98
9.11	HET SPROEISPECTRUM	99
9.12	STOF OVERDRACHTSCOËFFICIËNT IN DE SPROEIZONE	100
9.13	WARMTEOVERGANGSCOËFFICIËNT WANDEN EN LUCHT	101
9.14	STOF OVERDRACHTSCOËFFICIËNT WANDEN EN LUCHT	102
10.	ANALYTISCH REKENMODEL KLIMAATCASCADE[®]	105
10.1	INLEIDING EN SAMENVATTING	105
10.2	MODEL VOOR WARMTE- EN MASSATRANSPORT	106
10.3	METHODE 1: MASSA- EN WARMTEBALANS OP BASIS VAN FYSISCHE BESCHOUWING	107
10.4	METHODE 2: MASSA- EN WARMTEBALANS OP BASIS VAN DIFFERENTIAALVERGELIJKINGEN	111

10.5	STOF- EN WARMTEOVERDRACHT TUSSEN WATER EN WATERDAMP.....	115
10.6	VOORBEELD KLIMAATCASCADE [®]	119
10.7	WARMTEOVERDRACHT MET DE WANDEN VAN DE KLIMAATCASCADE [®]	120
10.8	KOELPRESTATIE VAN DE KLIMAATCASCADE [®]	121
10.9	REFERENTIES.....	121
11.	KOELPRESTATIES KLIMAATCASCADES[®]	123
11.1	SAMENVATTING	123
11.2	METHODE.....	123
11.3	GEBOUW / KLIMAATTYPE ALPHA.....	123
11.4	GEBOUW / KLIMAATTYPE BETA	127
11.5	KOELTRAJECTEN IN MOLLIER DIAGRAM	129
11.6	SPROEISPECTRUM EN SPROEIDRUK	129
11.7	ENERGIEGEBRUIK EN KOUDEFACOR.....	130
11.4	TEMPERATUURREGELING	130
12.	DE KLIMAATCASCADE[®] BUITEN HET KOELSEIZOEN.....	131
12.1	INLEIDING EN SAMENVATTING.....	131
12.2	VERWARMING VAN DE VENTILATIELUCHT	131
12.3	PSYCHOMETRISCHE ASPECTEN	132
12.4	SYSTEEMVARIANT A: VERWARMING IN DE KLIMAATCASCADE [®] MET WARM SPROEIWATER.....	132
12.5	SYSTEEMVARIANT B: VOORVERWARMING MET ADIABATISCHE KOELING IN DE KLIMAATCASCADE [®]	136
12.6	SYSTEEMVARIANT C: EXTERNE VERWARMING BUITEN DE KLIMAATCASCADE [®]	140
12.7	NAVERWARMING.....	141
12.8	THERMISCHE TREK	142
12.9	CONTINUÏTEIT SYSTEEMDRUK	143
12.10	LUCHTWASSERFUNCTIE	143
12.11	LEGIONELLAPREVENTIE	143
12.12	CONDENSRIESICO.....	143
12.12	VOORLOPIGE CONCLUSIES M.B.T. DE KLIMAATCASCADE [®] BUITEN HET KOELSEIZOEN.....	145
13.	LUCHTVERPLAATSING EN -REGELING	147
13.1	SAMENVATTING	147
13.2	WINDDRUK.....	147
13.3	AERODYNAMISCHE TREK	148
13.4	HYDRAULISCHE TREK.....	152
13.5	THERMISCHE TREK	157
13.6	DRUKVERSCHILLEN DOOR THERMISCHE TREK SYSTEEMVARIANT A1 – ALPHA GEBOUW	162
13.7	THERMISCHE + HYDRAULISCHE TREK	163
13.8	DEBIETREGELING	164
13.9	DRUKVERSCHILLEN IN HET GEBOUW	166
13.10	INVLOED VAN OPEN RAMEN	166
13.10	HULPVENTILATOR.....	167
14.	FYSISCH / CHEMISCHE ASPECTEN	171
14.1	INLEIDING EN SAMENVATTING	171
14.2	WATERVALEFFECT	171
14.3	IONISATIE.....	171
14.4	OZON.....	173
14.5	LEGIONELLAPREVENTIE	174
15.	CONCEPT-UITWERKING EN DIMENSIONERING.....	177
15.1	INLEIDING	177
15.2	KLIMAATCASCADE [®]	177
15.3	SPROEISYSTEEM.....	178
15.4	DRUKOPBOUW IN EEN KLIMAATCASCADE [®]	179

15.5	TOTALE DRUKOPBOUW VOOR HET LUCHTTOEVOERSYSTEEM	179
15.6	INFRASTRUCTUUR VAN DE LUCHTVERDELING	179
15.7	DEBIETREGELING	179
16.	NUMERIEKE STROMINGSSIMULATIE KLIMAATCASCADE[®].....	181
16.1	SAMENVATTING	181
16.2	INLEIDING CFD	181
16.3	BEPERKINGEN VAN CFD	182
16.4	VERBAND MET ANDERE MODELLEN.....	182
16.5	EXCEL REKENMODEL, CFD MODEL EN SPROEIERSELECTIE.....	183
16.6	VOORSELECTIE VAN DE SPROEIERS	183
16.7	SPROEIERSELECTIE DOOR SPRAYING SYSTEMS	185
16.8	METING VAN DE DRUPPELGROOTTEVERDELING	186
16.9	DRUPPELGROOTTEVERDELING EN DRUPPELSTATISTIEK	186
16.10	HOW DOES THE CFD CODE HANDLE MILLIONS OF DROPLETS?	189
16.11	HET CFD SIMULATIEMODEL	191
16.12	CFD SIMULATIES FYSIEK ONDERZOEK MODEL	191
16.13	CFD SIMULATIES 8 VERDIEPINGEN MODEL	199
16.14	WEERGAVE IN MOLLIER DIAGRAM	205
16.15	VERLOOP VAN DE LUCHTTEMPERATUUR OVER DE HOOGTE VAN DE KLIMAATCASCADE [®]	206
16.16	DRUKOPBOUW IN DE KLIMAATCASCADE [®]	206
16.17	CONCLUSIES	206
16.18	DETAILINFORMATIE CFD SIMULATIES.....	207
16.19	VERVOLGONDERZOEK	207
17.	FYSIEKE TESTOPSTELLING.....	209
17.1	SAMENVATTING	209
17.2	INLEIDING	210
17.3	LOCATIE EN AFMETINGEN VAN DE TESTOPSTELLING	211
17.4	ONTWERP VAN DE TESTOPSTELLING.....	212
17.5	INSTRUMENTATIE	214
17.6	MEETPROGRAMMA.....	215
17.7	VARIANTEN B1 – GEBOUW/KLIMAATMODEL BETA – ONTWERP ZOMERCONDITIES	215
17.8	VARIANTEN B1 T/M B5 – GEBOUW / KLIMAATMODEL BETA – ZOMER EN WINTERCONDITIES	221
17.9	MEETSESSIES A1 T/M A5 - GEBOUW/KLIMAATMODEL ALPHA – ZOMER EN WINTERCONDITIES.....	225
17.10	CONDENSRIESICO IN HET GEBOUW	231
17.11	DE KLIMAATCASCADE IN EEN VORSTPERIODE	232
18.	VALIDATIE VAN DE SIMULATIEMODELLEN.....	235
18.1	INLEIDING EN SAMENVATTING.....	235
18.2	UITGANGSPUNTEN.....	236
18.3	EXCEL REKENMODEL VARIANTEN B1 T/M B5.....	237
18.4	EXCEL REKENMODEL VARIANTEN A1 T/M A5	241
18.5	EXCEL REKENMODEL VARIANTEN B1/1 T/M B1/4 – VERHOOGDE WATER/LUCHTFACTOR	246
18.6	VERGELIJKING REKEN- EN SIMULATIERESULTATEN MET DE METINGEN.....	247
18.7	NUMERIEK SIMULATIEMODEL CFD	249
18.8	VERVOLGONDERZOEK	249
19.	DYNAMISCH SIMULATIEMODEL ESP-R	251
19.1	SAMENVATTING	251
19.2	INLEIDING ALGEMEEN	251
19.3	INLEIDING DYNAMISCH SIMULATIEMODEL ESP-R	252
19.4	ESP-R MODEL KLIMAATCASCADE [®]	253
19.5	THERMISCH NETWERK	253
19.6	STROMINGSNETWERK.....	254
19.7	UITGEVOERDE SIMULATIES	254

Earth, Wind & Fire – Airconditioning zonder Ventilatoren
(III) Onderzoek Geo-Klimaatconcept[®]

19.8	JAARLIJKSE ENERGIEPRESTATIES.....	254
19.9	CONCLUSIES.....	254
19.10	VERVOLGONDERZOEK	254
20.	INDIRECTE ADIABATISCHE VERDAMPINGSKOELING	255
20.1	SAMENVATTING	255
20.2	DIRECTE ADIABATISCHE VERDAMPINGSKOELING.....	255
20.3	INDIRECTE ADIABATISCHE VERDAMPINGSKOELING.....	255
20.4	INDIRECTE DAUWPUNTSKOELING (STATIC COOLING)	255
20.5	BEPERKINGEN EN CONCLUSIES DAUWPUNTSKOELING	257
21.	REFERENTIES	259
22.	BIJLAGE: MODEL VOOR WARMTE- EN MASSATransport IN DE KLIMAATCASCADE	265

Earth, Wind & Fire – Airconditioning zonder Ventilatoren
(III) Onderzoek Geo-Klimaatconcept[®]

1. EARTH, WIND & FIRE – IN HET KORT

1.1 Considerans

Energiebesparing in de gebouwde omgeving is een belangrijke opdracht voor de bouwsector. De formele doelstelling binnen de EU is (EP en EC 2010)

“As of 31 December 2020 new buildings in the EU will have to consume “nearly zero” energy and the energy will be “to a very large extent” from renewable sources”

Er mag van worden uitgegaan dat het hier gaat om het gebouwgebonden energiegebruik, waarover in Nederland al in 2008 tussen de belangrijkste actoren in de bouw een soortgelijke doelstelling werd geformuleerd in het zgn. Lenteakkoord. In Europees verband is verder de “20-20-20” afspraak gemaakt, die inhoudt dat in 2020 20% van het energiegebruik in de gebouwde omgeving duurzaam zal worden opgewekt (EP en EC 2009).

Energiebesparing wordt in Nederland, als lid van de Europese Unie, gereguleerd via de Energy Performance of Buildings Directive (CEN 2006). De Energie Prestatie Coëfficiënt van gebouwen EPC wordt regelmatig aangescherpt, en het is in toenemende mate de installatietechniek die te hulp wordt geroepen om hieraan te kunnen voldoen. Dit heeft in de loop van de ontwikkeling geresulteerd in steeds complexere, kwetsbare en onderhoudsgevoelige klimaatinstallaties. Dergelijke installaties leveren vaak niet het gezonde binnenklimaat dat ervan verwacht mag worden en een eenvoudige en intuïtief begrijpelijke bediening wordt door de complexiteit bemoeilijkt. Een saillant voorbeeld hiervan is de zgn. balansventilatie in de woningbouw.

1.2 Gebouwgebonden energiegebruik van gebouwen

Het gebouwgebonden energiegebruik van een gebouw wordt in belangrijke mate vanuit het ontwerp bepaald. De belangrijkste, inter-gerelateerde, elementen van het energetisch ontwerp zijn:

- A. De gebouwschil: Gevelfactor, glaspercentage, bouwfysische kwaliteit;
- B. De klimaatregeling: Klimaatzone, klimaateisen, klimaatstelsel;
- C. Het verlichtingssysteem: Lichtniveaus, daglicht/kunstlicht.

In gebouwssimulatiemodellen wordt van deze gebouwkenmerken uitgegaan, en voor het beoogde “*nearly zero energy*” gebouw zijn dit de belangrijkste parameters.

Voor het energiegebruik in de praktijk spelen echter ook de volgende factoren een rol:

- D. De gebruiker: Personen- en automatiseringsdichtheid, gebruikersgebonden apparatuur;
- E. Het gebruikersgedrag: Bedrijfstijden, milieumentaliteit;
- F. De kwaliteit van het technisch onderhoud.

Volgens recent onderzoek kunnen deze factoren in gunstige gevallen een vermindering van het energiegebruik opleveren van 20...30%, maar in ongunstige gevallen ook leiden tot een verhoging met 50...100%, beide cijfers gerelateerd aan een gemiddeld gebouw. (Heller, Jonathan en Heater, Morgan 2011). Het “*nearly zero energy*” concept vraagt dus wel om een nauwkeuriger definitie.

Het onderzoek “*Earth, Wind & Fire – Airconditioning zonder ventilatoren*” is gericht op element B, de klimaatregeling, voor veel gebouwen de grootste energiegebruiker.

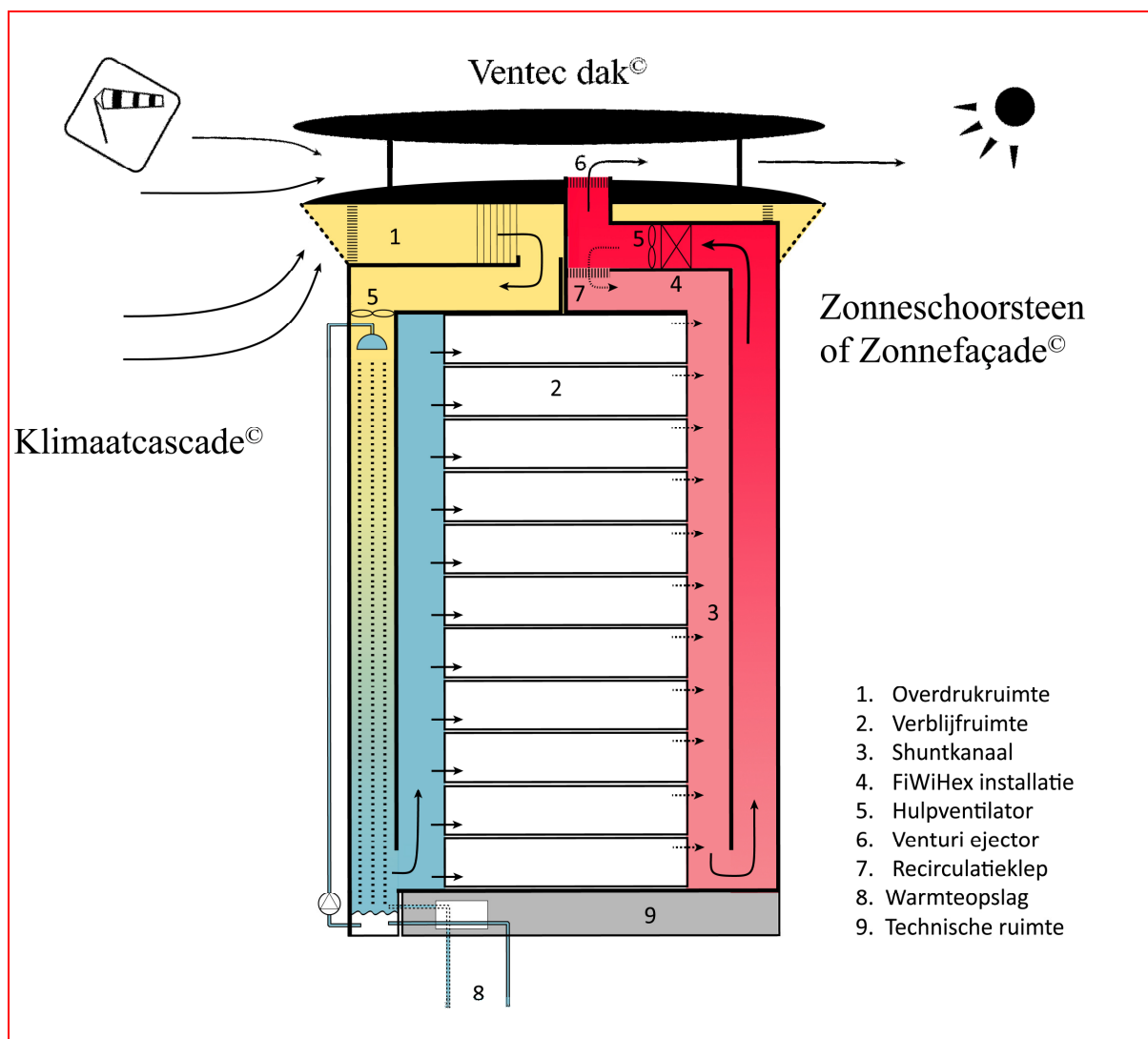
1.3 Earth, Wind & Fire: naar een energieneutraal gebouw

Het *Earth, Wind & Fire* concept zorgt voor een gezond, behaaglijk en productief binnenklimaat in gebouwen. De omvang van de installatietechniek wordt tot een minimum beperkt, het energiegebruik wordt drastisch teruggebracht, en de benodigde restenergie wordt door het gebouw zelf opgewekt. Architectuur, bouwmasse, constructies en klimaatvoorzieningen werken zodanig samen dat een bouwwerk, met behoud van architectonische en functionele kwaliteiten, wordt getransformeerd tot een klimaatmachine, geactiveerd door de natuurlijke hulpbronnen van zon, wind, geothermische energie en zwaartekracht: “*AIRCONDITIONING ZONDER VENTILATOREN*”.

Zon, wind, geothermische energie en zwaartekracht kunnen op verschillende manieren worden ingezet voor de klimaatregeling van gebouwen. Na een evaluatie van verschillende mogelijkheden zijn drie subconcepten geselecteerd die in eerste instantie afzonderlijk zijn ontwikkeld en geoptimaliseerd, maar uiteindelijk in een totaalconcept van klimaatregeling een symbiose gaan vormen –zie figuur 1.1

1.4 Ventecdak^{©1}

Het Ventecdak[©] benut positieve winddrukken om ventilatielucht via de Bernoulli-injector en de Klimaatcascade[©] aan het gebouw toe te voeren. Negatieve winddrukken worden gebruikt om het gebouw via de Zonneschoorsteen en de Venturi-ejector af te zuigen. Met dit concept wordt gebruik gemaakt van de goede luchtkwaliteit op grotere hoogte, en door de horizontale scheiding tussen toevoerlucht en afvoerlucht wordt kortsluiting tussen beide luchtstromingen voorkomen.



Figuur 1.1 - Principes Earth, Wind & Fire concept

In de overdrukkamer worden windturbines aangebracht, waarmee hogere vermogenscoëfficiënten kunnen worden gerealiseerd dan met vrijstaande turbines. Potentiële geluidsproblemen zijn door de inpandige

¹ Van Vent en Tect, Latijn voor Wind en Dak, maar ook Ventilation en Technology

situering gemakkelijk oplosbaar zijn, en het onderhoud kan binnen het gebouw worden uitgevoerd. Als onderdeel van de technische gebouwinstallaties is voor deze windturbines geen omgevingsvergunning vereist. Het vermogen van deze turbines is afhankelijk van de windsnelheid, die stijgt met toenemende gebouwhoogte, en varieert van ca 300 tot 750 kWh.a⁻¹ per m² rotoroppervlak bij gebouwhoogten van respectievelijk 25 tot 65 m.

Op het bovendak wordt als dakbedekking dunne film PV folie aangebracht dat ondanks een lager rendement een betere kosteneffectiviteit heeft dan zonnepanelen. Anno 2011 is hiermee in het referentiejaar NEN 5060:2008 een energieopbrengst van ca 100 W.m⁻² bereikbaar.

1.5 Klimaatcascade[©]

Kern van het klimaatsysteem is de Klimaatcascade[©], een warmtewisselaar met een zeer groot actief oppervlak, uitgevoerd als bouwkundige schacht. In de Klimaatcascade[©] wordt de ventilatielucht al naar behoefte wordt gekoeld of verwarmd, gedroogd of bevochtigd. Aan de top wordt zomer en winter via sproeiers water van ca 13⁰C toegevoerd, waarbij door impulsoverdracht van druppels op lucht de neerwaartse luchtbeweging wordt versterkt. Deze aerodynamische druk maakt tezamen met de hydraulische druk en de neerwaartse thermische trek ventilatoren overbodig. De benodigde koude wordt aan de bodem onttrokken, en warmte wordt direct of indirect door de zonneschoorsteen geleverd. Door de hoge warmteoverdrachtscoëfficiënt van de vallende druppels en het grote actieve oppervlak van het miljoenen druppels tellende sproeispectrum werkt de Klimaatcascade[©] met een extreem klein temperatuurverschil tussen lucht en water.

1.6 Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[©]

Ventilatie lucht wordt afgezogen via de Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[©] waarin tevens zonne-energie wordt geoogst, die wordt gebruikt voor verwarming van het gebouw in het stookseizoen. Met behulp van een FiWiHex warmtewisselaar aan de top van de zonneschoorsteen wordt de zonnwarmte overgedragen op circulerend water en in de bodem onder het gebouw opgeslagen. De Venturi-ejector in het Ventecdak[©] dient mede om het drukverlies van de FiWiHex warmtewisselaar te compenseren.

De thermische prestatie van een zonneschoorsteen, bij een bepaalde gebouwhoogte hoofdzakelijk bepaald door de breedte, wordt minimaal afgestemd op het af te zuigen luchtdebiet bij referentiecondities, die arbitrair zijn vastgesteld op 20⁰C buitentemperatuur bij een stralingsflux van 400 W.m⁻². Bij toepassing van een goede glassoort ligt het te behalen jaarrendement in de orde van 60%. De totale straling op een zuid georiënteerd vlak bedraagt in het referentiejaar NEN 5060:2008 ca 860 kWh.m⁻² waardoor per m² zonneschoorsteen een opbrengst van ca 500 kWh.m⁻² kan worden verwacht.

Het is mogelijk een zonneschoorsteen te ontwerpen op basis van de bijdrage die deze moet leveren aan het jaarlijks warmtegebruik. Voor de morfologie van een zonneschoorsteen zijn vele varianten denkbaar, waarbij de gevelbedekkende Zonnefaçade[©] een ultieme uitvoeringsvorm is.

1.7 Een gebouw als klimaatmachine

Energiebesparing in gebouwen is tot dusver het domein geweest van de bouwfysica en de installatietechniek. Beide hebben ontegenzeggelijk grote prestaties op dit gebied geleverd. Maar de architectuur, de discipline met de grootste impact op de gebouwde omgeving, is hierbij grotendeels afzijdig gebleven.

Het Ventecdak[©], de Klimaatcascade[©] en de Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[©] zijn elk op zich belangrijke elementen voor architectonische expressie. Klimaattechniek is niet meer ondergeschikt aan architectuur maar is architectuur. Het ontwerpen van een gebouw als klimaatmachine is hierdoor ook een taak geworden van de architect, die daarmee tevens mede verantwoordelijk wordt voor het binnenklimaat en de energiehuishouding. Een onvermoed intellectueel en artistiek potentieel wordt hierdoor ingeschakeld voor een intrinsiek integraal ontwerp.

1.8 Positionering en demarcaties van het onderzoek

Beperking van het energiegebruik van gebouwen is al decennialang onderwerp van onderzoek en er zijn op dit gebied belangrijke resultaten geboekt. Deze zijn tot op heden in hoofdzaak bereikt door bouwfysische verbeteringen van de gebouwschil en efficiencyverbetering van klimaatinstallaties. De grenzen van de mogelijkheden op deze terreinen lijken echter in zicht te zijn. Integratie van responsieve bouwelementen en klimaatinstallaties wordt beschouwd als de voornaamste strategie voor het realiseren van verdere energiebesparingen (IEA Annex 44, 2010) –zie hoofdstuk 8.

Het Earth, Wind & Fire onderzoek richt zich op energiebesparing door de passieve en actieve benutting van de omgevingsenergie van zon, wind en aardmassa voor het realiseren van een hoogwaardige klimaatregeling, stap 2 van de *Trias Energetica*, zie paragraaf 1.11. De voorzieningen voor de klimaatregeling worden hierbij niet met behulp van technische installaties aan het gebouw toegevoegd, maar in de architectuur van het gebouw geïntegreerd – zie paragraaf 1.6 en hoofdstuk 2. Een combinatie met responsieve bouwelementen uit het repertoire van IEA Annex 44 ligt wel voor de hand, maar is geen vereiste. Tabel 8.1 brengt de positionering en de demarcaties van het onderzoek in beeld.

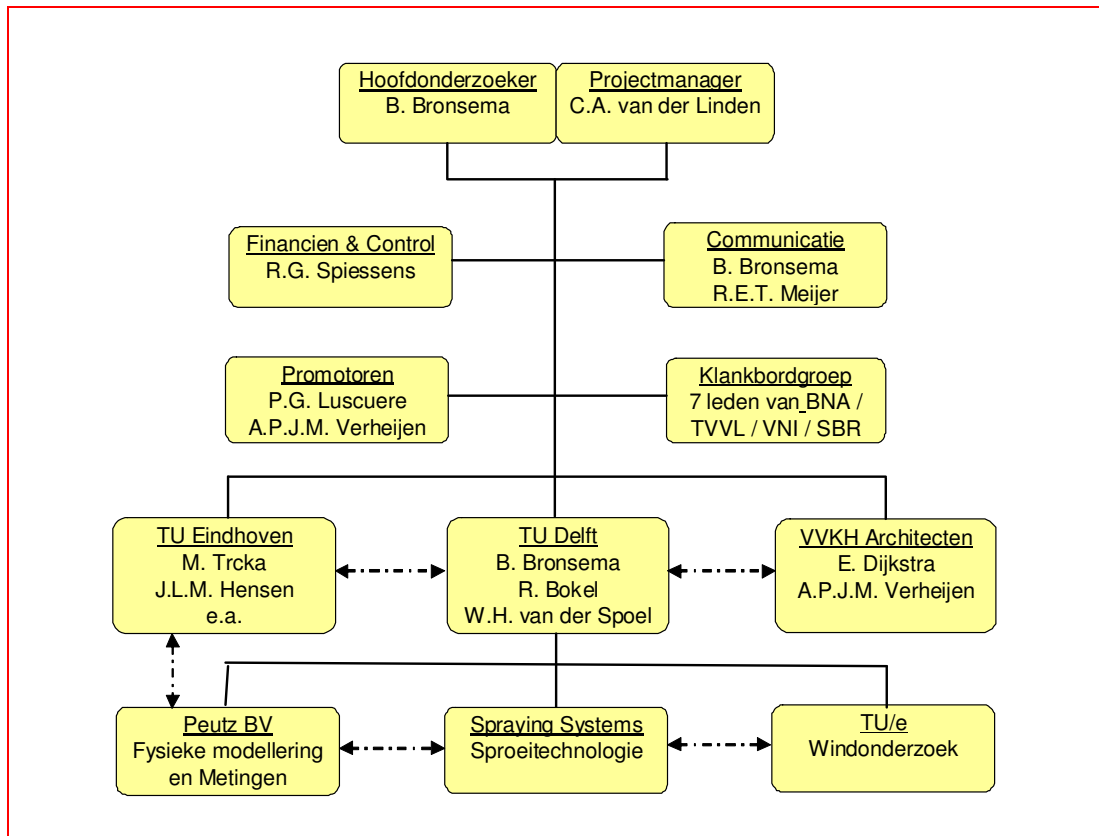
		Passief	Actief
Geïntegreerd	Earth, Wind & Fire	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ventecdak[©] ▪ Bernoulli-injector ▪ Venturi-ejector ▪ Zonneschoorsteen ▪ Zonnefaçade[©] ▪ Geo-Klimaatconcept[©] 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Klimaatcascade[©] ▪ Windturbines in Ventecdak[©] ▪ PV folie op Ventecdak[©] ▪ Zonneschoorsteen ▪ Zonnefaçade[©] ▪ Warmteopslag
	IEA Annex 44	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Geïntegreerde gevels ▪ Bouwdeelactivering ▪ Grondluchtcollectoren ▪ Dynamische isolatiesystemen ▪ Phase Change Materials ▪ Geothermische energie 	
Toegevoegd			<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fotovoltaïsche zonnepanelen ▪ Thermische zonnepanelen ▪ Vrijstaande windturbines

Tabel 1.1 – Positionering en demarcaties van het onderzoek

1.9 Organisatiestructuur en Financiering

Earth, Wind & Fire is een samenwerkingsproject van de TU Delft, de TU Eindhoven en VVKH Architecten. Hoofdonderzoeker van het project is Ing. Ben Bronsema, *Fellow REHVA*², geassisteerd door wetenschappelijke medewerkers van de faculteiten Bouwkunde van de TUD en de TU/e. Zie figuur 1.2.

² REHVA – Federation of European Heating, Ventilation and Air-conditioning Associations



Figuur 1.2 – Organisatiestructuur Project Earth, Wind & Fire

1.10 Ontwikkeltraject

Het Ventedak[®], de Klimaatcascade[®] en de Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[®] zijn ontwikkeld op basis van modelleren, simuleren, kalibreren en valideren, zie figuur 1.3.

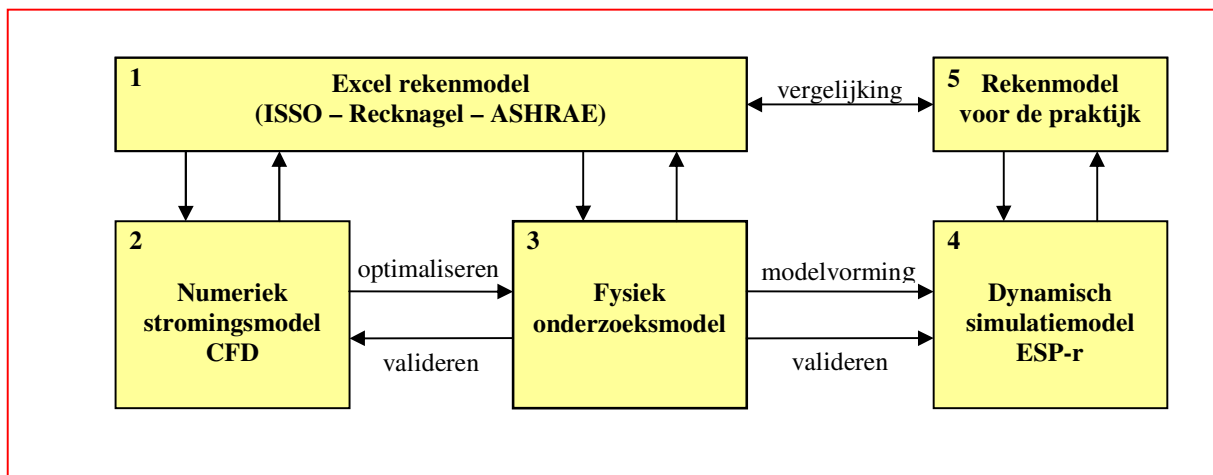
[1] De ontwikkeling van de verschillende concepten is begonnen met het maken van eenvoudige analytische modellen, die een eerste indruk gaven van de haalbaarheid en de potenties van het betreffende concept. Dergelijke modellen staan dicht bij de ingenieurspraktijk en maken een snelle evaluatie van alternatieven mogelijk, mede op basis van ervaring en intuïtie. Met behulp van wetenschappelijke en technische gegevens uit het repertoire van de klimaatingenieur werden wiskundige beschrijvingen gegeven van de fenomenen van warmteoverdracht en stromingen op macroniveau. Analytische modellen zijn opgesteld door de hoofdonderzoeker in samenwerking met wetenschappelijke medewerkers van de TU Delft.

[2] Met behulp van numerieke stromingsmodellen in CFD (Computational Fluid Dynamics) zijn vervolgens virtuele prototypes van de concepten gemaakt die inzicht gaven in de warmteoverdracht en stromingspatronen op microniveau. Hierdoor konden de fysische effecten nader worden geanalyseerd en werd met behulp van simulatietechnieken nagegaan of en in hoeverre modellen konden worden opgeschaald naar bouwdeelen op ware grootte. De CFD simulaties voor het Ventedak[®] zijn uitgevoerd door specialisten van de TU Eindhoven. CFD simulaties van de Klimaatcascade[®] zijn uitgevoerd door specialisten van Spraying Systems GmbH.

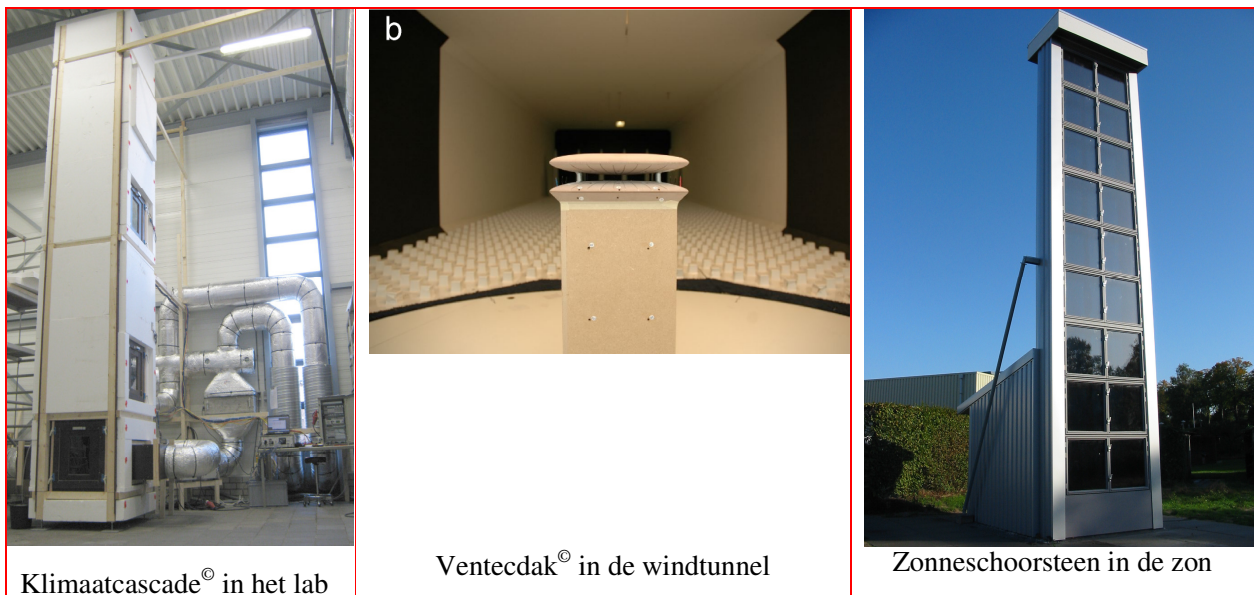
[3] De analytische en de CFD simulatiemodellen zijn gekalibreerd en gevalideerd met behulp van fysieke onderzoeksmodellen, waarin de werkelijk optredende fenomenen van warmteoverdracht en stromingen zijn gemeten. De fysieke onderzoeksmodellen zijn ontworpen door de hoofdonderzoeker en gebouwd en geïnstrumenteerd door Peutz; zie figuur 1.4.

[4] Met behulp van een dynamische simulatiemodel kunnen de energieprestaties van de Klimaatcascade[®] en de Zonneschoorsteen afzonderlijk en van een gebouw als geheel worden gesimuleerd in een wisselend buitenklimaat bij de klimaatomstandigheden van het referentiejaar NEN 5060:2008. Dynamische simulatiemodellen in ESP-r zijn ontworpen door specialisten van de unit Building Physics and Systems van de TU Eindhoven. De simulaties zijn gekalibreerd en gevalideerd op basis van de metingen in de fysieke modellen waardoor ze een hoge mate van betrouwbaarheid hebben verkregen.

[5] Een rekenmodel voor de praktijk, gebaseerd op de onderzoeksresultaten, geeft aan architecten en ingenieurs de mogelijkheid om de concepten voor concrete bouwprojecten globaal uit te werken en te dimensioneren. In het kader van het onderzoek is een gebruiksvriendelijk rekenmodel ontwikkeld voor de zonneschoorsteen, een dominant architectonisch bouwdeel. In de conceptuele fase kan de architect met dit model de afmetingen van een zonneschoorsteen variëren, en direct de hierbij behorende prestaties aflezen. Voor het conceptueel ontwerp van een Venteddak[®] en een Klimaatcascade[®] zijn globale ontwerpgegevens elementen in het definitief ontwerp.



Figuur 1.3 – Modelleren – Simuleren – Kalibreren – Valideren



Figuur 1.4 – Fysieke modelmetingen

1.11 Resultaten

Het onderzoek heeft uitgewezen dat airconditioning zonder ventilatoren mogelijk is en dat met dit concept voor een belangrijk deel aan de primaire doelstelling, het realiseren van een energieneutraal gebouw, kan worden voldaan.

Een bestaand kantoorgebouw in Amsterdam is op basis van het *Earth, Wind & Fire* concept virtueel herontworpen. Voor dit gebouw wordt met behulp van het dynamisch simulatiemodel het jaarlijkse energiegebruik in een referentie klimaatjaar bepaald en vergeleken met de huidige situatie. Het onderzoek is op dit onderdeel nog niet afgesloten, maar de verwachting is dat het nagestreefde “*nearly zero energy use*” binnen bereik ligt. Bovendien is met deze *case study* aangetoond dat het concept niet alleen voor nieuwbouw maar ook voor de bestaande bouwvoorraad kan worden toegepast.

1.12 De Trias Energetica

Energiebesparing wordt idealiter gerealiseerd volgens de Trias Energetica (Lysen, Erik H. 1996), een begrip waarmee de volgorde van drie stappen naar een zo duurzaam mogelijke energievoorziening wordt aangeduid:

1. Beperk de vraag naar energie door toepassen van vraagbeperkende maatregelen;
2. Gebruik zoveel mogelijk duurzame energiebronnen om de energie die nog nodig is op te wekken;
3. Zet efficiënte technieken in om het resterende energieverbruik op te wekken.

Het onderzoek *Earth, Wind & Fire* is in hoofdzaak gericht op het tweede element van de Trias Energetica. De eerste stap, beperking van het energiegebruik, o.a. door optimalisatie van de gebouwschil, gaat hieraan vooraf. De derde stap, inzet van efficiënte technieken om het resterende energiegebruik op te wekken, wordt gerealiseerd met behulp van de Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[©] en het Ventecdak[©]. Omdat het energiegebruik bij toepassing van het *Earth, Wind & Fire* concept gering is, is energieneutraliteit van gebouwen gemakkelijker te realiseren dan bij conventionele airconditioning.

1.13 Deelstudies

Het onderzoeksproject “Earth, Wind & Fire” is onderverdeeld in de volgende deelonderzoeken:

- *Earth, Wind & Fire* – (I) Onderzoek Zonneschoorsteen en Zonnefaçade[©]
- *Earth, Wind & Fire* – (II) Onderzoek Natuurlijke Ventilatie, Wind en Ventecdak[©]
- *Earth, Wind & Fire* – (III) Onderzoek Klimaatcascade[©] en Geo-Klimaatconcept[©]
- *Earth, Wind & Fire* – (IV) Binnenmilieu: Symbiose van Architectuur en Klimaattechniek

De deelrapporten (I) t/m (III) geven een gedetailleerd verslag van de drie deelonderzoeken en richtlijnen voor het ontwerp van de responsieve bouwdelen, respectievelijk (I) de Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[©], (II) het Ventecdak[©] en (III) de Klimaatcascade[©].

Deel (IV) gaat in op de noodzakelijke interactie tussen architectuur en klimaattechniek, en geeft de hoofdlijnen weer van de delen (I) t/m (III). In dit deel wordt tevens een *case study* gepresenteerd. De vier delen zijn zelfstandige eenheden en afzonderlijk te lezen.

1.14 Voor welke gebouwen is het Earth, Wind & Fire concept bedoeld?

De luchtstromingen voor de toevoer van ventilatielucht via de Klimaatcascade[©] en de afvoer hiervan via de Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[©], worden veroorzaakt door drukverschillen. Deze komen tot stand door gewichtsverschillen tussen koudere en warmere lucht en zijn evenredig met de hoogte van Klimaatcascade[©] en Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[©]. Omdat het om relatief kleine temperatuur- en drukverschillen gaat is een bepaalde minimum hoogte van het gebouw noodzakelijk. Het onderzoek gaat uit van gebouwen van minimaal 4 bouwlagen à 3,5 meter³.

³ In de Angelsaksische literatuur vaak aangeduid met “*Low-Rise Buildings*”

Het in het onderzoek ontwikkelde Geo-Klimaatconcept[©] betreft een centrale voorziening voor luchtbehandeling van gebouwen en is daardoor minder geschikt voor de woningbouw. Verschillende elementen zijn evenwel goed bruikbaar voor (gestapelde) woningbouw.

1.15 Voor welke architectuur komt het Earth, Wind & Fire concept in aanmerking?

Het Earth, Wind & Fire concept kan in elke architectuurstijl worden toegepast, klassiek, modern, internationaal, postmodern, bio-klimatisch, klimaatactief etc. Het is de architect die vorm geeft aan de uitwerking van het concept.

Het Earth, Wind & Fire concept, toegepast in combinatie met bio-klimatische of klimaatactieve architectuur met een hoge BREEAM-NL of GreenCalc milieuscore, biedt de grootste milieuvoordelen. Een maximale milieuprestatie van het gebouw gaat dan gepaard met optimale condities van het binnenmilieu. Deze combinatie kan het beste worden aangeduid als “*klimaatactieve architectuur van de 2^e generatie*”.

1.16 Is het Earth, Wind & Fire een totaalconcept?

Het in het onderzoek ontwikkelde Geo-Klimaatconcept[©] is een totaalconcept. Dit houdt niet in dat de responsieve bouwdeelen die in het onderzoek ontwikkeld zijn alleen in combinatie kunnen worden toegepast. Een *stand alone* toepassing van een Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[©], een Ventecdak[©] of een Klimaatcascade[©] in kantoorgebouwen is goed mogelijk.

1.17 Is het Earth, Wind & Fire concept alleen geschikt voor nieuwbouw?

Nieuwbouw kan uiteraard volledig op het Earth, Wind & Fire concept worden ontworpen. Bij grote renovaties van bestaande gebouwen kan het concept echter eveneens worden toegepast, zowel gedeeltelijk als in zijn geheel. Een Ventecdak[©] en een Zonneschoorsteen zijn mogelijke toevoegingen aan een gebouw. Bestaande gevels kunnen worden omgebouwd tot Zonnefaçades[©]. Bestaande installatieschachten kunnen worden omgebouwd tot Klimaatcascades[©]. De case-study – zie deelrapport (IV)- geeft hiervan een voorbeeld.

Dit aspect kan mede een rol spelen bij de keuze tussen afbraak of renovatie van bestaande gebouwen. Veelal wordt intuïtief gekozen voor renovatie, maar onderzoek wijst uit dat dit met betrekking tot milieuprestaties niet altijd vanzelfsprekend hoeft te zijn (Verbeeck, Griet et al 2011).

1.18 Positionering van Earth, Wind & Fire in de klimaattechniek

Het in het onderzoek ontwikkelde Geo-Klimaatconcept[©] vervangt de centrale mechanische luchtbehandeling van een gebouw. Decentrale voorzieningen voor verwarming en koeling op werkplekniveau, zoals klimaatplafonds, ventilatorconvectoren, radiatoren e.d. kunnen uitstekend worden gecombineerd met het Geo-Klimaatconcept[©] –zie ook hoofdstuk 13 van deelrapport (IV).

1.19 Spin-off effecten

Drijfveer van het onderzoek *Earth, Wind & Fire* was het terugdringen van het energiegebruik in de gebouwde omgeving op de marsroute naar een energieneutraal gebouw. Het onderzoek heeft daarnaast enkele belangrijke *spin-off* effecten, te weten:

- De architect wordt medeplichtig en medeverantwoordelijk voor het klimaatsysteem en het energiegebruik – zie ook hoofdstuk 2 en hoofdstuk 5 van deelrapport (IV).
- Door de integrale samenwerking van architect en ingenieur op het gemeenschappelijke Earth, Wind & Fire platform krijgt het ontwerpproces een hogere dimensie – zie ook hoofdstuk 5 van deelrapport (IV).
- Het kwaliteitsniveau van gebouwen zal hierdoor verbeteren en de faalkosten in de bouw worden gereduceerd – zie paragraaf 2.10 van deelrapport (IV).

- Door het vermijden van potentieel vervuilde klimaatinstallaties, het ontbreken van installatiegeluid en het vermijden van lage temperaturen bij de luchttoevoer, wordt een gezonder binnenklimaat in gebouwen gerealiseerd – zie hoofdstuk 6 van deelrapport (IV).
- Sick-Building symptomen verdwijnen met als gevolg een hogere productiviteit op de werkplek – zie hoofdstuk 7 van deelrapport (IV).
- De bouw- en exploitatiekosten van gebouwen worden gereduceerd. Eén en ander zal in een vervolgstudie nader worden gekwantificeerd.

1.20 Verantwoording

Het onderzoeksproject is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie; regeling Energie Onderzoek Subsidie: lange termijn (artikel 18b).

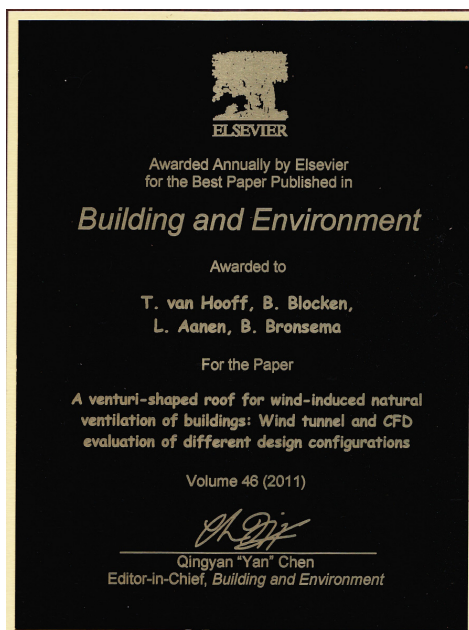
1.21 Publicaties

2. De resultaten van het onderzoek zullen in wetenschappelijke- en vaktijdschriften worden gepubliceerd. Ultimo 2011 zijn de volgende publicaties verschenen:

[1] Hooff T. van, B. Blocken B., Aanen L. en Bronsema B.; 'A venturi-shaped roof for wind-induced natural ventilation of buildings: wind tunnel and CFD evaluation of different design configurations', in: Building and Environment, published online 15-2-2011 (Best Paper Award)

[2] Blocken B., Hooff T. van, Aanen L., en Bronsema B.; 'Computational analysis of the performance of a venturishaped roof for natural ventilation: venturi-effect versus wind-blocking effect', in: Computers and Fluids, published online 26-04-2011

[3] Hooff T. van, B. Blocken B., Aanen L. en Bronsema B. Numerical analysis of the performance of a venturi-shaped roof for natural ventilation: influence of building width. Journal of Wind Engineering, published online



Earth, Wind & Fire – Airconditioning zonder Ventilatoren
(III) Onderzoek Geo-Klimaatconcept[®]

2. ARCHITECTUUR EN KLIMAATTECHNIEK

2.1 Historische ontwikkeling

Eeuwenlang heeft de architectuur rekening gehouden met het klimaat op de locatie van gebouwen, en werden gebouwen zorgvuldig ontworpen op de toetreding van licht en lucht en het weren dan wel toelaten van zonnewarmte. Integraal ontwerpen in optima forma!

In de loop van de geschiedenis hebben architectuur en klimaattechniek zich echter ontwikkeld als strikt gescheiden domeinen. De rol van de architect als integraal ontwerper is hierdoor uitgehold. De ontwikkeling van de klimaattechniek vanaf het einde van de 19^e eeuw heeft architecten een grote ontwerpvrijheid gegeven, maar de kunst en wetenschap om gebouwen te ontwerpen in de context van verwarming, ventilatie, verlichting en koeling zijn daardoor grotendeels verloren gegaan. Gebouwen zijn hierdoor geheel afhankelijk geworden van installaties en energie. Ironisch genoeg is de tevredenheid van gebruikers over het binnenklimaat hieraan niet evenredig. Het *Sick Building Syndrome* heeft zich vooral gemanifesteerd in gebouwen met omvangrijke klimaatinstallaties.

Architecten hebben door de gescheiden ontwikkeling van de klimaattechniek en hun ondeskundigheid op dit gebied niet zelden weerstand tegen de installatietechniek gekregen hetgeen op gespannen voet staat met een integraal ontwerpproces.

2.2 De status-quo anno 2011

De bouw- en installatietechniek heeft in de afgelopen kwart eeuw een uitstekende prestatie geleverd door een gezonder, behaaglijker, productiever en veiliger binnenmilieu te realiseren bij een aanzienlijk lager energiegebruik dan voorheen (Bronsema 2002).

De wettelijk voorgeschreven energieprestatie van gebouwen, wordt geleidelijk steeds aangescherpt –zie hoofdstuk 5 van deelrapport (IV). Bouwfysische mogelijkheden raken langzamerhand uitgeput en energiebesparing wordt in toenemende mate gerealiseerd met behulp van steeds complexere technieken en installaties. Deze zijn niet altijd dienstbaar zijn aan het comfort, de tevredenheid en de gezondheid van de gebruiker en drukken zwaar op de exploitatie van gebouwen. Bovendien kunnen vraagtekens worden geplaatst bij de intrinsieke duurzaamheid van deze maatregelen zie deelrapport (IV).

De ontwikkelingen naar energiebesparing zijn in hoge mate aan in de architectuur voorbijgegaan; er kunnen daarentegen duidelijke *rebound* effecten worden vastgesteld. Heeft de industrie in enkele decennia de warmte weerstand van dubbel glas tot 1/3 gereduceerd, de architectuur heeft hierop gereageerd door in veel gevallen het glasoppervlak te verdrievoudigen. De architectuur heeft zich verder, mede onder invloed van een toenemende maatschappelijk welvaart en modeverschijnselen, laten verleiden tot steeds uitbundiger vormen en bouwmassa's waarbij de installatietechniek te hulp wordt geroepen een goed binnenmilieu te realiseren.

2.3 Integratie van domeinen

Energiebesparing in gebouwen is tot dusver het domein geweest van de bouwfysica en de installatietechniek. Beide hebben ontegenzeggelijk grote prestaties op dit gebied geleverd. Maar de architectuur, de discipline met de grootste impact op de gebouwde omgeving, is hierbij grotendeels afzijdig gebleven.

Het Ventecdak[®], de Klimaatcascade[®] en de Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[®] zijn elk op zich belangrijke elementen voor architectonische expressie. Klimaattechniek is niet meer ondergeschikt aan architectuur maar is architectuur. Het ontwerpen van een gebouw als klimaatmachine is hierdoor ook een taak geworden van de architect, die daarmee tevens mede verantwoordelijk wordt voor het binnenklimaat en de energiehuishouding. Een onvermoed intellectueel en artistiek potentieel wordt hierdoor ingeschakeld voor een intrinsiek integraal ontwerp.

De directe inzet van natuurelementen voor klimaatregeling voert de architect terug naar één van de *basics* van zijn beroep. Architecten, met al hun creativiteit en invloed op het bouwproces, staan momenteel

voornamelijk aan de kant als het gaat om energie en binnenmilieu. Door de nieuwe aanpak van het ontwerpproces worden ze hierbij betrokken, en ook mede verantwoordelijk. Een onvermoed intellectueel en artistiek potentieel wordt hierdoor ingeschakeld voor een intrinsiek integraal ontwerp.

Voor de klimaatingenieur is het een uitdaging om zijn beroep op een hoger niveau uit te kunnen oefenen, vergelijkbaar met dat van de ingenieur voor de draagconstructie. Installatietechniek wordt ook architectuur. Architect en ingenieurs zullen hierdoor op termijn in staat zijn een gebouw inclusief constructies en binnenklimaat echt integraal te ontwerpen. Op weg naar het energieneutrale gebouw lijkt deze aanpak een harde noodzaak.

Verder is te verwachten dat de faalkosten in het bouwproces met de inherente, maar onnodige milieuconsequenties door deze aanpak substantieel kunnen worden teruggebracht –zie paragraaf 2.10.

Met de ontwikkeling van een gemeenschappelijk ontwerpplatform op basis van integrale klimaatconcepten wordt in het project *Earth, Wind & Fire* een brug geslagen tussen architecten en klimaatingenieurs. Het onderzoek beweegt zich hiermee in de richting van *Passive and Low Energy Architecture*, PLEA, [<http://www.arct.cam.ac.uk/PLEA/Home.aspx>], een wereldwijde architectuurstroming die duurzame architectuur en stedenbouwkundige ontwikkeling nastreeft en beoogt hierdoor complexe gebouwinstallaties overbodig te maken.

2.6 Onderzoek Earth, Wind & Fire

Het onderzoek ging uit van de hypothese dat het mogelijk is gebouwen te ontwerpen waarin architectuur, bouwmasa, constructies en klimaatvoorzieningen zodanig samenwerken dat een bouwwerk, met behoud van architectonische en functionele kwaliteiten, wordt getransformeerd tot een klimaatmachine, geactiveerd door de natuurlijke hulpbronnen van zon, wind, geothermische energie en zwaartekracht: “*AIRCONDITIONING ZONDER VENTILATOREN*”.

In dergelijke gebouwen wordt een gezond, behaaglijk en productief binnenklimaat gerealiseerd. De omvang van mechanische klimaatinstallaties wordt tot een minimum beperkt en het energiegebruik drastisch verlaagd.

Doel van het onderzoek was de ontwikkeling van integrale klimaatconcepten waarin architecten en klimaatingenieurs elkaar vinden op een gemeenschappelijk platform van kennis, kunde en expertise.. Met behulp hiervan wordt het mogelijk gebouwen zodanig te ontwerpen dat een natuurlijke klimaatregeling mogelijk wordt gemaakt, aangedreven door zon, wind, geothermische energie en zwaartekracht.

2.7 Uitdagingen en kansen voor de architectuur

Het *Earth, Wind & Fire* concept biedt de architectuur nieuwe mogelijkheden voor een synthese van architectonische expressie en klimaattechniek, van intuïtieve creativiteit en rationele logica. De klimaatvoorzieningen, door architecten niet zelden als een noodzakelijk kwaad gezien, en mede daarom verborgen in schachten en plafondruimten, worden integrale elementen van een gebouw, door de architect vormgegeven.

Het Ventedak[©], de Klimaatcascade[©] en de Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[©], geïntegreerd in bouw delen en constructieve elementen, zijn nieuwe uitdagingen voor architectonische expressie. Klimaattechniek is niet meer ondergeschikt aan architectuur maar is architectuur, en komt daarmee op gelijke voet te staan met de draagconstructie. De dialoog tussen architect en klimaatingenieur krijgt nieuwe dimensies en de door veel architecten zo verfoeide ordening van luchtkanalen en pijpen in het architectonisch ontwerp⁴ behoort grotendeels tot het verleden. De antibiose van werktuigbouwkunde en architectuur wordt opgeheven. Een nieuwe dimensie van *The Architecture of the Well-tempered Environment* (Banham, R. 1984).

⁴ “*I do not like ducts, I do not like pipes. I hate them thoroughly, but because I hate them so thoroughly, I feel that they have to be given their place. If I just hated them and took no care, I think that they would invade the building and completely destroy it. I want to correct any notion you may have that I am in love with that kind of things*” Louis Kahn in (*Hawkes, e.a. 2002*).

De architect zal daarom zijn beroep op een hoger niveau uit kunnen oefenen door naast ontwerper van het gebouw tevens een belangrijke rol te spelen als technisch en artistiek co-ontwerper van het klimaatsysteem. “*Terug naar de Toekomst*”. Op basis van de ontwikkelde integrale klimaatconcepten wordt een nauwe samenwerking mogelijk met de klimaatingenieur. De kwaliteit van het gebouw en het bouwproces zal hierdoor worden verbeterd en de omvang van technische installaties verminderd. Het energiegebruik van het gebouw wordt gereduceerd en de productiviteit op de werkplek verhoogd.

2.8 Drie subconcepten

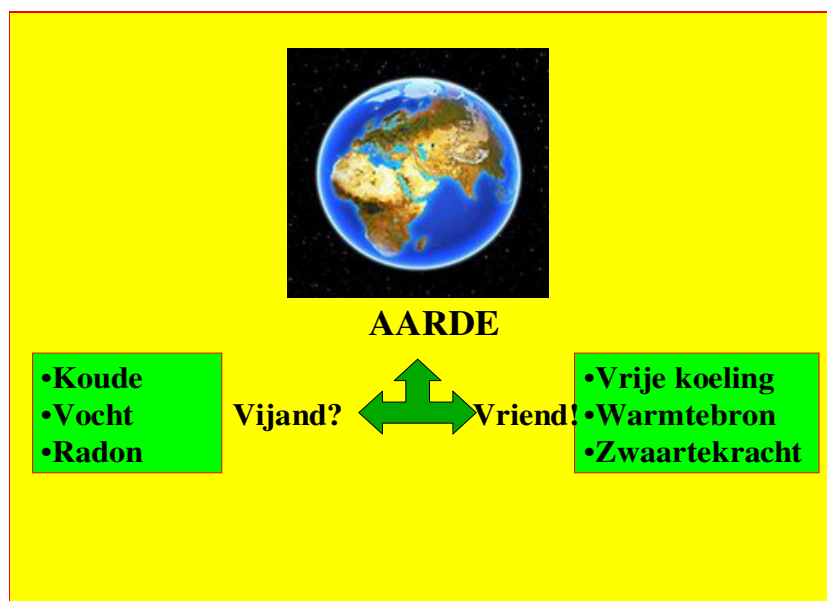
Zon, wind, geothermische energie en zwaartekracht kunnen op verschillende manieren worden ingezet voor de klimaatregeling van gebouwen. In het kader van het onderzoek is uitsluitend ingezet op geïntegreerde concepten van architectuur en binnenmilieu.:

Na een evaluatie van verschillende mogelijkheden zijn drie subconcepten geselecteerd, geïntegreerd in responsieve bouwdeelen, die in eerste instantie afzonderlijk zijn ontwikkeld en geoptimaliseerd, maar uiteindelijk in een totaalconcept van klimaatregeling een symbiose gaan vormen. Een verantwoording van de gemaakte keuzes is opgenomen in deelrapport (IV).

2.9 Introductie thema EARTH

Deelrapport (III) “Geo-Klimaatconcept” omvat een onderzoek naar de mogelijkheden voor een natuurlijke klimaatregeling in gebouwen. Het thema **EARTH** geeft hierbij uitdrukking aan de relatie tussen klimaatregeling en de invloed van de aarde, in een bepaald verband ook wel Geo genoemd. Deze invloed komt tot uitdrukking in de zwaartekracht, die een waterval kan veroorzaken en lucht in beweging kan zetten voor ventilatie en klimaatregeling van gebouwen. Met de ontwikkelde Klimaatcascade[®] kan lucht worden getransporteerd zonder ventilatoren en vindt koeling of verwarming plaats bij extreem hoge koude- en warmtefactoren (COP). De aarde wordt hierbij benut voor de levering van koude en warmte. **EARTH** staat eveneens voor de bijdrage die de aarde kan leveren als bron en opslagmedium van warmte en koude.

Figuur 2.1 laat enerzijds de vaak negatief beoordeelde effecten van de aarde ten aanzien van klimaatregeling zien. De positieve effecten die in het onderzoek *Earth, Wind & Fire* zijn geëxploreerd kunnen in toekomstige energieneutrale gebouwen worden ingezet voor een natuurlijke klimaatregeling.

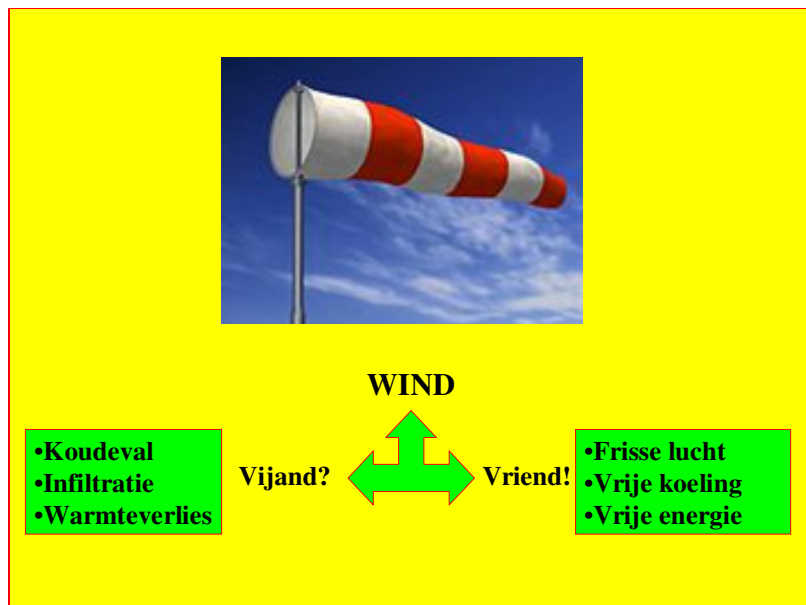


Figuur 2.1 De Aarde – Vriend of Vijand?

2.8 Introductie thema WIND

Deelrapport (II) “*Onderzoek Natuurlijke Ventilatie en Wind*” omvat een onderzoek naar de mogelijkheden die de wind biedt voor natuurlijke ventilatie van gebouwen. Het ontwikkelde Ventecdak[®], benut de overdruk van de wind op een gebouw voor de toevoer van ventilatielucht, die in de Klimaatcascade[®] wordt geconditioneerd. De onderdruk van de wind wordt benut om lucht via de Zonneschoorsteen of Zonnefaçade[®] af te zuigen. Drukverschillen tussen wind- en lijzijde van een gebouw drijven windturbines aan voor stroomopwekking.

De relatie tussen klimaatregeling en de wind heeft zowel positieve als negatieve aspecten; zie figuur 2.2.



Figuur 2.2 De Wind – Vriend of Vijand?

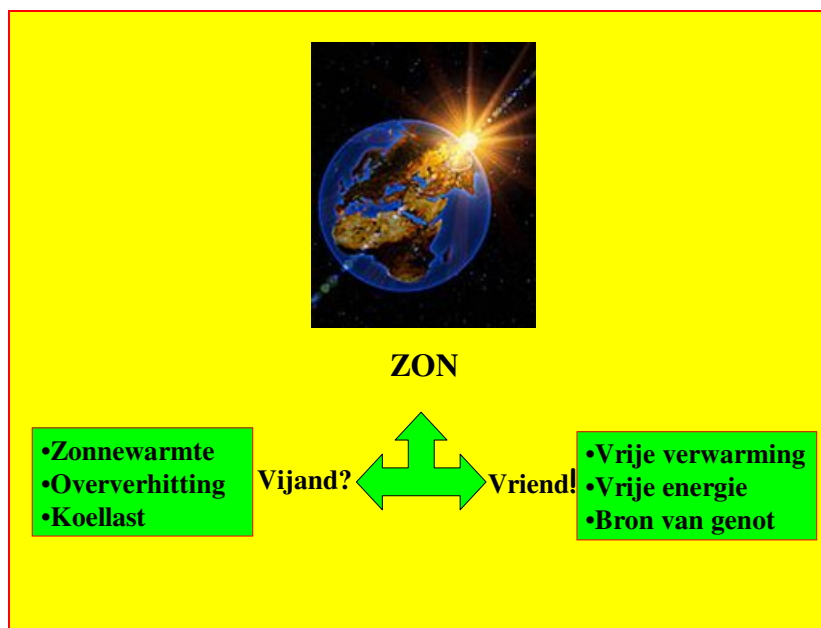
Anno 2011 is de bouwtechniek uitstekend in staat de negatieve aspecten van de wind in gebouwen en de gebouwde omgeving te neutraliseren. De positieve effecten die in het onderzoek *Earth, Wind & Fire* zijn geëxploreerd kunnen in toekomstige energieneutrale gebouwen worden ingezet als bijdrage aan een natuurlijke klimaatregeling.

2.9 Introductie Thema FIRE

Deelrapport (I) “*Onderzoek Zonneschoorsteen*” omvat een onderzoek naar de mogelijkheden om de zon te benutten voor het afzuigen van ventilatielucht uit gebouwen en het oogsten van zonnewarmte. **FIRE** is hierbij op te vatten als metafoor voor de zon.

De zon is een onuitputtelijke bron van energie, maar in kantoorgebouwen wordt zoninstraling meestal zoveel mogelijk geweerd. Door de hoge isolatiegraad van gebouwen in combinatie met de interne thermische belastingen moet zonnewarmte in veel gevallen met behulp van koeling worden afgevoerd. Niet alleen gaat deze warmte hierdoor grotendeels voor de energiehuishouding van gebouwen verloren; voor het afvoeren ervan is ook extra energie nodig.

De relatie tussen klimaatregeling en de wind heeft zowel positieve als negatieve aspecten; zie figuur 3.1. Klimaat ingenieurs zijn geneigd de zon als hinderlijk element te beschouwen, die zoveel mogelijk moet worden geweerd. De positieve effecten van de zon, die in het onderzoek *Earth, Wind & Fire* zijn geëxploreerd kunnen in de toekomstige energieneutrale gebouwen worden ingezet voor natuurlijke ventilatie en energiebesparing.



Figuur 3.1 De zon – Vriend of Vijand?

2.10 Positionering en systeemgrenzen van het onderzoek

NOVEM heeft enkele jaren geleden de Trias Energetica (zie paragraaf 1.10) in de bredere context geplaatst van de Trias Ecologica als stappenplan voor het realiseren van milieuneutrale gebouwen. Milieuneutraal in dit verband op te vatten als: energieneutraal, waterneutraal en materiaalneutraal.

Energie is een cruciaal milieuthema, enerzijds door de beperkte beschikbaarheid van fossiele brandstoffen, anderzijds door de verhoogde concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer die bij verbranding ontstaan. Voor de gebouwde omgeving is de energieprestatie dan ook het belangrijkste onderdeel van de totale milieuprestatie. Het onderzoek Earth, Wind & Fire is ook uitsluitend gericht op energieaspecten, met als einddoel het realiseren van een energieneutraal gebouw

Er zijn anno 2011 verschillende instrumenten beschikbaar voor het kwantificeren van de integrale milieuprestaties van gebouwen “van de wieg naar het graf” zoals GREENCALC en BREEAM-NL –zie hoofdstuk 5 van deelrapport (IV). Het lijkt een logische ontwikkeling dat toekomstige energieneutrale gebouwen in deze richting worden doorontwikkeld. Dit maakt echter geen deel uit van het onderzoek Earth, Wind & Fire.

2.11 Energiegebruik en de kwaliteit van het binnenmilieu

Drijfveer van het onderzoek *Earth, Wind & Fire* is het terugdringen van het energiegebruik in de gebouwde omgeving. Het is in principe heel gemakkelijk energie te besparen door concessies te doen aan de kwaliteit van het binnenmilieu. Als in het stookseizoen lagere, en in het koelseizoen hogere temperaturen worden geaccepteerd kan veel energie worden bespaard. Dit is eveneens het geval als concessies worden gedaan aan de luchtkwaliteit door beperking van de ventilatiecapaciteit⁵.

Het *Earth, Wind & Fire* concept doet geen concessies aan de kwaliteit van het binnenmilieu. De energieprestatie van gebouwen moet daarom altijd worden gezien in relatie met de kwaliteit van het binnenmilieu. In deelrapport (IV) wordt uitvoerig op dit aspect ingegaan.

⁵ Een “Net Zero Energy Building” mag geen “Net Zero Acceptability Building” worden. Dan Int-Hout in ASHRAE Journal december 2010.

2.12 Faalkosten

Faalkosten in de bouw zijn kosten die onnodig worden gemaakt in het productieproces van een gebouw en technische uitrusting. Het opgeleverde product voldoet niet aan gemaakte afspraken over kwaliteit en/of functionaliteit (Rooijackers, Gerard e.a. 2010). De omvang van faalkosten in de bouw is in 2008 geraamd op 11,4% van de omzet (USP Marketing Consultancy 2008). Gebrekkige voorbereiding (1), gegevensuitwisseling (2) en communicatie (3) alsmede onvoldoende aandacht tijdens de ontwerpfase voor de uitvoerbaarheid (4) worden als grootste schuldigen genoemd. Voor wat betreft de installaties kunnen deze punten als volgt worden uitgewerkt:

1. De voorbereiding van technische installaties is vaak van een lager uitwerkingsniveau dan de voorbereiding van bouw- en draagconstructies. Installaties worden vaak schematisch op tekening aangegeven terwijl bouwconstructies meestal volledig worden gedetailleerd.
2. De gegevensuitwisseling tussen de ontwerper van de installaties en de architect wordt hierdoor bemoeilijkt hetgeen tijdens de uitvoering vaak tot problemen leidt, die dan ad hoc moeten worden opgelost, in veel gevallen tegen extra kosten en met verlies van kwaliteit. Dit probleem wordt nog versterkt door de omstandigheid dat de installateur vaak in een (te) laat stadium detailtekeningen moet vervaardigen waarbij conflicten tussen bouw- en installatietechniek (te) laat aan het licht komen.
3. De communicatie tussen ingenieur en architect wordt sowieso al bemoeilijkt door het cultuurverschil tussen rationele logica en intuïtieve vaardigheid, niet zelden resulterend in een haatlievende verhouding tussen beide partijen.
4. Onvoldoende aandacht tijdens de ontwerpfase voor de uitvoerbaarheid van het ontwerp wordt in de hand gewerkt door het relatief lage uitwerkingsniveau van technische installaties, zie punt 1. Dit is overigens vaak weer het gevolg is van een (te) beperkte opdracht aan de installatieontwerper door de opdrachtgever die enerzijds hierop kosten wil besparen en anderzijds de eindverantwoordelijkheid bij de uitvoerende partij wenst te leggen.

Het ligt voor de hand aan te nemen dat veel van de genoemde problemen bij het geïntegreerde *Earth, Wind & Fire* concept niet voor zullen komen. Het gebouw zelf wordt hierbij ontworpen als machine voor de klimaatregeling. De ingenieur berekent en dimensioneert het systeem, maar de vormgeving, materialisatie en constructie komt volledig voor rekening van de architect. Zoals een architect schrijft (Hendriks, Jeroen 2010):

“...Met een grondige voorbereiding door en een strakke coördinatie van de verschillende ontwerpdisciplines valt al erg veel te winnen. Maar nog beter is het, wanneer het totaalontwerp tevens geïntegreerd en interdisciplinair tot stand komt. Met andere woorden, wanneer de diverse adviseurs de architectuur, constructies en installaties volledig met elkaar verweven en componenten of gebouw onderdelen meerdere functies tegelijkertijd gaan vervullen..... Het spreekt vanzelf dat vanuit de aard van zijn ruimtelijk, technisch en esthetisch integrerende werkzaamheden de architect de meest aangewezen partij is voor een rol als procesregisseur.

Het spreekt ook vanzelf dat een dergelijk project niet op basis van deelbestekken of richtlijnenbestek kan worden ontworpen en aanbesteed. Een DBFMO contract (Design, Build, Finance, Maintain, Operate) zoals door de Rijkgebouwendienst ontwikkeld (Groot Zwaartink, Miranda 2010), zou voor een innovatieve en milieubewuste opdrachtgever met gelijkgestemde partners een goede contractvorm kunnen zijn.

3. KORTE INHOUD

3.1 Luchtreiniging en architectonische inpassing

[5] Luchtfilters in luchtbehandelingsinstallaties dienen in de eerste plaats om vervuiling van de installatie te voorkomen. Voor de kwaliteit van het binnenmilieu kunnen ze door hun geuremissie als een noodzakelijk kwaad worden beschouwd. In het *Earth, Wind & Fire* concept, waarbij het gebouw fungeert als machine voor de klimaatregeling, is luchtfiltering in principe niet nodig.

De zelfreinigende klimaatcascade fungeert in beperkte mate als luchtwasser voor grotere stofdeeltjes. Bovendien worden verschillende verontreinigingen in de buitenlucht in het sproeispectrum geabsorbeerd. Indien om één of andere reden luchtfiltering noodzakelijk wordt geacht, kunnen elektrostatische luchtfilters worden toegepast, die een zeer laag drukverlies combineren met een zeer hoog rendement, ook voor fijn stof. Het verdient hierbij aanbeveling de luchtvochtigheid in het filter te beperken tot 90%. Om dit te realiseren kan de lucht worden voorverwarmd met behulp van een buiten de hoofdluchtstroom geplaatste verwarmingsunit.

[6] Hart van het Geo-Klimaatconcept[®] is de Klimaatcascade[®], waarin de ventilatielucht al naar gelang het seizoen wordt gekoeld en gedroogd dan wel verwarmd en bevochtigd. In de Klimaatcascade[®] wordt ook overdruk opgewekt, waarmee de drukverliezen in het luchttransportsysteem kunnen worden gecompenseerd. De winddruk speelt hierbij een aanvullende, maar wisselende rol.

Het Geo-Klimaatconcept[®] werkt zonder ventilatoren en het luchttransportsysteem moet dan ook worden ontworpen op basis van lage luchtsnelheden en lage drukverliezen. De afmetingen van de benodigde schachten en kanalen zijn hierdoor groter dan bij mechanische systemen. Het luchttransportsysteem wordt daarom idealiter in het architectonisch bouwkundig ontwerp geïntegreerd.

Voor enkele gebouwtypen is schematisch aangegeven hoe deze integratie kan worden gerealiseerd:

- Enkel corridor gebouw, met luchttoevoer via geïntegreerde gevelkanalen of inbandige kanalen en luchtafzuiging via de plafondruimten van de corridors.
- Atrium gebouw met luchttoevoer via geïntegreerde gevelkanalen en afzuiging via het atrium.
- Atriumgebouw met luchttoevoer via het atrium en afzuig via geïntegreerde gevelkanalen of inbandige kanalen.
- Dubbel corridorgebouw als variant op het atriumgebouw.

Bij deze gebouwtypen worden de gevelkanalen en de inbandige kanalen idealiter geïntegreerd met de draagconstructie.

Bij de toepassing van het Geo-Klimaatconcept[®] voor grote renovaties van bestaande gebouwen is integratie van het luchttransportsysteem in het architectonisch en bouwkundig ontwerp niet of nauwelijks uitvoerbaar. Voor dergelijke gevallen wordt een systematiek omschreven waarbij gebruik wordt van gemaakt van bestaande installatieschachten. De luchttoevoer wordt hierbij gerealiseerd via de plafondruimte en de luchtafzuiging via de corridors. Dit concept is uitgewerkt voor de *case study* – deelrapport (IV).

[7] Adiabatische koeling in zgn. *Direct Evaporative Cooling Towers* geniet een toenemende populariteit in landen met een warm en droog klimaat. In een adiabatisch proces wordt geen warmte toe- of afgevoerd, en blijft de warmte-inhoud of enthalpie van de lucht constant. Koeling van de lucht vindt plaats door verdamping van water, waarbij de verdampingswarmte aan de lucht wordt onttrokken. Hierdoor daalt de luchttemperatuur en stijgt de luchtvochtigheid. In het Nederlandse klimaat met vaak hoge relatieve vochtigheid van de buitenlucht komt directe verdampingskoeling in principe niet voor kantoorgebouwen in aanmerking.

Enkele voorbeelden worden gegeven van toepassingen in landen met een warm en droog klimaat alsmede een uitgebreide bibliografie van uitgevoerd onderzoek.

3.2 Psychometrische prestaties en rekenmodel

[8] In tegenstelling tot een adiabatisch proces –zie hoofdstuk 7, wordt in een diabatisch proces warmte afgevoerd. Dit gebeurt door gekoeld water toe te voeren, dat warmte en vocht uit de luchtstroom opneemt waardoor de lucht wordt gekoeld en gedroogd, terwijl het water in temperatuur stijgt. Hoofdstuk 8 geeft zuiver op basis van psychometrische analyse een voorlopig beeld van:

- het psychometrisch proces in een Klimaatcascade[®];
- de hiervoor benodigde koelwatertemperaturen en –debieten;
- de koelprestaties van een Klimaatcascade[®];
- de koudefactoren in vergelijking met conventionele koelsystemen;
- de energetische aspecten.

De eigenschappen van een Klimaatcascade[®] als warmtewisselaar worden in hoofdstuk 9 onderzocht. Op basis hiervan is een rekenmodel voor warmte- en stofoverdracht in een Klimaatcascade[®] ontwikkeld, waarmee de psychometrische berekeningen zijn uitgewerkt –zie hoofdstuk 11. Het rekenmodel is verder vergeleken met een numeriek CFD stromingsmodel –zie hoofdstuk 16, een dynamisch ESP-r simulatiemodel –zie hoofdstuk 18, en tenslotte gevalideerd en gekalibreerd in een fysieke testopstelling –zie hoofdstuk 17.

Uitgangspunt voor de diabatische koeling is dat de benodigde koude aan de bodem wordt onttrokken, waardoor de temperatuur van het koelwater is beperkt tot $\approx 13^{\circ}\text{C}$. Voor de koeling van de lucht is alleen pompenergie nodig die uiteraard toeneemt naarmate het aantal bouwlagen van een gebouw groter wordt. Het energiegebruik voor koeling van lucht met behulp van een Klimaatcascade[®] is bij gebouw/klimaattypen ALPHA maar een fractie van het energiegebruik van conventionele koudeopwekking. Ook bij BETA gebouwen is de energiebesparing zeer aanzienlijk, vooral bij niet te hoge gebouwen.

De Klimaatcascade[®] die aanvankelijk alleen als koelwater was bedoeld, is in de loop van het onderzoek doorontwikkeld tot universeel en volwaardig element voor *year-round* luchtbehandeling inclusief (voor)verwarming en bevochtiging –zie hoofdstuk 12.

[9] Een Klimaatcascade[®] kan worden beschouwd als een bijzondere uitvoering van een warmtewisselaar waarin het primaire medium, gekoeld water, in direct contact staat met het secundaire medium, de lucht. Het warmtewisselend oppervlak wordt gevormd door de waterdruppels van het primaire medium en de wanden van de cascade.

De warmte- en stofoverdracht van water op lucht in een Klimaatcascade[®] komt overeen met de psychometrisch benodigde enthalpieverandering van de lucht. Het warmtewisselend oppervlak van de cascade moet in combinatie met de warmteoverdrachtscoëfficiënt en het temperatuurverschil tussen water en lucht deze warmte- en stofoverdracht mogelijk maken. Bij de analyse hiervan is in eerste instantie uitgegaan van de benodigde koelcapaciteit in het koelseizoen.

Het warmtewisselend oppervlak van een Klimaatcascade[®] wordt in hoofdzaak bepaald door het cumulatieve oppervlak van de waterdruppels en de verblijfsduur hiervan in de cascade. Daarnaast speelt ook het wandoppervlak van de cascade een rol bij de warmteoverdracht, zij het minder prominent.

De verblijfsduur van de waterdruppels is een functie van de valsnelheid en de hoogte van de cascade. De valsnelheid wordt op zijn beurt weer bepaald door het druppelgewicht, en dus door de diameter van de druppels. Elke waterdruppel maakt deel uit van een druppelverzameling met uiteenlopende diameters en valsnelheden. Het cumulatieve oppervlak wordt bepaald door de distributieve verdeling van druppeldiameters in de sproeizone.

De warmteoverdrachtscoëfficiënt tussen lucht en water is een functie van de diameter en de valsnelheid van de waterdruppels; de functies zijn dus onderling gerelateerd. Een berekening of raming van de thermische prestaties van een Klimaatcascade[®] is daarom gecompliceerd. Het in werkelijkheid optredende sproeipatroon is moeilijk te voorspellen; veel hangt af van de uitvoering van de sproeiers, de waterdruk en de hoogte van de Klimaatcascade[®]. De analyses zijn echter van belang om een beter inzicht te krijgen in de uitgangspunten voor de CFD simulaties en de fysieke testopstelling.

Het spectrum van druppeldiameters in een Klimaatcascade[©] met de daarbij behorende parameters is geanalyseerd. Met behulp van literatuurgegevens is op basis van een gemeten distributieve verdeling een cumulatieve massaverdeling berekend. Deze dient als uitgangspunt voor de karakterisering van het sproeispectrum en de berekening van het cumulatieve oppervlak voor verschillende andere spectra. Een deel van het koelwater valt op de wanden van de Klimaatcascade[©] en vormt daar een waterfilm die ook een, zij het geringe rol speelt bij de warmteoverdracht..

De valsnelheid van waterdruppels is enerzijds bepalend voor hun verblijfstijd in de Klimaatcascade[©], anderzijds voor de warmteoverdracht tussen lucht en water. Met behulp van gangbare theorieën uit de stromingsleer is een functie afgeleid die de relatie tussen de diameter en de valsnelheid weergeeft. Deze is vergeleken met meteorologisch onderzoek naar de valsnelheid van regendruppels.

Het werkzame oppervlak van een Klimaatcascade[©] wordt hoofdzakelijk gevormd door het cumulatieve oppervlak van de druppelverzameling in de sproeizone. Op basis van metingen in de sproeizone van een koeltoren uit de literatuur is het werkzame oppervlak in een Klimaatcascade[©] gekarakteriseerd. Hieruit is een algoritme ontwikkeld voor de karakterisering van verschillende fijnere sproeispectra.

De warmte- en stofoverdrachtscoëfficiënten tussen lucht en water in de sproeizone en de wanden is geanalyseerd. De warmteoverdrachtscoëfficiënt in de sproeizone blijkt een factor ≈ 20 hoger te zijn dan die tussen wanden en lucht.

Formules zijn ontwikkeld voor de capaciteitsberekening van een Klimaatcascade[©]. Voor een transparante cascade, die de waterval van buiten af zichtbaar maakt, is een aanvullend rekenalgoritme ontwikkeld.

Op basis van de analyses in hoofdstuk 9 is een Excel rekenmodel gemaakt voor de warmte- en stofoverdracht in een Klimaatcascade[©], met behulp waarvan de koelprestaties zijn berekend van een Klimaatcascade[©] voor gebouwen van uiteenlopende omvang en hoogte –zie hoofdstuk 10 en 11.

Simulaties met het Excel rekenmodel zijn ook vergeleken met CFD stromingssimulaties –zie hoofdstuk 16, en een dynamische ESP-r simulatie –zie hoofdstuk 18. De simulaties zijn tenslotte gevalideerd en gekalibreerd op basis van metingen in een fysieke testopstelling –zie hoofdstuk 17.

[10] Het warmte- en massatransport in een Klimaatcascade[©] is een gecompliceerd proces waarin vele, vaak onderling gerelateerde variabelen een rol spelen. Een unieke eigenschap van een Klimaatcascade[©] is verder dat het werkzame oppervlak geen vaste waarde is, zoals bij traditionele warmtewisselaars. Door het variëren van het sproeispectrum kan het warmtewisselend oppervlak worden vergroot of verkleind, waardoor bij een gelijke koelprestatie het debiet en het temperatuurtraject van het koelwater kunnen worden beïnvloed.

Om een energetisch zo gunstig mogelijk ontwerp mogelijk te maken is het noodzakelijk over een rekenmodel voor het warmte- en massatransport in een Klimaatcascade[©] te kunnen beschikken, met behulp waarvan het ontwerp kan worden geoptimaliseerd. Een dergelijk model is in MS EXCEL ontwikkeld door Dr. ir. Wim van der Spoel en dr. Regina Bokel, beide van TU Delft. Benaderd vanuit twee invalshoeken, respectievelijk op basis van fysieke beschouwing en op basis van differentiaalvergelijkingen van de warmte- en massabalans, is een elegant en werkbaar model tot stand gekomen. Dr.Dipl.-Ing. Marija Trcka van TU Eindhoven is hierbij als *reviewer* opgetreden.

Hoofdstuk 10 geeft een beschrijving van de alfaversie van het rekenmodel. Een bètaversie is gebruikt voor de berekeningen in hoofdstuk 11 en voor het optimaliseren van het ontwerp voor de fysieke testopstelling. Het rekenmodel is in de loop van het onderzoek doorontwikkeld, mede op basis van de CFD simulaties en metingen in de fysieke testopstelling.

Belangrijke effecten, die een wezenlijke invloed kunnen hebben op de warmte- en stofoverdracht in een Klimaatcascade[©] zijn in de bètaversie nog niet uitgewerkt, zoals:

- De ontwikkeling van het sproeispectrum bij de val van de waterdruppels, waarbij door verschillen in valsnelheid druppels kunnen coaguleren of uiteenvallen.
- Het percentage van het waterdebiet dat op de wanden van de Klimaatcascade[©] terechtkomt, en niet deelneemt aan het proces van warmte- en stofoverdracht in het sproeispectrum.

- De invloed van de variërende valsnelheid van waterdruppels tussen beginsnelheid en eindsnelheid.

[11] Het Excel rekenmodel volgens hoofdstuk 10 is toegepast voor het dimensioneren van een Klimaatcascade[®] van 4 tot 20 verdiepingen hoog, luchtdebieten van 20.000 tot 100.000 m³.h⁻¹ en luchtsnelheden van 1,5 – 2,0 en 2,5 m.s⁻¹ voor gebouw/klimaattypen ALPHA en BETA.

De koelprestatie van een Klimaatcascade[®] wordt bepaald door het temperatuurtraject van het koelwater, de water/luchtverhouding, het sproeispectrum en de hoogte. Om het benodigde pompvermogen zo klein mogelijk te houden zijn een zo laag mogelijke koelwatertemperatuur en een zo klein mogelijke water/luchtverhouding gewenst. Hierbij moet worden gewaakt voor psychometrisch ongewenste effecten zoals adiabatische luchtbevochtiging in de koelperiode (negatieve latente koeling) en een te hoge luchtvochtigheid van de toevoerlucht.

Het benodigde sproeispectrum is afhankelijk van de hoogte van de cascade. Bij hogere gebouwen kan een grover sproeipatroon worden gebruikt en omgekeerd. De luchtsnelheid in de Klimaatcascade[®] heeft nauwelijks invloed op de koelprestatie. Het aandeel van de cascadowanden in de totale koelprestatie is bij type ALPHA beperkt tot 5 à 15%, afhankelijk van de hoogte, en bij type BETA met $\approx 5\%$ vrijwel verwaarloosbaar.

Volgens de berekeningen bedraagt het aandeel latente koeling bij type ALPHA ca 10...15% van de totale koelprestatie, bij een koelwatertemperatuur van 13^oC en een water/luchtverhouding van 0,4. Bij type BETA is dit aandeel 20...23% bij een koelwatertemperatuur van 14^oC en wisselende water/luchtverhoudingen van 1,2...1,4, afhankelijk van de cascadehoogte. De relatieve vochtigheid aan de voet van de Klimaatcascade[®] ligt bij type ALPHA tussen 85% en 90% en bij type BETA tussen 95% en 99%.

De metingen in de fysieke testopstelling zijn naderhand gebruikt voor de validatie van het Excel rekenmodel. Luchttemperaturen, en daarmee de voelbare prestaties van een Klimaatcascade[®] kunnen met een hoge graad van nauwkeurigheid worden berekend. De berekening van de vochtinhoud van de lucht, en daarmee van de latente prestaties, is minder nauwkeurig –zie hoofdstuk18.

[12] De ontwerpcondities voor een Klimaatcascade[®] zijn gebaseerd op het leveren van gekoelde lucht in de koelperiode. Bij lagere buitentemperaturen moet de ventilatielucht worden verwarmd tot de toevoertemperatuur van 18^oC. Als de Klimaatcascade[®] hiervoor wordt ingezet vindt tevens luchtbevochtiging plaats, hetgeen onder winterse condities een gewenst fenomeen is. Om echter in de tussenseizoenen de relatieve vochtigheid in de ruimte te beperken tot maximaal 40% is slechts een partiële verwarming in de cascade mogelijk; naverwarming tot 18^oC moet buiten de Klimaatcascade[®] worden gerealiseerd.

In hoofdstuk 12 worden drie systeemvarianten onderzocht:

- A - Partiële verwarming en bevochtiging in de Klimaatcascade[®] met behulp van warm sproeiwater + externe naverwarming tot 18^oC.
- B - Partiële verwarming en bevochtiging in de Klimaatcascade[®] met behulp van externe voorverwarming gevolgd door adiabatische koeling + externe naverwarming tot 18^oC.
- C – Totale verwarming tot 18^oC buiten de Klimaatcascade[®] al dan niet met separate externe luchtbevochtiging.

De systeemvarianten A en B zijn onderverdeeld in de varianten A1, A2 en B1, B2. Bij A1 en B1 is de Klimaatcascade[®] alle seizoenen door in bedrijf waarbij de luchtvochtigheid in de ruimte kan oplopen tot 60% RV. Bij A2 en B2 wordt het sproeisysteem in de Klimaatcascade[®] in de tussenseizoenen uitgeschakeld waardoor de luchtvochtigheid tot 40% wordt beperkt. Een evaluatie van de bouwfysische consequenties hiervan is projectgebonden.

De varianten onderscheiden zich voor wat betreft energiegebruik, robuustheid, luchtbevochtiging, bevroeringsrisico, thermische, aerodynamische en hydraulische trek, luchtwasserfunctie, legionellarisico en condensrisico in het gebouw. De varianten zijn op al deze aspecten beoordeeld.

Systeemvariant A1, waarbij de Klimaatcascade[®] 100% van de tijd in bedrijf is, past het beste in het robuuste en energiezuinige Geo-Klimaatconcept[®]. Bevriezing van sproeiwater bij zeer lage buitentemperaturen blijkt bij de normale water/luchtfactoren niet op te treden - zie hoofdstuk 17. Systeemvariant C waarbij de Klimaatcascade[®] buiten het koelseizoen niet actief in gebruik is en slechts dient als aanzuigkanaal voor de lucht, is een veilige optie voor toepassing in condensgevoelige gebouwen.

3.3 Luchtverplaatsing en fysisch/chemische aspecten

[13] Om de gewenste luchtverplaatsing in een gebouw tot stand te brengen beschikt het Geo-Klimaatconcept[®] concept over verschillende drijfkrachten. Externe drijfkracht wordt geleverd door de wind, die via het Ventecdak[®] positieve drukken kan leveren voor de luchttoevoer en, in combinatie met de zonneshoorsteen, negatieve drukken voor de luchtafvoer - zie deelrapport (II). Interne drijfkrachten binnen het Geo-Klimaatconcept[®] zijn de aerodynamische trek, de hydraulische trek en de thermische trek in de Klimaatcascade[®]. De combinatie van externe en interne drijfkrachten moet gedurende het grootst mogelijke deel van de bedrijfstijd in staat zijn de gewenste luchtverplaatsing in een gebouw te realiseren. Aerodynamische trek is het sterkst bij de fijnste druppelspectra, vrijwel verwaarloosbaar bij de grofste spectra en sterk afhankelijk van de sproeidruk, de sproeihoek en de geometrische verhoudingen van de Klimaatcascade[®]. In vergelijking met de hydraulische en de thermische trek is de invloed op het functioneren van de Klimaatcascade[®] gering.

Hydraulische trek⁶ is een krachtige “luchtbeweger”, en voor het functioneren van een Klimaatcascade[®] van dominant belang. Opvallend is dat in de literatuur geen informatie over dit fenomeen te vinden is. Bij Klimaatcascades[®] voor adiabatische koeling (*Passive Downdraught Evaporative Cooling PDEC*) – zie hoofdstuk 7 is de strategie gericht op maximale verdamping van de waterdruppels, waarbij uiteraard geen hydraulische trek optreedt.

Thermische trek is alleen nuttig voor het functioneren van een Klimaatcascade[®] als deze benedenwaarts is gericht, dus in de koelperiode. Als in de stookperiode en de tussenseizoenen de lucht in de Klimaatcascade[®] wordt verwarmd is de opwaarts gerichte thermische trek ongewenst. Dit effect wordt door hydraulische trek gecompenseerd, waardoor onder alle omstandigheden een positieve luchtbeweging in het ventilatiesysteem kan worden gerealiseerd.

Natuurlijke drijfkrachten zijn naar hun aard wisselvallig en tevens afhankelijk van de vorm, de hoogte en de stedenbouwkundige context van het gebouw. Er kan onder omstandigheden een tekort aan ventilatiecapaciteit ontstaan, maar evengoed een surplus. Een tekort zal worden gecompenseerd met behulp van een regelbare axiaalventilator in de Klimaatcascade[®]. Een surplus wordt voorkomen met behulp van regelbare kleppen in het luchttoevoersysteem. Het gewenste ventilatiedebiet zal onder alle omstandigheden kunnen worden gerealiseerd, waarbij wordt aangetekend dat bij gunstige weersomstandigheden vergroting van de ventilatiecapaciteit in principe mogelijk is zonder consequenties voor ventilatorenergie en ventilatiegeluid. Dit geeft het natuurlijk werkende Geo-Klimaatconcept[®] in vergelijking met mechanische ventilatie een bijzonder voordeel.

[14] In een Klimaatcascade[®] treedt het zgn. watervaleffect op waarbij negatieve ionen worden gevormd, waaraan een positieve invloed op de kwaliteit van de ruimtelucht wordt toegeschreven. Een literatuurstudie naar de effecten van negatieve ionen op het binnenmilieu levert geen duidelijk beeld op. Wel kan worden gesteld dat in een Klimaatcascade[®] de natuurlijke ionenbalans in stand blijft, dit in tegenstelling tot de situatie bij mechanische systemen van ventilatie en airconditioning.

Ozonemissie uit elektrostatische luchtfilters zou een gunstige invloed kunnen hebben op de kwaliteit van het koelwater in de Klimaatcascade[®] en daarmee op de kwaliteit van de ruimtelucht. Voorshands is dit aspect speculatief.

⁶ De term “hydraulische trek” is als zodanig door Bronsema voorgesteld

De koelwatertemperaturen en de bedrijfswijze van de Klimaatcascade[®] zijn zodanig dat aan de preventie van legionella in principe geen aandacht behoeft te worden besteed. Het concept is intrinsiek veilig.

[15] De uitwerking en dimensionering van het Geo-Klimaatconcept[®] is alleen mogelijk in het kader van een Voorlopig Ontwerp van een concreet gebouw. Hoofdstuk 15 geeft enkele richtlijnen voor de ventilatiecapaciteit in relatie tot het vloeroppervlak van een gebouw en de hieraan gerelateerde doorsnede van een Klimaatcascade[®]. Verder wordt de methodologie besproken voor het selecteren van het sproeisysteem.

De beschikbare drukken zijn in vergelijking met mechanische ventilatiesystemen gering en vereisen een goede afstemming met de infrastructuur van de luchtverdeling en de debietregeling.

3.4 Modelleren, Simuleren, Kalibreren en Valideren

[16] In hoofdstuk 10 is een Excel rekenmodel beschreven waarmee de prestaties van een Klimaatcascade[®] kunnen worden gesimuleerd. Het is gewenst dan wel noodzakelijk dit rekenmodel te verifiëren met behulp van een meer geavanceerd simulatiemodel. Een numerieke stromingssimulatie met behulp van CFD komt hiervoor als eerste in aanmerking.

Een tweede en niet minder belangrijke reden voor het gebruik van CFD voor de ontwikkeling van de Klimaatcascade[®] is de selectie van de benodigde sproeiers. Met behulp van het Excel rekenmodel kan weliswaar een voorlopig sproeipatroon worden geselecteerd, maar het type sproeier dat dit spectrum bij een bepaalde voordruk kan leveren is hiermee nog niet bekend. Samenwerking met een partner op het gebied van sproeitechnologie, die niet alleen het sproeispectrum van sproeiers kan meten maar ook in staat is dit via CFD te verbinden met de gewenste prestaties in een Klimaatcascade[®] is hiervoor onontbeerlijk. Een dergelijke partner is gevonden in Spraying Systems Deutschland GmbH

Na een korte inleiding over het karakter en de mogelijkheden van numerieke stromingssimulatie met behulp van CFD, wordt een overzicht gegeven van de voor een Klimaatcascade[®] uitgevoerde CFD simulaties. Deze omvatten in hoofdlijnen:

- Koeling en droging van ventilatielucht bij een ontwerp zomerconditie van 28⁰C bij 55% RV en bij een gemiddelde zomerconditie van 20⁰C bij 80% RV.
- Verwarming en bevochtiging van ventilatielucht bij een ontwerp winterconditie van -10⁰C bij 90% RV en bij een gemiddelde winterconditie van +5⁰C bij 90% RV

Simulaties zijn uitgevoerd voor de fysieke testopstelling volgens hoofdstuk 17 en voor een model op ware grootte, waarvoor gekozen is voor een gebouw van 8 verdiepingen met een ventilatiecapaciteit van 40.000 m³.h⁻¹ en gebouw/klimaatmodel BETA. De simulaties wijzen uit dat de in zomer en winter gevraagde luchtcondities bij uittrede van de Klimaatcascade[®] kunnen worden gerealiseerd bij een constante watertemperatuur van 13⁰C en een constant waterdebiet. Dit maakt een regeltechnisch zeer eenvoudige uitvoering van de Klimaatcascade[®] mogelijk; slechts bij zeer lage buitentemperaturen is een geringe verhoging van de watertemperatuur gewenst. De Klimaatcascade[®] is hierdoor niet alleen een effectief en energievriendelijk Hoog Temperatuur Koelsysteem (HTK), maar tevens een ultra Laag Temperatuur Verwarmingssysteem (LTV).

Naast simulatie van de psychometrische prestaties zijn ook simulaties uitgevoerd met betrekking tot de drukopbouw in een Klimaatcascade[®]. Bij gemiddelde zomercondities wordt in het model met 8 verdiepingen aan de voet van de Klimaatcascade[®] een positieve druk gerealiseerd van ca 100 Pa.

De voor het testmodel gemaakte simulaties zijn gevalideerd met metingen in de fysieke testopstelling.

[17] Validatie van de het Excel rekenmodel en het CFD simulatiemodel van de Klimaatcascade[®] is uitgevoerd met behulp van een fysieke testopstelling in het bouwfysisch laboratorium van Peutz bv. Op pragmatische gronden en kostenoverwegingen is gekozen voor de minimum geachte doorsnede van 1.0 x 1,0 m. Om de omvang van het luchtcirculatiesysteem en de benodigde vermogens voor verwarming en bevochtiging van de lucht te beperken is gekozen voor een luchtsnelheid van 0,5 m.s⁻¹.

De testopstelling is gebouwd in een bestaande hal, waardoor de hoogte van het model moest worden beperkt tot 6 m. De metingen zijn uitgevoerd met de door Spraying Systems GmbH geselecteerde sproeiers, die direct op de waterleiding zijn aangesloten.

De berekening van de psychometrische prestaties en de selectie van de sproeiers is gebaseerd op CFD simulaties –zie hoofdstuk 16. De metingen zijn dan ook in eerste instantie bedoeld om het CFD simulatiemodel voor Gebouw/Klimaatype BETA te valideren. Het meetprogramma is derhalve gebaseerd op het CFD simulatieprogramma. In tweede instantie is met behulp van de meetresultaten ook het Excel rekenmodel gevalideerd.

Gebouw/Klimaatype BETA:

Als eerste zijn metingen uitgevoerd voor de ontwerp zomercondities. De voelbare koelprestatie voldoet aan de uitgangspunten van het conceptueel psychometrisch ontwerp zoals geformuleerd in hoofdstuk 8. De verwachte luchtdroging trad echter nauwelijks op, waarop is getracht met verhoging van de water/luchtfactor $R_{w/L}$ het droogeffect te verbeteren. De relatieve vochtigheid van de uitgaande lucht ligt echter in alle gevallen op $\approx 100\%$ bij slechts geringe verschillen in temperatuur, waaruit geconcludeerd kan worden dat verhoging van de water/luchtfactor geen invloed hebben op de vochtinhoud van de lucht. De Klimaatcascade[®] functioneert bij de ontwerp zomercondities voornamelijk als een (effectieve) luchtkoeler.

Bij gemiddelde zomercondities is met een Voelbare Warmte Factor $VWF = 0,77$ de overdracht van voelbare warmte eveneens dominant, maar er treedt eveneens een duidelijke luchtdroging op. De Klimaatcascade[®] functioneert als luchtkoeler en -droger.

Bij wintercondities zijn met een $VWF \approx 0,5$ de overdracht van voelbare en latente warmte ongeveer in evenwicht. Naast verwarming van de lucht treedt een aanzienlijke luchtbevochtiging op. De Klimaatcascade[®] functioneert als (voor)verwarmer en luchtbevochtiger.

De relatieve vochtigheid van de uitgaande lucht ligt bij alle metingen dicht bij 100% . De relatieve vochtigheid die hierdoor in de ruimte wordt gerealiseerd ligt bij alle varianten binnen de grenzen van thermisch comfort.

De gemeten drukopbouw in de Klimaatcascade[®] komt goed overeen met de berekende waarden van de CFD simulaties.

Het temperatuurverloop in de Klimaatcascade[®] is voor alle varianten grafisch weergegeven. Opvallend is dat de temperatuurdaling respectievelijk –stijging van de lucht zich vrijwel geheel afspeelt in het bovenste deel van de cascade, tussen 5,1m \rightarrow 3,6 m. Of dit ook geldt voor de vochtinhoud is niet bekend, omdat de alleen bij de intrede en de uitrede zijn gemeten.

Gebouw / Klimaatmodel ALPHA:

Voor het ALPHA model zijn door budgetbeperkingen geen CFD simulaties uitgevoerd. De metingen hiervoor dienen dus niet voor de validatie van het CFD model, maar ter verificatie en kalibratie van het Excel rekenmodel.

De voor het ALPHA model benodigde water/luchtfactor van $R_{w/L} \approx 0,4$ is gerealiseerd door vermindering van het waterdebiet bij handhaving van het luchtdebiet en het sproeispectrum. Door 3 van de 5 sproeiers af te sluiten werd een water/luchtfactor $R_{w/L}$ van $\approx 0,44$ gerealiseerd. Het asymmetrische sproeipatroon dat hierbij ontstaat moest worden geaccepteerd.

Als eerste zijn metingen uitgevoerd voor de ontwerp zomercondities. De voelbare koelprestatie voldoet geheel aan de uitgangspunten van het conceptueel psychometrisch ontwerp zoals geformuleerd in hoofdstuk 8. In plaats van de verwachte luchtdroging trad echter een geringe luchtbevochtiging op. Er treedt hierdoor een ongewenste, zij het beperkte adiabatische koeling op waardoor de latente capaciteit negatief is

Bij de gemiddelde zomerconditie wordt de lucht dieper gekoeld dan de gewenste 20°C waarbij tevens een geringe verlaging van de vochtinhoud plaatsvindt. De voelbare koelcapaciteit is dus hoger dan noodzakelijk, en de vraag doet zich voor of en hoe het psychometrisch proces in een Klimaatcascade[®] kan

worden beïnvloed. Een optie hiervoor is het aanpassen van de water/luchtfactor $R_{w/L}$ door sproeiërs uit te schakelen bij handhaving van het sproeispectrum en een constante watertemperatuur van 13°C. Een tweede mogelijkheid is het verhogen van de watertemperatuur bij constante water/luchtfactor.

Bij wintercondities is de overdracht van latente warmte dominant. Er treedt een aanzienlijke luchtbevochtiging op. De Klimaatcascade[®] functioneert als (voor)verwarmer en luchtbevochtiger.

De relatieve vochtigheid van de uitgaande lucht ligt bij alle metingen dicht bij 100%. De relatieve vochtigheid die hierdoor in de ruimte wordt gerealiseerd ligt bij alle varianten binnen de grenzen van thermisch comfort.

Condensrisico in het gebouw:

Voor de laagst gemeten buitentemperatuur is voor een temperatuurfactor van 0,5 en 0,65 de maximum toegestane relatieve vochtigheid in de ruimte berekend. Hierbij is ervan uitgegaan dat de RV nabij een constructie niet langdurig hoger mag zijn dan 80%.

Voor Gebouw / Klimaatmodel BETA en een normale ruimtetemperatuur van 22°C ligt de relatieve vochtigheid in de ruimte op een veilig niveau. Voor ALPHA is zelfs een zeer veilige marge aanwezig.

Geconcludeerd kan worden dat condensrisico op uitwendige scheidingsconstructies als gevolg van gebruik van de Klimaatcascade[®] in de winterperiode niet aanwezig is. Thermische bruggen en meerdimensionale aansluitingen moeten uiteraard zorgvuldig worden gedetailleerd en berekend.

[18] De metingen in de fysieke testopstelling zijn gebruikt voor de validatie van het Excel rekenmodel en het CFD simulatiemodel. Voor het Excel rekenmodel zijn berekeningen uitgevoerd voor de varianten B1 t/m B5 en A1 t/m A5 met dezelfde invoercondities als in het meetprogramma volgens hoofdstuk 17. Tevens zijn enkele berekeningen gemaakt om de gevoeligheid van het model voor de water/lucht factor te testen.

Conclusies varianten B1 t/m B5:

- Door beperkingen in het Excel rekenmodel voor wat betreft de valsnelheid van de druppels zijn de berekende en de gemeten profielen van het psychometrisch proces in de Klimaatcascade[®] niet congruent. Dit heeft echter weinig invloed op het eindresultaat.
- Met het Excel rekenmodel kunnen de luchttemperaturen, en daarmee de voelbare prestaties van de Klimaatcascade[®], met een hoge tot zeer hoge graad van nauwkeurigheid worden berekend.
- De berekening van de vochtinhoud van de lucht, en daarmee van de latente prestaties is minder nauwkeurig. Zowel in de koelperiode als in de verwarmingsperiode is de gemeten latente capaciteit lager dan de berekende waarden. De verschillen liggen globaal tussen $\approx -0,5$ en $-1,0 \text{ g.kg}^{-1}$.

Conclusies varianten A1 t/m A5:

- Bij de ontwerp zomerconditie, variant A1, is de berekende luchttemperatuur substantieel hoger dan de gemeten waarde, waardoor de voelbare prestatie van de Klimaatcascade[®] aanzienlijk wordt ondergewaardeerd.
- Bij de gemiddelde zomercondities, variant A2, zijn de verschillen kleiner, maar wordt de voelbare prestatie van de Klimaatcascade[®] nog steeds ondergewaardeerd.
- De latente prestaties van de Klimaatcascade[®] worden bij de varianten A1 en A2 aanzienlijk overgewaardeerd. De gemeten vochtinhoud van de lucht ligt aanzienlijk boven de berekende waarden.
- Voor de voorjaar/najaar en wintercondities A3 t/m A5 komen de berekende waarden voor zowel de luchttemperatuur als de vochtinhoud goed tot zeer goed overeen met de gemeten waarden.

Gevoeligheid voor de water/luchrfactor

- Voor wat betreft de voelbare prestaties is het effect van een verhoogde water/luchtfactor bij de berekeningen sterker dan bij de metingen. Bij verhoging van de water/luchtfactor $R_{w/L}$ van 1,17 \rightarrow 1,37 komen de berekende en gemeten luchttemperaturen zeer dicht bij elkaar te liggen om daarna bij $R_{w/L} = 1,37 \rightarrow 2,3$ weer te divergeren.
- Voor wat betreft de latente prestaties is het beeld minder duidelijk. Het verschil tussen de berekende en gemeten vochtinhoud neemt bij $R_{w/L}$ van 1,17 \rightarrow 1,37 \rightarrow 1,7 toe om daarna weer af te nemen. De betrouwbaarheid van het Excel rekenmodel is voor latente prestaties onvoldoende.

Het Excel rekenmodel is dus gevoelig voor het temperatuurverschil water/lucht en voor de water/luchtfactor. Voor het meest voor de hand liggende Gebouw/Klimaattype BETA en een water/luchtfactor 1,2 tot 1,4 geeft het model goede resultaten.

Conclusies CFD simulatiemodel:

De cases B1 t/m B3 van de CFD simulaties zijn eveneens gevalideerd op basis van de meetresultaten, waarbij alleen de luchttemperaturen zijn beoordeeld. Het beeld komt in grote trekken overeen met de resultaten van de overeenkomstige simulaties met het Excel rekenmodel. Geconcludeerd kan worden dat de CFD simulaties een betrouwbaar beeld geven van de voelbare prestaties van een Klimaatcascade[®].

[19] Door specialisten van de unit Building Physics and Systems (BPS) van de Technische Universiteit Eindhoven is een simulatiemodel van de Klimaatcascade[®] ontworpen in de ESP-r omgeving.

Het model is gebaseerd op het Excel Rekenmodel en is voor wat betreft de voelbare prestaties gekalibreerd en gevalideerd op basis van de metingen in de fysieke testopstelling.

De resultaten van de validatie zijn vergeleken met het Excel Rekenmodel, het CFD model en de metingen in de fysieke testopstelling. In de meeste gevallen is er sprake van een goede tot zeer goede overeenkomst waardoor het ESP-r model geschikt is om betrouwbare voorspellingen te kunnen doen over de voelbare energiestaat van een Klimaatcascade[®]. Voor wat betreft de latente prestaties is verbetering van het model gewenst.

Aerodynamische, hydraulische en thermische trek zijn voorshands nog niet in het stromingsnetwerk van het ESP-r model geïntegreerd, waardoor het model geen voorspellingen kan doen over het energiegebruik ten behoeve van luchttransport.

Het ESP-r model van de Klimaatcascade[®] kan in principe in het gebouwmodel worden geïntegreerd, hetgeen enerzijds een grotere gebruiksflexibiliteit biedt, maar anderzijds complicerend werkt voor implementatie en gebruik. Dit was de reden om de Klimaatcascade[®] als *stand-alone* element te simuleren voor het preconditioneren van ventilatielucht. De psychometrische prestaties worden geïmplementeerd in het gebouwmodel, waardoor de energiestaat over het referentiejaar kunnen worden voorspeld.

Voor de perfectionering van het ESP-r model is aanvullend onderzoek nodig met betrekking tot de integratie van functies voor de aerodynamische en hydraulische trek in het stromingsnetwerk en verbetering van de functies voor de latente prestaties,.

[20] In een Klimaatcascade[®] wordt water gebruikt als koelmedium, niet als koudemiddel. Er wordt dus geen gebruik gemaakt van de verdampingswarmte van water en er is dus geen sprake van directe adiabatische verdampingskoeling.

Mede door de groeiende populariteit van indirecte adiabatische verdampingskoeling, zogenaamde dauwpuntkoeling, is globaal nagegaan of dit systeem in het Geo-Klimaatconcept[®] als alternatief voor de Klimaatcascade[®] zou kunnen worden toegepast. Geconcludeerd wordt dat dit om de volgende redenen niet het geval is:

- Het drukverlies is voor een natuurlijk ventilatiesysteem te hoog.
- Er is geen neerwaartse hydraulische trek beschikbaar, waardoor het systeem sterk afhankelijk is van de hulpventilator.
- De gewenste luchttemperatuur van 17°C voor Gebouw/Klimaatmodel BETA is moeilijk te realiseren.

Earth, Wind & Fire – Airconditioning zonder Ventilatoren
(III) Onderzoek Geo-Klimaatconcept[®]

4. BEGRIPPEN, EENHEDEN EN SYMBOLEN

4.1 Begrippen

Begrip	Engels	
Albedo		Diffuse reflectiefactor
Atmosferische grenslaag	Atmospheric Boundary Layer	De onderste laag van de atmosfeer waarin turbulentie door wind en thermiek aanwezig is.
Badgir	Badgir	Iraanse windtoren
Beaufort	Beaufort	Schaal van windsnelheden, aangeduid met “windkracht”
Bernoulli-effect	Bernoulli-principle	In een gesloten systeem gaat een afname van de snelheid van een fluidum gepaard gaat met een verhoging van de druk in dat fluidum , vice versa.
Bernoulli-injector	Bernoulli-injector	Voorziening in het VENTEXDAK die gebruik maakt van het Bernoulli-effect om lucht in de KLIMAATCASCADE te blazen.
Bio-terreur		Moedwillige verspreiding van virussen door bacteriologische besmette stoffen.
Bowen factor		Verhouding tussen de voelbare en de latente warmtestroom die door zonnestraling wordt veroorzaakt
BREEAM	BREEAM	British Research Establishment Environmental Assessment Method – een systeem voor de bepaling van de milieuprestatie van gebouwen.
BREEAM-NL	-	Nederlandse versie van BREEAM
bvo	gfa	bruto vloeroppervlak / resp. gross floor area
CBR	CBR	Chemische, Bacteriologische en Radioactieve stoffen
CFD	CFD	Computational Fluid Dynamics – Numerieke stromingssimulatie van fluida
Cradle to Cradle	Cradle to Cradle	Een filosofie voor duurzaam ontwerpen
Doosmodel		Eenvoudig model met behulp waarvan de concentratie van de luchtverontreiniging boven een stad wordt geschat.
DUBO	-	Duurzaam Bouwen
ECO-INSTAL	-	Rekenprogramma voor de bepaling van de milieuprestatie van installaties (in ontwikkeling).
ECO-QUANTUM	-	Rekenprogramma voor de bepaling van de

Earth, Wind & Fire – Airconditioning zonder Ventilatoren
(III) Onderzoek Geo-Klimaatconcept[®]

		milieuprestatie van gebouwen.
ESP-r	ESP-r	Gebouw simulatieprogramma.
GEO-KLIMAATCONCEPT [®]	Geo-Climate concept	Innovatief systeem van klimaatregeling dat gebruik maakt van de zwaartekracht en de aardmassa voor het conditioneren van lucht.
Globale straling		Som van de directe zonstraling en diffuse hemelstraling op een horizontaal vlak.
GPR-Gebouw	-	Een rekenmodel voor het duurzaam ontwikkelen van gebouwen
GREENCALC	-	Rekenprogramma voor de milieuprestatie van gebouwen
g-waarde	g-value	De verhouding tussen de binnenkomende en de opvallende zonnestraling voor een raam of beglazingssysteem (zowel directe als diffuse straling). Vroegere aanduiding ZTA-waarde.
Interne grenslaag	Urban boundary layer	Laag waarin de stroming bij toenemende strijklengte wordt aangepast aan de ruwheid van de stad.
Invalshoek	Angle of incident	De hoek tussen de zonnestraal en de normaal op het betreffende vlak
Irradiantie	Irradiance	De stralingsflux die door een oppervlakte-element wordt opgevangen.
Karman constante	Karman constant	Dimensieloze constante die het logaritmische snelheidsprofiel beschrijft van een turbulente vloei stofstroming in de buurt van een grenslaag.
KLIMAATCASCADE [®]	Climate Cascade [®]	Onderdeel van het GEO-KLIMAATCONCEPT [®] waarmee lucht wordt behandeld door direct contact met gekoeld of verwarmd water dat met sproeiers in de luchtstroom wordt gebracht.
Kortsluiting	Short Circuiting	Een ongewilde verbinding tussen luchtafvoer en luchtaanzuig bij ventilatiesystemen
Loefzijde	Wind side	Windzijde
Lijzijde	Lea side	Benedenwindse zijde
Menglaag	Mixing layer	Luchtlaag waarvan de lucht door turbulentie of convectie dooreen gemengd en homogeen wordt.
PCM	Phase Change Material	PCM is een faseovergangsmateriaal met een hoge smeltings/stollingswarmte dat tijdens de faseovergang energie kan opslaan respectievelijk afgeven.

Earth, Wind & Fire – Airconditioning zonder Ventilatoren
(III) Onderzoek Geo-Klimaatconcept[®]

PLEA	PLEA	Passive and Low Energy Architecture – een architectuurstroming.
PM ₁₀	PM ₁₀	Fijn stof - Vaste deeltjes ≤ 10 μm
PM _{2,5}	PM _{2,5}	Zeer fijn stof - Vaste deeltjes ≤ 2,5 μm
PM _{0,1}	PM _{0,1}	Ultra fijn stof – Vaste deeltjes ≤ 0,1 μm
Potentielle windsnelheid – U ₁₀	Potential wind speed	In weerstations gemeten windsnelheid op een hoogte van 10 m in een vlak terrein met een ruwheidlengte van 0,03 m.
Radiantie	Radiance	De intensiteit van uitgaande straling in een bepaalde richting van een oppervlakte-element gedeeld door het oppervlak van de loodrechte projectie van het element op een vlak loodrecht op de gegeven richting.
Ruwheidslengte	Roughness length	Een aerodynamische karakteristiek van het bodemoppervlak bepaald door de bodemstructuur en de geometrie van de obstakels. Windsnelheid neemt af bij toenemende ruwheidhoogte
Stedelijke laag	Urban Canopy Layer	Laag waarin de windstroming voornamelijk bepaald wordt door de geometrie van straten en hoogte van gebouwen.
Strijk lengte		Afstand waarover wind over een aaneengesloten oppervlak strijkt.
Stralingsenergie	Radiant energy	De hoeveelheid energie overgedragen door straling.
Stralingsflux, vermogen	Radiant flux	De stralingsenergie per tijdseenheid. Het vermogen dat wordt uitgezonden, overgedragen of ontvangen in de vorm van straling.
Trombewand	Trombewall	Een trombewand bestaat in principe uit een wand met daarvoor een glasplaat. De wand achter het glas warmt op door de zon en geeft - door de massa van de wand - de warmte vertraagd door naar de ruimte erachter. Door de glazen plaat wordt afkoeling en uitstraling naar buiten ('s nachts) tegengegaan.
Turbiditeit	Turbidity	Troebelheid; de toestand waarbij de doorlatendheid van de atmosfeer voor (zichtbare) straling is verminderd.
Turbulentie	Turbulence	Zie vlagerigheid
VENTEXDAK	VENTEXROOF	Innovatief dakontwerp dat gebruik maakt van een Bernoulli-ejector voor de toevoer van ventilatielucht in een gebouw en een Venturi-ejector voor het afzuigen van lucht.
Ventilatiefactor		Variabele grootte, bepaald door windsnelheid en hoogte, waarmee de afvoer van

		luchtverontreinigingen kan worden geschat.
Venturi-effect		Een doelbewust in een stromingkanaal voor vloeistof of gas aangebrachte vernauwing. Doordat het passerende medium een snelheidsverhoging ondergaat ontstaat daardoor op die plek een drukverlaging; het “Venturi-effect”
Venturi-ejector	Venturi-ejector	Voorziening in het VENTEXDAK waarmee lucht wordt afgezogen
Verschuivingshoogte		Virtuele verhoging van het grondoppervlak door de aanwezigheid van obstakels
Vlagerigheid		Windvariaties in tijd en snelheid
Winddrukcoëfficiënt	Pressure coëfficiënt	Fractie van de dynamische winddruk en de winddruk op een gebouw
Warmte-eiland effect	Urban Heat Island	Verschijnsel dat de temperatuur in een stedelijk gebied gemiddeld hoger is dan op een referentiepunt in het omliggend landelijk gebied.
Windroos		Grafische voorstelling van windsnelheden en windrichtingen in een bepaalde periode
Wrijvingssnelheid		Fictieve “snelheid” die afhangt van de wrijving die de wind ondervindt bij de stroming langs het grondoppervlak
Zog		Gebied aan de lijzijde van een gebouw waar de windinvloed nog merkbaar is.
ZONNESCHOORSTEN	Solar Chimney	Een verticale schacht waarin zonne-energie wordt benut om natuurlijke ventilatie in een gebouw te stimuleren en zonnewarmte te oogsten.
Zonnetoren	Solar updraft tower	Krachtcentrale voor de opwekking van elektrische energie. Lucht wordt verwarmd in een grote cirkelvormige glasoverkapte ruimte en stijgt op in een hoge slanke toren. De convectiestroom drijft luchturbines aan die elektrische stroom opwekken.
ZTA-waarde		Zie g-waarde
Zwarte straler	Black body	Een voorwerp dat al het licht dat er op valt, absorbeert, en dus niet reflecteert . Hoewel de naam anders zou doen vermoeden, zendt een zwarte straler wel degelijk licht uit. Het spectrum van een zwarte straler is zeer karakteristiek, en slechts afhankelijk van de temperatuur van de zwarte straler.

4.2 Eenheden en symbolen ruimte en tijd

<i>l</i>	lengte	m
<i>b</i>	breedte, diepte	m

h	hoogte	m
d	dikte	m
r	straal	m
D	middellijn, diameter	m
s	weglengthe	m
A	oppervlak	m ²
V	volume, inhoud	m ³
t	tijd	s
u, v, w, c	snellheid	m.s ⁻¹
a	versnelling	m.s ⁻²
g	gravitatieversnelling	m.s ⁻²

4.3 Eenheden en symbolen warmte

T	Thermodynamische temperatuur	K
θ (<i>theta</i>)	Celsiustemperatuur	⁰ C
α, λ (<i>alpha, lamda</i>)	lineaire uitzettingscoëfficiënt	K ⁻¹
β, α_v (<i>beta, alpha_v</i>)	kubieke uitzettingscoëfficiënt	K ⁻¹
Q	hoeveelheid warmte	J
Φ (<i>phi</i>)	warmtestroom	W
q	warmtestroomdichtheid	W.m ⁻²
G	warmtegeleiding	W.K ⁻¹
λ (<i>lamda</i>)	warmtegeleidingscoëfficiënt	W.m ⁻¹ .K ⁻¹
h	warmteoverdrachtscoëfficiënt	W.m ⁻² .k ⁻¹
U	warmtedoorgangcoëfficiënt	W.m ⁻² .K ⁻¹
r	warmteweerstandcoëfficiënt	m.k.W ⁻¹
R	warmteweerstand	m ² .K.W ⁻¹
α	temperatuurvereffeningscoëfficiënt	m ² .s ⁻¹
C	warmtecapaciteit	J.k ⁻¹
r	verdampingswarmte	kJ.kg ⁻¹
c	soortelijke warmte	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
c_p	soortelijke warmte bij constante druk	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
c_v	soortelijke warmte bij constant volume	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
γ (<i>gamma</i>)	verhouding c_p/c_v	-
h	(soortelijke) enthalpie	J.kg ⁻¹

4.4 Eenheden en symbolen klimaatregeling

t	tijd	s
-----	------	---

T		thermodynamische temperatuur	K
θ	<i>(theta)</i>	celsiustemperatuur	⁰ c
v		volume	m ³
q_v		volumestroom, (volume)debiet	m ³ .s ⁻¹
m		massa	kg
q_m		massastroom	kg.s ⁻¹
p		druk	Pa
A		oppervlak	m ²
u, v, w, c		snelheid	m.s ⁻¹
ρ	<i>(rho)</i>	(massa)dichtheid, soortelijke massa	kg.
c		soortelijke warmte	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
$h, (i)$		(soortelijke) enthalpie	J.kg ⁻¹
P		vermogen	W
Q		hoeveelheid warmte	J
Φ	<i>(phi)</i>	warmtestroom	W
$q, (\varphi)$	<i>(phi)</i>	warmtestroomdichtheid	W.m ⁻²
U		warmtedoorgangscoefficiënt	W.m ⁻¹ .K ⁻¹
G		vochtstroom	kg.s ⁻¹
g		vochtstroomdichtheid	kg.m ⁻² .s ⁻¹
x		absolute vochtigheid	kg.kg ⁻¹
φ	<i>(phi)</i>	relatieve vochtigheid	%
n		ventilatievoud	m ³ .h ⁻¹ .m ⁻³
N		aantal uren	h
G_h		aantal graaduren	K.h
G_d		aantal graaddagen	K.d
I_{clo}		kledingweerstand	Clo (0,155m ² .K.W ⁻¹)

4.5 Eenheden en symbolen stromingsleer

p		druk	Pa
σ	<i>(sigma)</i>	normaalspanning	Pa
τ	<i>(tau)</i>	schuifspanning	Pa
$\eta, (\mu)$	<i>(eta, mu)</i>	(dynamische) viscositeit	Pa.s
ν	<i>(nu)</i>	kinematische viscositeit	m ² .s
ξ	<i>(xi)</i>	weerstandscoefficiënt	-
λ	<i>(lamda)</i>	weerstandsfactor voor pijpen	-
σ, γ	<i>(sigma, gamma)</i>	oppervlaktespanning	n.m ⁻¹

5. LUCHTREINIGING

5.1 Samenvatting

Luchtfilters in luchtbehandelingsinstallaties dienen in de eerste plaats om vervuiling van de installatie te voorkomen. Voor de kwaliteit van het binnenmilieu kunnen ze door hun geuremissie als een noodzakelijk kwaad worden beschouwd. In het *Earth, Wind & Fire* concept, waarbij het gebouw fungeert als machine voor de klimaatregeling, is luchtfiltering in principe niet nodig.

De zelfreinigende klimaatcascade fungeert in beperkte mate als luchtwasser voor grotere stofdeeltjes. Bovendien worden verschillende verontreinigingen in de buitenlucht in het sproeispectrum geabsorbeerd. Indien om één of andere reden luchtfiltering noodzakelijk wordt geacht, kunnen elektrostatische luchtfilters worden toegepast, die een zeer laag drukverlies combineren met een zeer hoog rendement, ook voor fijn stof. Het verdient hierbij aanbeveling de luchtvochtigheid in het filter te beperken tot 90%. Om dit te realiseren kan de lucht worden voorverwarmd met behulp van een buiten de hoofdlichtstroom geplaatste verwarmingsunit.

5.2 Algemeen

Luchtfilters in luchtbehandelingsinstallaties dienen in de eerste plaats om vervuiling van de installatie te voorkomen. Vervuilde warmtewisselaars in luchtbehandelingcentrales veroorzaken op den duur capaciteitsvermindering. Vervuilde ventilatoren werken met een lager rendement, raken in onbalans en produceren meer geluid. Vervuilde regelopnemers en sensoren verstoren de regeling. Vervuilde luchtkanalen kunnen gezondheidsproblemen opleveren als in het geaccumuleerde stof micro-organismen gaan groeien die later in de ruimte terecht kunnen komen.

Omdat de genoemde installatiecomponenten in het *Earth, Wind & Fire* concept niet voorkomen, is luchtfiltering om deze reden niet nodig.

Een tweede reden om ventilatielucht te reinigen is de bescherming die luchtfilters kunnen bieden tegen vervuiling en verkleuring van het interieur. Het is vooral fijn stof ($PM_{2,5} - PM_{10}$)^{*} dat hiervoor verantwoordelijk is, en juist fijn stof wordt door de gangbare luchtfilters onvoldoende verwijderd. Voor dit doel zouden zeer hoogwaardige luchtfilters moeten worden toegepast.

Een derde, misschien wel de belangrijkste reden, is de bescherming van mensen in het binnenmilieu tegen fijn stof ($< PM_5$) dat door de slijmvliezen, het zelfreinigend menselijk luchtfilter, niet wordt gevangen en diep in de longen kan doordringen. De deeltjes in dit stofspectrum kunnen besmet zijn met schadelijke en giftige stoffen, zoals vluchtige organische stoffen en metalen. Op locaties waar dit risico aanwezig is kan het verstandig zijn hoogwaardige luchtfilters toe te passen (Bronsema 1995). Ook als voor bepaalde gebouwen bescherming tegen bio-terreur gewenst is kunnen dergelijke filters een extra beveiliging bieden (Bronsema 2002B, 2005).

5.3 De Klimaatcascade[®] als luchtwasser

In het Geo-Klimaatconcept functioneert de Klimaatcascade[®] tevens als luchtwasser. In een luchtwasser wordt een deel van de (bevochtigbare) stofdeeltjes $> \approx 5 \mu m$ door de waterdruppels uit de lucht “gewassen”. Het filtereffect berust op het botsen van stofdeeltjes met waterdruppels, waarna de stofdeeltjes met het water worden afgevoerd. Vettige stof- en roetdeeltjes worden niet door de waterdruppels opgenomen.

Het reinigingseffect in een sproeistraal is beperkt (ASHRAE 2000), omdat de luchtruimte rondom de waterdruppels relatief groot is en er daarom weinig botsingen plaats zullen vinden. In airconditioning systemen worden luchtwassers altijd in tegenstroom uitgevoerd, terwijl de Klimaatcascade[®] in gelijkstroom werkt waardoor het te verwachten reinigingseffect kleiner zal zijn.

Luchtwassers worden veel toegepast in de industrie en de intensieve veehouderij om de stof- en geurbelasting van proceslucht te reduceren. Bij klimaatregeling is het op locaties met veel

luchtverontreiniging een groot voordeel dat veel oplosbare gassen, SO₂, NO_x, Ozon, NH₃, formaldehyde, geurstoffen en smog in de Klimaatcascade[®] worden geabsorbeerd.

Anders dan de naam suggereert kan een luchtwater niet als volwaardige luchtreiniger worden beschouwd.

5.4 Stoffilters

In de traditionele klimaattechniek worden in het beste geval zakkenfilters toegepast van de klasse EU 8/9 met een rendement van 80 – 90% bij een deeltjesgrootte van 1µm; fijn stof wordt door dergelijke filters niet gevangen. De luchtweerstand van deze filters is aanzienlijk, 100 – 400 Pa, waardoor ze in het natuurlijke ventilatieconcept van Earth, Wind & Fire niet kunnen worden toegepast. Bovendien laboreren dergelijke filters aan de zgn. *luchtfILTERparadox*: Stofdeeltjes worden uit de lucht verwijderd maar na enige tijd gaat het in de filters verzamelde stof geur afgeven die door mensen als onaangenaam wordt ervaren. P.O. Fanger noemde deze geuremissie de “*verborgen olfs*” (Fanger 1987). Het effect wordt nog versterkt als filters nat worden, bijvoorbeeld ingeval van mistig weer als kleine waterdruppeltjes in het filter worden afgescheiden. In dit geval kan een luchtfILTER zelfs een uitstekende voedingsbron gaan vormen voor microbiologische groei. Niet alleen wordt hierdoor de geuremissie versterkt, maar ook bestaat kans op schimmelgroei in het filter met de kans dat schimmelsporen in de ruimte terecht komen en bij gevoelige mensen allergische reacties kunnen veroorzaken. Technieken om luchtfilters droog te houden zijn bekend, maar worden niet algemeen toegepast (Bronsema 2001).

Geconcludeerd kan worden dat stoffilters in klimaatinstallaties een noodzakelijk kwaad zijn. Ze vormen niet alleen een belangrijke kostenpost voor het energiegebruik en de exploitatie van klimaatinstallaties, maar zijn ook debet aan een degeneratie van de buitenluchtkwaliteit. De beste luchtkwaliteit is die van de buitenlucht mits die niet door het verkeer en/of andere bronnen is verontreinigd. Natuurlijke ventilatiesystemen zijn dan ook qua luchtkwaliteit superieur.

5.5 Hoogwaardige luchtfilters

Indien een slechte kwaliteit van de buitenlucht dan wel de aan het binnenmilieu gestelde eisen dit noodzakelijk of wenselijk maakt moet de ventilatielucht worden gefilterd, maar dan wel met hoogwaardige luchtfilters. Deze kunnen ook uit hygiënische overwegingen wenselijk zijn om de luchtkanalen, en/of de vloer- of plafondruimte, als deze voor de luchtverdeling worden gebruikt, zo schoon mogelijk te houden.

Hoogwaardige HEPA stoffilters komen voor een natuurlijk ventilatiesysteem niet in aanmerking in verband met hun hoge luchtweerstand.

Het enige luchtfILTER dat een zeer hoog rendement combineert met een zeer lage luchtweerstand is het elektrostatische luchtfILTER (Bronsema, B. 1997). Dit type is dus geschikt voor toepassing in het Earth, Wind & Fire concept; zie paragraaf 5.5.

5.6 Elektrostatisch luchtfILTER

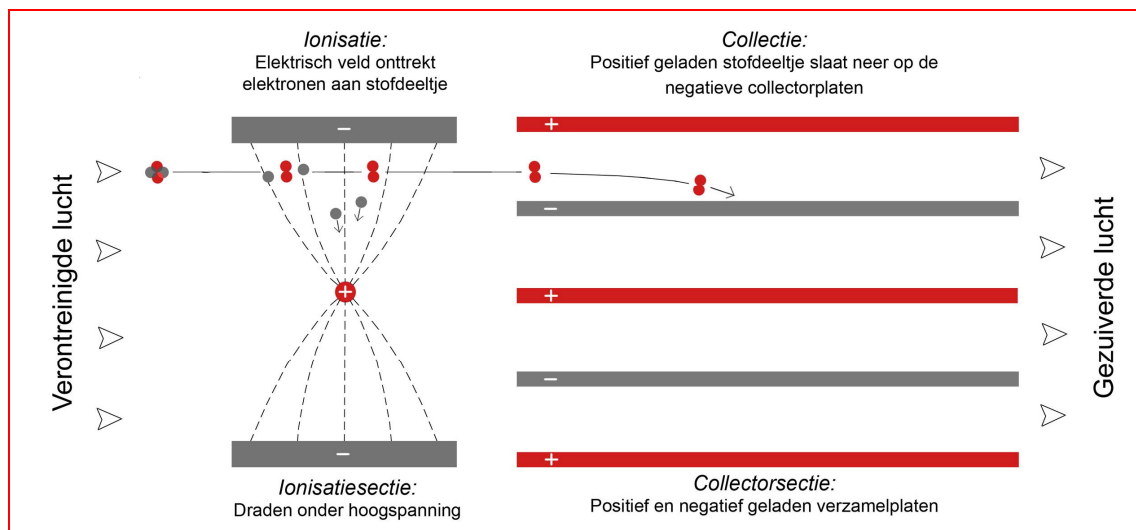
Het reinigingseffect van elektrostatische filters is gebaseerd op het fysische principe dat elektrisch geladen deeltjes in een elektrisch veld worden afgebogen. In een elektrostatische luchtfILTER worden stofdeeltjes elektrisch opgeladen en vervolgens door middel van een elektrostatisch veld van baan veranderd en opgevangen op platen, zie figuur 5.1 (ISSO 2002 - Handboek Installatietechniek)

De te reinigen lucht stroomt door het filter, bestaande uit een ionisatiesectie en een collectorsectie. In de ionisatiesectie worden de stofdeeltjes elektrisch geladen in het spanningsveld dat aanwezig is tussen de ionisatiedraden en de geaarde platen. Deze geladen deeltjes komen nu in de collectorsectie; deze bestaat uit een aantal parallel geplaatste metalen collectorplaten, afwisselend geaard of aangesloten op een hoge spanning. De positief geladen deeltjes worden door de positief geladen platen afgestoten en op de geaarde platen neergeslagen en daarmee uit de luchtstroom verwijderd. De adhesiekrachten, al of niet geholpen door een stofbindmiddel, houden de deeltjes op hun plaats. Met behulp van een (automatische)

wasinrichting wordt het filter periodiek gereinigd. De ionisatiedraden worden aangesloten op een gelijkspanning van 12 kV, en de collectorplaten op ≈ 6 kV.

Voordelen van elektrostatische luchtfilters t.o.v. zakkenfilters zijn de volgende (Bronsema B. 2002C):

- Hoge afscheidingsgraad tot 99% voor fijn stof – zie figuur 5.2
- Laag drukverlies, ca 10 Pa bij een luchtsnelheid van 1,0 m/s – zie figuur 5.2
- Geen geuremissie en microbiële groei in het filter;
- Microbiële verontreinigingen zoals bacteriën worden niet slechts afgescheiden maar tevens door de in het hoogspanningsveld gevormde ozon “geoxideerd” oftewel verbrand;
- Door de ozonvorming worden ook vele organische geurstoffen geoxideerd waardoor de lucht frisser wordt, mede door de omzetting van O_3 naar O_2 ;
- Constant drukverlies, onafhankelijk van de vervuilingstoestand;
- Lagere onderhoudskosten, omdat geen filtercellen behoeven te worden gewisseld;
- Door de (automatische) wasinrichting worden afvalproblemen met volumineuze gebruikte filtercellen voorkomen;

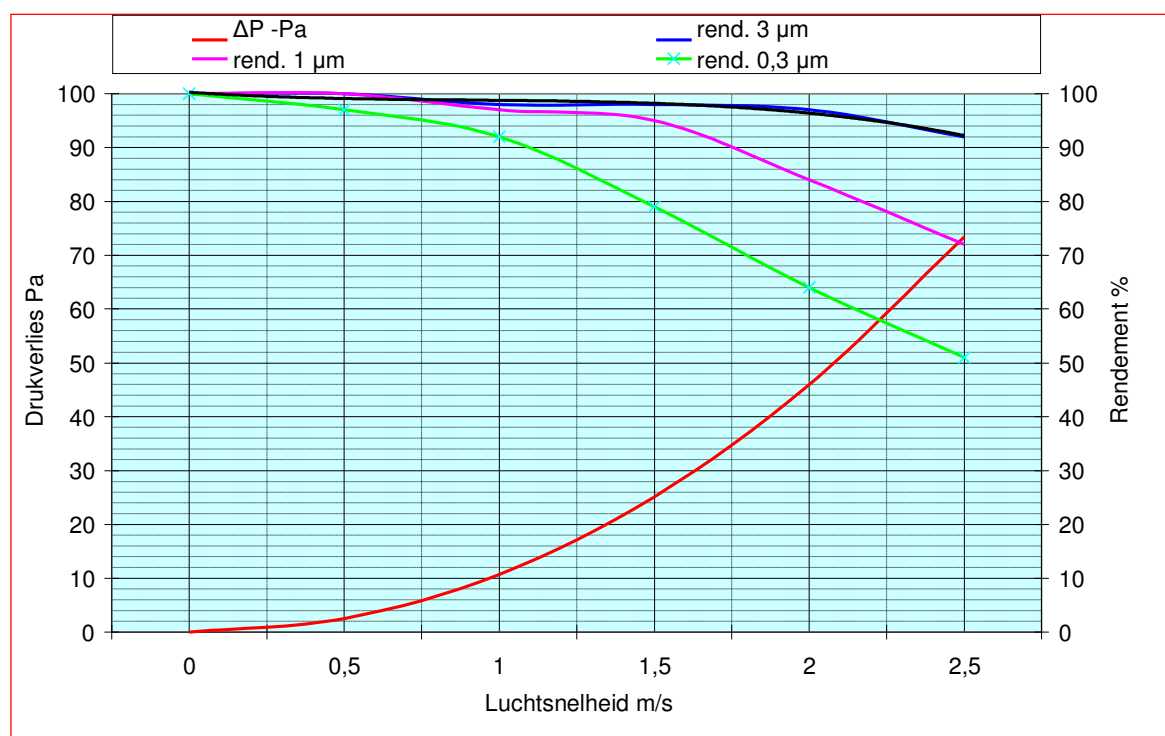


Figuur 5.1. – Principe van een elektrostatisch luchtfilter (ISSO 2002)

Nadelen van elektrostatische filters zijn

- De hoge investeringskosten en de introductie van *hightech* apparatuur in een gebouw. Een globale levenscyclusanalyse wijst echter uit dat de jaarlijkse kosten niet hoger zijn dan die van traditionele zakkenfilters. Bij een hoge stofconcentratie in de buitenlucht is de terugverdientijd korter dan bij relatief schone lucht.
- Een eventuele restozon productie, die echter in de praktijk geen problemen oplevert. (TÜH 1997) Het reactievermogen van ozon is dermate groot dat een vrijwel volledige omzetting van O_3 naar O_2 in de Klimaatcascade[®] - zie hoofdstuk 6- plaatsvindt.

Grotere stofdeeltjes $> 30 \mu m$ worden in een elektrostatische slecht afgescheiden. Voor dit stofspectrum wordt daarom een grof voorfilter aangebracht.



Figuur 5.2 – Rendement en drukverlies elektrostatisch luchtfilter – bron GEA-Delbag

5.7 Conclusie

Door de gunstige aanzuiglocatie van de buitenlucht -zie deelrapport (IV) hoofdstuk 9, zal in veel gevallen geen luchtfiltering nodig zijn. Waar dit wel het geval is kunnen binnen de randvoorwaarden van het Earth, Wind & Fire concept elektrostatische luchtfilters worden toegepast.

5.8 Luchtfilterprotectie

Luchtfilters in een ventilatiesysteem kunnen in geval van stuifneeuw, mist en motregen vochtdoorslag geven en/of dichtvriezen. Ook bestaat gevaar voor corrosie en elektrische overslag in elektrostatische filters. Het is daarom gewenst luchtfilters droog te houden: “*The First Law in Air Filter Technology: Keep the Filter Dry*” (Bronsema, B. 2001B, 1995). Om dit te bereiken moet de lucht onder de genoemde omstandigheden worden gedroogd.

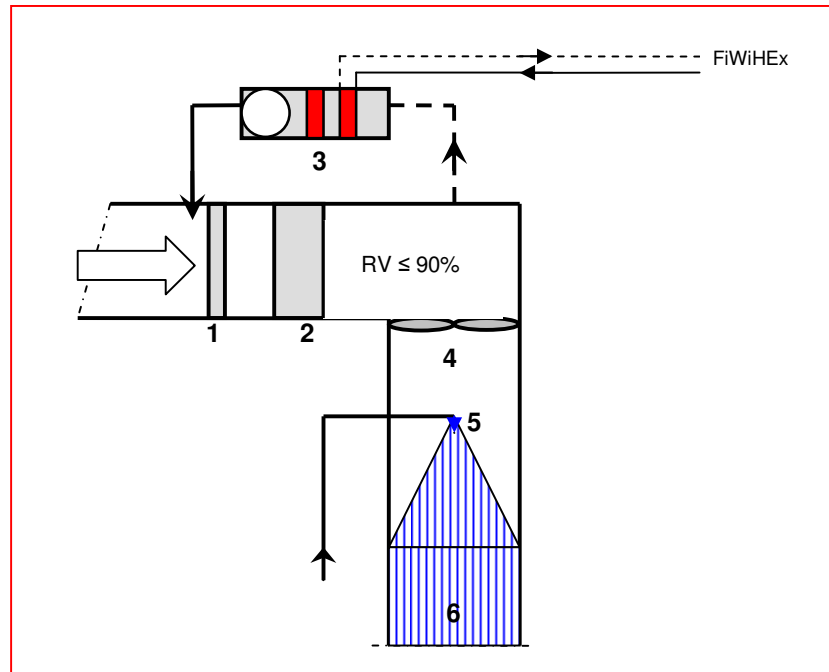
Het thermisch vermogen van het droogstelsel moet in principe groot genoeg zijn om de relatieve vochtigheid van de lucht tot 90% te beperken (DIN 1994). De maximum concentratie van vloeibare vochtdeeltjes in lucht bedraagt ca $200 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ en om deze te verdampen en de lucht verder te drogen tot een relatieve vochtigheid van 90% is per $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ventilatielucht een thermisch vermogen nodig van $\approx 3 \text{ kW}$.

De volgende verwarmingssystemen kunnen worden toegepast:

- Een register van gladde koperen buizen, aangesloten op de warmteterugwinning of op het verwarmingssysteem van het gebouw en aangebracht vòòr het grof filter. Bevriezingsgevaar maakt dit tot een minder aantrekkelijke optie.
- Elektrische infrarood verwarming. Deze elementen zijn geïnstalleerd in de ongefilterde lucht en zullen in de loop van de tijd vervuilen. Bij inschakeling in geval van een hoge relatieve vochtigheid wordt het stof door de hoge temperatuur van de stralingslampen ontleed en verbrand. Hierdoor ontstaat een sterke geuremissie en mogelijk zelfs brandgevaar.
- Recirculatie met warme lucht. Bij dit systeem wordt $\approx 10\%$ van het luchtdebiet uit de Klimaatcascade[®] gerecirculeerd en na verwarming met $\approx 25 \text{ K}$ teruggevoerd naar de vuile kant van het luchtfilter. Dit systeem is het meest betrouwbaar en heeft daarom de voorkeur – zie figuur 5.3.

Legenda

1. Grof voorfilter in de overdrukkamer;
2. Elektrostatisch filter
3. Luchtverwarmingskast met verwarming uit de FiWiHEX installatie in de zonneschoorsteen + elektrische back-up;
4. Hulpventilator
5. Sproeisysteem
6. Klimaatcascade[®]



Figuur 5.3– Luchtdroging t.b.v. luchtfilterprotectie

Earth, Wind & Fire – Airconditioning zonder Ventilatoren
(III) Onderzoek Geo-Klimaatconcept[®]

6. HET GEO-KLIMAATCONCEPT[®]

6.1 Samenvatting

Het Geo-Klimaatconcept[®] is een natuurlijk werkend luchtbehandelingsstelsel waarbij de lucht centraal wordt ge(pre)conditioneerd met koude uit de bodem of met warmte die wordt geogst in een Zonneschoorsteen of Zonrefacade[®].

Hart van het Geo-Klimaatconcept[®] is de Klimaatcascade[®], waarin de ventilatielucht al naar gelang het seizoen wordt gekoeld en gedroogd dan wel verwarmd en bevochtigd. In de Klimaatcascade[®] wordt ook een bescheiden overdruk opgewekt, waarmee de drukverliezen in het luchtverdeelstelsel kunnen worden gecompenseerd. De winddruk speelt hierbij een aanvullende, maar wisselende rol.

Het Geo-Klimaatconcept[®] werkt zonder ventilatoren en het luchtverdeelstelsel moet dan ook worden ontworpen op basis van lage luchtsnelheden en lage drukverliezen. De afmetingen van de benodigde schachten en kanalen zijn hierdoor groter dan bij mechanische systemen. Het luchtverdeelstelsel wordt daarom idealiter bouwkundig in het architectonisch ontwerp geïntegreerd.

Voor enkele gebouwtypen wordt schematisch aangegeven hoe deze integratie kan worden gerealiseerd:

- Enkel corridor gebouw, met luchttoevoer via geïntegreerde gevelkanalen of inpandige kanalen en luchtafzuiging via de plafondruimten van de corridors.
- Atrium gebouw met luchttoevoer via geïntegreerde gevelkanalen en afzuiging via het atrium.
- Atriumgebouw met luchttoevoer via het atrium en afzuig via geïntegreerde gevelkanalen of inpandige kanalen.
- Dubbel corridorgebouw als variant op het atriumgebouw.

Bij deze gebouwtypen worden de gevelkanalen en de inpandige kanalen idealiter geïntegreerd met de draagconstructie.

Bij de toepassing van het Geo-Klimaatconcept[®] voor grote renovaties van bestaande gebouwen is integratie van het luchtverdeelstelsel in het architectonisch en bouwkundig ontwerp niet of nauwelijks uitvoerbaar. Daarom wordt voor deze gevallen een systematiek omschreven waarbij gebruik wordt van gemaakt van bestaande installatieschachten. De luchttoevoer wordt hierbij gerealiseerd via de plafondruimte en de luchtafzuiging via de corridors. Dit concept is uitgewerkt voor de *case study* –zie deelrapport (IV).

6.2 De Klimaatcascade[®]

Hart van het Geo-Klimaatconcept[®] is de Klimaatcascade[®], een bouwkundige schacht waarin ventilatielucht wordt gedroogd en gekoeld dan wel verwarmd en bevochtigd door direct contact met gekoeld of verwarmd water dat door sproeiers boven in de schacht wordt gepompt.

Het principe van luchtkoeling door direct contact met gekoeld water is niet nieuw maar stond aan het begin van de ontwikkeling van de airconditioning begin 20^e eeuw. Het belangrijkste toepassingsgebied lag destijds in de tabaks- en de katoenindustrie, waar vochtbeheersing belangrijker was dan temperatuurbeheersing. De luchtwasser met dauwpuntsregeling, later uitgegroeid tot koelwasser, ontwikkelde zich daardoor tot een centraal element ook voor comforttoepassingen. Carrier, één van de grondleggers van airconditioning, wees droge luchtkoelers (koelbatterijen) eigenlijk af, omdat hiermee de vochtigheid niet goed te regelen was; *“It’s not the heat, it’s the humidity”*.

Pas veel later, toen ook kleinere gebouwen en woningen werden voorzien van airconditioning, kregen droge koelers de overhand, want koelwassers waren voor deze toepassing te log en onpraktisch.

Bovendien was voor het publiek airconditioning in de eerste plaats koeling (Cooper, G. 1998; Will, H.M. 1999; Bronsema, B. 2002).

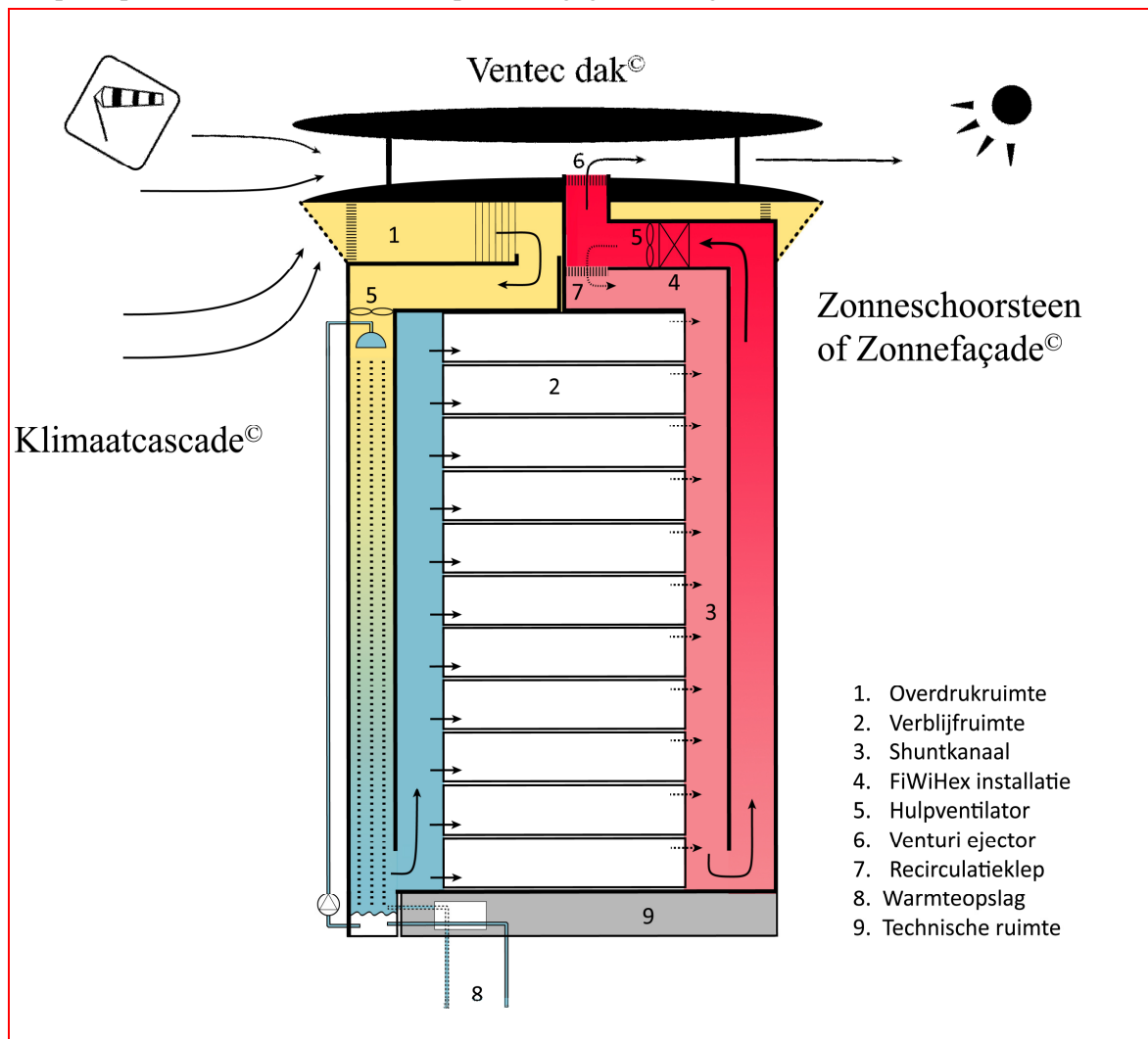
De Klimaatcascade[®], zoals toegepast in het Geo-Klimaatconcept[®], is om de volgende redenen superieur aan de traditionele systemen voor luchtkoeling met koelmachines en droge koelers:

- Het energiegebruik voor luchtkoeling is slechts een fractie van het energiegebruik bij traditionele koelsystemen –zie hoofdstuk 8.

- In de Klimaatcascade[®] wordt druk opgebouwd voor de luchtdistributie in het gebouw – zie hoofdstuk 13.
- De investerings-, onderhouds- en exploitatiekosten zijn lager omdat het systeem gebruik maakt van bouwkundige voorzieningen met lange levensduur.
- De Klimaatcascade[®] is weinig gevoelig voor vervuiling en bovendien zelfreinigend waardoor een betere luchtkwaliteit geleverd.
- De natuurlijk ionenbalans van de lucht blijft in stand, hetgeen eveneens een positieve invloed heeft op de luchtkwaliteit.

6.3 Principe

Het principe van het Geo-Klimaatconcept[®] is aangegeven in figuur 6.1.



Figuur 6.1 – Principe Geo-Klimaatconcept[®]

Op dakniveau, waar de windsnelheid en de winddruk het hoogst zijn, wordt positieve winddruk benut voor toevoer van ventilatielucht naar de Klimaatcascade[®] (5), een warmtewisselaar uitgevoerd als bouwkundige schacht. De positieve druk in de overdrukruimte (1) wordt tevens gebruikt voor de opwekking van energie met behulp van windturbines – zie deelrapport (II).

Boven in de Klimaatcascade[®] wordt water van $\approx 13^{\circ}\text{C}$ gesproeid en de miljoenen vallende waterdruppels zorgen 's zomers voor koeling en droging, en 's winters voor verwarming en bevochtiging van de lucht. De impuls van de vallende waterdruppels wordt gedeeltelijk overgedragen op de lucht, waardoor een aerodynamische trek ontstaat die de neerwaartse stroming van de lucht versterkt. De lucht/water emulsie in de Klimaatcascade[®] is zwaarder dan de omgevingslucht, waardoor de aerodynamische trek wordt versterkt met hydraulische trek en in de koelperiode tevens met omgekeerde thermische trek. Hierdoor wordt aan de voet van de Klimaatcascade[®] een positieve druk opgebouwd, die wordt benut voor de luchtdistributie in het gebouw. Door het watervaleffect wordt de lucht tevens geïoniseerd en verfrist –zie hoofdstuk 14.

De aldus geconditioneerde lucht stroomt aan de voet van de Klimaatcascade[®] naar een verticale toevoerschacht van waaruit de kantoorruimten (2) van lucht worden voorzien. De luchtdistributie vindt plaats door kwelventilatie⁷ via laag geplaatste wandroosters, die elektronisch op constant of variabel debiet worden geregeld. De gebruikte lucht wordt op plafondniveau via het shuntkanaal (3) en de zonneshoorsteen afgezogen –zie deelrapport (I). Op dakniveau wordt de lucht door een watergekoelde warmtewisselaar systeem FiWiHeX (4) gekoeld en stroomt vervolgens via de Venturi-ejector (6) naar buiten- zie deelrapport (II), hoofdstuk 16. De aan de lucht onttrokken warmte wordt in de bodem opgeslagen voor benutting in de winter; zie deelrapport (I).

Het sproeiwater wordt aan de voet van de Klimaatcascade[®] opgevangen in een reservoir, dat met behulp van een warmtewisselaar op een temperatuur van $\approx 13^{\circ}\text{C}$ wordt gehouden. In de koelperiode wordt het reservoir gekoeld met koude uit de bodem, en in de stookperiode verwarmd met warmte die direct of indirect door de Zonneshoorsteen of de Zonnefaçade[®] wordt geleverd.

In de volgende paragrafen wordt het Geo-Klimaatconcept[®] in enkele gebouwtypen geprojecteerd en nagegaan welke typen zich het beste lenen voor de toepassing.

6.4 Enkel corridor gebouw

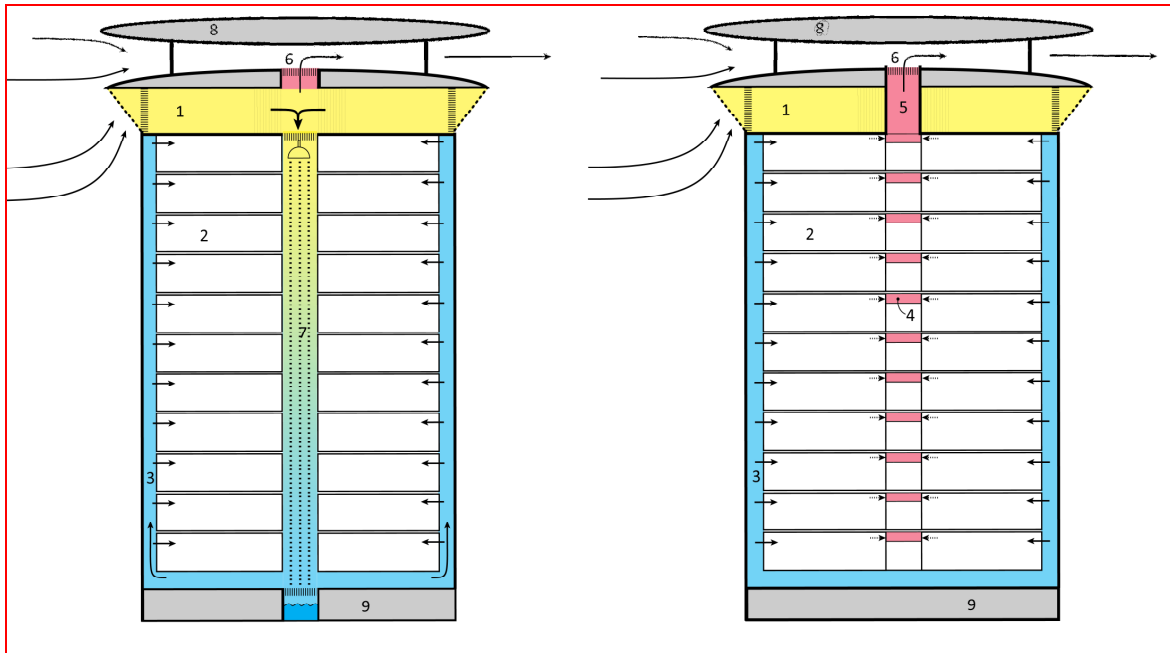
6.4.1 Luchttoevoer via gevelkanalen – zie figuur 6.2

Figuur 6.2 geeft het Geo-Klimaatconcept[®] weer in een enkele corridor gebouw. Links is de doorsnede ter plaatse van de Klimaatcascade[®] - rechts de normaaldoorsnede.

Geconditioneerde lucht wordt aan de voet van de Klimaatcascade[®] (7) via een tussenvloer naar verticale verdeelkanalen aan de gevel (3) toegevoerd, en van daaruit gedistribueerd naar de kantoorruimten (2). De gebruikte lucht wordt aan de gangzijde via een kanaalsysteem in het gangplafond (4) afgevoerd naar het shuntkanaal van de zonneshoorsteen en stroomt van daaruit via de Zonneshoorsteen (5) of de Zonnefaçade[®], de FiWiHeX warmteterugwinning –zie deelrapport (I)- en de Venturi-ejector (6)–zie deelrapport (II)- naar buiten.

Het luchttoevoersysteem is hier nogal omvangrijk en gecompliceerd. Er is een tussenvloer nodig en de gevelkanalen krijgen, vooral bij hogere gebouwen, een grote omvang. Bij een gebouw van 10 verdiepingen, één gevelkanaal per 3,6 m, een vertrekdiepte van 5,4 m, een ventilatiecapaciteit van $5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (zie hoofdstuk 15) en een luchtsnelheid van $\text{ca } 2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ worden de gevelkanalen $\text{ca } \varnothing 400 \text{ mm}$ - zie figuur 6.4. Of het drukverlies van een dergelijk luchtverdeelsysteem door de Klimaatcascade[®] kan worden opgebracht, hangt af van de gebouwhoogte, de drukopbouw in de Klimaatcascade[®] - afhankelijk van de klimaatomstandigheden- en de winddruk. Er is weliswaar een hulpventilator beschikbaar maar het aantal bedrijfsuren hiervan moet zoveel mogelijk worden beperkt.

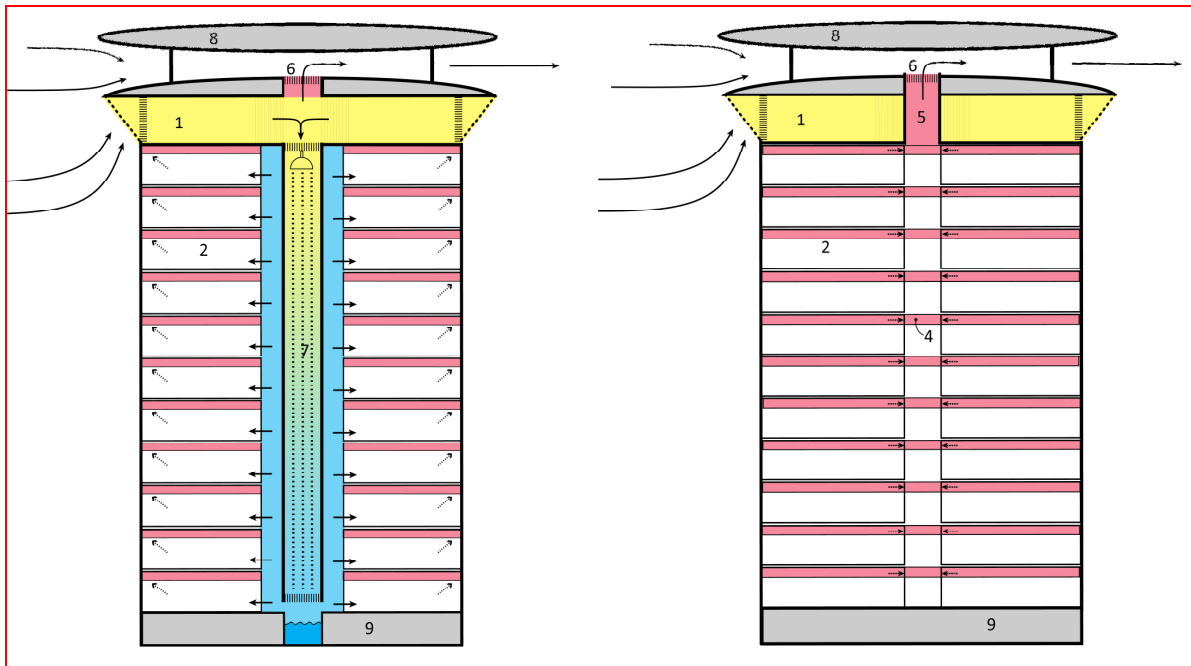
⁷ Vaak “Verdringingsventilatie” genoemd



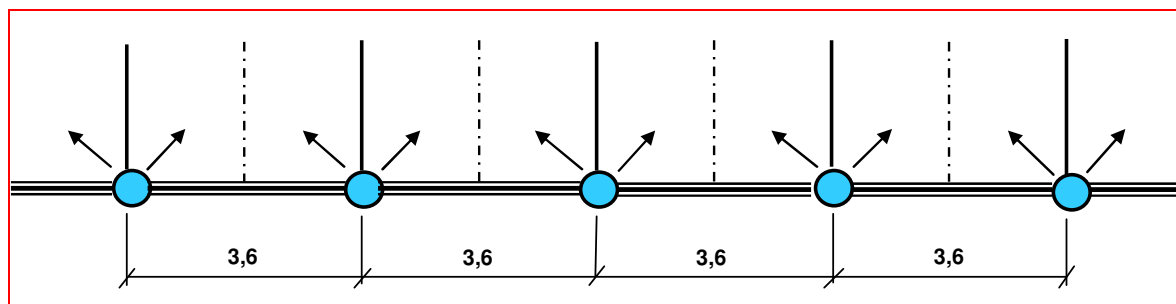
Figuur 6.2 – Enkel corridor gebouw – luchttoevoer via gevelkanalen

6.4.2 Luchttoevoer via inpandige kanalen – zie figuur 6.3

Figuur 6.3 laat de luchtverdeling zien bij toepassing van inpandige kanalen. Het luchttoevoersysteem is identiek maar spiegelbeeldig met figuur 6.2. De verticale luchtkanalen staan in de gang zone in een soortgelijke verdeling en maatvoering als aangegeven in figuur 6.4. Er is in dit geval geen tussenvloer nodig maar wel een horizontale transportschacht ter plaatse van de gang zone. Om een goede luchtverdeling in de ruimte te realiseren kan hier het beste via de verlaagde plafonds worden afgezogen. Het afzuigsysteem is verder identiek aan figuur 6.2.



Figuur 6.3 – Enkel corridor gebouw – luchttoevoer via inpandige kanalen



Figuur 6.4 – Principe luchttoevoerkanalen aan de gevel of inpandig

6.4.3 Beoordeling

De getoonde concepten lijken moeilijk verenigbaar met de eisen voor een brandveilig gebouw. Een voorlopige conclusie is dan ook dat deze toepassing van het Geo-Klimaatconcept[®] op enkele, voor architect en klimaatingenieur uitdagende problemen zal stuiten.

Uit hygiënische overwegingen moet aandacht moet worden besteed aan de reinigbaarheid en aan de eventuele noodzaak van elektrostatische luchtfilters van het luchttoevoersysteem - zie hoofdstuk 5.

6.5 Atriumgebouw

Een atrium kan worden gebruikt als centraal afzuigplenum of als centraal toevoerplenum van de ventilatielucht. Zie figuur 6.5 en 6.6 en de bijbehorende toelichting.

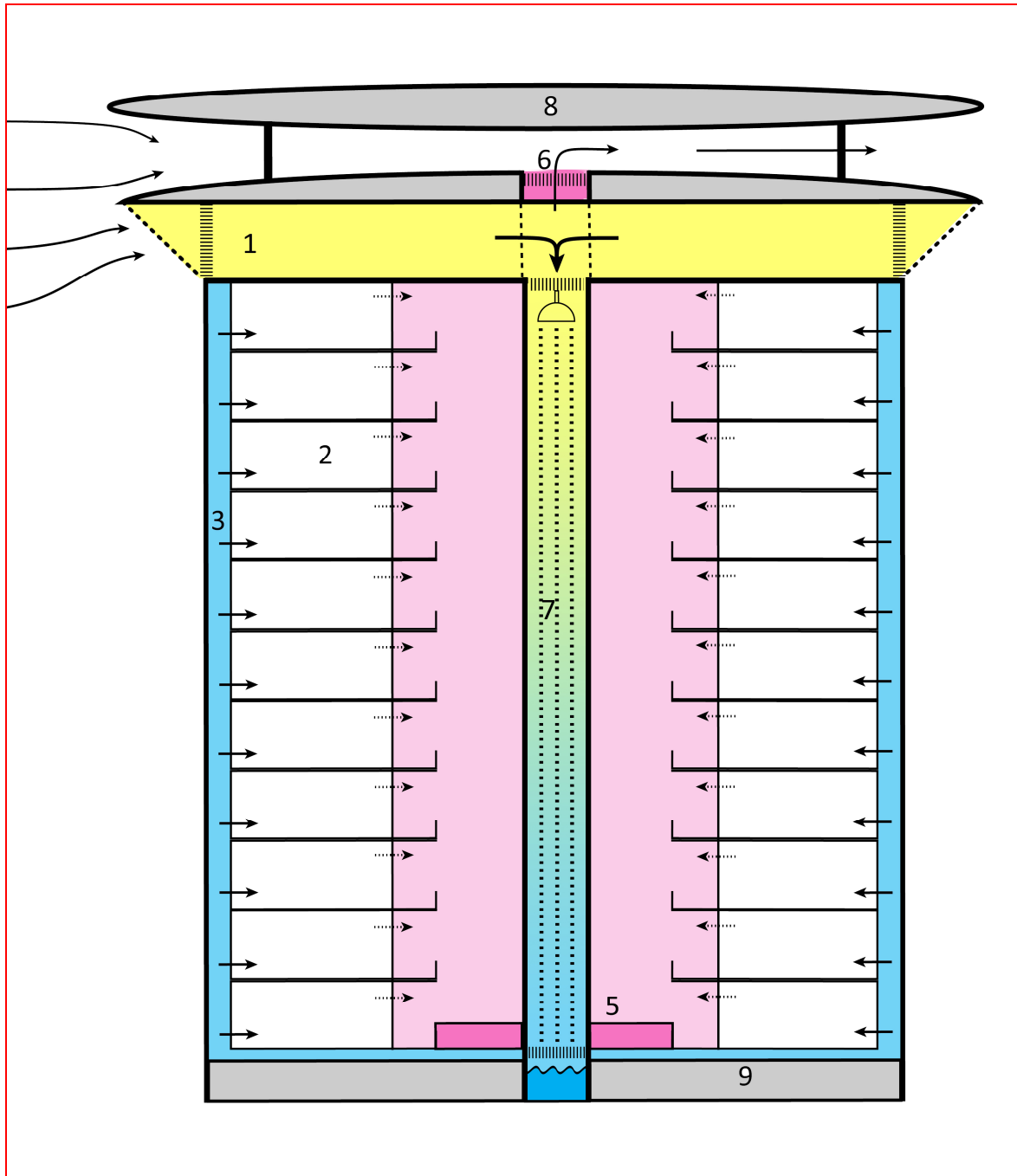
6.5.1 Centraal afzuigplenum – zie figuur 6.5

De luchttoevoer is bij dit concept identiek aan figuur 6.1. De gebruikte ventilatielucht stroomt vanuit de kantoorruimten via overstroomroosters naar het atrium en wordt daar via roosters afgezogen naar de voet van de zonneshoorsteen of de Zonnefaçade[®]. Het atrium dient hier dus tevens als shuntkanaal.

Het voordeel van een centraal afzuigplenum is dat de door de zonneshoorsteen te leveren thermische trek niet groot hoeft te zijn omdat het drukverlies van het afzuigstelsel beperkt is -zie deelrapport (I). Het thermisch vermogen en daarmee de afmetingen van zonneshoorsteen kunnen daardoor kleiner zijn dan bij een centraal toevoerplenum. Het luchttoevoersysteem is min of meer identiek aan dat van figuur 6.2. Zoninstraling in het atrium is binnen bepaalde grenzen geen probleem; zonnewarmte wordt via de gebruikte ventilatielucht afgevoerd.

De luchttoevoer is bij dit concept identiek aan figuur 6.1. De gebruikte ventilatielucht stroomt vanuit de kantoorruimten via overstroomroosters naar het atrium en wordt daar via roosters afgezogen naar de voet van de zonneshoorsteen of de Zonnefaçade[®]. Het atrium dient hier dus tevens als shuntkanaal.

Het voordeel van een centraal afzuigplenum is dat de door de zonneshoorsteen te leveren thermische trek niet groot hoeft te zijn omdat het drukverlies van het afzuigstelsel beperkt is -zie deelrapport (I). Het thermisch vermogen en daarmee de afmetingen van zonneshoorsteen kunnen daardoor kleiner zijn dan bij een centraal toevoerplenum. Het luchttoevoersysteem is min of meer identiek aan dat van figuur 6.2. Zoninstraling in het atrium is binnen bepaalde grenzen geen probleem; zonnewarmte wordt via de gebruikte ventilatielucht afgevoerd.

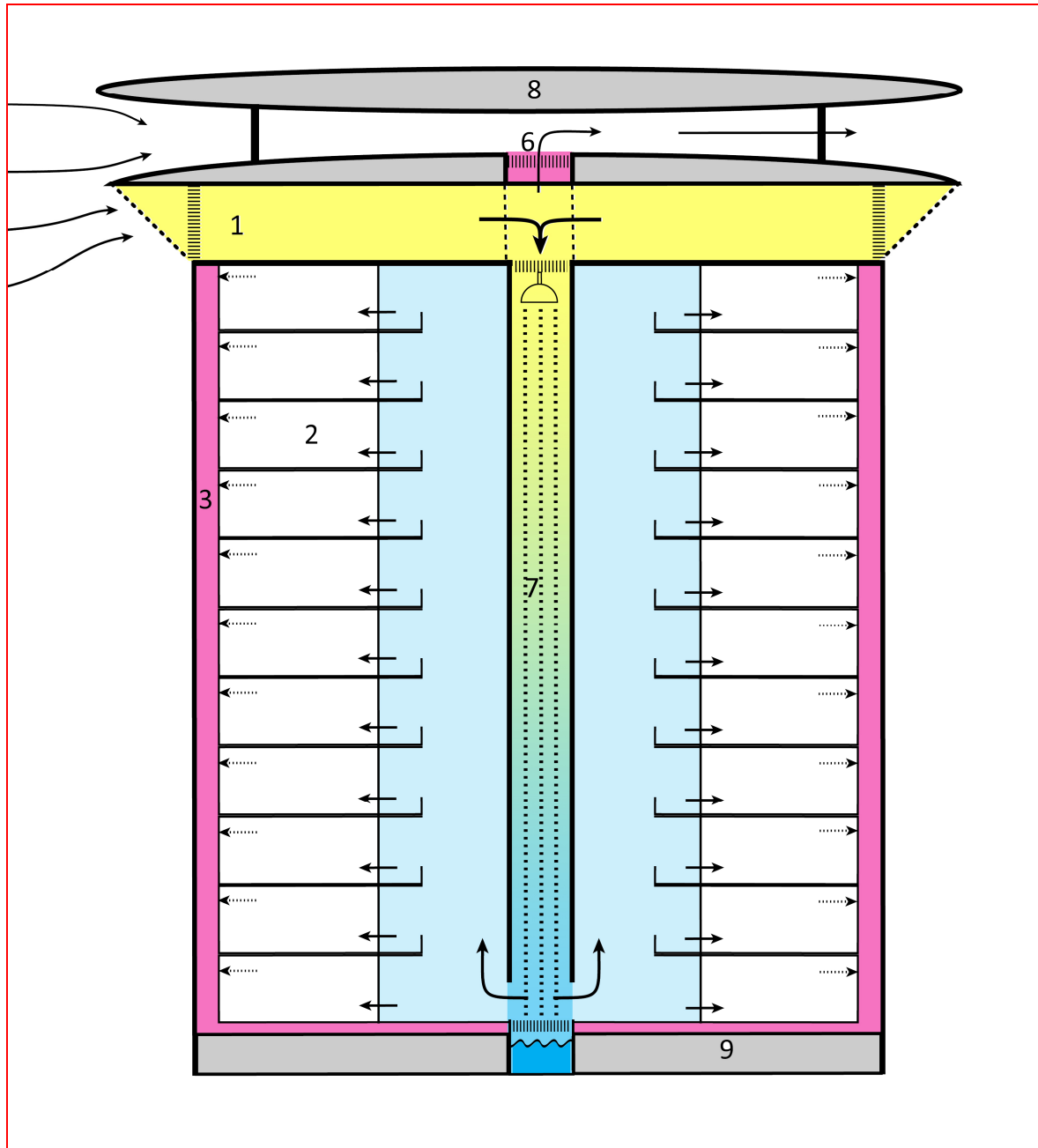


Figuur 6.5 – Principe atriumgebouw – atrium is afzuigplenum

6.5.2 Centraal toevoerplenum – zie figuur 6.6

De Klimaatcascade[®] wordt bij dit principe op het niveau van de eerste verdieping onderbroken en het water valt als een fontein vrij in het gekoeld water reservoir, dat als een vijver kan worden vormgegeven. De ventilatielucht stroomt hier ter plaatse het atrium in. De kantoorruimten worden afgezogen via afzuigkanalen aan de gevel, die aan de voet zijn aangesloten op de zoneschoorsteen. Geconditioneerde ventilatielucht wordt vanuit het atrium via kwelroosters aan de kantoorruimten toegevoerd. De afzuigkanalen aan de gevel dienen hier als shuntkanaal voor de zoneschoorsteen.

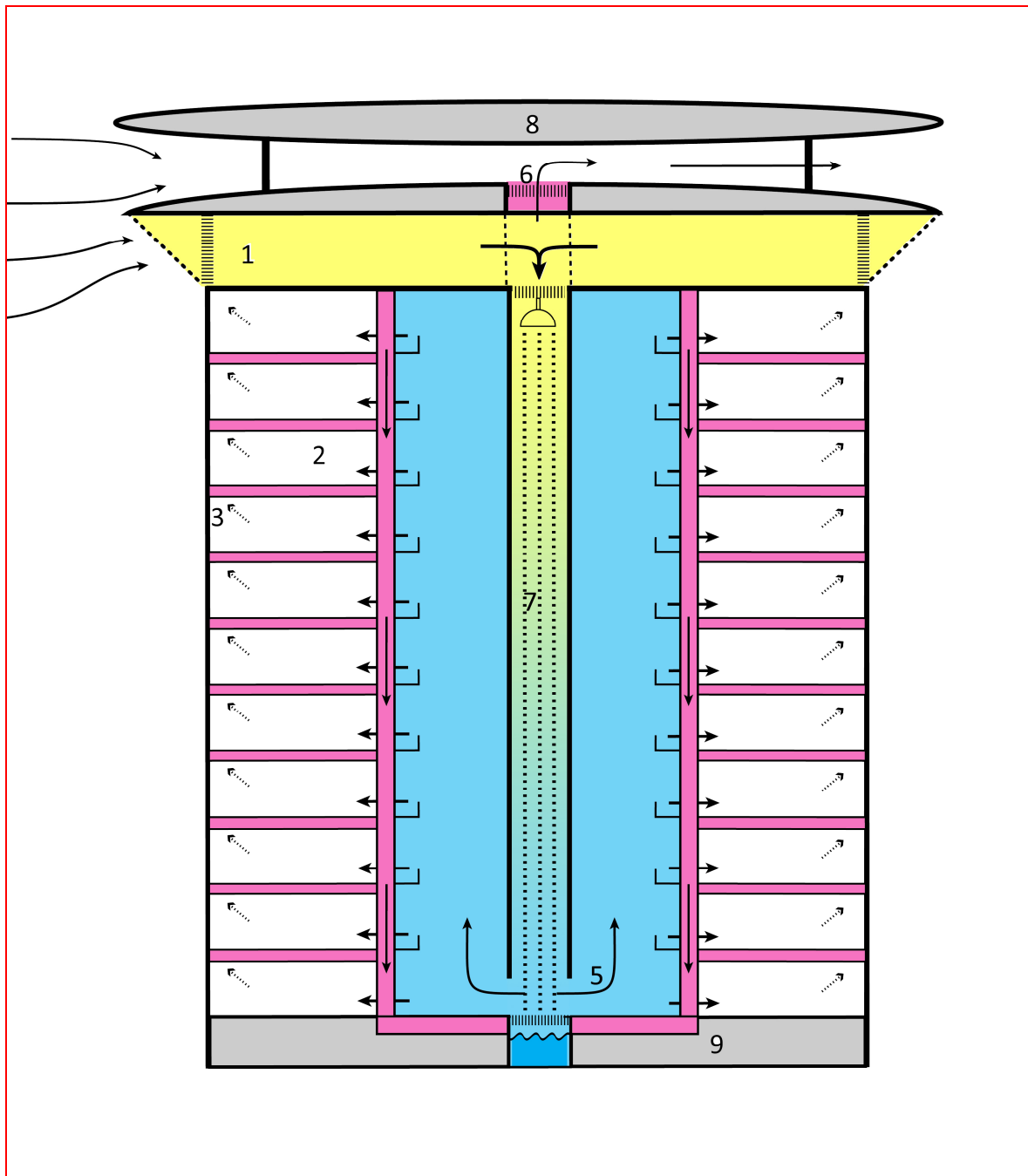
Het atrium is hier koeler dan de kantoorvertrekken en de luchttemperatuur aan de voet van de Klimaatcascade[®] mag in dit geval daarom ook niet te laag zijn. Ook is het gebruik van de Klimaatcascade[®] buiten het koelseizoen niet zonder meer mogelijk -zie hoofdstuk 12. Voor toepassingen van adiabatische koeling in een warm klimaat is dit overigens een veel geciteerde en onderzochte oplossing.



Figuur 6.6 – Principe atriumgebouw – Atrium is toevoerplenum

6.5.3 Atriumgebouw – luchtkanalen inpandig –zie figuur 6.7

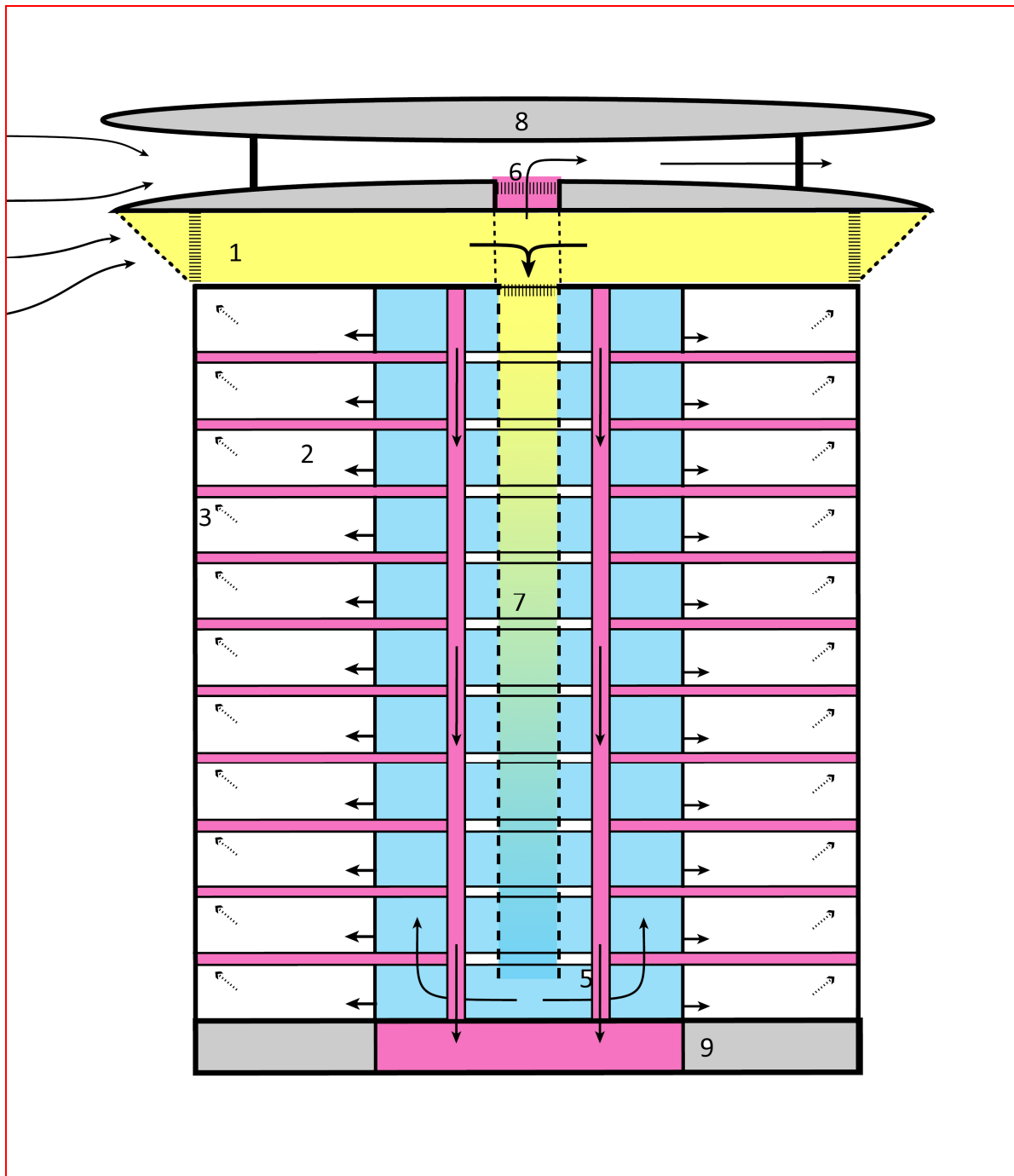
Figuur 6.7 is in principe identiek aan figuur 6.6, echter de verticale afzuigkanalen liggen hier inpandig en zijn aan de onderkant aangesloten op een horizontaal verzamelplenum dat aansluit op de voet van de zonneschoorsteen.



Figuur 6.7 – Principe atriumgebouw – atrium is toevoerplenum – Inpandige afzuigkanalen

6.6 Dubbel corridorgebouw –zie figuur 6.8

Dit is een variant op het atriumgebouw van figuur 6.7. De tussenvloer van de inpandige ruimten is voorzien van openingen voor de luchttoevoer naar de hogere verdiepingen. Een concept volgens figuur 6.6 met het atrium als afzuigplenum is eveneens denkbaar.

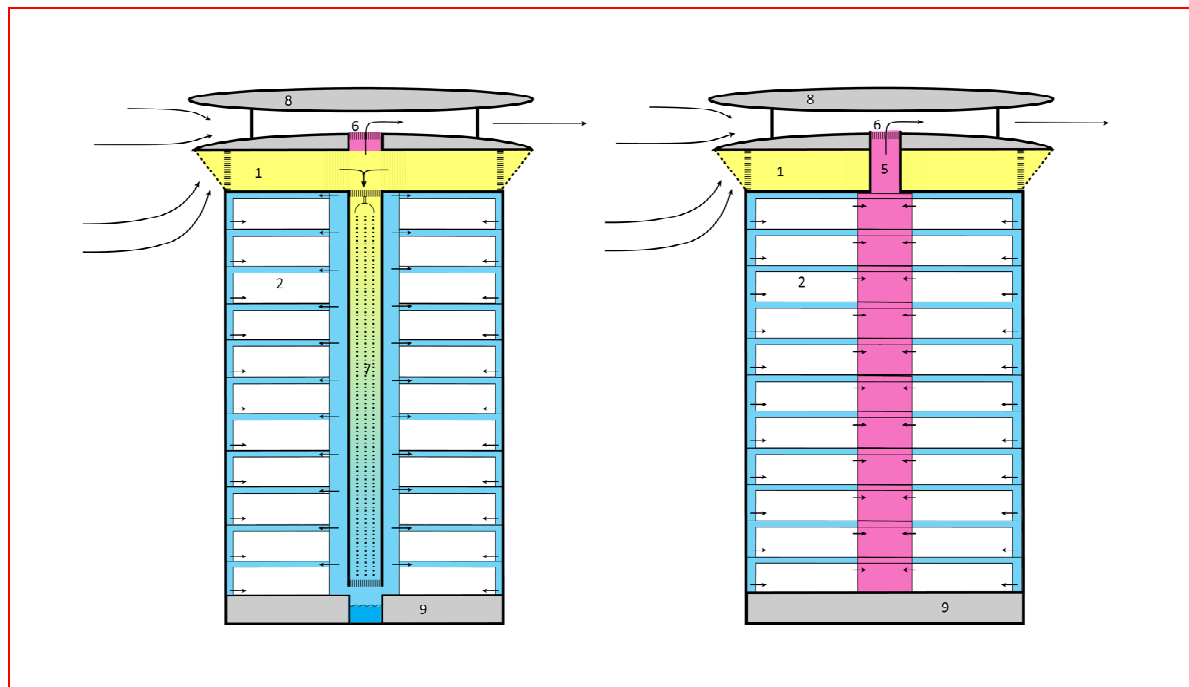


Figuur 6.8 – Dubbel corridorgebouw

6.7 Het Geo-Klimaatconcept[®] in bestaande gebouwen

De voorgaande paragrafen geven een beeld van de mogelijke inpassing van het Geo-Klimaatconcept[®] in verschillende bouwtypologieën. De getoonde concepten hebben duidelijk betrekking op nieuwbouw, waarbij het gebouwontwerp geheel is afgestemd op de toepassing van het Geo-Klimaatconcept[®]. Het hierna omschreven concept komt in aanmerking voor toepassing bij grote renovaties van bestaande gebouwen. Zie figuur 6.9.

De Klimaatcascade[®], de luchttoevoerschacht en het shuntkanaal worden ondergebracht in bestaande installatieschachten. Bij gebrek aan voldoende schachtruimte wordt deze uitgebreid of worden nieuwe schachten gebouwd.



Figuur 6.9 – Geo-Klimaatconcept in bestaand gebouw

Vanuit de luchttoevoerschacht wordt de in de Klimaatcascade[®] geconditioneerde lucht toegevoerd aan de plafondruimte. Vanuit de plafondruimte worden aan de gevelzijde driehoekige luchtschachtjes aangebracht die op vloerniveau zijn voorzien van luchttoevoerroosters. De onderkoelde ventilatielucht wordt dus toegevoerd volgens het verdringingsprincipe.

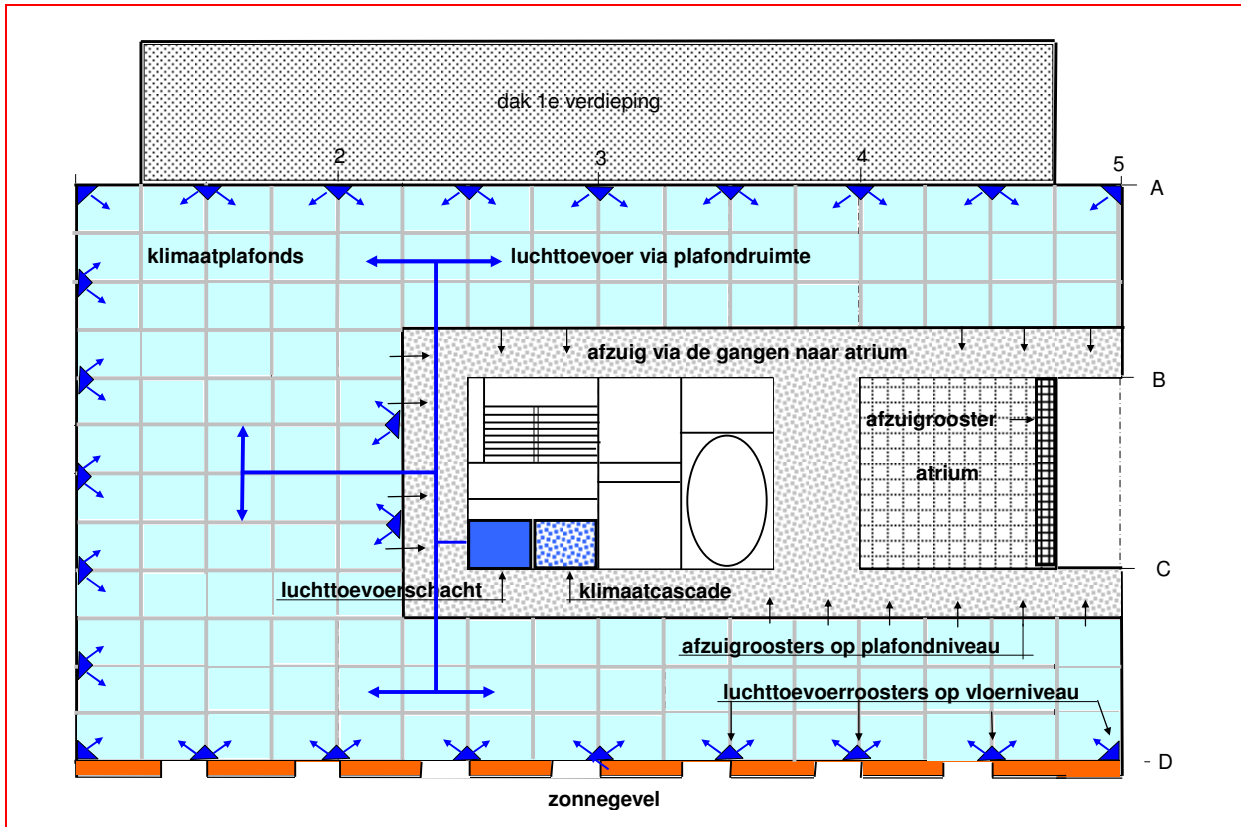
De lucht wordt op plafondniveau via de gangen afgezogen naar het shuntkanaal, dat aan de voet is aangesloten op de zonneshoornsteen.

De plafondruimte dient in dit concept als toevoerplenum van de lucht bij een geringe overdruk. Hoewel lekverliezen via de plafonds voor de ruimteventilatie niet verloren zijn is het van belang dat de ventilatielucht zijn weg naar de kantoorruimten vindt via de toevoerroosters. Er moeten dan ook bepaalde eisen worden gesteld aan de dichtheid van de verlaagde plafonds. Verlichtingsarmaturen dienen te zijn uitgevoerd zonder ventilatiesleuven, en onderhoudsgevoelige apparatuur moet bij voorkeur buiten de plenumzone worden aangebracht.

Het omschreven systeem is aangegeven in figuur 6.10, die is ontleend aan de *case study* –zie deelrapport (IV). In het onderhavige gebouw wordt de lucht via een atrium afgezogen, waardoor geen shuntkanaal aanwezig is. Ruimteverwarming en –koeling is hier uitgevoerd met klimaatplafonds.

6.8 Verdere uitwerking

Dit hoofdstuk beoogt slechts een introductie te geven van het Geo-Klimaatconcept[®]. In het navolgende zijn de verschillende systeemaspecten in detail nader onderzocht.



Figuur 6.10 – Luchtverdeling en -distributie bestaand kantoorgebouw

Earth, Wind & Fire – Airconditioning zonder Ventilatoren
(III) Onderzoek Geo-Klimaatconcept[®]

7. KLIMAATCASCADE VOOR ADIABATISCHE KOELING

7.1 Samenvatting

In een adiabatisch proces wordt geen warmte toe- of afgevoerd, en blijft de warmte-inhoud of enthalpie van de lucht constant. Koeling van de lucht vindt plaats door verdamping van water, waarbij de verdampingswarmte aan de lucht wordt onttrokken. Hierdoor daalt de luchttemperatuur en stijgt de luchtvochtigheid. In het Nederlandse klimaat met vaak hoge relatieve vochtigheid van de buitenlucht komt directe verdampingskoeling in principe niet voor kantoorgebouwen in aanmerking.

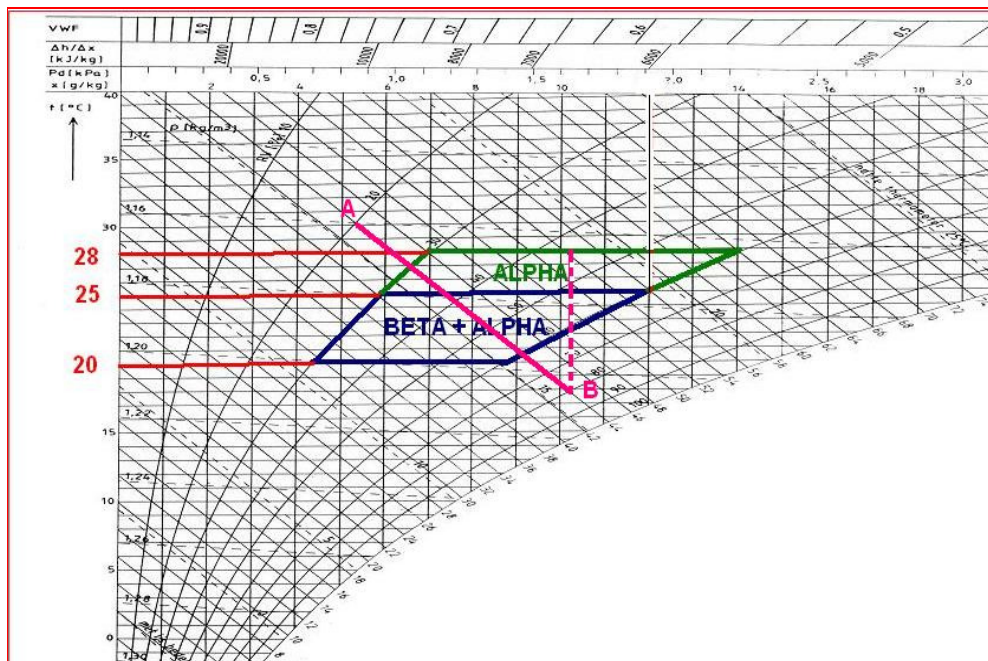
Enkele voorbeelden worden gegeven van toepassingen in landen met een warm en droog klimaat alsmede een uitgebreide bibliografie van uitgevoerd onderzoek.

7.2 Werking

In een adiabatisch proces wordt geen warmte toe- of afgevoerd, en blijft de warmte-inhoud of enthalpie van de lucht constant. Koeling van de lucht vindt plaats door verdamping van water, waarbij de verdampingswarmte aan de lucht wordt onttrokken. Hierdoor daalt de luchttemperatuur en stijgt de luchtvochtigheid. Een dergelijk koelsysteem wordt dan ook vaak aangeduid met verdampingskoeling of *evaporative cooling*.

In een droog en heet klimaat wordt dit koelsysteem vaak toegepast en om die reden ook wel *desert cooling* genoemd. De stijging van de vochtigheid bij ventilatie met 100% buitenlucht is hier meestal geen probleem zolang de relatieve vochtigheid binnen de grenzen blijft.

Figuur 7.1 toont een voorbeeld het psychometrische proces van een dergelijk koelsysteem in een Mollier diagram. De condities van de lucht bij intrede A van het koelsysteem zijn 30°C bij een relatieve vochtigheid (RV) van 20%; de absolute luchtvochtigheid is 5,3 gram per kg droge lucht. Door het directe contact van lucht en waterdruppels verdampt een deel van het water, waarbij de verdampingswarmte aan de lucht wordt onttrokken, die hierdoor wordt gekoeld. De condities van de lucht bij uitrede B van het koelsysteem zijn 17,7°C bij een RV van 80,0%; de absolute luchtvochtigheid is hierbij gestegen tot 10,2 gram per kg droge lucht. De totale warmte-inhoud van de lucht (enthalpie) is met 43,6 kJ.kg⁻¹ gelijk gebleven; het proces is adiabatisch.



Figuur 7.1 – Mollier diagram verdampingskoeling

In het Mollier diagram is te zien is dat als ventilatielucht van deze conditie aan een ruimte wordt toegevoerd de ruimteconditie ruim binnen het behaaglijkheidsgebied ligt. Voor plaatselijke koeling in keukens, wasserijen, en sommige industrieën is verdampingskoeling soms een economische oplossing. In het Nederlandse klimaat met vaak hoge relatieve vochtigheid van de buitenlucht komt directe verdampingskoeling in principe niet voor kantoorgebouwen in aanmerking. Een nieuwe techniek van indirecte verdampingskoeling biedt in sommige gevallen wel interessante mogelijkheden -zie hoofdstuk 20.

7.3 Passive Draught Evaporative Cooling (PDEC)

De belangstelling voor toepassing van directe verdampingskoeling in zgn. *DECT's* (*Direct Evaporative Cooling Towers*), meestal aangeduid met *PDEC's* (*Passive Draught Evaporative Cooling*), heeft interessante onderzoeksresultaten opgeleverd, die ook van belang kunnen zijn voor het Geo-Klimaatconcept – zie paragraaf 7.4. Enkele saillante punten:

- Het onderzoek heeft hoofdzakelijk plaatsgevonden op basis van modellering en simulering; validatie van de modellen op basis van metingen aan testmodellen of uitgevoerde *PDEC's* zijn schaars.
- De grenzen van thermische behaaglijkheid op de werkplek moeten worden opgerekt, vooral met betrekking tot de relatieve vochtigheid.
- Een groot deel van het onderzoek met behulp van CFD en dynamische simulaties is uitgevoerd voor een denkbeeldig kantoorgebouw in Sevilla. *PDEC* blijkt allèen niet in staat te zijn een behaaglijk binnenmilieu te realiseren. In de zomerperiode is altijd ondersteuning nodig met nachtventilatie en/of mechanische koeling.
- De modellen en de gebruikte simulatietools zijn nog lang niet betrouwbaar genoeg om als hulpmiddelen voor het ontwerp te kunnen dienen.

7.4 Bibliografie

- Yajima, S. e.a. (1996) doen verslag van hun test om de prestaties van een “*shower cooling tower*” in een proefopstelling te bepalen. Zij claimen dat door gebruik te maken van gekoeld water een dergelijk systeem ook geschikt is voor toepassing in een vochtig buitenklimaat, maar in hun verslag komt dit belangrijke aspect verder helaas niet meer aan de orde. De temperatuurverlaging wordt door hen uitgedrukt in een formule voor de “Natte Bol Depressie” (NBD) dat is het temperatuurverschil tussen de droge bol en de natte bol temperatuur. De invloed van het water- en het luchtdebiet op deze NBD wordt niet vermeld en de relatie tussen berekende en gemeten waarden is onduidelijk.
- Bowman N. e.a. (1996) geven een exposé over de aanpak van een Europees onderzoeksproject in het kader van het *Joule 4th Framework Programma* (contract nr. JOR3CT950078) over de toepassing van *PDEC's* in Zuid Europa. Het onderzoeksteam is een samenwerking van ingenieurs, architecten en universitaire research. Het programma omvat bouwkundige ontwerpstudies, beoordeling van de gebouwprestaties, en de opzet en monitoring van de experimentele fase. Prestaties worden beoordeeld met behulp van dynamische simulatieprogramma's (DSP) en CFD. De beperkingen van de anno 1996 beschikbare DSP software worden aangegeven.
- Martinez, D. e.a. (2000) deden modelonderzoek naar de grenzen van adaptief thermisch comfort bij toepassing van *PDEC* in kantoorgebouwen. Eén van hun belangrijkste conclusies in dit verband is dat een relatieve vochtigheid van 80% thermisch aanvaardbaar is, waar normaliter een grenswaarde van 60% RV geldt (ASHRAE 1992).
- Bowmen, N.T. e.a.(2000) beschrijven in een artikel “*Concepts and Precedents*” de eerste resultaten van het Europese *PDEC* onderzoeksproject in het kader van het *Joule 4th Framework Programma*. Vijf categorieën van verdampingskoeling worden omschreven en in een psychometrisch diagram weergegeven: (1) passief indirect, (2) actief indirect, (3) direct, (4) actief direct en (5) de combinatie van actief direct en indirect. Het *PDEC* concept biedt volgens hen in potentie de beste mogelijkheid tot beperking van airconditioning. De fysische principes van *PDEC* worden omschreven, waarbij nadruk

wordt gelegd op complete verdamping van de waterdruppels, bepaald door de druppelgrootte, de hoogte van de koeltoren en het temperatuurverschil water/lucht. Enkele voorbeelden van *PDEC* worden beschreven, o.a. de koeltorens op de Expo '92 in Sevilla. Helaas wordt het toepassingsgebied slechts aangeduid met “heet en droog klimaat, zoals in Zuid Europa en het Midden Oosten”.

- Cook, M.J. e.a. (2000) beschrijven in een tweede artikel “*Airflow Modelling*” vervolresultaten van het Europese *PDEC* onderzoeksproject in het kader van het *Joule 4th Framework Programma*. CFD wordt toegepast om de stromingspatronen van de ventilatielucht en de inherente ruimtetemperaturen te analyseren in een denkbeeldig kantoorgebouw in Sevilla. De inpandige werkplekken in dit gebouw zijn als kantoorruimten gegroepeerd rondom atria en worden omringd door kantoorruimten aan de perimeter. De atria zijn aan de bovenzijde voorzien van geleideschotten die als windvanger functioneren. Bovenin de atria wordt water verneveld, en de adiabatisch gekoelde lucht stroomt via de inpandige kantoorruimten en de gevelkantoren naar afzuigschachten aan de gevel. In koele zomernachten werkt het systeem omgekeerd en wordt lucht via de atria naar buiten afgevoerd. Het belangrijkste doel van de CFD simulaties was de interactie van de waterdruppels en de lucht te modelleren, om op basis hiervan de benedenwaartse trek alsmede de effectiviteit van de lucht- en temperatuurverdeling in de aangesloten kantoorruimten te kunnen voorspellen. Het artikel omvat een beschrijving van de gebruikte CFD technieken en de resultaten van de CFD analyse.

Bij een buitenconditie van 35⁰C bij 34% RV wordt in de atria een conditie gerealiseerd van 24⁰C bij 85% RV, en in de kantoorruimten 29⁰C bij een interne thermische belasting van 32 W.m⁻². Volgens de onderzoekers kan door nachtventilatie een bouwdeel-oppervlaktetemperatuur van 21⁰C worden bereikt, en de resulterende temperatuur van ≈ 25⁰C wordt voor thermisch comfort als aanvaardbaar beschouwd. De CFD analyse brengt voor het omschreven concept heel wat voetangels en klemmen aan het licht, vooral in de luchtverdeling. Het concept is verder gevoelig voor windinvloeden die de luchtverdeling kunnen verstoren. De vraag is gewettigd of luchtverdeling via een atrium wel een goed idee is? Desondanks is het een interessant artikel, dat veel inzicht biedt in de problematiek van CFD voor *PDEC*. Erg overtuigend zijn de resultaten echter niet, ook al omdat de simulaties niet in een testopstelling zijn gevalideerd.

- Robinson, D. e.a. (2004) beschrijven in een derde artikel “*Thermal Modelling of an Office Building*” vervolresultaten van het Europese *PDEC* onderzoeksproject in het kader van het *Joule 4th Framework Programma*. Van een denkbeeldig kantoorgebouw in Sevilla, zie Cook, M.J. e.a. (2000), zijn met twee verschillende dynamische simulatietools de thermische prestaties van het *PDEC* systeem geanalyseerd, al dan niet in combinatie met mechanische koeling. Als eerste is een relatief eenvoudig model gebruikt, waarin veronderstelde ventilatiecapaciteiten en temperaturen worden ingevoerd, op basis waarvan het jaarlijkse aantal *PDEC* bedrijfsuren, het waterverbruik en de frequentie van optredende ruimtetemperaturen wordt berekend. Met het meer geavanceerd *ESP-r* model zijn de luchttemperaturen in de *PDEC*, de inherente benedenwaartse trek en de luchtverplaatsingen berekend, die op hun beurt weer dienen om het jaarlijkse aantal *PDEC* bedrijfsuren, het waterverbruik en de frequentie van optredende ruimtetemperaturen te bepalen. Deze benadering geeft een gedetailleerder inzicht in de systeemprestaties dan het eenvoudige model, en biedt tevens inzicht in verschillende regelstrategieën, maar is ook veel bewerkelijker en gevoeliger voor fouten.

Beide analyses laten zien dat *PDEC* allèen niet in staat is in het betreffende kantoorgebouw in Sevilla een behaaglijk binnenmilieu te realiseren, en dat in de zomerperiode altijd ondersteuning van een mechanisch koelsysteem nodig is. Benadrukt wordt dat de omschreven thermische simulaties met vele onzekerheden omgeven zijn, en dan at ze aan ontwerpers nog onvoldoende informatie bieden om gebouwen met *PDEC* op een betrouwbare manier te kunnen ontwerpen. Aanvullende CFD analyses en validatie van simulatietools op basis van fysieke modellen of uitgevoerde gebouwen met *PDEC* zijn nodig om de betrouwbaarheid van de methodiek op een hoger peil te brengen. Ook het installeren van hulpventilatoren en additionele koelsystemen zijn goede middelen om het vertrouwen in *PDEC* te vergroten.

- Lomas, K.J. e.a. (2004) beschrijven in dit artikel “*Building bioclimatic charts for non-domestic buildings and passive draught evaporative cooling*” vervolresultaten van het Europese *PDEC*

onderzoeksproject in het kader van het *Joule 4th Framework Programma*. Een *Building BioClimatic Chart (BBCC)* geeft het gebied van het binnenklimaat aan waarin mensen zich thermisch behaaglijk voelen alsmede de grenzen van de buitenklimaatcondities waarin deze behaaglijkheid in passief gekoelde gebouwen kan worden bereikt. Hierbij wordt uitgegaan van het adaptieve model van thermisch comfort. Voor het eerder genoemde kantoorgebouw in Sevilla zijn met behulp van het ESP-r model simulaties uitgevoerd voor interne thermische belastingen van respectievelijk 10, 30 en 50 W.m². Voor de *PDEC* koeling gedurende werktijden is uitgegaan van een ventilatievoud van 20 m³.m⁻³.h⁻¹ (!); voor de nachtventilatie werd 4 m³.m⁻³.h⁻¹ aangehouden. Het maximum aantal overschrijdingsuren van de ruimtetemperatuur gedurende de werktijd werd vastgesteld op 5% voor 25⁰C en 1% voor 28⁰C. De berekende temperatuuroverschrijdingen blijken deze grenzen in aanzienlijke mate te overschrijden. Voor gebouwen met *PDEC* in een met Sevilla vergelijkbaar klimaat wordt daarom een aangepaste *BBCC* voorgesteld. Het onderzoek gaat verder uitvoerig in op de problemen en de beperkingen van het gebruikte model.

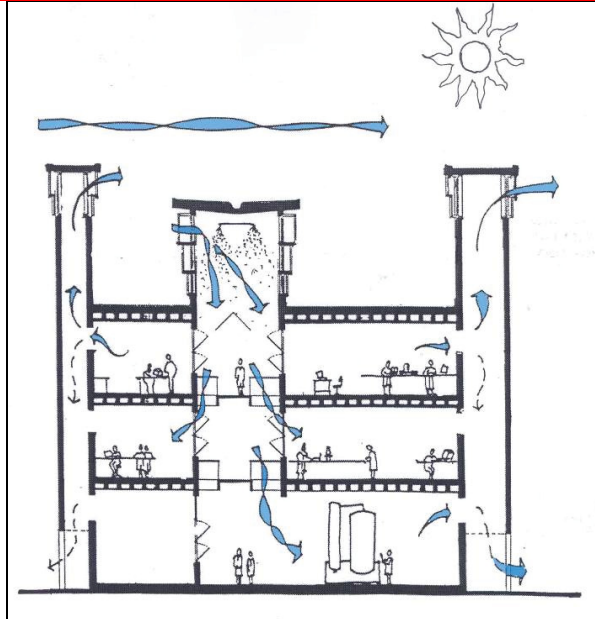
- Erell, E. e.a. (2007) ontwikkelden een tweetraps koelwasser voor adiabatische koeling^{*}, voorzien van een windvanger en een hulpventilator. Met de tweetraps uitvoering wordt beoogd water te besparen. In de eerste trap wordt buitenlucht aangezogen en met behulp van sproeiers adiabatisch gekoeld. In de tweede trap wordt secundaire lucht uit de te koelen ruimte geïnduceerd, waarna de menglucht met behulp van een tweede sproeibank adiabatisch verder wordt gekoeld. De gekoelde lucht wordt aan de voet van de koelwasser direct aan de ruimte toegevoerd. Het artikel doet verslag van de aerodynamische prestaties van deze koelwasser. Experimenten werden uitgevoerd in het droge klimaat van de Negev woestijn, waarbij de ventilatiecapaciteit werd gemeten bij (a) alleen winddruk, (b) hulpventilator ingeschakeld en (c) sproeiers in bedrijf. De invloed van de sproeiers op de ventilatiecapaciteit is aanzienlijk; bij een (lage) windsnelheid van 1 m.s⁻¹ werd het luchtdebiet door inschakeling van de sproeiers verdubbeld van ca 2,25 m³.s⁻¹ naar ca 4,5 m³.s⁻¹. In een vervolgartikel wordt verslag gedaan van het ontwerp van het sproeisysteem en de koelcapaciteit van deze koelwasser (Pearlmutter, D. e.a. 2007).
- Pearlmutter, D. e.a. (2007) beschrijven de selectie van de sproeiers en het ontwerp van de sproeibanken in de tweetraps koelwasser beschreven door Erell, E. (2007). De keuze tussen sproeiers die het water fijn vernevelen, en daardoor een hogere verdamping kunnen realiseren, en sproeiers die grotere druppels vormen, en daardoor een hogere impulsoverdracht generen, wordt beslist in het voordeel van de laatste, vooral omdat voor eerstgenoemde een hogere pompdruk nodig is met een inherent hoger energiegebruik. In het droge klimaat van de Negev wordt met de geteste koelwasser van 8 meter hoog en een diameter van 2 m een maximale adiabatische koeling gerealiseerd van 70 Kw bij ingeschakelde, en 60 KW met uitgeschakelde hulpventilator. De impulsoverdracht van water op lucht, en de invloed daarvan op het luchtdebiet, heeft een grotere invloed op de koelcapaciteit dan de verdamping van water en de invloed daarvan op de luchttemperatuur.
- Salméron, J.M. e.a. (2009) geven een overzicht van passieve, actieve en hybride systemen, aangeduid met PHDC.⁸ Ze maken hierbij onderscheid in
 - * Cool Towers met bevoeide cellulose matrix of pads in de luchtstroom;
 - * Shower Towers met watersproeiers in de luchtstroom;
 - * Porous media met bevochtigde poreuze elementen in de luchtstroom;
 - * Misting Towers met werverstuivers in de luchtstroom;
 - * Hybride systemen met actieve koeling door koelementen.

De publicatie omvat een casestudy van het Torrent Research Centre in Ahmedabad, India, een locatie met een zeer warm en droog klimaat, zie figuur 5.2. De binnentemperatuur bleef 12 – 14 ⁰C onder de buitentemperatuur die tijdens piekdagen kon oplopen tot 40⁰C.

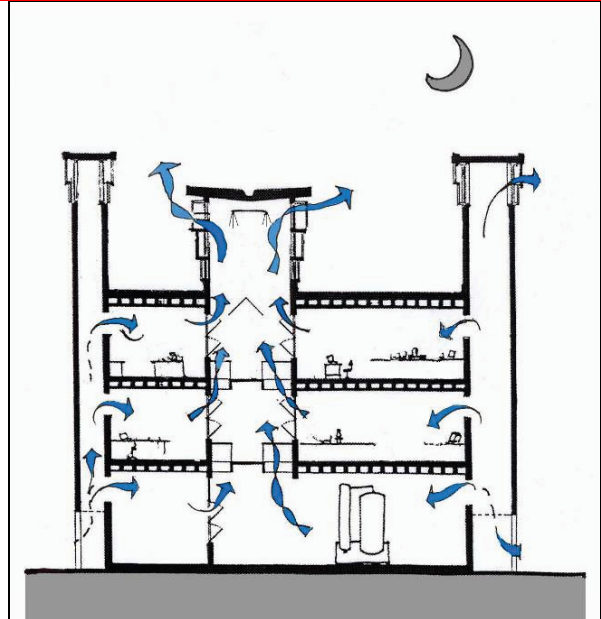
Het artikel toont ook een afbeelding van de Malta Stock Exchange, zie figuur 5.3.

Het onderzoek is met subsidie van de EU uitgevoerd, zie www.phdc.eu. Een rekenmodel kan van deze site worden gedownload.

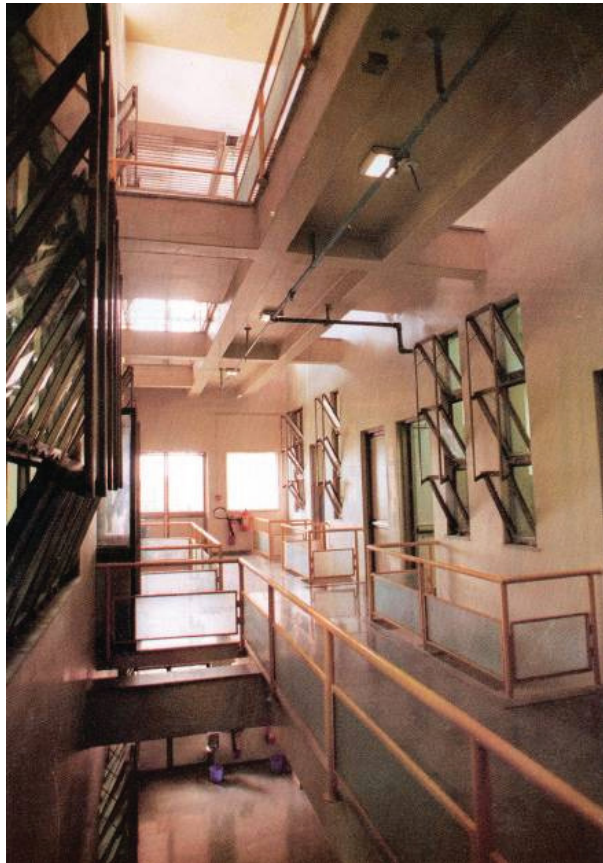
⁸ Passive and Hybrid Draught Cooling



Cross section of TRC showing daytime cooling strategy cooling



Cross section of TRC showing night time convective

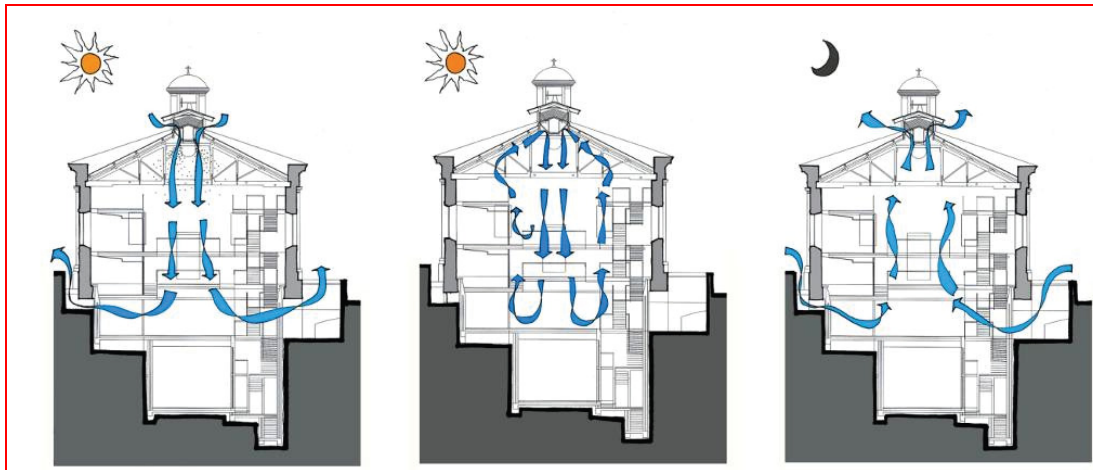


Laboratory concourse with hopper vents to scoop cool air in the offices and labs.



Torrent Research Centre. Ahmedabad, India (Source:Ford)

Figuur 7.2 – Adiabatische koeling in het Torrent Research Centre, Ahmedabad, India



Figuur 7.3 – Adiabatische koeling in de Malta Stock Exchange: hybride systeem met PDEC en koelelementen

8. KLIMAATCASCADE VOOR DIABATISCHE KOELING

8.1 Inleiding en Samenvatting

In tegenstelling tot een adiabatisch proces -zie hoofdstuk 7, wordt in een diabatisch proces warmte afgevoerd. Dit gebeurt door gekoeld water toe te voeren, dat warmte en vocht uit de luchtstroom opneemt waardoor de lucht wordt gekoeld en gedroogd, terwijl het water in temperatuur stijgt.

Het voorliggende hoofdstuk geeft een voorlopig beeld van:

- het psychometrisch proces in een Klimaatcascade[®];
- de hiervoor benodigde koelwatertemperaturen en –debieten;
- de koelprestaties van een Klimaatcascade[®];
- de koudefactoren in vergelijking met conventionele koelsystemen;
- de energetische aspecten.

De eigenschappen van een Klimaatcascade[®] als warmtewisselaar worden in hoofdstuk 10 onderzocht. Op basis hiervan is een Excel rekenmodel voor warmte- en stofoverdracht in een Klimaatcascade[®] ontwikkeld, op basis waarvan in een volgend stadium de berekeningen zijn herhaald en verfijnd –zie hoofdstuk 11. Het Excel rekenmodel is verder vergeleken met een numeriek stromingsmodel CFD –zie hoofdstuk 16, en een dynamisch simulatiemodel in ESP-r –zie hoofdstuk 18, en tenslotte gevalideerd en gekalibreerd in een fysieke onderzoekstelling –zie hoofdstuk 17.

Uitgangspunt voor de diabatische koeling is dat de benodigde koude aan de bodem wordt onttrokken, waardoor de temperatuur van het koelwater is beperkt tot $\approx 13^{\circ}\text{C}$. Voor de koeling van de lucht is alleen pompenergie nodig die uiteraard toeneemt naarmate het aantal bouwlagen van een gebouw groter wordt. Het energiegebruik voor koeling van lucht met behulp van een Klimaatcascade[®] is bij gebouw/klimaattype ALPHA maar een fractie van het energiegebruik van conventionele koudeopwekking. Ook bij BETA gebouwen is de energiebesparing zeer aanzienlijk, vooral bij niet te hoge gebouwen.

8.2 Werking

(Zie figuur 6.1 in hoofdstuk 6)

Op dakniveau, waar de windsnelheid en de winddruk het hoogst zijn, wordt positieve winddruk benut voor toevoer van ventilatielucht naar de Klimaatcascade[®], een warmtewisselaar uitgevoerd als bouwkundige schacht. De positieve druk in de overdrukruimte (1) –zie deelrapport (II), hoofdstuk 11- wordt tevens gebruikt voor de opwekking van energie met behulp van windturbines – zie deelrapport (II), hoofdstuk 20.

Boven in de Klimaatcascade[®] wordt water van $\approx 13^{\circ}\text{C}$ gespreid en de miljoenen vallende waterdruppels zorgen 's zomers voor koeling en droging, en 's winters voor verwarming en bevochtiging van de lucht. De impuls van de vallende waterdruppels wordt gedeeltelijk overgedragen op de lucht, waardoor een aerodynamische trek ontstaat die de neerwaartse stroming van de lucht versterkt. De lucht/water emulsie in de Klimaatcascade[®] is zwaarder dan de omgevingslucht, waardoor de aerodynamische trek wordt versterkt met omgekeerde thermische trek en hydraulische trek. Hierdoor wordt aan de voet van de Klimaatcascade[®] een positieve druk opgebouwd. Door het watervaleffect wordt de lucht tevens geïoniseerd en verfrist –zie hoofdstuk 14.

8.3 Drijvende krachten

De drijvende krachten voor de luchtstroom door een Klimaatcascade[®] zijn drukverschillen tengevolge van:

- Overdruk door de Bernoulli-injector in het Ventecdak[®] tengevolge van winddruk –zie deelrapport (II).
- Benedenwaartse aerodynamische trek door impulsoverdracht van de vallende waterdruppels op de lucht – zie paragraaf 13.3;
- Benedenwaartse hydraulische trek door het gewichtsverschil tussen de lucht/water emulsie in de Klimaatcascade[®] en de buitenlucht – zie paragraaf 13.4;

- Benedenwaartse thermische trek als in koelbedrijf de lucht in de Klimaatcascade[®] een grotere dichtheid heeft dan de buitenlucht – zie paragraaf 13.5;
- Onderdruk aan de voet van de Klimaatcascade[®] tengevolge van de afzuiging door de zonneshoorsteen –zie deelrapport (I).

Als deze drukverschillen niet voldoende zijn om de vereiste ventilatiecapaciteit te realiseren wordt een hulpventilator aan de top van de Klimaatcascade[®] ingeschakeld. Tezamen moeten deze drukverschillen onder alle klimaatomstandigheden de drukverliezen in het ventilatiesysteem compenseren bij een neerwaartse luchtstroom in de Klimaatcascade[®] met de berekende capaciteit.

8.4 Conceptueel psychometrisch ontwerp Klimaatcascade[®]

Een Klimaatcascade[®] moet worden ontworpen op de maximum buitenluchtconditie, die kan worden gesteld op 28°C bij $\approx 55\%$ RV en een absoluut vochtgehalte van $\approx 13,1 \text{ g.kg}^{-1}$ - zie deelrapport (IV). Tabel 8.1 geeft een voorlopig overzicht van de psychometrische condities en koeltrajecten voor respectievelijk gebouw/klimaatype ALPHA en BETA; deze zijn tevens weergegeven in de figuren 8.2 en 8.3. De vermelde temperatuurtrajecten van het koelwater zijn voorlopige aannamen. Met behulp van een rekenmodel zijn deze nader vastgesteld –zie hoofdstuk 10 en 11.

	Conditie	Temperatuur - °C		RV - %		x – g.kg ⁻¹		h – kJ.kg ⁻¹	
		ALPHA	BETA	ALPHA	BETA	ALPHA	BETA	ALPHA	BETA
A	Buitenconditie	28 ⁰	28 ⁰	55%	55%	13,1	13,1	61,4	61,4
B	Uittrede koelwater	20 ⁰	17 ⁰	90%	90%	13,1	11,1	52,9	45,2
C	Ruimteconditie	28 ⁰	25 ⁰	60%	60%	14,1	12,1		
D	Dauwpunt	18,0 ⁰	15,4 ⁰						
E	Temp.traject koelwater	13 ⁰ - 18 ⁰	13 ⁰ - 15,4 ⁰						
F	Enthalpieverschil lucht							8,5	16,2
	Voelbare warmte							8,3	10,9
	Latente warmte							0,2	5,3
	Voelbare Warmte Factor							0,98	0,67

Tabel 8.1 – Conditie koelsysteem met Klimaatcascade[®] – RV_{max} = 60%

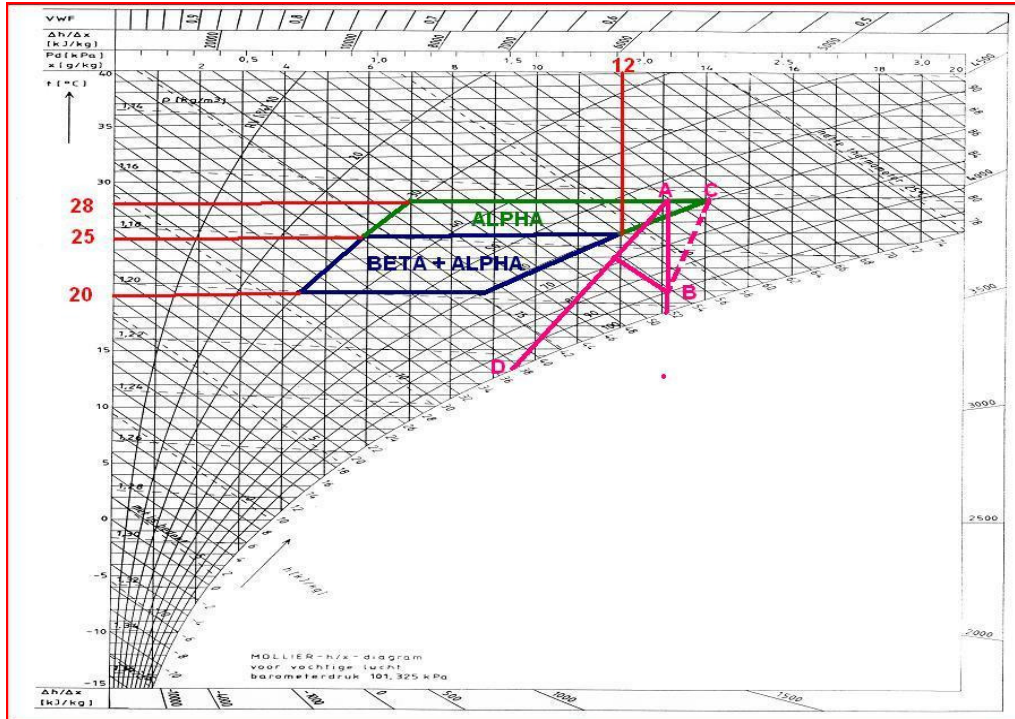
De waterdampafgifte van personen bij een ruimtetemperatuur van 25⁰...28⁰C en lichte kantoorarbeid is ca 65 g.h⁻¹; bij een ventilatiedebiet van 50 m³.h⁻¹ per persoon komt dit overeen met $\Delta x \approx 1 \text{ g.kg}^{-1}$. Het vochtgehalte van de ventilatielucht moet dan 1 g.kg⁻¹ lager zijn dan dat in de ruimte.

De verzadigingsgraad van de lucht bij uittrede van de Klimaatcascade[®] is voorlopig nog niet bekend. Voor *Passive Draught Evaporative Cooling (PDEC)* wordt door enkele onderzoekers een “Natte Bol Depressie” van 80% vermeld – zie paragraaf 7.2, maar de veronderstelling lijkt gewettigd dat in een Klimaatcascade[®] veel hogere verzadigingsgraden kunnen worden bereikt. Voorlopig wordt ervan uitgegaan dat de relatieve vochtigheid van de lucht bij uittrede van de Klimaatcascade[®] 90% zal zijn. Deze waarde is waarschijnlijk mede afhankelijk van de druppelgrootte in het sproeispectrum, het relatieve snelheidsverschil en de contacttijd tussen water en lucht, mede bepaald door de hoogte van de Klimaatcascade[®].

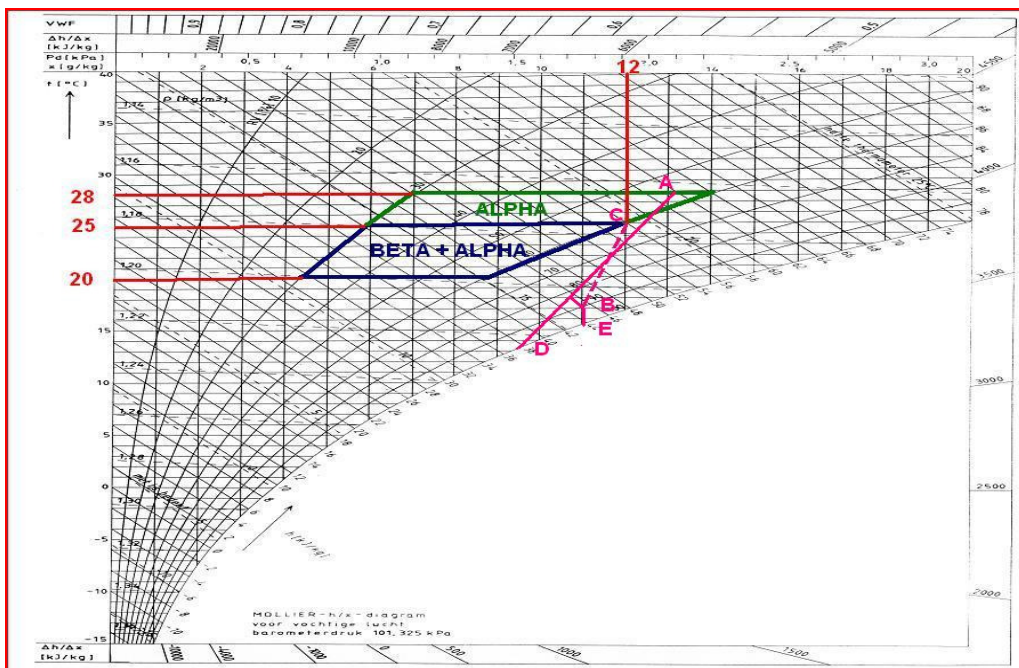
Aangenomen wordt dat de uitgaande watertemperatuur gelijk is aan de dauwpuntstemperatuur van de uitgaande lucht. De dauwpuntstemperatuur (DP) is de temperatuur waarbij de lucht door afkoeling 100%

verzadigd wordt. Deze DP temperatuur kan in de Mollier diagrammen figuur 8.1 en 8.2 worden afgelezen als vanaf punt B een verticale lijn wordt getrokken naar de verzadigingslijn.

Vanaf de intredeconditie (A) zal de lucht in eerste instantie door het koelwater van 13,0°C (D) worden gekoeld en gedroogd, maar waar in de Klimaatcascade[®] de lucht- en koelwatertemperaturen elkaar naderen vindt adiabatische koeling en bevochtiging plaats naar de uitredeconditie (B).



Figuur 8.1 – Psychometrisch proces Klimaatscascade[®] ALPHA – $RV_{\max} = 60\%$



Figuur 8.2 – Psychometrisch proces Klimaatscascade[®] BETA – $RV_{\max} = 60\%$

8.5 Temperatuurtrajecten Klimaatcascade[©]

Een Klimaatcascade[©] is een warmtewisselaar waarin de twee media, water en lucht, niet gescheiden zijn, maar direct met elkaar in contact zijn, waardoor naast warmteoverdracht ook stofoverdracht kan plaatsvinden. De te koelen lucht en het koelwater, in de vorm van een waterval, bewegen in dezelfde richting.

Een Klimaatcascade[©] is een gelijkstroom warmtewisselaar, zie figuur 8.3 links, ontleend aan het Handboek Installatietechniek (ISSO 2002). Voor het temperatuurverschil ΔT dat als “drijvende kracht” voor het warmtetransport geldt moet het zgn. logaritmisch gemiddelde temperatuurverschil worden ingezet, vaak aangeduid met MLTD, Mean Logaritmisch Temperature Difference waarvoor formule (8.1) geldt

$$\Delta T_{\log, gelijk} = \frac{(T_{wi} - T_{ki}) - (T_{wu} - T_{ku})}{\ln \frac{(T_{wi} - T_{ki})}{(T_{wu} - T_{ku})}}$$

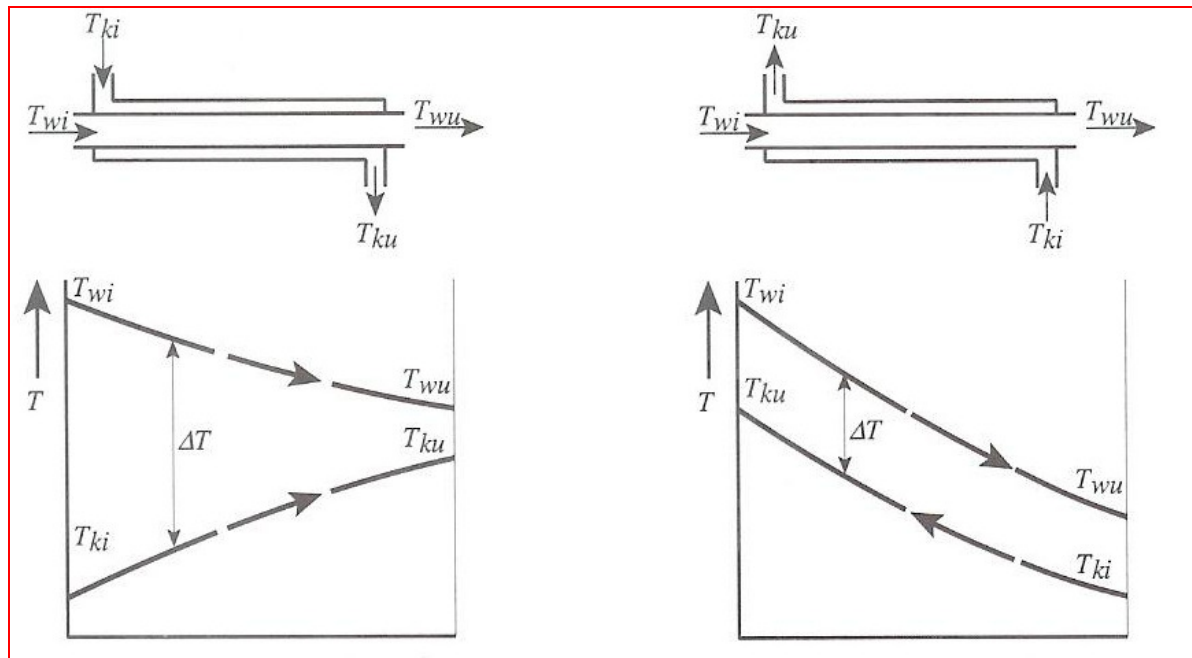
(8.1)

Omdat het in deze formule om temperatuurverschillen gaat, kan in plaats van de thermodynamische temperatuur T ook de Celsius temperatuur θ worden ingevuld.

De temperaturen en de MLTD voor de gebouw/klimaattypen ALPHA en BETA, zoals voorlopig aangenomen, zijn aangegeven in tabel 8.2. De aanvoertemperatuur van het koelwater is hierbij gesteld op 13⁰C -zie paragraaf 8.6. Met behulp van een rekenmodel zijn deze waarden naderhand nauwkeuriger bepaald –zie hoofdstuk 11.

Type	$\theta_{w,in}$	$\theta_{w,uit}$	$\theta_{k,in}$	$\theta_{k,uit}$	MLTD
ALPHA	28 ⁰	20 ⁰	13 ⁰	18,0 ⁰	6,1
BETA	28 ⁰	17 ⁰	13 ⁰	15,4 ⁰	6,1

Tabel 8.2 – Temperaturen en MLTD Klimaatcascade[©]



Figuur 8.3 – Principe warmtewisselaars – Links Gelijkstroom – Rechts Tegenstroom (ISSO 2002)

8.6 Temperatuurtrajecten warmtewisselaar

De Klimaatcascade[©] maakt gebruik van koude uit de bodem, zonder additionele mechanische koeling, zie figuur 8.4, die overeenkomt met figuur 19.6 van deelrapport (I). Uitgegaan wordt van een bodemtemperatuur van 12⁰C.

Voor de scheiding tussen het bronsysteem en het bovengrondse systeem wordt een zgn. tegenstroom warmtewisselaar gebruikt, zie figuur 8.3 rechts. Voor het temperatuurverschil ΔT dat als “drijvende kracht” voor het warmtetransport geldt moet ook hier het logaritmisch gemiddelde temperatuurverschil MLTD worden ingezet. Voor tegenstroom geldt formule (8.2)

$$\Delta T_{\log, \text{tegen}} = \frac{(T_{wi} - T_{ku}) - (T_{wu} - T_{ki})}{\ln \frac{(T_{wi} - T_{ku})}{(T_{wu} - T_{ki})}}$$

(8.2)

Omdat het in deze formule om temperatuurverschillen gaat, kan in plaats van de thermodynamische temperatuur T ook de Celsius temperatuur θ worden ingevuld.

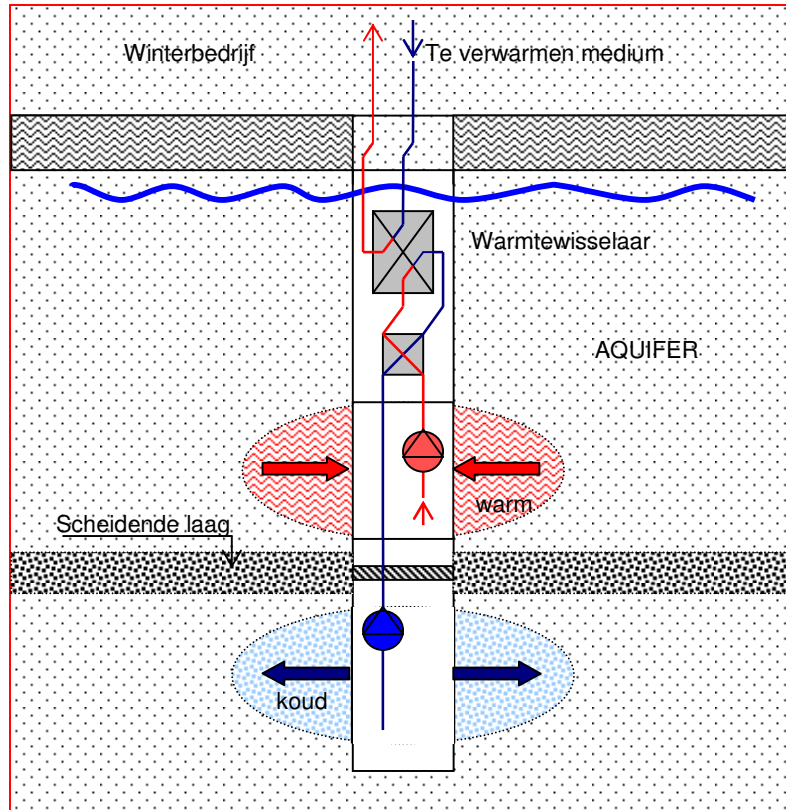
Een veel gebruikte waarde voor tegenstroom warmtewisselaars $\Delta\theta_{\log}$ is 1,0 K; deze wordt gerealiseerd bij temperatuurtrajecten van het bronsysteem als aangegeven in tabel 8.3. De intredetemperatuur van de Klimaatcascade[©] bij deze condities is 13,0⁰C, slechts 1,0 K boven de brontemperatuur van 12⁰C. Ook deze waarden zijn naderhand nauwkeuriger bepaald met behulp van een rekenmodel –zie hoofdstuk 11.

Type	$\theta_{w,in}$	$\theta_{w,uit}$	$\theta_{k,in}$	$\theta_{k,uit}$	MLTD
ALPHA	18 ⁰	13 ⁰	12 ⁰	17 ⁰	1,0
BETA	15,4 ⁰	13 ⁰	12 ⁰	14,4 ⁰	1,0

Tabel 8.3 – Temperaturen en MLTD warmtewisselaar bronsysteem

In de zomer wordt koude voor koeling van de ventilatielucht aan de bodem onttrokken; het temperatuurniveau van het koelwater is geschikt voor ruimtekoeling door bouwdeelactivering en/of actieve koelplafonds –zie figuur 8.4. Deze tekening geeft een monobronstelsel weer, waarbij de warme en de koude bron boven elkaar liggen; getekend is de wintersituatie.

In de zomersituatie wordt water uit de koude bron opgepompt, en het opgewarmde water wordt geïnfiltreerd in de warme bron. Een warmtewisselaar scheidt het bronsysteem van het bovengrondse systeem (Willemsen en van Harlingen 2002).



Figuur 8.4 – Monobron in winterbedrijf

8.7 Energieaspecten

Voor het koelsysteem zijn twee pompen nodig, de bronpomp en de sproeierpomp, die beide elektrische energie gebruiken, hoofdzakelijk bepaald door het waterdebiet en de benodigde opvoerhoogte

De bronpomp staat in een gesloten systeem, waarin alleen energie nodig is voor het compenseren van de drukverliezen van leidingen en warmtewisselaar.

De sproeierpomp staat in een open systeem; naast het compenseren van de drukverliezen van leidingen, warmtewisselaar en sproeiers moet koelwater moet worden opgepompt over het aantal verdiepingen dat het gebouw omvat. De hiervoor benodigde energie wordt voor een nog onbekend deel benut voor het in beweging brengen van de ventilatielucht door impulsoverdracht van de vallende waterdruppels op de lucht. Naar verwachting wordt een veel groter deel omgezet in warmte als deze druppels in het koelwaterreservoir vallen.

Pompvermogens worden berekend met de formule

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot q_v}{\eta}$$

(8.3)

Waarin	P	=	pompvermogen	[kW]
	ρ	=	dichtheid van water	[kg.m ⁻³]
	g	=	gravitatieconstante	[m.s ⁻²]
	h	=	opvoerhoogte	[m]
	q_v	=	volumestroom	[m ³ .s ⁻¹]
	η	=	rendement	[-]

Voor een raming van benodigde pompenergie worden de volgende aannamen gedaan:

- Primaire pomp: drukverlies warmtewisselaar, sproeiers en leidingsysteem: 1,5 m
- Bronpomp: drukverlies warmtewisselaar en leidingsysteem: 1,5 m
- Pompendementen inclusief elektromotor: 75%

De volumestroom van de pompen wordt berekend met de volgende formule:

$$q_v = \frac{P_{th}}{(\theta_{uit} - \theta_{in}) \cdot c}$$

(8.4)

Waarin: q_v = volumestroom [dm³.s⁻¹]
 P_{th} = thermisch vermogen [kJ.s⁻¹ = kW]
 θ_{uit} = uitgaande temperatuur [°C]
 θ_{in} = ingaande temperatuur [°C]
 c = specifieke warmte [kJ.kg⁻¹.K⁻¹]

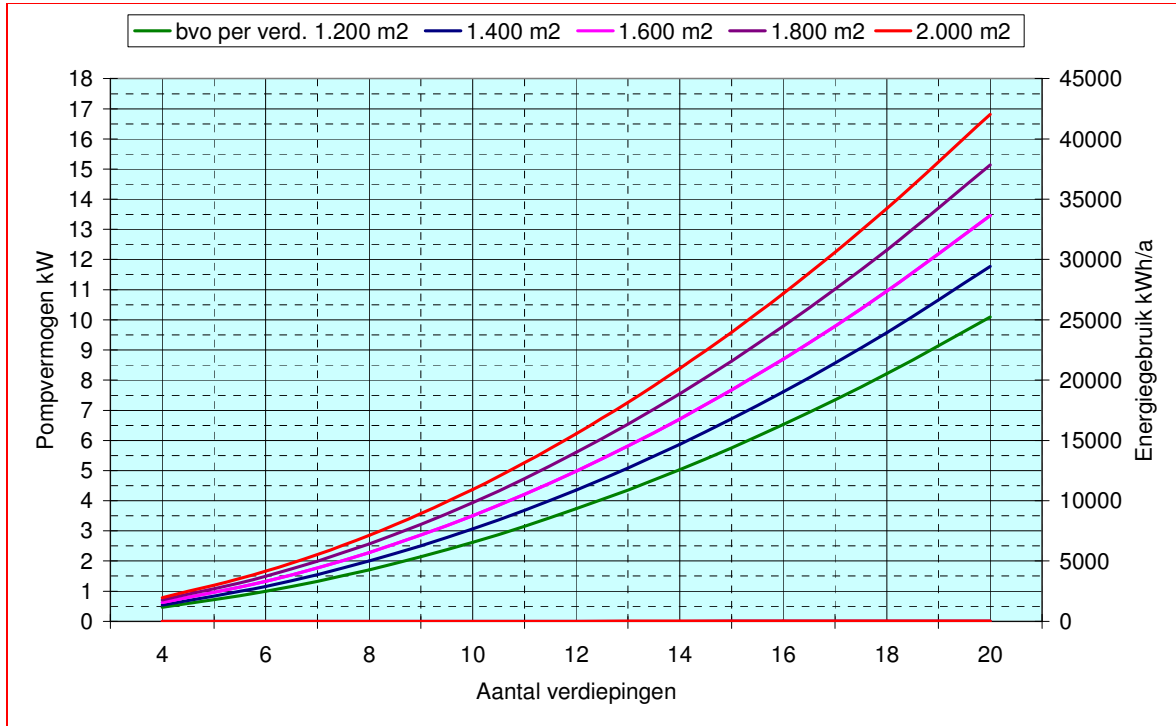
Tabel 8.4 geeft een overzicht van de koelcapaciteiten, de benodigde pompenergie en de koudefactoren voor de gebouw/klimaattypen ALPHA en BETA. Uitgegaan is van een gebouw met vier verdiepingen verdiepinghoogte 3,5 m, ventilatiecapaciteit 3.000 m³.h⁻¹ per verdieping, overeenkomend met ca 1 kg.s⁻¹.

	symbool	eenheid	ALPHA	BETA
Luchtzijdig:				
Debiet per verdieping		m ³ .h ⁻¹	3000	3000
Debiet 4 verdiepingen		m ³ .h ⁻¹	12000	12000
idem		m ³ .s ⁻¹	3,33	3,33
idem		kg.s ⁻¹	4,00	4,00
Intrede Klimaatcascade [©]	$\theta_{w,in}$	°C	28,00	28,00
Uittrede Klimaatcascade [©]	$\theta_{w,uit}$	°C	19,70	17,10
Intrede Klimaatcascade [©]	h	kJ.kg ⁻¹	61,40	61,40
Uittrede Klimaatcascade [©]	h	kJ.kg ⁻¹	52,90	45,20
Enthalpieverschil	Δh	kJ.kg ⁻¹	8,50	16,20
Koelcapaciteit	P_{th}	kW	34,00	64,80
Primaire pomp (1):				
Aanvoertemperatuur	$\theta_{k,in}$	°C	13,00	13,00
Retourtemperatuur	$\theta_{k,uit}$	°C	18,00	15,40
Volumestroom	q_v	dm ³ .s ⁻¹	1,63	6,46
Volumestroom	q_v	m ³ .h ⁻¹	5,85	23,24
Opvoerhoogte (4*3,5+1,5)		m	15,50	15,50
Pompvermogen $\eta = 0,75$	P	kW	0,33	1,31
Bronpomp (2):				
Aanvoertemperatuur	$\theta_{k,in}$	°C	12,00	12,00
Retourtemperatuur	$\theta_{k,uit}$	°C	17,00	14,40
Volumestroom	q_v	dm ³ .s ⁻¹	1,63	6,46
Volumestroom	q_v	m ³ .h ⁻¹	5,85	23,24
Opvoerhoogte (1,5)		m	1,5	1,5
Pompvermogen $\eta=0,75$		kW	0,03	0,13
Totaal pompvermogen (1+2)	P	kW	0,36	1,44
Koudefactor –zie par.9.9	-	-	94,0	45,1
Water/Luchtverhouding	-	kg/kg	0,4	1,6

Tabel 8.4 – Koelcapaciteit, Pompvermogens en Koudefactor

8.8 Pompvermogens en jaarlijks energiegebruik

Voor gebouwen van 4 tot 20 verdiepingen en 1.200 tot 2.000 m² bvo per verdieping zijn de pompvermogens en de jaarlijkse energiegebruiken berekend; zie figuur 8.5 en 8.6. Uitgegaan is van een bedrijfstijd van 2.000 uur per jaar.



Figuur 8.5 – Pompvermogen en jaarlijks energiegebruik als functie aantal verdiepingen en bvo - ALPHA

8.9 Koudefactor

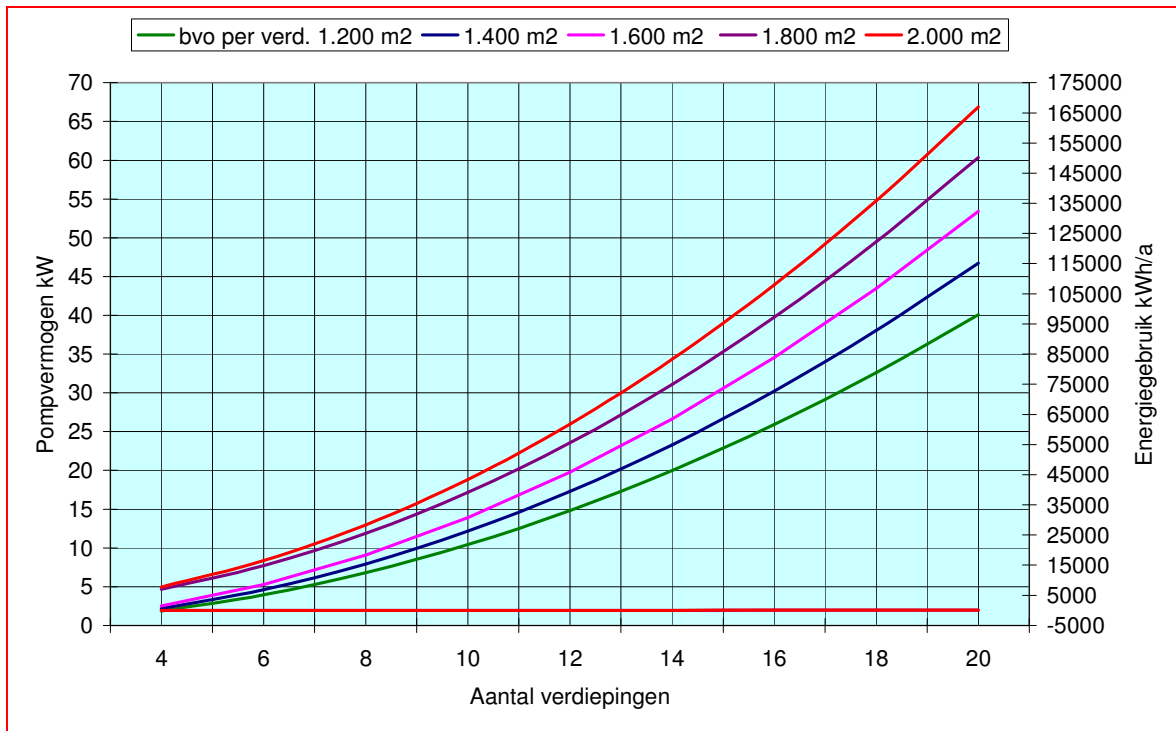
Het koelsysteem met Klimaatcascade[®] levert een bepaald koelvermogen waarvoor de primaire energie aan de bodem wordt onttrokken; de pompen gebruiken elektrische energie. De prestaties van het cascadeconcept kunnen worden uitgedrukt in de koudefactor ϵ . Deze wordt gedefinieerd als de verhouding van de onttrokken warmtestroom tot het hiervoor benodigde opgenomen vermogen van de pompen. In formule

$$\epsilon = \frac{\Phi_o}{P} \tag{8.5}$$

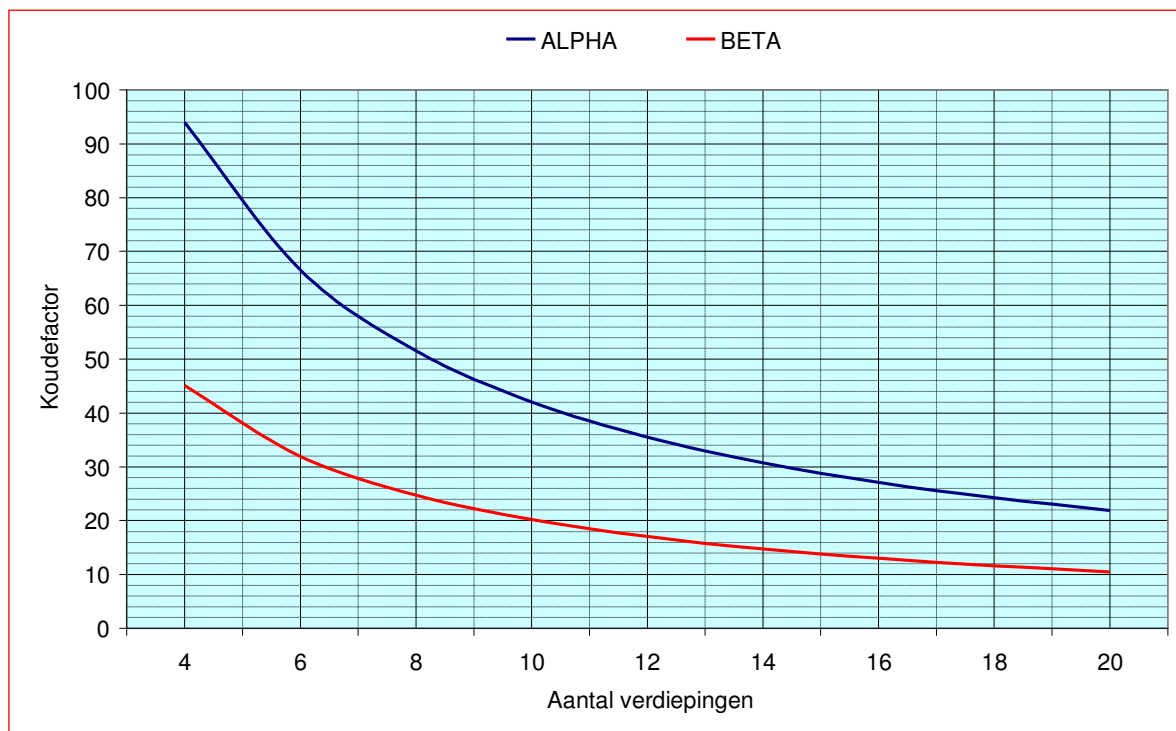
Waarin

- ϵ = koudefactor
- Φ_o = onttrokken warmtestroom
- P = opgenomen asvermogen

De voor het voorbeeld van paragraaf 8.7 berekende koudefactoren zijn met $\epsilon = 90$ voor ALPHA en $\epsilon = 45$ voor BETA veel hoger dan de koudefactoren van 5 à 7 die met de traditionele koudetechniek haalbaar zijn. De koudefactor neemt echter af bij toenemende hoogte van het gebouw omdat de pompdruk en het opgenomen vermogen van de primaire pomp dan toeneemt. Dit wordt in beeld gebracht in figuur 8.6, die is berekend voor een verdiepinghoogte van 3,5 m en de in tabel 9.4 vermelde temperaturen en capaciteiten. Ook bij zeer hoge gebouwen zijn de haalbare koudefactoren aanzienlijk hoger dan bij traditionele koudetechniek.



Figuur 8.6 – Pompmogelijkheden en jaarlijks energieverbruik als functie aantal verdiepingen en bvo - BETA



Figuur 8.7 – Koudefactoren

8.10 De Klimaatcascade[®] versus conventionele koeling

Een vergelijking van een Klimaatcascade[®] met conventionele koeling op basis van de koudefactor bij gedefinieerde condities gaat mank. Een Klimaatcascade[®] dient namelijk niet alleen voor koeling van de ventilatielucht maar ook voor het luchttransport en moet derhalve gedurende de gehele bedrijfstijd van het klimaatsysteem in bedrijf blijven. Een koelmachine voor mechanische koeling heeft daarentegen maar een beperkt aantal bedrijfsuren, terwijl het luchttransport verzorgd wordt met behulp van een separate ventilator.

Voor een betere vergelijking wordt daarom in dit verband de Energy Efficiency Ratio EER^{k+v} geïntroduceerd, waarmee zowel het energiegebruik voor koudeopwekking als voor het transport van de koude naar de werkplek via de lucht in rekening wordt gebracht. In feite betekent dit dat de systeemvergelijking niet plaatsvindt op basis van de koudeproductie maar op basis van de koudelevering op de werkplek.

De EER^{k+v} wordt als volgt gedefinieerd:

$$EER^{k+v} = \frac{\Phi_{th,a}}{P_k + P_v}$$

(8.6)

Waarin

$$\begin{aligned} \Phi_{th,a} &= \text{koudevraag in koelseizoen} && [\text{kWh}_{th} \cdot \text{a}^{-1}] \\ P_k &= \text{energiegebruik voor koeling} && [\text{kWh}_e \cdot \text{a}^{-1}] \\ P_v &= \text{energiegebruik voor luchttransport in koelseizoen} && [\text{kWh}_e \cdot \text{a}^{-1}] \end{aligned}$$

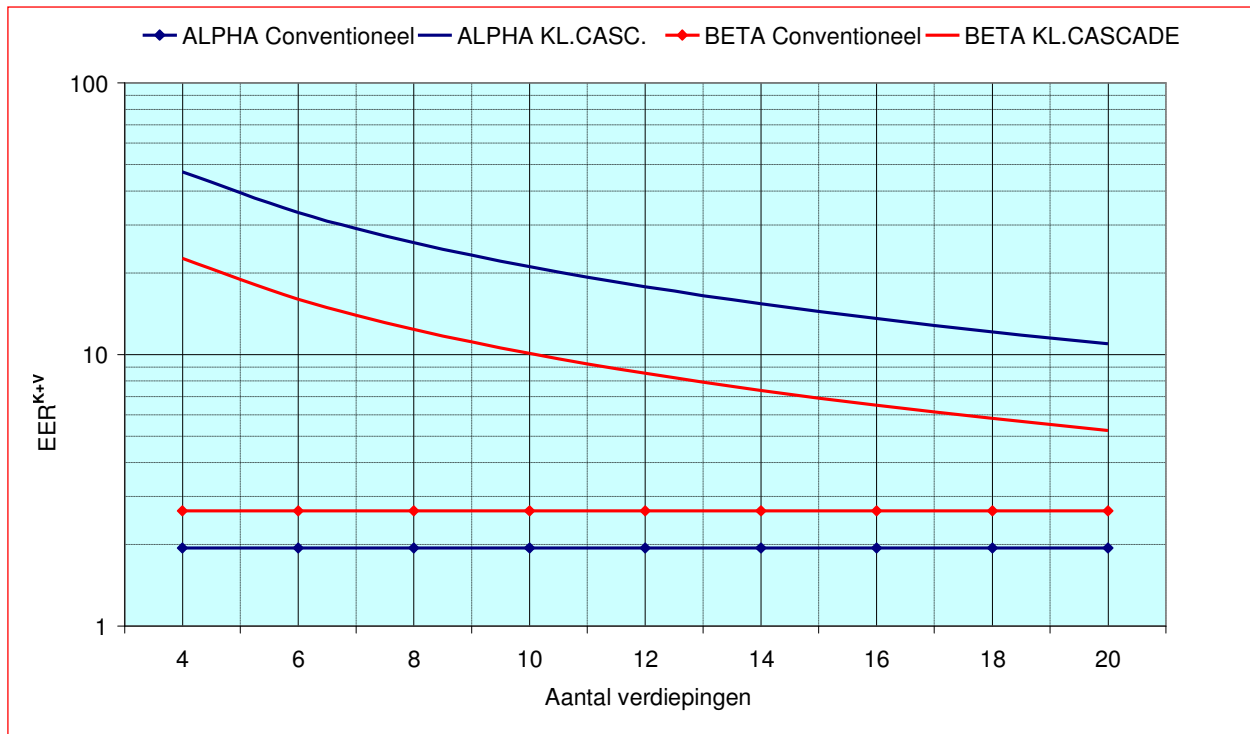
Een globale prestatievergelijking is gemaakt voor de Klimaatcascade[®] conform paragraaf 6.5 voor de gebouw/klimaatypen ALPHA en BETA en een conventioneel systeem volgens de onderstaande uitgangspunten:

- Het conventionele systeem bestaat uit een waterkoelinstallatie met watergekoelde condensor en natte koeltoren. Het gemiddelde koelrendement (koudefactor) in het koelseizoen wordt gesteld op 4,5 (TNO en Deerns 2007). Verondersteld wordt dat het energiegebruik van de koeltoren, de koelwater- en de koudwaterpompen in rekening kan worden gebracht door een verlaging van dit rendement met -1, hetgeen echter wordt gecompenseerd door een verhoging van +1 door toepassing van een Hoog Temperatuur afgiftesysteem.
- Voor het energiegebruik ten behoeve van het luchttransport in een conventioneel systeem wordt uitgegaan van een SPF van 4, conform NEN EN 13779 (CEN 2008) de standaardwaarde voor de toevoerventilator van een luchtbehandelinginstallatie. SPF is de *Specific Fan Power* in $\text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ en ligt voor een SPF van 4 in het bereik van $1.250 \dots 2.000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$. Gerekend is met een waarde van 1.500.
- De koudevraag in het koelseizoen $\Phi_{th,a}$ wordt berekend op basis van 500 vollasturen.
- Het aantal bedrijfsuren in het koelseizoen is gesteld op 1.000.

Aantal verdiepingen	4	6	8	10	12	14	16	18	20
EER ^{k+v} Klimaatcascade [®] - ALPHA	47,0	33,3	25,8	21,0	17,8	15,4	13,6	12,1	11,0
EER ^{k+v} Conventioneel	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
Klimaatcascade [®] /Conventioneel	24,3	17,2	13,3	10,9	9,2	7,9	7,0	6,3	5,7
EER ^{k+v} Klimaatcascade [®] - BETA	22,6	16,0	12,4	10,1	8,5	7,4	6,5	5,8	5,3
EER ^{k+v} Conventioneel	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
Klimaatcascade [®] /Conventioneel	8,5	6,0	4,7	3,8	3,2	2,8	2,5	2,2	2,0

Tabel 8.5 – EER^{k+v} Klimaatcascade[®] en Conventioneel

De op basis van deze uitgangspunten berekende waarden EER^{K+V} zijn aangegeven in tabel 8.5 en figuur 8.8. Ook voor hoge gebouwen is de EER^{K+V} voor het cascadeconcept superieur.



Figuur 8.8 – EER^{K+V} voor conventionele koeling en [®] – gebouw/klimaattypen ALPHA en BETA

8.11 Definitieve energieberekeningen

De energieberekeningen uit dit hoofdstuk zijn gemaakt op basis van psychometrische uitgangspunten en schattingen van de temperatuurtrajecten van het koelwater. In hoofdstuk 11 worden berekeningen van de koelprestaties van Klimaatcascades[®] gepresenteerd die gebaseerd zijn op het analytisch rekenmodel –zie hoofdstuk 10. Hieruit blijkt o.a. dat de water/lucht verhouding $R_{w/L}$ voor gebouw/klimaat type ALPHA met waarden van 1,2...1,4 lager kunnen zijn dan de waarde van 1,6 waarmee in het voorliggend hoofdstuk is gerekend. Dit heeft uiteraard een gunstig effect op het energiegebruik.

Earth, Wind & Fire – Airconditioning zonder Ventilatoren
(III) Onderzoek Geo-Klimaatconcept[®]

9. DE KLIMAATCASCADE ALS WARMTEWISSELAAR

9.1 Inleiding

Een Klimaatcascade[©] kan worden beschouwd als een bijzondere uitvoering van een warmtewisselaar waarin het primaire medium, gekoeld water, in direct contact staat met het secundaire medium, de lucht. Het warmtewisselend oppervlak wordt gevormd door de waterdruppels van het primaire medium en de wanden van de cascade.

Voor inzicht in de werking van een Klimaatcascade[©] als warmtewisselaar kan dit hoofdstuk als *pièce de résistance* worden beschouwd. Met gangbare formules uit de stromings- en warmteleer is getracht een wiskundige beschrijving te geven van de fenomenen van warmte- en stofoverdracht tussen het gekoelde water en de lucht. Dit blijkt een weerbarstige materie te zijn, gekenmerkt door onzekerheden. Desondanks is een poging gewaagd, waardoor enerzijds het inzicht in de werking van een Klimaatcascade[©] is verdiept en anderzijds duidelijk is geworden waar mogelijk zwakke punten in de theorie zitten.

Op basis van de analyses in dit hoofdstuk is een fysisch rekenmodel gemaakt van de warmte- en stofoverdracht in een Klimaatcascade[©] -zie hoofdstuk 10. Met behulp hiervan zijn de koelprestaties berekend van Klimaatcascade[©] voor gebouwen van uiteenlopende omvang en hoogte –zie hoofdstuk 11. Simulaties met het analytisch rekenmodel zijn ook vergeleken met numerieke stromingssimulaties –zie hoofdstuk 16, en een dynamische simulatie met ESP-r –zie hoofdstuk 18. De simulaties zijn tenslotte gevalideerd en gekalibreerd op basis van metingen in een fysieke onderzoekopstelling –zie hoofdstuk 17. Hierdoor is het inzicht in de prestaties van een Klimaatcascade[©] verdiept, vooral met betrekking tot het gedrag van een druppelverzameling, het werkzaam oppervlak van de warmtewisselaar, in een luchtstroom. Hiermee is een betrouwbaar rekenmodel beschikbaar gekomen voor het ontwerp van een Klimaatcascade[©] in de praktijk.

Voor verschillende berekeningen is gebruik gemaakt van het onderzoek “Optimization of Direct-Contact-Spray-Coolers” (El-Morsi, M.S. 2002).

9.2 Samenvatting

De warmteoverdracht van lucht op water in een Klimaatcascade[©] komt overeen met de psychometrisch benodigde enthalpieverandering van de lucht; zie hoofdstuk 8. Het warmtewisselend oppervlak van de cascade moet in combinatie met de warmteoverdrachtscoëfficiënt en het temperatuurverschil tussen water en lucht deze warmteoverdracht mogelijk maken. Deze elementen worden in de voorliggende paragraaf geanalyseerd; uitgegaan is van de benodigde koelcapaciteit in het koelseizoen.

Het warmtewisselend oppervlak van een Klimaatcascade[©] wordt in hoofdzaak bepaald door het cumulatieve oppervlak van de waterdruppels en de verblijfsduur hiervan in de cascade. Daarnaast speelt ook het wandoppervlak van de cascade een rol bij de warmteoverdracht, zij het minder prominent. De verblijfsduur van de waterdruppels is een functie van de valsnelheid en de hoogte van de cascade. De valsnelheid wordt op zijn beurt weer bepaald door het druppelgewicht, en dus door de diameter van de druppels. Elke waterdruppel maakt deel uit van een druppelverzameling met uiteenlopende diameters en valsnelheden. Het cumulatieve oppervlak wordt bepaald door de distributieve verdeling van druppeldiameters in de sproeizone.

De warmteoverdrachtscoëfficiënt tussen lucht en water is een functie van de diameter en de valsnelheid van de waterdruppels; de functies zijn dus onderling gerelateerd. Een berekening of raming van de thermische prestaties van een Klimaatcascade[©] is daarom moeilijk te maken. Het in werkelijkheid optredende sproeipatroon is moeilijk te voorspellen; veel hangt af van de uitvoering van de sproeiers, de waterdruk en de hoogte van de Klimaatcascade[©]. De analyses zijn echter van belang om een beter inzicht te krijgen in de uitgangspunten voor de CFD simulaties en de fysieke testopstelling.

Het spectrum van druppeldiameters in een Klimaatcascade[©] met de daarbij behorende parameters is geanalyseerd. Met behulp van literatuurgegevens wordt op basis van een gemeten distributieve verdeling een cumulatieve massaverdeling berekend. Deze dient als uitgangspunt voor de karakterisering van het

sproeispectrum en de berekening van het cumulatieve oppervlak voor verschillende andere scenario's - paragraaf 9.3. Een deel van het koelwater valt op de wanden van de Klimaatcascade[©] en vormt daar een waterfilm die een rol speelt bij de warmteoverdracht -paragraaf 9.4.

De valsnelheid van waterdruppels is enerzijds bepalend voor hun verblijfstijd in de Klimaatcascade[©], anderzijds voor de warmteoverdracht tussen lucht en water. Met behulp van gangbare theorieën uit de stromingsleer is een functie afgeleid die de relatie tussen de diameter en de valsnelheid weergeeft. Deze is vergeleken met meteorologisch onderzoek naar de valsnelheid van regendruppels -paragraaf 9.6.

Het werkzame oppervlak van een Klimaatcascade[©] wordt hoofdzakelijk gevormd door het cumulatieve oppervlak van de druppelverzameling in de sproeizone. Op basis van metingen in de sproeizone van een koeltoren uit de literatuur wordt het werkzame oppervlak in een Klimaatcascade[©] gekarakteriseerd - paragraaf 9.7. Hieruit is een algoritme ontwikkeld voor de karakterisering van verschillende fijnere sproeipatronen -paragraaf 9.8- en van het wandoppervlak -paragraaf 9.9.

De warmte- en stofoverdrachtscoëfficiënten tussen lucht en water in de sproeizone en de wanden wordt geanalyseerd. De warmteoverdrachtscoëfficiënt in de sproeizone blijkt een factor ≈ 20 hoger te zijn dan die tussen wanden en lucht -paragraaf 9.10, 9.11 en 9.12.

Formules worden ontwikkeld voor de capaciteitsberekening van een Klimaatcascade[©] - paragraaf 9.15. Voor een transparante cascade, die de waterval van buiten af zichtbaar maakt, wordt een aanvullend rekenalgoritme gegeven -paragraaf 9.16.

9.3 Karakterisering van het sproeipatroon in een Klimaatcascade[©]

Het sproeipatroon wordt in hoge mate bepaald door de uitvoering van de sproeiërs en de sproeidruk. Er zijn grote verschillen tussen sproeikoppen voor lage druk zoals douches, middendruk zoals sprinklers en hoge druk zoals verstuivers.

De volumestroom van het water wordt bepaald door de benodigde koelprestatie bij ontwerpcondities in de zomer -zie hoofdstuk 8.

De keuze van het sproeisysteem is bepalend voor de pompdruk en daarmee voor het energieverbruik en de koudefactor van de Klimaatcascade[©].

Het spectrum van de distributieve verdeling van druppeldiameters in het sproeipatroon is een belangrijk gegeven. In de literatuur zijn hierover weliswaar gegevens te vinden, maar deze gelden voor het sproeipatroon direct achter de sproeier. Tijdens hun val in de Klimaatcascade[©] zullen snelheidsverschillen tussen grotere en kleinere druppels ontstaan, waardoor deze contact met elkaar maken en kunnen coaguleren tot grotere druppels. Anderzijds kunnen grote druppels ook uiteenvallen in kleinere druppels. De distributieve verdeling van de druppeldiameters in de Klimaatcascade[©] behoeft dus geen constante te zijn. Meting hiervan in de fysieke testopstelling bleek niet mogelijk omdat de hiervoor benodigde apparatuur alleen geschikt is voor metingen in een laboratoriumopstelling.

Met behulp van de Equivalente Bol Theorie is het mogelijk de eigenschappen van een waterdruppel, diameter, oppervlak en volume met één getal te karakteriseren (Rawle A. 2001-2005, Jones A. e.a. 1995). Druppels hoeven hiervoor niet perfect bolvormig te zijn (Tekasakul P. e.a. 2002), hetgeen met de door luchtweerstand afgeplatte waterdruppels in een klimaatwaterval ook niet het geval is.

De gemiddelde druppeldiameter wordt mathematisch uitgedrukt in de formule

$$D[1,0] = \frac{\sum n \cdot d}{n}$$

(9.1)

Waarin

- D[1,0] = Gemiddelde druppeldiameter, meestal geschreven als d_{10}
- d = Diameter van de afzonderlijke druppels
- n = Aantal druppels

De uitdrukking $D[1,0]$ betekent dat in de teller van de vergelijking de diameter de macht 1 heeft (d^1) en in de noemer d niet voorkomt (d^0).

De valsnelheid wordt niet bepaald door de diameter maar in hoofdzaak door het gewicht, en dus het volume van een druppel. Het volume van een bol is $\pi d^3/6$ en de relatie tussen de gemiddelde druppeldiameter en het gemiddelde volume hiervan wordt geschreven als

$$D[3,0] = \sqrt[3]{\frac{\sum n \cdot d^3}{n}} \quad (9.2)$$

Waarin

$D[3,0]$ = Gemiddelde druppeldiameter op volume of VMD Volume Mean Diameter, meestal geschreven als d_{30}

Het oppervlak van een bol is πd^2 en de relatie tussen de gemiddelde druppeldiameter en het gemiddelde oppervlak hiervan wordt daarom geschreven als

$$D[2,0] = \sqrt{\frac{\sum n \cdot d^2}{n}} \quad (9.3)$$

Waarin

$D[2,0]$ = Gemiddelde druppeldiameter op oppervlak of SMD Surface Mean Diameter, meestal geschreven als d_{20}

Voor toepassingen waarbij het actieve oppervlak van belang is, zoals bij katalyse en de verbranding van brandstofniveaus en, naar aan te nemen, ook bij warmteoverdracht in een Klimaatcascade[®], wordt de relatie tussen de gemiddelde druppeldiameter en het gemiddelde oppervlak hiervan meestal uitgedrukt in de Sauter Mean Diameter SMD die wordt geschreven als

$$D[3,2] = \frac{\sum n \cdot d^3}{\sum n \cdot d^2} \quad (9.4)$$

Waarin

$D[3,2]$ = Sauter Mean Diameter, meestal geschreven als d_{32}

De druppeldiameter en het aantal druppels kan worden gemeten met behulp van fotografische technieken. Een voorbeeld van dergelijke metingen in de sproeizone van een koeltoren (Terblanche, R. e.a. 2009) geeft het in tabel 9.1 weergegeven beeld waarin

d = druppeldiameter [mm]

n = aantal druppels

R_m = cumulatieve massaverdeling van het druppelspectrum

d (mm)	n	R _m	n.d ¹	n.d ² (mm) ²	n.d ³ (mm) ³	
0,25	5	0,999995	1,25	0,31	0,08	De verschillende gelijkwaardige diameters zijn als volgt berekend:
0,75	48	0,998806	36,00	27,00	20,25	
1,25	35	0,994789	43,75	54,69	68,36	
1,75	27	0,986287	47,25	82,69	144,70	$d_{10 \text{ of } D[1,0]}$
2,25	15	0,976248	33,75	75,94	170,86	$= \frac{\sum n.d^1}{n} = 2,95mm$
2,75	21	0,950587	57,75	158,81	436,73	
3,25	10	0,930417	32,50	105,63	343,28	
3,75	13	0,890137	48,75	182,81	685,55	$d_{20 \text{ of } D[2,0]}$
4,25	21	0,795417	89,25	379,31	1612,08	$= \sqrt{\frac{\sum n.d^2}{n}} = 3,55mm$
4,75	18	0,682071	85,50	406,13	1929,09	
5,25	15	0,554538	78,75	413,44	2170,55	
5,75	16	0,375817	92,00	529,00	3041,75	$d_{30 \text{ of } D[3,0]}$
6,25	11	0,218024	68,75	429,69	2685,55	$= \sqrt[3]{\frac{\sum n.d^3}{n}} = 4,01mm$
6,75	4	0,145743	27,00	182,25	1230,19	
7,25	2	0,100961	14,50	105,13	762,16	
7,75	0	0,100961	0,00	0,00	0,00	$d_{32 \text{ of } D[3,2]}$
8,25	0	0,100961	0,00	0,00	0,00	$= \frac{\sum n.d^3}{\sum n.d^2} = 5,14mm$
8,75	0	0,100961	0,00	0,00	0,00	
9,25	1	0,054459	9,25	85,56	791,45	
9,75	1	0	9,75	95,06	926,86	
Σ	263		775,75	3313,44	17019,48	

Tabel 9.1 – Gemeten en berekende druppeldiameters in een koeltoren

De cumulatieve massaverdeling van het druppelspectrum in deze metingen is weergegeven in figuur 9.1. Naast de gemeten cumulatieve massaverdeling R_{gemeten} is hierin ook de probabilistische massaverdeling volgens Rosin-Rammler R_{RR} aangegeven. De Rosin-Rammler functie is een empirische relatie die wordt gebruikt om de gemeten cumulatieve massaverdeling te correleren aan de druppeldiameters (Terblanche, R. e.a. 2009). De formule van de RR functie is als volgt:

$$R_{RR}(d_d) = e^{-\left(\frac{d_d}{\bar{d}}\right)^{\eta_{RR}}} \quad (9.5)$$

Waarin

R_{RR} = massadistributie volgens Rosin-Rammler

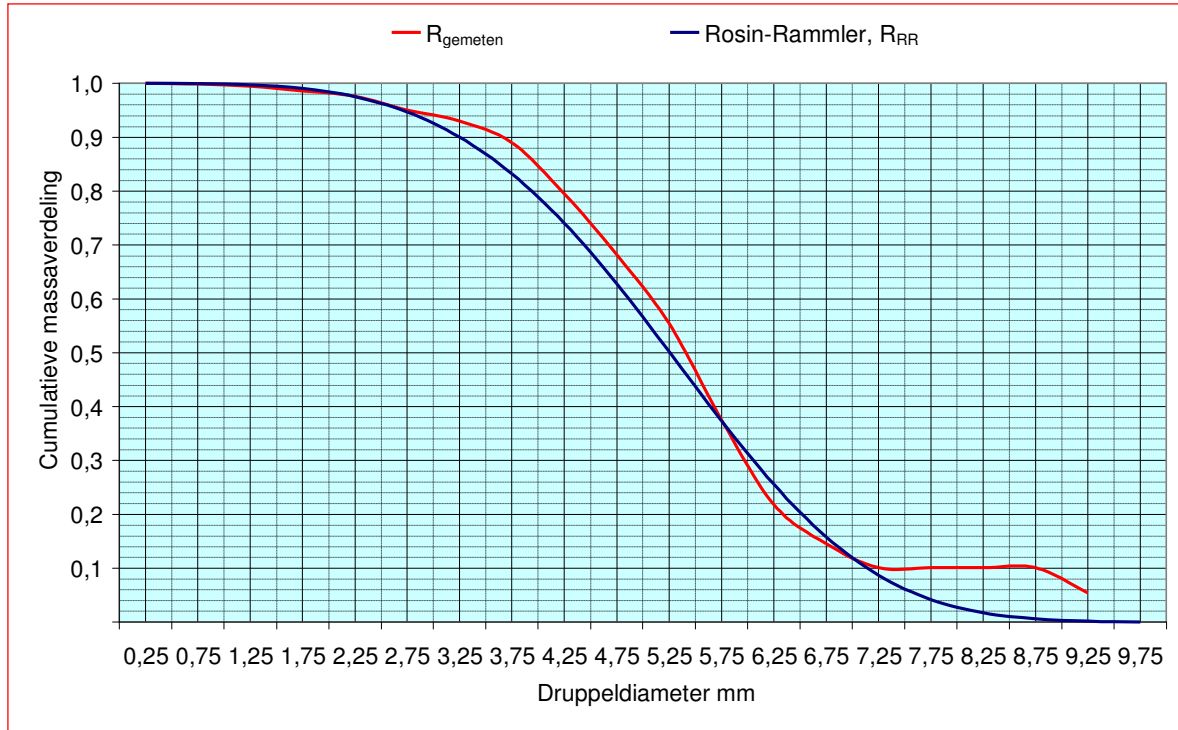
\bar{d} = gemiddelde diameter volgens Rosin-Rammler

$$\eta_{RR} = \frac{\ln(-\ln R_{\text{gemeten}})}{\ln\left(\frac{d_d}{\bar{d}}\right)} \quad (9.6)$$

De gemiddelde diameter volgens Rosin-Rammler \bar{d} is de diameter uit de cumulatieve massadistributie waarbij $R_{\text{gemeten}} = e^{-1}$

Op basis van de distributieve spectrumverdeling van tabel 9.1 en figuur 9.1 zijn 10 sproeispectra met afnemende druppelgrootte gedefinieerd. De druppeldiameter is hierbij in stappen van telkens 10% verkleind, en met het rekenalgoritme van paragraaf 10.3 zijn de equivalente druppeldiameters d_{10} , d_{20} , d_{30}

en d_{32} hiervan berekend; zie tabel 9.2. Deze spectra zijn gebruikt voor de hierna volgende analyse van de warmte- en stofoverdracht in een Klimaatcascade[®].



Figuur 9.1 – Cumulatieve massaverdeling van de metingen volgens tabel 9.1

Spectrum>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Diameter	nominaal	0,9*1	0,8*1	0,7*1	0,6*1	0,5*1	0,4*1	0,3*1	0,2*1	0,1*1
d_{10} - mm	2,95	2,65	2,36	2,06	1,77	1,47	1,18	0,88	0,59	0,29
d_{20} - mm	3,55	3,19	2,84	2,48	2,13	1,77	1,42	1,06	0,71	0,35
d_{30} - mm	4,01	3,61	3,21	2,81	2,41	2,01	1,61	1,20	0,80	0,40
d_{32} - mm	5,14	4,62	4,11	3,60	3,08	2,57	2,05	1,54	1,03	0,51

Tabel 9.2 – Equivalente druppeldiameters in verschillende spectra

9.4 Karakterisering van het besproeide wandoppervlak

Niet alle door het sproeisysteem toegevoerde koelwater komt in de sproeizone terecht. Een deel van de druppels valt op de wanden van de Klimaatcascade[®] en stroomt naar beneden. Als de watertoevoer groot genoeg is worden op het wandoppervlak stroompjes gevormd. Bij toenemende watertoevoer worden de stroompjes breder totdat uiteindelijk het gehele wandoppervlak is bedekt met een benedenwaarts stromende waterfilm. De dikte van de waterfilm is een functie van het toegevoerde debiet en van de schuifkracht tussen wandoppervlak en water, die bepaald wordt door adhesiekrachten en de aard van het oppervlak.

De dikte van de waterfilm bepaalt ook de oppervlaktestructuur daarvan. Onder invloed van de zwaartekracht beweegt de waterfilm zich naar beneden, aan de binnenkant afgeremd door de schuifkracht en aan de buitenkant beheerst door de oppervlaktetension van het water. Als het evenwicht verbroken wordt ontstaat een rimpel of golfje die het evenwicht weer herstelt tot de volgende golf zich aandient. Als het toegevoerde waterdebiet wordt verminderd neemt de dikte van de waterfilm af, totdat deze wordt onderbroken en zich afzonderlijke stroompjes gaan vormen tussen een overigens droog oppervlak.

Er is veel theoretisch en experimenteel onderzoek gedaan naar de karakteristieken van waterfilms langs verticale vlakke platen (Portalski, S. 1963, Zhou, D.W. e.a. 2009, Ambrosini, W. e.a. 2002, Mikielewicz, J.e.a. 1976, Rao, B.K. 1999, Yan, W.M. e.a. 1990, Doniec, A. 1988).

An obvious justification for such a long lasting (and continuing) effort in this field can be found in the well-known relevance that falling films have in several industrial applications, including heat and mass transfer devices. However, it is rather clear that falling films have also exerted an appeal on scientists and engineers as a consequence of the complexity of the behaviour of their surface, that shows a variety of non-linear wavy structures riding on a thin fluid substrate. This complexity, whose fascinating aspects are not made less interesting by everyday observation of falling films, whenever a viscous fluid flows over an incline, is shared with other fluid-dynamic instabilities and constitutes a remarkable challenge for any theoretical model (Ambrosini, W. e.a. 2002).

De theoretische dikte van een vallende waterfilm langs een vlak en glad oppervlak met verwaarlozing van de adhesieve schuifkracht op de *interface* water/wand, kan worden berekend met de formule (Nusselt, W. 1916, Zhou, D.W. 2009)

$$\delta = \left[\frac{3 \cdot \nu \cdot \Gamma_N}{\rho \cdot g \cdot \sin \beta} \right]^{1/3}$$

(9.7)

Waarin

δ	=	dikte van de waterfilm	[m]
ν	=	kinematische viscositeit	[m ² .s ⁻¹]
Γ	=	toegevoerde waterdebiet	[kg.s ⁻¹]
Γ_N	=	waterdebiet per breedte-eenheid	[kg.(s ⁻¹ .m ⁻¹)]
ρ	=	dichtheid van water	[kg.m ⁻³]
g	=	gravitatieconstante	[m.s ⁻²]
β	=	hellingshoek van het oppervlak	[⁰]

Voorbeeld:

Een Klimaatcascade[©] met een doorsnede van 1,7*1,7 m² en een waterdebiet van 2,1 kg.s⁻¹, waarvan 15% op de wanden van de cascade valt – $\Gamma = 0,15 * 2,1 = 0,315 \text{ kg.s}^{-1}$

$$\Gamma_N = 0,15 * 2,1 / (4 * 1,7) = 0,046 \text{ kg.s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\nu = 10,10 * 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$$

$$\beta = 90^0 \text{ (vertikaal vlak)}$$

$$\delta = \left[\frac{3 * 10,10 * 10^{-7} * 0,046}{1000 * 9,81 * 1} \right]^{1/3} = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 0,24 \text{ mm}$$

De minimum dikte van een waterfilm voordat deze uiteenvalt in afzonderlijke stroompjes is experimenteel gemeten op $\approx 0,15 \text{ mm}$ (Mikielewicz, J.e.a. 1976). Onder de vermelde condities is in het voorbeeld dus sprake van een gesloten waterfilm.

Een vlak en glad oppervlak zonder adhesieve schuifkracht komt in de praktijk niet voor. Een transparante cascade van glas zal deze randvoorwaarden kunnen benaderen, maar een steenachtig oppervlak voldoet hieraan zeker niet. Verondersteld mag worden dat de dikte van de waterfilm in dat geval zal toenemen. De literatuur geeft hierover voor zover na te gaan geen uitsluitsel.

De valsnelheid van de waterfilm is een functie van het waterdebiet dat op de wanden van de cascade valt en de dikte van de film. Uit de continuïteitsvergelijking volgt de formule

$$w = \frac{\Gamma}{\delta * L} \quad (9.8)$$

Waarin

w = valsnelheid [m.s⁻¹]
 L = lengte van de film [m] = omtrek van de cascade

In het voorbeeld

$$w = \frac{0,315 * 10^{-3}}{0,24 * 10^{-3} * (4 * 1,7)} = 0,19 \text{ m.s}^{-1}$$

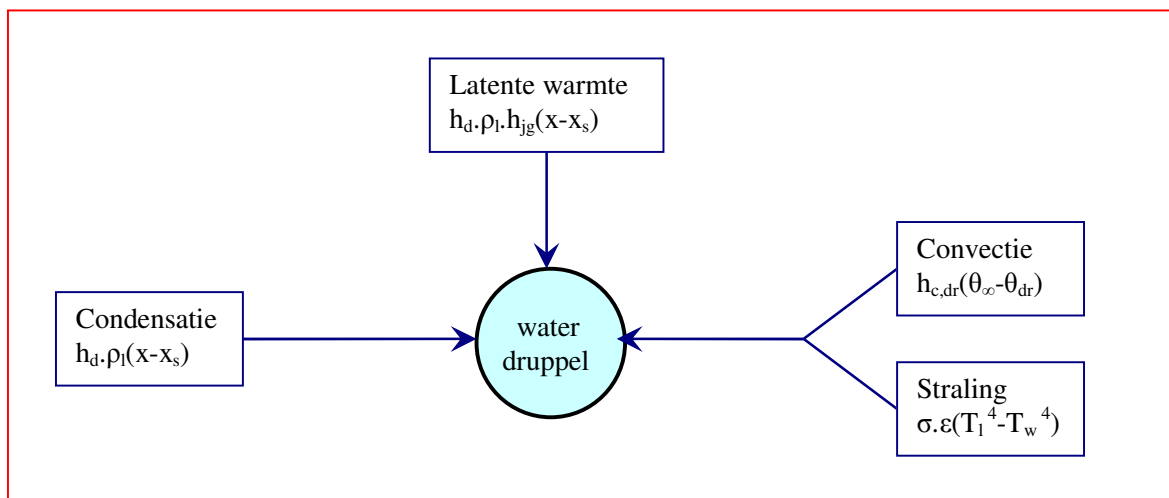
9.5 Warmte- en stofoverdracht in een Klimaatcascade[®]

Warmte- en stofoverdracht in een Klimaatcascade[®] vindt plaats via de waterdruppels en via de natte wanden. Van beide moet het oppervlak en de overgangscoefficiënt worden bepaald.

Warmte en stofoverdracht naar een waterdruppel in een Klimaatcascade[®] is gevisualiseerd in figuur 9.2 (El-Morsi 2002).

Een Klimaatcascade[®] voor een gebouw/klimaatype ALPHA functioneert onder ontwerpcondities als “droge” koeler. Hiervoor behoeft dan ook alleen de voelbare warmteoverdracht te worden berekend.

Een Klimaatcascade[®] voor een gebouw/klimaatype BETA, functioneert onder ontwerpcondities als “natte” koeler. Hiervoor moet zowel de warmte als de stofoverdracht worden berekend.



Figuur 9.2 – Warmte- en stofoverdracht naar een waterdruppel

De warmtestroom tussen lucht en water in een Klimaatcascade[®] wordt bepaald door het benodigde thermisch vermogen, uitgedrukt in de formule

$$\dot{\Phi} = q_{v,l} \cdot \rho_l \cdot (h_{l,in} - h_{l,uit}) \quad (9.9)$$

Waarin

$\dot{\Phi}$ = warmtestroom [kW]

$q_{v,l}$	= volumestroom lucht	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
ρ_l	= dichtheid van de lucht	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
$h_{l,in}$	= enthalpie van de lucht bij intrede	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$h_{l,uit}$	= enthalpie van de lucht bij uitrede	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$

De warmtestroom bestaat uit een voelbare component Φ_v en een latente component Φ_l , waarbij $\Phi = \Phi_v + \Phi_l$.

De warmteoverdracht tussen lucht en water via waterdruppels en via de wandoppervlakken is in principe convectief. Volgens El-Morsi vindt er eveneens warmteoverdracht plaats door straling, maar dit lijkt dubieus, aangezien lucht een diathermaan gas is dat straling doorlaat en niet absorbeert.

Als een eventuele stralingscomponent wordt verwaarloosd kan de voelbare warmteoverdracht in een Klimaatcascade[©] worden beschreven met de algemene formule

$$\dot{\Phi}_v = A_{dr} \cdot h_{c,dr} (\theta_\infty - \theta_{dr}) + A_{wnd} \cdot h_{c,wnd} (\theta_\infty - \theta_{wnd}) \quad [\text{W}] \quad (9.10)$$

Waarin

Φ_v	= warmtestroom voelbare warmte	$[\text{W}]$
A_{dr}	= totaal oppervlak waterdruppels in de sproeizone	$[\text{m}^2]$
$h_{c,dr}$	= convectieve warmteovergangscoefficiënt van lucht op druppels	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
θ_∞	= temperatuur in de luchtstroom	$[^\circ\text{C}]$
θ_{dr}	= temperatuur van de waterdruppels	$[^\circ\text{C}]$
A_{wnd}	= totaal oppervlak wand	$[\text{m}^2]$
$h_{c,wnd}$	= convectieve warmteovergangscoefficiënt lucht en wanden	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
θ_{wnd}	= temperatuur van de wand	$[^\circ\text{C}]$

Op analoge wijze kan de latente warmteoverdracht in een Klimaatcascade[©] worden beschreven met de algemene formule

$$\dot{\Phi}_l = A_{dr} \cdot K_{dr} \cdot r (c_{d,\infty} - c_{d,opp}) + A_{wnd} \cdot K_w \cdot r (c_{d,\infty} - c_{d,wnd}) \quad (9.11)$$

Waarin

$\dot{\Phi}_l$	= warmtestroom latente warmte	$[\text{W}]$
A_{dr}	= totaal oppervlak waterdruppels in de sproeizone	$[\text{m}^2]$
K_{dr}	= stofoverdrachtscoëfficiënt luchtvochtigheid op druppels	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
r	= verdampingswarmte water bij de condensatietemperatuur	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$c_{d,\infty}$	= waterdampconcentratie in de lucht	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
$c_{d,opp}$	= waterdampconcentratie aan het oppervlak van de druppels	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
A_{wnd}	= totaal oppervlak wand	$[\text{m}^2]$
K_w	= stofoverdrachtscoëfficiënt luchtvochtigheid op wand	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$c_{d,wnd}$	= waterdampconcentratie aan het oppervlak van de wand	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$

9.6 Valsnelheid waterdruppels

Het werkzame oppervlak van een Klimaatcascade[©] wordt naast een vast wandoppervlak bepaald door het cumulatieve oppervlak van de waterdruppels die gelijktijdig in de cascade aanwezig zijn. Dit cumulatieve oppervlak is een functie van het aantal druppels en de d_{32} Sauter Mean Diameter SMD; zie par. 9.3. Het aantal druppels hangt af van het waterdebiet en de d_{30} Volume Mean Diameter VMD. De verblijfstijd van een druppel in de Klimaatcascade[©] is een functie van de hoogte en van de valsnelheid, die weer direct verband houdt met het gewicht en dus de d_{30} Volume Mean Diameter.

De valsnelheid is tevens een belangrijke parameter voor het getal van Reynolds en daarmee van de convectieve warmteovergangcoëfficiënt.

De valsnelheid van een druppel of een druppelverzameling wordt bepaald door de aanvangssnelheid, de zwaartekracht en de luchtweerstand. Tijdens de val neemt in eerste instantie de snelheid toe met de gravitatieversnelling g maar door de toenemende snelheid neemt ook de luchtweerstand toe. Als beide krachten in evenwicht zijn neemt de snelheid niet verder toe en is de eindsnelheid $w_{v,t}$ bereikt; zie figuur 9.7

De luchtweerstand wordt bepaald door de weerstandcoëfficiënt C_w die afhankelijk is van de aard van de stroming, laminair, turbulent of tussenliggend, uitgedrukt in het getal van Reynolds Re volgens de formule

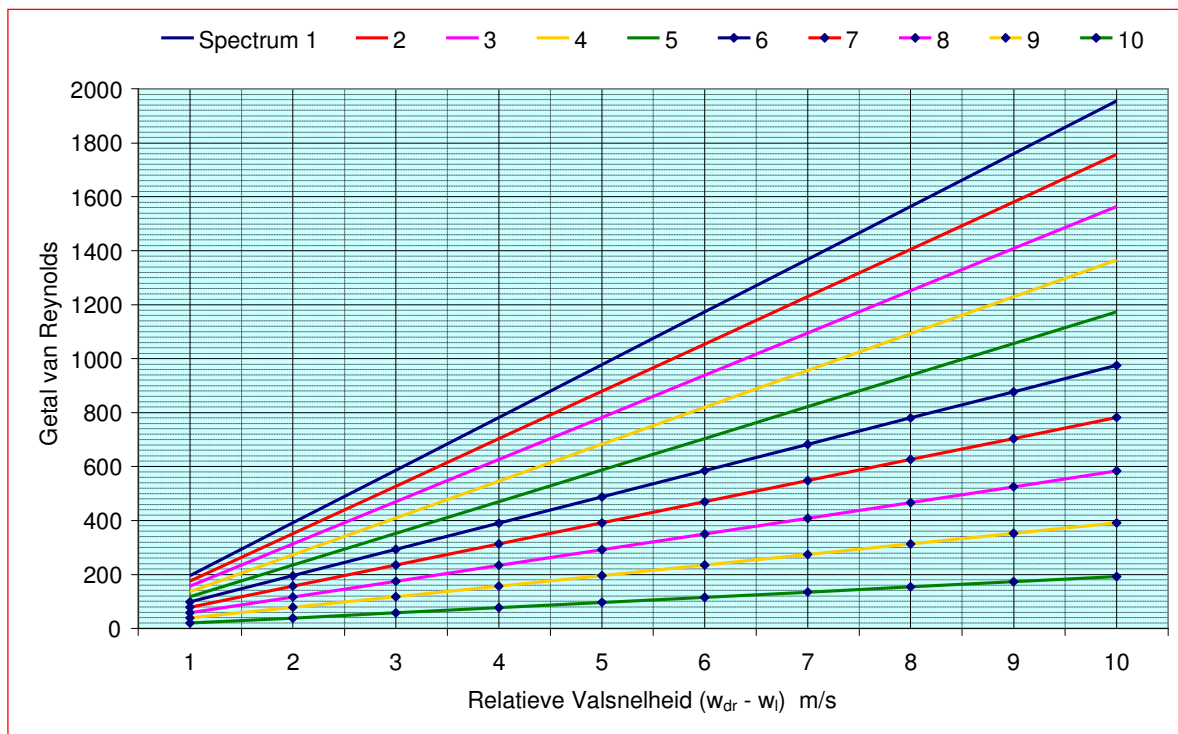
$$Re = \frac{d_{dr} \cdot \rho_l \cdot (w_{dr} - w_l)}{\mu_l}$$

(9.12)

Waarin

Re	=	getal van Reynolds	[-]
d_{dr}	=	druppeldiameter	[m]
ρ_l	=	dichtheid van de lucht	[kg.m ⁻³]
w_{dr}	=	snelheid van de druppel	[m.s ⁻¹]
w_l	=	luchtsnelheid	[m.s ⁻¹]
μ_l	=	dynamische viscositeit lucht	[Pa.s]

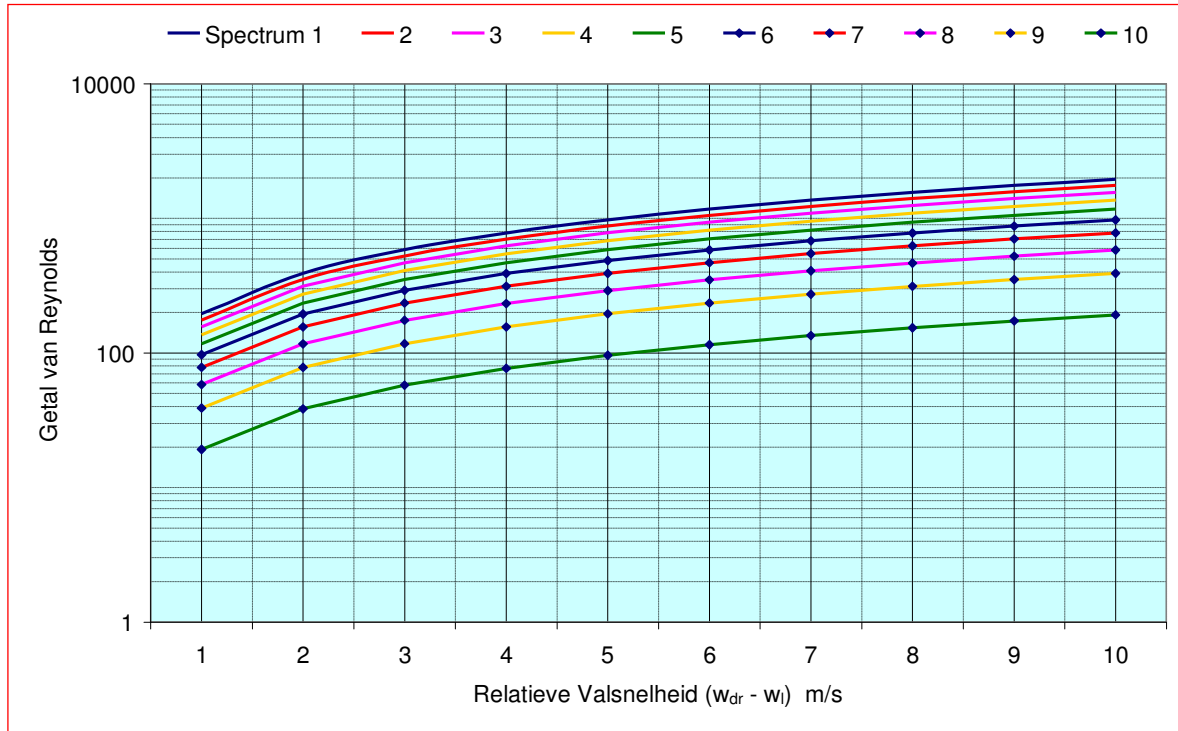
De figuren 9.3 en 9.4 laten de getallen van Reynolds zien bij relatieve druppelsnelheden van 1 tot 10 m.s⁻¹ voor de druppelspectra 1 t/m 10, berekend volgens formule (9.12). De dichtheid van lucht ρ_l bij 20°C is 1,2 kg.m⁻³ en de dynamische viscositeit μ_l is 1,81.10⁻⁵ Pa.s.



Figuur 9.3 – Getal van Reynolds als functie van de relatieve valsnelheid

Laminaire stroming treedt op bij $Re \leq 1$ en turbulente stroming bij $Re \geq 300$ (Hemeon 1999). In het overgangsgebied neemt de turbulentie in het zog van de vallende druppels geleidelijk toe. Er is geen scherpe overgang van laminaire naar turbulente stroming aan te wijzen.

Figuur 9.3 leert dat voor de meest relevante druppelspectra 1 tot 7 –zie hoofdstuk 10 en 11- bij relatieve valsnelheden $\geq 4 \text{ m.s}^{-1}$ overwegend sprake zal zijn van turbulente stroming.



Figuur 9.4 – Getal van Reynolds als functie van de relatieve valsnelheid

De weerstandscoefficiënt C_w wordt uitgedrukt in de formule

$$F_w = 0,5 \rho_l \cdot (w_{dr} - w_l)^2 \cdot C_w \cdot A \quad [N] \quad (9.13)$$

Waarin

- F_w = weerstandskracht [N]
- ρ_l = dichtheid van lucht [kg.m^{-3}]
- w_{dr} = snelheid van de druppel [m.s^{-1}]
- w_l = lichtsnelheid [m.s^{-1}]
- C_w = weerstandscoefficiënt [-]
- A = geprojecteerd druppeloppervlak [m^2]

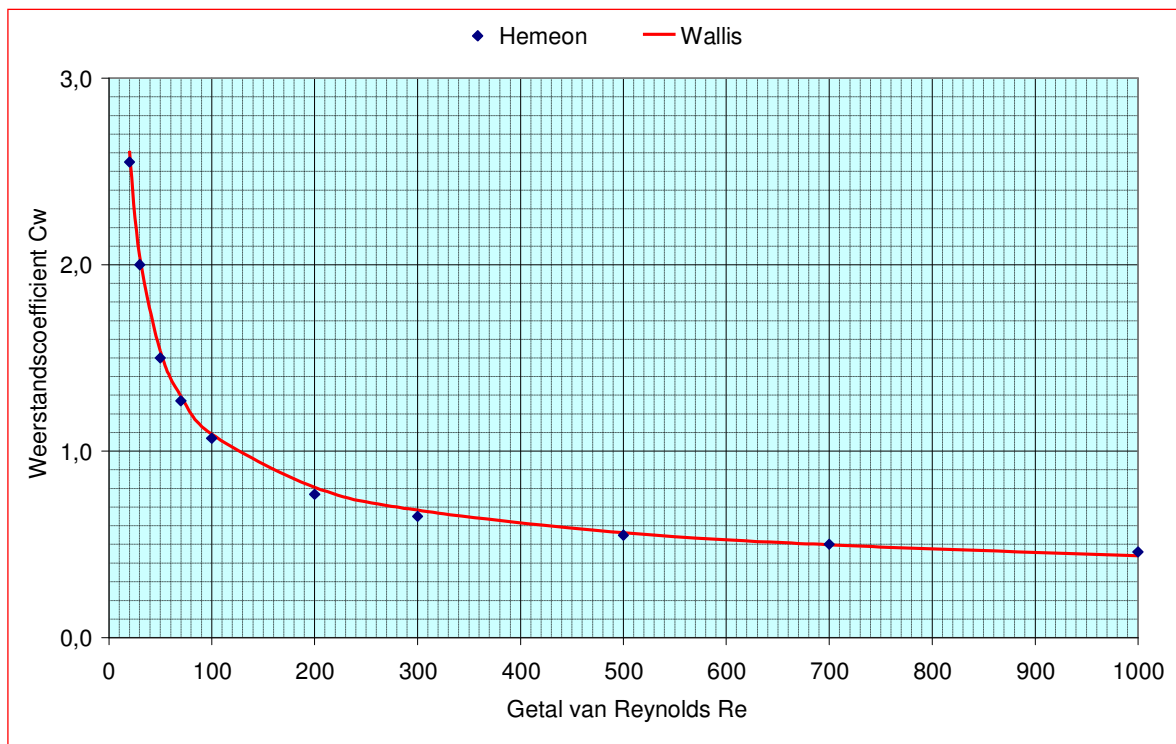
De weerstandscoefficiënt C_w kan worden berekend met de formule van Wallis (1969), ontleend aan Ghosh, S. 1994)

$$C_w = \left(\frac{24}{R_e} \right) \cdot (1 + 0,15 R_e^{0,687}) \quad (9.14)$$

Figuur 9.5 geeft het verloop weer van de weerstandscoefficiënt C_w volgens formule (9.14). In de figuur zijn ook de C_w waarden aangegeven zoals in 1940 empirisch bepaald door Lapple en Shepherd (Hemeon W.C.L. 1999). Beide waarden komen zeer goed overeen⁹.

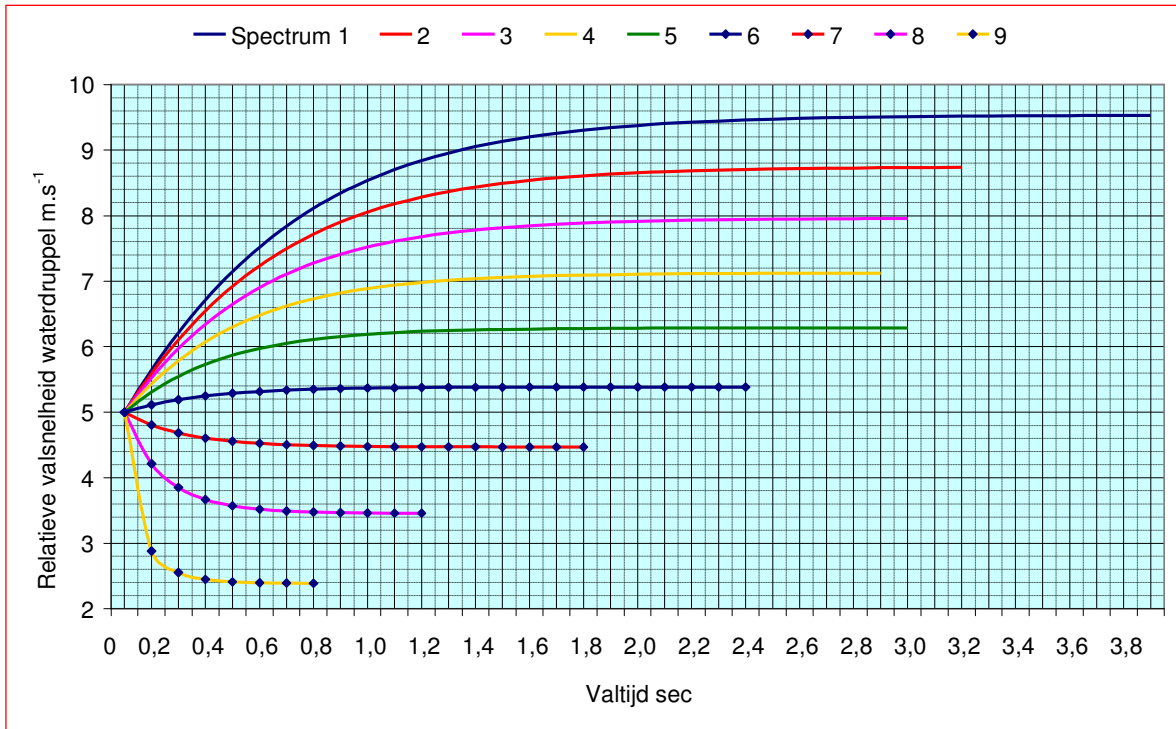
Figuur 9.6 brengt de absolute valsnelheid van waterdruppels met diameters d_{10} volgens de sproeispectra 1 t/m 9 conform tabel 9.4 in beeld. Het betreft hier een voorbeeld waarin de beginsnelheid van de druppels is gesteld op $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. De zwaardere druppels van spectrum 1 met $d_{10} = 2,95 \text{ mm}$ bereiken hierbij hun eindsnelheid van $\approx 9,5 \text{ m/s}$ na $\approx 2,5$ seconde. Lichtere druppels van spectrum 6 met $d_{10} = 1,47 \text{ mm}$ bereiken hun eindsnelheid van $\approx 5,4 \text{ m/s}$ reeds na $\approx 1,0$ seconde.

Figuur 9.7 laat de eindsnelheden van de verschillende spectra voor een beginsnelheid $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Een belangrijke observatie is dat de eindsnelheid onafhankelijk is van de beginsnelheid, hetgeen ook de volgende berekeningen zal blijken.



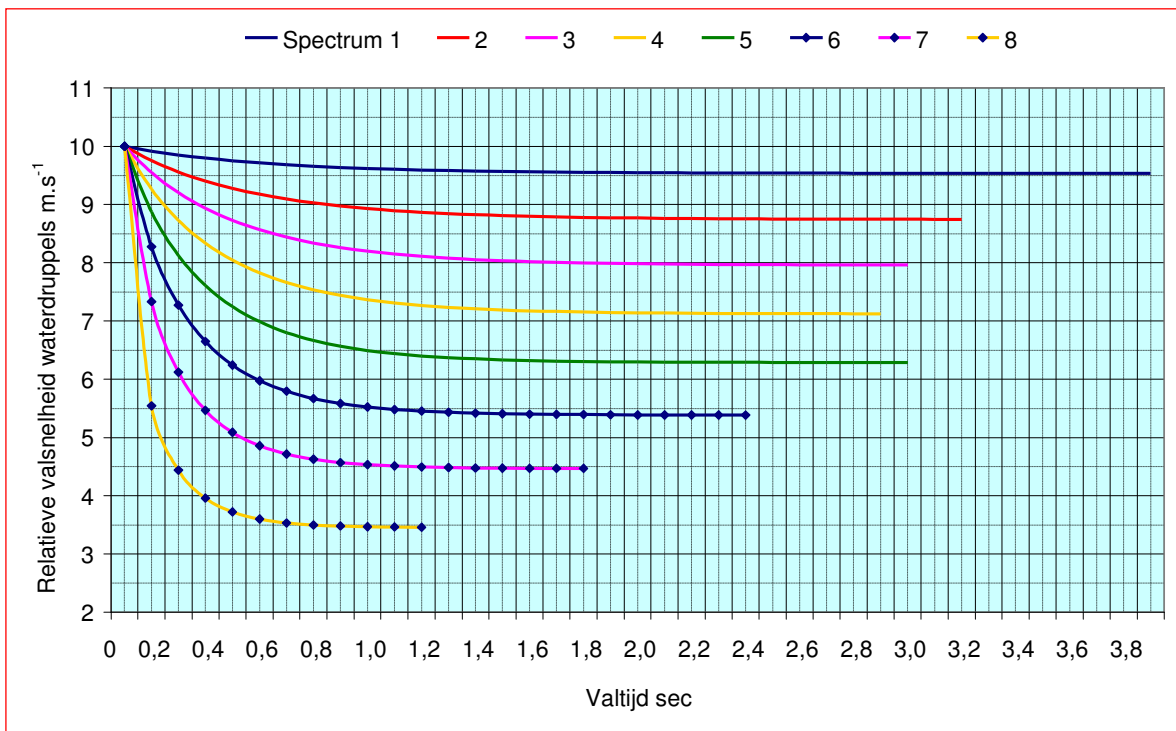
Figuur 9.5 - Weerstandscoefficiënt C_w als functie van getal van Reynolds

⁹ Heeft Wallis gebruik gemaakt van Lapple en Shepherd? De oorspronkelijke publicaties zijn niet op Internet te vinden.



Figuur 9.6 – Snelheidsontwikkeling waterdruppels in Klimaatcascade[®] bij een beginsnelheid van 5 m.s⁻¹

De werkelijke beginsnelheid van de druppels hangt af van het type van de sproeier en de voordruk. Zie hoofdstuk 16.



Figuur 9.7 – Snelheidsontwikkeling waterdruppels in Klimaatcascade[®] bij een beginsnelheid van 10 m.s⁻¹

De eindsnelheid $w_{v,t}$ van een waterdruppel, waarbij de zwaartekracht $m \cdot g$ in evenwicht is met de weerstandskracht F_w wordt gegeven door de formule

$$m \cdot g = F_w = 0,5 \rho_l \cdot (w_{v,t} - w_l)^2 \cdot C_w \cdot A$$

en

$$w_{v,t} = w_l + \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g}{\rho \cdot A_{dr} \cdot C_w}}$$

(9.15)

Waarin

$w_{v,t}$	= eindsnelheid van een druppel	[m.s ⁻¹]
w_l	= luchtsnelheid	[m.s ⁻¹]
m	= massa van de druppel	[kg]
g	= gravitatieversnelling	[m.s ⁻²]
A	= geprojecteerd oppervlak druppel	[m ²]
C_w	= weerstandscoefficiënt	[-]

De weerstandscoefficiënt C_w is volgens formule (9.14) afhankelijk van het getal van Reynolds Re dat op zijn beurt weer afhankelijk is van de druppelsnelheid. Formule (9.15) is daarom iteratief uitgewerkt voor druppelverzamelingen met $d_{10} = 0,5 \dots 3,0$ mm, zie figuur 9.8 waarin de relatieve eindsnelheid is aangegeven gebaseerd op een luchtsnelheid van $2,0 \text{ m.s}^{-1}$ in de Klimaatcascade[©]. De functie kan worden weergegeven door de vergelijking

$$w_{v,t} = 1,7411d_{10} + 0,1623 \quad [\text{m.s}^{-1}]$$

(9.16)

Zoals hier boven reeds opgemerkt is de eindsnelheid van een waterdruppel onafhankelijk van de beginsnelheid. Voor het sproeisysteem betekent dit dat de beginsnelheid laag kan worden gehouden; de zwaartekracht doet dan zijn werk om de eindsnelheid te bereiken. De voordruk bij de sproeiers kan dan ook laag zijn waardoor de pompenergie en het energiegebruik kunnen worden beperkt.

Voor de navolgende berekeningen van de warmteoverdracht in een Klimaatcascade[©] wordt gerekend met gemiddelde druppelsnelheden in de sproeizone. Er wordt hierbij geen grote fout gemaakt als de gemiddelde snelheid gelijk wordt gesteld aan de eindsnelheid. De figuren 9.6 en 9.7 maken duidelijk dat deze voor de fijnere sproeispectra zeer snel wordt bereikt. De grovere sproeispectra met zwaardere druppels komen alleen in aanmerking voor hoge gebouwen met langere valtijden, waardoor het gemiddelde eveneens een redelijk benadering blijft.

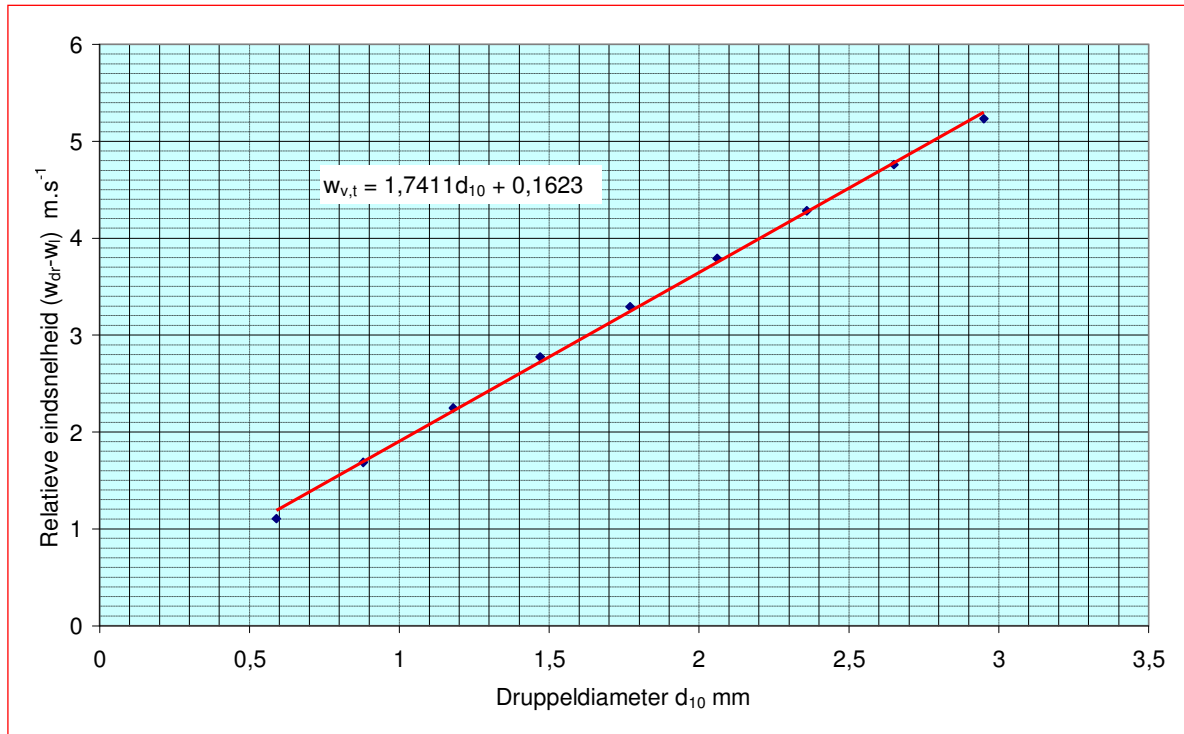
De valsnelheid van druppels in een Klimaatcascade[©] kan worden vergeleken met de valsnelheid van regendruppels, die door verschillende wetenschappers is onderzocht (o.a. Spilhaus, 1948 en Beard 1976). Figuur 9.9 brengt de eindvalsnelheid in beeld voor kleine tot grote druppels, $1 \text{ mm} \leq d_{10} \leq 6 \text{ mm}$ volgens Beard. De eindvalsnelheid als functie van de druppeldiameter d_{10} wordt goed benaderd met de 3^e graads polynoom

$$w_{v,t} = 0,0532d_{10}^3 - 0,8627d_{10}^2 + 4,7842d_{10} - 0,0043$$

(9.17)

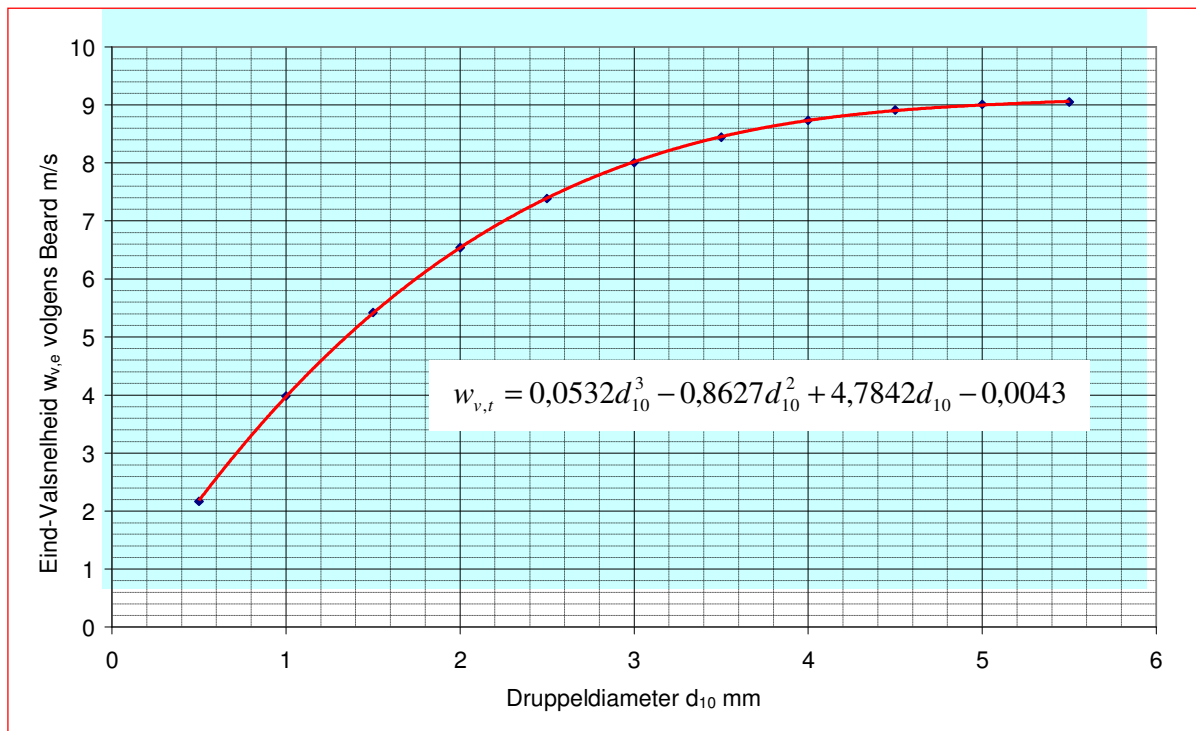
Waarin

$w_{v,t}$	= eindvalsnelheid	[m.s ⁻¹]
d_{10}	= druppeldiameter	[mm]



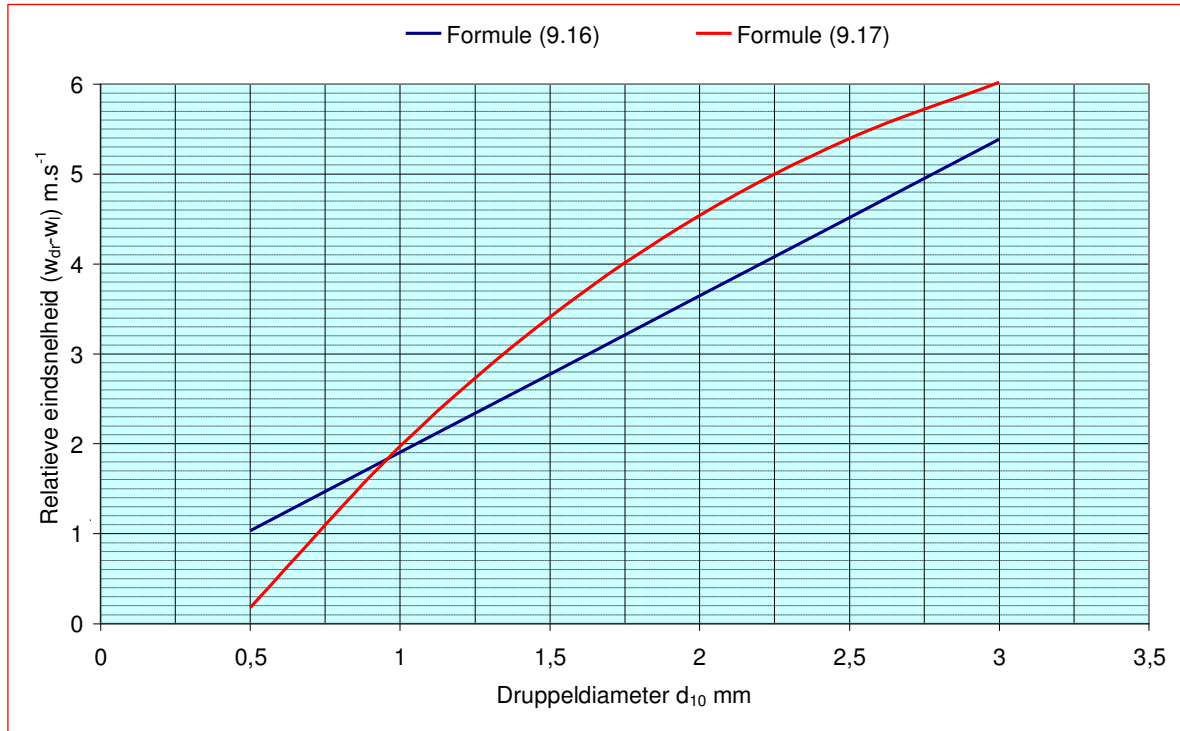
Figuur 9.8 – Relatieve eindsnelheid (w_{dr} - w_l) voor w_l = 2,0 m.s⁻¹

Voor de bepaling van de verblijfstijd van een waterdruppel in een Klimaatcascade[®] is de absolute valsnelheid van belang. Voor de berekening van de warmteovergangscoefficiënt moet worden uitgegaan van de relatieve valsnelheid ten opzicht van de lucht. In de navolgende analyses is voorlopig uitgegaan van een luchtsnelheid van 2,0 m.s⁻¹.



Figuur 9.9 – Eind-Valsnelheid als functie van de diameter van regendruppels volgens Beard

Figuur 9.10 laat de uitwerking zien van formule (9.15) / figuur 9.6 en formule (9.17) / figuur 9.7 in één beeld waardoor ze gemakkelijk kunnen worden vergeleken; de verschillen zijn duidelijk. Voor de navolgende berekeningen van het werkzaam oppervlak en warmteoverdrachtscoëfficiënten in de sproeizone is uitgegaan van formule (9.16).



Figuur 9.10 – Relatieve eindsnelheid ($w_{dr}-w_l$) voor $w_l = 2,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Gezien de vele parameters die de valsnelheid van waterdruppels beïnvloeden en het niet-lineaire karakter van de hierbij betrokken fysische processen is het van groot belang één en ander met behulp van numerieke simulatie en/of in een proefopstelling nader te evalueren.

9.7 Werkzame oppervlak van de druppelverzameling in de sproeizone

Het waterdebiet dat nodig is om de warmteoverdracht tussen lucht naar water te realiseren wordt uitgedrukt in de formule

$$q_{w,v} = \frac{\dot{\Phi}}{c_w (\theta_{uit} - \theta_{in})} \quad (9.18)$$

Waarin

- $q_{w,v}$ = waterdebiet [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$]
- $\dot{\Phi}$ = warmtestroom of thermisch vermogen [$\text{kJ}\cdot\text{s}^{-1} = \text{kW}$]
- c_w = soortelijke warmte van water [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
- θ_{uit} = watertemperatuur uittrede [$^{\circ}\text{C}$]
- θ_m = watertemperatuur intrede [$^{\circ}\text{C}$]

De verzameling van waterdruppels in de sproeizone wordt gekarakteriseerd door de equivalente diameters d_{10} , d_{30} en d_{32} hiervan; zie paragraaf 9.3. Deze zijn voorsnog niet te voorspellen; daarom wordt voor de hierna volgende analyses voorlopig uitgegaan van de gemeten waarden in een tegenstroom koeltoren, die in principe vergelijkbaar is met een Klimaatcascade[©], hoewel laatstgenoemde volgens het gelijkstroom principe werkt (Terblanche, R. e.a. 2009). Deze metingen hebben uitgewezen dat de water/lucht verhouding en de luchtsnelheid weinig invloed hebben op de sproeikarakteristiek.

De equivalente diameters zoals vermeld in paragraaf 9.3 zijn

- $d_{10} = 2,95 \text{ mm}$
- $d_{30} = 4,01 \text{ mm}$
- $d_{32} = 5,14 \text{ mm}$

Het aantal druppels dat per tijdseenheid in de Klimaatcascade[©] wordt gevormd, wordt bepaald door het waterdebiet en de equivalente druppeldiameter d_{30} volgens de formule

$$n = \frac{6q_v}{\pi \cdot (d_{30} \cdot 10^{-2})^3} \quad [\text{s}^{-1}] \quad (9.19)$$

Waarin

$$\begin{aligned} q_{w,v} &= \text{waterdebiet} & [\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \\ n &= \text{aantal druppels} & [\text{s}^{-1}] \end{aligned}$$

Het cumulatieve oppervlak van n druppels met een equivalente diameter d_{32} is

$$A = n \cdot \pi \cdot (d_{32} \cdot 10^{-3})^2 \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (9.20)$$

De valsnelheid van een druppelverzameling met de equivalente druppeldiameter $d_{30} = 4,01 \text{ mm}$ is volgens formule (9.16)

$$w_{v,t} = 1,7411d_{10} + 0,1623 \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (9.21)$$

De gemiddelde verblijfstijd van een druppelverzameling met de equivalente druppeldiameter $d_{30} = 4,0 \text{ mm}$ is

$$t = \frac{H}{w_{v,e}} \quad (9.22)$$

Waarin

$$\begin{aligned} t &= \text{Verblijfstijd} & [\text{s}] \\ H &= \text{Hoogte van de Klimaatcascade}^{\text{©}} & [\text{m}] \\ w_{v,e} &= \text{Valsnelheid} & [\text{ms}^{-1}] \end{aligned}$$

Het aantal druppels dat zich tegelijkertijd in de Klimaatcascade[©] bevindt wordt berekend door vermenigvuldiging van de vergelijkingen (9.14) en (9.17)

$$n = \frac{6q_v}{\pi \cdot (d_{30} \cdot 10^{-2})^3} * \frac{H}{w_{v,e}}$$

(9.23)

Het cumulatieve oppervlak van deze druppelverzameling wordt berekend door combinatie van de vergelijkingen (9.18) en (9.15)

$$A_{dr} = \frac{6q_v}{(d_{30} \cdot 10^{-2})^3} * \frac{H}{w_{v,e}} * (d_{32} \cdot 10^{-3})^2$$

(9.24)

9.8 Vergroting van de werkzame oppervlakte door een fijner sproeipatroon

Als uitgangspunt is de distributieve spectrumverdeling van tabel 9.1 figuur 9.1 genomen; dit is geen fictief, maar een werkelijk gemeten spectrum. In stappen van telkens 10% is de diameter van de druppels verkleind en zijn met het rekenalgoritme van paragraaf 10.3 de equivalente druppeldiameters d_{10} , d_{20} , d_{30} en d_{32} berekend; zie tabel 9.4.

Spectrum>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Diameter	nominaal	0,9*1	0,8*1	0,7*1	0,6*1	0,5*1	0,4*1	0,3*1	0,2*1	0,1*1
d_{10} - mm	2,95	2,65	2,36	2,06	1,77	1,47	1,18	0,88	0,59	0,29
d_{20} - mm	3,55	3,19	2,84	2,48	2,13	1,77	1,42	1,06	0,71	0,35
d_{30} - mm	4,01	3,61	3,21	2,81	2,41	2,01	1,61	1,20	0,80	0,40
d_{32} - mm	5,14	4,62	4,11	3,60	3,08	2,57	2,05	1,54	1,03	0,51

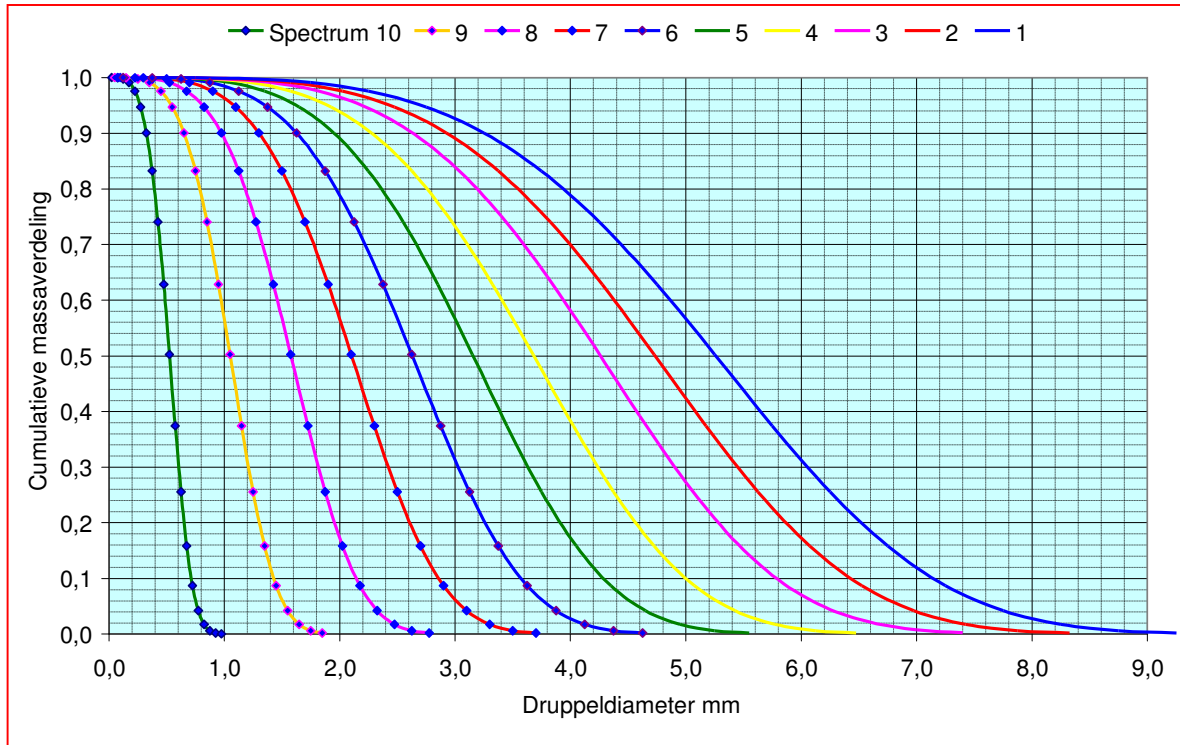
Tabel 9.4 – Equivalente druppeldiameters in verschillende spectra

Figuur 9.10 laat de cumulatieve massaverdeling zien in de verschillende spectra.

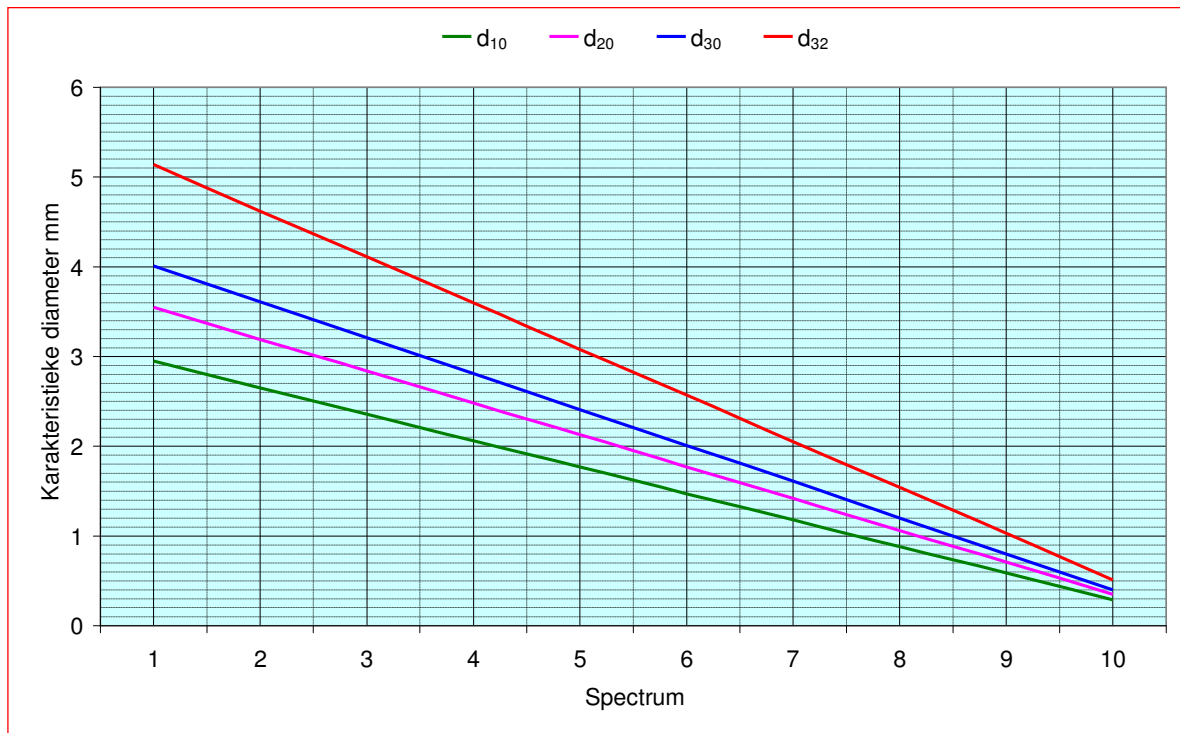
Figuur 9.11 laat de karakteristieke druppeldiameters d_{10} , d_{20} , d_{30} , en d_{32} zien in de verschillende sproeispectra.

Figuur 9.12 geeft de vergroting weer van de warmteovergangscoefficiënt bij gebruik van een fijner sproeipatroon. De warmteovergangscoefficiënt van de wanden blijft hierbij gelijk, maar deze is slechts een kleine fractie van die in de sproeizone. Uitgegaan is van een luchtsnelheid in de Klimaatcascade[®] van 1,5 m.s⁻¹

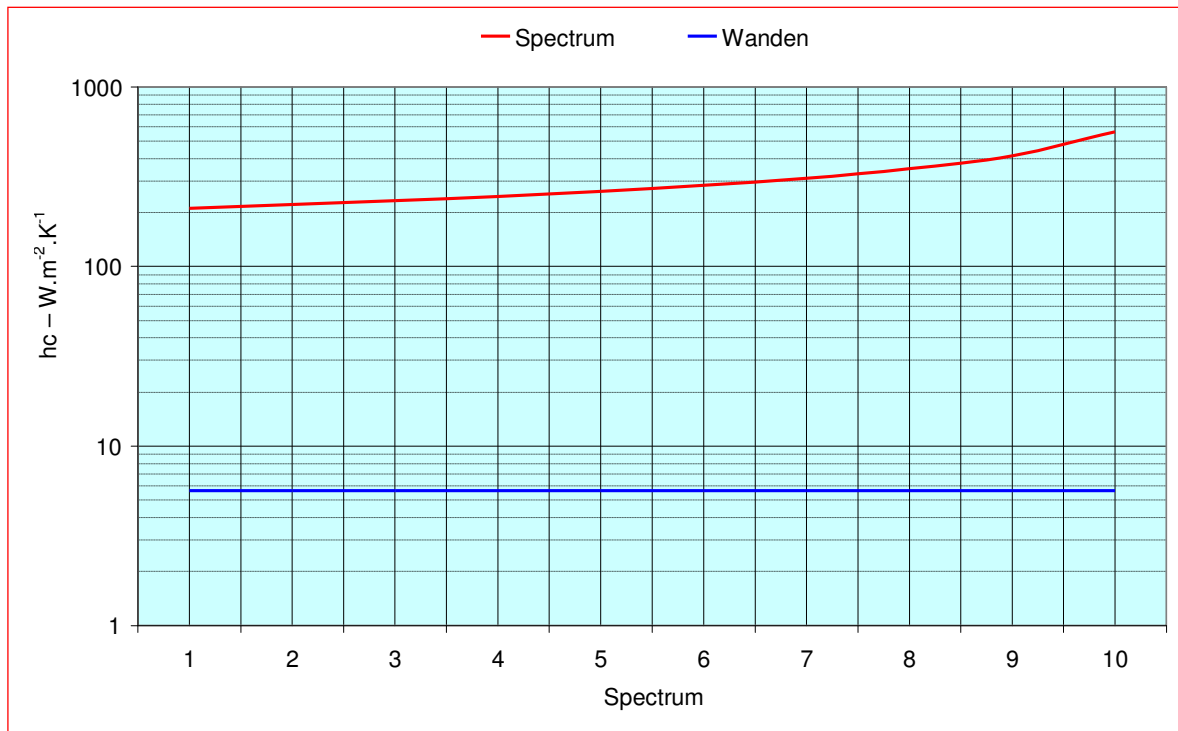
Figuur 9.13 laat de vergroting zien van het werkzame oppervlak van een Klimaatcascade[®] als een fijner sproeispectrum wordt gebruikt. Verkleining van de druppeldiameter is een bijzonder effectief middel om het werkzaam oppervlak te vergroten. Het wandoppervlak speelt een grote rol bij een grover sproeispectrum.



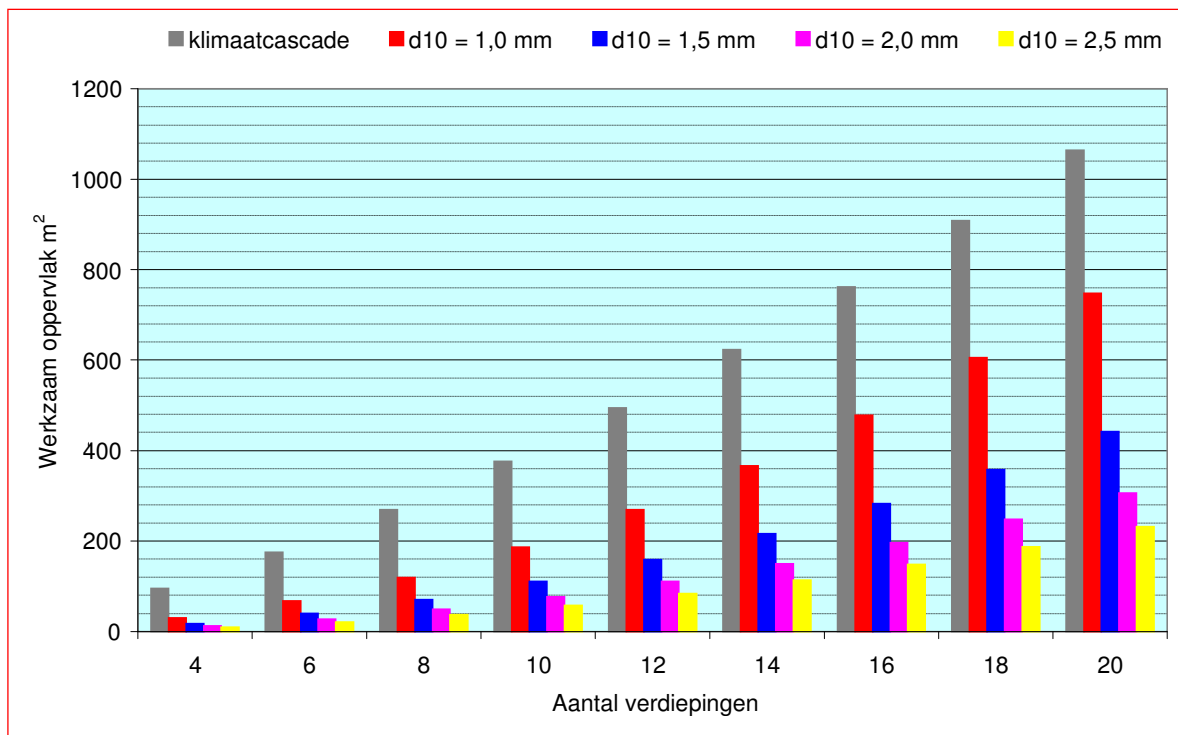
Figuur 9.10 – Cumulatieve massaverdeling in verschillende spectra



Figuur 9.11- Karakteristieke druppeldiameters d_{10} , d_{20} , d_{30} en d_{32} in sproeispectra 1 tot 10



Figuur 9.12 – Warmteoverdrachtscoëfficiënt h_c in de sproeizone als functie van het sproeispectrum



Figuur 9.13 – Werkzaam oppervlak Klimaatcascade[®] als functie van sproeispectrum

9.9 Werkzame oppervlak van de binnenwanden

Uitgaande van een rechthoekige doorsnede met gelijke zijden is het oppervlak van de binnenwanden

$$A_{wnd} = 4 \cdot H \sqrt{\frac{q_{v,l}}{v_l}} \quad (9.25)$$

Waarin

$$\begin{aligned} A_{wnd} &= \text{Wandoppervlak} && [\text{m}^2] \\ q_{v,l} &= \text{Luchtdebiet} && [\text{m}^3 \text{s}^{-1}] \\ H &= \text{Hoogte Klimaatcascade}^{\text{©}} && [\text{m}] \end{aligned}$$

9.10 Warmteovergangscoefficiënt in de sproeizone

De warmteoverdrachtscoëfficiënt door convectie $h_{c,dr}$ in de sproeizone van lucht op waterdruppels is een functie van verschillende variabelen, zoals temperatuur, snelheid van de media, viscositeit, warmtegeleidingscoëfficiënten, turbulente of laminaire stroming en geometrie van de druppels. Voor $h_{c,dr}$ kan de volgende relatie worden gebruikt (El-Morsi 2002, Ranz e.a. 1952):

$$Nu = \frac{h_{c,dr} \cdot d}{\lambda} = 2 + 0,6 Pr^{2/3} \cdot Re^{1/2} \quad (9.26)$$

Waarin

$$\begin{aligned} Nu &= \text{Getal van Nusselt} && [-] \\ h_{c,dr} &= \text{warmteoverdrachtscoëfficiënt} && [\text{Wm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \\ d &= \text{diameter waterdruppel} && [\text{m}] \\ \lambda &= \text{warmtegeleidingscoëfficiënt} && [\text{Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \\ Pr &= \text{Getal van Prandl} && [-] \\ Re &= \text{Getal van Reynolds} && [-] \end{aligned}$$

$$Pr = \frac{v}{a} = \frac{v}{\lambda} \rho \cdot c_p = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} \quad [-] \quad (9.27)$$

Waarin

$$\begin{aligned} v &= \text{kinematische viscositeit} && [\text{m}^2 \text{s}^{-1}] \\ \rho &= \text{dichtheid van de lucht} && [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \\ c_p &= \text{specifieke warmtecapaciteit} && [\text{Jkg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \\ \eta &= \text{dynamische viscositeit} && [] \end{aligned}$$

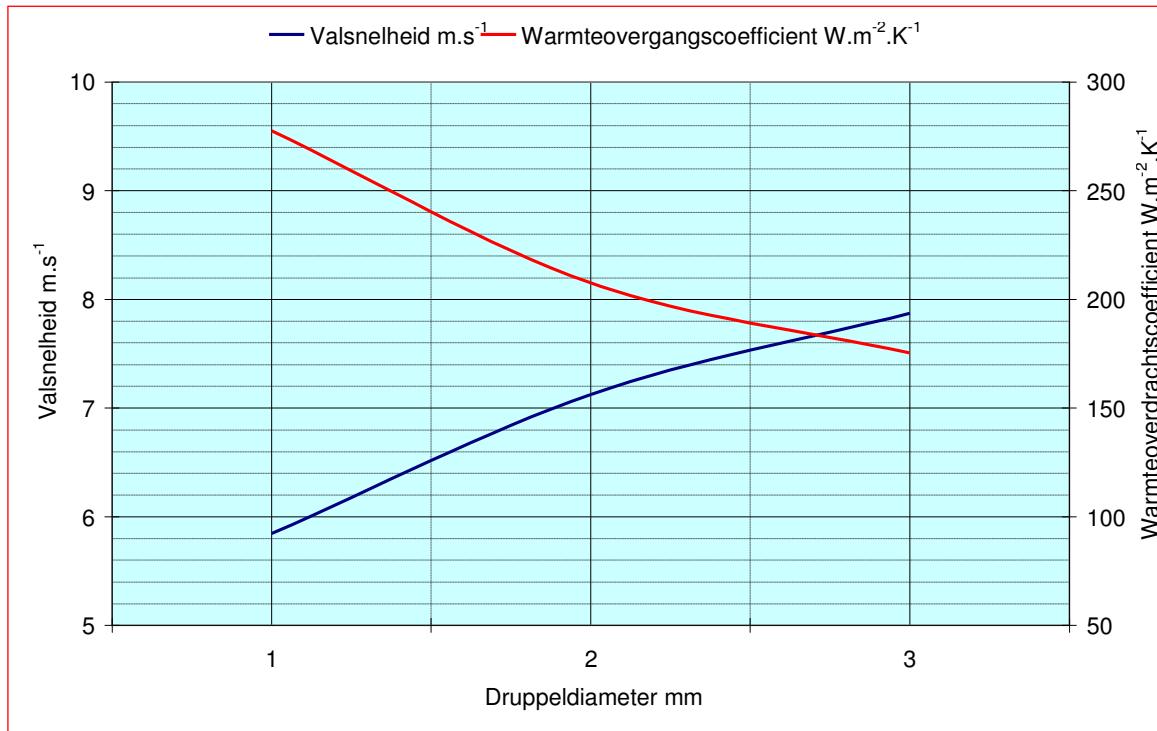
Pr is voor lucht in het temperatuurbereik van $20^\circ\text{C} \dots 40^\circ\text{C} \approx 0,71$

$$Re = \frac{(w_\infty - w_d) \cdot d}{v} = \frac{(w_\infty - w_d) \cdot d \cdot \rho_l}{\eta} \quad [-] \quad (9.28)$$

Waarin

$$\begin{aligned} w_\infty &= \text{snelheid van de lucht} && [\text{m/s}] \\ w_d &= \text{snelheid van de waterdruppel} && [\text{m/s}] \end{aligned}$$

De relatieve luchtsnelheid ($w_\infty - w_d$) van een waterdruppel ten opzichte van de lucht is in hoge mate afhankelijk van de druppeldiameter d ; zie paragraaf 9.5. In figuur 9.14 zijn de relatieve valsnelheden van waterdruppels met een diameter van 1–3 mm aangegeven alsmede de met formule (9.11) berekende warmteovergangscoefficiënten. Figuur 9.12 laat de warmteovergangscoefficiënt zien als functie van het sproeispectrum.



Figuur 9.14 – Valsnelheid druppels en warmtedrachtscoëfficiënt lucht/water als functie van diameter

9.11 Het sproeispectrum

Het benodigde sproeispectrum wordt in de eerste plaats gedicteerd door de benodigde koelprestatie. In hogere gebouwen met een langere contacttijd tussen water en lucht kan in principe met een grover sproeispectrum worden gewerkt; zie hoofdstuk 10 en 11.

Enkele algemene observaties geven aan dat de warmteoverdracht in een Klimaatcascade[®] is evenredig met:

- De warmteovergangcoëfficiënt tussen water en lucht; deze neemt toe bij een fijner sproeispectrum met kleinere druppels –zie figuur 9.14.
- Het werkzaam oppervlak van de druppelverzameling; volgens vergelijking (9.19) is dit oppervlak omgekeerd evenredig met de gemiddelde druppeldiameter op volume VMD of d_{30} – een fijner sproeispectrum geeft dus een groter werkzaam oppervlak –zie ook figuur 9.13.
- De verblijfstijd van een druppel in de cascade; deze neemt toe bij kleinere druppels met een lagere valsnelheid en is dus eveneens omgekeerd evenredig met de gemiddelde druppeldiameter op volume VMD of d_{30} .

Om een zo groot mogelijke warmteoverdracht te realiseren zou dus gekozen moeten worden voor een zo fijn mogelijk sproeispectrum. Een fijner sproeispectrum heeft echter ook nadelen, te weten:

- De vereiste voordruk bij de sproeier neemt toe waardoor het pompvermogen en het inherente energiegebruik stijgen.
- Kleinere druppels kunnen zich als aerosolen gaan gedragen en met de ventilatielucht worden meegevoerd, hetgeen ongewenst is.
- Door de lagere valsnelheid van kleinere druppels zal de aerodynamische trek minder zijn dan bij grotere druppels zie hoofdstuk 13.
- De kleine gaatjes in de hiervoor benodigde sproeiërs zijn gevoelig voor verstopping, waardoor de potentiële onderhoudskosten kunnen stijgen.

De keuze van het sproeispectrum is dus altijd een compromis. Paragraaf 15.3 gaat verder op dit aspect in.

9.12 Stofoverdrachtscoëfficiënt in de sproeizone

Voor de stofoverdrachtscoëfficiënt K_{dr} van waterdamp op waterdruppels in de sproeizone kan de volgende relatie worden gebruikt (El-Morsi 2002, Ranz e.a.1952):

$$Sh = \frac{K_{dr} \cdot d}{ID} = 2 + 0,6Sc^{1/3} \cdot Re^{1/2}$$

(9.29)

Waarin

Sh	=	Getal van Sherwood	[-]
K_{dr}	=	stofoverdrachtscoëfficiënt	[m/s]
d	=	diameter waterdruppel	[m]
ID	=	diffusiecoëfficiënt waterdamp	[m ² /s]
Sc	=	Getal van Schmidt	[-]
Re	=	Getal van Reynolds – zie (10.13)	[-]

$$Sc = \frac{\nu}{ID}$$

(9.30)

Waarin

ν	=	kinematische viscositeit	[m ² .s ⁻¹]
-------	---	--------------------------	------------------------------------

De diffusiecoëfficiënt van waterdamp in lucht kan worden benaderd met de formule (ASHRAE Handbook Fundamentals 2001 Chapter 5.2):

$$ID = \frac{0,926}{p} \left(\frac{T^{2,5}}{T + 245} \right) \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$$

(9.31)

Waarin

p	=	druk	[kPa]
T	=	temperatuur	[K]

Bij een luchttemperatuur van 25^oC (298 K) en een druk van 101,325 kPa wordt de diffusiecoëfficiënt berekend op

$$ID = \frac{0,926}{101,325} \left(\frac{298^{2,5}}{298 + 245} \right) \cdot 10^{-6} = 25,8 \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$$

Het Handboek Installatietechniek geeft voor Sc een waarde van 0,63 bij een temperatuur van 20^oC.

De kinematische viscositeit van lucht bij 20^oC is $\nu = 15,35 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ en bij 25^oC $\nu \approx 15,82 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, waardoor de waarde van Sc omhoog gaat naar 0,65.

De diffusiecoëfficiënt van waterdamp kan ook met behulp van deze gegevens en formule (10.25) worden berekend

$$ID = \frac{\nu}{Sc} = \frac{15,82 \cdot 10^{-6}}{0,65} = 24,34 \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$$

Deze waarde komt goed overeen met de berekening volgens formule (9.16).

Het getal van Sherwood volgens formule (9.14) kan met $Sc = 0,65$ worden berekend:

$$Sh = 2 + 0,6 \cdot 0,65^{1/3} \cdot Re^{1/2} = 2 + 0,52 \cdot Re^{1/2}$$

Met een gemiddelde waarde van $ID = 25 \cdot 10^{-6}$ wordt dan de stofoverdrachtscoëfficiënt K_{dr} in de sproeizone berekend met de formule

$$K_{dr} = \frac{Sh \cdot ID}{d} = \frac{(2 + 0,52 Re^{1/2}) \cdot 25 \cdot 10^{-6}}{d} = \frac{(50 + 13 Re^{1/2}) \cdot 10^{-6}}{d}$$

(9.32)

9.13 Warmteovergangscoefficiënt wanden en lucht

Een deel van het gekoelde water dat door het sproeisysteem aan de Klimaatcascade[®] wordt toegevoerd valt op de wanden waardoor deze worden gekoeld en deel gaan uitmaken van het warmtewisselend oppervlak.

Ten gevolge van temperatuurverschillen tussen wanden en lucht ontstaan vrije convectiestromingen. De convectieve warmteoverdracht wordt versterkt door een gedwongen convectiestroming als gevolg van een geforceerde luchtbeving langs de wanden. Deze luchtbeving ontstaat door de drijvende krachten van overdruk in de overdrukkamer, aerodynamische trek, en benedenwaartse thermische trek; zie hoofdstuk 13.

De warmteovergangscoefficiënten door vrije convectie is een functie van de kengetallen van Reynolds, Nusselt, Raleigh en Prandl, de warmtegeleidingscoëfficiënt, de kinematische viscositeit van lucht en de hoogte van het verticale vlak.

De warmteovergangscoefficiënten door gedwongen convectie is een functie van de kengetallen van Reynolds en Prandl, de lichtsnelheid, de hydraulische diameter en de lengte van het kanaal.

Als vrije convectie en gedwongen convectie tegelijk optreden is sprake van gemengde convectie. Hiervoor zijn in hoofdstuk 8 van deelrapport (I) "Onderzoek Zonneschoorsteen" verschillende benaderingsformules afgeleid, die echter geen eenduidig beeld geven. Bovendien zijn er grote fysische verschillen tussen een Klimaatcascade[®] en een Zonneschoorsteen.

- In een Klimaatcascade[®] zijn de temperatuurverschillen aanzienlijk kleiner dan in een Zonneschoorsteen en spelen daarom naar alle waarschijnlijkheid bij de warmteoverdracht geen rol van betekenis.
- In een Klimaatcascade[®] is de turbulentie-intensiteit in de luchtstroom, veroorzaakt door de vallende waterdruppels, waarschijnlijk veel groter dan in een Zonneschoorsteen met als gevolg een grotere warmteoverdrachtscoëfficiënt.

Een empirische afgeleide betrekking voor de Zonneschoorsteen luidt - zie formule (8.24/2) uit deelrapport (I)

$$h_{c,m} = \left\langle \left[5(\theta_w - \theta_\infty)^{0,5} \right]^2 + \left[10w^{1,5} \right]^2 \right\rangle^{1/2}$$

(9.33/1)

Waarin

$$h_{c,m} = \text{warmteovergangscoefficiënt gemengde convectie} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

$$\begin{aligned} w &= \text{luchtsnelheid} && [\text{m.s}^{-1}] \\ \theta_w &= \text{temperatuur wandoppervlak} && [^{\circ}\text{C}] \\ \theta_{\infty} &= \text{temperatuur in de luchtstroom} && [^{\circ}\text{C}] \end{aligned}$$

Als het temperatuurverschil ($\theta_w - \theta_{\infty}$) verwaarloosbaar is gaat deze formule over in

$$\boxed{h_{c,m} = 10w^{1,5}} \quad (9.33/2)$$

Bij luchtsnelheden van 1,5.....2,5 m.s⁻² wordt dan een warmteoverdrachtscoëfficiënt berekend van $h_{c,m} = 18,4.....39,5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, gevoelsmatig toch wel hoge waarden.

Een eenvoudiger betrekking voor $w \geq 1,5 \text{ m.s}^{-1}$ uit deelrapport (I) luidt

$$\boxed{h_{c,m} = 7,65w} \quad (9.33/3)$$

Bij luchtsnelheden van 1,5.....2,5 m.s⁻² wordt de warmteoverdrachtscoëfficiënt $h_{c,m} = 11,5.....19,1 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, gevoelsmatig meer realistische waarden. Voor het bepalen van de warmteoverdracht aan de wanden van de Klimaatcascade[®] wordt in de navolgende analyses van formule (9.33/3) gebruik gemaakt.

Dat het hier, in tegenstelling tot een zonneschoorsteen, om een nat vlak gaat speelt kennelijk geen rol. De warmteweerstand van een dunne waterfilm is immers verwaarloosbaar klein. Dit wordt bevestigd door globaal literatuuronderzoek op het gebied van warmteoverdracht in verdamperen en condensoren (Kandlikar, S.G.)

De wandtemperatuur θ_{wnd} is mede afhankelijk van de uitvoering van de Klimaatcascade[®]. Bij een transparante uitvoering in glas vindt er tevens warmte-uitwisseling plaats met de omgeving. Bij een visueel gesloten uitvoering wordt de Klimaatcascade[®] in principe geïsoleerd en is het proces van warmteoverdracht adiabatisch.

9.14 Stofoverdrachtscoëfficiënt wanden en lucht

Tussen stof- en warmteoverdracht bestaat voor niet te kleine Re-waarden een analogie, uitgedrukt in de formule (Handboek Installatietechniek):

$$\boxed{Nu.(Re)^{-1}.(Pr)^{1/3} = Sh.(Re)^{-1}.(Sc)^{1/3}} \quad (9.34)$$

Hieruit volgt voor de stofoverdrachtscoëfficiënt K_w

$$\boxed{K_w = \frac{h_c}{\rho.c_p} \left[\frac{Pr}{Sc} \right]^{2/3}} \quad (9.35)$$

Waarin

$$\begin{aligned} K_w &= \text{stofoverdrachtscoëfficiënt op wand} && [\text{m.s}^{-1}] \\ h_c &= \text{convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt} && [\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}] \\ \rho &= \text{dichtheid van de lucht} && [\text{kg.m}^{-3}] \\ c_p &= \text{soortelijke warmte van de lucht} && [\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}] \end{aligned}$$

$Pr =$ getal van Prandtl: $v/a = 0,71$ bij 20°C [-]
 $Sc =$ getal van Schmidt: $v/ID = 0,65$ bij $\approx 25^{\circ}\text{C}$ [-] zie paragraaf 9.11

Het getal van Prandtl wordt uitgedrukt in de formule

$$\Pr = \frac{\nu}{a} \quad (9.36)$$

Waarin

$\nu =$ kinematische viscositeit $[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
 $a =$ temperatuurvereffeningscoëfficiënt $[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$

De temperatuurvereffeningscoëfficiënt volgt uit

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (9.37)$$

Waarin

$\lambda =$ warmtegeleidingscoëfficiënt $[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ voor lucht bij 20°C : $\lambda = 0,026$
 $\rho =$ dichtheid $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ $\rho = 1,2$
 $c_p =$ soortelijke warmte $[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ $c_p = 1010$

Voor lucht van 20°C is de temperatuurvereffeningscoëfficiënt

$$a = \frac{0,026}{1,2 \cdot 1010} = 21,45 \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$$

Waaruit volgt

$$\Pr = \frac{15,35 \cdot 10^{-6}}{21,45 \cdot 10^{-6}} = 0,71$$

De stofoverdrachtscoëfficiënt wordt dan berekend

$$K = \frac{h_c}{1,2 \cdot 1010} \cdot \left[\frac{0,71}{0,65} \right]^{2/3}$$

Voor lucht van 20°C geldt

$$K = 0,875 \cdot 10^{-3} \cdot h_c \quad (9.38)$$

Voor het bepalen van het warmte-effect door condensatie en verdamping aan de wanden van de Klimaatcascade[©] wordt in de navolgende analyses van formule (9.38) gebruik gemaakt.

Earth, Wind & Fire – Airconditioning zonder Ventilatoren
(III) Onderzoek Geo-Klimaatconcept[®]

10. ANALYTISCH REKENMODEL KLIMAATCASCADE[®]

10.1 Inleiding en Samenvatting

Het warmte- en massatransport in een Klimaatcascade[®] is een gecompliceerd proces waarin vele, vaak onderling gerelateerde variabelen een rol spelen.

Een unieke eigenschap van een Klimaatcascade[®] is verder dat het werkzame oppervlak geen vaste waarde is, zoals bij traditionele warmtewisselaars. Door het variëren van het sproeispectrum kan het warmtewisselend oppervlak worden vergroot of verkleind, waardoor bij een gelijke koelprestatie het debiet en het temperatuurtraject van het koelwater kunnen worden beïnvloed.

Om een energetisch zo gunstig mogelijk ontwerp en dimensionering van een Klimaatcascade[®] mogelijk te maken is het noodzakelijk over een rekenmodel te kunnen beschikken, met behulp waarvan het ontwerp kan worden geoptimaliseerd.

Dr. ir. Wim van der Spoel en dr. Regina Bokel, beide van TU Delft, hebben gezamenlijk een analytisch rekenmodel ontwikkeld voor het warmte- en massatransport in een Klimaatcascade[®]. Vanuit twee invalshoeken benaderd, respectievelijk op basis van fysische beschouwing en op basis van differentiaalvergelijkingen van de warmte- en massabalans is een elegant en werkbaar model tot stand gekomen. Dr.ing. Marija Trcka van TU Eindhoven is hierbij als *reviewer* opgetreden.

Een beschrijving van de alfaversie van het rekenmodel volgt hierna. Een bètaversie in MS-EXCEL is gebruikt voor de berekeningen in hoofdstuk 11 en voor het optimaliseren van het ontwerp voor het testmodel van de Klimaatcascade[®]. Om varianten gemakkelijk door te kunnen rekenen zijn in deze bètaversie de volgende verfijningen aangebracht:

- De uniforme druppeldiameters zijn vervangen door de distributieve massaverdeling van druppeldiameters in de sproeispectra volgens tabel 9.2 van hoofdstuk 9
- Het aantal waterdruppels is berekend met behulp van de Volume Mean Diameter $D[3,0]$ –zie paragraaf 9.3
- Het totale actieve oppervlak van de druppels is berekend met behulp van de Sauter Mean Diameter $D[3,2]$ – zie paragraaf 9.3.
- Om de berekeningen te vergemakkelijken is de water/luchtverhouding R_{WL} ingevoerd –zie hoofdstuk 8.
- In het rekenmodel is het aantal verdiepingen ($n_{\text{verdieping}}$), het netto vloeroppervlak per verdieping (NVO/verd) en het specifieke ventilatievoud (q_{vent}) toegevoegd

Belangrijke effecten, die een wezenlijke invloed kunnen hebben op de warmte- en stofoverdracht in een Klimaatcascade[®] zijn in de bètaversie nog niet uitgewerkt, zoals:

- De ontwikkeling van het sproeispectrum bij de val van de waterdruppels, waarbij door verschillen in valsnelheid druppels kunnen coaguleren of uiteenvallen.
- Het percentage van het waterdebiet dat op de wanden van de Klimaatcascade[®] terechtkomt, en niet deelneemt aan het proces van warmte- en stofoverdracht in het sproeispectrum.
- De invloed van de variërende valsnelheid van waterdruppels tussen beginsnelheid en eindsnelheid –zie figuur 9.6 en 9.7 in hoofdstuk 9.

Naast de in hoofdstuk 11 gepresenteerde simulaties met behulp van het analytisch rekenmodel zijn ook CFD simulaties gemaakt –zie hoofdstuk 16. Alle simulaties zijn geverifieerd, gevalideerd en gekalibreerd in een fysieke testopstelling –zie hoofdstuk 17. Op basis hiervan zal de bètaversie van het rekenmodel zo nodig worden aangepast.

10.2 Model voor warmte- en massatransport

10.2.1 Definities

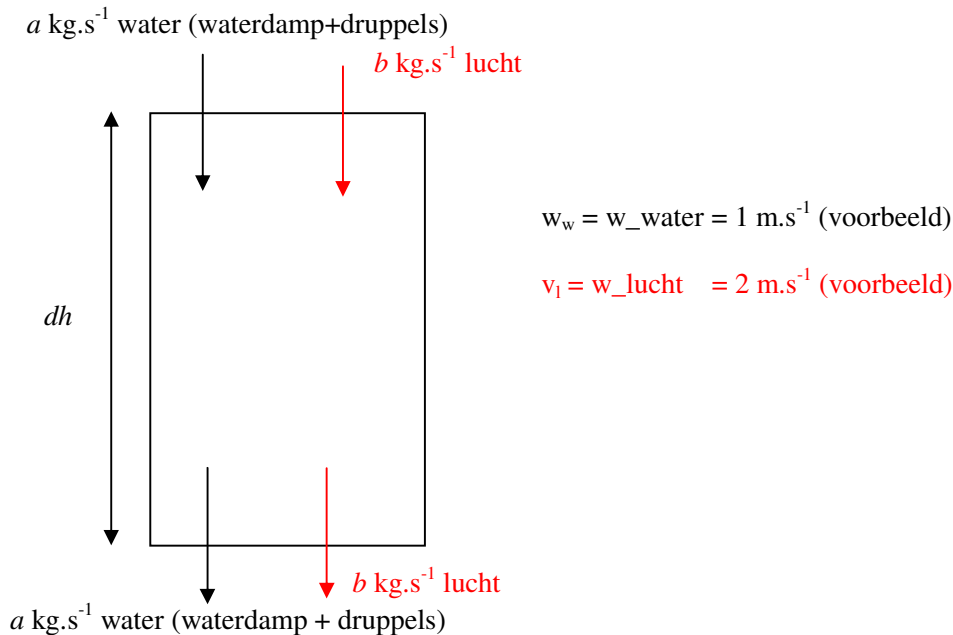
Bovenin de Klimaatcascade[©] komt water met een massastroomdichtheid van $q_w \text{ kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ met een temperatuur T_w . Ook komt bovenin binnen een massastroomdichtheid lucht van $q_l \text{ kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ met een temperatuur T_l . In de lucht zit een hoeveelheid waterdamp met een temperatuur T_l . De binnenkomende lucht heeft een relatieve luchtvochtigheid $\varphi_{in} \%$.

10.2.2 Wat willen we weten?

We willen graag weten wat de uitgaande watertemperatuur, de uitgaande luchttemperatuur, de relatieve luchtvochtigheid van de uitgaande lucht en de hoeveelheid overgebleven water onder de Klimaatcascade[©] is als we bij een bepaald luchtdebiet, met gegeven temperatuur en luchtvochtigheid, een hoeveelheid water toevoegen met bekende temperatuur. Voor een eerste berekening kiezen we voor een *vaste valsnelheid* van het water en een *vast luchtdebiet* in de Klimaatcascade[©].

10.2.3 Tijdafhankelijkheid of hoogteafhankelijkheid?

Bij het kijken naar het effect van de hoogte geeft het volgende plaatje aan wat er gebeurt:



Bij het kiezen van een arbitraire hoeveelheid luchtdeeltjes en een arbitraire hoeveelheid waterdeeltjes is het bij de Klimaatcascade[©] zo dat er boven net zoveel deeltjes in een hoogte gebiedje dh inkomen als er onder weer uitgaan. Deze situatie is hetzelfde op elk tijdstip, om 9 uur 's ochtends of om 3 uur 's middags. Kortom, er is *geen tijdafhankelijkheid* in deze situatie. Wel is er een *hoogteafhankelijkheid*, want bovenin het hoogtegebiedje dh is de temperatuur van het inkomende water en de temperatuur van de inkomende lucht anders dan onderin het hoogtegebiedje.

10.2.4 Modelvorming

Ten behoeve van de modelvorming zijn twee verschillende methoden gehanteerd, die hierna worden toegelicht.

In de eerste methode worden op basis van een beschouwing van de fysische processen in een hoogtegebiedje dh de gediscretiseerde vergelijkingen bepaald. Deze methode is uitgewerkt door dr. Regina Bokel.

In de tweede methode wordt uitgegaan van de differentiaalvergelijkingen voor warmte- en massatransport, waarna vervolgens de gediscretiseerde differentievergelijkingen daaruit worden afgeleid. Deze methode is uitgewerkt door dr.ir Wim van der Spoel
 Beide methoden leiden uiteindelijk tot exact dezelfde gediscretiseerde differentievergelijkingen.

10.2.5 Aannamen

De belangrijkste aannamen en vereenvoudigingen die in het model voor de Klimaatcascade[®] worden gemaakt zijn:

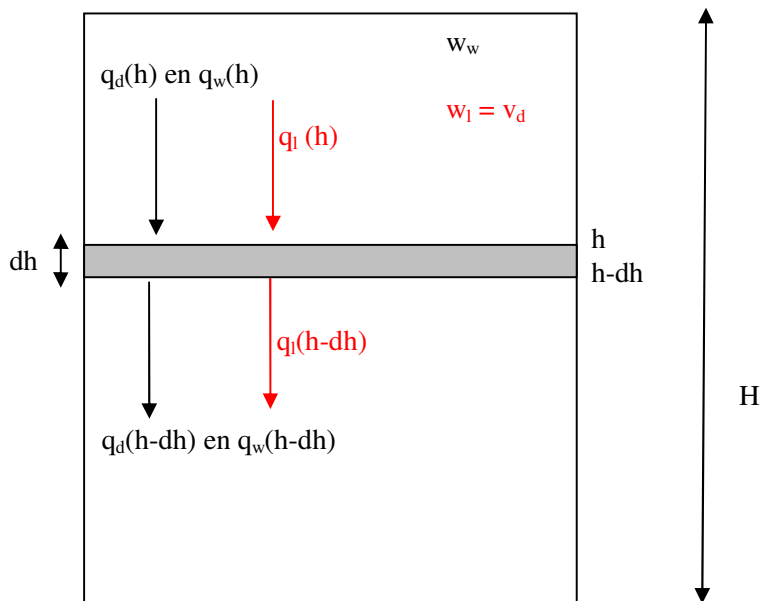
- Constante luchtdichtheid. In werkelijkheid is de dichtheid van de lucht afhankelijk van de luchttemperatuur.
- Constante massa- en warmteoverdrachtcoëfficiënten.
- Aanname van ronde waterdruppels ten behoeve van bepaling wateroppervlakte.
- Geen plaatsafhankelijkheid van temperatuur *in* een waterdruppel
- Constante valsnelheid van de waterdruppels
- Waterdruppels hebben geen interactie met elkaar

Voor de aannamen wat betreft de invloed van de wanden wordt verwezen naar de paragraaf 10.6.

10.3 Methode 1: massa- en warmtebalans op basis van fysische beschouwing

10.3.1 Beschouwing

Beschouwd wordt een hoogtegebiedje dh in de Klimaatcascade[®] op hoogte h :



Op hoogte h is er in het gebiedje tussen h en $(h - dh)$ een massahoeveelheid van:
 water:

$$m_w(h) = A \frac{q_w(h)}{w_w} dh$$

(10.1)

waterdamp:

$$m_d(h) = A \frac{q_d(h)}{w_d} dh$$

(10.2)

lucht:

$$m_l(h) = A \frac{q_l(h)}{w_l} dh$$

(10.3)

A is het bovenoppervlak van de Klimaatcascade[©]. De waarden van de grootheden in bovenstaande vergelijkingen zijn bekend op hoogte H.

10.3.2 Transportvergelijkingen voor water

▪ Massa

Massavergelijking voor water onder de aanname dat $w_w = \text{constant}$:

Om de massavergelijking voor water op te stellen kijken we naar het verschil in hoeveelheid water op hoogtes h en $h-dh$

Op hoogte $h-dh$ komt er aan massa uit:

▪ Water

$$m_w(h-dh) = A \frac{q_w(h-dh)}{w_w} dh$$

(10.4)

Waardoor het verschil in massa over de hoogte dh gelijk is aan

$$\frac{dm_w(h)}{dh} = A \left(\frac{q_w(h)}{w_w} - \frac{q_w(h-dh)}{w_w} \right) = \frac{(m_w(h) - m_w(h-dh))}{dh}$$

(10.5)

Deze verandering in hoeveelheid water wordt veroorzaakt door verdamping of condensatie van het water. De verdampings- of condensatiesnelheid kan worden uitgerekend door gelijkstellen van het verschil in massastroom $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ over dh aan de hoeveelheid water die verdampt of condenseert.

$$\frac{dm_w(h)}{dt} = A(q_w(h) - q_w(h-dh)) = \frac{dm_{d \rightarrow w}(h)}{dt}$$

(10.6)

▪ Enthalpie

De verandering in energiestroom dQ_w over de hoogte dh is gelijk aan het verschil in energiestroom van de waterstroom tussen h en $h-dh$. Dit verschil in energiestroom wordt veroorzaakt door de latente energiestroom die vrijkomt bij de overgang van waterdamp naar vloeibaar water (of andersom)

$\Delta E_{lat,d \rightarrow w}$ ($\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$) en de voelbare warmteoverdracht tussen lucht en waterdruppels $\Delta E_{voel,l \rightarrow w}$ ($\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$)

$$dQ_w = c_w \cdot A(q_w(h)T_w(h) - q_w(h-dh)T_w(h-dh)) =$$

$$\frac{w_w}{dh} c_w (m_w(h)T_w(h) - m_w(h-dh)T_w(h-dh)) = \Delta E_{lat,w \rightarrow d} + \Delta E_{voel,w \rightarrow l}$$

(10.7)

De hoeveelheid energie in een kg water is gelijk aan de soortelijke warmte c_w van water vermenigvuldigd met de hoeveelheid water vermenigvuldigd met de temperatuur van het water in Kelvin.

10.3.3 Transportvergelijkingen voor waterdamp en lucht

▪ Massa

Massavergelijking voor *waterdamp* onder de aanname dat $w_l = \text{constant}$:

Net als bij massavergelijking voor water kijken we naar het verschil in massa over de hoogte dh . Dit is gelijk aan:

$$\frac{dm_d(h)}{dh} = A \left(\frac{q_d(h)}{w_l} - \frac{q_d(h-dh)}{w_l} \right) = \frac{(m_d(h) - m_d(h-dh))}{dh}$$

(10.8)

Deze verandering in hoeveelheid waterdamp wordt veroorzaakt door verdamping of condensatie van het water. Dit verdampings- of condensatie proces is wel tijdafhankelijk, en kan daarom alleen worden uitgerekend als we het verschil in warmtestroom ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) gelijkstellen aan de hoeveelheid water die verdampt of condenseert.

$$\frac{dm_d(h)}{dt} = A \cdot (q_d(h) - q_d(h-dh)) = \frac{dm_{w \rightarrow d}(h)}{dt}$$

(10.9)

Massavergelijking voor *lucht* onder de aanname dat $w_l = \text{constant}$:

Er komt geen lucht bij en er verdwijnt ook geen lucht in de Klimaatcascade[©]. Onder de aanname van een contante luchtdichtheid is de hoeveelheid lucht gelijk over de hele Klimaatcascade[©].

$$m_l(h) = m_l(h-dh)$$

(10.10)

▪ Enthalpie

De verandering in energiestroom dQ_{d+l} over de hoogte dh is gelijk aan het verschil in energiestroom van de waterdamp- en luchtstroom tussen h en $h-dh$. Dit verschil in energiestroom wordt veroorzaakt door de latente warmteoverdracht bij de overgang van waterdamp naar vloeibaar water of andersom $\Delta E_{lat,d \rightarrow w}$ ($\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$) en de voelbare warmteoverdracht tussen lucht en waterdruppels $\Delta E_{voel,l \rightarrow w}$ ($\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$).

$$dQ_{d+l} = c_w A (q_d(h) T_d(h) - q_d(h-dh) T_d(h-dh)) + (q_d(h) - q_d(h-dh)) L_w^0 + c_l A (q_l(h) T_l(h) - q_l(h-dh) T_l(h-dh))$$

(10.11/1)

$$dQ_{d+l} = \frac{w_d}{dh} c_w (m_d(h) T_d(h) - m_d(h-dh) T_d(h-dh)) + \frac{w_d}{dh} (m_d(h) - m_d(h-dh)) L_w^0 + \frac{w_l}{dh} c_l (m_l(h) T_l(h) - m_l(h-dh) T_l(h-dh))$$

(10.11/2)

$$dQ_{d+l} = \Delta E_{lat,d \rightarrow w} + \Delta E_{voel,l \rightarrow w}$$

(10.11/3)

Hierin is L_w^0 ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$) de verdampingswarmte van water van 0°C naar waterdamp van 0°C . Deze term is nodig om de verdampingsenergie die in de waterdamp zit mee te kunnen nemen.

10.3.4 Expliciete uitdrukkingen voor massa en temperatuur

Met invullen van de vergelijking voor stof- en energieoverdracht (daarvoor worden vooralsnog de bekende variabelen op hoogte h gebruikt zodat sprake is van een eenvoudige expliciete discretisatie) krijgen we:

▪ Massa

Uit vergelijking (10.5)

$$q_w(h-dh) = q_w(h) + \frac{1}{A} \frac{dm_{d \rightarrow w}(h)}{dt}$$

(10.12/1)

$$m_w(h-dh) = m_w(h) + \frac{dh}{w_w} \frac{dm_{d \rightarrow w}(h)}{dt}$$

(10.12/2)

En uit vergelijking (10.9)

$$q_d(h-dh) = q_d(h) - \frac{1}{A} \frac{dm_{w \rightarrow d}(h)}{dt}$$

(10.13/1)

$$m_d(h-dh) = m_d(h) - \frac{dh}{w_d} \frac{dm_{w \rightarrow d}(h)}{dt}$$

(10.13/2)

En uit vergelijking (10.10)

$$m_l(h) = m_l(h-dh)$$

(10.14)

Dus m_l is niet van de hoogte afhankelijk; dat de dichtheid van de temperatuur afhangt zit dus niet in dit model.

▪ Enthalpie

Uit vergelijking (10.7)

$$dQ_w = c_w A (q_w(h)T_w(h) - q_w(h-dh)T_w(h-dh)) = \frac{w_w}{dh} c_w (m_w(h)T_w(h) - m_w(h-dh)T_w(h-dh))$$

(10.15/1)

$$dQ_w = \Delta E_{lat, w \rightarrow d} + \Delta E_{sens, w \rightarrow l}$$

(10.15/2)

Ofwel:

$$T_w(h-dh) = \frac{1}{m_w(h-dh)} \left(m_w(h)T_w(h) - \frac{dh}{c_w w_w} (\Delta E_{lat,w \rightarrow d}(h) + \Delta E_{sens,w \rightarrow l}(h)) \right)$$

(10.15/3)

$$= \frac{1}{q_w(h-dh)} \left(q_w(h)T_w(h) - \frac{1}{c_w A} (\Delta E_{lat,w \rightarrow d}(h)) + \Delta E_{sens,w \rightarrow l}(h) \right)$$

(10.15/4)

Uit vergelijking (10.11)

$$dQ_{d+l} = c_w A (q_d(h)T_l(h) - q_d(h-dh)T_l(h-dh)) + A (q_d(h) - q_d(h-dh)) \cdot L_w^0 + c_l A (q_l T_l(h) - q_l T_l(h-dh))$$

(10.16/1)

$$dQ_{d+l} = \frac{w_d}{dh} c_w (m_d(h)T_l(h) - m_d(h-dh)T_l(h-dh)) + \frac{w_d}{dh} (m_d(h) - m_d(h-dh)) \cdot L_w^0 + \frac{w_l}{dh} c_l (m_l T_l(h) - m_l T_l(h-dh))$$

(10.16/2)

$$dQ_{d+l} = \Delta E_{lat,d \rightarrow w} + \Delta E_{sens,l \rightarrow w}$$

(10.16/3)

Ofwel:

$$T_l(h-dh) = \frac{Ac_w q_d(h)T_l(h) + Ac_l q_l T_l(h) - (\Delta E_{lat,d \rightarrow w}(h) + \Delta E_{voel,l \rightarrow w}(h)) + A(q_d(h) - q_d(h-dh)) \cdot L_w^0}{A(c_w q_d(h-dh) + c_l q_l)}$$

(10.16/4)

$$T_l(h-dh) = \frac{c_w m_d(h)T_l(h) + c_l m_l T_l(h) - \frac{dh}{w_l} (\Delta E_{lat,d \rightarrow w}(h) + \Delta E_{voel,l \rightarrow w}(h)) + (m_d(h) - m_d(h-dh)) \cdot L_w^0}{(c_w m_d(h-dh) + c_l m_l)}$$

(10.16/5)

10.4 Methode 2: massa- en warmtebalans op basis van differentiaalvergelijkingen

10.4.1 Relaties

De relatie tussen massastroomdichtheid, massadichtheid en snelheid is als volgt:

- **Water:**

$$q_w = w_w \rho_w^*$$

(10.17)

- **Waterdamp:**

$$q_d = w_l \rho_d$$

(10.18)

▪ **Lucht:**

$$q_l = w_l \rho_l$$

(10.19)

Hierin is ρ_w^* een bulkdichtheid, d.w.z. de totale massahoeveelheid water per m³ ruimte.

De snelheden zijn overigens positief gedefinieerd in de negatieve richting van h . Dit in tegenstelling tot de normale conventie

De waarden van de grootheden in bovenstaande vergelijkingen zijn bekend op hoogte H .

10.4.2 Transportvergelijkingen voor water

▪ **Massa**

Massavergelijking voor water, onder de aanname dat $v_w = \text{constant}$:

$$\frac{\partial \rho_w^*}{\partial t} = w_w \frac{\partial \rho_w^*}{\partial h} + g_{d \rightarrow w}$$

(10.20)

Waarin $g_{d \rightarrow w}$ de stofoverdracht per volume-eenheid in kg.m⁻³.s⁻¹ voor de overgang van waterdamp naar vloeibaar water.

Gediscretiseerde (in de plaats) massavergelijking voor water over de hoogte dh en oppervlakte A

$$A dh \frac{d\rho_w^*}{dt} = A w_w (\rho_w^*(h) - \rho_w^*(h - dh)) + A dh \cdot g_{d \rightarrow w}$$

(10.21)

▪ **Energie**

Energievergelijking voor water:

$$c_w \frac{\partial (\rho_w^* T_w)}{\partial t} = c_w w_w \frac{\partial (\rho_w^* T_w)}{\partial h} + e_{lat,d \rightarrow w} + e_{voel,l \rightarrow w}$$

(10.22)

Hierin staat $e_{lat,d \rightarrow w}$ voor het vermogen van de latente warmte per volume-eenheid in J.m⁻³.s⁻¹ bij de overgang van waterdamp naar vloeibaar water, en $e_{voel,l \rightarrow w}$ voor de voelbare warmteoverdracht door convectie tussen lucht en waterdruppels in J.m⁻³.s⁻¹.

Gediscretiseerde (in de plaats) energievergelijking voor water over de hoogte dh en oppervlakte A

$$c_w A dh \frac{\partial (\rho_w^* T_w)}{\partial t} = c_w w_w A (\rho_w^*(h) T_w(h) - \rho_w^*(h - dh) T_w(h - dh)) + A dh (e_{lat,d \rightarrow w} + e_{voel,l \rightarrow w})$$

(10.23)

10.4.3 Transportvergelijkingen voor waterdamp en lucht

▪ **Massa**

Massavergelijking voor waterdamp, onder de aanname dat $w_l = \text{constant}$:

$$\frac{\partial \rho_d}{\partial t} = w_l \frac{\partial \rho_d}{\partial h} + g_{w \rightarrow d}$$

(10.24)

Waarin $g_{w \rightarrow d}$ de stofoverdracht per volume-eenheid ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$) voor de overgang van water naar waterdamp
Gediscretiseerde (in de plaats) massavergelijking voor waterdamp over de hoogte dh en oppervlakte A

$$A dh \frac{\partial \rho_d}{\partial t} = A w_l (\rho_d(h) - \rho_d(h - dh)) + A dh \cdot g_{w \rightarrow d}$$

(10.25)

Massavergelijking voor lucht (geen bron- of verliestermen), onder de aanname dat $w_l = \text{constant}$:

$$\frac{\partial \rho_l}{\partial t} = w_l \frac{\partial \rho_l}{\partial h}$$

(10.26)

Gediscretiseerde (in de plaats) massavergelijking voor lucht over de hoogte dh en oppervlakte A

$$A dh \frac{d \rho_l}{dt} = A w_l (\rho_l(h) - \rho_l(h - dh))$$

(10.27)

▪ Enthalpie

Enthalpievergelijking voor waterdamp+lucht (ten opzichte van lucht+water bij 0°C)

$$c_d \frac{\partial(\rho_d T_l)}{\partial t} + L_w^0 \frac{\partial \rho_d}{\partial t} + c_l \frac{\partial(\rho_l T_l)}{\partial t} =$$

$$c_d w_l \frac{\partial(\rho_d T_l)}{\partial h} + c_l w_l \frac{\partial(\rho_l T_l)}{\partial h} + L_w^0 w_l \frac{\partial \rho_l}{\partial h} + e_{\text{lat}, w \rightarrow d} + e_{\text{voel}, w \rightarrow l}$$

(10.28)

Hierin is L_w^0 de verdampingswarmte van water van 0°C naar waterdamp van 0°C in $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Gediscretiseerde (in de plaats) energievergelijking voor waterdamp+lucht over de hoogte dh en oppervlakte A , onder het gegeven dat w_l niet van de hoogte afhangt:

$$c_d A dh \frac{\partial(\rho_d T_l)}{\partial t} + L_w^0 A dh \frac{\partial \rho_d}{\partial t} + c_l A dh \frac{\partial(\rho_l T_l)}{\partial t} =$$

$$c_d w_l A (\rho_d(h) T_l(h) - \rho_d(h - dh) T_l(h - dh)) + c_l w_l A (\rho_l(h) T_l(h) - \rho_l(h - dh) T_l(h - dh)) +$$

$$L_w^0 w_l A (\rho_d(h) - \rho_d(h - dh)) + A dh \cdot (e_{\text{lat}, w \rightarrow d} + e_{\text{voel}, w \rightarrow l})$$

(10.29)

10.4.4 Stof- en warmteoverdracht tussen water en waterdamp

Voor het stoftransport als gevolg van verdampen/condenseren per m^3 ruimte geldt

$$g_{w \rightarrow d} = -g_{d \rightarrow w}$$

(10.30)

en voor de vermogensdichtheid van de latente warmteoverdracht:

$$e_{lat,d \rightarrow w} = -e_{lat,w \rightarrow d}$$

(10.31)

en voor de vermogensdichtheid van de voelbare warmteoverdracht door convectie tussen lucht en water:

$$e_{voel,l \rightarrow w} = -e_{voel,w \rightarrow l}$$

(10.32)

10.4.5 Discretisatie voor een tijdsafhankelijk proces (steady-state case)

Voor een tijdsafhankelijk proces is de linkerzijde van vergelijkingen (10.20) t/m (10.29) gelijk aan 0. Met invullen van de vergelijkingen voor stof- en warmteoverdracht (daarvoor worden vooralsnog de bekende variabelen op hoogte h gebruikt zodat sprake is van een eenvoudige expliciete discretisatie) krijgen we:

- **Massa**

Uit vergelijking (10.21)

$$\rho_w^*(h - dh) = \rho_w^*(h) + \frac{dh}{w_w} g_{d \rightarrow w}(h)$$

(10.33)

En uit vergelijking (10.25)

$$\rho_d(h - dh) = \rho_d(h) - \frac{dh}{w_l} g_{d \rightarrow w}(h)$$

(10.34)

En uit vergelijking (10.27)

$$\rho_l(h - dh) = \rho_l(h)$$

(10.35)

dus ρ_l is niet van de hoogte afhankelijk (dat de dichtheid van de temperatuur afhangt zit dus niet in dit model).

- **Enthalpie**

Uit vergelijking (10.23)

$$T_w(h - dh) = \frac{1}{c_w \rho_w^*(h - dh)} \left(c_w \rho_w^*(h) T_w(h) + \frac{dh}{w_w} (e_{lat,d \rightarrow w}(h) + e_{voel,l \rightarrow w}(h)) \right)$$

(10.36)

En uit vergelijking (10.29) met het gegeven dat ρ_l constant is:

$$T_l(h-dh) = \frac{1}{c_d \rho_d (h-dh) + c_l \rho_l} \cdot \left(c_d \rho_d (h) T_l(h) + c_l \rho_l T_l(h) + L_w^0 (\rho_d (h) - \rho_d (h-dh)) - \frac{dh}{w_l} (e_{lat,d \rightarrow w}(h) + e_{voel,l \rightarrow}(h)) \right)$$

(10.37)

10.5 Stof- en warmteoverdracht tussen water en waterdamp

Een model wordt gepresenteerd voor de bepaling van de grootte van het stof- en warmteoverdrachtproces tussen water en waterdamp. Voor zover nodig wordt aangegeven of de gegeven vergelijkingen voor de hierboven behandelde methode 1 dan wel methode 2 gelden.

10.5.1 Oppervlak waterdruppels

We gaan er van uit dat de druppels niet vervormen, uit elkaar vallen of samenklonteren.

Het druppeloppervlak kunnen we uitrekenen als we het aantal druppels weten. We gaan uit van perfect bolvormige druppels met diameter d .

Met referentie naar methode 1 ad paragraaf 10.3:

$$aantal - druppels(h) = \frac{\frac{m_w(h)}{\rho_w}}{V_{drup}} = \frac{A \frac{q_w(h) dh}{w_w \rho_w}}{\frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3}$$

(10.38)

$$\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3.$$

Het oppervlak van alle druppels in het gebiedje dh is dan

$$Opp_{drup}(h) = aantal druppels(h) \cdot 4\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

$$= \frac{A \frac{q_w(h) dh}{w_w \rho_w}}{\frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3} \cdot 4\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 6A \frac{q_w(h) dh}{w_w \rho_w d} = 6 \frac{m_w(h)}{\rho_w d}$$

(10.39)

Met referentie naar methode 2 ad paragraaf 10.4:

Het totale oppervlak a_{drup} van de waterdruppels per m^3 ruimte is gelijk aan:

$$a_{drup} = \frac{\rho_w^*}{\rho_w \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3} \cdot 4\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \frac{6\rho_w^*}{\rho_w d}$$

(10.40)

10.5.2 Stof- en warmteoverdracht volgens methode 1 – paragraaf 10.3

Het vermogen van de latente warmteoverdracht in een hoogtegebiedje dh is gelijk aan:

$$\Delta E_{lat,w \rightarrow d} = -\Delta E_{lat,d \rightarrow w} = \frac{dm_{w \rightarrow d}(h)}{dt} (L_w^0 + c_d T_w)$$

(10.41)

Met

$$\frac{dm_{d \rightarrow w}(h)}{dt} = Opp_{drup} \cdot \beta_x (x_{d,l} - x_{d,opp})$$

(10.42)

Waarin

$$\begin{aligned} \beta_x &= \text{stofoverdrachtcoëfficiënt} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] \\ x_{d,l} &= \text{de luchtvochtigheid} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \\ x_{d,l} &= \text{de luchtvochtigheid} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \text{ ter plaatse van het wateroppervlak} \end{aligned}$$

Bij constante dichtheid van de lucht en atmosferische druk (10^5 Pa) geldt de volgende relatie tussen luchtvochtgehalte en partiële waterdampdruk:

$$x_d = \frac{\rho_d}{\rho_l} \approx 6,2 \cdot 10^{-6} p_d$$

(10.43)

zodat we kunnen schrijven:

$$\frac{dm_{d \rightarrow w}(h)}{dt} = 6,2 \cdot 10^{-6} \cdot Opp_{drup} \cdot \beta_x (p_{d,l}(h) - p_{d,opp}(h))$$

(10.44)

De partiële waterdampdruk wordt overigens berekend met:

$$p_{d,l} = \rho_d R_w T_l \quad \text{en} \quad p_{d,opp} = p_{sat}(T_w)$$

(10.45/1) (10.45/2)

Waarin R_w de gasconstante van water [$462 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$] en $p_{sat}(T_w)$ de verzadigde waterdampdruk bij watertemperatuur T_w .

Tevens geldt

$$\frac{dm_{d \rightarrow w}(h)}{dt} = -\frac{dm_{w \rightarrow d}(h)}{dt}$$

(10.46)

Het vermogen van de voelbare warmteoverdracht door convectie tussen lucht en water in een hoogtegebiedje dh wordt ten slotte gegeven door:

$$\Delta E_{voel,l \rightarrow w} = -\Delta E_{voel,w \rightarrow l} = Opp_{drup} \cdot h_c (T_l - T_w)$$

(10.47)

10.5.3 Stof- en warmteoverdracht volgens methode 2 – paragraaf 10.4

Voor het stoftransport als gevolg van verdampen/condenseren per m³ ruimte geldt

$$g_{d \rightarrow w} = -g_{w \rightarrow d} = a_{drup} \cdot \beta_x (x_{d,l} - x_{d,opp})$$

(10.48)

ofwel:

$$g_{d \rightarrow w} = -g_{w \rightarrow d} = 6,2 \cdot 10^{-6} \cdot a_{drup} \cdot \beta_x (p_{d,l}(h) - p_{d,opp}(h))$$

(10.49)

Met

$$p_{d,l} = \rho_d R_w T_l \quad \text{en} \quad p_{d,opp} = p_{sat}(T_w)$$

(10.50/1) (10.50/2)

De vermogensdichtheid van de latente warmteoverdracht is gelijk aan:

$$e_{lat,w \rightarrow d} = -e_{lat,d \rightarrow w} = g_{w \rightarrow d} (L_w^0 + c_d T_w)$$

(10.51)

En de vermogensdichtheid van de voelbare warmteoverdracht door convectie tussen lucht en water wordt gegeven door:

$$e_{voel,l \rightarrow w} = -e_{voel,w \rightarrow l} = a_{drup} \cdot h_c (T_l - T_w)$$

(10.52)

10.5.4 Stofoverdrachtcoëfficiënt β_x

Voor niet te kleine Re-waarden geldt (Lewis):

$$Nu \cdot Re^{-1} \cdot Pr^{-1/3} = Sh \cdot Re^{-1} \cdot Sc^{-1/3}$$

(10.53)

Met

$$Sh = \frac{\beta_x \cdot d}{\rho_l \cdot D} \quad Nu = \frac{h_c \cdot d}{\lambda} \quad Sc = \frac{\nu}{D} \quad Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu}{\rho_l c_l} \lambda$$

(10.54/1) (10.54/2) (10.54/3) (10.54/4)

Waarin

$$\begin{aligned} \nu &= \text{kinematische viscositeit} \quad [\text{m}^2 \text{s}^{-1}] \\ D &= \text{diffusiecoëfficiënt} \quad [\text{m}^2 \text{s}^{-1}] \\ d &= \text{karakteristieke afmeting} \quad [\text{m}] \end{aligned}$$

kunnen we schrijven:

$$\beta_x = \frac{h_c}{c_p} \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^{2/3}$$

(10.55)

En ingevuld bij 20°C (Sc = 0.63 en Pr = 0.71):

$$\beta_x = \frac{h_c}{1007} \left(\frac{0,71}{0,63} \right)^{2/3} = 1,08 \cdot 10^{-3} \cdot h_c$$

(10.56)

10.5.5 Verzadigde waterdampdruk

$$P_{sat}(\theta) = 100 \exp \left(18,956 - \frac{4030,18}{\theta + 235} \right)$$

(10.57)

waarin θ de temperatuur in °C.

10.5.6 Numerieke waarden voor de soortelijke warmte en verdampingswarmte

De verdampingswarmte L_w van water is 2257000 J.kg⁻¹ (water van 100 °C naar waterdamp van 100 °C). De soortelijke warmtes (handboek installatietechniek, tabel 1.2.6 bij 20 graden C, tabel 1.2-8 bij 20 graden C) bedragen:

$$\begin{aligned} c_w &= 4184 & [\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}] \\ c_l &= 1007 & [\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}] \\ c_d &= 1864 & [\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}] \text{ (bij } 100^\circ\text{C)} \end{aligned}$$

zodat

$$L_w^0 = L_w + c_w(100 - 0) - c_d(100 - 0) = 2489000 \text{ J.kg}^{-1}.$$

10.5.7 Warmteoverdrachtscoëfficiënt h_c

Volgens Ranz and Marshall kan voor enkele druppels de volgende correlaties worden gebruikt (El Morsi, 2002 en Ranz en Marshall deel 1, 1952)

$$Nu = \frac{h_c \cdot d}{\lambda} = 2 + 0,6 Pr^{1/3} \cdot Re^{1/2}$$

(10.58)

Waarin

Nu = getal van Nusselt
Sh = getal van Sherwood
Re = getal van Reynolds gebaseerd op de relatieve snelheid tussen druppel en lucht.
Pr = getal van Prandl

$$Re = \frac{\rho_l |w_l - w_w| d}{\mu_l}$$

(10.59)

$$Pr = \frac{\mu_l \cdot c}{\lambda_l}$$

(10.60)

Waarin

μ_l = dynamische viscositeit van lucht [kg.m⁻¹.s⁻¹]

λ_l = thermische geleidingscoëfficiënt van lucht [W.m⁻¹.K⁻¹]

Hieruit volgt:

$$h_c = \frac{\lambda \cdot Nu}{d} = \frac{\lambda(2 + 0,6 \text{Pr}^{1/3} \cdot \text{Re}^{1/2})}{d} = \frac{\lambda(2 + 0,6(0,7)^{1/3}(\rho_l |w_l - w_w| d))^{1/2}}{\mu_l}$$

(10.61)

10.5.8 Rekenvoorbeeld

- Druppelgrootte van 4 mm, $v_l - v_w = 6 \text{ m.s}^{-1}$, bij 20°C.
- Dit geeft $\text{Re} = 1.2 \times 6 \times 0.004 / 1.8 \cdot 10^{-5} = 1590$
- Kinematische viscositeit ν (tabel 1.2-8 uit Handboek installatietechniek) = $1.51 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$
- Dynamisch viscositeit μ_l (tabel 1.2-8 uit Handboek installatietechniek) = $1.81 \cdot 10^{-5} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$
- $\text{Nu} = 2 + 0.6 \times 0.7^{0.33} \times 1590^{0.5} = 23.3$, en daaruit volgt:
- $h_c = 145 \text{ w.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

10.6 Voorbeeld Klimaatcascade[®]

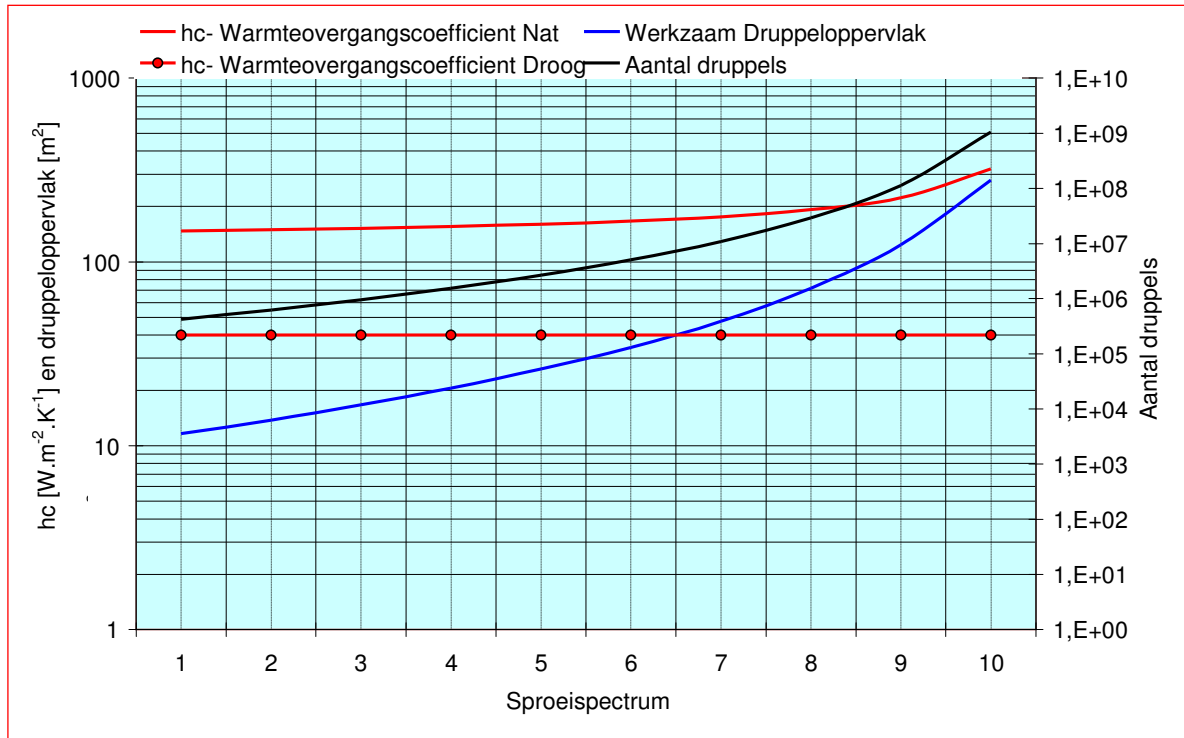
Figuur 10.1 toont een met behulp van het rekenmodel uitgewerkt voorbeeld van een Klimaatcascade[®] voor een gebouw van 4 verdiepingen, hoogte 14 m, luchtdebiet 20.000 m³.h⁻¹, water/luchtfactor 1,2.

Aangegeven zijn de warmteovergangscoefficiënt, het werkzaam druppeloppervlak en het aantal druppels in de cascade voor de sproeispectra 1 t/m 10.

De effectiviteit van de Klimaatcascade[®] ten opzichte van de traditionele indirecte koeling, waarbij lucht langs een watervoerende pijpbundel stroomt, blijkt uit de volgende eigenschappen:

- De hoge warmteovergangscoefficiënt, oplopend van $h_c \approx 150$ bij spectrum 1 tot 300 W.m⁻².K⁻¹ bij spectrum 10, en daarmee globaal genomen 3 tot 6 keer zo hoog als bij traditionele koelsystemen – zie de eveneens in de grafiek aangegeven waarde voor droge koeling van $h_c \approx 40 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.
- Het grote werkzaam oppervlak van de druppelverzameling, oplopend van ≈ 12 tot 280 m², en daarmee nauwelijks vergelijkbaar met een traditioneel systeem.

In de klimaattechniek worden traditionele indirecte koelsystemen compact uitgevoerd, met als gevolg hoge drukverliezen, die met behulp van een ventilator moet worden opgebracht. De Klimaatcascade[®] daarentegen levert positieve druk aan het luchtverdeelsysteem.



Figuur 10.1 – Warmteovergangscoefficient, druppeloppervlak en aantal druppels als functie van het sproeispectrum

10.7 Warmteoverdracht met de wanden van de Klimaatcascade[®]

Dit is een eerste aanzet voor een model. Ten behoeve van de eenvoud worden de volgende aannamen gedaan:

1. Hoge massa-uitwisselingsnelheid tussen water in de cascade en water tegen de wand zodat
2. De temperatuur van de wanden gelijk is aan de watertemperatuur in de cascade op die hoogte
3. Warmteoverdracht met de wanden direct effect heeft op de temperatuur van het water in de cascade
4. De wanden zijn adiabatisch (geen warmteoverdracht naar de omgeving)
5. De wanden zijn volledig bedekt met een laagje water
6. De advectieve warmteoverdracht van (eventueel) afstromend water wordt verwaarloosd

In feite komt het erop neer dat het oppervlak van het water wordt verhoogd door aanwezigheid van de natte wand.

Met betrekking tot alleen methode 2 zijn de formules als volgt.

Het wandoppervlak per m³ ruimte is gelijk aan:

$$a_{w,wand} = \frac{2(b_w + l_w)}{b_w l_w} \quad (10.62)$$

waarin l_w en b_w respectievelijk de lengte en breedte van de koelwasser.

Voor het stoftransport als gevolg van verdampen/condenseren per m³ ruimte geldt weer

$$g_{d \rightarrow w, wand} = -g_{w \rightarrow d, wand} = 6,2 \cdot 10^{-6} \cdot a_{w,wand} \cdot h_{wand} \cdot \beta_x (p_{d,l}(h) - p_{d,wand}(h))$$

(10.63)

De vermogensdichtheid van de latente warmteoverdracht, plus de voelbare warmteoverdracht door convectie met de wand, wordt gegeven door

$$e_{w \rightarrow d, wand} = g_{w \rightarrow d, wand} (L_w^0 + c_d T_w) + a_{w, wand} \cdot h_{wand} (T_l - T_w)$$

(10.64)

Deze term dient te worden toegevoegd aan vergelijking (10.28) en met min-teken aan vergelijking (10.22), en aan de uitdrukkingen die daaruit voortvloeien.

10.8 Koelprestatie van de Klimaatcascade[©]

Het koelvermogen van de Klimaatcascade[©] met betrekking tot de inkomende lucht is te onderscheiden in een voelbaar en latent deel. Hiervoor worden de volgende formules gehanteerd:

Voelbaar deel:

$$P_{voelbaar} = Aq_l \left(c_l + \frac{\rho_{d, in}}{\rho_l} c_d \right) \cdot (T_{l, in} - T_{l, uit})$$

(10.65)

Latent deel:

$$P_{latent} = \frac{Aq_l}{\rho_l} (L_w^0 + c_d T_{l, uit}) \cdot (\rho_{d, in} - \rho_{d, uit})$$

(10.66)

10.9 Referenties

1. Handboek installatietechniek, januari 2002.
2. Mass transfer, A.F. Mills, 2001, ISBN 013032829-4
3. Optimization of Direct-Contact-Spray-Coolers, PhD by Mohamed S. El-Morsi, 2002
4. Heat and Moisture in building envelopes, Prof. dr. ir. M.H. de Wit, jan. 2008
5. Ranz en Marshall 1952, deel 1

Earth, Wind & Fire – Airconditioning zonder Ventilatoren
(III) Onderzoek Geo-Klimaatconcept[®]

11. KOELPRESTATIES KLIMAATCASCADES[®]

11.1 Samenvatting

Het analytisch rekenmodel volgens hoofdstuk 10 is toegepast voor het dimensioneren van een Klimaatcascade[®] van 4 tot 20 verdiepingen hoog, luchtdebieten van 20.000 tot 100.000 m³.h⁻¹ en luchtsnelheden van 1,5 – 2,0 en 2,5 m.s⁻¹ voor gebouw/klimaattypen ALPHA en BETA.

De koelprestatie van een Klimaatcascade[®] wordt bepaald door het temperatuurtraject van het koelwater, de water/luchtverhouding, het sproeispectrum en de hoogte. Om het benodigde pompvermogen zo klein mogelijk te houden zijn een zo laag mogelijke koelwatertemperatuur en een zo klein mogelijke water/luchtverhouding gewenst. Hierbij moet worden gewaakt voor psychometrisch ongewenste effecten zoals adiabatische luchtbevochtiging in de koelperiode (negatieve latente koeling) en een te hoge luchtvochtigheid van de toevoerlucht.

Het benodigde sproeispectrum is afhankelijk van de hoogte van de cascade. Bij hogere gebouwen kan een grover sproeipatroon worden gebruikt en omgekeerd. De luchtsnelheid in de Klimaatcascade[®] heeft nauwelijks invloed op de koelprestatie.

Het aandeel van de cascadowanden in de totale koelprestatie is bij type ALPHA beperkt tot 5 à 15%, afhankelijk van de hoogte, en bij type BETA met $\approx 5\%$ vrijwel verwaarloosbaar.

Bij type ALPHA bedraagt het aandeel latente koeling bij een koelwatertemperatuur van 13⁰C en een water/luchtverhouding van 0,4 ca 10...15% van de totale koeling. Bij type BETA is dit 20...23% bij een koelwatertemperatuur van 14⁰C en wisselende water/luchtverhoudingen van 1,2...1,4, afhankelijk van de cascadehoogte.

De relatieve vochtigheid aan de voet van de Klimaatcascade[®] ligt bij type ALPHA tussen 85% en 90% en bij type BETA tussen 95% en 99%.

11.2 Methode

Met behulp van het analytisch rekenmodel (hoofdstuk 10) zijn voor gebouwen van 4 tot 20 verdiepingen en 20.000 tot 100.000 m³.h⁻¹ de koelprestaties berekend voor gebouw/klimaattypen ALPHA en BETA. Uitgangspunt hiervoor is de psychometrische analyse uit hoofdstuk 6.

Figuur 11.1 brengt als voorbeeld de water- en luchttemperaturen in beeld van een Klimaatcascade[®] type ALPHA met een hoogte van 10 verdiepingen à 3,5 m.

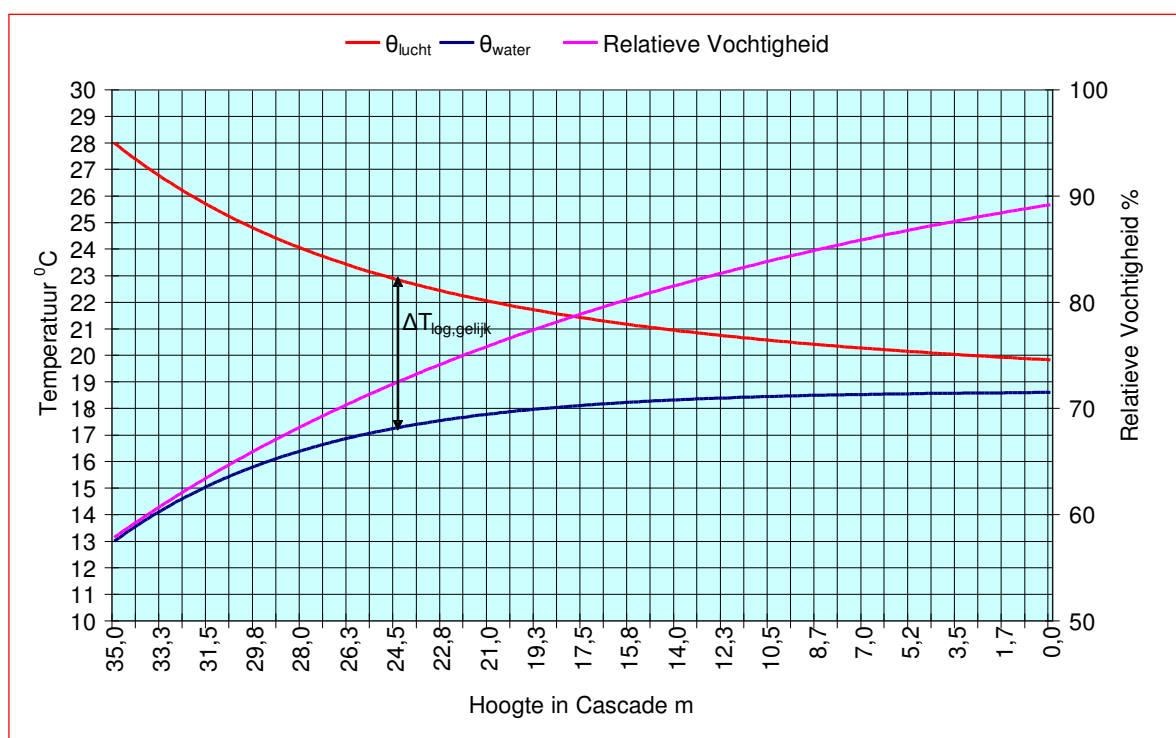
11.3 Gebouw / Klimaattype ALPHA

De ontwerp-toevoertemperatuur van de ventilatielucht voor dit gebouw/klimaattype is $\approx 20^0$ C; zie paragraaf 8.4. Met behulp van het rekenmodel is voor gebouwen van 4 tot 20 verdiepingen iteratief het noodzakelijke sproeispectrum bepaald om de lucht van de buitenconditie tot $\approx 20^0$ C te koelen. Deze iteratie kan in principe worden uitgevoerd met 4 variabelen, de koelwatertemperatuur, de water/luchtverhouding, het sproeispectrum en de luchtsnelheid in de cascade. Voor de twee eerstgenoemde is een vaste waarde aangehouden, namelijk:

- Koelwater van 13⁰C, bij gebruikmaking van koude uit de bodem de laagst mogelijke temperatuur, zie paragraaf 8.6. Dit levert het maximale temperatuurtraject van het koelwater op, alsmede het minimale koelwaterdebiet en pompvermogen.
- Een water/luchtverhouding $R_{WL} = 0,4$ conform de psychometrische analyse van paragraaf 8.4. Tevens is voor één geval een berekening gemaakt voor een water/luchtverhouding van 0,3; zie hierna.

Verdere uitgangspunten:

- Netto vloeroppervlak per verdieping 1.000 [m²];
- Specifiek ventilatiedebiet per netto m² 5 [m³.m⁻².h⁻¹]
- Buitentemperatuur 28 [⁰C]
- RV buitenlucht 54,4 [%]



Figuur 11.1 – Temperatuurverloop van lucht, koelwater en relatieve vochtigheid als functie van hoogte in een Klimaatcascade[®] van 35 m

Om de invloed van de lichtsnelheid in de Klimaatcascade[®] op de koelcapaciteit vast te kunnen stellen is deze berekend bij lichtsnelheden van 1,5 – 2,0 en 2,5 m.s⁻¹. Verder is bepaald welk aandeel van de totale koelcapaciteit door de cascadowanden wordt geleverd.

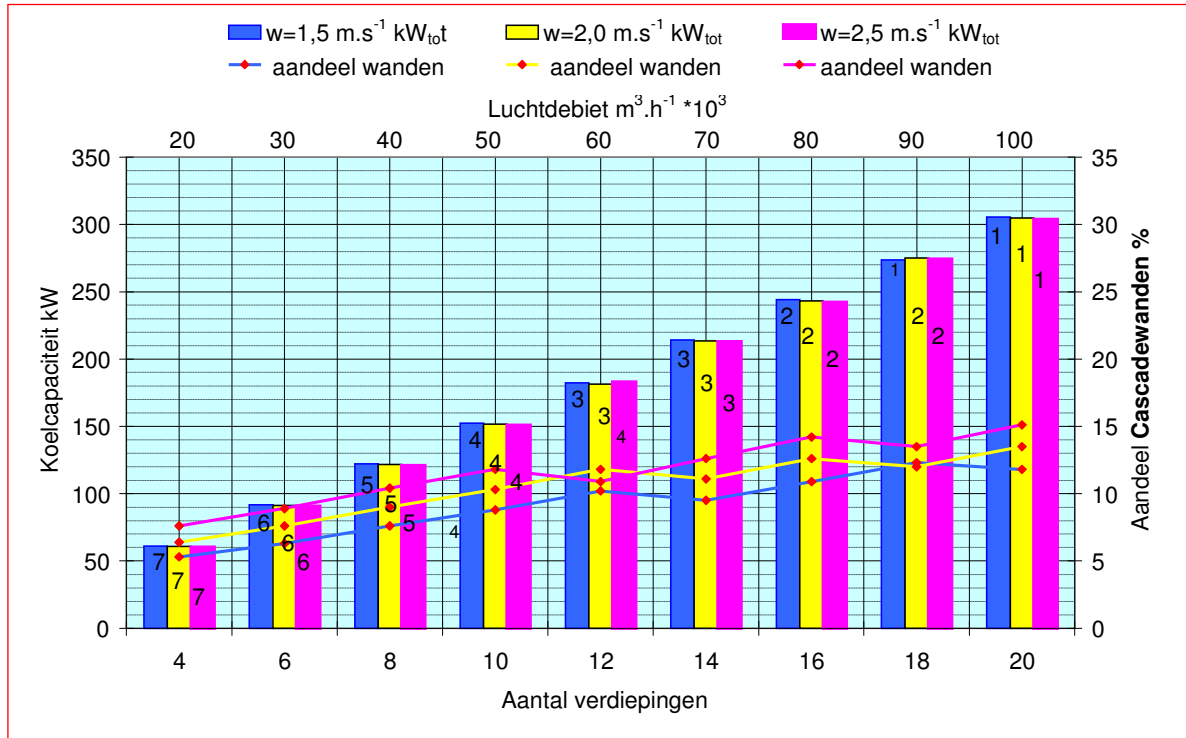
De resultaten van de berekening zijn weergegeven in figuur 11.2. De volgende conclusies kunnen hieruit worden getrokken:

- Bij lagere gebouwen is een fijner sproeispectrum nodig dan bij hogere gebouwen. Het grotere werkzaam oppervlak dat hierdoor in de sproeizone wordt gerealiseerd is noodzakelijk ter compensatie van de kleinere inhoud.
- De lichtsnelheid in de Klimaatcascade[®] heeft nauwelijks invloed op de koelcapaciteit.
- Het aandeel van de cascadowanden op de totale koelcapaciteit is bij lagere gebouwen beperkt tot 5 à 8% en loopt bij hogere gebouwen op tot 12 à 15%. Bij een hogere lichtsnelheid in de cascade neemt het aandeel van de wanden toe; blijkbaar wordt het kleinere wandoppervlak overgecompenseerd door de verbeterde warmteovergangscoefficiënt ten gevolge van de hogere lichtsnelheid. De discontinuïteit in deze functie is het gevolg van de discontinuïteit in de sproeispectra.

Voor een gebouw / klimaattype ALPHA is uitgegaan van vrijwel droge koeling d.w.z. zonder ontvochtiging; zie paragraaf 8.4. Figuur 11.3 laat zien dat dit bij de gekozen wateraanvoertemperatuur van 13^oC niet is te realiseren. Het aandeel latente koeling ligt tussen 10% en 15%, waardoor de voelbare warmte factor VWF tussen 0,9 en 0,85 ligt tegenover 0,98 in paragraaf 9.4. De invloed hierop van de lichtsnelheid in de Klimaatcascade[®] is gering.

Verhoging van de voelbare warmte factor VWF door verkleining van het latente aandeel in de koelcapaciteit zou mogelijk zijn door verhoging van de koelwatertemperatuur. Dit zou echter ook een verkleining van het temperatuurtraject van het koelwater tot gevolg hebben en een stijging van het koelwaterdebiet met inherente verhoging van de pompenergie. Deze exercitie is daarom achterwege gelaten.

In figuur 11.3 is ook de relatieve luchtvochtigheid bij uitrede van de Klimaatcascade[®] aangegeven; deze ligt tussen 85% en 90%, en is daarmee iets lager dan de waarde in paragraaf 8.4. De iets lagere luchtvochtigheid die hierdoor in de ruimte wordt gerealiseerd is gunstig voor wat betreft thermisch comfort en het luchttransportsysteem wordt minder gevoelig voor het risico van condensatie. De invloed van de luchtsnelheid in de Klimaatcascade[®] op de relatieve vochtigheid is gering.

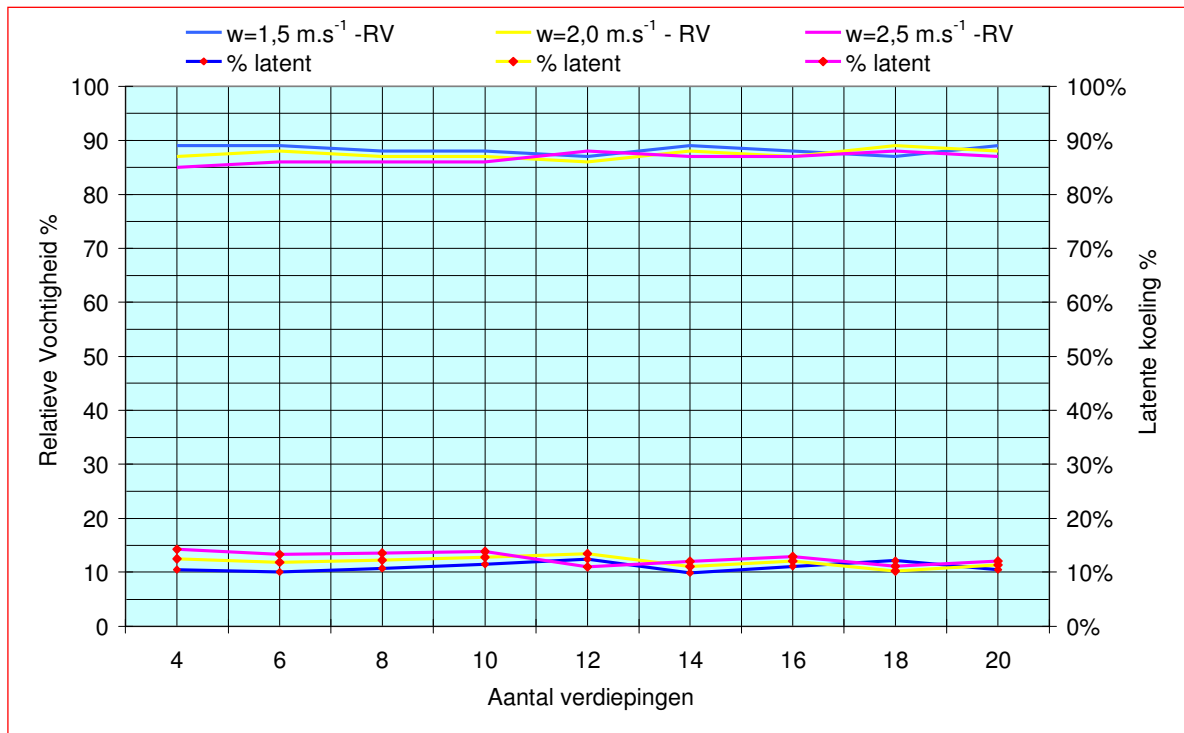


Figuur 11.2 – Koelcapaciteit, sproeispectrum en aandeel cascadowanden als functie van de luchtsnelheid $R=0,4 \text{ kg.kg}^{-1}$

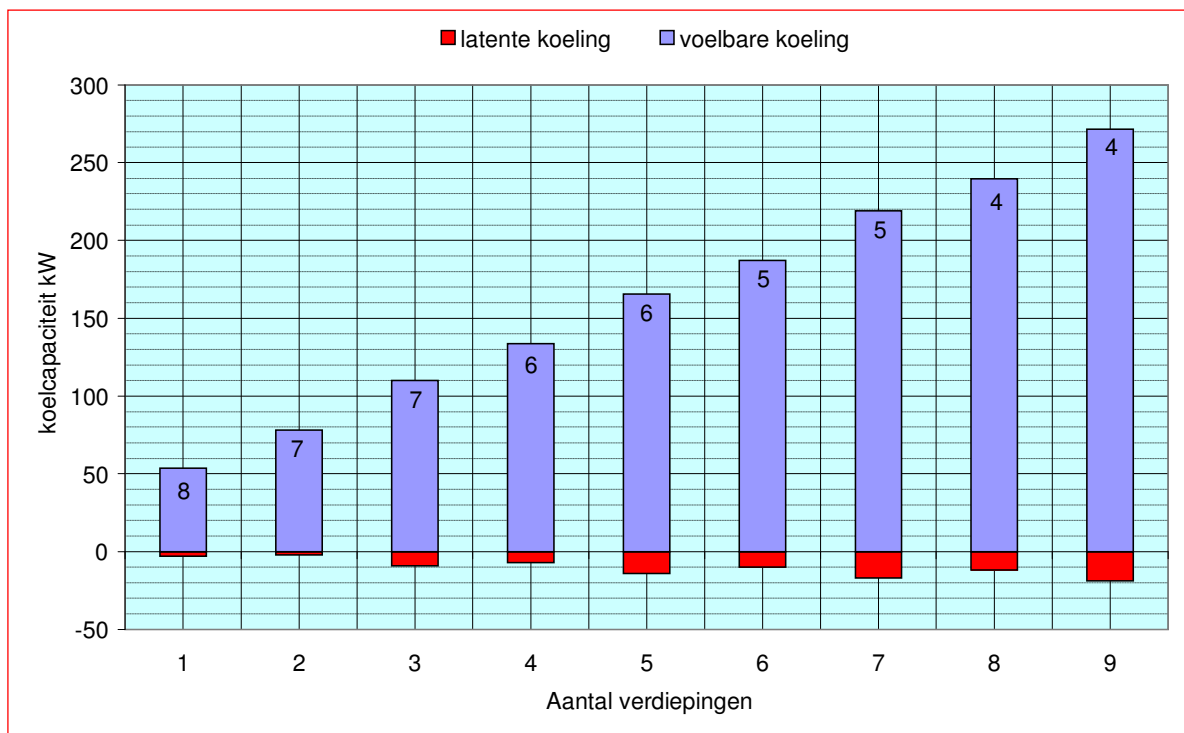
De bij deze berekeningen aangehouden water/luchtverhouding $R_{w/L} = 0,4 \text{ kg.kg}^{-1}$ is gebaseerd op de psychometrische analyse uit paragraaf 8.4. Het is interessant na te gaan of het waterdebiet kan worden verminderd, omdat hierdoor op pompenergie kan worden bespaard. Figuur 11.4 geeft een beeld van de koelcapaciteiten bij een luchtsnelheid van $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ en een verminderd waterdebiet bij $R_{w/L} = 0,3 \text{ kg.kg}^{-1}$.
 Conclusies:

- Voor alle hoogtes zijn fijnere sproeispectra nodig. Het grotere werkzaam oppervlak dat hierdoor in de sproeizone wordt gerealiseerd is noodzakelijk ter compensatie van het kleinere aantal druppels dat in de cascade wordt gevormd.
- Er ontstaat voor alle hoogtes een negatieve latente koelcapaciteit, hetgeen inhoudt dat de lucht in de Klimaatcascade[®] wordt bevochtigd. Dit is een ongewenst effect.

Figuur 11.5 brengt dit effect op een andere manier in beeld. De relatieve vochtigheid van de uitgaande lucht is over het gehele gebied tussen 90% en 95%. De negatieve koelcapaciteit ligt tussen -3% en -10%, tegenover een positieve koelcapaciteit van +10% en +15% bij het hogere waterdebiet bij $R_{w/L} = 0,4$.



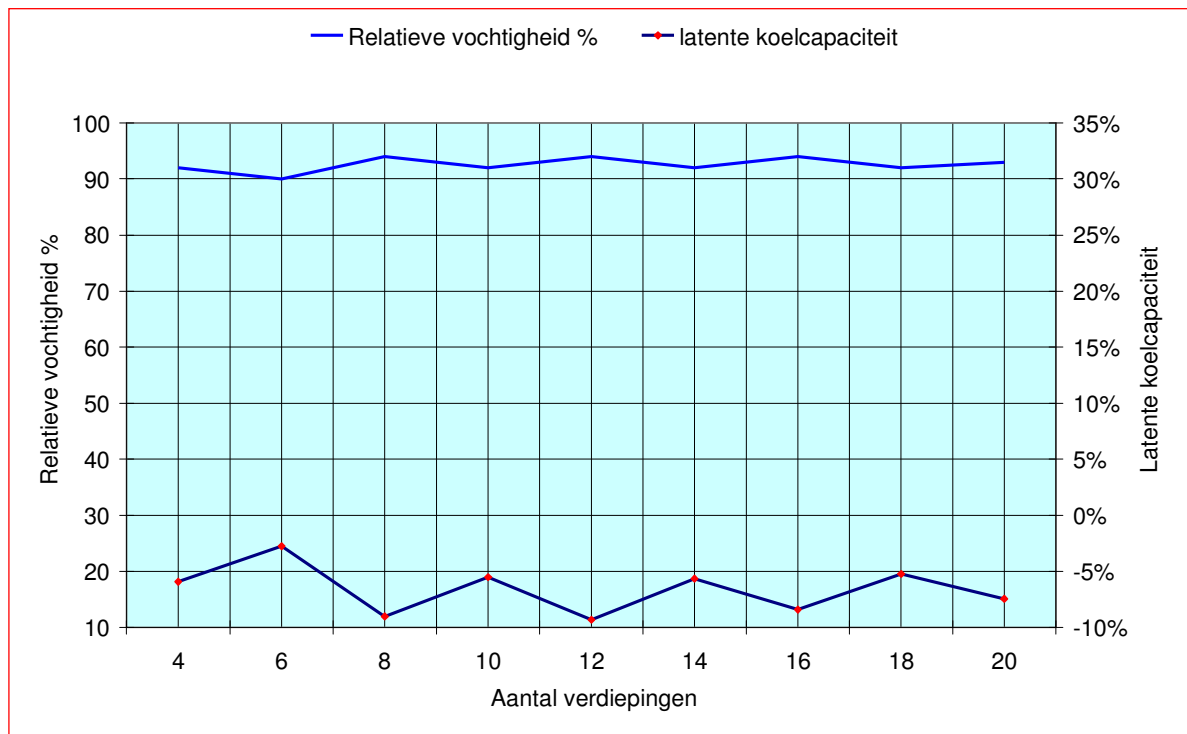
Figuur 11.3 – Relatieve vochtigheid en aandeel latente koeling als functie van het aantal verdiepingen
 $R_{w/L} = 0,4 \text{ kg.kg}^{-1}$



Figuur 11.4 – Koelcapaciteit en sproeispectra bij een luchtsnelheid van $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ – $R_{w/L} = 0,3 \text{ kg.kg}^{-1}$

Het is mogelijk om met behulp van meerdere berekeningen de water/luchtverhouding $R_{w/L}$ te optimaliseren, maar voorlopig wordt voor type ALPHA uitgegaan van $R_{w/L} = 0,4$. Hierbij geldt ook de

overweging dat voor een fijner sproeispectrum in het algemeen ook een hogere waterdruk nodig is, waardoor de potentiële voordelen van een kleiner waterdebiet bij een lagere R-waarde geheel of gedeeltelijk teniet worden gedaan.



Figuur 11.5 - Relatieve vochtigheid en aandeel latente koeling als functie van het aantal verdiepingen
 $R_{w/L} = 0,3 \text{ kg.kg}^{-1}$

11.4 Gebouw / Klimaattype BETA

De ontwerp-toevoertemperatuur van de ventilatielucht voor dit gebouw/klimaattype is $\approx 17^{\circ}\text{C}$; zie paragraaf 8.4. Met behulp van het rekenmodel is voor gebouwen van 4 tot 20 verdiepingen iteratief het noodzakelijke sproeispectrum bepaald om de lucht van de buitenconditie tot $\approx 17^{\circ}\text{C}$ te koelen. Hierbij is gestreefd naar een relatieve vochtigheid van de lucht bij het verlaten van de Klimaatcascade[®] $< 100\%$. Hiervoor bleek het noodzakelijk te zijn de koelwatertemperatuur te verhogen naar 14°C , die derhalve bij de iteratie als vaste waarde is aangehouden. Als variabelen zijn de water/luchtverhouding en het sproeispectrum gehanteerd.

Om de invloed van de luchtsnelheid in de Klimaatcascade[®] op de koelcapaciteit vast te kunnen stellen is deze berekend bij luchtsnelheden van $1,5 - 2,0$ en $2,5 \text{ m.s}^{-1}$. Verder is bepaald welk aandeel van de totale koelcapaciteit door de cascadowanden wordt geleverd.

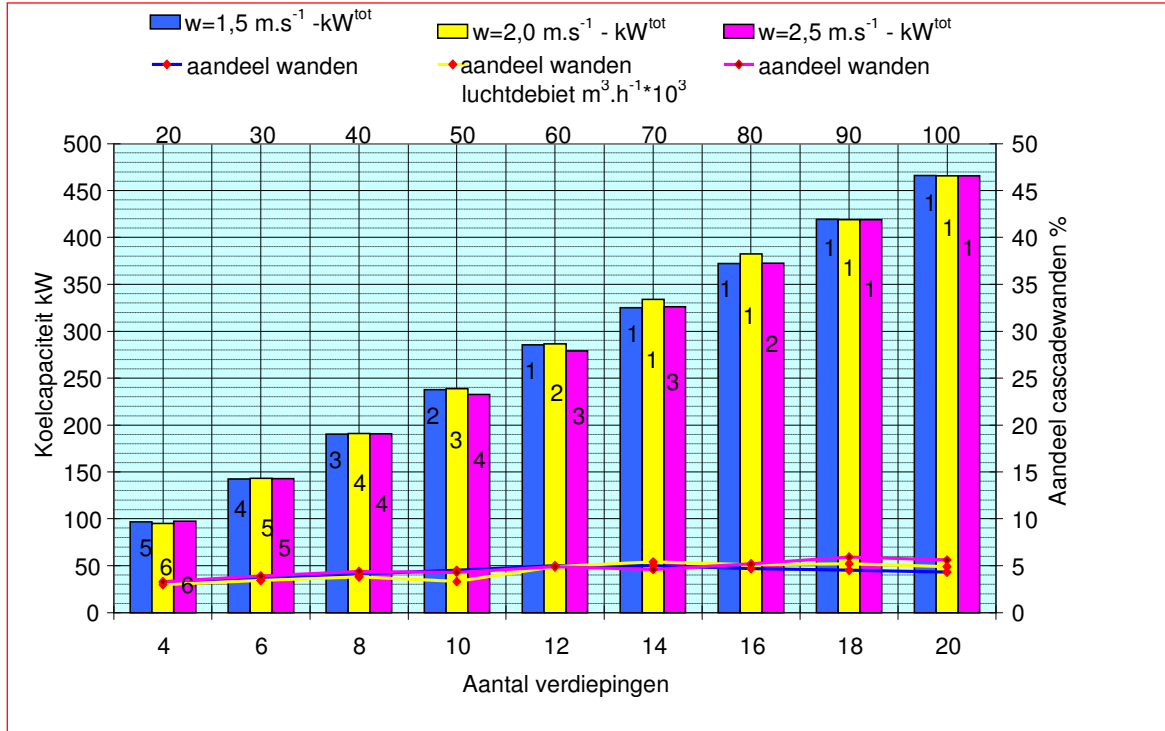
Verdere uitgangspunten:

- Netto vloeroppervlak per verdieping 1.000 $[\text{m}^2]$;
- Specifiek ventilatiedebiet per netto m^2 5 $[\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{h}^{-1}]$
- Buitentemperatuur 28 $[^{\circ}\text{C}]$
- RV buitenlucht 54,4 $[\%]$

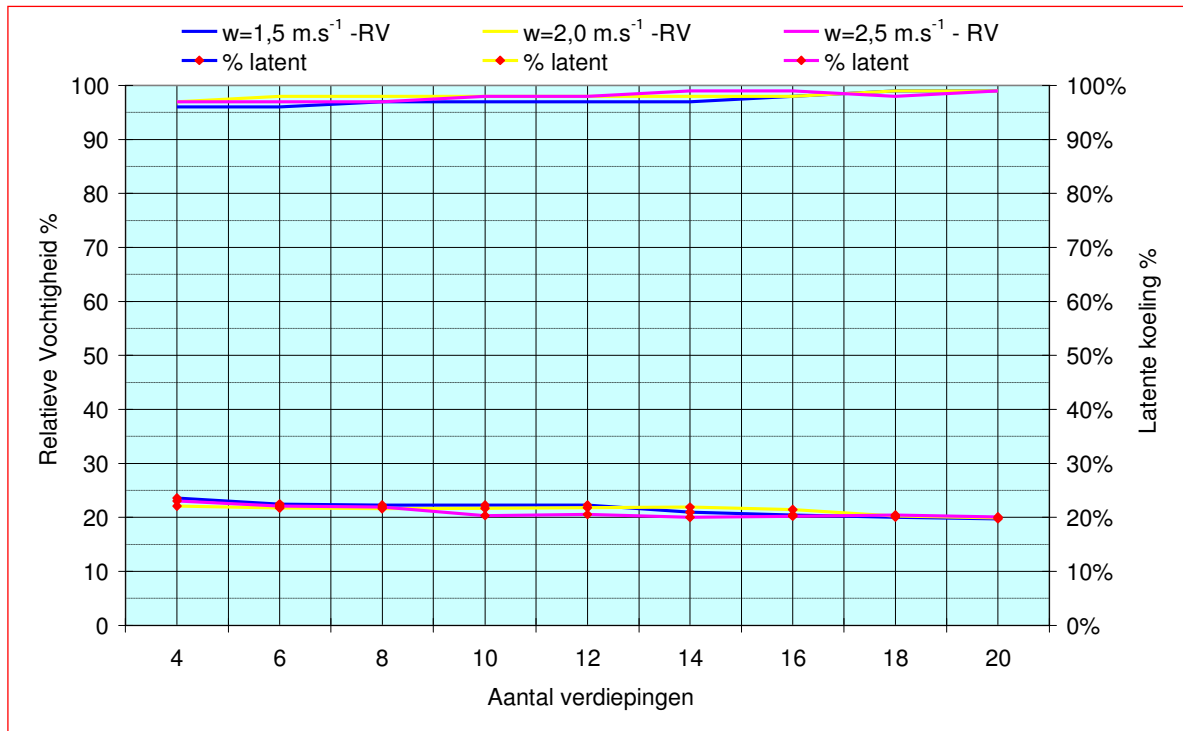
De resultaten van de berekening zijn weergegeven in figuur 11.6. De conclusies die hieruit kunnen worden getrokken zijn dezelfde als die genoemd voor gebouw / klimaattype ALPHA, figuur 11.2:

- Bij lagere gebouwen is een fijner sproeispectrum nodig dan bij hogere gebouwen. Het grotere werkzaam oppervlak dat hierdoor in de sproeizone wordt gerealiseerd is noodzakelijk ter compensatie van de kleinere inhoud.

- De luchtsnelheid in de Klimaatcascade[®] heeft nauwelijks invloed op de koelcapaciteit.



Figuur 11.6 - Koelcapaciteit, sproeispectrum en aandeel cascade wanden als functie van de luchtsnelheid



Figuur 11.7 - Relatieve vochtigheid en aandeel latente koeling als functie van het aantal verdiepingen
 $R_{w/L}$ = variabel

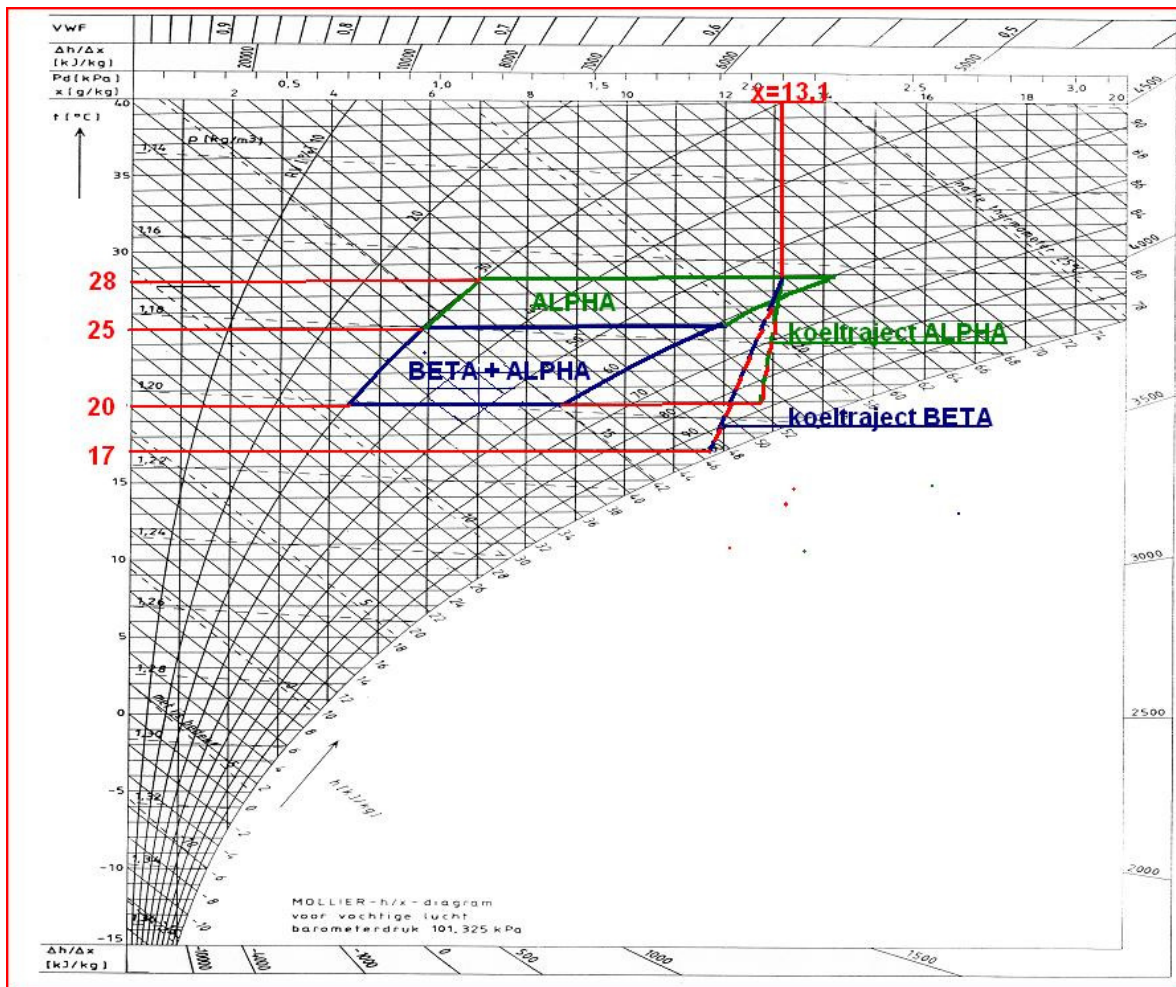
Het aandeel van de cascadowanden op de totale koelcapaciteit is bij lagere gebouwen beperkt tot $\approx 3\%$ en loopt bij hogere gebouwen op tot $\approx 5\%$. Door het in vergelijking met ALPHA grotere waterdebiet en het navenant grotere werkzaam oppervlak in de sproeizone is het aandeel van de wanden in de koelprestatie vrijwel verwaarloosbaar.

Figuur 11.7, de pendant van figuur 11.3 voor ALPHA, laat het aandeel van de latente koeling zien bij de gekozen wateraanvoertemperatuur van 14°C ; deze ligt tussen 20% en 23% met een voelbare warmtefactor van $0,8 - 0,77$. De invloed hierop van de luchtsnelheid in de Klimaatcascade[®] is gering.

In figuur 11.7 is ook de relatieve luchtvochtigheid bij uitrede van de Klimaatcascade[®] aangegeven; deze ligt tussen 95% en 99%. De invloed van de luchtsnelheid in de Klimaatcascade[®] op de relatieve vochtigheid is gering.

11.5 Koeltrajecten in Mollier diagram

De berekende koeltrajecten zijn aangegeven in het Mollier diagram figuur 11.8



Figuur 11.8 – Koeltrajecten ALPHA en BETA in Mollier diagram

11.6 Sproeispectrum en sproeidruk

Bij de selectie van het sproeispectrum in de voorgaande paragrafen is geen rekening gehouden met de verschillen in sproeidruk die hiermee gepaard gaan.

11.7 Energiegebruik en Koudefactor

In hoofdstuk 8 zijn enkele voorlopige berekeningen gemaakt van energiegebruiken en koudefactoren van het Geo-Klimaatconcept in vergelijking met conventionele koelsystemen. Een belangrijke indicator voor het energiegebruik is de water/luchtverhouding $R_{w/L}$. Uit de voorgaande berekeningen blijkt dat deze voor klimaat/gebouwtype BETA lager kan zijn dan in hoofdstuk 8 aangenomen, hetgeen een gunstig effect heeft op het energiegebruik.

11.4 Temperatuurregeling

Een eenvoudige regeling van de luchttemperatuur is mogelijk met behulp van de aanvoertemperatuur van het koelwater.

12. DE KLIMAATCASCADE[®] BUITEN HET KOELSEIZOEN

12.1 Inleiding en Samenvatting

De ontwerpcondities voor een Klimaatcascade[®] zijn gebaseerd op het leveren van gekoelde lucht in de koelperiode. Bij lagere buitentemperaturen moet de ventilatielucht worden verwarmd tot de toevoertemperatuur van 18^oC. Als de Klimaatcascade[®] hiervoor wordt ingezet vindt tevens luchtbevochtiging plaats, hetgeen onder winterse condities een wenselijk fenomeen is. Om echter in de tussenseizoenen de relatieve vochtigheid in de ruimte te beperken tot maximaal 40% is slechts een partiële verwarming in de cascade mogelijk; naverwarming tot 18^oC moet buiten de Klimaatcascade[®] worden gerealiseerd.

In het voorliggende hoofdstuk worden drie systeemvarianten onderzocht:

- A - Partiële verwarming en bevochtiging in de Klimaatcascade[®] met behulp van warm sproeiwater + externe naverwarming tot 18^oC.
- B - Partiële verwarming en bevochtiging in de Klimaatcascade[®] met behulp van externe voorverwarming gevolgd door adiabatische koeling + externe naverwarming tot 18^oC.
- C – Totale verwarming tot 18^oC buiten de Klimaatcascade[®] al dan niet met separate externe luchtbevochtiging.

De systeemvarianten A en B zijn onderverdeeld in de varianten A1, A2 en B1, B2. Bij A1 en B1 is de Klimaatcascade[®] alle seizoenen door in bedrijf waarbij de luchtvochtigheid in de ruimte kan oplopen tot 60% RV. Bij A2 en B2 wordt het sproeisysteem in de Klimaatcascade[®] in de tussenseizoenen uitgeschakeld waardoor de luchtvochtigheid tot 40% wordt beperkt. Een evaluatie van de bouwfysische consequenties hiervan is projectgebonden.

De varianten onderscheiden zich voor wat betreft energiegebruik, robuustheid, luchtbevochtiging, bevroeringsrisico, thermische, aerodynamische en hydraulische trek, luchtwaterfunctie en legionellarisico. De varianten zijn op al deze aspecten beoordeeld.

Systeemvariant A1, waarbij de Klimaatcascade[®] 100% van de tijd in bedrijf is, past het beste in het robuuste en energiezuinige Geo-Klimaatconcept[®], maar het risico op bevroering van sproeiwater bij zeer lage buitentemperaturen verdient nader onderzoek. Zie hoofdstuk 17 –Fysieke Testopstelling.

Systeemvariant C waarbij de Klimaatcascade[®] buiten het koelseizoen niet actief in gebruik is en slechts dient als aanzuigkanaal voor de lucht, lijkt de meest veilige keus te zijn.

12.2 Verwarming van de ventilatielucht

De luchtdistributie naar de kantoorruimten wordt gerealiseerd door middel van kwelventilatie¹⁰ via laag geplaatste wandroosters. Om koude voeten te voorkomen mag de temperatuur van de toevoerlucht niet meer dan enkele graden onder de ruimtetemperatuur van $\approx 20^{\circ}\text{C}$ liggen, bijvoorbeeld 18^oC. Bij een buitentemperatuur $\theta_e < 18^{\circ}\text{C}$ moet de ventilatielucht dan worden verwarmd. Hiervoor zijn in principe de volgende systeemvarianten beschikbaar:

- Variant A: Voorverwarming in de Klimaatcascade[®] met behulp van warm sproeiwater + externe naverwarming – zie paragraaf 12.4;
- Variant B: Voorverwarming in de Klimaatcascade[®] door dauwpuntsregeling (voorverwarming met adiabatische bevochtiging) + externe naverwarming – zie paragraaf 12.5;
- Variant C: Verwarming buiten de Klimaatcascade[®], die in dit geval niet in bedrijf is en slechts dient als aanzuigschacht voor de ventilatielucht – zie paragraaf 12.6.

Bij het gebruik van de Klimaatcascade[®] voor verwarming verandert ook de luchtvochtigheid en moet rekening worden gehouden met psychometrische aspecten – zie paragraaf 12.3. De lucht kan hierdoor slechts worden voorverwarmd tot $\approx 4^{\circ}\dots 8^{\circ}\text{C}$, afhankelijk van de te realiseren luchtvochtigheid in de ruimte, en moet buiten de Klimaatcascade[®] verder tot $\approx 18^{\circ}\text{C}$ worden verwarmd.

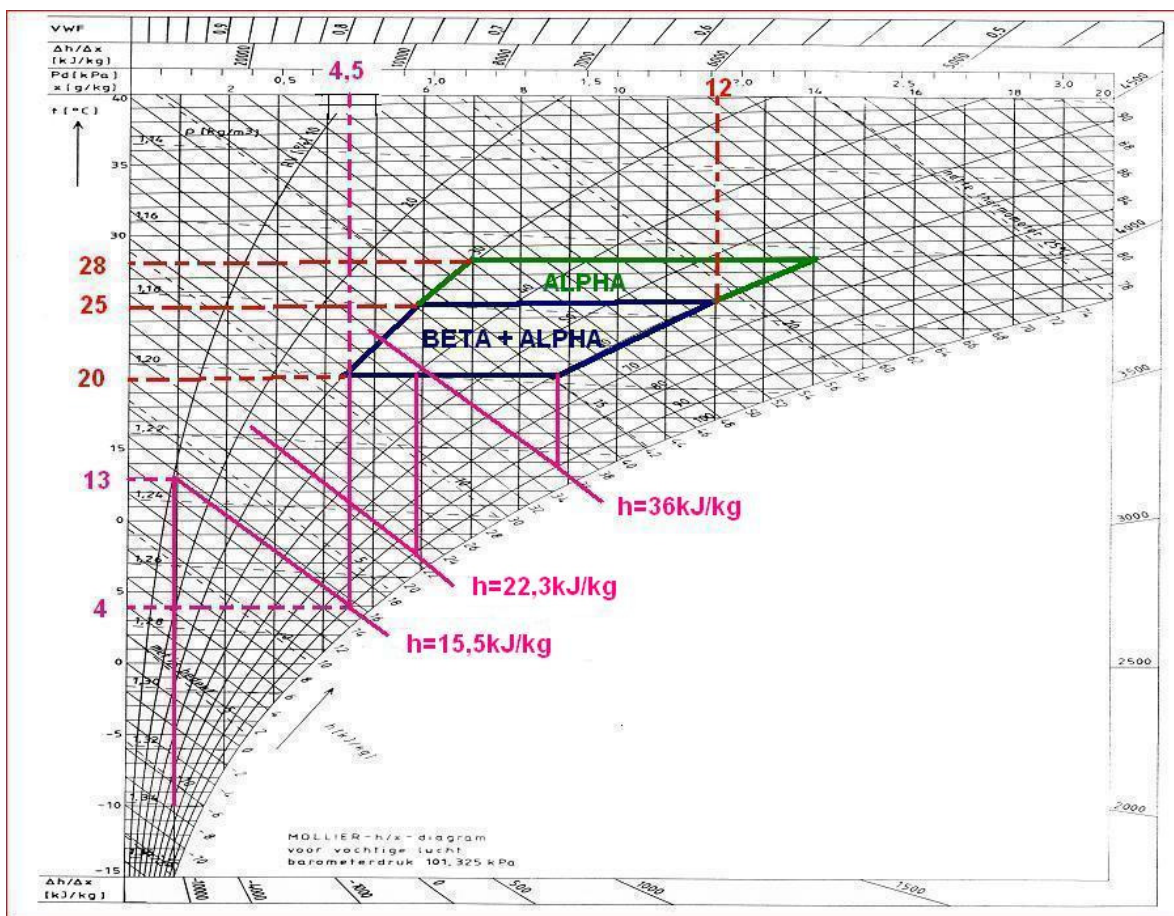
¹⁰ Meestal verdringingsventilatie genoemd

12.3 Psychometrische aspecten

Buiten het koelseizoen is een minimum RV_i in verblijfsruimten gewenst van 30%...40%, zie deelrapport (IV) paragraaf 7.9. Bij de systeemvarianten A en B wordt de Klimaatcascade[®] gebruikt om deze vochtigheid te realiseren. Hierbij moet in principe worden voorkomen dat de RV_i hoger wordt dan 40%. Het Mollierdigram figuur 13.1 laat zien dat bij een ruimtetemperatuur van 20°C en een RV_i van 40% de absolute luchtvochtigheid $\approx 5,8 \text{ g.kg}^{-1}$ bedraagt. Als de relatieve vochtigheid bij uitrede van de Klimaatcascade[®] wordt gesteld op 90% is de maximum luchttemperatuur bij deze luchtvochtigheid $\approx 8^\circ\text{C}$ bij een enthalpie van $\approx 22,3 \text{ kJ.kg}^{-1}$

Als wordt uitgegaan van 30% RV in de ruimte is de absolute luchtvochtigheid $\approx 4,5 \text{ g.kg}^{-1}$. De maximum luchttemperatuur bij uitrede van de cascade is in dit geval $\approx 4^\circ\text{C}$ bij een enthalpie van $\approx 15,5 \text{ kJ.kg}^{-1}$.

Bij de navolgende analyses is de ontwerpconditie van de buitenlucht gesteld op $\theta_e = -10^\circ\text{C}$ bij een vochtinhoud $x = 1 \text{ g.kg}^{-1}$ en een enthalpie van $-7,5 \text{ kJ.kg}^{-1}$.



Figuur 12.1 –Ontwerpcondities Klimaatcascade[®] buiten het koelseizoen

12.4 Systeemvariant A: Verwarming in de Klimaatcascade[®] met warm sproeiwater

De intrede- en uittredecondities van de Klimaatcascade[®] zijn bij een ruimte RV van 30% conform paragraaf 12.3

- Intrede: $\theta_e = -10^\circ\text{C}$ $x_e = 1,0 \text{ g.kg}^{-1}$ $h_e = -7,5 \text{ kJ.kg}^{-1}$
- Uittrede: $\theta_{uit} = +4^\circ\text{C}$ $x_{uit} = 4,5 \text{ g.kg}^{-1}$ $h_{uit} = 15,3 \text{ kJ.kg}^{-1}$

Het benodigde thermisch vermogen per kg.s^{-1} lucht bedraagt

$$P_{th} = (h_{uit} - h_e) = (15,3 - (-7,5)) = 22,8 \text{ kW}$$

De water/luchtverhouding $R_{w/L}$ in een Klimaatcascade[®] wordt bepaald door het psychometrisch ontwerp voor de koelperiode en wordt voorlopig gesteld op respectievelijk

Gebouw/Klimaattype ALPHA: $R_{w/L} = 0,4 \text{ kg.kg}^{-1}$

Gebouw/Klimaattype BETA: $R_{w/L} = 1,4 \text{ kg.kg}^{-1}$

Het temperatuurtraject van het warme water volgt uit

$$\Delta\theta_w = \frac{P_{th}}{R_{w/L} * c} \quad [\text{K}]$$

(12.1)

Waarin $\Delta\theta_w$ = temperatuurtraject water [K]
 P_{th} = thermisch vermogen [kW]
 $R_{w/L}$ = water/luchtverhouding [-]
 c = soortelijke warmte water [kJ.kg⁻¹.K⁻¹]

Hieruit volgen de volgende temperatuurtrajecten

$$\text{ALPHA} \quad \Delta\theta_w = \frac{22,8}{0,4 * 4,18} = 13,6 \text{ K}$$

$$\text{BETA} \quad \Delta\theta_w = \frac{22,8}{1,4 * 4,18} = 3,9 \text{ K}$$

Afhankelijk van het sproeispectrum zal naar verwachting de uitgaande watertemperatuur iets boven de uitgaande luchttemperatuur liggen. Als voor dit temperatuurverschil $\approx 2,5 \text{ K}$ wordt aangehouden zijn de globale temperatuurtrajecten van het water

$$\text{ALPHA} \quad \theta_{w,in} = (13,6 + 4 + 2,5) \approx 20,1^{\circ}\text{C} - \theta_{w,uit} = (20,1 - 13,6) \approx 6,5^{\circ}\text{C}$$

$$\text{BETA} \quad \theta_{w,in} = (3,9 + 4 + 2,5) \approx 10,4^{\circ}\text{C} - \theta_{w,uit} = (10,4 - 3,4) \approx 7,0^{\circ}\text{C}$$

Het rekenalgoritme is weergegeven in tabel 12.1. Naast een RV_i van 40% is hierin ook de berekening voor $RV_i = 30\%$ aangegeven. Uitgaande van een RV van 90% bij uitrede van de cascade zou bij een enthalpie $h_e \geq 22,3 \text{ kJ.kg}^{-1}$ de relatieve vochtigheid in de ruimte hoger worden dan 40%, zie figuur 12.1. Dit is qua thermisch comfort geen probleem, maar een hogere relatieve vochtigheid brengt bepaalde risico's met zich mee –zie deelrapport (IV) paragraaf 7.9. Er zijn dan 2 mogelijkheden:

A1: Het sproeisysteem blijft in werking, waardoor de lucht adiabatisch wordt bevochtigd en gekoeld waarbij een hogere relatieve vochtigheid in de ruimte tot maximaal 60% wordt geaccepteerd. Dit zou kunnen worden voorkomen door het bevochtigingrendement te verlagen, hetgeen in principe mogelijk is door wijziging van het sproeispectrum, bijvoorbeeld door uitschakeling van één of meer sproeiers bij een multi-sproeiersysteem. In het kader van het onderzoek wordt deze optie niet verder onderzocht. De aerodynamische en hydraulische trek in het ventilatiesysteem – zie hoofdstuk 13- blijft bij dit systeem beschikbaar, maar het temperatuurtraject voor de externe naverwarming tot 18⁰C wordt groter en het hiervoor benodigde thermisch vermogen stijgt navenant. De door het sproeisysteem veroorzaakte adiabatische koeling moet immers worden gecompenseerd.

A2: Het sproeisysteem in de Klimaatcascade[®] wordt uitgeschakeld, waardoor deze alleen dienst doet als aanzuigkanaal voor de buitenlucht. De hydraulische trek in het ventilatiesysteem, een belangrijke drijvende kracht voor het luchttransport, is dan niet meer beschikbaar. De hulpventilator in de Klimaatcascade[®] –zie paragraaf 13.10- zal de ontbrekende aerodynamische en hydraulische trek moeten compenseren met in principe een groter elektrisch energiegebruik als gevolg.

Bij systeemvariant A1 vindt voorverwarming van de ventilatielucht plaats bij extreem lage temperaturen van het verwarmingsmedium en deze variant is daarmee een uitstekend voorbeeld van lage temperatuur

(LT)verwarming, geheel passend in het *Earth, Wind & Fire* concept. Het lijkt echter ook een kwetsbaar systeem, vooral door het risico van bevriezing van kleine waterdruppels, bijvoorbeeld in het geval van een ongelijkmatige luchtverdeling boven in de Klimaatcascade[®]. Het is in elk geval gewenst om uit te gaan van zo hoog mogelijke watertemperaturen met een inherent hogere relatieve vochtigheid in de ruimte. In het navolgende is daarom voor deze systeemvariant uitgegaan van een RV_i van 40%.

Het versproeien van warm water in lucht met een temperatuur beneden het vriespunt is in de klimaattechniek niet gebruikelijk. In koeltorens wordt dit wel gedaan, maar de temperaturen van het koelwater liggen hier met 25^0 à 30^0C iets hoger. Bovendien is bevriezing van koeltorens, ondanks noodverwarmingssystemen, geen zeldzaamheid. De Klimaatcascade[®] zal bij deze systeemvariant in elk geval van de nodige vorstbeveiligingen moeten worden voorzien.

In traditionele luchtwassers wordt de lucht eerst voorverwarmd en aansluitend adiabatisch gekoeld, waardoor bevriezingsgevaar wordt voorkomen. Dit systeem wordt in paragraaf 12.5 nader onderzocht.

In dit stadium van het onderzoek is het moeilijk een keus tussen de varianten A1 en A2 te maken. Systeemvariant A1, waarbij de Klimaatcascade[®] 100% van de tijd in bedrijf is, past het beste in het robuuste en energiezuinige Geo-Klimaatconcept[®], maar het risico op bevriezing van sproeiwater bij zeer lage buitentemperaturen verdient nader onderzoek. Zie hoofdstuk 17 –Fysieke Testopstelling.

symbool	eenheid	ALPHA		BETA		formule
$q_{m,l}$	$kg \cdot s^{-1}$	1,0		1,0		
θ_e	0C	-10^0		-10^0		
h_e	$kJ \cdot kg^{-1}$	-7,5		-7,5		
RV_i	%	30%	40%	30%	40%	
$\theta_{l,uit}$	0C	4^0	8^0	4^0	8^0	
x_{uit}	$g \cdot kg^{-1}$	4,5	5,8	4,5	5,8	
h_{uit}	$kJ \cdot kg^{-1}$	15,3	22,6	15,3	22,6	
P_{th}	kW	22,8	30,1	22,8	30,1	$= (h_{uit} - h_e)$
R_{RV}	-	0,4		1,4		
$\Delta\theta_w$	K	13,6	18,0	3,9	5,1	$= P_{th}/(r \cdot c)$
$\theta_{w,in}$	0C	$20,1^0$	$28,5^0$	$9,9^0$	15,5	
$\theta_{w,uit}$	0C	$6,5^0$	$10,5^0$	$6,5^0$	$10,5^0$	
P_{th}	$kW \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$	27,4	36,1	27,4	36,1	$= P_{th} \cdot \rho$

Tabel 12.1 - Rekenalgoritmes

In de onderste regel van de tabel is uit praktische overwegingen ook het thermisch vermogen aangegeven voor een volumestroom in $m^3 \cdot s^{-1}$.

De bedrijfsmodus van de Klimaatcascade[®] volgens systeemvariant A is aangegeven in tabel 12.2 en figuur 12.2.

$h_e - kJ \cdot kg^{-1}$	verwarming in de cascade met warm sproeiwater	naverwarming buiten de cascade	diabatische koeling	RV in de ruimte	h/a op basis van $\Sigma = 2500$ h/a	
					h/a	%
$\leq 22,3$	ja tot 8^0C	ja tot 18^0C	nee	40%	900	36%
$22,3 \rightarrow 36,0$	nee	ja tot 18^0C^*	nee	40% → 60%	825	33%
$\geq 36,0$	nee	ja tot 18^0C^*	ja	max. 60%	775	31%

Tabel 12.2 – Bedrijfswijze van de Klimaatcascade[®] systeemvariant A (* = zo nodig)

Figuur 12.3 geeft deze bedrijfsmodus weer in een andere context. De relatie tussen de buitentemperatuur en de luchtenthalpie in deze grafiek is ontleend aan NEN 5060:2008 –B2, waarbij de enthalpie is berekend met de formule uit Handboek Installatietechniek (ISSO 2002):

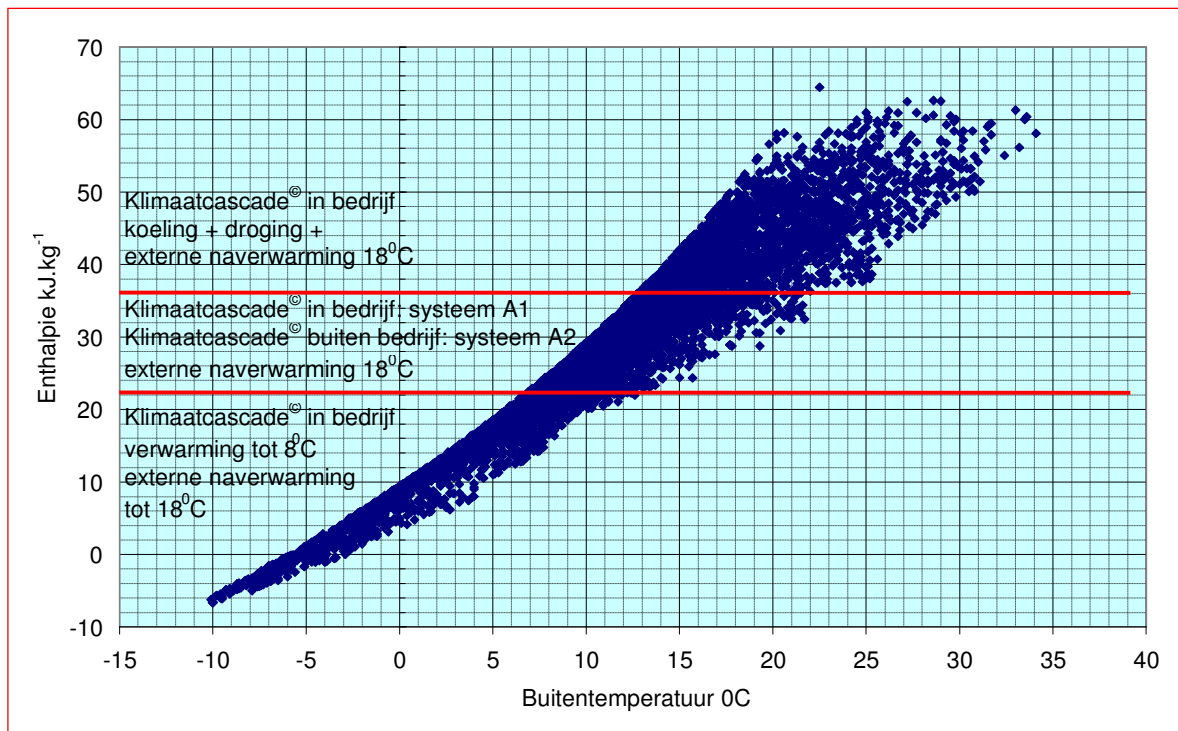
$$h_e = 1,006 \cdot \theta_e + x \cdot (2491 + 1,926 \theta_e)$$

(12.2)

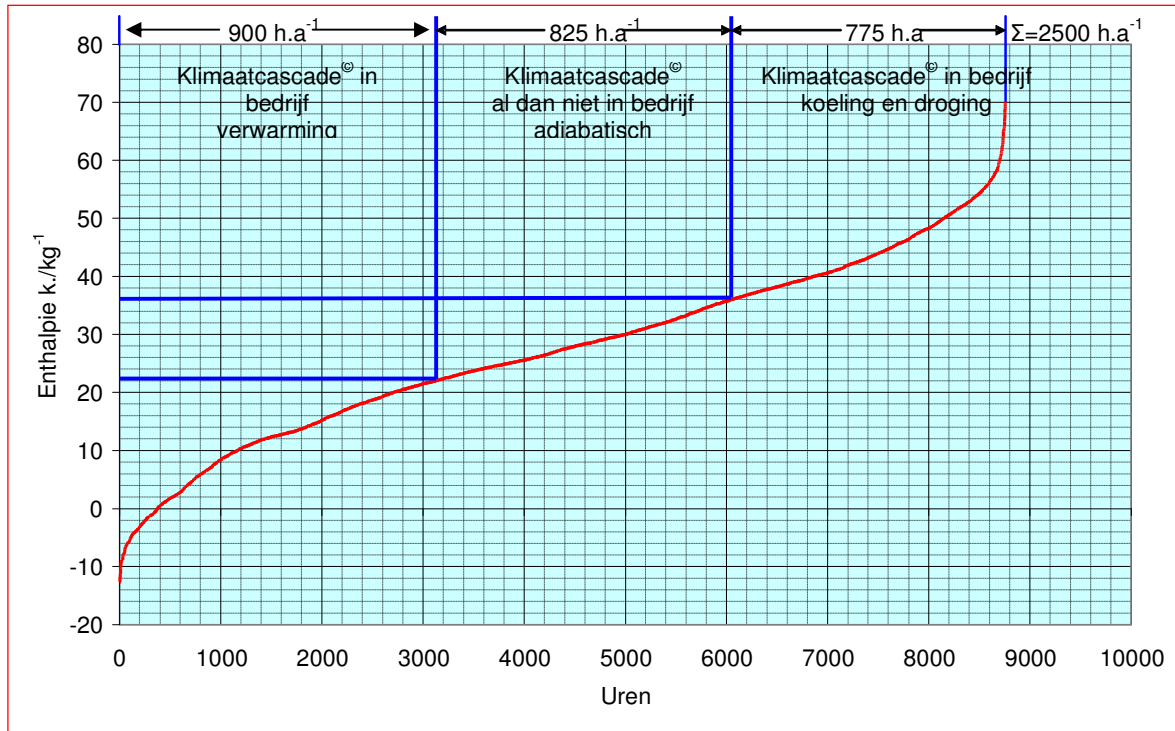
Waarin

h_e = enthalpie buitenlucht [kJ.kg⁻¹]
 θ_e = buitentemperatuur [°C]
 x = absoluut vochtgehalte [kg.kg⁻¹]

Figuur 13.3 laat het jaarlijks aantal bedrijfsuren voor de drie bedrijfsmodi zien van systeemvariant A in relatie tot de frequentieverdeling van de buitenluchtenthalpie.



Figuur 12.2 – Bedrijfsmodus Klimaatcascade[®] in relatie tot enthalpie en temperatuur van de buitenlucht
Systeemvariant A



**Figuur 12.3 – Jaarlijks aantal bedrijfsuren van de Klimaatcascade[©] voor de drie bedrijfsmodi
Systeemvariant A**

De installatietechnische implicaties van systeemvariant A zijn beperkt tot een warmtewisselaar in het sproeisysteem, waarmee het sproeiwater kan worden verwarmd tot $28,5^{\circ}\text{C}$ (ALPHA) respectievelijk $15,5^{\circ}\text{C}$ (BETA) met een capaciteit van $\approx 36,1 \text{ kW per m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ luchtverplaatsing. Deze warmtewisselaar kan worden aangesloten op de FiWiHeX installatie van de zonneshoorsteen annex back-up. Aangezien de lucht in dit systeem slechts wordt voorverwarmd tot $\approx 8^{\circ}\text{C}$ wordt naverwarming tot 18°C gerealiseerd buiten de Klimaatcascade[©] – zie paragraaf 12.6.

12.5 Systeemvariant B: Voorverwarming met adiabatische koeling in de Klimaatcascade[©]

In de klimaattechniek is deze zogenaamde dauwpuntsregeling een bekende techniek. De lucht wordt hierbij voorverwarmd en in de cascade adiabatisch gekoeld en bevochtigd. De temperatuurtrajecten zijn hierbij als volgt –zie figuur 12.1:

RV_i = 40%: voorverwarming tot $\approx 21^{\circ}\text{C}$ – adiabatische koeling tot $\approx 8^{\circ}\text{C}$

RV_i = 30%: voorverwarming tot $\approx 13^{\circ}\text{C}$ – adiabatische koeling tot $\approx 4^{\circ}\text{C}$

Afhankelijk van het sproeispectrum zal naar verwachting de uitgaande watertemperatuur iets boven de uitgaande luchttemperatuur liggen. Als voor dit temperatuurverschil $\approx 2,5 \text{ K}$ wordt aangehouden zijn de globale temperatuurtrajecten van het water bij RV_i = 40%:

ALPHA $\theta_{w,in} = (13,6 + 8 + 2,5) \approx 24,1^{\circ}\text{C}$ - $\theta_{w,uit} = (24,1 - 13,6) \approx 10,5^{\circ}\text{C}$

BETA $\theta_{w,in} = (3,9 + 8 + 2,5) \approx 14,4^{\circ}\text{C}$ - $\theta_{w,uit} = (14,4 - 3,4) \approx 11,0^{\circ}\text{C}$

Het rekenalgoritme is weergegeven in tabel 13.2. Naast een RV_i van 40% is hierin ook de berekening voor RV_i = 30% aangegeven.

Uitgaande van een RV van 90% bij uitrede van de cascade zou bij een enthalpie $h_e \geq 22,3 \text{ kJ.kg}^{-1}$ de relatieve vochtigheid in de ruimte hoger worden dan 40%, zie figuur 12.1. Dit is qua thermisch comfort geen probleem, maar een hogere relatieve vochtigheid brengt bepaalde risico's met zich mee –zie deelrapport (IV) paragraaf 7.14. Er zijn dan, evenals bij systeemvariant A, 2 mogelijkheden:

B1: Het sproeisysteem blijft in werking, waardoor de lucht adiabatisch wordt bevochtigd en gekoeld waarbij een hogere relatieve vochtigheid in de ruimte tot maximaal 60% wordt geaccepteerd. Dit zou kunnen worden voorkomen door het bevochtigingrendement te verlagen, hetgeen in principe mogelijk is door wijziging van het sproeispectrum, bijvoorbeeld door uitschakeling van één of meer sproeiers bij een multi-sproeiersysteem. In het kader van het onderzoek wordt deze optie niet verder onderzocht..

De aerodynamische en hydraulische trek in het ventilatiesysteem blijft bij dit systeem beschikbaar, maar het temperatuurtraject voor de externe naverwarming tot 18⁰C wordt groter en het hiervoor benodigde thermisch vermogen stijgt navenant. De door het sproeisysteem veroorzaakte adiabatische koeling moet immers worden gecompenseerd.

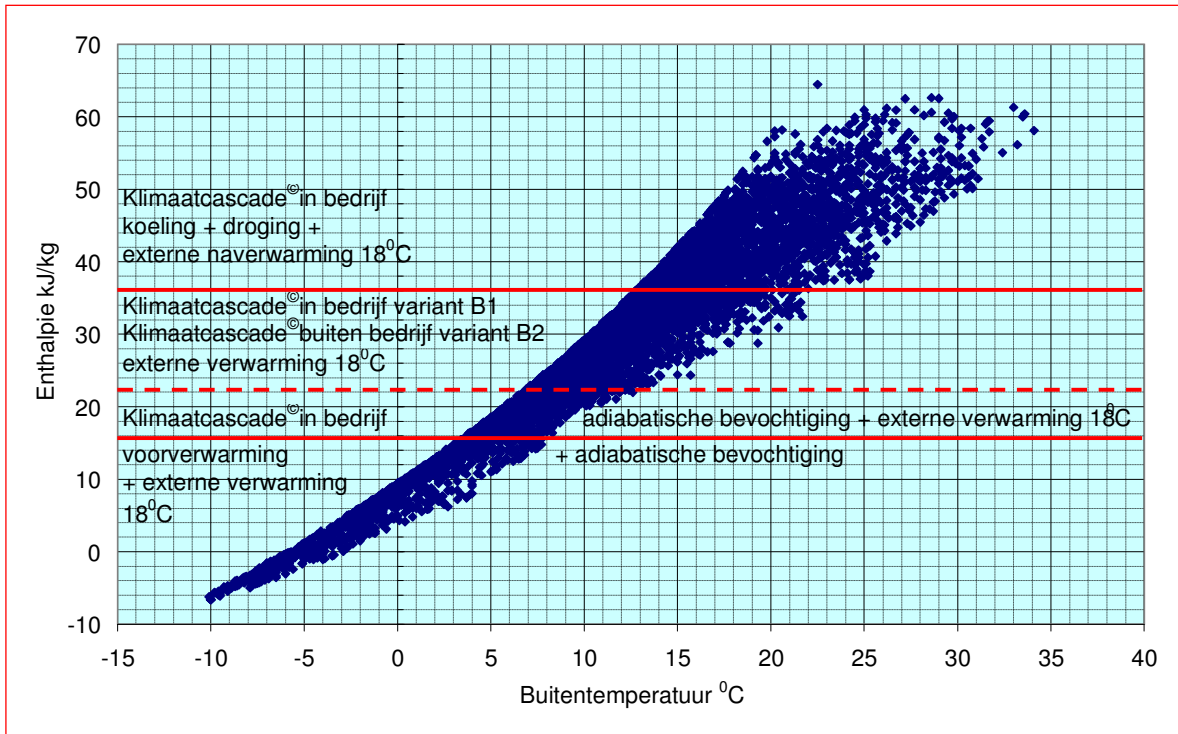
B2: Het sproeisysteem in de Klimaatcascade[©] wordt uitgeschakeld, waardoor deze alleen dienst doet als aanzuigkanaal voor de buitenlucht. De aerodynamische en hydraulische trek in het ventilatiesysteem, een belangrijke drijvende kracht voor het luchttransport, is dan niet meer beschikbaar. De hulpventilator in de Klimaatcascade[©] –zie paragraaf 13.10- zal de ontbrekende aerodynamische en hydraulische trek moeten compenseren met in principe een groter elektrisch energiegebruik als gevolg.

Omdat systeemvariant B minder aantrekkelijk wordt geacht dan variant A wordt in het kader van het onderzoek ook geen keus tussen B1 en B2 gemaakt.

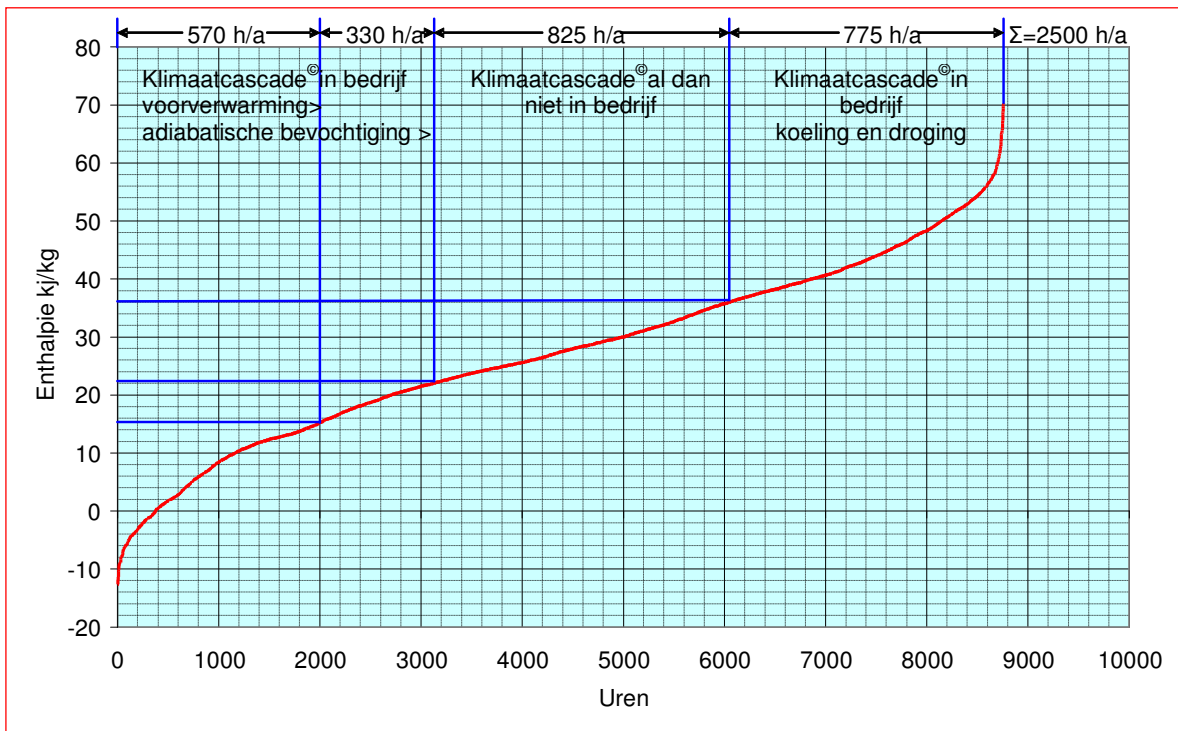
De bedrijfswijze van de Klimaatcascade[©] volgens dit systeem is aangegeven in tabel 12.3 en figuur 12.5

h _e –kJ.kg ⁻¹	voorverwarming	adiabatische koeling	naverwarming	diabatische koeling	RV in de ruimte	h/a op basis van Σ = 2500 h/a	
						h/a	%
≤ 15,5	ja	ja	ja tot 18 ⁰ C	nee	min. 30%	570	23%
15,5→22,3	nee	ja	ja tot 18 ⁰ C	nee	30%→40%	330	13%
22,3→36,0	nee	ja	18 ⁰ C*	nee	40%→60%	825	33%
≥ 36,0	nee	nee	18 ⁰ C*	ja	max. 60%	775	31%

Tabel 12.3 – Bedrijfswijze van de Klimaatcascade[©] systeemvariant B (* = zo nodig)



Figuur 12.4 – Bedrijfsmodus Klimaatcascade[®] in relatie tot enthalpie en temperatuur van de buitenlucht Systemvariant B



Figuur 12.5 – Jaarlijks aantal bedrijfsuren van de Klimaatcascade[®] voor de vier bedrijfsmodi Systemvariant B

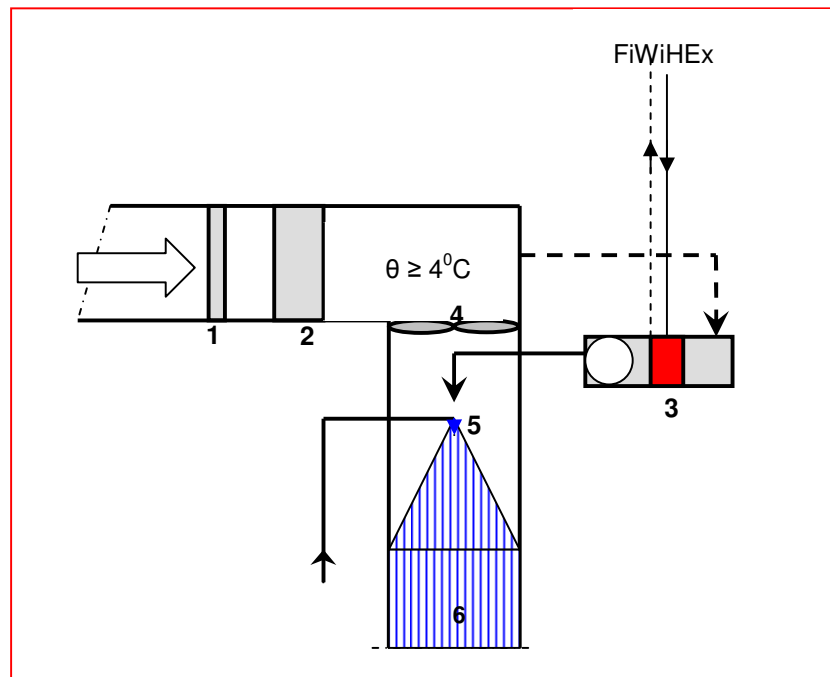
De installatietechnische implicaties van systeemvariant B bestaan uit in hoofdzaak uit een installatie voor het voorverwarmen van de lucht tot 13^oC. Dit is niet alleen psychometrisch noodzakelijk maar ook gewenst om bevriezingsgevaar van het sproeisysteem te verminderen.

Het traditionele systeem van luchtverwarming met behulp van een verwarmingsbatterij in de luchtstroom kan in het Geo-Klimaatconcept niet worden toegepast omdat dit teveel drukverlies zou geven. De lucht moet daarom worden verwarmd met een buiten de luchtstroom geplaatste verwarmingsunit voorzien van ventilator en verwarmingsbatterij, die is aangesloten op de FiWiHEX warmtewisselaar van de zonneshoорsteen - zie deelrapport (I) “De Zonneshoорsteen” paragraaf 19.6. De lucht wordt hierbij met hoge snelheid via straalpijpen in de Klimaatcascade[®] geblazen, waardoor een goede menging plaatsvindt en tevens aerodynamische trek wordt opgewekt.

Figuur 13.6 geeft één en ander schematisch weer.

Verklaring

1. Grof voorfilter in de overdrukkamer (facultatief);
2. Elektrostatisch filter (facultatief)
3. Luchtverwarmingskast met verwarming uit de FiWiHEX installatie in de zonneshoорsteen
4. Hulpventilator
5. Sproeisysteem
6. KLIMAATCASCADE



Figuur 12.6– Voorverwarming van de lucht bij systeemvariant B

Het thermisch vermogen dat nodig is om lucht te verwarmen wordt berekend met de formule

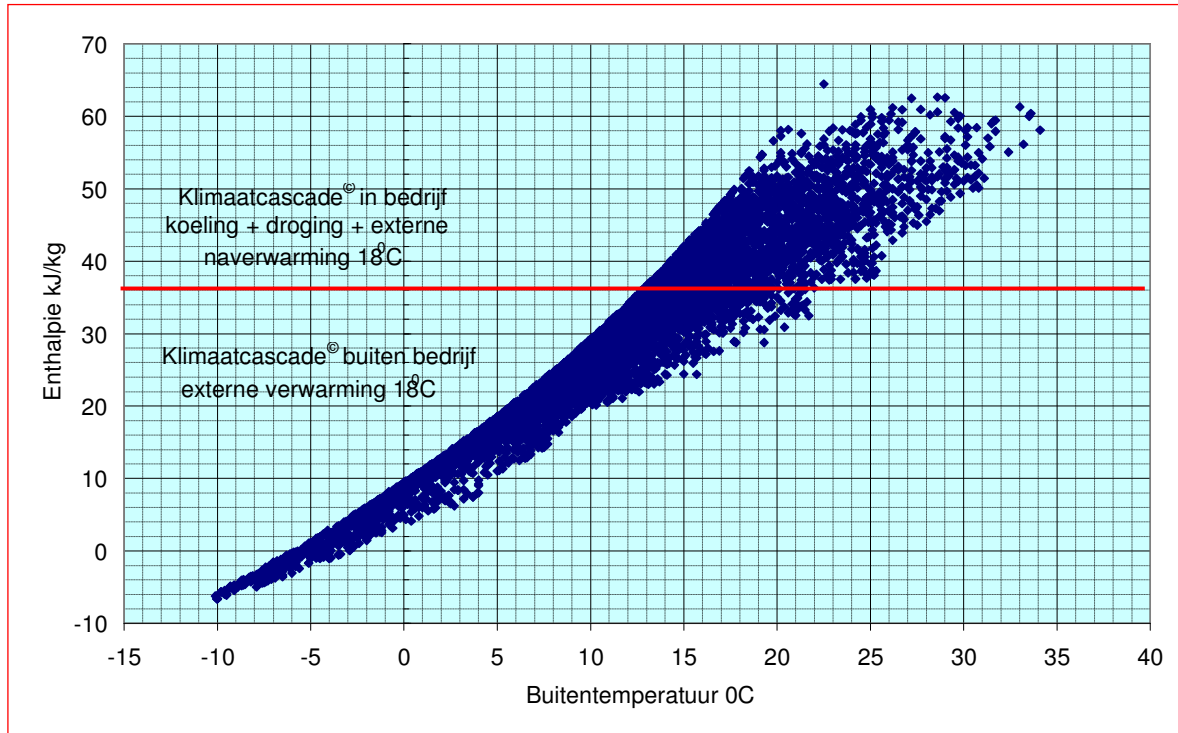
$$P = q_v \cdot \rho \cdot c \cdot (\theta_e - \theta_t) \quad (12.3)$$

Waarin	P	=	vermogen	[kW]
	q_v	=	volumestroom	[m ³ .s ⁻¹]
	ρ	=	dichtheid van lucht	[kg.m ⁻³] -(1,2 bij 20 ^o C)
	c	=	soortelijke warmte	[kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹] -(1,007 bij 20 ^o C)
	θ_e	=	buitentemperatuur	[^o C]
	θ_t	=	toevoertemperatuur	[^o C]

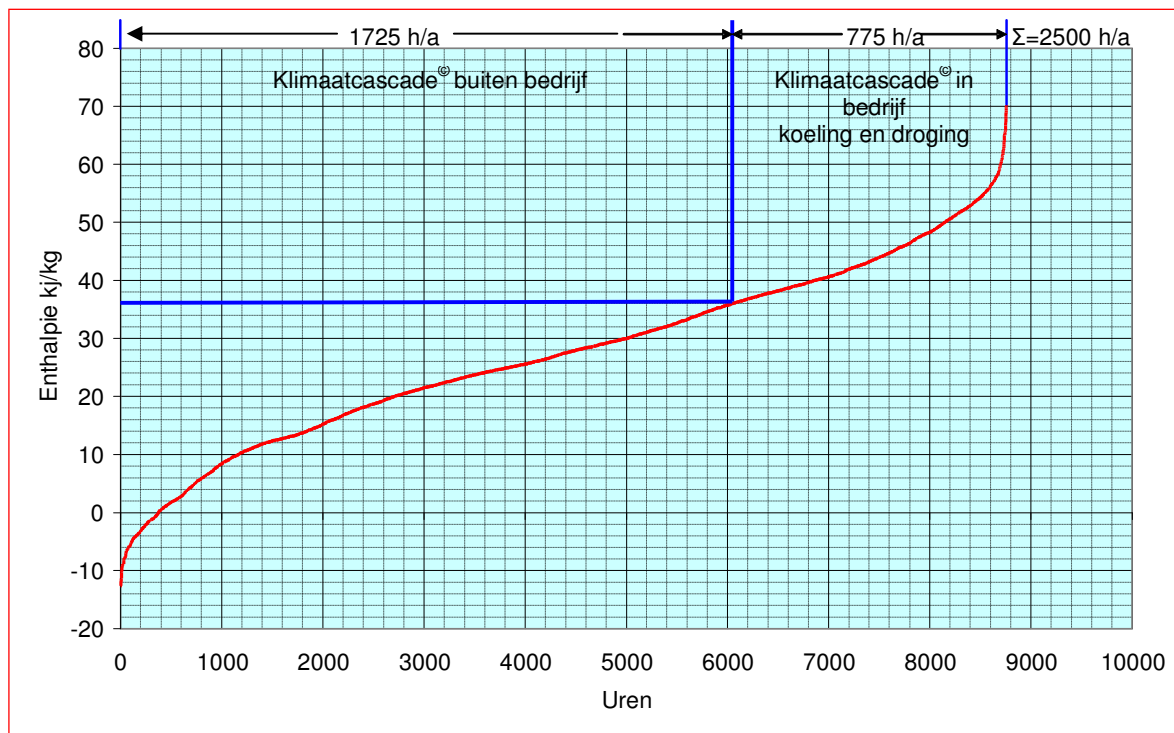
Bij een buitentemperatuur θ_e van -10^oC is voor een volumestroom q_v van 1 m³.s⁻¹ (bij 20^oC) en verwarming tot 21^oC een vermogen nodig van $P_1 = 1,0 \cdot 1,2 \cdot 1,007 \cdot [21 - (-10)] = 37,5$ kW. Aangezien de lucht in dit systeem slechts wordt voorverwarmd tot $\approx 8^o$ C moet naverwarming tot 18^oC worden gerealiseerd buiten de Klimaatcascade[®] – zie paragraaf 12.6

12.6 **Systeemvariant C: Externe verwarming buiten de Klimaatcascade[®]**

De bedrijfswijze van de Klimaatcascade[®] volgens dit systeem is aangegeven in de figuren 12.7 en 12.8



Figuur 12.7 – Bedrijfsmodi Klimaatcascade[®] in relatie tot enthalpie en temperatuur van de buitenlucht Systeemvariant C



Figuur 12.8 – Jaarlijks aantal bedrijfsuren van de Klimaatcascade[®] voor de twee bedrijfsmodi
Systeemvariant B

12.7 Naverwarming

Bij elk van de 3 systeemvarianten A, B en C moet de lucht buiten de Klimaatcascade[®] worden verwarmd tot de toevoertemperatuur van $\approx 18^{\circ}\text{C}$. Bij systeem C is dit tevens de hoofdverwarming; bij de systemen A en B wordt de capaciteit gebaseerd op naverwarming.

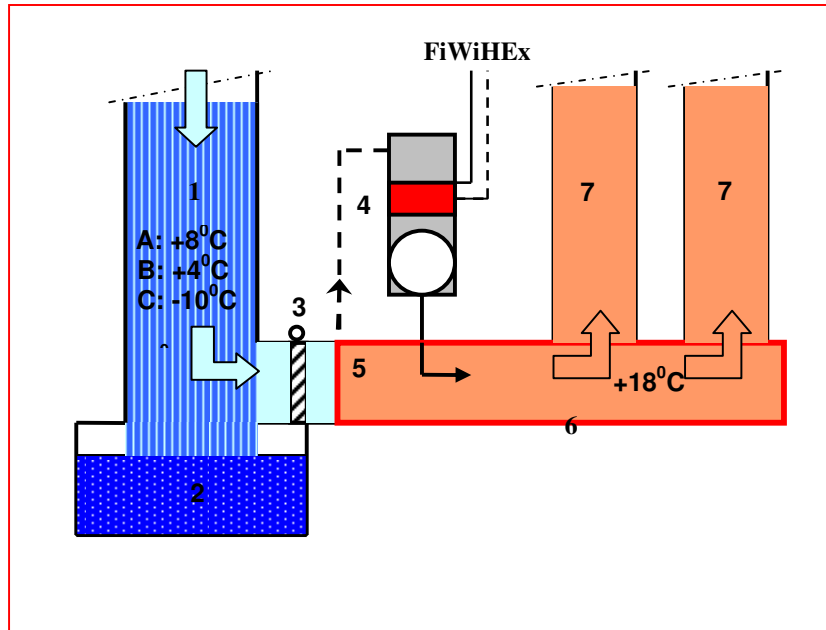
(Na)verwarming van de lucht kan in principe op de volgende manieren worden gerealiseerd zie figuur 12.9:

- Door een buiten de luchtstroom geplaatste verwarmingsunit voorzien van ventilator en verwarmingsbatterij. In principe kan hiermee tevens enige aerodynamische trek worden gerealiseerd. Optioneel kan luchtbevochtiging worden opgenomen.
- Vloer- plafond- en wandverwarming van het toevoerplenum.
- Een combinatie van lucht- en wandverwarming; zie tabel 12.4.

Beide installaties kunnen worden aangesloten op de FiWiHEX warmtewisselaar van de zonneshoorsteen, een energie-efficiënte oplossing - zie deelrapport (I) “De Zonneshoorsteen” paragraaf 19.6.

Verklaring

- 1 Klimaatcascade[®]
(buiten het koelseizoen niet altijd in bedrijf)
- 2 Waterbassin (afgetapt bij Klimaatcascade[®] buiten bedrijf)
- 3 Regelklep
- 4 Luchtverwarmingskast aangesloten op de FiWiHEX installatie in de zonneshoorsteen
- 5 Drukplenum
- 6 Wandverwarming aangesloten op de FiWiHEX installatie
- 7 Stijgschachten



Figuur 12.9 – (Na)verwarming ventilatielucht op 18^oC

Bij de systemen A en B zou de capaciteit voor naverwarming van de lucht mogelijkerwijs door wandverwarming kunnen worden gedekt; zie tabel 12.4. Als de convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt wordt gesteld op $5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, is de capaciteit van een dergelijk systeem bij een gemiddeld temperatuurverschil tussen lucht en wanden van 25K ca 125 W.m^{-2} . Voor een ventilatiecapaciteit van $1 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ zou dan de in tabel 12.4 vermelde wandoppervlak beschikbaar moeten zijn. In hoeverre dit een reële optie is kan pas in het ontwerpstadium worden beoordeeld, waarbij het temperatuurtraject van de lucht nader kan worden bepaald op basis van het beschikbare oppervlak.

Systeem	$\theta_{in} - ^\circ\text{C}$	$\theta_{uit} - ^\circ\text{C}$	Verwarming $\text{kW.m}^{-3}.\text{s}^{-1}$			Wandopp. $\text{m}^2.\text{m}^{-3}.\text{s}^{-1}$
			lucht	wand	totaal	
A	+8 ^o	18 ^o	--	12,1	12,1	96,8
B	+4 ^o	18 ^o	--	16,9	16,9	135,2
C	-10 ^o	18 ^o	21,8	12,1	12,1	96,8

Tabel 12.4 – Naverwarming van de lucht op 18^oC

12.8 Thermische trek

Bij de systemen A en B wordt de lucht in de Klimaatcascade[®] verwarmd waardoor hierin een ongewenste opwaartse thermische trek ontstaat. Deze moet worden gecompenseerd door winddruk, neerwaartse aerodynamische en hydraulische trek, opwaartse thermische trek in het luchttoevoersysteem, de hulpventilator of door een combinatie hiervan.

Bij systeem A is onder winter-ontwerpcndities de gemiddelde temperatuur in de Klimaatcascade[®] bij een rechtlijnig temperatuurverloop $\theta_{kc} \approx [(-10^0+8^0)/2] \approx -1^0\text{C}$, waardoor ten opzichte van de buitentemperatuur een opwaartse thermische trek ontstaat van $\approx 1,5 \text{ Pa}$ per verdieping van 3,5 m.

Bij systeem B is bij dezelfde condities de gemiddelde temperatuur in de Klimaatcascade[®] $\theta_{kc} = [(21^0+8^0)/2] \approx 14,5^0\text{C}$, en de opwaartse thermische trek bedraagt $\approx 3,9 \text{ Pa}$ per verdieping.

Hier staan tegenover:

- De neerwaartse hydraulische trek, die , afhankelijk van het de luchtsnelheid, het koelwaterdebiet en het sproeispectrum in de Klimaatcascade[®], een aanzienlijke positieve bijdrage kan leveren; zie paragraaf 13.4.
- De voorshands nog onbekende neerwaartse aerodynamische trek, die echter vermoedelijk slechts een geringe positieve bijdrage zal kunnen leveren; zie paragraaf 13.3.
- De opwaartse thermische trek in de toevoerschacht(en), die bij een temperatuur van 18⁰C ten opzichte van de buitenlucht ≈ 4,4 Pa per verdieping bedraagt en hiermee de opwaartse trek in de Klimaatcascade[®] kan compenseren; zie paragraaf 13.6

Het gebruik van de Klimaatcascade[®] voor luchtverwarming en bevochtiging in de winter gaat dus ten koste van de beschikbare drukken voor de natuurlijke ventilatie. In hoofdstuk 13 wordt hier verder op ingegaan.

12.9 Continuïteit systeemdruk

In vergelijking met de onzekere aerodynamische trek en de met de seizoenen wisselende thermische trek levert de hydraulische trek een substantiële en constante bijdrage aan het drukverschil waarop het luchttransportsysteem kan worden ontworpen; zie paragraaf 13.4.

Als de Klimaatcascade[®]buiten het koelseizoen niet in bedrijf is (systeemvariant A2 en B2) is de door het sproeisysteem opgewekte hydraulische trek ook niet beschikbaar. De hulpventilator zal dit moeten compenseren, maar het elektrisch energiegebruik neemt daardoor toe.

In hoofdstuk 13 wordt dit aspect nader onderzocht.

12.10 Luchtwaterfunctie

De luchtwaterfunctie van de Klimaatcascade[®] –zie paragraaf 5.3- is uiteraard alleen beschikbaar als het sproeisysteem in bedrijf is. Bij de systeemvarianten A2 en B2 is deze functie gedurende 33% van de bedrijfstijd niet actief (zie figuur 12.3 en 12.5) en bij systeem C zelfs 69% (zie figuur 12.8).

Bij alle drie systemen A, B en C is het sproeisysteem tijdens het koelseizoen actief. Omdat in warme zomermaanden de luchtkwaliteit vaak het slechts is, denk bijvoorbeeld aan zomersmog, is het belang van de luchtwaterfunctie in dit seizoen het grootst. Het niet in bedrijf zijn van het sproeisysteem bij de systeem varianten A2 en B2 in tussenseizoen hoeft, gezien de beperkte functie voor de luchtreiniging, in principe geen groot probleem voor de luchtkwaliteit op te leveren.

12.11 Legionellapreventie

Om het risico op de ontwikkeling van de legionellabacterie in langdurig stilstaand water te voorkomen zijn de veiligste opties:

- het sproeisysteem in de Klimaatcascade[®] zo lang mogelijk in bedrijf te houden –systeemvarianten A1 en B1;
- het buiten bedrijf nemen en volledig aftappen van het sproeisysteem buiten het koelseizoen –systeem C.

12.12 Condensrisico

Bij het gebruik van de Klimaatcascade[®] buiten het koelseizoen moet aandacht worden geschonken aan eventueel condensrisico op uitwendige scheidingsconstructies.

Bij de beoordeling van het condensrisico van bouwkundige constructies kan gebruik worden gemaakt van de temperatuurfactor of f -waarde. Deze factor, die als een karakteristieke eigenschap van een constructie moet worden beschouwd, wordt als volgt gedefinieerd (Handboek Installatietechniek 2002):

$$f = \frac{\theta_{i,opp} - \theta_{e,lucht}}{\theta_{i,lucht} - \theta_{e,lucht}} \quad [-] \quad (12.1)$$

Waarin

$$\theta_{i,opp} = \text{binnenoppervlaktetemperatuur} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$\begin{aligned}\theta_{e,lucht} &= \text{luchttemperatuur buiten} && [^{\circ}\text{C}] \\ \theta_{i,lucht} &= \text{luchttemperatuur binnen} && [^{\circ}\text{C}]\end{aligned}$$

Volgens artikel 3.26 van het Bouwbesluit dient de f-waarde voor kantoorgebouwen minimaal 0,5 te bedragen. Op basis van deze eis kan bij verschillende binnen- en buitencondities de te verwachten binnenoppervlaktetemperatuur van een constructie worden bepaald.

Vervolgens kan worden getoetst of het dauwpunt van de binnenlucht niet hoger is dan $\theta_{i,o}$. Indien dit het geval is zal er sprake zijn van condensatie. Om schimmelgroei te voorkomen wordt vaak de stelregel gehanteerd dat de RV nabij een constructie niet langdurig hoger mag zijn dan 80 %. Dit kan inhouden dat het dauwpunt ten opzichte van $\theta_{i,o}$ moet worden verlaagd.

Bij wintercondities van $\theta_{i,lucht} = 20^{\circ}\text{C}$ en $\theta_{e,lucht} = -5^{\circ}\text{C}$ wordt met formule (12.1) bij de minimum temperatuurfactor uit het Bouwbesluit van $f = 0,5$ de binnenoppervlaktetemperatuur berekend op $\theta_{i,opp} = 7,5^{\circ}\text{C}$. Als in het grensvlak met een temperatuur van $7,5^{\circ}\text{C}$ wordt uitgegaan van een maximum RV = 80%, bedraagt de maximum vochtigheidsgraad van de lucht $x \approx 5,2 \text{ g.kg}^{-1}$. De maximum toelaatbare relatieve vochtigheid in de ruimte met $\theta_{i,lucht} = 20^{\circ}\text{C}$ is dan 35%.

De waterdampafgifte van personen bij een ruimtetemperatuur van 20°C en lichte kantoorarbeid is $\approx 36 \text{ g.h}^{-1}$. Bij een ventilatiedebiet van $50 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ per persoon komt dit overeen met $\Delta x \approx 0,6 \text{ g.kg}^{-1}$. De vochtigheidsgraad van de toevoerlucht mag dan $(5,2 - 0,6 =) 4,6 \text{ g.kg}^{-1}$ bedragen. Systemevariant A met $\text{RV}_i = 30\%$ levert dan geen probleem op –zie paragraaf 12.4 en tabel 12.1.

Voor woningbouw wordt in het Bouwbesluit een minimum temperatuurfactor $f = 0,65$ voorgeschreven. Bij dezelfde klimaatcondities $\theta_{i,lucht} = 20^{\circ}\text{C}$ en $\theta_{e,lucht} = -5^{\circ}\text{C}$ is de bijbehorende minimum binnenoppervlaktetemperatuur $\theta_{i,opp} = 11,25^{\circ}\text{C}$. Bij 80% RV is de maximum vochtigheidsgraad van de lucht $x \approx 6,7 \text{ g.kg}^{-1}$ en de maximum toelaatbare relatieve vochtigheid in de ruimte met $\theta_{i,lucht} = 20^{\circ}\text{C}$ is dan 45%. De vochtigheidsgraad van de toevoerlucht mag dan $(6,7 - 0,6 =) 6,1 \text{ g.kg}^{-1}$ bedragen. Systemevariant A met $\text{RV}_i = 40\%$ levert dan geen probleem op –zie paragraaf 12.4. en tabel 12.1.

Voor constructievlakken kan de temperatuurfactor eenvoudig worden berekend op basis van de warmteweerstand van de constructie. Het Bouwbesluit eist voor uitwendige scheidingsconstructies van kantoorgebouwen een warmteweerstand R_c van $2,5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Deze wordt gedefinieerd als (NEN 1068:2001):

$$R_c = \frac{1}{U} - R_{si} - R_{se}$$

Waarin

$$\begin{aligned}U &= \text{warmtedoorgangscoefficiënt van het vlak} && [\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}] \\ R_{si} &= \text{warmteovergangsweerstand ingaande warmtestroom} && [\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}] \\ R_{se} &= \text{warmteovergangsweerstand uitgaande warmtestroom} && [\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}]\end{aligned}$$

Dit betreft de warmteweerstand inclusief de overgangsweerstanden buiten en binnen. Voor scheidingsconstructies grenzend aan de buitenlucht worden forfaitaire waarden gehanteerd aangehouden van $R_{si} = 0,13$ en $R_{se} = 0,04$.

De binnenoppervlaktetemperatuur wordt berekend met de formule

$$\theta_{i,opp} = \theta_{i,lucht} - \left(\frac{R_{si}}{R_c + R_{si} + R_{se}} \right) * (\theta_{i,lucht} - \theta_{e,lucht})$$

Bij een $\theta_{i,lucht} = 20^{\circ}\text{C}$ en $\theta_{e,lucht} = -5^{\circ}\text{C}$ wordt $\theta_{i,opp}$ berekend op $18,8^{\circ}\text{C}$. Als in het grensvlak met een temperatuur van $18,8^{\circ}\text{C}$ wordt uitgegaan van een maximum RV = 80%, bedraagt de maximum vochtigheidsgraad van de lucht $\approx 11,0 \text{ g.kg}^{-1}$. De maximum toelaatbare relatieve vochtigheid in de ruimte met $\theta_{i,lucht} = 20^{\circ}\text{C}$ is dan 76%.

De temperatuurcoëfficiënt wordt bij deze conditie berekend op $f = 0,95$, dus zeer ruim boven de minimumwaarde van $f = 0,5$.

Thermische bruggen en meerdimensionale aansluitingen hebben in het algemeen een lagere temperatuur dan constructievlakken en zijn daardoor kwetsbaarder voor condensrisico. Er bestaan computerprogramma's om thermische bruggen te berekenen. NEN-EN-ISO 13788 (NNI 2011) geeft hiervoor rekenvoorschriften met o.a. de volgende uitgangspunten :

- Maandelijks berekening voor de kritische periode van oktober tot en met april;
- Voor elk van deze maanden wordt de maandgemiddelde buitentemperatuur gehanteerd.

Ook kan gebruik worden gemaakt van de SBR-referentiedetails of details van leveranciers met een attest, waarmee op eenvoudige wijze kan worden voldaan aan de eis van de f -waarde uit het Bouwbesluit.

Geconcludeerd kan worden dat gebruik van de Klimaatcascade[®] buiten het koelseizoen voor wat betreft condensrisico geen problemen behoeft op te leveren als wordt voldaan aan de minimum eis voor de temperatuurfactor uit het Bouwbesluit. Voor een robuuste bedrijfsvoering wordt aanbevolen hierbij uit te gaan van $f = 0,65$.

Bij toepassing van het Geo-Klimaatconcept[®] in bestaande gebouwen moet een zorgvuldig onderzoek worden uitgevoerd naar eventueel aanwezige thermische bruggen, en de mogelijkheden de bouwfysische kwaliteit hiervan te verbeteren naar het niveau van nieuwbouw. Als dit niet mogelijk is wordt aanbevolen systeemvariant B of C toe te passen.

12.12 Voorlopige conclusies m.b.t. de Klimaatcascade[®] buiten het koelseizoen

Voor de systeemvarianten A, B en C zijn de positieve (+) en de negatieve effecten (-) van het gebruik van de Klimaatcascade[®] buiten het koelseizoen met hun intuïtief bepaalde weegfactoren aangegeven in de beoordelingstabel 12.5.

Op grond hiervan lijken de systeemvarianten A1 en B1 de meest verstandige opties te zijn. De meest veilige is variant C. Variant A1 past het beste in het Geo-Klimaatconcept[®]. De negatieve thermische trek bij deze variant kan echter probleemloos worden gecompenseerd door neerwaartse hydraulische trek. Ervan uitgaande dat het bevroeringsrisico kan worden geëlimineerd verdient systeemvariant A1 in alle opzichten de voorkeur.

Beoordelingsaspect	De Klimaatcascade [®] buiten het koelseizoen					Weegfactor
	Systeem A1	Systeem A2	Systeem B1	Systeem B2	Systeem C	
Energiegebruik	+	+/-	+/-	+/-	+	2
Eenvoud	+	+	-	-	+	2
Luchtbevochtiging	+	+	+	+	-	2
Bevroeringsgevaar	-	+	+	+	+	2
Thermische trek	-	-	-	-	+	1
Aerodynamische trek	+	-	+	-	-	1
Hydraulische trek	+	-	+	-	-	3
Luchtwaterfunctie	+	-	+	-	-	1
Legionellapreventie	+	-	+	-	+	2
Continuïteit systeemdruk	+	-	+	-	-	3
Condensrisico	+	+	+	+	+	3
Totaalscore	10+/3-	10+/9-	18+/4-	8+/11-	12+/7-	19

Tabel 12.5 – Beoordelingstabel systeemvarianten A, B en C

Earth, Wind & Fire – Airconditioning zonder Ventilatoren
(III) Onderzoek Geo-Klimaatconcept[®]

13. LUCHTVERPLAATSING EN -REGELING

13.1 Samenvatting

Om de gewenste luchtverplaatsing in een gebouw tot stand te brengen beschikt het Geo-Klimaatconcept[®] concept over verschillende drijfkrachten. Externe drijfkracht wordt geleverd door de wind, die via het Ventecdak[®] positieve drukken kan leveren voor de luchttoevoer en, in combinatie met de zonneshoorsteen, negatieve drukken voor de luchtafvoer - zie deelrapport (I) “Natuurlijke Ventilatie en Wind”. Interne drijfkrachten binnen het Geo-Klimaatconcept[®] zijn de aerodynamische trek, de hydraulische trek en de thermische trek in de Klimaatcascade[®]. De combinatie van externe en interne drijfkrachten moet gedurende een groot deel van de bedrijfstijd in staat zijn de gewenste luchtverplaatsing in een gebouw te realiseren.

Met behulp van een dynamisch simulatiemodel in ESP-r worden in deelrapport (IV) “Binnenmilieu: Symbiose van Architectuur en Klimaattechniek” de potenties van het Geo-Klimaatconcept[®] in een case study gesimuleerd onder referentie klimaatcondities volgens NEN-EN 5060: 2008.

Aerodynamische trek is het sterkst bij de fijnste druppelspectra, vrijwel verwaarloosbaar bij de grofste spectra en sterk afhankelijk van de sproeidruk, de sproeihoek en de geometrische verhoudingen van de Klimaatcascade[®]. In vergelijking met de hydraulische en de thermische trek is de invloed op het functioneren van de Klimaatcascade[®] gering.

Hydraulische trek¹¹ is een krachtige “luchtbeweger”, en voor het functioneren van een Klimaatcascade[®] van dominant belang. Opvallend is dat in de literatuur geen informatie over dit fenomeen te vinden is. Bij Klimaatcascades[®] voor adiabatische koeling (*Passive Draught Evaporative Cooling PDEC*) – zie hoofdstuk 7 is de strategie gericht op maximale verdamping van de waterdruppels, waarbij uiteraard geen hydraulische trek optreedt.

Thermische trek is alleen nuttig voor het functioneren van een Klimaatcascade[®] als deze benedenwaarts is gericht, dus in de koelperiode. Als in de stookperiode en de tussen seizoenen de lucht in de Klimaatcascade[®] wordt verwarmd is de opwaarts gerichte thermische trek ongewenst. Dit effect kan door hydraulische trek worden gecompenseerd, waardoor onder alle omstandigheden een positieve luchtbeweging in het ventilatiesysteem kan worden gerealiseerd.

Natuurlijke drijfkrachten zijn naar hun aard wisselvallig en tevens afhankelijk van de vorm, de hoogte en de stedenbouwkundige context van het gebouw. Er kan onder omstandigheden een tekort aan ventilatiecapaciteit ontstaan, maar evengoed een surplus. Een tekort zal worden gecompenseerd met behulp van een regelbare axiaalventilator in de Klimaatcascade[®]. Een surplus wordt voorkomen met behulp van regelbare kleppen in het luchttoevoersysteem. Het gewenste ventilatiedebiet zal onder alle omstandigheden kunnen worden gerealiseerd, waarbij wordt aangetekend dat bij gunstige weersomstandigheden vergroting van de ventilatiecapaciteit in principe mogelijk is zonder consequenties voor ventilatorenergie en ventilatiegeluid. Dit geeft het natuurlijk werkende Geo-Klimaatconcept[®] in vergelijking met mechanische ventilatie een bijzonder voordeel.

13.2 Winddruk

Via de Bernoulli-injector van het Ventecdak[®] kan in principe een aanzienlijke positieve winddruk aan de Klimaatcascade[®] worden geleverd - zie deelrapport (II) “Natuurlijke Ventilatie en Wind”. Met behulp van CFD simulaties, gevalideerd met behulp van metingen in de windtunnel, is één en ander voor verschillende dakvormen en in een aantal stedenbouwkundige varianten onderzocht. De op basis van dit onderzoek berekende winddrukcoëfficiënten worden in het ESP-r simulatiemodel voor de case study gebruikt – Zie deelrapport (IV) “Binnenmilieu: Symbiose van Architectuur en Klimaattechniek”.

¹¹ De term “hydraulische trek” is als zodanig door Bronsema voorgesteld

Negatieve winddrukken worden gebruikt voor het afzuigstelsel van gebouwen via de Venturi-ejector van het Ventecdak[®], de Zonneschoorsteen en de warmteterugwinning – Zie deelrapport (II) “Natuurlijke Ventilatie en Wind” en deelrapport (I) “Onderzoek Zonneschoorsteen”.

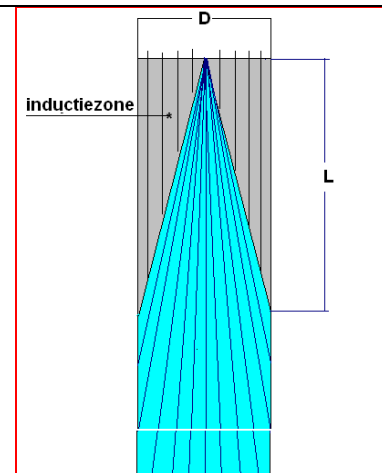
Ongewenste luchtstromingen van lucht uit het gebouw naar de omgeving en *vice versa*, met alle negatieve gevolgen hiervan voor het thermisch comfort en warmteverliezen, moeten worden voorkomen. Dit wordt bereikt door het interieur van een gebouw als neutrale zone uit te voeren waarin de luchtdruk in principe gelijk is aan de buitendruk. Door deze neutrale zone tussen het luchttoevoer- en het afzuigstelsel is het gebouw een gesloten stelsel.

Dit houdt in dat de overdruk van het toevoersysteem niet kan worden gebruikt om een tekort aan afzuigcapaciteit te compenseren. Evenmin kan de onderdruk van het afzuigstelsel worden gebruikt om een tekort aan toevoerventilatie te compenseren. Drukverliezen in het luchttoevoersysteem moeten worden gecompenseerd door positieve winddruk in de Bernoulli-injector + de drukopbouw in de Klimaatcascade[®]. Drukverliezen in het luchtafzuigstelsel moeten worden gecompenseerd door de thermische trek in de Zonneschoorsteen + negatieve winddruk in de Venturi-ejector.

13.3 Aerodynamische trek

Het aerodynamisch gedrag van vloeistofstralen is door enkele onderzoekers theoretisch geanalyseerd, maar experimentele validatie ontbreekt (Rothe P.H. e.a. 1977, Ghosh S. e.a. 1994). Het gaat hierin hoofdzakelijk over de straalontwikkeling en impulsverdracht in vrije stralen, zoals in toepassingen voor industrie, tuinbouw en brandbestrijding.

In een Klimaatcascade[®] is maar zeer beperkt sprake van een vrije straal; deze is beperkt tot de inductiezone direct na de sproeier. Zodra de druppels de wanden van de cascade hebben bereikt kan de straal zich niet verder meer uitbreiden en is de sproeizone beperkt tot de cascade. Omdat er dan geen lucht van buiten meer wordt geïnduceerd houdt de verdere ontwikkeling van de straal op en zijn de druppels alleen onderhevig aan de zwaartekracht en de luchtweerstand –zie figuur 13.1 en paragraaf 9.6.

<p>De lengte L van de inductiezone wordt bepaald door de sproeihoek Φ en de doorsnede van de Klimaatcascade[®]. D volgens de relatie</p> $L = \frac{0,5D}{\operatorname{tg}(\Phi/2)}$ <p>(13.1)</p> <p><u>Voorbeeld 14.1:</u> $D = 2 \text{ m}$ en $\Phi = 30^\circ$ – $L = 3,73 \text{ m}$</p> <p>De aerodynamische trek wordt door 4 factoren bepaald:</p> <ul style="list-style-type: none">▪ Het waterdebiet;▪ De initiële snelheid van de waterstraal;▪ Het sproeispectrum;▪ De sproeihoek Φ en de geometrie van de cascade.	 <p>Figuur 13.1 - Straalontwikkeling</p>
--	---

De hierboven genoemde referenties geven een gecompliceerde analytische benadering van het aerodynamische gedrag in de sproeizone op druppelniveau, echter zonder experimentele validatie. Ook de bibliografie van Klimaatcascade[®] voor adiabatische koeling –paragraaf 7.4- geeft nauwelijks aanknopingspunten met betrekking tot aerodynamische trek. Een complicatie is verder dat voor zover na te gaan alle onderzoek betrekking heeft op cascades met vrije uitloop, zonder noemenswaardige tegendruk.

De Klimaatcascade[®] in het Geo-Klimaatconcept[®] is daarentegen onderdeel van een luchtverdeelstelsel, waarbij in het toevoerplenum druk wordt opgebouwd ten behoeve van de verdere luchtdistributie in het gebouw. In hoeverre kan aerodynamische trek bijdragen aan deze drukopbouw? In tegenstelling tot een Klimaatcascade[®] met vrije uitmonding is de luchtsnelheid immers niet afhankelijk van de aerodynamische trek. De wind, de neerwaartse hydraulische en thermische trek en de hulpventilator zijn afzonderlijk en in combinatie dominant en bepalend voor de luchtsnelheid waarvoor de Klimaatcascade[®] wordt ontworpen. De bijdrage van de aerodynamische trek kan dan ook alleen maar worden gezien als een extra impuls of stimulus voor de verhoging van de positieve druk in de Klimaatcascade[®].

De aerodynamische trek in een Klimaatcascade[®] kan worden benaderd met behulp van de impulsvergelijking¹²

$$m \cdot \Delta w = F \cdot \Delta t \quad [\text{N} \cdot \text{s}]$$

(13.2)

Waarin

m	=	watermassa	[kg]
Δw	=	$w_i - w_t$	[m.s ⁻¹]
w_i	=	initiele druppelsnelheid	[m.s ⁻¹]
w_t	=	eindsnelheid druppels	[m.s ⁻¹]
F	=	krachtsuitwisseling	[N]
Δt	=	tijdverschil (w_i en w_t)	[s]

Als de druppels een hoge uitstroomsnelheid hebben, waarbij de initiële snelheid w_i hoger is dan de eindsnelheid w_t , kan hierdoor in theorie een extra druk worden gegenereerd van

$$\Delta p_{ae} = \frac{F}{A} = \frac{m}{A \cdot \Delta t} \cdot \Delta w = \frac{\Phi}{A} \cdot \Delta w \quad [\text{Pa}]$$

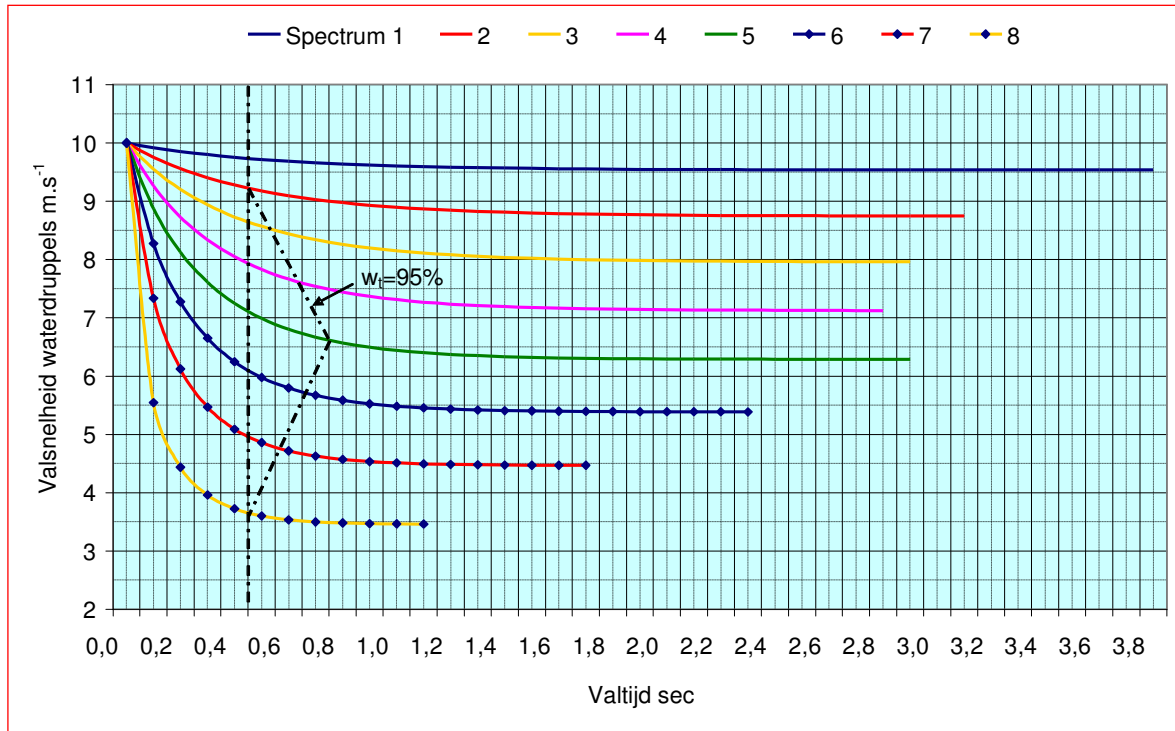
(13.3)

Waarin

Δp_{ae}	=	aerodynamische trek	[Pa]
F	=	doorsnede Klimaatcascade [®]	[m ²]
Φ	=	massastroomdichtheid water	[kg.s ⁻¹]

Figuur 13.2 geeft een beeld van de snelheidsontwikkeling van druppels in verschillende sproeispectra voor een initiële snelheid van 10 m.s⁻¹. Voor het fijnste sproeispectrum 8 is $w_i - w_t = (10 - 3,5 =) 6,5$ m/s.

¹² Met dank aan Lourens Aanen



Figuur 13.2 – Snelheidsontwikkeling waterdruppels in Klimaatcascade[®] bij $W_{Dr,0} = 10 \text{ m.s}^{-1}$

De massastroomdichtheid van het water is via de water/luchtverhouding $R_{W/L}$ gerelateerd aan het luchtdebiet. Voor een luchtdebiet van $q_v \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, overeenkomend met $\approx 1,2q_m \text{ kg.s}^{-1}$ is het waterdebiet voor respectievelijk

$$\text{ALPHA: } R_{W/L} = 0,4 \rightarrow \Phi_w = q_m * 0,4 * 1,2 = 0,48q_m \text{ kg.s}^{-1}$$

$$\text{BETA: } R_{W/L} = 1,4 \rightarrow \Phi_w = q_m * 1,4 * 1,2 = 1,68q_m \text{ kg.s}^{-1}$$

Het oppervlak A van de Klimaatcascade[®] voor een luchtdebiet van $q_v \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ is bij een luchtsnelheid van $2 \text{ m.s}^{-1} = 0,5q_v \text{ m}^2$.

Hieruit volgt de maximaal bereikbare aerodynamische trek voor respectievelijk

$$\text{ALPHA: } \Delta p_{ae} = \frac{0,48q_v}{0,5q_v} \cdot 6,5 = 6,24 \text{ Pa}$$

$$\text{BETA: } \Delta p_{ae} = \frac{1,68q_v}{0,5q_v} \cdot 6,5 = 21,8 \text{ Pa}$$

Voorwaarde hiervoor is dat tijdens de overgang van w_i naar w_t de straal zich vrij kan uitbreiden. Deze uitbreiding houdt op zodra de sproestraal de wanden van de cascade heeft bereikt, hetgeen het geval is na 0,5.....0,8 seconden, afhankelijk van de sproeihoek en het sproeispectrum; zie figuur 13.2. De hierin getekende lijnen $w_t = 95\%$ staan voor de tijd dat de sproestraal 95% van de eindsnelheid heeft bereikt.

Observatie van deze figuur leidt tot de volgende conclusies:

- Voor het meest grove spectrum 1 is het verschil tussen de initiële snelheid en de eindsnelheid van de druppels slechts $\approx 0,5 \text{ m.s}^{-1}$. De aerodynamische trek is dan verwaarloosbaar.
- Voor het fijnste spectrum 8 is het verschil tussen de initiële snelheid en de eindsnelheid van de druppels zoals hierboven aangegeven $\approx 6,5 \text{ m.s}^{-1}$. De gemiddelde snelheid in dit traject is $\approx 6,75 \text{ m.s}^{-1}$, hetgeen inhoudt dat de straal de wanden van de cascade bij een uitvoering volgens figuur 13.1 na $\approx (3,73/6,75) = 0,55$ seconden raakt, iets na het bereiken van de eindsnelheid. De boven berekende waarden van de aerodynamische trek zouden dan correct moeten zijn.

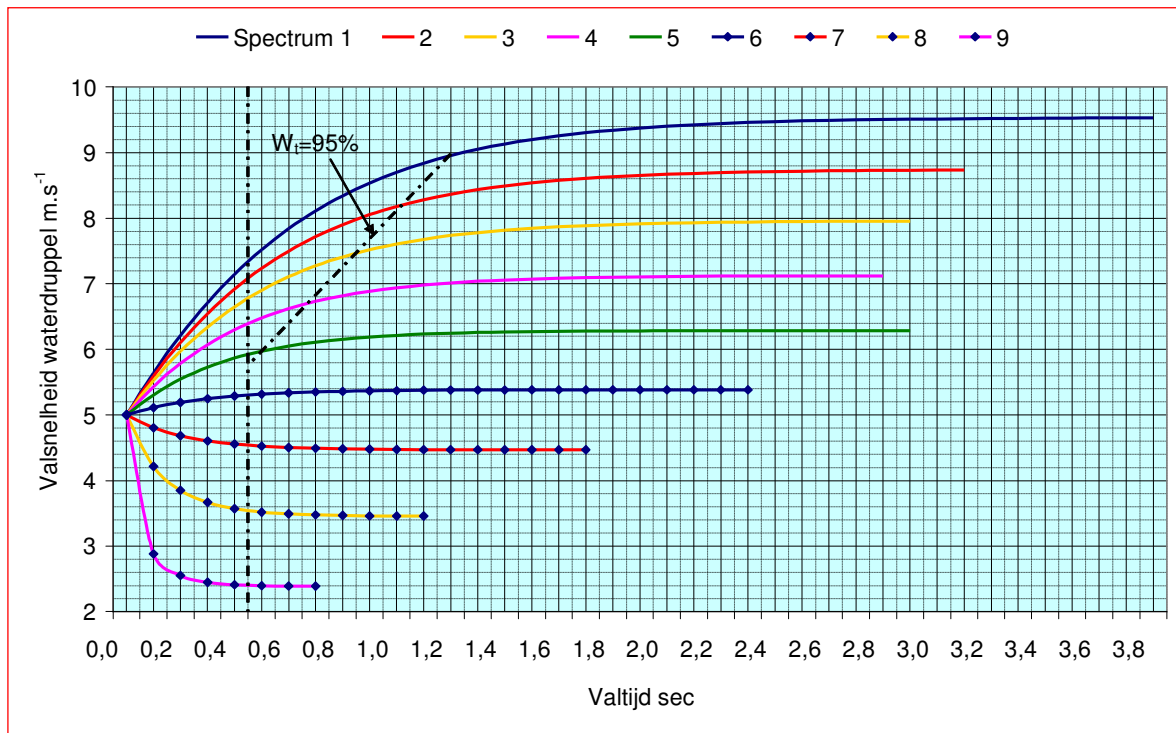
- Voor spectrum 5 is het verschil tussen de initiële snelheid en de eindsnelheid van de druppels zoals hierboven aangegeven $\approx (10-6,3=) 3,7 \text{ m.s}^{-1}$. De gemiddelde snelheid in dit traject $\approx 8,15 \text{ m.s}^{-1}$, hetgeen inhoudt dat de straal de wanden van de cascade bij een uitvoering volgens figuur 13.1 na $\approx (3,73/8,15=) 0,45$ seconden raakt, ruim voor het bereiken van de eindsnelheid. De aerodynamische trek moet dan ook kleiner zijn dan uit de berekening met formule (13.2) zou volgen.

De algemene conclusie moet luiden dat de aerodynamische trek het grootst is bij de kleinste druppelgrootte. Het verschil tussen de initiële snelheid en eindsnelheid is hierbij het grootst en tevens wordt de eindsnelheid bereikt voordat de wand wordt geraakt. De geometrische verhoudingen van de Klimaatcascade[©] en de sproeihoek zijn mede bepalende factoren.

Figuur 13.3 geeft een beeld van de snelheidsontwikkeling van druppels in verschillende sproeispectra voor een initiële snelheid van 5 m.s^{-1} . Voor het fijnste sproeispectrum 8 is $w_i - w_f = (5 - 2,5 =) 2,5 \text{ m/s}$. Hieruit volgt een maximaal bereikbare aerodynamische trek voor ALPHA: $\Delta P = 2,4 \text{ Pa}$ en BETA $8,1 \text{ Pa}$.

Voor de grovere sproeispectra is de eindsnelheid van de waterdruppels groter dan de initiële snelheid hetgeen eveneens aerodynamische trek zal opleveren. Hier is geen sprake van een omzetting van kinetische, maar van potentiële druppelenergie in luchtsnelheid. Door de kleinere gemiddelde snelheid van de druppels in hun val naar de eindsnelheid wordt de wand van de cascade minder snel bereikt en kan de aerodynamische trek beter tot ontwikkeling komen.

Voor het fijnste sproeispectrum 8 is $w_i - w_f = (5 - 3,5 =) 1,5 \text{ m/s}$. De aerodynamische trek is voor ALPHA $(1,5/6,5)*6,24 = 1,44 \text{ Pa}$ en voor BETA $(1,5/6,5)*21,8 = 5,0 \text{ Pa}$.



Figuur 11.3 – Snelheidsontwikkeling waterdruppels in Klimaatcascade[©] bij $W_{Dr,0} = 5 \text{ m.s}^{-1}$

13.4 Hydraulische trek¹³

Veronderstel een stilstaande luchtkolom, die gezien de aanwezigheid van een bodem gemiddeld ook niet zal gaan bewegen. In deze luchtkolom bewegen zich druppels naar beneden met een constante snelheid, die een functie is van de druppeldiameter, en bij grotere druppeldichtheid, door het ontstaan van turbulenties etc., ook van de hoeveelheid druppels. Bij een constant waterdebiet is de hoeveelheid water in 1 m³ lucht, de “waterdichtheid” ρ_{wk}

$$\rho_{wk} = \frac{\Phi_{dr}}{A \cdot w_{dr}} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

(13.3)

Waarin

$$\begin{aligned} \rho_{wk} &= \text{waterdichtheid in de lucht} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \\ \Phi_{dr} &= \text{waterdebiet} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \\ A &= \text{oppervlak van de kolom} \quad [\text{m}^2] \\ w_{dr} &= \text{druppelsnelheid} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \end{aligned}$$

Omdat de druppels een constante snelheid hebben is er evenwicht tussen de zwaartekracht op de druppels en de wrijvingskracht van de lucht. De totale kracht die door de druppels op 1 m³ lucht wordt uitgeoefend is gelijk aan het totale gewicht aan water in het volume ρ_{wk} . De druppels zorgen dan ook voor een toename van de drukgradiënt over de kolom, bovenop de normale statische drukgradiënt ten gevolge van het gewicht van de lucht van

$$\frac{dp}{dh} = \rho_{wk} \cdot g = \frac{\Phi_{dr}}{A \cdot w_{dr}} \cdot g \quad [\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}]$$

(13.4)

Waarin

$$g = \text{gravitatieversnelling} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$$

Dit is dus eigenlijk niet meer dan een toename van de dichtheid van het water / luchtmengsel ten opzichte van lucht. Bij afwezigheid van een bodem zal de lucht, als er tussen de onder- en de bovenopening van de kolom geen andere drukken bestaan, dan ook gaan bewegen.

De drukgradiënt is afhankelijk van het waterdebiet en de druppelgrootte; deze bepaalt immers de valsnelheid van de druppels. Bij een gelijk waterdebiet is er bij grotere druppels minder water in de luchtkolom aanwezig, waardoor de drukgradiënt kleiner is. Echter, bij gelijke hoeveelheid water in de kolom is de drukgradiënt onafhankelijk van de druppelgrootte.

Bij deze beschouwing is uitgegaan van een gelijkmatige verdeling van de druppels over het oppervlak van de kolom. Als dat niet het geval is ontstaan er in de kolom verschillen in drukgradiënten wat zal leiden tot circulaties binnen de kolom.

Deze beschouwing is wel op macroniveau; op microniveau zal onder de vallende druppels een stuwdruk ontstaan, en rond de druppels ten gevolge van afschuifsnellheden een lokale drukgradiënt. Vlak bij de druppel zal er een snelheid naar beneden ontstaan die gecompenseerd wordt door een omhoog gerichte snelheid iets verder van de druppel. In een referentiefraam, meebewegend met de gemiddelde luchtsnelheid, is de totale omhoog gerichte flux natuurlijk gelijk aan de neergaande flux.

Wat gebeurt er energetisch met de druppels in dit proces? Bij het verlaten van de sproeier hebben de druppels een hoeveelheid kinetische en potentiële energie. Als de druppels de constante eindsnelheid hebben bereikt, blijft de kinetische energie constant. De potentiële energie wordt bij kleine druppels door

¹³ Met dank aan Lourens Aanen

viskeuze krachten omgezet in warmte. Bij grotere druppels gebeurt dit uiteindelijk ook door het ontstaan van lokale wervelingen – kinetische energie van de lucht- die uiteindelijk ook zullen uitdoven en de lucht opwarmen.

Als de kolom aan de onderzijde niet gesloten is, zoals bij een Klimaatcascade[®], blijft deze beschouwing in principe onveranderd. De constante eindsnelheid van de druppels ten opzichte van de lucht blijft gelijk. De absolute valsnelheid van de druppels wordt in dit geval vermeerderd met de luchtsnelheid. Bij hetzelfde waterdebiet wordt de waterdichtheid dus kleiner. In formule

$$\rho_{wk} = \frac{\Phi_{dr}}{A.(w_{dr} + w_l)} \quad [\text{kg.m}^{-3}]$$

(13.5)

Waarin

$$w_l = \text{luchtsnelheid} \quad [\text{m.s}^{-1}]$$

En daardoor ook de drukgradiënt

$$\frac{dp}{dh} = \rho_{wk} \cdot g = \frac{\Phi_{dr}}{A.(w_{dr} + w_l)} \cdot g \quad [\text{Pa.m}^{-1}]$$

(13.6)

Het effect van turbulentie op de valsnelheid is hierbij niet in rekening gebracht.

De bovenstaande beschouwing geldt alleen voor het deel van de cascade waarin de druppels hun (constante) eindsnelheid hebben bereikt. In het gedeelte waarin dit niet het geval is leveren de druppels een extra kracht op de lucht, die afhankelijk is van de initiële snelheid van de druppels, de aerodynamische trek; zie paragraaf 13.3.

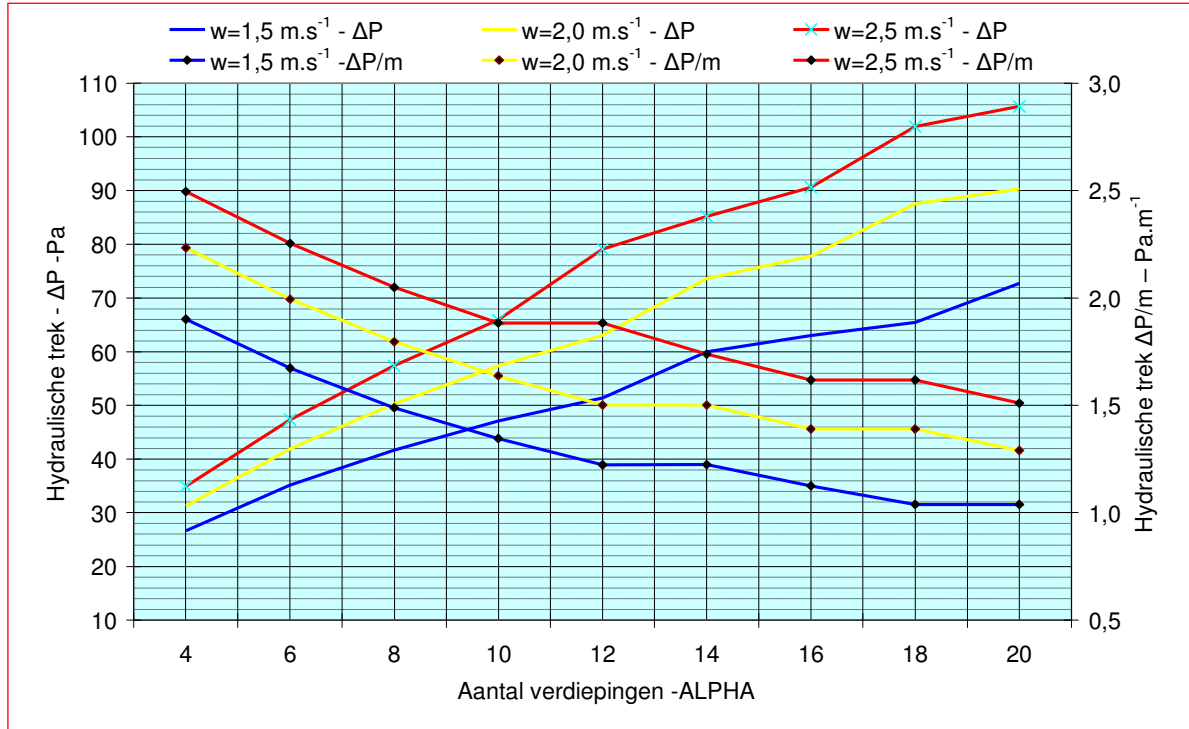
Met behulp van formule (13.6) en het rekenmodel hoofdstuk 10 is de hydraulische trek berekend voor gebouwen van 4 tot 20 verdiepingen bij luchtsnelheden van 1,5 – 2,0 en 2,5 m.s⁻¹. De berekeningen zijn gebaseerd op een netto vloeroppervlak nvo = 1.000 m² per verdieping en een ventilatiecapaciteit van 5 m³.m⁻².h⁻¹, betrokken op nvo.

Zie figuur 13.4 voor een gebouw/klimaatype ALPHA met R = 0,4 kg.kg⁻¹, en figuur 13.5 voor een gebouw/klimaatype ALPHA met R = 1,2...1,4. De combinaties van R_{w/L} en sproeispectrum zijn zodanig gekozen dat bij een intredeconditie van 28^oC – 55% RV een uittredetemperatuur wordt gerealiseerd van 20^oC voor ALPHA en 17^oC voor BETA. Zie tabel 13.2

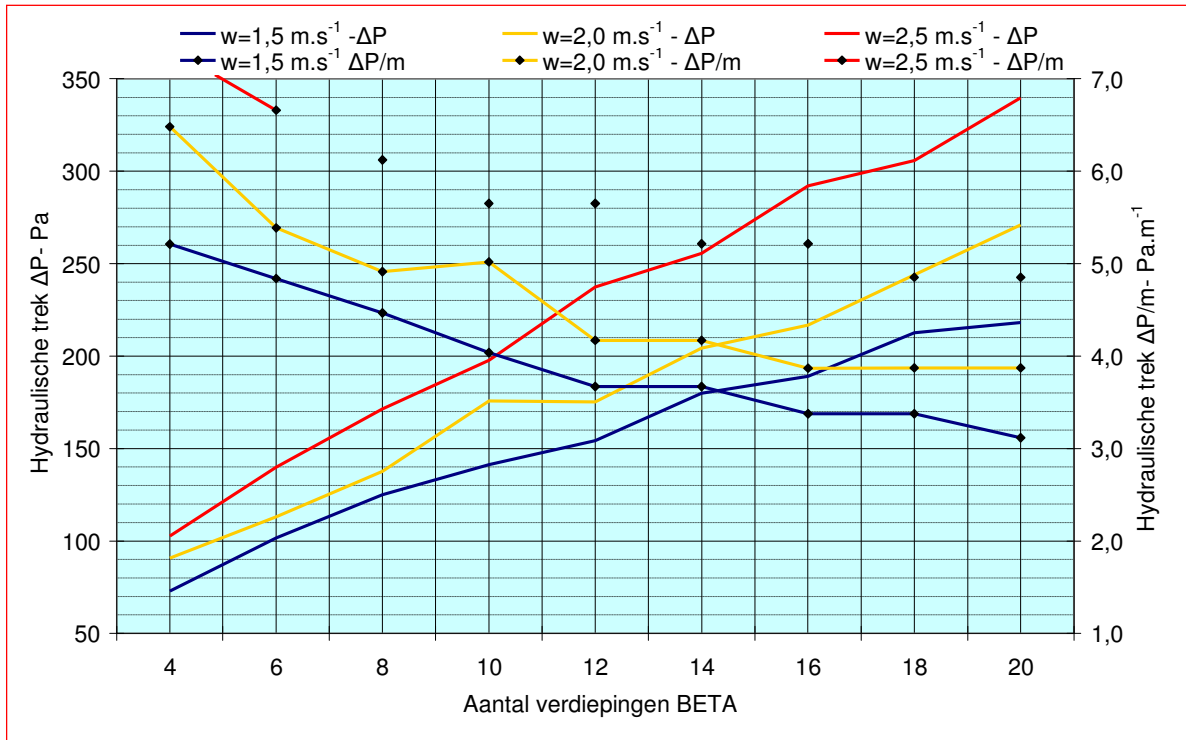
Verdiepingen	4	6	8	10	12	14	16	18	20
ALPHA -1,5 m.s ⁻¹									
R _{w/L} m.s ⁻¹	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Spectrum	7	6	5	4	3	3	2	1	1
ALPHA -2,0 m.s ⁻¹									
R _{w/L} m.s ⁻¹	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Spectrum	7	6	5	4	3	3	2	2	1
ALPHA -2,5 m.s ⁻¹									
R _{w/L} m.s ⁻¹	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Spectrum	7	6	5	4	4	3	2	2	1
BETA -1,5 m.s ⁻¹									
R _{w/L} m.s ⁻¹	1,4	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Spectrum	5	5	5	4	3	3	2	2	1
BETA -2,0 m.s ⁻¹									
R _{w/L} m.s ⁻¹	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2

Spectrum	6	5	4	3	2	2	1	1	1
BETA -2,5 m.s ⁻¹									
R _{w/L} m.s ⁻¹	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Spectrum	6	5	4	4	4	3	3	2	2

Tabel 13.2 – Water/Lucht verhoudingen R_{w/L} en sproeispectra als functie van aantal verdiepingen en luchtsnelheid in de Klimaatcascade[®].



Figuur 13.4 – Hydraulische trek in Klimaatcascade[®] als functie van aantal verdiepingen en luchtsnelheid ALPHA R=0,4 kg.kg⁻¹



Figuur 13.5 - Hydraulische trek in Klimaatcascade[®] als functie aantal verdiepingen en luchtsnelheid BETA - R=1,2....1,4 kg.kg⁻¹

Observatie van de figuren 13.5 en 13.6 levert de volgende conclusies op:

- Verhoging van de luchtsnelheid brengt een kleinere doorsnede van de Klimaatcascade[®] met zich mee, zie formule (13.6) maar het effect op de hydraulische trek is toch positief.
- Bij hogere gebouwen is een grover sproeispectrum nodig met een grotere eindsnelheid van de vallende waterdruppels. Dit heeft een dempende invloed op de gerealiseerde hydraulische drukverschillen; zie formule (13.6). Door de grotere hoogte wordt echter toch een aanzienlijke hydraulische trek gerealiseerd.
- Omgekeerd is een fijner sproeispectrum voor lagere gebouwen gunstig, omdat de geringere hoogte wordt gecompenseerd door grotere hydraulische trek per meter.
- Door het hogere waterdebiet bij gebouw/klimaattypen BETA is de te realiseren hydraulische trek aanzienlijk groter dan bij type ALPHA.

Door de hydraulische trek wordt in een Klimaatcascade[®] lucht verplaatst en een bepaald drukverschil geleverd. De energie hiervoor wordt geleverd door de potentiële energie van het opgepompte water. Een energetische vergelijking tussen de geïnvesteerde pompenergie en de door de luchtbeweging uitgespaarde ventilatorenergie geeft het volgende beeld:

Het pompvermogen kan worden berekend met de formule:

$$P_{pomp} = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot q_{v,pomp}}{\eta_p} \quad (13.7)$$

Waarin

P_{pomp}	=	pompvermogen	[W]
ρ	=	dichtheid van water	[kg.m ⁻³]
h	=	opvoerhoogte	[m]

$$\begin{aligned}q_{v,pomp} &= \text{volumestroom} & [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \\ \eta_p &= \text{pomprendement} & [-]\end{aligned}$$

Het ventilatorvermogen kan worden berekend met de formule:

$$P_{vent} = \frac{q_{v,vent} \cdot \Delta p}{\eta_v} \quad (13.8)$$

Waarin

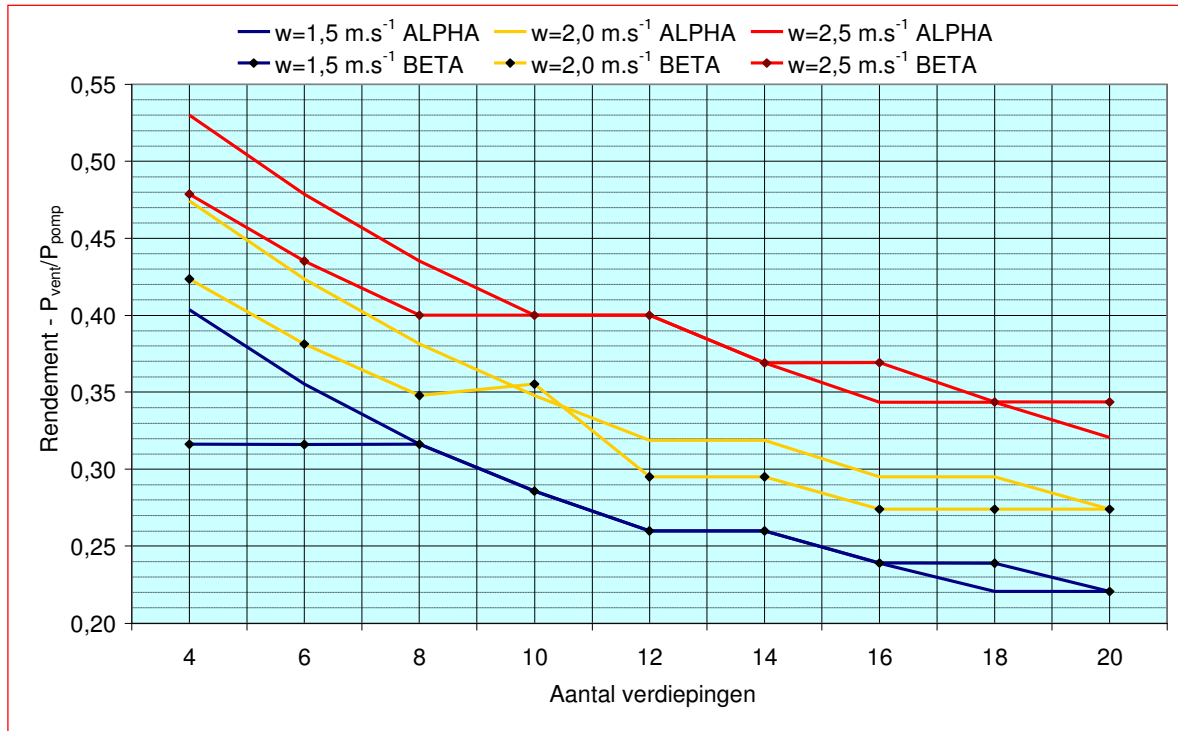
$$\begin{aligned}P_{vent} &= \text{ventilatorvermogen} & [\text{W}] \\ q_{v,vent} &= \text{volumestroom} & [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \\ \eta_v &= \text{ventilatorrendement} & [-]\end{aligned}$$

Als $\eta_p = \eta_v$ kan het rendement van de omzetting van pompennergie naar ventilatorenergie worden berekend met de formule:

$$\eta = \frac{P_{vent}}{P_{pomp}} = \frac{q_{v,vent} \cdot \Delta p}{\rho \cdot g \cdot h \cdot q_{v,pomp}} \quad (13.9)$$

Figuur 13.6 brengt de met behulp van het rekenmodel berekende rendementen in beeld voor de gebouw/klimaattypen ALPHA en BETA. Een hogere luchtsnelheid in de Klimaatcascade[©]. levert een hogere rendement op. Bij hogere gebouwen neem het rendement af.

De aerodynamische trek is niet in deze beschouwing betrokken. Deze ontstaat door het verschil tussen de initiële snelheid en de eindsnelheid van de waterdruppels, maar hiervoor is ook een additionele druk op de sproeiers nodig.



Figuur 13.6 – Rendement omzetting pompenergie in luchtbeweging als functie van aantal verdiepingen en luchtsnelheid in de Klimaatcascade[®]. – ALPHA

13.5 Thermische trek

Naast winddruk, aerodynamische en hydraulische trek levert in principe ook thermische trek stuwkracht voor het functioneren van een Klimaatcascade[®]. In de cascade moet deze trek in principe benedenwaarts gericht zijn maar dit is alleen het geval als de luchttemperatuur onder de buitentemperatuur ligt, dus in koelbedrijf.

Thermische trek ontstaat door het drukverschil dat twee kolommen gas van verschillende massa, in dit geval dus lucht, op elkaar uitoefenen. Verschil in massa ontstaat door temperatuurverschil van de lucht. Benedenwaartse thermische trek ontstaat als in de Klimaatcascade[®]. buitenlucht wordt gekoeld en er daardoor een temperatuurverschil ontstaat met de buitentemperatuur.

Lucht van 0^o C heeft een dichtheid (soortelijke massa) ρ_0 van 1,293 kg.m⁻³. Door verlaging van de temperatuur wordt het soortelijk volume kleiner en de dichtheid groter. Dit effect wordt berekend met de Wet van Gay-Lussac

$$\frac{v}{T} = \text{constant} \quad \text{oftewel} \quad \frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2} = \frac{v_0}{T_0} \quad (13.10)$$

Waarin v = soortelijk volume [m³.kg⁻¹]
 T = thermodynamische temperatuur [K]

Omdat $v = \frac{1}{\rho}$ kan deze formule ook worden geschreven als

$$\rho_1 \cdot T_1 = \rho_2 \cdot T_2 = \rho_0 \cdot T_0$$

$$\rho_1 = \rho_0 \frac{T_0}{T_1} \quad \text{en} \quad \rho_2 = \rho_0 \frac{T_0}{T_2} \quad (13.11)$$

Waarin

- ρ = dichtheid van de lucht [kg.m⁻³]
- T_0 = luchttemperatuur bij 0^oC [K]
- T_1 = luchttemperatuur buiten [K]
- T_2 = luchttemperatuur in Klimaatcascade[®]. [K]

Drukverschil wordt uitgedrukt in de formule

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot h \quad [\text{Pa}] \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m} = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}^{-2} = \text{N} \cdot \text{m}^{-2})$$

$$\Delta p = \rho_0 \left[\frac{T_0}{T_1} - \frac{T_0}{T_2} \right] \cdot g \cdot H$$

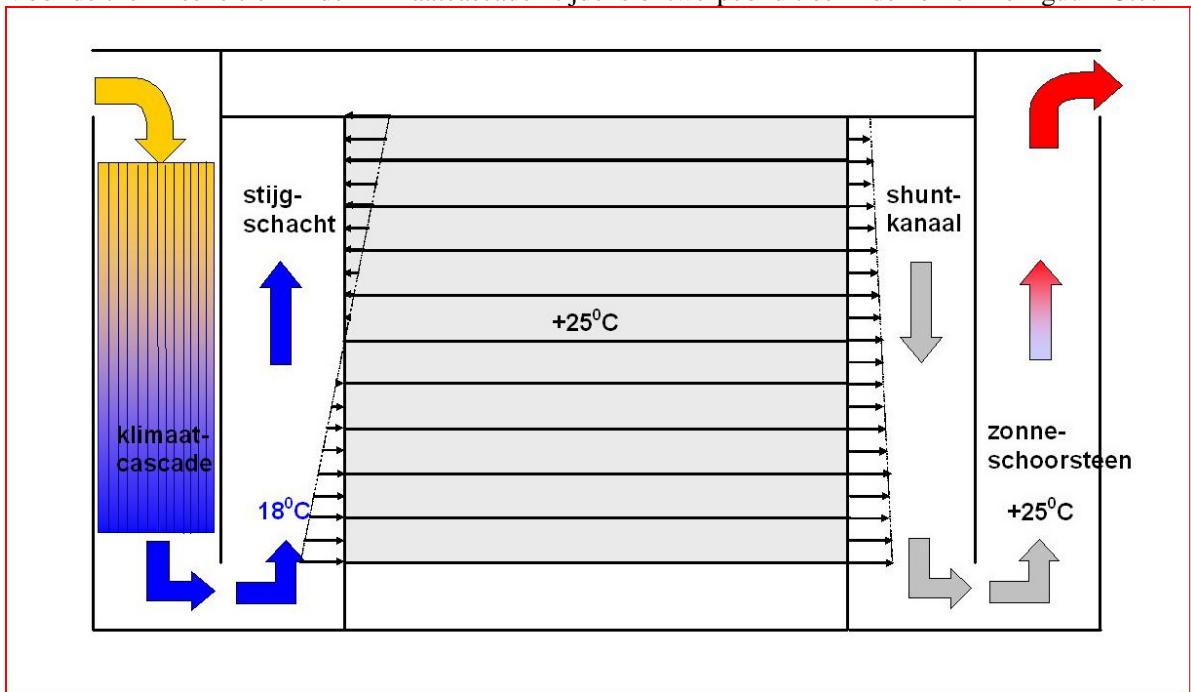
(13.12)

Waarin

- Δp = thermische trek [Pa]
- ρ_0 = dichtheid lucht bij 0^oC [kg.m⁻³]
- g = gravitatieconstante [m.s⁻²]
- H = hoogte van de Klimaatcascade[®] [m]

Rekenvoorbeeld:

Voor de thermische trek in de Klimaatcascade[®] tijdens ontwerpcondities in de zomer zie figuur 13.7.



Figuur 13.7 – Drukverdeling tijdens ontwerpcondities zomer exclusief winddruk, aerodynamische en hydraulische trek

Buitenlucht met een temperatuur van 28⁰C wordt in de cascade gekoeld tot 18⁰C. De gemiddelde temperatuur in de cascade wordt gesteld op 23⁰C. Bij een verdiepinghoogte van 3,5 m is de thermische trek per verdieping:

$$\Delta p = 1,293 \left[\frac{273}{273+28} - \frac{273}{273+23} \right] \cdot 9,81 \cdot 3,5 = -0,68 Pa \quad \text{Ten opzichte van de buitenlucht is deze}$$

waarde negatief, maar ten opzichte van het systeem positief.

De gekoelde lucht stroomt vervolgens door de stijgschachten omhoog. Ten opzichte van de cascade wordt hierdoor een thermische trek gerealiseerd van

$$\Delta p = 1,293 \left[\frac{273}{273+23} - \frac{273}{273+18} \right] \cdot 9,81 \cdot 3,5 = -0,70 Pa$$

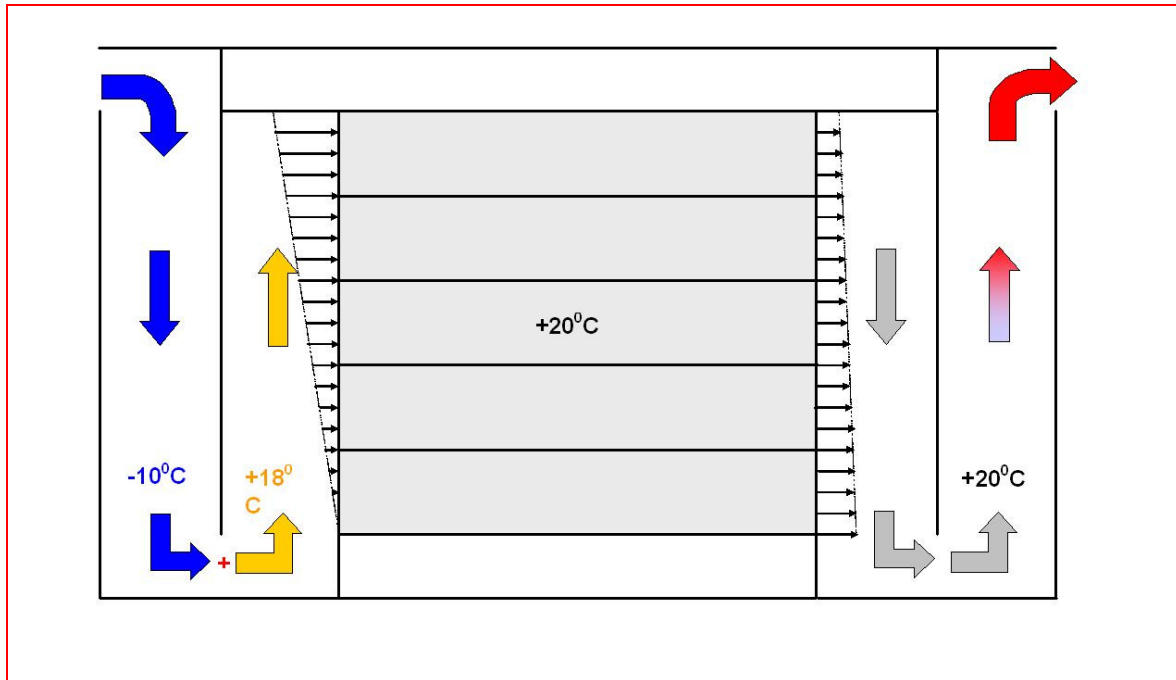
Zowel in de Klimaatcascade[©] als in de stijgschachten ontstaat dus een benedenwaartse thermische trek van vrijwel gelijke grootte, die elkaar neutraliseren. Bij een gebouw van bijvoorbeeld 10 verdiepingen is de benedenwaartse trek aan de voet van de Klimaatcascade[©] (10*6,8=) 6,8 Pa. Voor de onderste verdiepingen is er dus een gewenst positief drukverschil beschikbaar, dat echter naar boven toe afneemt en op de bovenste verdieping omslaat in een gering negatief drukverschil van (6,8 – 7,0=) -0,2 Pa. Deze benadering gaat uit van een rechtlijnig verloop van de luchttemperatuur in de Klimaatcascade[©] met een rekenkundig gemiddelde. Het werkelijk temperatuurverloop ziet er waarschijnlijk anders uit; als bijvoorbeeld de koeling geheel of overwegend plaatsvindt in het bovenste deel van de cascade, is de gemiddelde cascadetemperatuur lager en de benedenwaartse thermische trek navenant hoger. Ook drukverliezen van een eventuele luchtreiniging en van het cascadesysteem zelf zijn niet in rekening gebracht.

Voor de thermische trek in de Klimaatcascade[©] tijdens ontwerpcondities in de winter zie figuur 13.7. Deze heeft betrekking op systeemvariant C, waarbij de cascade onder deze omstandigheden niet in bedrijf is en alleen dient als aanzuigkanaal voor de buitenlucht, die in het toevoerplenum wordt verwarmd tot 18⁰C; zie paragraaf 12.6 en figuur 12.7.

De thermische trek in de stijgschacht per verdieping van 3,5 m is

$$\Delta p = 1,293 \left[\frac{273}{273+(-10)} - \frac{273}{273+18} \right] \cdot 9,81 \cdot 3,5 = 4,4 Pa$$

Afgezien van de eerder genoemde drukverliezen en winddruk heerst aan de voet van de cascade de referentiedruk van de buitenlucht. De overdruk in de stijgschacht is ter plaatse van de onderste verdieping dus 0, maar neemt vervolgens toe met de hoogte. In tegenstelling tot de zomersituatie is nu dus de onderste verdieping het meest kwetsbaar.



Figuur 13.7 – Drukverdeling tijdens ontwerpcondities winter exclusief winddruk, aerodynamische en hydraulische trek (ALPHA gebouw)

Deze analyse maakt duidelijk dat de ventilatie van de onderste verdiepingen niet door de thermische trek alleen kan worden gerealiseerd. Winddruk, aerodynamische trek, hydraulische trek, eventueel aangevuld met een geringe onderdruk in het afzuigsysteem zullen hiervoor aanvullende drijfkracht moeten leveren.

Een meer inzichtelijke methode om drukverschillen in het ventilatiesysteem tot uitdrukking te brengen is de volgende:

Het drukverschil van de lucht aan de voet van de Klimaatcascade[®] en de buitenlucht bedraagt

$$P_{kc} - P_e = g.H.\rho_{kc} - g.H.\rho_e \quad [\text{Pa}]$$

(13.13/1)

Waarin

P_{kc} = druk aan de voet van de Klimaatcascade[®] [Pa]
 P_e = druk van de buitenlucht op referentieniveau [Pa]
 ρ_{kc} = dichtheid van de lucht in de Klimaatcascade[®] [Pa]
 ρ_e = dichtheid van de buitenlucht [Pa]

$$P_{kc} - P_e = g.H.\rho_0 \cdot \frac{T_0}{T_{kc}} - g.H.\rho_0 \cdot \frac{T_0}{T_e}$$

$$P_{kc} - P_e = g.H.\rho_0.T_0 \left(\frac{1}{T_{kc}} - \frac{1}{T_e} \right)$$

(13.13/2)

Met $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$, $\rho_0 = 1,293 \text{ kg.m}^{-3}$, $T_0 = 273\text{K}$ en $H = n_1$ verdiepingen à 3,5 m is de constante term in deze formule (12.120.n) en gaat de formule over in

$$P_{kc} - P_e = 12120n_1 \left(\frac{1}{T_{kc}} - \frac{1}{T_e} \right)$$

En

$$P_{kc} = P_e + 12120n_1 \left(\frac{1}{T_{kc}} - \frac{1}{T_e} \right) \quad [\text{Pa}]$$

(13.13)

Waarin n_1 = aantal verdiepingen Klimaatcascade[©]. [-]
 T_{kc} = Kelvintemperatuur aan de voet van de cascade [K]
 T_e = Kelvintemperatuur van de buitenlucht [K]

Het drukverschil tussen de toevoerschacht en de Klimaatcascade[©] wordt naar analogie van formule (13.13/3) bepaalt met de formule

$$P_{ts} = P_{kc} - 12120n_2 \left(\frac{1}{T_{ts}} - \frac{1}{T_{kc}} \right) \quad [\text{Pa}]$$

(13.14)

Waarin P_{ts} = druk in de toevoerschacht [Pa]
 n_2 = aantal verdiepingen toevoerschacht [-]
 T_{ts} = Kelvintemperatuur in de toevoerschacht [K]

Het drukverschil tussen de toevoerschacht en de buitenlucht wordt met behulp van de formules (13.13) en (13.14) als volgt berekend

$$P_{ts} - P_e = \left[P_e + 12120n_1 \left(\frac{1}{T_{kc}} - \frac{1}{T_e} \right) \right] - \left[12120n_2 \left(\frac{1}{T_{ts}} - \frac{1}{T_{kc}} \right) \right] - P_e$$

En

$$P_{ts} = P_e + 12120 \left(\frac{n_1}{T_{kc}} - \frac{n_1}{T_e} - \frac{n_2}{T_{ts}} + \frac{n_2}{T_{kc}} \right)$$

(13.15)

In het voorgaande voorbeeld met $T_{kc} = 296\text{K}$, $T_e = 301\text{K}$, $T_{ts} = 291\text{K}$, $n_1 = 10$ en $n_2 = 1$ wordt met behulp van (13.15) $P_{ts,1}$ berekend

$$P_{ts} = P_e + 12120 \left(\frac{10}{296} - \frac{10}{301} - \frac{1}{291} + \frac{1}{296} \right) = P_e + 6,1 \quad \text{Pa}$$

De druk in de toevoerschacht kan voor $n_2 = 1$ met de formules (13.13) en (13.14) ook als volgt worden berekend:

$$(13.13) \quad P_{kc} = P_e + 12120 * 10 \left(\frac{1}{296} - \frac{1}{301} \right) = P_e + 6,8 \text{ Pa}$$

$$(13.14) P_{ts} = P_{kc} - 12120n_2 \left(\frac{1}{T_{ts}} - \frac{1}{T_{kc}} \right) = P_{kc} - 12120 \left(\frac{1}{291} - \frac{1}{296} \right) = P_e + 6,8 - 0,7 = P_e + 6,1 \text{ Pa}$$

13.6 Drukverschillen door thermische trek systeemvariant A1 – ALPHA gebouw

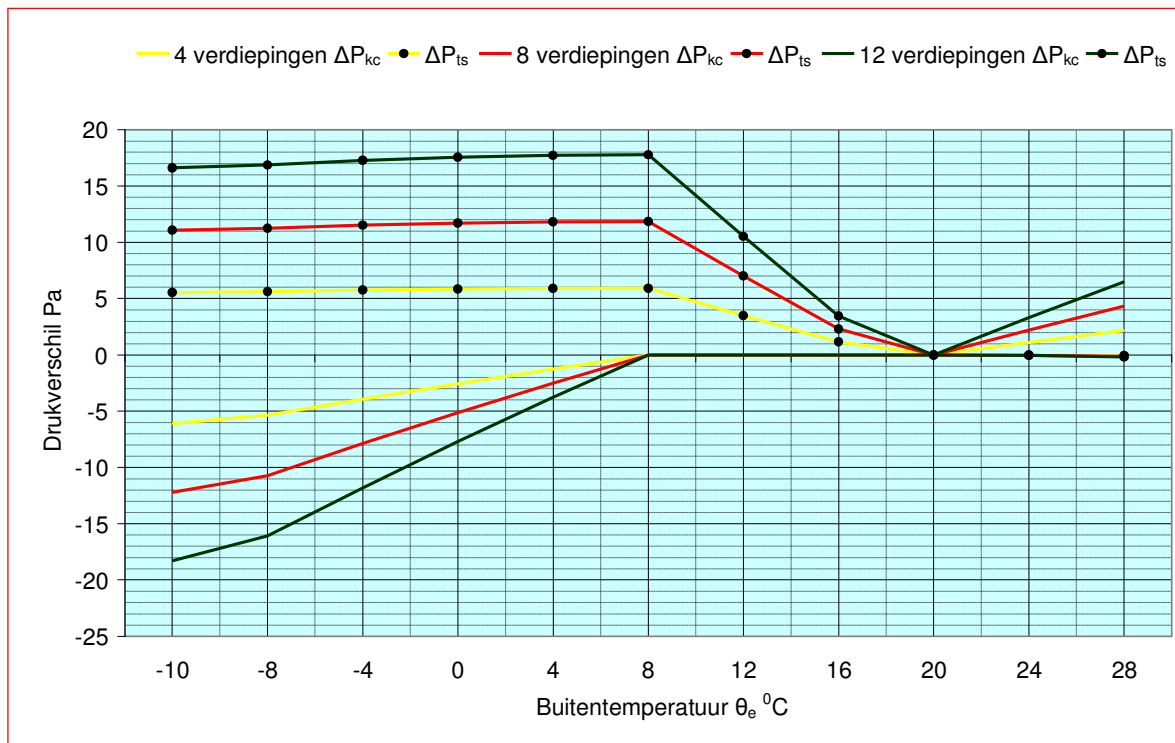
Figuur 13.8 laat voor systeemvariant A de drukverschillen door thermische trek zien ter plaatse van de voet van de Klimaatcascade[®] ΔP_{kc} en de top van de toevoerschacht ΔP_{ts} ten opzichte van de buitenlucht bij een temperatuurbereik van -10°C tot $+28^{\circ}\text{C}$.

Onder 20°C is er, met uitzondering van de begane grond, een redelijk drukverschil beschikbaar, oplopend voor de hogere verdiepingen. Een kantelpunt ligt op 20°C waarbij geen thermische trek in de stijgschacht meer beschikbaar is en de Klimaatcascade[®] nog geen benedenwaartse thermische trek levert. Boven 20°C levert de cascade enige benedenwaartse trek, die echter bij hogere verdiepingen wordt geneutraliseerd door de benedenwaartse trek in de stijgschacht.

De figuur laat zien dat de druk in de Klimaatcascade[®] bij buitentemperaturen $\theta_e < 8^{\circ}\text{C}$ negatief is, bij positieve drukken in de toevoerschacht. Deze drukken worden echter hoogteafhankelijk opgebouwd. Voor de onderste verdieping is nog geen positieve thermische trek beschikbaar; de druk in de toevoerschacht is hier gelijk aan de druk onder in de Klimaatcascade[®].

Bij $8^{\circ}\text{C} < \theta_e < 20^{\circ}\text{C}$ neemt het positieve drukverschil aan de top van de toevoerschacht af naar 0. Vanaf $\theta_e > 20^{\circ}\text{C}$ komt er vanuit de Klimaatcascade[®] positieve druk voor de toevoerschacht beschikbaar, die echter naar boven toe wordt geneutraliseerd door de negatieve thermische trek.

Om de gewenste luchtstroom naar de te ventileren ruimten tot stand te brengen moet de druk niet alleen aan de top, maar in de gehele toevoerschacht, positief zijn. Het negatieve drukverschil in de Klimaatcascade[®] bij lagere buitentemperaturen moet dus worden gecompenseerd door aerodynamische trek, hydraulische trek en/of winddruk.



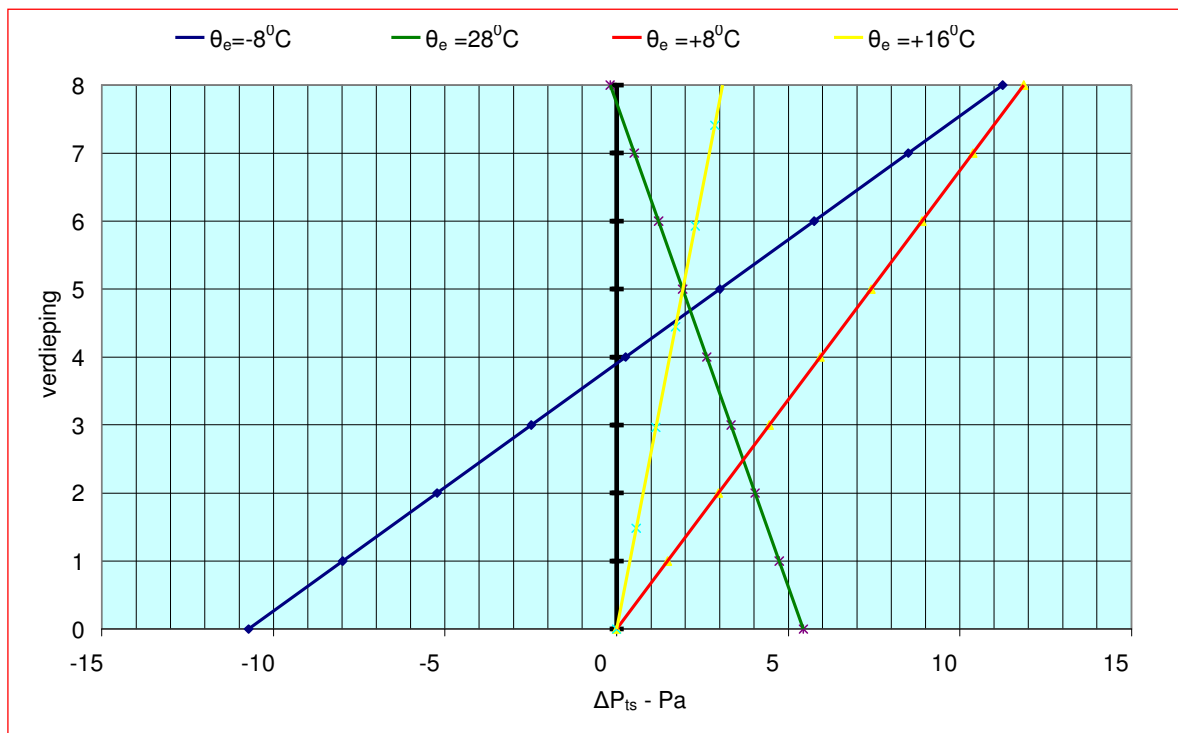
Figuur 13.8 – Drukverschillen door thermische trek aan de voet van de Klimaatcascade[®] ΔP_{kc} en de top van de toevoerschacht ΔP_{ts} t.o.v. de buitenlucht – Systeemvariant A1 (ALPHA gebouw)

Figuur 13.9 laat de drukken in de toevoerschacht zien voor een gebouw van 8 verdiepingen bij verschillende buitentemperaturen.

- Bij $\theta_e = -8^\circ\text{C}$ verloopt de druk van ≈ -11 Pa bij de onderste verdieping tot $\approx +11$ Pa bij de bovenste verdieping.
- Bij $\theta_e > +8^\circ\text{C}$, het sproeisysteem is dan buiten werking en de lucht wordt niet meer in de Klimaatcascade[®] verwarmd, verloopt de druk van 0 Pa bij de onderste verdieping tot $\approx +12$ Pa bij $\theta_e \approx +8^\circ\text{C}$, afnemend naar $\approx +3$ Pa bij $\theta_e \approx +16^\circ\text{C}$
- Bij $\theta_e = 28^\circ\text{C}$, met actief sproeisysteem in koelbedrijf, verloopt de druk van $\approx +5,5$ Pa bij de onderste verdieping tot licht negatief bij de bovenste verdieping.

Geconcludeerd kan worden dat de Klimaatcascade[®] niet door thermische trek alleen zal kunnen functioneren, en dat de additionele aerodynamische trek en hydraulische trek niet kunnen worden gemist. Dit geldt vooral bij buitentemperaturen boven 20°C .

Het is tevens duidelijk dat een Klimaatcascade[®] met vrije uitloop, bijvoorbeeld volgens figuur 6.6 in hoofdstuk 6, buiten de koelperiode alleen zal kunnen functioneren als de hydraulische trek groter is dan de thermische trek.

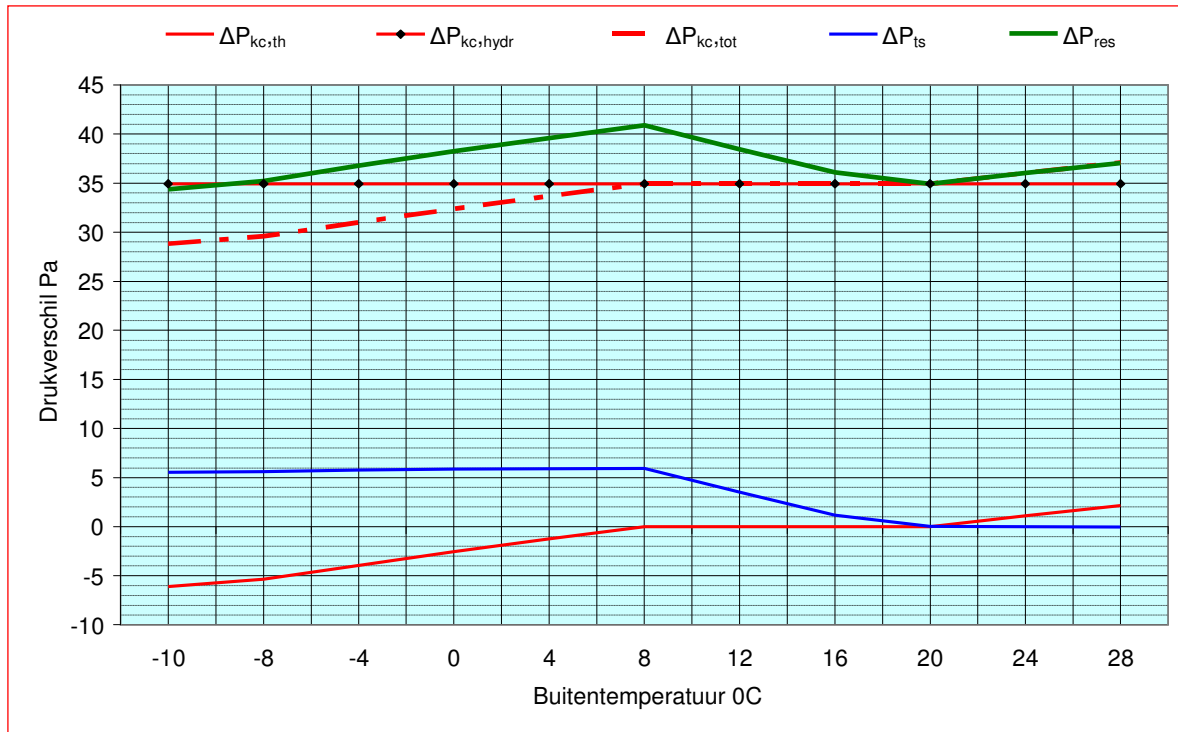


Figuur 13.9 – Hoogteafhankelijke drukken ΔP_{ts} t.g.v. thermische trek in de toevoerschacht t.o.v. de buitenlucht – Systeemvariant A1 (ALPHA gebouw)

13.7 Thermische + Hydraulische trek

In figuur 13.10 zijn de thermische trek $\Delta p_{kc,th}$ en de hydraulische trek $\Delta p_{kc,hydr}$ in de Klimaatcascade[®] gesommeerd tot $\Delta P_{kc,tot}$ voor een gebouw/klimaattipe ALPHA van 4 verdiepingen, systeemvariant A1 volgens paragraaf 12.4. Deze figuur is vergelijkbaar met figuur 13.9 – gele lijnen.

De stabiliserende invloed van de hydraulische trek is duidelijk; ook aan de top van de toevoerschicht is steeds overdruk aanwezig, variërend tussen 35 en 40 Pa.



Figuur 13.10 – Drukverschillen aan de voet van de Klimaatcascade[®] ΔP_{kc} en de top van de toevoerschicht ΔP_{ts} t.o.v. de buitenlucht – Systeemvariant A1 – ALPHA gebouw – Luchtsnelheid 2,5 m.s⁻¹

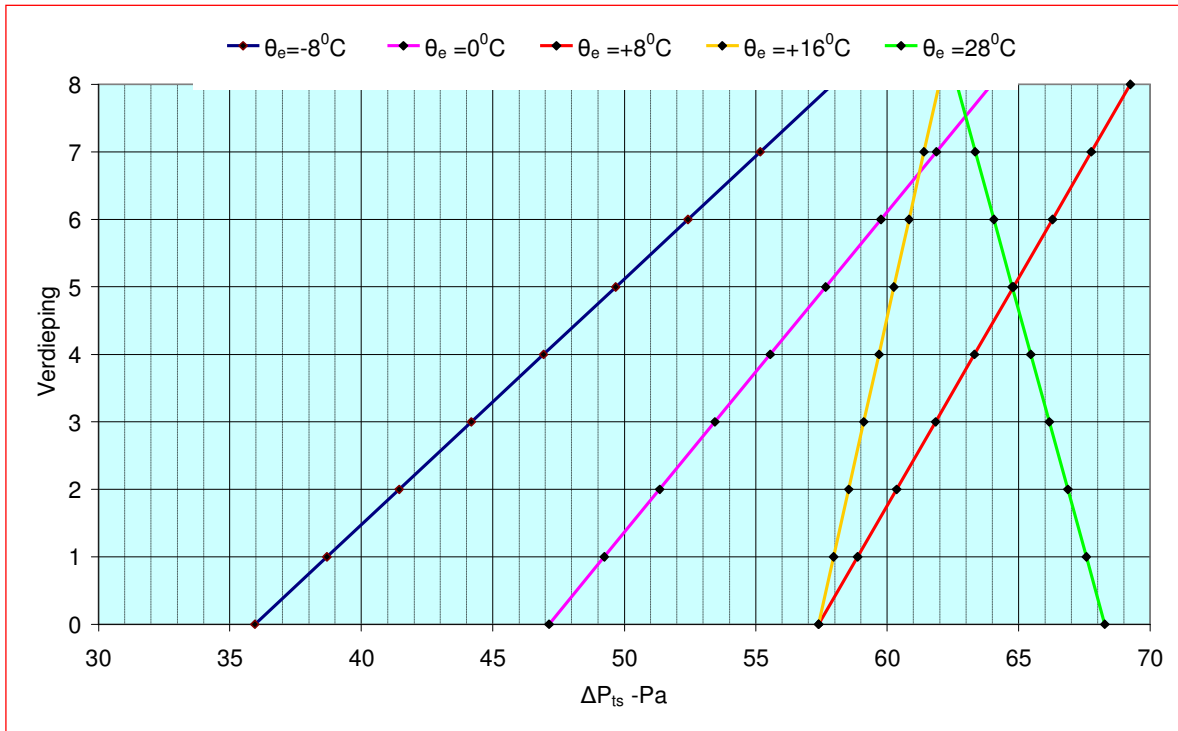
Figuur 13.11, pendant van figuur 13.9, laat de stabiliserende werking zien van de hydraulische trek op de drukken in de toevoerschicht. Negatieve drukken, zoals in figuur 13.9, komen niet meer voor. Het grootste drukverschil tussen de begane grond -36 Pa- en de bovenste verdieping -58 Pa- treedt op bij een buitentemperatuur van -8°C. Voor de begane grond kunnen de drukken variëren van 35 Pa bij een buitentemperatuur van -8°C tot 68 Pa bij +28°C. Het regelsysteem zal deze drukverschillen moeten kunnen compenseren.

Deze verschillen worden nog groter bij een BETA gebouw, waar door het grotere waterdebiet een aanzienlijk hogere hydraulische trek wordt gerealiseerd; zie figuur 13.12

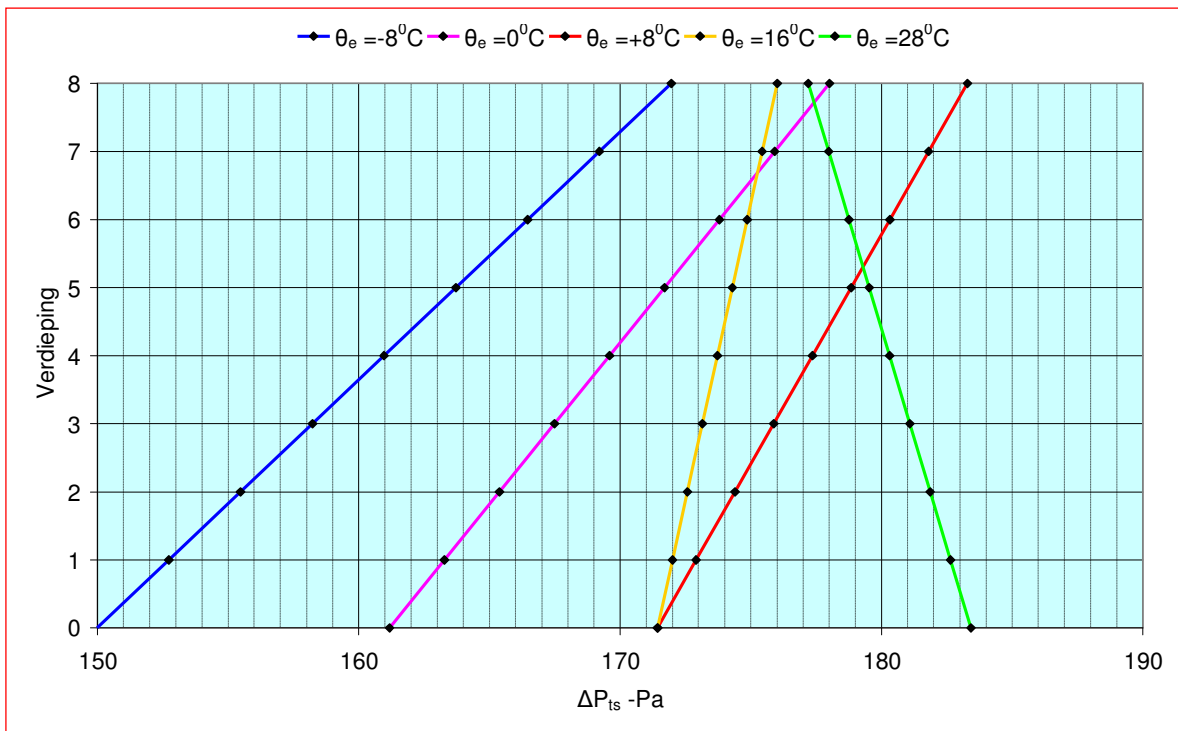
13.8 Debietregeling

De druk in het toevoerplenum moet op een variabele of een constante waarde worden geregeld, afhankelijk van de ventilatiebehoefte in de kantoorruimten. Een kleppensectie tussen de Klimaatcascade[®] en het plenum reduceert een te hoge druk ten gevolge van winddruk, en/of aerodynamische druk en/of hydraulische druk. In geval van te lage druk in het plenum wordt de hulpventilator in de Klimaatcascade[®] ingeschakeld.

Uit de voorgaande analyses blijkt dat de drukken in de toevoerschicht afhankelijk zijn van de hoogte en tevens per seizoen wisselen. De uitlatopeningen naar de te ventileren verdiepingen en ruimten moeten derhalve worden voorzien van automatisch geregelde kleppen.



Figuur 13.11 - Hoogteafhankelijke drukken in de toevoerschacht ΔP_{ts} t.o.v. de buitenlucht als functie van de buitentemperatuur en de hoogte – Systemvariant A1 – ALPHA gebouw - Luchtsnelheid $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



Figuur 13.12- Hoogteafhankelijke drukken in de toevoerschacht ΔP_{ts} t.o.v. de buitenlucht als functie van de buitentemperatuur en de hoogte – Systemvariant A1 – BETA gebouw - Luchtsnelheid $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

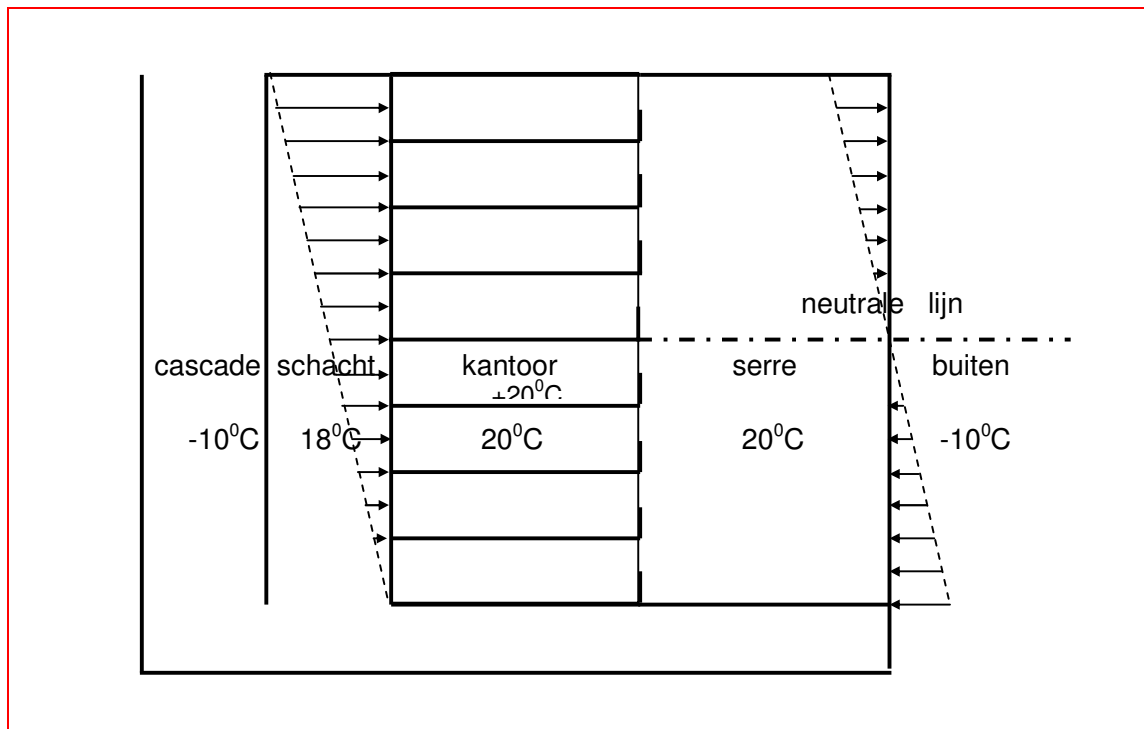
13.9 Drukverschillen in het gebouw

De vraag is of drukken en drukverschillen in het gebouw de ventilatiestromen kunnen beïnvloeden. Bij luchtafvoer via een gesloten afzuigsysteem, bijvoorbeeld volgens de figuren 6.1 t/m 6.3 in hoofdstuk 6 is dit niet het geval. Bij luchtafvoer via een atrium of serre, als aangegeven in figuur 6.5 zou beïnvloeding mogelijk zijn als in de buitenwand openingen aanwezig zijn waardoor het temperatuurverschil tussen binnen en buiten zich in drukverschillen in atrium of serre zou kunnen manifesteren.

Een dergelijke situatie moet in hoogbouw altijd worden voorkomen, ook bij toepassing van traditionele ventilatieconcepten. De toegangen op de begane grond moeten worden uitgevoerd met draaideuren en raamopeningen dienen bij grote temperatuurverschillen tussen binnen en buiten gesloten blijven.

De in figuur 13.13 aangegeven neutrale lijn is gebaseerd op de veronderstelling dat on dichtheden in de buitengevel gelijkmatig verdeeld zijn. Op de neutrale lijn kan dan een virtuele opening worden gedacht waarin geen drukverschil tussen binnen en buiten aanwezig is.

In de getekende wintersituatie staat de buitengevel onder de neutrale lijn op overdruk van buiten naar binnen, terwijl boven de neutrale lijn de overdruk van binnen naar buiten werkt. Zolang de buitenwand naast de genoemde virtuele opening dicht is, en er geen andere openingen aanwezig zijn, kunnen de overdrukken en onderdrukken niet tot uitwerking komen. Zodra boven en onder de neutrale lijn geveldelen worden geopend ontstaan er luchtstromingen.



Figuur 13.13 – Luchtafvoer via serre of atrium

13.10 Invloed van open ramen

“Natuurlijke ventilatie staat bij vrijwel iedereen in hoog aanzien, en terecht. Via een open raam kan een warme en muffe ruimte snel en doeltreffend worden gelucht. Een open raam is een uitstekend middel om vlug even een frisse neus te halen als men daar behoefte aan heeft. Een te openen raam is eigenlijk een elementair recht van de werkende mens” (Bronsema, B. 1996)

De tijd dat klimaattechnici een gesloten gevel propageerden om door een strikte scheiding van natuur en techniek de kunstmatige klimaatregeling beter beheersbaar te maken, ligt gelukkig ver achter ons. Tocht heeft deze tijd diepe sporen achtergelaten en het basale wantrouwen van veel mensen tegen

airconditioning in de hand gewerkt. Iedereen die in een geconditioneerd gebouw met een gesloten gevel heeft gewerkt zal dit kunnen beamen, vooral als op een warme zomerdag de “airco” het eens af heeft laten weten. Ook slecht functionerende of vervuilde klimaatinstallaties, die in veel gebouwen oorzaak zijn geweest van het *Sick Building Syndrome* hebben het verlangen naar natuurlijke ventilatie via een open raam geweldig versterkt.

In een gebouw met een goed functionerende klimaatregeling zijn te openen ramen niet nodig voor thermisch comfort of luchtkwaliteit. Een te openen raam is echter een probaat middel om het hoofd te kunnen bieden aan “*opvliegers*”, plotselinge aanvallen van warmte, gepaard gaande met een versnelde hartslag, verhoging van de lichaamstemperatuur, transpireren en vaatverwijding. Dit is geen typisch vrouwelijk verschijnsel, maar kan iedereen overkomen die geconfronteerd wordt met een plotseling opkomende stress. Het spreekt dan ook vanzelf dat in een gebouw dat is uitgerust met het Geo-Klimaatconcept[®] de ramen te openen moeten zijn.

De invloed van open ramen op de klimaatregeling van een gebouw wordt bepaald door externe en interne factoren. Externe factoren zijn

- Windrichting en windsnelheid : Wind op de gevel geeft overdruk, wind langs de gevel geeft onderdruk –zie deelrapport (II) hoofdstuk 8. De windsnelheid is bepalend voor de grootte van over- en onderdrukken.
- Temperatuurverschillen: Bij afnemende buitentemperatuur worden thermische drukverschillen groter –zie figuur 13.13

Interne factoren zijn:

- Grootte van de raamopening: Windhinder in een kantoorruimte, tocht en opwaaiende documenten, geven al snel aanleiding om door individueel ingrijpen de raamstand te minimaliseren.
- Grootte van de ruimte: In een eenpersoonskamer zijn de effecten van een open raam beperkt tot de ruimte zelf en de lokale gebruiker. In groepskantoren treedt een disciplinerend effect op, waardoor nadelige effecten van een open raam sneller zullen worden gecorrigeerd.
- Binnendeuren: Gesloten binnendeuren vormen een belemmering voor de luchtstroom die optreedt tengevolge van een open raam. In veel kantoren staan de binnendeuren naar de gang vaak open, en is de invloed van de luchtstroom op het gebouw groter.
- Gebouwtype: In een enkel corridor gebouw kunnen de effecten van de luchtstroom sterk zijn als ramen in tegenover elkaar liggende gevels worden geopend bij openstaande gangdeuren. In atrium gebouwen zorgt de dempende werking van het bouwvolume in principe voor kleinere effecten.
- Aantal open ramen:: De effecten van de luchtstroom worden minder naarmate minder ramen open staan. Bij een goed binnenklimaat is de behoefte om een raam te openen in het algemeen gering.
- Bouwvolume: Grotere bouwvolumes hebben een groter dempend effect, waardoor de invloed van open ramen kleiner wordt.
- Debietregeling op lokaal niveau: Op lokaal niveau is een debietregeling van het Geo-Klimaatconcept[®] aan te bevelen op basis van luchtkwaliteit en/of CO₂ concentratie. Als in een dergelijke ruimte een raam geopend wordt zal het ventilatiedebiet dat via het klimaatsysteem wordt toegevoerd worden gereduceerd of tot nul teruggebracht. De invloed van een open raam op het gebouw wordt hierdoor kleiner; tevens wordt de bedrijfsvoering energiezuiniger.
- Debietregeling op gebouwniveau: Het Geo-Klimaatconcept[®] is geen *free-running* concept. Zowel de luchttoevoer vanuit de Klimaatcascade[®] als de luchtafzuiging via de Zonneschoorsteen wordt behoefteafhankelijk geregeld. Er zal dus nimmer een storm binnen een gebouw kunnen gaan waaien.

Samengevat: In een Gezond Gebouw is een te openen ramen een essentiële voorziening. Bij een goed binnenklimaat, eveneens een essentiële voorziening, is de behoefte om een raam ook metterdaad te openen gering. Enkele geopende ramen hebben in principe weinig invloed op de niet voorziene luchtstromingen in een gebouw. Regeling van ventilatiedebieten in het Geo-Klimaatconcept[®] is belangrijk.

13.10 Hulpventilator

De hulpventilator moet in staat zijn een groot luchtdebiet te leveren bij een klein drukverschil.

Axiaalventilatoren met een klein aantal schoepen, een kleine naafdiameter en een grote buitendiameter zijn hiervoor het meest geschikt; zie bijvoorbeeld figuur 13.14/1 en 13.14/2.

De hulpventilator kan het beste boven het sproeisysteem, hoog in de Klimaatcascade[®] worden aangebracht. De invloed van de roterende luchtbeweging bij in bedrijf zijnde ventilator moet nader worden geëvalueerd.

De luchtweerstand van dergelijke ventilatoren bij stilstand is gering. Overwogen zou kunnen worden om bij voldoende winddruk de ventilator als generator te laten werken voor de opwekking van elektrische energie.

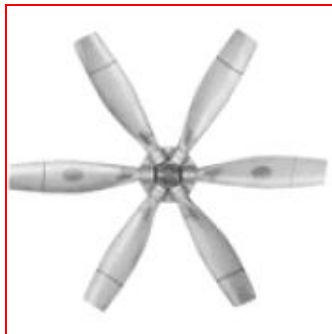
Het ventilatorvermogen kan worden berekend met de formule

$$P_{el} = \frac{q_v \cdot p_{tot}}{\eta_{hydr} \cdot \eta_{mot}}$$

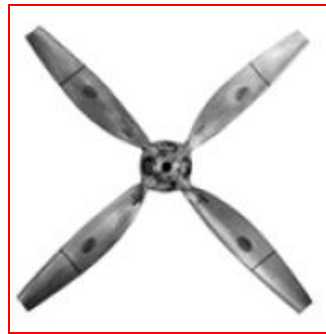
(13.16)

Waarin

P_{el}	=	elektrisch opgenomen vermogen	[W]
q_v	=	volumestroom	[m ³ ·s ⁻¹]
p_{tot}	=	totaaldruk	[Pa]
η_{hydr}	=	waaierrendement betrokken op p_{tot}	[-]
η_{mot}	=	motorrendement	[-]



Figuur 13.14/1

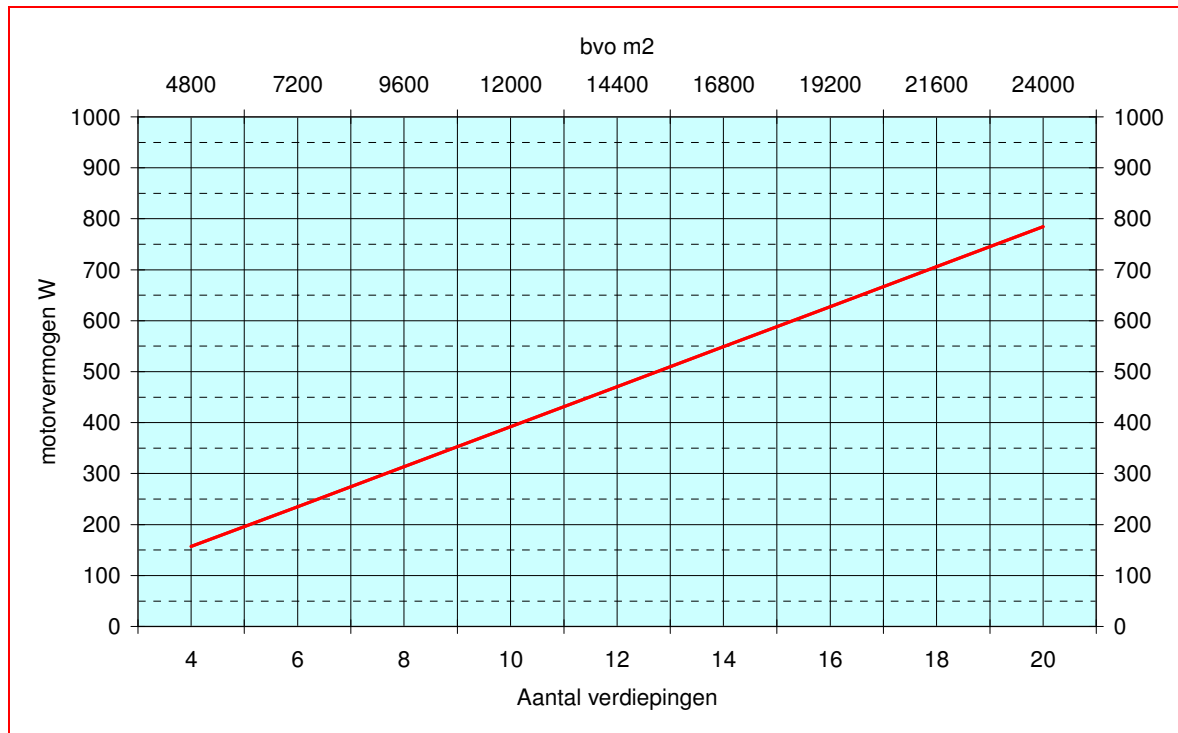


Figuur 13.14/2

Figuur 13.15 geeft een beeld van de benodigde motorvermogens voor gebouwen van 4 tot 20 verdiepingen en 4.800 tot 24.000 m² bruto vloer oppervlak, gebaseerd op een specifiek ventilatiedebiet van 3,25 m³·m⁻²·h⁻¹ overeenkomstig paragraaf 15.2 en tabel 15.1 in hoofdstuk 15.

Uitgegaan is van een totaaldruk p_{tot} van 20Pa, een waaierrendement η_{hydr} van 65% en een motorrendement η_{mot} van 85%. Voor een groot gebouw met 20 verdiepingen en een bruto vloer oppervlak van 24.000 m² is bij deze omstandigheden het motorvermogen minder dan 800 W.

Het aantal draaiuren in een referentiejaar kan geval voor geval met behulp van een dynamische ESP-r simulatie worden bepaald. Voor de simulatieresultaten van de case study zie deelrapport (IV).



Figuur 13.15 – Motorvermogens hulpventilator

Earth, Wind & Fire – Airconditioning zonder Ventilatoren
(III) Onderzoek Geo-Klimaatconcept[®]

14. FYSISCH / CHEMISCHE ASPECTEN

14.1 Inleiding en samenvatting

In een Klimaatcascade[®] treedt het zgn. watervaleffect op waarbij negatieve ionen worden gevormd, die mogelijk een positieve invloed hebben op de kwaliteit van de ruimtelucht. Een literatuurstudie naar de effecten van negatieve ionen op het binnenmilieu levert geen duidelijk beeld op. Wel kan worden gesteld dat in een Klimaatcascade[®] de natuurlijke ionenbalans in stand blijft, dit in tegenstelling tot de situatie bij mechanische systemen van ventilatie en airconditioning.

Ozonemissie uit elektrostatische luchtfilters zou een gunstige invloed kunnen hebben op de kwaliteit van het koelwater in de Klimaatcascade[®] en daarmee op de kwaliteit van de ruimtelucht. Voorshands is deze gedachtegang speculatief.

De koelwatertemperaturen en de bedrijfswijze van de Klimaatcascade[®] zijn zodanig dat aan de preventie van legionella in principe geen aandacht behoeft te worden besteed. Het concept is intrinsiek veilig.

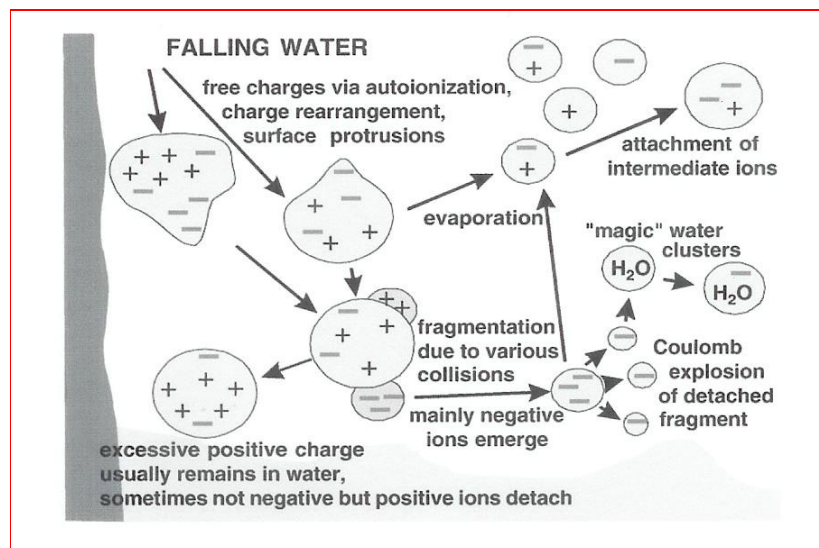
14.2 Watervaleffect

Een mogelijk positieve bijwerking van het fysisch proces in de Klimaatcascade[®] is de productie van negatieve ionen door het watervaleffect, ook Lenards effect genoemd naar de Hongaarse fysicus en Nobelprijswinnaar P. Lenard (1892). Een soortgelijk effect treedt ook op bij de golfbeweging en de inherente druppelvorming van zeewater, ook Blanchard effect genoemd naar de Franse meteoroloog D. Blanchard. Sinds de oudheid wordt de luchtkwaliteit in een dergelijke omgeving als gezond en prettig ervaren, hetgeen wordt toegeschreven aan de positieve werking van negatieve luchtionen – zie paragraaf 14.3.

Met “luchtionen” worden elektrisch geladen moleculen of clusters van moleculen in de lucht aangeduid. Hoe de vorming van deze luchtionen tot stand komt is een nog niet opgelost wetenschappelijk vraagstuk. Een mogelijke verklaring is weergegeven in figuur 12.1 (Luts Aare 2009).

Een waterdruppel met enkele miljoenen moleculen bevat door auto-ionisatie een gelijk aantal positieve H_3O^+ en negatieve OH^- ionen.

In een waterval worden waterdruppels door de val langs de wand en op de ondergrond, en door onderlinge botsingen gefragmenteerd. Hierbij blijven de meeste positieve ionen in de druppel achter en worden negatieve ionen als vrije ionen in de lucht geëmitteerd.



Figuur 14.1 - Watervaleffect

14.3 Ionisatie

De ionenconcentratie in de binnenlucht van kantoren, vooral die met mechanische ventilatie of airconditioning is veel lager dan die in de buitenlucht. In plaatstalen luchtkanalen slaan de geladen moleculen in de ventilatielucht neer op de wanden waardoor vrijwel geen ionen de ruimte meer bereiken. In een gebouw worden weliswaar continu nieuwe ionen gevormd, maar deze slaan grotendeels neer op

statisch geladen vlakken zoals computerschermen. De ionenconcentratie in de onderhavige gebouwen is daardoor slechts 10% of minder dan in de buitenlucht (Hawkins L.H. 1981).

De positieve werking van negatieve luchtionen op de luchtkwaliteit is bepaald niet onomstreden. Het Handboek Installatietechniek (ISSO 2002) en de Recknagel (2009) besteden er geen enkele aandacht aan. De CIBSE Guide A (CIBSE 1999) zegt in paragraaf 1.11.2

“It has been suggested that the ion balance of the air is an important factor in human comfort in that negative ions tend to produce sensations of freshness and well-being and positive ions cause headache, nausea and general malaise. Present evidence on the effects of air ions and, in particular, the effectiveness of air ionisers is inconclusive and hence no design criteria can be established”.

Vanaf \approx 1950 rees bij wetenschappers het vermoeden dat negatieve luchtionen een positief effect zouden kunnen hebben voor mensen met gevoelige luchtwegen; dit vermoeden werd door onderzoek in Amerika bevestigd. In een Deens onderzoek naar de effecten van geïoniseerde lucht op ratten werd geen enkele relatie gevonden, waarna verder onderzoek werd beëindigd (Andersen Ib 2008).

Een wetenschappelijk onderzoek in een aantal Deense scholen wees uit dat hier ook geen sprake was van een comfortprobleem; er werd geen correlatie gevonden tussen de concentraties van luchtionen en comfortklachten. (Andersen Ib 2008) Het binnenmilieuonderzoek heeft zich sindsdien en vanaf 1970 onder leiding van P.O. Fanger vooral geconcentreerd op temperatuur en kwaliteit van de binnenlucht.

Een Brits onderzoek bij een grote verzekeringsmaatschappij in een kantoor met airconditioning wees uit dat bij hogere concentraties van negatieve luchtionen tot 50% minder klachten voorkomen over hoofdpijn, misselijkheid en duizeligheid. Een ionenarme atmosfeer werd daarentegen als bedompt ervaren en mensen voelden zich minder alert (Hawkins L.H. 1981). Over luchtwegproblemen wordt in dit onderzoek niets vermeld.

Een overzichtsartikel over dit onderwerp (Yates Alayne e.a. 1986) geeft de volgende samenvatting:

“Exposure to positive and negative air ions appears to have diverse effects on physiological and behavioural systems. The general trend is that positive ions are associated with adverse results and that negative ions are associated with salutary results. Ionisation changes do not influence all individuals, may have differential effects according to gender, and are more likely to impact upon organisms under stress or those affected by a disease process. Effects may be complex and subtle, involving anxiety, activity, mood, learning and internal rhythm. Air ion research has only recently begun to regard descriptions of the electrical environment and the experimental microclimates as important variables to be measured and considered in interpreting the results”.

Hoewel de gezondheidseffecten die aan negatieve ionen toegeschreven worden twijfelachtig zijn, is er wereldwijd een hele industrie van “ionisatie luchtreinigers” oftewel *ionisers* ontstaan. De werking van deze apparaten is aanleiding geweest voor veel onderzoek, met soms tegenstrijdige resultaten. Bepaalde ziektekiemen kunnen worden geëlimineerd, maar andere weer niet (Fletcher Louise 2008). De concentratie van organische aerosolen kan door negatieve ionen zelfs worden verhoogd, waardoor het gebruik binnenshuis wordt afgeraden (Waring Michael S. 2008). De stofconcentratie in binnenruimten kan door negatieve ionen worden verminderd door interactie van ionen onderling en door depositie van elektrisch geladen stofdeeltjes op statisch geladen vlakken en wanden (Mendell Mark J. 1993). Het stof verplaatst zich hierbij alleen maar en deze vlakken moeten derhalve frequent worden gereinigd; (Grinshpun S.A. e.a. 2005). Voor significante effecten is echter een hoge ionenconcentratie nodig, $\geq 10^{10}$ ionen per m^{-3} lucht¹⁴ (Fletcher L.A. 2008). In een besloten ruimte breng een hoge ionenconcentratie het

¹⁴ Metingen bij de Vantaanputous waterval nabij Helsinki gaven waarden aan van $2^9 \dots 10^9$ negatieve ionen per m^3 lucht.

risico met zich mee van een te grote statische oplading van objecten in de nabijheid van de *ioniser*, met de inherente incidentele ontlading hiervan (Grinshpun S.A. e.a. 2005). Het rendement van laagwaardige luchtfilters kan door de emissie van negatieve ionen in het filter sterk worden verbeterd (Huang R. 2008). Bij elkaar genomen is het genoemde onderzoek bepaald niet onverdeeld positief over het gebruik van *ionisers*.

Het *Earth, Wind & Fire* onderzoek is uiteraard niet gericht op het al dan niet toepassen van ionisatie luchtreinigers, maar het is wel van belang enig inzicht te hebben in de pro's en contra's van negatieve ionen in de ruimtelucht. Het Geo-Klimaatconcept[©] onderscheidt zich namelijk op enkele punten van traditionele luchtbehandelingssystemen, die positief zouden kunnen uitwerken op de luchtkwaliteit in de binnenruimte:

- De Klimaatcascade[©] is in principe een bouwkundige schacht waarin negatieve luchtionen niet op de wanden zullen neerslaan en de natuurlijke concentratie van de buitenlucht behouden blijft.
- De waterval in de Klimaatcascade[©] is zelf een bron van negatieve luchtionen.
- Het elektrostatisch filter, indien toegepast, is een bron van negatieve ionen.

Het lijkt daardoor mogelijk om de natuurlijke ionenbalans in de buitenlucht ook in de ruimtelucht te behouden of te versterken. Metingen in een proefopstelling zouden hier interessante gegevens kunnen opleveren.

14.4 Ozon

Ozon is een bijzondere vorm van zuurstof. Normaliter vormen twee zuurstofatomen een zuurstofmolecule, O₂, zoals dat in de lucht voorkomt. De ozon molecule bestaat uit drie zuurstofatomen, O₃, dat echter een instabiele verbinding is. Dit betekent dat O₃ snel terugvalt in de stabiele zuurstof molecule O₂. Als de ozon molecule echter weer uiteenvalt in gewone zuurstof, gaat dit altijd via een reactie partner (ASHRAE 1994).

Ozon generatoren, *ozonisers*, worden vooral in de VS in grote aantallen verkocht. Fabrikanten claimen dat verontreinigingen in de binnenlucht door ozon worden geoxideerd, waardoor de luchtkwaliteit zou verbeteren. Bij de maximaal aanvaardbare concentratie van ozon zijn deze reacties echter zeer traag en is het effect op de kwaliteit van de binnenlucht verwaarloosbaar. In een breed overzichtsartikel over ozon wordt dan ook gesteld dat (Weschler, Charles J. 2000).

“...ozon is not a practical and effective means of improving indoor air quality, especially in light of its potentially serious risk to health”

In het binnenmilieu kan ozon dus als een schadelijke en gezondheidsbedreigende stof worden gezien,

Ozon komt in wisselende maar kleine concentraties voor in de buitenlucht en wordt in het binnenmilieu geëmitteerd door kopieerapparaten en laser printers. Ozon wordt ook als bijproduct geëmitteerd in elektrostatische luchtfilters, zie hoofdstuk 5. In het corona ontladingsysteem (CD = Corona Discharge), wordt bij het ontladen van de hoge spanning ozon gevormd. Lucht bevat 21% zuurstof (O₂). Door de elektrische ontlading wordt een deel van de O₂ gesplitst. Omdat enkelvoudige zuurstofatomen niet kunnen bestaan, worden ze als het ware tijdens die afsplitsing gebonden met andere zuurstof moleculen zodat het instabiele en sterk oxiderende O₃ ontstaat. Ozon is daarmee een zeer sterke oxidant en biocide die o.a. gebruikt wordt voor waterbehandeling, o.a. voor legionellapreventie in koeltorens (ISSO 2008), zie ook paragraaf 14.4. De ozonconcentraties die hierbij worden toegepast zijn vele malen groter dan de bovengenoemde MAC waarden in lucht en bovendien reageert ozon ook met watermoleculen (Weschler, Charles J. 2000).

Het rendement van een elektrostatisch luchtfilter neemt toe met een hogere spanning, maar hierbij stijgt ook de ozonemissie. In principe is dit ongewenst omdat ozon een milieuverontreinigende stof is, die bij hogere concentraties na inhalatie schadelijk is voor de gezondheid. Verschillende instanties, MAC-waardes voor ozon opgesteld, de Maximale Aanvaardbare Concentratie voor een stof voor een bepaalde tijd, waaraan een mens mag blootgesteld worden (Weschler, Charles J. 2000). Voor een normale werkweek van 5 dagen en 8 uur per dag is door de WHO¹⁵ een MAC-waarde voor ozon gesteld van 0,06 PPM¹⁶. Voor 15 minuten geldt een MAC-waarde van 0,3 PPM. De geurdrempel van ozon is echter vele malen lager dan deze MAC-waardes voor ozon, waardoor te hoge concentraties snel zullen worden opgemerkt.

In een Klimaatcascade[®] zouden de positieve en negatieve eigenschappen van ozon wellicht kunnen worden gecombineerd. De ozonemissie van het elektrostatisch luchtfilter wordt in het koelwater van de cascade opgenomen, waarbij omzetting plaatsvindt van O₃ naar O₂. Het aldus met zuurstof verrijkte water heeft op zijn beurt een gunstige uitwerking op de luchtkwaliteit in de cascade. Tevens worden eventuele micro-organismen in het koelwater gedood. Deze gedachtegang is speculatief, maar interessant genoeg om in een volgend stadium nader te worden onderzocht.

14.5 Legionellapreventie

(Deze paragraaf is ontleend aan ISSO publicatie 55.3)

In koeltorens worden in het algemeen micro-organismen aangetroffen, en dit geldt eveneens voor de Klimaatcascade[®] als omgekeerde koeltoren. In deze paragraaf wordt daarom aandacht besteed aan een micro-organisme, de Legionellabacterie, die bij inademing kan leiden tot infecties via de luchtwegen,

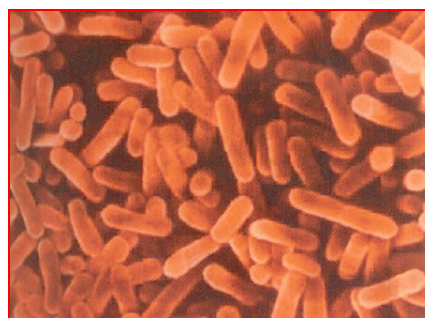
Micro-organismen zijn eencellige organismen zonder geslacht met een grootte van 0,5 tot 10 µ. Micro-organismen komen voor in lucht en water en kunnen leiden tot de volgende klachten:

- Irritaties aan ogen en slijmvliezen;
- Allergieën, voornamelijk schimmels die kunnen leiden tot overgevoeligheid;
- Infecties, voornamelijk door inademing aan longen en luchtwegen.

De aanwezigheid van micro-organismen is afhankelijk van:

- Voeding, bijv. in de lucht aanwezige huidschilfers;
- Vocht; veel micro-organismen overleven alleen in een vochtige omgeving;
- Temperatuur; ideaal zijn temperaturen tussen kamer- en lichaamstemperatuur.

Er zijn ongeveer 50 soorten Legionellabacteriën waarvan de Legionella Pneumophila waarschijnlijk de enige is die ziekteverwekkend is. De bacteriesoort Legionella Pneumophila, zie figuur 15.3, komt altijd in zeer lage aantallen voor in alle typen water. Legionellose ofwel "veteranenziekte" kan alleen ontstaan door inademing van kleine waterdruppels (aerosolen). De bacterie nestelt zich in de longblaasjes. Het drinken van met Legionella besmet water is niet gevaarlijk!



Figuur 14.2 – Legionellabacteriën

Legionella Pneumophila is ingedeeld in 3 groepen: serotypes. Omdat de verschillende serotypen verschillende ziektebeelden hebben is het van belang te onderzoeken welk serotype er in een installatie aangetroffen wordt. De volgende serotypen worden onderscheiden:

¹⁵ World Health Organization

¹⁶ Parts per million overeenkomend met µg.m⁻³

- Legionella Pneumophila serotype 1: deze veroorzaakt de veteranenziekte, en kan in het ergste geval dodelijk zijn; zonder behandeling is de kans op sterfte 10-20%;
- Legionella Pneumophila serotypen 2-14: deze veroorzaakt de Legionellagriep;
- Legionella non pneumophila of "*species*". Dit zijn de overige, minder gevaarlijke soorten.

De soort wordt vastgesteld via "*serotyping*" van de bacterie. Besmetting met de soort Legionella Pneumophila is verantwoordelijk voor 90% van de Legionella-infecties. Tot nu toe is bekend dat besmetting alleen plaats kan vinden door inademing van aerosolen en niet door waterconsumptie. Aerosolen met Legionellabacteriën vragen daarom de meeste aandacht.

Enkele belangrijke kenmerken van de Legionellabacterie zijn:

- Overleeft alleen in waterige milieus;
- Groeit alleen bij aanwezigheid van zuurstof in het water;
- Heeft voor groei een zuurgraad (pH) nodig tussen de 5,5 en 9,2; een pH van 2,2 wordt 5 minuten overleefd;
- Verblijft bij voorkeur in hoeken, kieren, randen en in de in leidingen aanwezige biofilm, dit is een slijmachtige substantie tegen de wanden van leidingen en reservoirs. De aanwezigheid van een biofilm is een van de randvoorwaarden voor groei van Legionellabacteriën. Stilstaand water bevordert hierbij biofilmvorming;
- Bij temperaturen lager dan 20⁰C vermenigvuldigt de Legionellabacterie zich niet maar blijft wél in leven. Blijft water tussen 20⁰C en 25⁰C langer dan een week stilstaan, dan kan zich wel langzame groei voordoen;
- Vermenigvuldigt zich bij temperaturen tussen de 25⁰C en 50⁰C met maximale groei tussen 30⁰C en 40⁰C
- Bij 42⁰C is de verdubbelingstijd van de populatie 120 minuten;
- Boven 50⁰C vindt langzame afsterving en boven 60⁰C snelle afsterving plaats;
- Een naakte Legionellabacterie sterft bij een omgevingstemperatuur van 70⁰C binnen 8 tot 10 seconden. Daarentegen is bewezen dat een Legionellabacterie die zich in een biofilm ophoudt gedurende 20 uur een dergelijke temperatuur kan overleven. De vorming van een biofilm in (water)leidingen en reservoirs moet dus zo veel mogelijk worden beperkt. Indien zich toch een biofilm heeft gevormd dan kan deze meestal worden verwijderd door grondig te spoelen met zeer hoge concentraties chloor of loog.

Figuur 14.3 illustreert het temperatuurbereik waarbinnen Legionella overleeft, groeit of afsterft. Tevens wordt een indruk gegeven van het temperatuurbereik van een aantal veel gebruikte systemen en verschillende typen apparatuur.

Een Klimaatcascade[®] werkt bij diabatische koeling in het temperatuurbereik tussen 10⁰C en 20⁰C, zie hoofdstuk 8, voor de ontwikkeling van legionella een veilig gebied. Omdat de Klimaatcascade[®] bij voorkeur volgens systeemvariant A2 zal werken bij koelwatertemperaturen van 13⁰..20⁰C – zie hoofdstuk 12- is het risico voor een overleving van legionella bacteriën uitgesloten.

Toepassingsgebied	Temperatuurgebied	Legionella groei- en afsterfgedrag
	100 ^o	
stoombevochtiging		
HT CV systemen	80 ^o	snelle decimering
Warm tapwater	60 ^o	
.	50 ^o	langzame decimering
	45 ^o	langzame uitgroei
	40 ^o	snelle uitgroei
baden, douches, koeltorens		optimale uitgroei
	30 ^o	
	25 ^o	snelle uitgroei
adiabatische koeling	20 ^o	langzame uitgroei
KLIMAATCASCADE[®]		
leidingwater in gebouw	10 ^o	overleving in lage concentraties mogelijk
	0 ^o	

Figuur 14.3 – Groei- en afsterfgedrag van de Legionella bacterie

15. CONCEPT-UITWERKING EN DIMENSIONERING

15.1 Inleiding

Het is niet de bedoeling van dit hoofdstuk het Geo-Klimaatconcept[©] in detail uit te werken. Dat is alleen maar mogelijk in het kader van een Voorlopig Ontwerp van een concreet gebouw. Het lijkt echter zinvol iets nader in te gaan op enkele in het voorgaande vermelde principes .

15.2 Klimaatcascade[©]

15.2.1 Ventilatiecapaciteit

De ventilatiecapaciteit dient te worden bepaald door de klimaatadviseur. Voor een eerste aanzet kan in kantoorgebouwen worden uitgegaan van de volgende globale gegevens.

Uitgegaan wordt van kwaliteitscategorie II uit NEN-EN 15251 bij een laag emissieniveau uit het interieur –zie deelrapport (IV) paragraaf 6.3. Voor een cellenkantoor komt dit overeen met $1,4 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ of $\approx 5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ betrokken op het afdelings vloeroppervlak volgens NEN 2580, zie tabel 15.1. Het specifieke ventilatie-debiet op bvo basis bedraagt $5 \cdot 0,65 = 3,25 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. Met een ventilatie-debiet van $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ kan dus een vloeroppervlak worden bediend van $1 \cdot 3600 / 3,25 \approx 1.100 \text{ m}^2$.

Bruto vloeroppervlak (bvo)	Netto vloeroppervlak (nvo)	Nuttig vloeroppervlak	Afdelings vloeroppervlak	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vloeroppervlak werkplekken inclusief ▪ Looproutes tussen werkplekken 	55%		
				<ul style="list-style-type: none"> ▪ Supplementaire afdelingsruimte 	10%		
			<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sanitaire ruimten ▪ Speciale ruimten ▪ Buitenberging, stallingen 				
			<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verkeersoppervlak ▪ Oppervlak voor technische installaties 				
	Tarra vloeroppervlak	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Niet statische bouwdelen ▪ Statische bouwdelen ▪ Ruimten lager dan 1,5 m 					

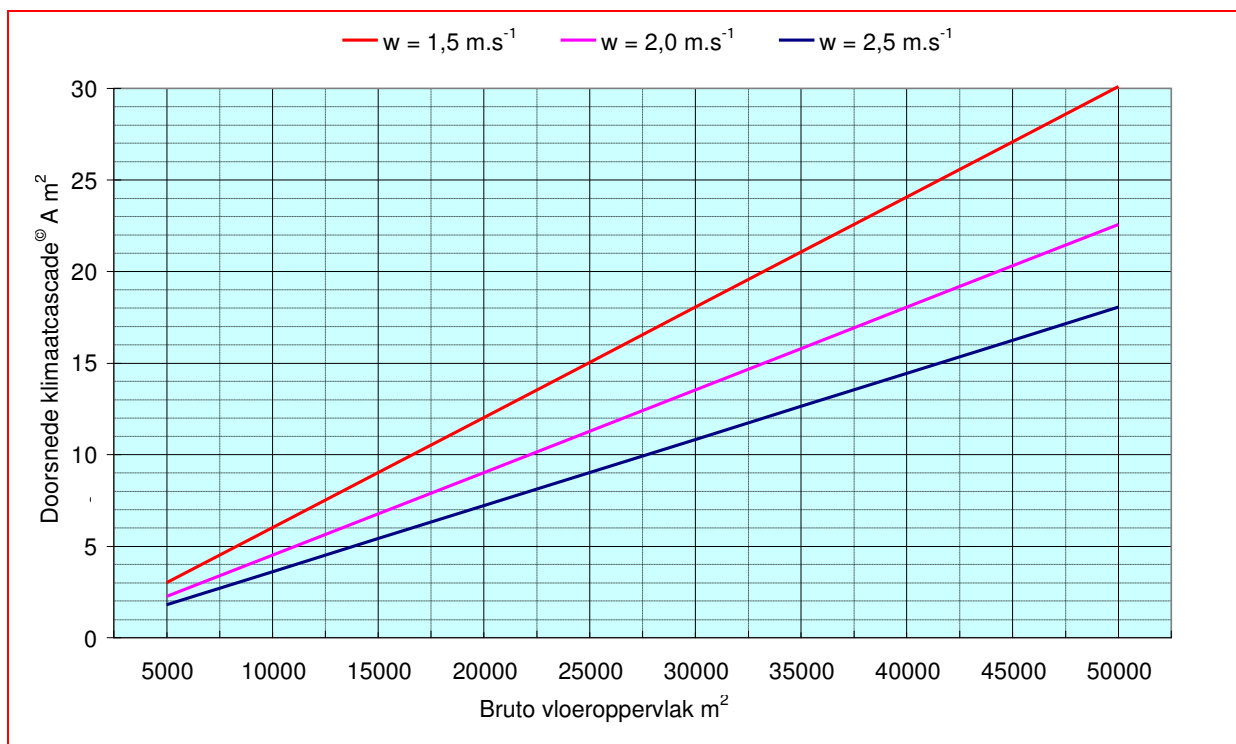
Tabel 15.1 – Verdeling vloeroppervlakken van gebouwen volgens NEN 2580

Voor een goede luchtverdeling over de op het natuurlijke ventilatiesysteem aangesloten ruimten en een energie-efficiënte bedrijfsvoering kan worden uitgegaan van de toepassing van zelfregelende roosters met regeling op basis van aanwezigheid en/of CO₂, waardoor een reductiefactor van 0,85 à 0,9 kan worden toegepast; het specifieke ventilatie-debiet kan hierdoor in principe worden verlaagd naar $\approx 4,5 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, betrokken op het afdelingsvloeroppervlak. Het is uiteraard aan de ontwerper om het ventilatie-debiet nader per geval vast te stellen.

15.2.2 Doorsnede

De doorsnede van een Klimaatcascade[©] wordt bepaald door de lichtsnelheid en de ventilatiecapaciteit. De lichtsnelheid heeft binnen bepaalde grenzen weinig invloed op de koelprestaties –zie hoofdstuk 11. Voor de globale dimensionering van een Klimaatcascade[©] in het Voorlopig Ontwerp lijkt een lichtsnelheid van $1,5 \text{ à } 2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ een redelijk uitgangspunt. Voor een snelle indicatie op basis van de ventilatiecapaciteit ad paragraaf 15.2.1 kan het benodigde doorsnedeoppervlak worden ontleend aan Figuur 15.1.

Voor nieuwbouw moet de geometrie van de doorsnede zijn aangepast aan het sproeipatroon van de geselecteerde sproeiers. Bij revitalisatie van bestaande gebouwen, waarbij veelal een bestaande installatieschacht zal worden omgebouwd tot Klimaatcascade[®], wordt het sproeipatroon aangepast aan de schachtafmetingen.



Figuur 15.1 – Doorsnede Klimaatcascade[®] als functie van het bruto vloeroppervlak en luchtsnelheid

De materiaalkeuze voor een Klimaatcascade[®] kan in principe vrij door de ontwerper worden gekozen. Als bouwkundig element met lange levensduur lijkt een steenachtig materiaal voor de hand te liggen. De binnenzijde moet glad en goed reinigbaar worden uitgevoerd.

15.3 Sproeisysteem

Het sproeisysteem is bepalend voor de prestaties van een Klimaatcascade[®], en moet derhalve met grote zorgvuldigheid worden ontworpen.

Basisgegevens voor het ontwerp van het sproeisysteem zijn het voor de koelprestatie benodigde waterdebiet en sproeispectrum -zie hoofdstuk 11. Met behulp van het rekenmodel –zie hoofdstuk 10- kan iteratief de water/luchtverhouding $R_{w/L}$ en het optimale sproeispectrum worden bepaald.

De keuze van sproeiers die dit sproeispectrum ook metterdaad kunnen leveren is niet zo eenvoudig. In de industrie worden sproeiers gebruikt voor zeer uiteenlopende toepassingen en voor verschillende vloeistoffen, temperaturen en drukken. Het sproeispectrum van in de catalogi van fabrikanten opgenomen sproeiers is dus geen vast gegeven.

Op basis van de ervaringen die zijn opgedaan met het ontwerp van de fysieke testopstelling –zie hoofdstuk 17- geeft de volgende selectiemethode goede resultaten:

1. Voorlopige berekening van de water/luchtverhouding $R_{w/L}$ en het optimale sproeispectrum door de klimaatadviseur, uitgedrukt in één van de spectra 1 t/m 10 volgens tabel 9.2 in hoofdstuk 9.
2. Selectie door de fabrikant uit het fabrieksassortiment van één of meer sproeiers die vermoedelijk aan dit sproeispectrum kunnen voldoen. .

3. Laboratoriummeting van de sproeispectra van de geselecteerde sproeiers en keuze van het sproeiertype dat optimaal aan het berekende sproeispectrum voldoet –zie paragraaf 16.6.
4. CFD simulaties met één of meer van de gekozen sproeiertypes om de keuze te verifiëren en het sproeisysteem te optimaliseren.

Het ligt voor de hand dat sproeierfabrikanten t.z.t. de voor het ontwerp van een Klimaatcascade[®] benodigde gegevens in hun catalogi zullen vermelden.

15.4 Drukopbouw in een Klimaatcascade[®]

Naast de koelprestatie is de luchtverplaatsing en het leveren van positieve druk voor de luchtverdeling een belangrijke functie van een Klimaatcascade[®]. De figuren 13.11 en 13.12 in hoofdstuk 13, geldend voor een gebouw van 8 verdiepingen, laten zien dat het mogelijk is drukken op te bouwen van > 35 Pa tot > 150 Pa voor respectievelijk ALPHA en BETA gebouwen. Deze drukken zijn weliswaar kleiner dan bij de meeste mechanische ventilatiesystemen maar anderzijds aanzienlijk groter dan bij gebruikelijke natuurlijke ventilatiesystemen.

15.5 Totale drukopbouw voor het luchttoevoersysteem

De beschikbare druk voor de luchtverdeling in het gebouw wordt gevormd door de drukopbouw in de Klimaatcascade[®] + de positieve winddruk op de Bernoulli-injector. De tabellen 19.2 en 19.3 in deelrapport (II) “*Onderzoek Natuurlijke Ventilatie, Wind en het Ventecdak[®]*” laten zien dat op een hoogte van 30 m bij een windkracht 3 Beaufort een positieve druk beschikbaar is van +10 Pa oplopend tot + 119 Pa bij 7 Beaufort.

15.6 Infrastructuur van de luchtverdeling

Hoofdstuk 6 geeft een aantal principes voor de luchtverdeling in gebouwen. Voor nieuwbouw zijn deze gebaseerd op een plenum voor de luchttoevoer onder in het gebouw, waarop verticale gevelkanalen of inpannige verdeelkanalen zijn aangesloten –zie de figuren 6.2 t/m 6.8. De typologie van het gebouw, enkelcorridor, dubbelcorridor of atrium bepaalt in hoge mate de infrastructuur van de luchtverdeling. Idealiter zal worden gezocht naar een integratie van de draagconstructie en de luchtverdeling met behulp van buisvormige kolommen.¹⁷ In de VO fase (Voorlopig Ontwerp) zou voor de dimensionering hiervan een lichtsnelheid van 2,0 à 3,0 m.s⁻¹ kunnen worden aangehouden, waardoor in het algemeen forse kolomafmetingen ontstaan.

Voor revitalisatie van bestaande gebouwen met inbouw van het Geo-Klimaatconcept[®] moet uiteraard gebruik worden gemaakt van de bestaande mogelijkheden. De oplossing volgens paragraaf 6.x, toegepast in de case study, is een voorbeeld van een luchtverdeelsysteem met geringe drukverlies.

Het drukverlies van het luchtverdeelsysteem moet uiteraard zijn afgestemd op de totaal door de Bernoulli-injector + de Klimaatcascade[®] gegenereerde drukken. Deze zijn naast de hoogte en het ontwerp van gebouw en Klimaatcascade[®], ook afhankelijk van de buitentemperatuur, de windsnelheid en de gekozen regelstrategie volgens de systeemvarianten A, B en C uit hoofdstuk 12.

Het is aan de ontwerper om hierin een afgewogen keus te maken.

15.7 Debietregeling

Door de wisselende voordruk aan de voet van de Klimaatcascade[®] en de hoogteafhankelijke drukken in de toevoer- en afvoerschachten moet de luchtdistributie in de kantoorruimten automatisch worden geregeld. Deze regeling kan worden uitgevoerd op basis van luchtkwaliteit, aanwezigheid, persoonlijke behoefte of

¹⁷ Als voorbeeld kan gelden het kantoorgebouw van Waterschap Vallei en Eem in Leusden; adviseur klimaatsysteem Ben Bronsema.

anderszins. In principe kan de debietregeling zowel in de luchttoevoer als in de luchtafvoer of in beide worden uitgevoerd.

16. NUMERIEKE STROMINGSSIMULATIE KLIMAATCASCADE[®]

16.1 Samenvatting

In hoofdstuk 10 is een Excel rekenmodel ontwikkeld waarmee de prestaties van een Klimaatcascade[®] kunnen worden gesimuleerd. Het is gewenst dan wel noodzakelijk dit rekenmodel te verifiëren met behulp van een meer geavanceerd simulatiemodel. Een numerieke stromingssimulatie met behulp van CFD komt hiervoor als eerste in aanmerking.

Een tweede en niet minder belangrijke reden voor het gebruik van CFD voor de ontwikkeling van de Klimaatcascade[®] is de selectie van de benodigde sproeiers. Met behulp van het Excel rekenmodel kan weliswaar een voorlopig sproeipatroon worden geselecteerd, maar het type sproeier dat dit spectrum bij een bepaalde voordruk kan leveren is hiermee nog niet bekend. Samenwerking met een partner op het gebied van sproeitechnologie, die niet alleen het sproeispectrum van sproeiers kan meten maar ook in staat is dit via CFD te verbinden met de gewenste prestaties in een Klimaatcascade[®] is hiervoor onontbeerlijk. Een dergelijke partner is gevonden in Spraying Systems Deutschland GmbH

Na een korte inleiding over het karakter en de mogelijkheden van numerieke stromingssimulatie met behulp van CFD, wordt een overzicht gegeven van de voor een Klimaatcascade[®] uitgevoerde CFD simulaties. Deze omvatten in hoofdlijnen:

- Koeling en droging van ventilatielucht bij een ontwerp zomerconditie van 28⁰C bij 55% RV en bij een gemiddelde zomerconditie van 20⁰C bij 80% RV.
- Verwarming en bevochtiging van ventilatielucht bij een ontwerp winterconditie van -10⁰C bij 90% RV en bij een gemiddelde winterconditie van +5⁰C bij 90% RV

Simulaties zijn uitgevoerd voor de fysieke testopstelling volgens hoofdstuk 17 en voor een model op ware grootte, waarvoor gekozen is voor een gebouw van 8 verdiepingen met een ventilatiecapaciteit van 40.000 m³.h⁻¹ en gebouw/klimaatmodel BETA. De simulaties wijzen uit dat de in zomer en winter gevraagde luchtcondities bij uittrede van de Klimaatcascade[®] kunnen worden gerealiseerd bij een constante watertemperatuur van 13⁰C en een constant waterdebiet. Dit maakt een regeltechnisch zeer eenvoudige uitvoering van de Klimaatcascade[®] mogelijk; slechts bij zeer lage buitentemperaturen is een geringe verhoging van de watertemperatuur gewenst. De Klimaatcascade[®] is hierdoor niet alleen een effectief en energie vriendelijk Hoog Temperatuur Koelsysteem (HTK), maar tevens een ultra Laag Temperatuur Verwarmingssysteem (LTV).

Naast simulatie van de psychometrische prestaties zijn ook simulaties uitgevoerd met betrekking tot de drukopbouw in een Klimaatcascade[®]. Bij gemiddelde zomercondities wordt in het model met 8 verdiepingen aan de voet van de Klimaatcascade[®] een positieve druk gerealiseerd van ca 100 Pa.

De voor het testmodel gemaakte simulaties zijn gevalideerd met metingen in de fysieke testopstelling –zie hoofdstuk 17.

16.2 Inleiding CFD

Stromende fluïda, vloeistoffen en gassen, zorgen voor de overdracht van energie in klimaatinstallaties en het binnenmilieu. Stromende lucht in de gebouwde omgeving zorgt voor het transport van warmte, vocht en luchtverontreinigingen. Computational Fluid Dynamics (CFD) is een rekentechniek die het mogelijk maakt de beweging van en in een stroming te bestuderen. Met CFD kan in principe een rekenmodel worden geconstrueerd dat model staat voor het fysieke model dat men wil bestuderen. Dit virtuele prototype is gebaseerd op de wetten van de stromingsleer, en met behulp van de toegepaste software kunnen stromingen van vloeistoffen en gassen en gerelateerde fysische processen, zoals warmte- en stofoverdracht in beeld worden gebracht en voorspeld. De software geeft in grafische en numerieke vorm een voorspelling van de prestaties van deze bouwdeelen.

Voor stromingen zijn de wetten van behoud van massa, impuls en energie van kracht, uitgedrukt in partiële differentiaalvergelijkingen PDE's. In CFD wordt het stromingsveld gediscretiseerd, onderverdeeld in een groot aantal afzonderlijke kleine cellen, het raster of grid. In elke cel worden de PDE's via

algebraïsche algoritmes met behulp van computers numeriek seriematig opgelost waardoor een compleet beeld van de stroming in het betreffende stromingsveld kan worden gegenereerd.

CFD geeft snel inzicht in de werking van nieuwe concepten, die moeilijk op een andere manier kan worden verkregen. Dit is een groot voordeel bij de ontwikkeling van responsieve bouwdelen omdat het bouwen van fysieke prototypes hiervoor erg kostbaar is. Met behulp van CFD analyse kan worden nagegaan hoe concepten en variaties hiervan zullen presteren. Met behulp van CFD kunnen snel veranderingen in processen worden voorspeld bij wijziging van randvoorwaarden. Ontwerpen kunnen hierdoor op een efficiënte wijze worden geoptimaliseerd. Fysieke prototypes kunnen dan worden gemaakt op basis van een geoptimaliseerd virtueel prototype, waardoor op tijd en geld wordt bespaard.

Voor het onderzoek Earth, Wind & Fire is met behulp van een virtueel prototype in CFD de prestatie van de Klimaatcascade[©] geanalyseerd en geoptimaliseerd. Mede op basis hiervan is een fysiek schaalmodel gebouwd voor experimenteel onderzoek. Dit fysieke schaalmodel is op zijn beurt ook weer een prototype voor de in de werkelijke bouwpraktijk te realiseren bouwdelen.

Op basis van metingen aan het fysieke model zijn de CFD simulaties gevalideerd, waardoor deze een hoge mate van betrouwbaarheid hebben verkregen en geschikt zijn om een model op te schalen naar de werkelijkheid van reële toepassingen in de klimaattechniek.

16.3 Beperkingen van CFD

“De grootste nadelen van CFD zijn de complexiteit en de gevoeligheid van de resultaten voor de te kiezen modelparameters. De gebruiker moet vele keuzes maken bij het uitvoeren van een simulatie, en deze kunnen sterk de nauwkeurigheid van de resultaten beïnvloeden. Als veilig uitgangspunt durven we te stellen dat voor CFD-resultaten niet de veronderstelling van onschuld geldt, integendeel: “CFD resultaten zijn fout, tot het tegendeel bewezen is”. Verificatie en validatie van CFD simulaties zijn essentieel. Voor de validatie zijn dan weer nauwkeurige metingen nodig” (Blocken, B. 2010).

Onnauwkeurige invoergegevens, een gebrekkig Excel rekenmodel, een onjuiste keuze van het raster, niet adequate software of beperkte computercapaciteit, kunnen de resultaten van een CFD simulatie sterk beïnvloeden. Deze kunnen dan ook pas betrouwbaar worden geacht, indien ze zijn gevalideerd met metingen in situ of aan een fysiek model.

De uitvoering van CFD simulaties, opstelling van het analytisch model, bepaling van het raster, discretisering van het stromingsveld en het simulatieproces inclusief visualisatie en analyse van de gegevens is een gecompliceerd proces. Kennis van het betreffende vaktechnische domein is onontbeerlijk, maar ook kennis van numerieke rekentechnieken. CFD simulaties voor het onderzoek Earth, Wind & Fire zijn dan ook onder auspiciën van de onderzoeker uitgevoerd door externe specialisten. Voor de in hoofdstuk 9 ontwikkelde Klimaatcascade[©] zijn de CFD simulaties uitgevoerd door Dr.-Ing. J. Stefan Markus van Spraying Systems Deutschland GmbH, een ervaren en erkend specialist op het gebied van CFD voor sproeitechnologie.

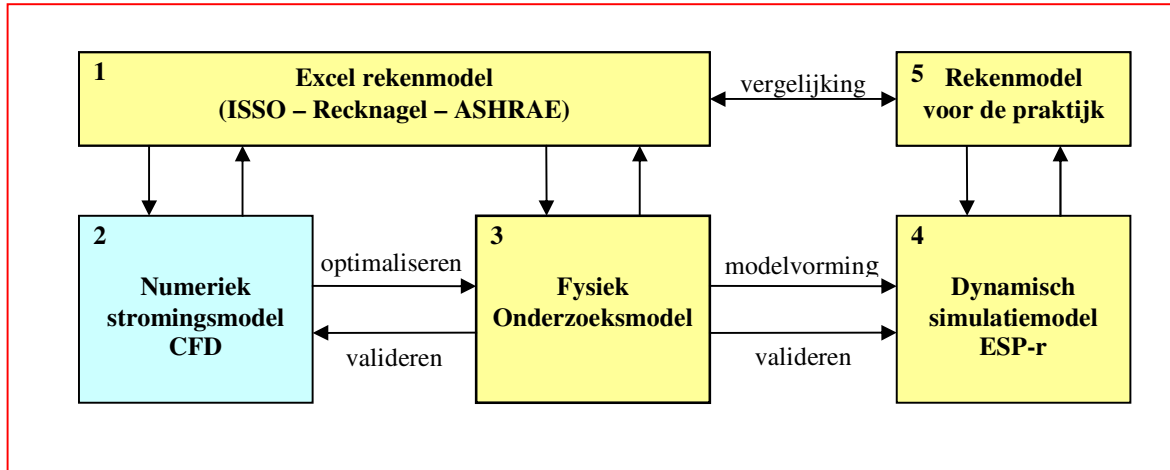
16.4 Verband met andere modellen

Voor het Earth, Wind & Fire concept zou het ideaal zijn de warmte- en stofoverdracht en de drukopbouw in de Klimaatcascade[©] gelijktijdig te kunnen modelleren en simuleren met het thermisch- en stromingsnetwerk in een gebouw met behulp van één model binnen hetzelfde computerdomein. Door beperkingen in computercapaciteit heeft CFD (nog) niet het niveau bereikt dat nodig is voor *real-time* berekeningen. Koppeling met een dynamisch gebouwsimulatiemodel is daardoor niet mogelijk, hetgeen voor de verdere ontwikkeling van het concept als nadeel kan worden beschouwd.

Voor de Klimaatcascade[©] is daarom binnen het gebouwsimulatiemodel ESP-r een experimentele module ontwikkeld waarmee het dynamische proces direct kan worden gekoppeld aan het thermisch- en stromingsnetwerk in een gebouw –zie hoofdstuk 18.

Het verband tussen het Excel rekenmodel, het numeriek stromingsmodel CFD, het fysieke onderzoeksmodel en het dynamisch simulatiemodel ESP-r is weergegeven in figuur 16.1. Elk model heeft zijn eigen toepassingsgebied en door gegevensuitwisseling tussen de modellen kan in principe een hoge

mate van betrouwbaarheid worden gerealiseerd. De simulatieresultaten van het Excel rekenmodel, het CFD model en het ESP-r model, gevalideerd en gekalibreerd op basis van metingen aan het fysieke model, geven tezamen een betrouwbaar beeld van de prestaties van de Klimaatcascade[®]. Voor deze innovatieve ontwikkeling, waarvoor geen referentiegegevens bestaan, is dit noodzakelijk.



Figuur 16.1 – Modelleren - Simuleren – Kalibreren - Valideren

16.5 Excel rekenmodel, CFD model en sproeierselectie

In hoofdstuk 9 is de werking van de Klimaatcascade[®] theoretisch onderzocht in termen van warmte- en stofoverdracht. Op basis hiervan is in hoofdstuk 10 een Excel rekenmodel ontwikkeld waarmee de prestaties kunnen worden gesimuleerd. Voor een innovatieve ontwikkeling als de Klimaatcascade[®], is het gewenst het Excel model te verifiëren en te valideren met behulp van meer geavanceerd simulatiemodel. Een numeriek stromingsmodel met CFD komt hiervoor als eerste in aanmerking.

Een tweede en niet minder belangrijke reden voor het gebruik van CFD voor de ontwikkeling van de Klimaatcascade[®] is de selectie van de benodigde sproeiers. Met behulp van het Excel rekenmodel kan weliswaar een voorlopig sproeipatroon worden geselecteerd, maar het type sproeier dat dit spectrum bij een bepaalde voordruk kan leveren is hiermee nog niet bekend. Samenwerking met een partner op het gebied van sproeitechnologie, die niet alleen het sproeispectrum van sproeiers kan meten maar ook in staat is dit via CFD te verbinden met de gewenste prestaties is hiervoor onontbeerlijk. Een dergelijke partner is gevonden in Spraying Systems Deutschland GmbH.

16.6 Voorselectie van de sproeiers

Met behulp van het Excel rekenmodel (betaversie), is een analyse gemaakt van de koelprestaties van de te testen Klimaatcascade[®] en de daarvoor benodigde debieten en temperaturen van het koelwater –zie tabel 16.1. Er is onderscheid gemaakt voor de klimaat/gebouwtypen BETA en ALPHA met een luchttemperatuur bij uitrede van de cascade van respectievelijk 17^oC en 20^oC. Bij een doorsnede van 1,0 m² en een luchtsnelheid van 0,5 m.s⁻¹ is het luchtdebiet 0,5 m³.s⁻¹ ≡ 1.800 m³.h⁻¹ ≡ 0,6 kg.s⁻¹

De te bereiken koelprestatie kan worden gemanipuleerd door variatie van (a) het koelwaterdebiet en (b) het sproeispectrum. Bij een lager koelwaterdebiet hoort een fijner sproeispectrum. De relatieve vochtigheid moet hierbij << zijn dan 100%.

Als uitgangspunt voor de selectie is gekozen voor een zo klein mogelijk sproeiwaterdebiet waardoor het pompvermogen wordt geminimaliseerd. De consequenties hiervan voor de sproeidruk waren onderdeel van de sproeierselectie.

Voor BETA volgt hieruit een water/lucht verhouding $R_{w/L} = 1,00 \text{ kg.kg}^{-1}$ bij een sproeispectrum nr. 7 en een koelwaterdebiet van 0,6 kg.s⁻¹. Voor ALPHA $R_{w/L} = 0,3 \text{ kg.kg}^{-1}$ bij een sproeispectrum nr. 9 en een

koelwaterdebiet van $0,18 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$. De hierbij behorende gegevens van de sproeispectra en de karakteristieke druppeldiameters zijn aangegeven in tabel 16.2 en figuur 16.2.

Klimaat/gebouw type BETA								
$R_{w/L}$	kg/kg	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,85
$\theta_{w,in}$	$^{\circ}\text{C}$	13,0	13,5	13,8	13,5	13,0	13,2	13,1
$\theta_{w,uit}$	$^{\circ}\text{C}$	15,7	16,3	16,7	16,7	16,5	16,9	17,0
spectrum	nummer	5	6	7	7	7	8	9
$\theta_{air,in}$	$^{\circ}\text{C}$	28,0	28,0	28,0	28,0	28,0	28,0	28,0
$\theta_{air,uit}$	$^{\circ}\text{C}$	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0
$RV_{air,uit}$	%	93	95	97,0	97,0	96,0	99,0	100,0
Δp	Pa	47,4	44,0	40,6	37,3	33,9	30,5	28,8
$q_{m,water}$	kg/s	0,84	0,78	0,72	0,66	0,60	0,54	0,51
$q_{m,water}$	m^3/h	3,02	2,81	2,59	2,38	2,16	1,94	1,84
Klimaat/gebouw type ALPHA								
$R_{w/L}$	kg/kg	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30
$\theta_{w,in}$	$^{\circ}\text{C}$	13,5	14,3	13,7	14,8	13,8	15,2	14,0
$\theta_{w,uit}$	$^{\circ}\text{C}$	17,6	18,4	18,3	19,1	18,9	19,7	19,5
spectrum	nummer	6	7	7	8	8	9	9
$\theta_{air,in}$	$^{\circ}\text{C}$	28,0	28,0	28,0	28,0	28,0	28,0	28,0
$\theta_{air,uit}$	$^{\circ}\text{C}$	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
$RV_{air,uit}$	%	84	88	87	92	90	97	95
Δp	Pa	20,3	18,6	16,9	15,2	13,5	11,9	10,2
$q_{m,water}$	kg/s	0,36	0,33	0,30	0,27	0,24	0,21	0,18
$q_{m,water}$	m^3/h	1,30	1,19	1,08	0,98	0,86	0,76	0,65

Tabel 16.1 – Overzicht koelprestaties

Sproeispectrum										
spectrum	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d_wat mm	2,95	2,65	2,36	2,06	1,77	1,47	1,18	0,88	0,59	0,29
d_vmd mm	4,01	3,61	3,21	2,81	2,41	2,01	1,61	1,20	0,80	0,40
d_smd mm	5,14	4,62	4,11	3,60	3,08	2,57	2,05	1,54	1,03	0,51

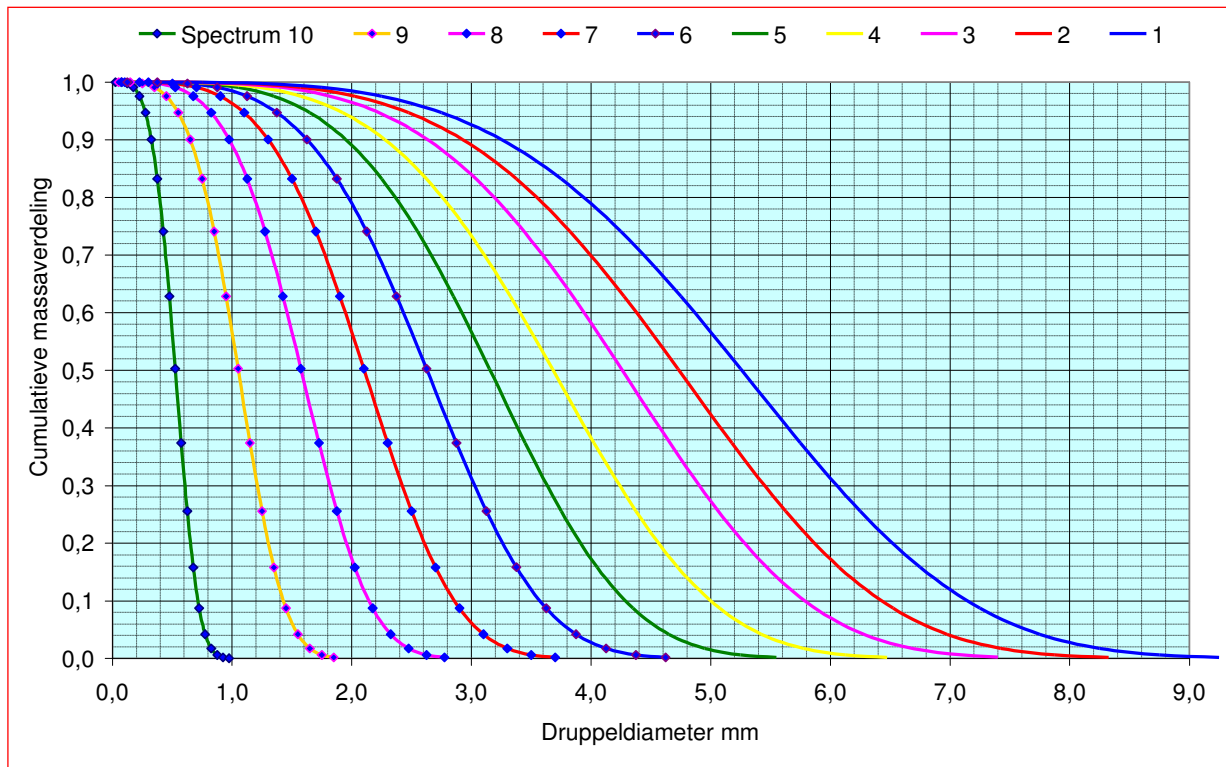
Tabel 16.2 – Sproeispectra en karakteristieke druppeldiameter

Verklaring voor de afkortingen in tabel 16.2 – zie ook paragraaf 9.3

d_wat = druppeldiameter d_{10} [mm]

d_vmd = volume mean diameter d_{20} [mm]

d_smd = Sauter mean diameter d_{32} [mm]



Figuur 16.2 – Druppelgrootteverdeling Rosin Ramler

16.7 Sproeierselectie door Spraying Systems

Uitgaande van Gebouw/Klimaatmodel BETA is op basis van deze berekeningen door Spraying Systems een voorselectie gemaakt van de mogelijk te gebruiken sproeiers. Criteria hiervoor zijn:

- Verwachte congruentie met de berekende druppelgrootteverdeling.
- Een hoog waterdebiet bij een zo laag mogelijke druk (< 1 bar).
- Een kleine sproeihoek (30°) om zo weinig mogelijk water op de wanden te sproeien.
- Een volledig gevulde sproeizone – geen holle kegel model.
- Minimaal aantal sproeiers om de aanschaf- en onderhoudskosten laag te houden.
- Bij meerdere sproeiers in een vierkante Klimaatcascade[®] is het mogelijke aantal beperkt tot 4 of 5.

Figuur 16.3, ontleend aan de catalogus van Spraying Systems GmbH, laat enkele sproeiers zien waaruit op basis van deze criteria een keuze kan worden gemaakt.



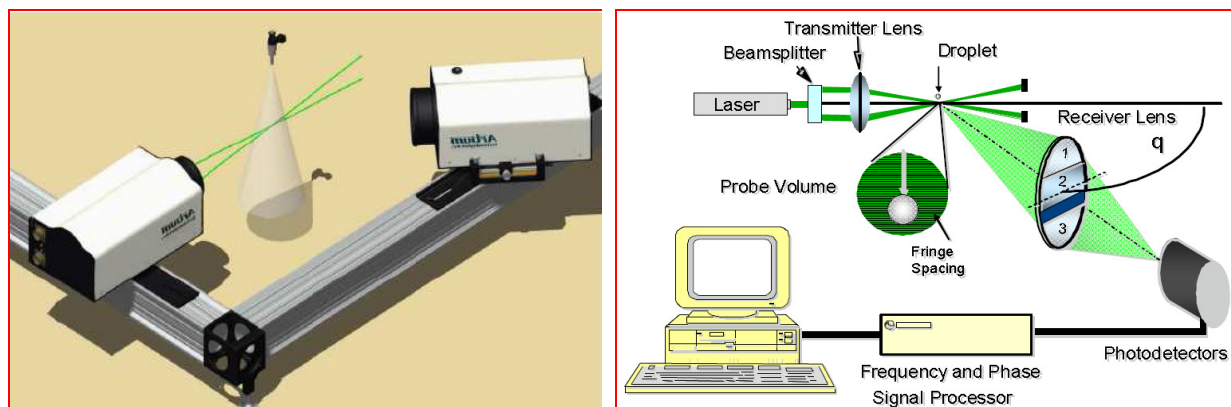
Figuur 16.3 – Mogelijke sproeiers t.b.v. de sproeierselectie door Spraying Systems

Als eerste werd een type FullJet[®] 1-1/2HH-30250 geselecteerd (figuur 16.3 rechts), waarvan een druppelgrootteverdeling bij benadering bekend was. Een oriënterende CFD simulatie met deze sproeier toonde aan dat hiermee niet de gevraagde koelcapaciteit kon worden bereikt. Een kleinere sproeier type FullJet[®] 3/4GG-3050 (figuur 16.3 midden) met een fijner sproeispectrum gaf bij een iets verhoogde water/luchtverhouding globaal genomen wel het gewenste resultaat, maar hiervan waren 5 stuks nodig. Besloten werd voor beide sproeiers een CFD simulatie uit te voeren. Voor een zo realistisch mogelijke simulatie werd besloten van beide sproeiers de druppelgrootteverdeling nauwkeurig te meten.

16.8 Meting van de druppelgrootteverdeling

De druppelgrootteverdeling van de geselecteerde sproeiers zoals ingevoerd bij de oriënterende CFD simulaties berustte op verouderde gegevens, en gold alleen bij hogere drukken dan voor de Klimaatcascade[®] gewenst. Om een betrouwbare CFD simulatie mogelijk te maken zijn de sproeispectra daarom bij een lage druk van 0,5 bar gemeten.

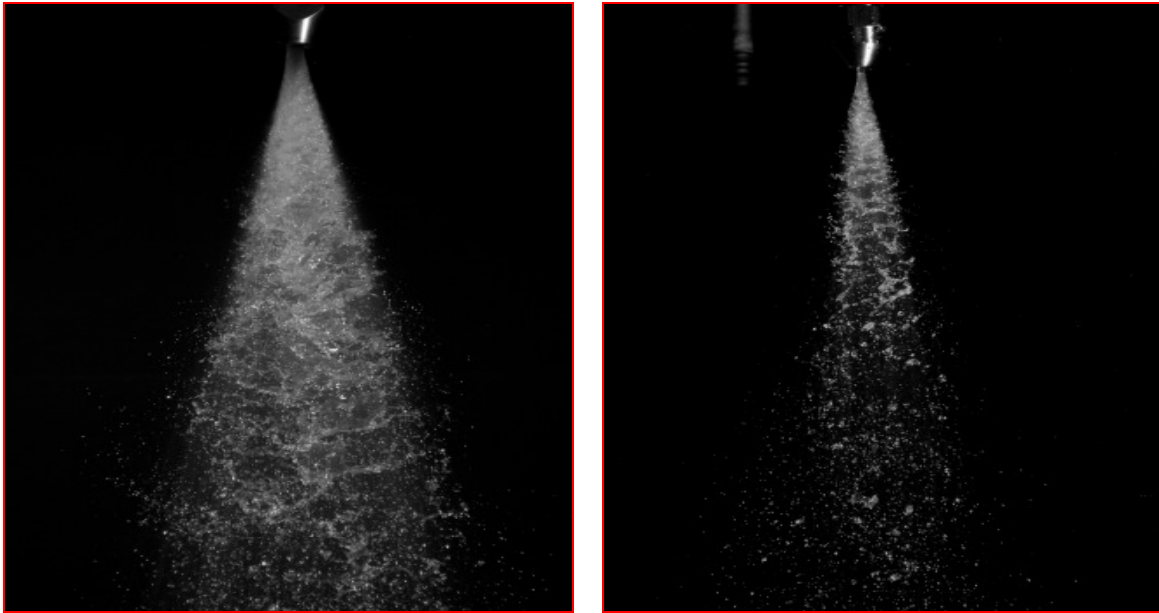
Metingen van druppelgrootte en druppelsnelheid werden uitgevoerd in het laboratorium van Spraying Systems Deutschland GmbH. De hiervoor gebruikte apparatuur is een PDI 300 (Phase Doppler Interferometer), bestaande uit een zender, ontvanger, signaalprocessor en computer. De zender en de ontvanger kunnen benedenwaarts worden bewogen, waardoor meting op verschillende afstanden van de sproeier plaats kan vinden - zie schema en foto figuur 16.4. Documentatie van Spraying Systems Co. geeft uitgebreide informatie over de meetsystematiek (Schick, Rudolf J. 2010).



Figuur 16.4 – Phase Doppler Interferometer

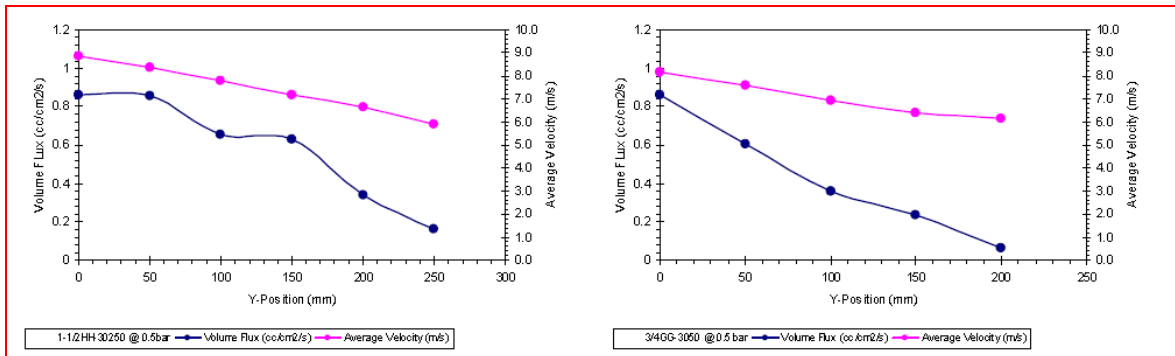
16.9 Druppelgrootteverdeling en druppelstatistiek

Figuur 16.5 laat de sproeipatronen zien van de twee onderzochte sproeiers met debieten van respectievelijk $\approx 42 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ -type 1-1/2HH-30250, en $\approx 8,23 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ -type 3/4GG-3050.



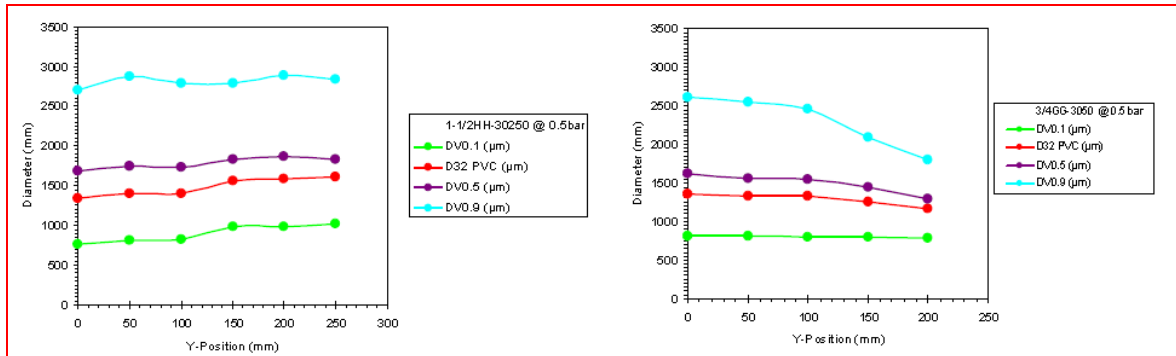
Figuur 16.5 – Sproei patroon type 1-1/2HH-30250 (links) en 3/4GG-3050 (rechts) bij 0,5 bar voordruk

De figuur laat duidelijk zien dat het spectrum van de grotere sproeier (links) compacter is dan die van het kleinere type (rechts). De druppelgrootteverdeling werd gemeten op een afstand van 1000 mm van de sproeier. Het sproeispectrum heeft zich op deze afstand enerzijds voldoende ontwikkeld en gestabiliseerd. Figuur 16.6 laat de afname zien van de druppeldichtheid en de druppelsnelheid gemeten vanuit het hart van de straal naar de buitenkant.



Figuur 16.6 – Druppeldichtheid en gemiddelde druppelsnelheid in de straal op radiale afstand Y

Figuur 16.7 geeft een beeld van de statistische druppeldiameters in de straal gemeten vanuit het hart van de straal. Bij vergelijking met tabel 16.2 lijkt de gemeten druppelgrootteverdeling dichter bij spectrum 8 dan bij spectrum 7 te liggen.



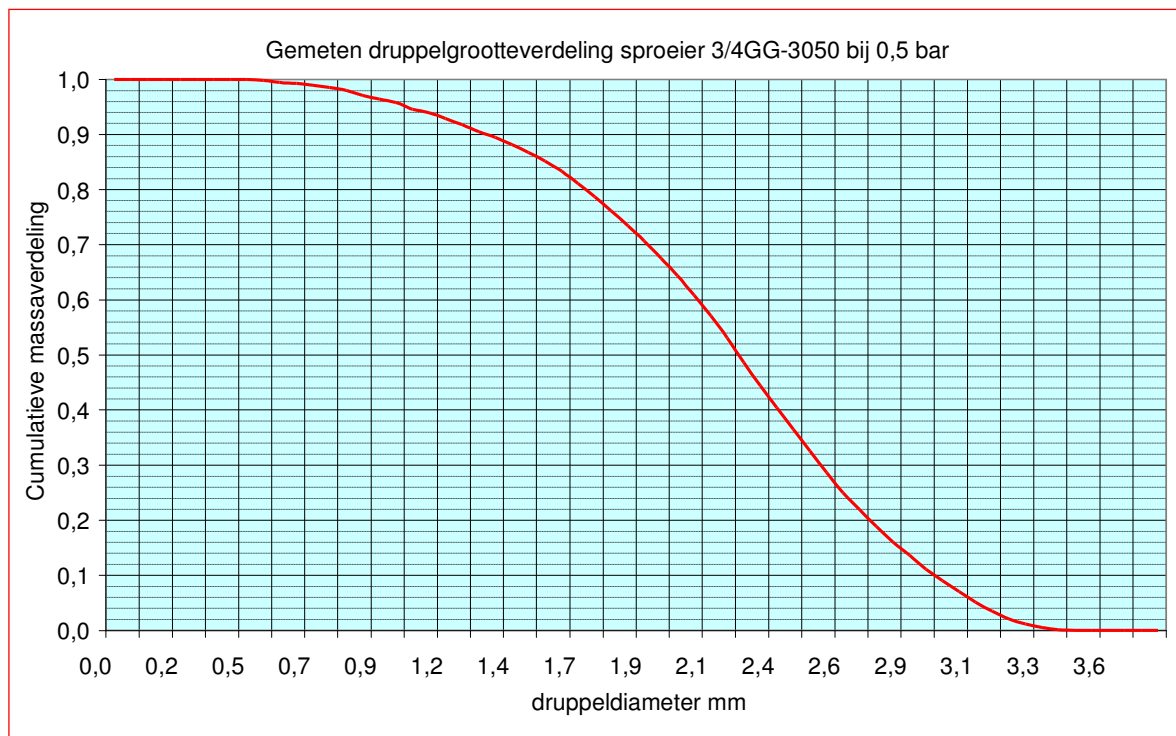
Figuur 16.7 – Druppelstatistiek in de straal op radiale afstand Y

De grote sproeier type FullJet® 1-1/2HH-30250 bleek bij een oriënterende CFD simulatie niet de gewenste koelcapaciteit te leveren –zie paragraaf 16.11 Case A2. De simulaties zijn daarom uitgevoerd met 5 stuks van de kleinere sproeier type FullJet® 3/4GG-3050 –zie paragraaf 16.11 Case B1 t/m B5. Dit type is uiteraard ook voor de metingen in de fysieke testopstelling gebruikt.

Om een zo goed mogelijke prestatievergelijking mogelijk te maken van het CFD model, het Excel rekenmodel en het ESP-r model onderling, dient voor alle simulaties dezelfde druppelstatistiek te worden gebruikt. De modellen kunnen dan ook elk afzonderlijk worden gekalibreerd en gevalideerd op basis van de metingen.

Figuur 16.5 geeft de gemeten druppelgrootteverdeling weer voor de sproeier type FullJet® 3/4GG-3050 bij een voordruk van 0,5 bar zoals gemeten door Spraying Systems.

De druppelstatistiek volgens de metingen van Spraying Systems is aangegeven in tabel 16.3. De *current X position* is de plaats 1000 mm achter de sproeier, de *current Y position* is de radiale afstand vanuit hart van de sproeier. PVC betekent *Probe Volume Corrected*, een correctie voor de gebruikte Phase Doppler Interferometer.



Figuur 16.8 – Druppelgrootteverdeling sproeier FullJet® 3/4GG-3050 bij een voordruk van 0,5 bar

Current X Position	0	0	0	0	0
Current Y Position	0	50	100	150	200
Counts	8118	6462	3284	5808	1700
Data Rate (Hz)	18,3	13,5	8,0	5,4	1,6
Diameter Min (µm)	28,6	26,3	201,6	186,2	220,5
Diameter Max (µm)	3346,6	3171,0	3227,9	3208,7	2565,3
D ₁₀ PVC (µm)	734,3	769,1	800,9	842,0	869,8
D ₂₀ PVC (µm)	867,2	890,1	914,3	937,0	939,7
D ₃₀ PVC (µm)	1006,6	1018,6	1035,0	1033,4	1009,2
D ₃₂ PVC (µm)	1356,2	1333,9	1326,3	1257,0	1164,1

Tabel 16.3 – Druppelkarakteristiek sproeier FullJet® 3/4GG-3050 bij een voordruk van 0,5 bar

In het analytische model en het ESP-r model zijn de D₃₀ (VMD) en D₃₂ (SMD) waarden belangrijke invoerparameters. Voor de simulaties met deze modellen zijn op advies van Spraying Systems hiervoor gemiddelde waarden gebruikt van respectievelijk D₃₀ = 1048 µm en D₃₂ = 1317 µm.

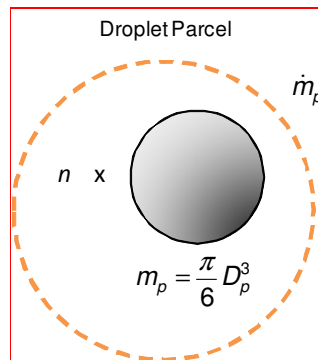
Een vergelijking met tabel 16.2 leert dat dit spectrum tussen de gedefinieerde spectra 8 en 9 ligt en daarmee aanzienlijk fijner is dan spectrum 7 dat voor de voorselectie van de sproeiers is gebruikt –zie paragraaf 16.6

Voor het volledige meetrapport zie “Test Report Drop size analysis” van Spraying Systems Deutschland GmbH, Project No P100165-A d.d. 29-09-2010.

16.10 How Does The CFD Code Handle Millions Of Droplets?

Een interessante vraag is hoe miljoenen afzonderlijke druppels in het CFD simulatiemodel worden verwerkt. Dr.-Ing. J. Stefan Markus licht dit als volgt toe:

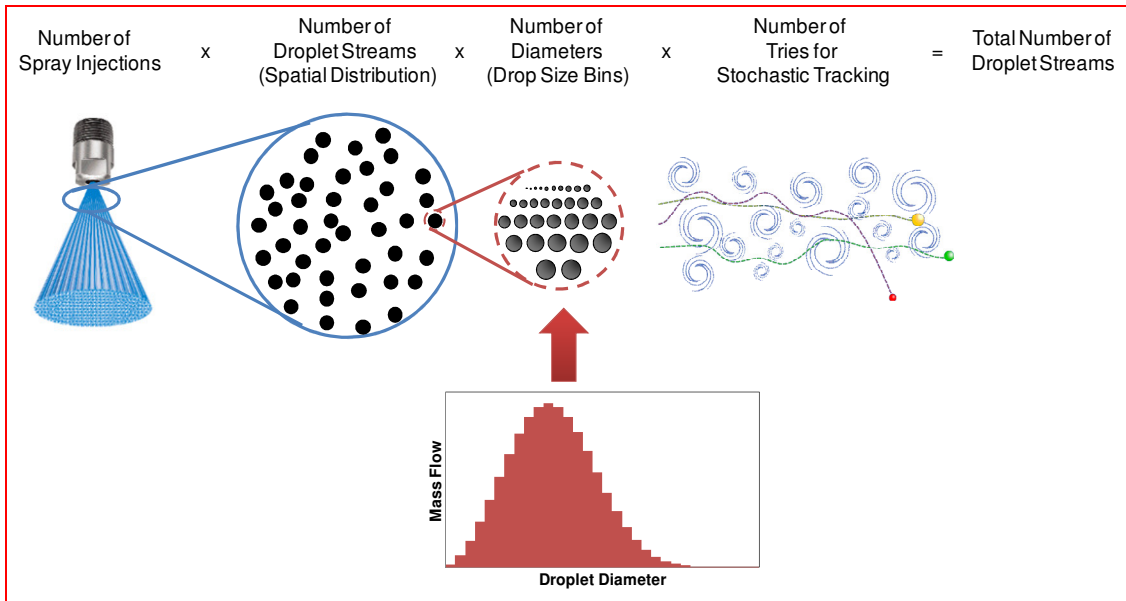
“The effect of the water droplets on the humid air is simulated by the Lagrangian approach, so called discrete phase modelling. Therefore it is assumed that the droplet spray is dilute; this means the volume percentage is low. Each droplet (or particle) in the model represents a parcel of droplets in reality. Each droplet parcel represents a small mass flow rate contains may contain arbitrary number of droplets in reality. See figure 16.9



Figuur 16.9 –Droplet parcel

In our case are 2.5 spray nozzles inside the computational domain; as the flow in the climate cascade is symmetric only the flow for one half is computed. Each nozzle droplet stream contains 42 droplet streams that are randomly injected in direction of the spray cone; each droplet stream is divided in to 32 droplet size bins. For each stream accidently 3 different number of tries for the droplets trajectories with random different paths due to turbulent dispersion are calculated. Hence in our computational domain 5 (number of

nozzles) \times 42 (number of droplet streams) \times 32 (number of diameters) \times 3 (number of tries for stochastic tracking) = 10080 trajectories of droplet parcels are computed. See figure 16.10



Figuur 16.10 - Image of Turbulence Dispersion of Particles is taken from Will Bachallo 2008

$$\text{Number Frequency of Droplet Parcel} \cdot \text{Residence Time of Droplet Parcel} = \text{Number of Droplets per Droplet Stream}$$

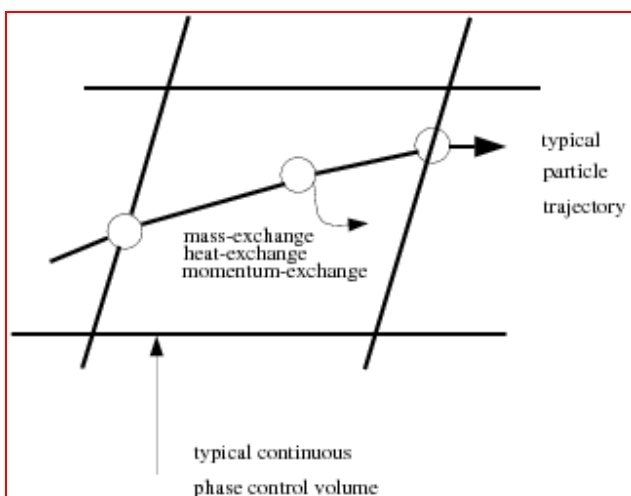
$$\sum \text{Number of Droplets per Droplet Stream} = \text{Total Number of Droplets in Computational Domain}$$

Figuur 16.11 - Droplet Streams and Total Number of Droplets in The Computational Domain

The total mass flow in this case of all streams is $2.5 \times 0.134075 \text{ kg/s} = 0.335188 \text{ kg/s}$. For instance one may look at a single droplet parcel, e.g. a droplet parcel with a diameter of $603 \mu\text{m}$ and a mass per one droplet of 0.115 mg will represent a mass flow of about 38.5 mg/s . The number of droplets per second is the so called frequency, for this $603 \mu\text{m}$ “droplet parcel” the frequency is about 335 droplets/s . Another example given for a droplet parcel with a diameter of $2490 \mu\text{m}$ and a mass per one droplet of 15.4 mg will represent a mass flow only of about 15.4 mg/s . The number of droplets per s is the so called frequency, for this $2490 \mu\text{m}$ droplet parcel the frequency is about 1.9 droplets/s . Altogether in this case about 4.76 Million droplets are present in the domain.

As the trajectory of a particle is computed, the model keeps track of the heat, mass, and momentum gained or lost by the particle stream that follows that trajectory and these quantities can be incorporated in the subsequent continuous phase calculations. Thus, while the continuous phase always impacts the discrete phase, you can also incorporate the effect of the discrete phase trajectories on the continuum. This two-way coupling is accomplished by alternately solving the discrete and continuous phase equations until the solutions in both phases have stopped changing. This interphase exchange of heat, mass, and momentum from the particle to the continuous phase is depicted qualitatively in Figure 16.11.

For further reading about the theory behind the Lagrangian discrete phase capabilities please refer to chapter 16. “Discrete Phase” of the ANSYS FLUENT “Theory Guide”.



Figuur 16.12 -Heat, Mass, and Momentum Transfer Between the Discrete and Continuous Phase

16.11 Het CFD simulatiemodel

Voor de CFD modellering is een 3D model ontworpen overeenkomend met het fysieke onderzoek model zoals in hoofdstuk 17 beschreven –zie paragraaf 16.11.

Om na te gaan of de simulatie betrouwbaar genoeg kan worden opgeschaald naar ware grootte is ook een model ontwikkeld voor een gebouw van 8 verdiepingen –zie paragraaf 16.12.

De simulaties zijn uitgevoerd met de algemene CFD code van ANSYS FLUENT. Omdat dit model standaard niet geschikt is voor de modellering van het koelproces met condensatie in een Klimaatcascade[®], is hiervoor in samenwerking met Fluent Germany een speciale UDF¹⁸ ontwikkeld.

CFD simulatiemodellen voor een Klimaatcascade[®] hebben enkele beperkingen, namelijk:

- Het sproeispectrum komt pas op enige afstand van de sproeier tot ontwikkeling. Direct na het verlaten van de sproeier is de waterstraal nog niet opgebroken in afzonderlijke druppels. Door de uitzonderlijk hoge druppeldichtheid in deze fase is modellering met CFD niet goed mogelijk. Pas na een afstand van ca 1000 mm heeft het spectrum zich voldoende ontwikkeld en gestabiliseerd om met CFD te kunnen worden gemodelleerd.
- Niet alle door het sproeisysteem toegevoerde koelwater komt in de sproeizone terecht. Een deel van de druppels valt op de wanden van de Klimaatcascade[®], en doet daarom maar beperkt mee aan het koelproces. Hoe groot dit aandeel is valt nauwelijks te voorspellen; in het fysieke onderzoeksmodel is dit aandeel gemeten –zie hoofdstuk 17.
- Bij het gebruik van meerdere kleine sproeiers gaan de sproeispectra elkaar op enige afstand overlappen, waardoor de druppelgrootteverdeling meer uiteen gaat lopen dan bij één enkele sproeier.

16.12 CFD simulaties fysiek onderzoek model

16.12.1 Invoercondities

Simulaties voor het fysieke onderzoek model zijn uitgevoerd voor Gebouw/Klimaatmodel BETA met de in tabel 16.4 aangegeven invoercondities. Uitgangspunt is een constant koelwaterdebiet en een constante koelwatertemperatuur van 13^oC, hetgeen de regeling van de Klimaatcascade[®] uiterst eenvoudig maakt. Slechts bij lagere buitentemperaturen wordt de watertemperatuur iets verhoogd.

¹⁸ User Defined Function

	Eenheid	Invoercondities simulaties – Gebouw/Klimaatmodel BETA			
		Zomer		Winter	
		Ontwerp	Gemiddeld	Gemiddeld	Ontwerp
Luchtdruk	kPa	100	100	100	100
Luchttemperatuur in	⁰ C	28	20	5	-10
Relatieve vochtigheid	%	55	80	90	90
Luchtsnelheid	m.s ⁻¹	0,5	0,5	0,5	0,5
Lucht volumestroom	m ³ .h ⁻¹	1.800	1.800	1.800	1.800
Lucht massastroom	kg.s ⁻¹	0,574	0,576	0,626	0,671
Luchttemperatuur uit	⁰ C	17	17	8	8
Relatieve vochtigheid	%	95	95	95	95
Watertemperatuur in	⁰ C	13	13	13	15
Water volumestroom	l.min ⁻¹	40,3	40,4	40,4	40,4
Water volumestroom	m ³ .h ⁻¹	2,42	2,42	2,42	2,42
Water massastroom	kg.s ⁻¹	0,672	0,672	0,672	0,672
Water/Luchtverhouding	-	1,17	1,17	1,07	1,00

Tabel 16.4 – Invoercondities voor de simulaties fysieke onderzoeksmodel –Gebouw/Klimaatmodel BETA

Voor de ontwerp-winterconditie bij -10⁰C zijn de waarden voor de relatieve vochtigheid gebaseerd op waarden voor de sublimatie druk -zie

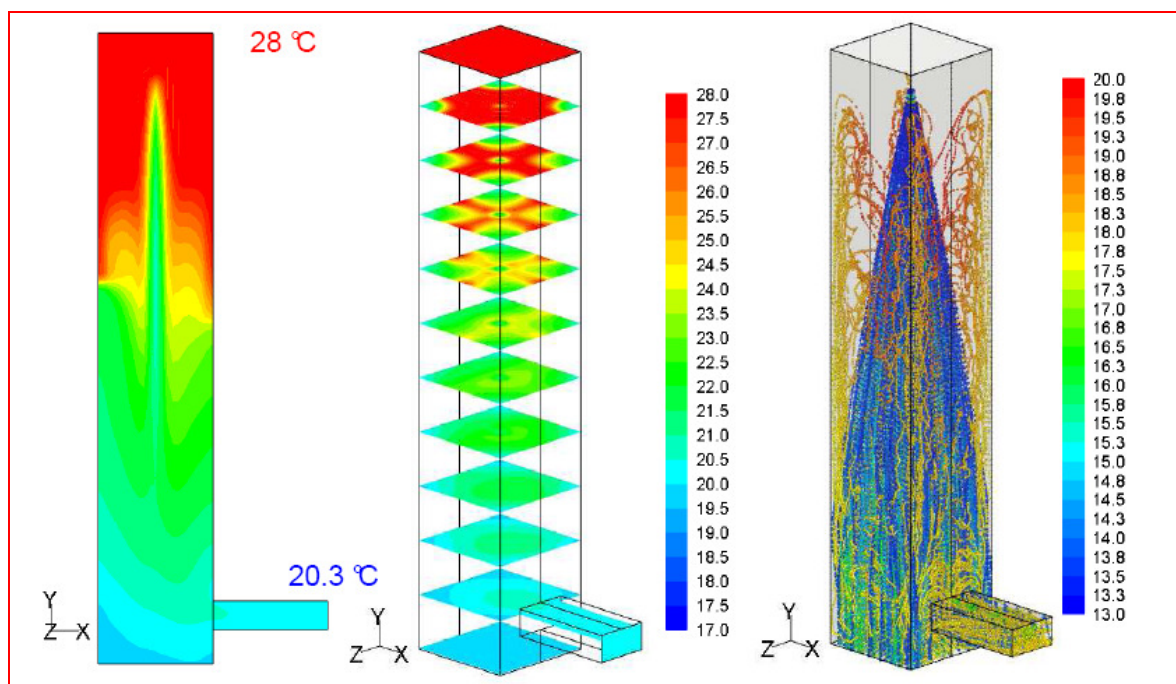
<http://www.wolframalpha.com/input/?i=sublimation+pressure+of+water+at+263.15+K>

16.12.2 Case A2 – Ontwerp zomercondities met één FullJet[®]Nozzle 1-1/2HH-30250

Bij deze simulatie wordt de lucht slechts tot ca 20⁰C gekoeld – zie figuur 16/13.1- en voldoet daarmee niet aan de eis voor een gebouw/klimaat type BETA; zie ook de opmerking ter zake in paragraaf 16.5. Om deze reden is deze serie van simulaties afgebroken en voortgezet met vijf FullJet[®]Nozzles 3/4GG-3050, die een fijner sproeispectrum produceren –zie paragraaf 16.12.3 e.v.

Interessant is te zien dat naast de kegelvormige koelere hoofdstroom van de sproeizone veel zwevende warmere druppels waar te nemen zijn. Dit zijn de kleinste druppels uit het sproeispectrum, die snel door de warme lucht worden verwarmd en kunnen verdampen nadat hierop in eerste instantie condensatie heeft plaatsgevonden.

De druppeltemperaturen aan de voet van de klimaatcascade[®] zijn niet uniform. Naast nauwelijks opgewarmde grote druppels die in het bassin vallen zijn in de luchtafvoer veel kleinere druppels waar te nemen met temperaturen rond 18⁰C.

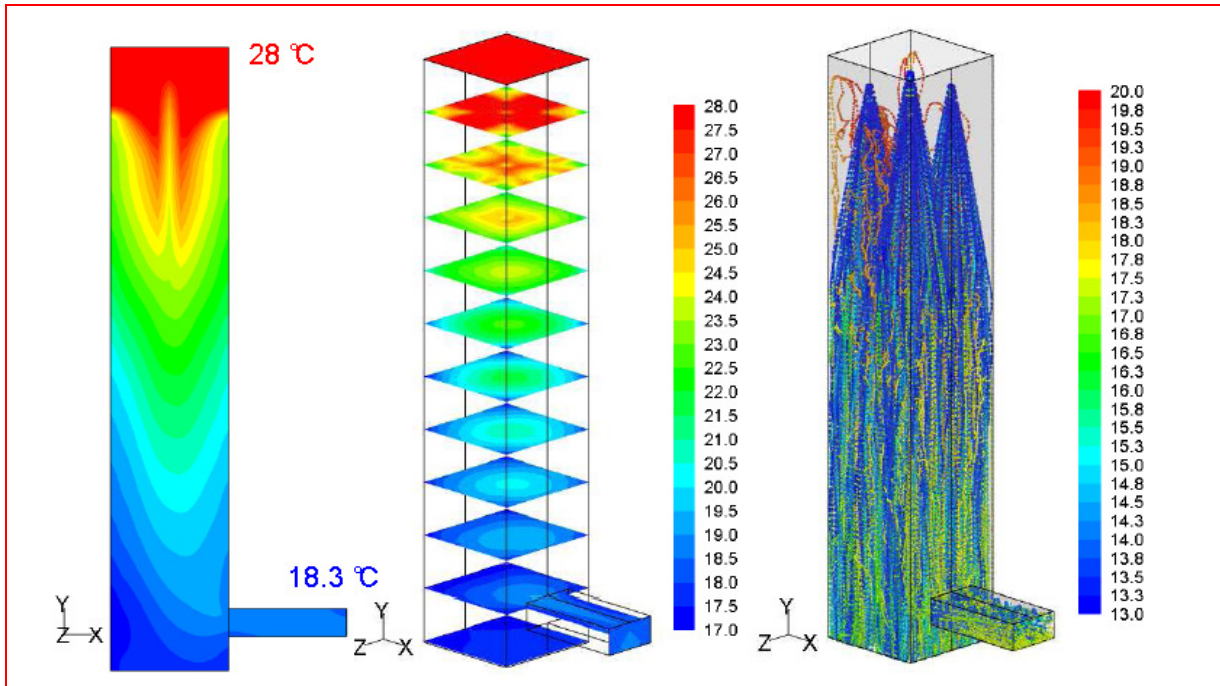


Figuur 16.13/1 – Case A2 – Luchttemperaturen (links) en druppeltemperaturen (rechts) in °C

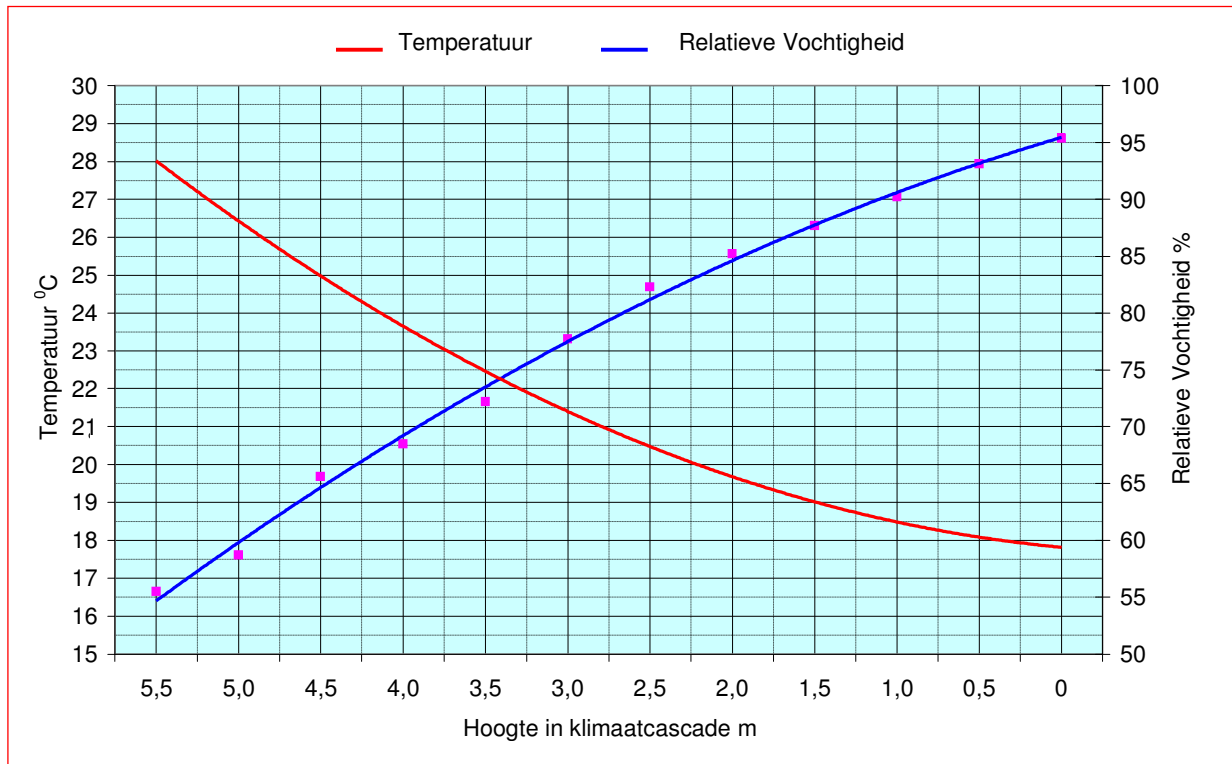
16.12.3 Case B1 – Ontwerp zomercondities met vijf FullJet[®] Nozzles 3/4GG-3050

Zie figuur 16.14/1 en 16.14/2. Bij een koelwatertemperatuur van 13^oC wordt de lucht gekoeld van 28^oC naar ca 18^oC en daarmee voldoet deze configuratie nog niet geheel aan de eis voor een gebouw/klimaattypen BETA van 17^oC. De relatieve vochtigheid loopt op van 55% naar ca 95%.

NB: De simulatie voor een 8 verdiepingen gebouw met identieke sproeiers, water/luchtverhouding en koelwatertemperatuur laat zien dat de uitgaande luchttemperatuur hier met 16,5^oC wel ruimschoots aan de eis voldoet. Blijkbaar is het koelproces in de fysieke testopstelling door de beperkte hoogte hiervan nog niet voltooid.



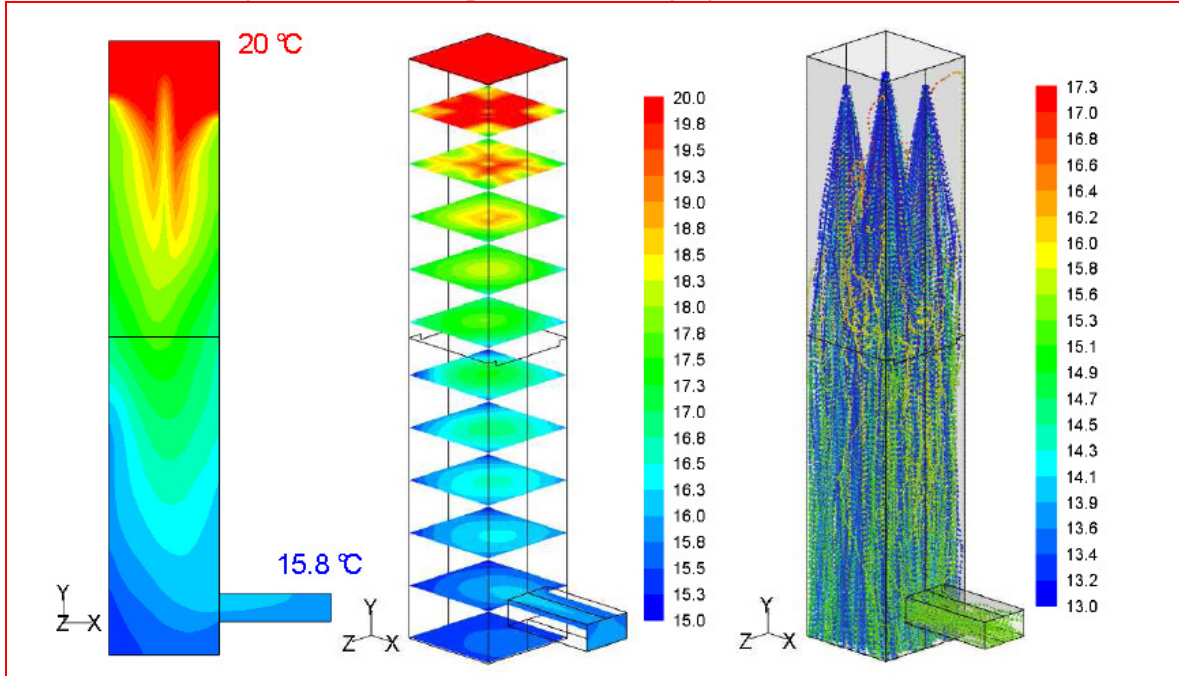
Figuur 16.14/1 – Case B1 – Luchttemperaturen (links) en druppeltemperaturen (rechts) in °C



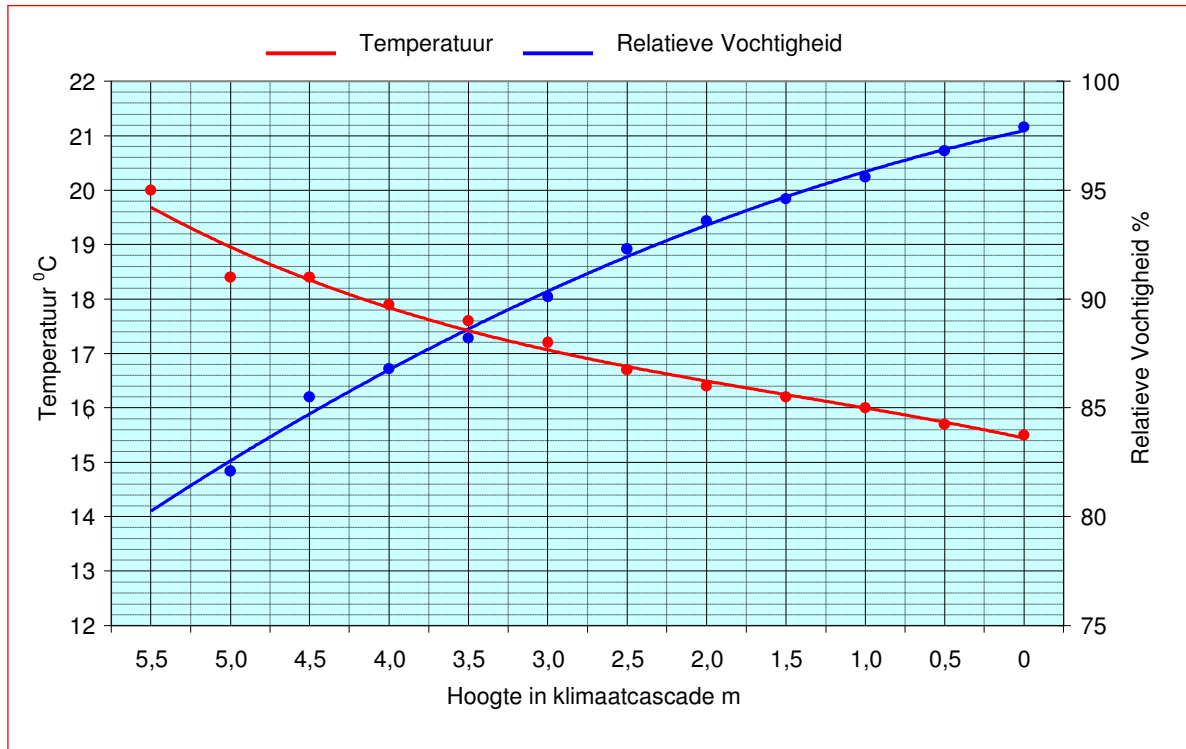
Figuur 16.14/2 – Case B1 - Temperatuur en R.V. van de lucht als functie van de hoogte in de cascade

16.12.4 Case B2 – Gemiddelde zomercondities met vijf FullJet[®] Nozzles 3/4GG-3050

Bij een uitgaande luchtconditie van 15,8^oC / 95% R.V. komt de relatieve vochtigheid in de ruimte bij een temperatuur van 24^oC uit op ≈ 60%. Deze kan desgewenst worden verlaagd door verhogen van de water/luchtverhouding. De koelwatertemperatuur is 13^oC, gelijk aan case B1.



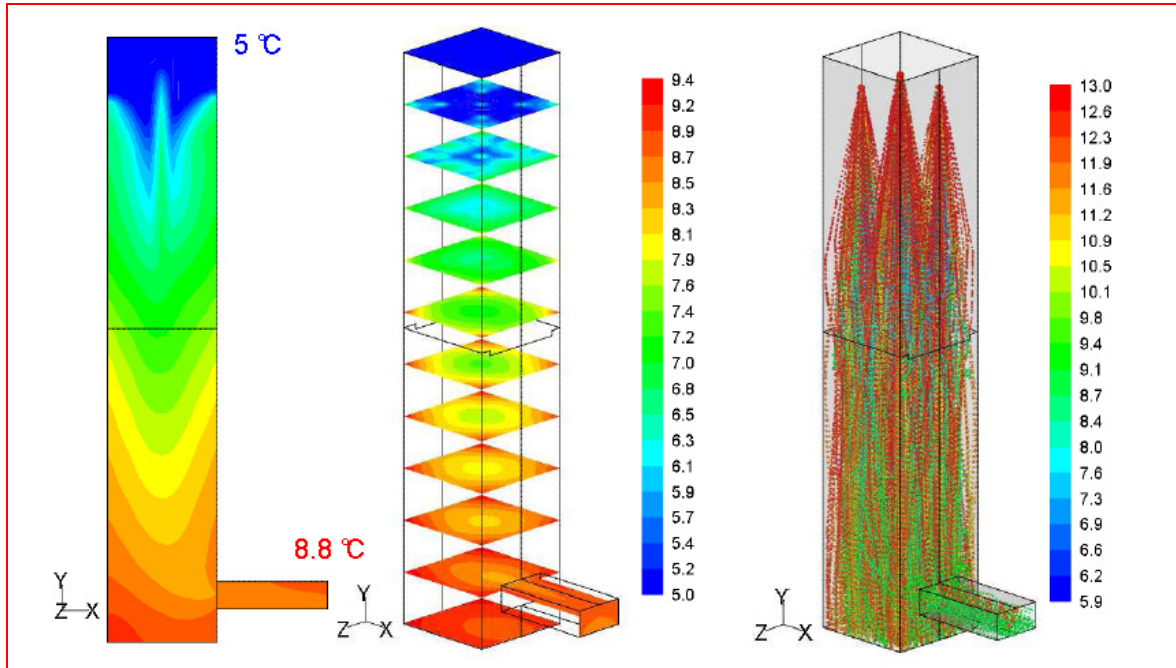
Figuur 16.15/1 - Case B2 – Luchttemperaturen (links) en druppeltemperaturen (rechts) in ^oC



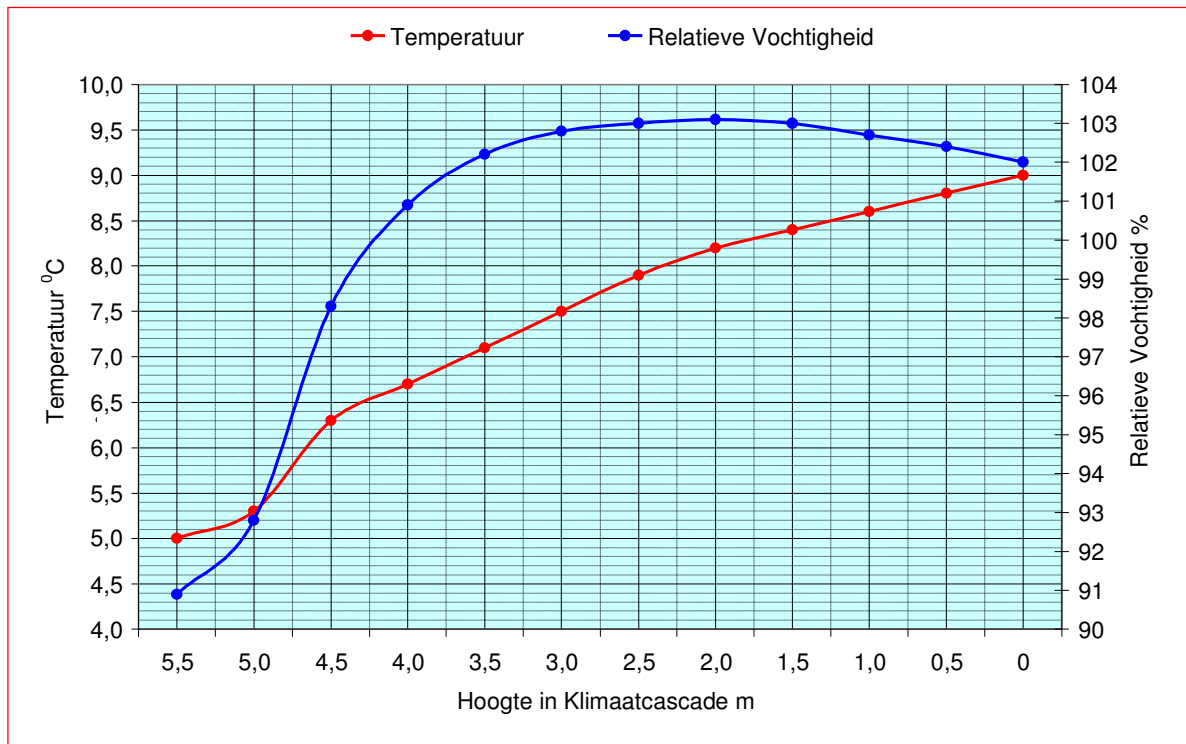
Figuur 16.15/2 – Case B2 -Temperatuur en RV van de lucht als functie van de hoogte in de cascade

16.12.5 Case B3 – Gemiddelde wintercondities met vijf FullJet[®]Nozzles 3/4GG-3050

De koelwatertemperatuur is hier nog steeds 13⁰C, zodat kan worden gesproken van een ultra-laag temperatuur verwarmingssysteem. Bij een uitgaande luchtconditie van 8,8⁰C / 100% R.V. komt de relatieve vochtigheid in de ruimte bij een temperatuur van 22⁰C uit op $\approx 40\%$. Deze kan desgewenst worden verlaagd door een verlaging van de koelwatertemperatuur, hetgeen bij lage buitentemperaturen geen energie hoeft te kosten.



Figuur 16.16/1 - Case B3 – Luchttemperaturen (links) en druppeltemperaturen (rechts) in ⁰C



Figuur 16.16/2 – Temperatuur en RV van de lucht als functie van de hoogte in de cascade

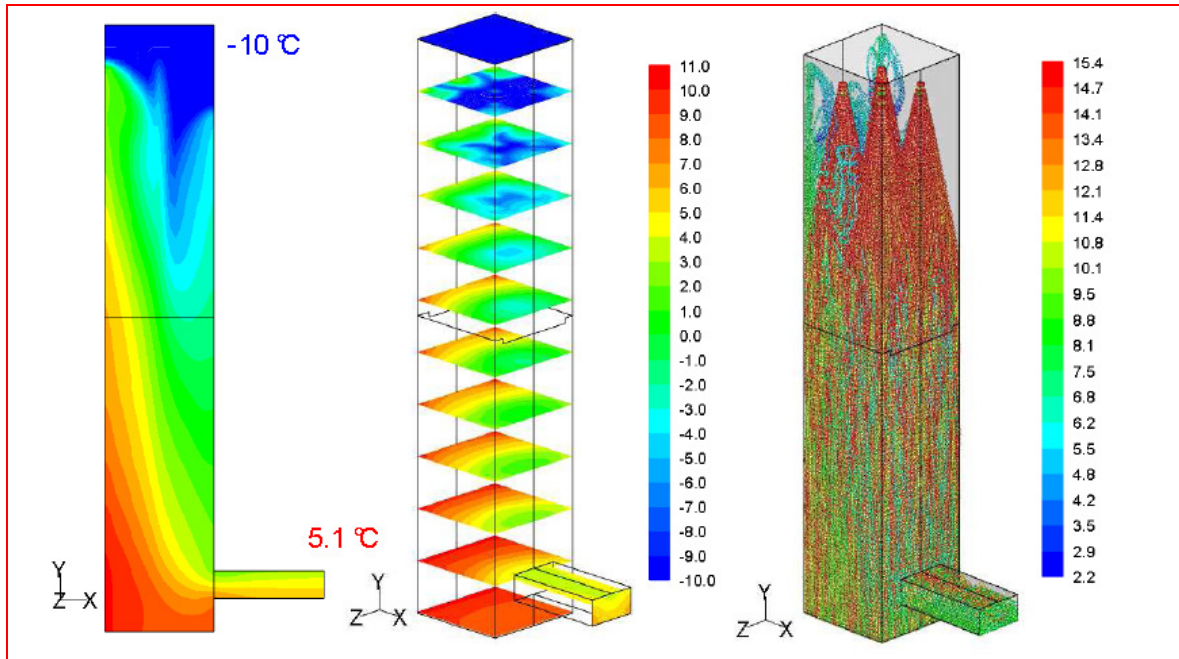
16.12.6 Case B5 – Ontwerp wintercondities vijf FullJet[®] Nozzles 3/4GG-3050

Voor deze simulatie is de koelwatertemperatuur verhoogd naar 15,4⁰C waardoor een uitgaande luchtconditie van 5,1⁰C wordt gerealiseerd¹⁹. Nog steeds kan worden gesproken van een ultra-laag temperatuur verwarmingssysteem.

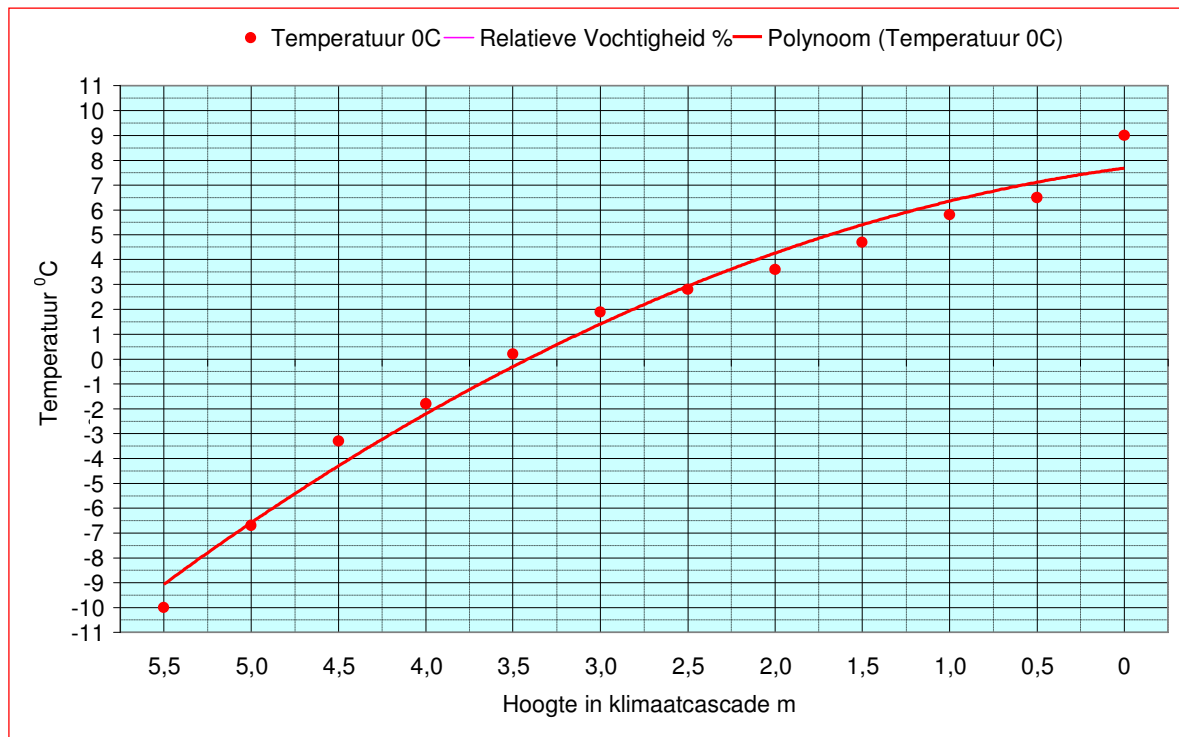
De relatieve vochtigheid is niet aangegeven²⁰ verwacht mag worden dat deze bij uittrede 100% bedraagt. De relatieve vochtigheid in de ruimte komt bij een temperatuur van 22⁰C uit op ≈ 50 à 60%.

¹⁹ Figuur 16.6/1 laat een waarde van 5,1⁰C zien, terwijl figuur 16.6/2, gebaseerd op numerieke gegevens 9⁰C aangeeft. De waarheid ligt waarschijnlijk ergens in het midden.

²⁰ Het rapport van Spraying Systems vermeldt hier: “Warning –There was an error initialising the mass fraction of this case. This too high mass fraction causes a R.H. higher than 100% at the inlet boundary”



Figuur 16.17/1 - Case B5 – Luchttemperaturen (links) en druppeltemperaturen (rechts) in °C



Figuur 16.17/2 – Case B5 -Temperatuur en RV van de lucht als functie van de hoogte in de cascade

16.13 CFD simulaties 8 verdiepingen model

16.13.1 Varianten

Tabel 16.5 laat een aantal varianten van gebouwen zien van 4 tot 20 verdiepingen met daaraan gerelateerde volumedebieten²¹ die voor CFD simulatie in aanmerking zouden kunnen komen. De water/luchtverhouding $R_{w/l}$ en het spectrum van de druppelgrootteverdeling is berekend met het analytische rekenmodel – zie hoofdstuk 10. Om het aantal CFD simulaties te beperken is gekozen voor gebouw/klimaatmodel BETA en een gebouw van 8 verdiepingen.

Aantal verdiepingen →		4	6	8	10	12	14	16	18	20
Hoogte	m	14	21	28	35	42	49	56	63	70
NVO per verdieping	m ²	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Ventilatiecapaciteit	m ³ .m ⁻² .h ⁻¹	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Volumedebiet lucht	m ³ .h ⁻¹	20000	30000	40000	50000	60000	70000	80000	90000	100000
Massadebiet lucht	kg.h ⁻¹	24000	36000	48000	60000	72000	84000	96000	108000	120000
Luchtsnelheid	m.s ⁻¹	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Doorsnede cascade	m ²	2,78	4,17	5,56	6,94	8,33	9,72	11,11	12,50	13,89
Diepte cascade	m	1,67	2,04	2,36	2,64	2,89	3,12	3,33	3,54	3,73
Breedte cascade	m	1,67	2,04	2,36	2,64	2,89	3,12	3,33	3,54	3,73
Berekend met analytisch rekenmodel										
ALPHA - $R_{w/l}$	→	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Massadebiet water	dm ³ .h ⁻¹	9600	14400	19200	24000	28800	33600	38400	43200	48000
Spectrum	nummer	7	6	5	4	3	3	2	2	1
BETA - $R_{w/l}$	→	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Massadebiet water	dm ³ .h ⁻¹	31200	43200	57600	72000	86400	100800	115200	129600	144000
Spectrum	nummer	6	5	4	3	2	2	1	1	1

Tabel 16.5 – Mogelijke varianten gebouw/klimaat model

16.13.2 Invoercondities

De invoercondities voor de CFD simulaties zijn aangegeven in tabel 16.6

	Eenheid	Invoercondities simulaties – Gebouw/Klimaatmodel BETA			
		Zomer		Winter	
		Ontwerp	Gemiddeld	Gemiddeld	Ontwerp
Luchtdruk	kPa	100	100	100	100
Luchttemperatuur in	°C	28	20	5	-10
Relatieve vochtigheid	%	55	80	90	90
Luchtsnelheid	m.s ⁻¹	2,0	2,0	2,0	2,0
Lucht volumestroom	m ³ .h ⁻¹	40.000	40.000	40.000	40.000
Lucht massastroom	kg.s ⁻¹	13,0	13,4	14,1	14,9
Luchttemperatuur uit	°C	17	17	8	8
Relatieve vochtigheid	%	95	95	95	95
Watertemperatuur in	°C	13	13	13	15
Water volumestroom	l.min ⁻¹	40,3	40,4	40,4	40,4
Water volumestroom	m ³ .h ⁻¹	2,42	2,42	2,42	2,42
Water massastroom	kg.s ⁻¹	15,2	15,7	15,1	14,9
Water/Luchtverhouding	-	1,17	1,17	1,07	1,00
Case	→	D1	D2	D3	D4

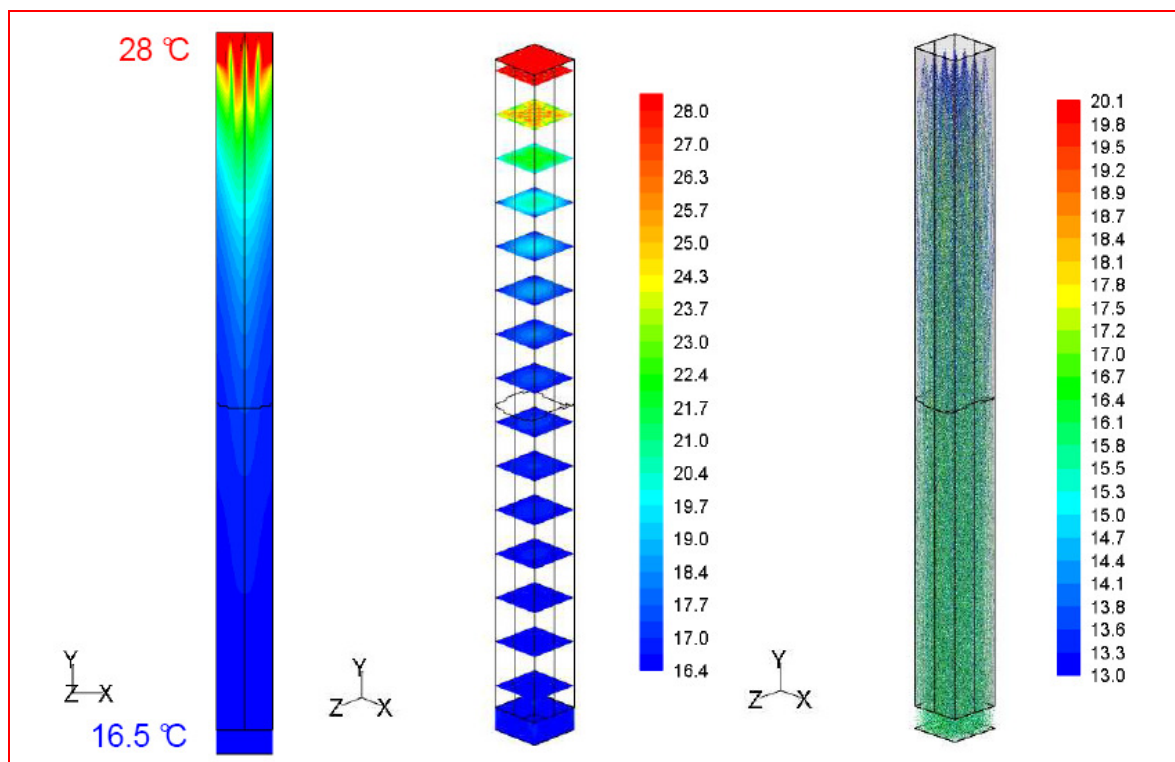
Tabel 16.6 – Invoercondities voor 8 verdiepingenmodel –Gebouw/Klimaatmodel BETA

²¹ Het vloeroppervlak per verdieping is willekeurig gekozen

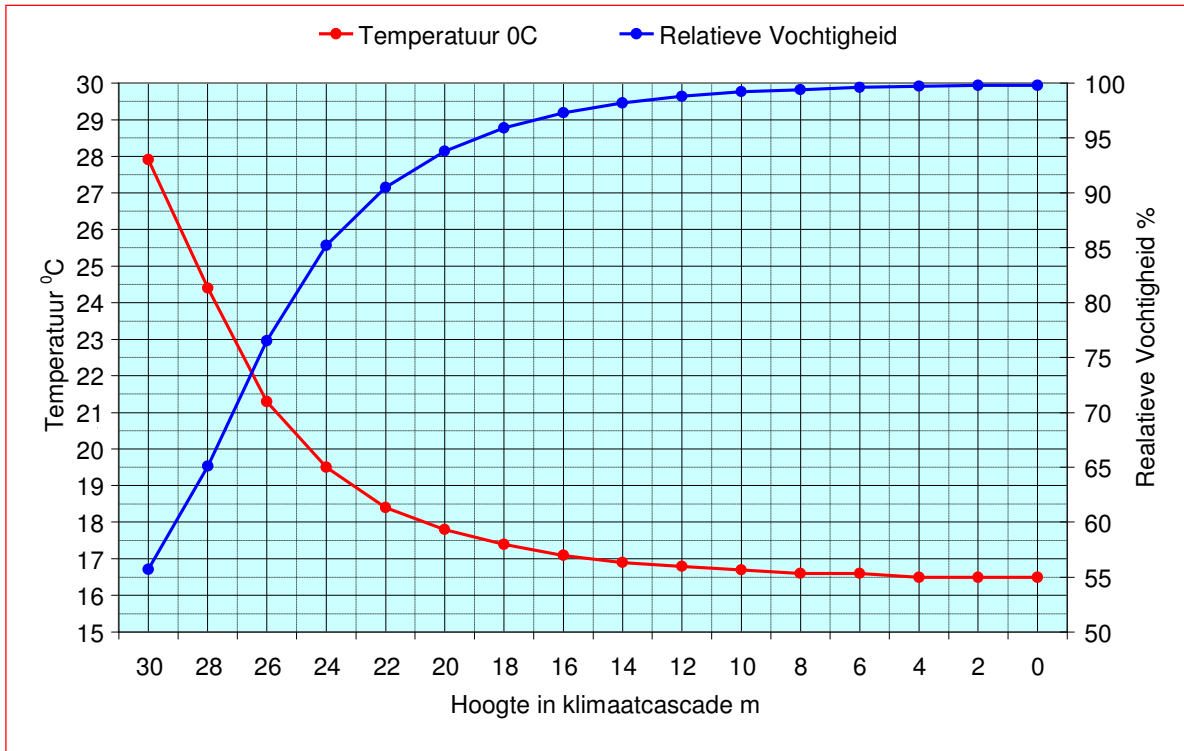
Voor de simulaties van het 8 verdiepingenmodel is gekozen voor de sproeier type 1-1/2HH-30250 omdat de druppelgrootteverdeling hiervan nauwkeurig bekend is –zie paragraaf 16.9. Voor werkelijke toepassingen kan de sproeierselectie uiteraard worden geoptimaliseerd.

16.13.3 Case D1 - Ontwerp zomercondities met 25 FullJet[®] Nozzles 1-1/2HH-30250

In tegenstelling tot de simulatie van het fysieke onderzoeksmodel wordt hier ruimschoots voldaan aan de gevraagde condities voor het BETA gebouw/klimaatmodel.

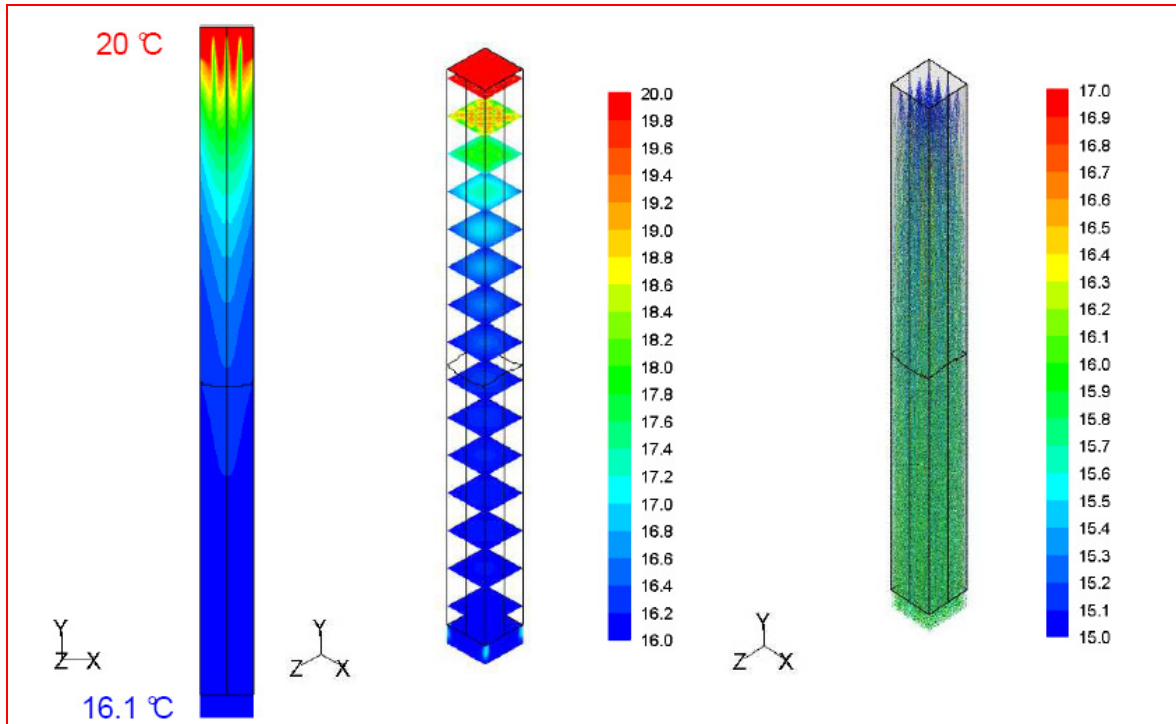


Figuur 16.18/1 - Case D1 – Luchttemperaturen (links) en druppeltemperaturen (rechts) in °C

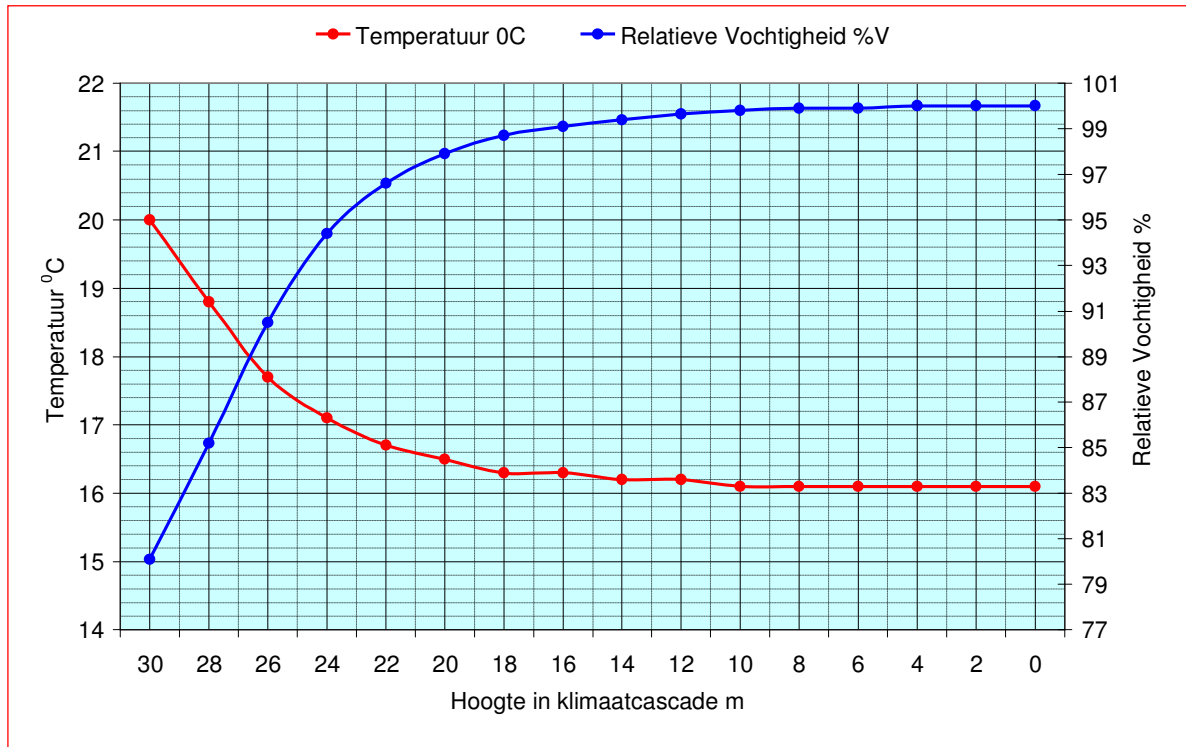


Figuur 16.18/2 – Case D1 -Temperatuur en RV van de lucht als functie van de hoogte in de cascade

16.13.4 Case D2 - Gemiddelde zomercondities met 25 FullJet[®] Nozzles 1-1/2HH-30250



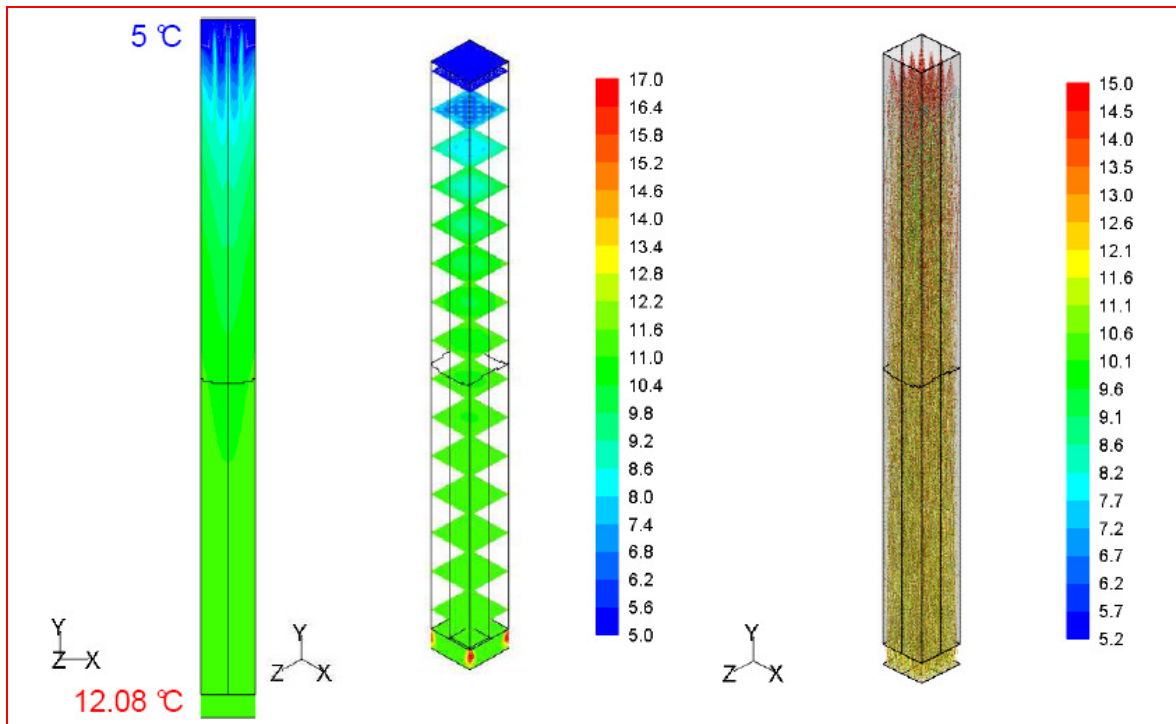
Figuur 16.19/1 - Case D2 – Luchttemperaturen (links) en druppeltemperaturen (rechts) in °C



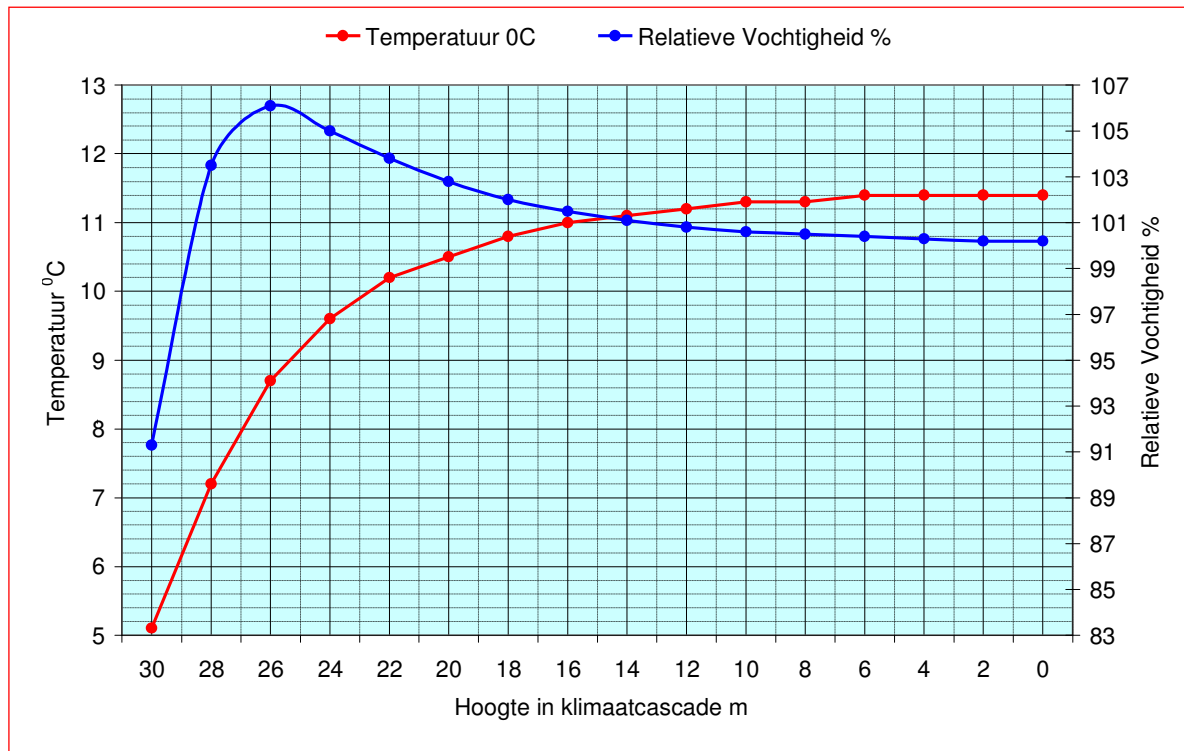
Figuur 16.19/2 – Case D2 -Temperatuur en RV van de lucht als functie van de hoogte in de cascade

16.13.5 Case D3 - Gemiddelde wintercondities met 25 FullJet[®] Nozzle 1-1/2HH-30250

De koelwatertemperatuur is hier verhoogd naar 15°C, waardoor een uittredeconditie van $\approx 12^{\circ}\text{C} / 100\%$ R.V. wordt gerealiseerd. Bij deze conditie komt de relatieve vochtigheid in de ruimte bij een temperatuur van 22°C uit op $\approx 60\%$ hetgeen erg hoog is. Een lagere R.V. kan desgewenst worden gerealiseerd door een verlaging van de koelwatertemperatuur.



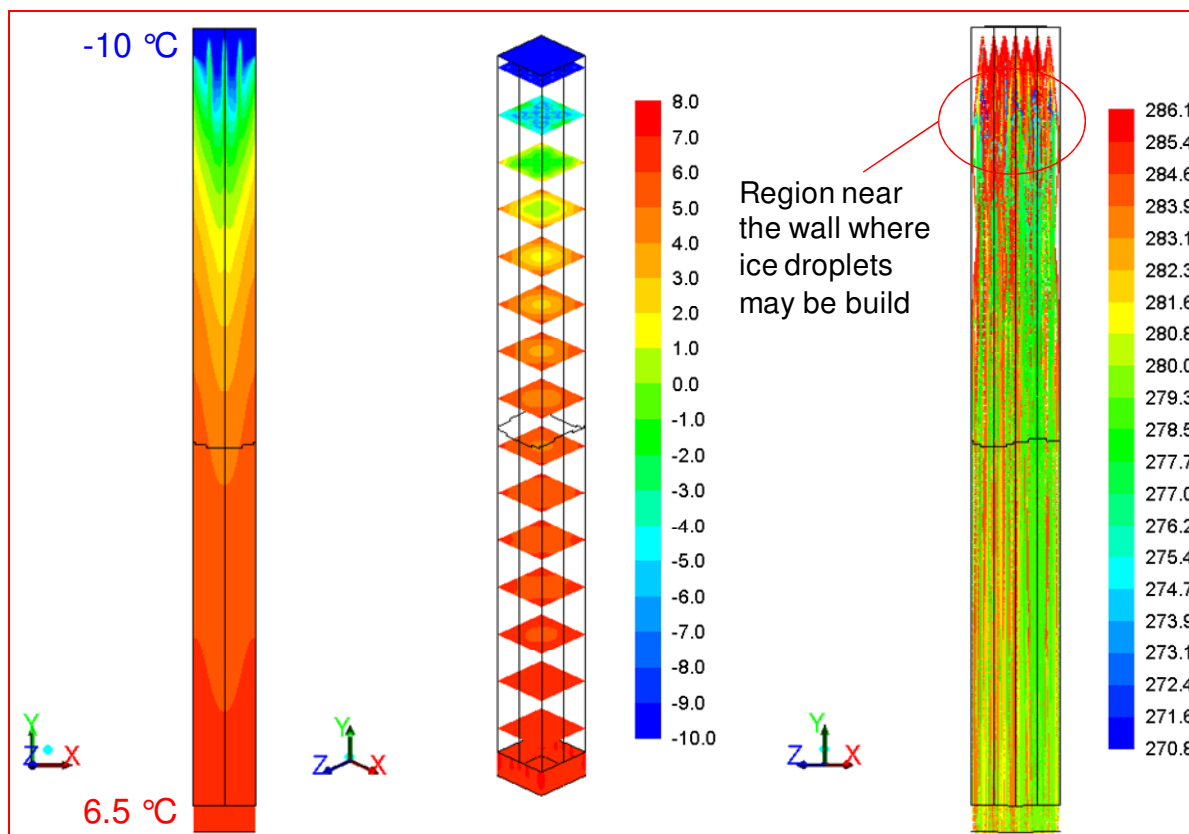
Figuur 16.20/1 - Case D3 – Luchttemperaturen (links) en druppeltemperaturen (rechts) in °C



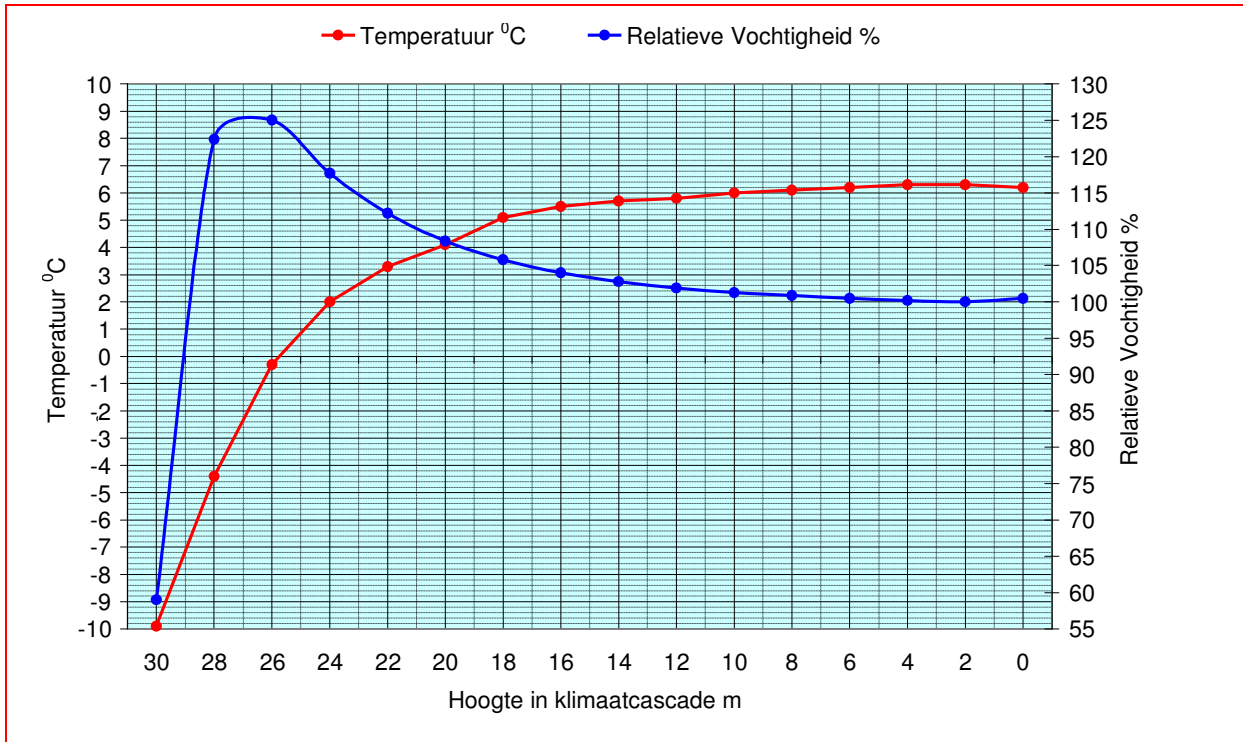
Figuur 16.20/2 – Case D3 - Temperatuur en RV van de lucht als functie van de hoogte in de cascade

16.13.6 Case D4 - Ontwerp wintercondities met 25 FullJet[®] Nozzle 1-1/2HH-30250

Bij een koelwatertemperatuur van 13⁰C, wordt een uittredeconditie van $\approx 6,5^{\circ}\text{C}$ / 100% R.V. gerealiseerd. Bij deze conditie komt de relatieve vochtigheid in de ruimte bij een temperatuur van 22⁰C uit op $\approx 40\%$, een ideale waarde. Aan de top van de Klimaatcascade[®] kunnen kleine druppels tegen de wanden bevriezen; dit bevroingsproces is niet gemodelleerd.



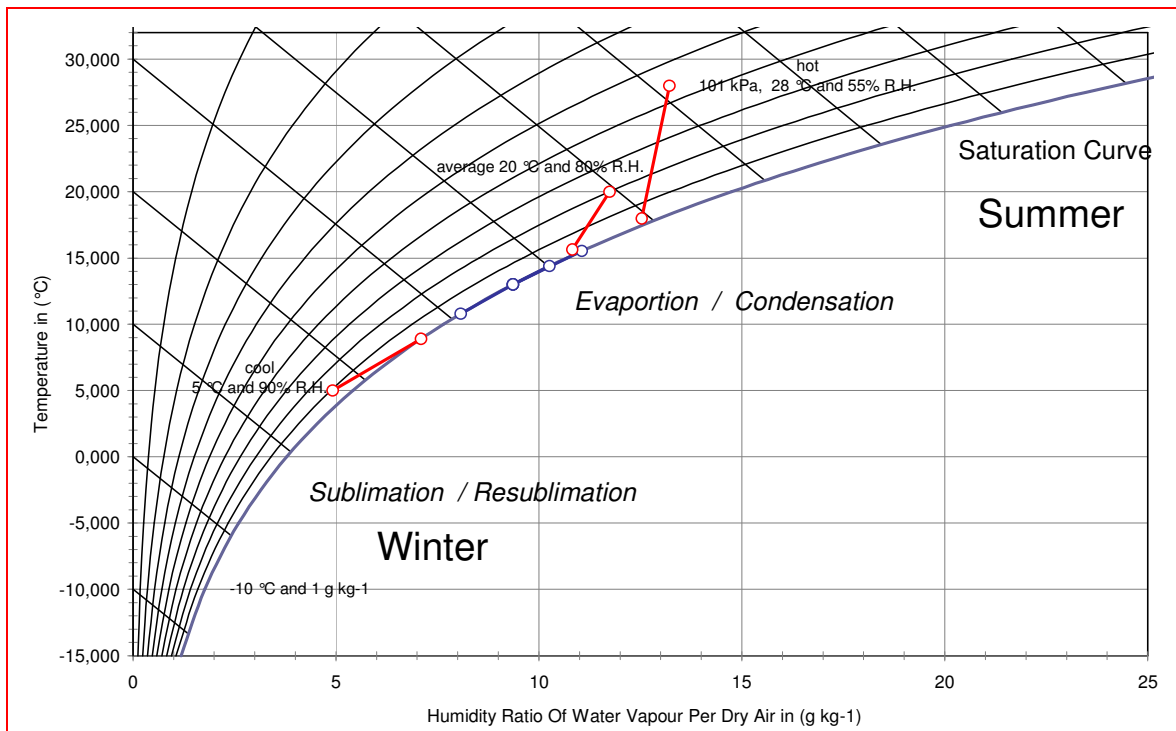
Figuur 16.21/1 - Case D4 – Luchttemperaturen (links) en druppeltemperaturen (rechts) in ⁰C



Figuur 16.21/2 – Case D4 - Temperatuur en RV van de lucht als functie van de hoogte in de cascade

16.14 Weergave in Mollier diagram

Enkele gesimuleerde psychometrische bewerkingen zijn weergegeven in het Mollier diagram figuur 16.22.



Figuur 16.22 – Simulatiesresultaten in het Mollier diagram

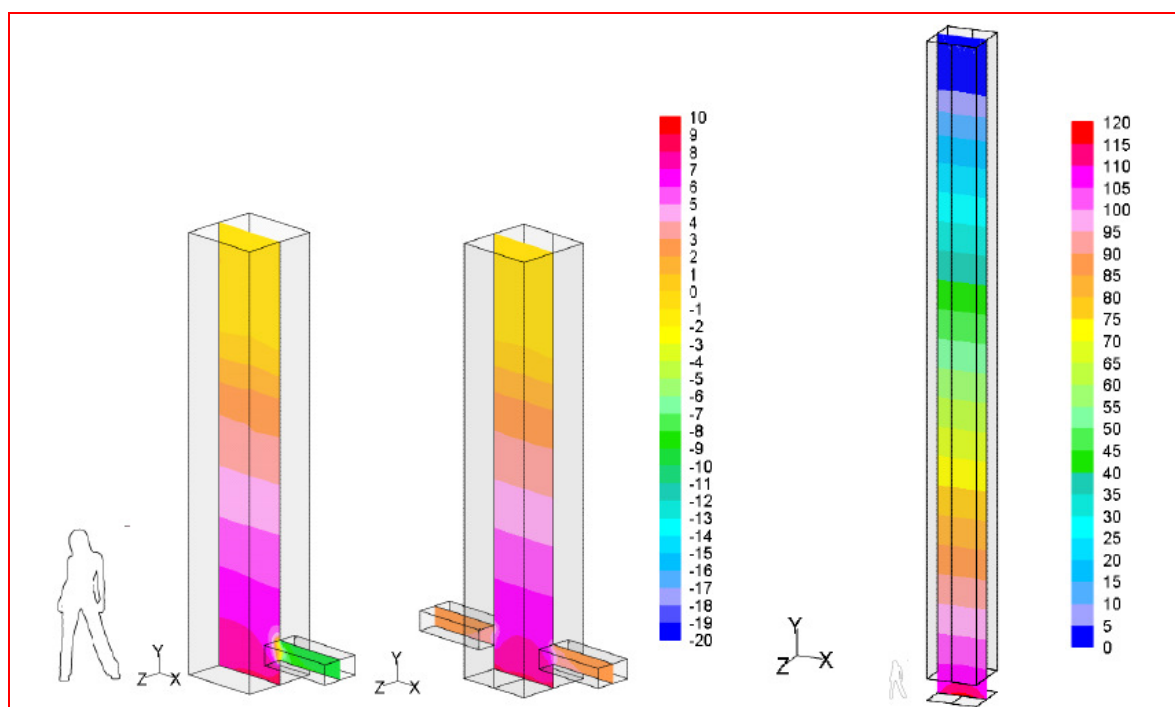
16.15 Verloop van de luchttemperatuur over de hoogte van de Klimaatcascade[®]

De simulaties D1 t/m D4 maken duidelijk dat de eindtemperatuur van de uitgaande lucht reeds op ongeveer de halve hoogte van de Klimaatcascade[®] bereikt wordt. Als de sproeiers op een hoogte van 4 verdiepingen zouden zijn aangebracht zou ongeveer dezelfde koelprestatie worden geleverd, en aanzienlijk op pompenergie kunnen worden bespaard.

Een dergelijke interventie heeft consequenties voor de drukopbouw in de Klimaatcascade[®]. De aerodynamische trek verandert niet, maar de hydraulische trek wordt aanzienlijk lager. De neerwaartse thermische trek wordt in de stookperiode hoger en in de koelperiode lager. De totale energetische consequenties zijn onderwerp van vervolgonderzoek – zie paragraaf 16.18.

16.16 Drukopbouw in de klimaatcascade[®]

In de klimaatcascade wordt door aerodynamische trek en hydraulisch en thermisch drukverschil statische druk opgebouwd. Figuur 16.23 brengt deze drukken in beeld, zowel voor het fysieke onderzoeksmodel met ≈ 10 Pa (links) als voor het 8 verdiepingenmodel met ≈ 100 Pa (rechts). Beide gelden voor de gemiddelde zomerconditie, buitentemperatuur 20°C . Bij hogere buitentemperaturen nemen de drukken toe; bij lagere buitentemperaturen ze af.



Figuur 16.23 – Statische drukken in de klimaatcascade[®] -Links B2 en C1 – Rechts D2

16.17 Conclusies

Alle simulatieresultaten laten zien dat de Klimaatcascade[®] zowel onder zomercondities als wintercondities goed functioneert. In de zomer is gelijktijdige koeling en droging van warme en vochtige buitenlucht mogelijk. In de winter kan koude en droge buitenlucht worden verwarmd en bevochtigd.

Opschalen van het fysieke schaalmodel naar ware grootte laat het verschil zien tussen een onderbroken proces in het schaalmodel naar een voltooid proces bij ware grootte. In het eerste geval is de warmtewisseling tussen water en lucht door de beperkte hoogte van de cascade en de inherente korte contacttijd nog niet voltooid. In het tweede geval is het temperatuurverschil tussen water en lucht aan de voet van de cascade zeer gering bij een relatieve luchtvochtigheid van tegen 100%.

Verder is aangetoond dat in een Klimaatcascade[®] een aanzienlijk positief drukverschil kan worden opgebouwd.

16.18 Detailinformatie CFD simulaties

Voor gedetailleerde informatie over de CFD simulaties wordt verwezen naar de rapportage van Spraying Systems Deutschland GmbH, Project-No. P100165-A van 7 december 2010.

16.19 Vervolgonderzoek

De optimale hoogte waarop de sproeiers in de Klimaatcascade[®] worden aangebracht, en de consequenties daarvan voor pompenergie en drukopbouw, is onderwerp van vervolgonderzoek –zie paragraaf 16.14.

Earth, Wind & Fire – Airconditioning zonder Ventilatoren
(III) Onderzoek Geo-Klimaatconcept[®]

17. FYSIEKE TESTOPSTELLING

17.1 Samenvatting

17.1.1 Algemeen

Validatie van de verschillende simulatiemodellen van de Klimaatcascade[®] is uitgevoerd met behulp van een fysieke testopstelling in het bouwfysisch laboratorium van Peutz bv. Het functionele ontwerp en de hoofdafmetingen hiervan zijn bepaald door de hoofdonderzoeker. Op pragmatische gronden en kostenoverwegingen is gekozen voor de minimum geachte doorsnede van 1,0 x 1,0 m. Om de omvang van het luchtcirculatiesysteem en de benodigde vermogens voor verwarming en bevochtiging van de lucht te beperken is gekozen voor een luchtsnelheid van 0,5 m.s⁻¹.

De testopstelling is gebouwd in een bestaande hal, waardoor de hoogte van het model moest worden beperkt tot 6 m. De metingen zijn uitgevoerd met de door Spraying Systems GmbH geselecteerde sproeiers – zie hoofdstuk 16, die direct op de waterleiding zijn aangesloten. Engineering en uitvoering zijn door Peutz gerealiseerd. De instrumentatie is in overleg met de TU Eindhoven ontworpen en door Peutz gematerialiseerd en geïnstalleerd.

De berekening van de psychometrische prestaties en de selectie van de sproeiers is gebaseerd op CFD simulaties –zie hoofdstuk 16. De metingen zijn dan ook in eerste instantie bedoeld om het CFD simulatiemodel voor Gebouw / Klimaatype BETA te valideren. Het meetprogramma is derhalve gebaseerd op het CFD simulatieprogramma. In tweede instantie zal met behulp van de meetresultaten ook het Excel rekenmodel voor Gebouw / Klimaatmodel ALPHA en BETA worden gekalibreerd en gevalideerd.

17.1.2 Gebouw / Klimaatmodel BETA

Als eerste zijn metingen uitgevoerd voor de ontwerp zomercondities. De voelbare koelprestatie voldoet aan de uitgangspunten van het conceptueel psychometrisch ontwerp zoals geformuleerd in hoofdstuk 8. De verwachte luchtdroging trad echter nauwelijks op, waarop is getracht met verhoging van de water/luchtfactor $R_{w/L}$ het droogeffect te verbeteren. De relatieve vochtigheid van de uitgaande lucht ligt echter in alle gevallen op $\approx 100\%$ bij slechts geringe verschillen in temperatuur, waaruit geconcludeerd kan worden dat verhoging van de water/luchtfactor geen invloed hebben op de vochtinhoud van de lucht. De in hoofdstuk 8 aangenomen Natte Bol Depressie van 90% ligt in werkelijkheid tegen 100%. De Klimaatcascade[®] functioneert bij de ontwerp zomercondities voornamelijk als een (effectieve) luchtkoeler. Bij gemiddelde zomercondities met een Voelbare Warmte Factor VWF = 0,77 de overdracht van voelbare warmte eveneens dominant, maar er treedt eveneens een duidelijke luchtdroging op. De Klimaatcascade[®] functioneert als luchtkoeler en -droger.

Bij wintercondities zijn met een VWF $\approx 0,5$ de overdracht van voelbare en latente warmte ongeveer in evenwicht. Naast verwarming van de lucht treedt een aanzienlijke luchtbevochtiging op. De Klimaatcascade[®] functioneert als (voor)verwarmer en luchtbevochtiger.

De relatieve vochtigheid van de uitgaande lucht ligt bij alle metingen dicht bij 100%. De relatieve vochtigheid die hierdoor in de ruimte wordt gerealiseerd ligt bij alle varianten binnen de grenzen van thermisch comfort.

De gemeten drukopbouw in de Klimaatcascade[®] komt goed overeen met de berekende waarden van de CFD simulaties.

Het temperatuurverloop in de Klimaatcascade[®] is voor alle varianten grafisch weergegeven. Opvallend is dat de temperatuuurdaling respectievelijk –stijging van de lucht zich vrijwel geheel afspeelt in het bovenste deel van de cascade, tussen 5,1m \rightarrow 3,6 m. Of dit ook geldt voor de vochtinhoud is niet bekend, omdat de alleen bij de intrede en de uittrede zijn gemeten.

17.1.3 Gebouw / Klimaatmodel ALPHA

Voor het ALPHA model zijn door budgetbeperkingen geen CFD simulaties uitgevoerd. De metingen hiervoor dienen dus niet voor de validatie van het CFD model, maar ter verificatie en kalibratie van het analytisch rekenmodel.

De voor het ALPHA model benodigde water/luchtfactor van $R_{WL} \approx 0,4$ is gerealiseerd door vermindering van het waterdebiet bij handhaving van het luchtdebiet en het sproeispectrum. Door 3 van de 5 sproeiërs af te sluiten werd een water/luchtfactor R_{WL} van $\approx 0,44$ gerealiseerd. Het asymmetrische sproeipatroon dat hierbij ontstaat moest worden geaccepteerd.

Als eerste zijn metingen uitgevoerd voor de ontwerp zomercondities. De voelbare koelprestatie voldoet geheel aan de uitgangspunten van het conceptueel psychometrisch ontwerp zoals geformuleerd in hoofdstuk 8. In plaats van de verwachte luchtdroging trad echter een geringe luchtbevochtiging op. Er treedt hierdoor een ongewenste, zij het beperkte adiabatische koeling op waardoor de latente capaciteit negatief is.

Bij de gemiddelde zomerconditie wordt de lucht dieper gekoeld dan de gewenste 20°C waarbij tevens een geringe verlaging van de vochtinhoud plaatsvindt. De voelbare koelcapaciteit is dus hoger dan noodzakelijk, en de vraag doet zich voor of en hoe het psychometrisch proces in een Klimaatcascade[©] kan worden beïnvloed. De meest gerede optie hiervoor is het aanpassen van de water/luchtfactor R_{WL} door sproeiërs uit te schakelen bij handhaving van het sproeispectrum en een constante watertemperatuur van 13°C . Zie hoofdstuk ???

Bij wintercondities is de overdracht van latente warmte dominant. Er treedt een aanzienlijke luchtbevochtiging op. De Klimaatcascade[©] functioneert als (voor)verwarmer en luchtbevochtiger.

De relatieve vochtigheid van de uitgaande lucht ligt bij alle metingen dicht bij 100%. De relatieve vochtigheid die hierdoor in de ruimte wordt gerealiseerd ligt bij alle varianten binnen de grenzen van thermisch comfort.

Het temperatuurverloop in de Klimaatcascade[©] is voor alle varianten grafisch weergegeven. In tegenstelling tot het BETA model verloopt hier de temperatuuurdaling respectievelijk –stijging van de lucht meer evenredig over de hoogte van de cascade.

17.1.4 Condensrisico in het gebouw

Voor de laagst gemeten buitentemperatuur is voor een temperatuurfactor van 0,5 en 0,65 de maximum toegestane relatieve vochtigheid in de ruimte berekend. Hierbij is ervan uitgegaan dat de RV nabij een constructie niet langdurig hoger mag zijn dan 80% – zie paragraaf 12.12.

Voor Gebouw / Klimaatmodel BETA en een normale ruimtetemperatuur van 22°C ligt de relatieve vochtigheid in de ruimte op een veilig niveau. Voor ALPHA is zelfs een zeer veilige marge aanwezig.

Geconcludeerd kan worden dat condensrisico op uitwendige scheidingsconstructies als gevolg van gebruik van de Klimaatcascade[©] in de winterperiode niet aanwezig is. Thermische bruggen en meerdimensionale aansluitingen moeten uiteraard zorgvuldig worden gedetailleerd en berekend.

17.2 Inleiding

Een belangrijke doelstelling van het onderzoek “*Earth, Wind & Fire – Airconditioning zonder ventilatoren*” is de bouwwereld te voorzien van betrouwbare ontwerpgegevens voor dit innovatieve concept van klimaatregeling. Pas als deze beschikbaar zijn zullen opdrachtgevers en ontwerpers bereid kunnen worden gevonden het concept in concrete bouwwerken tot uitvoering te brengen.

De Klimaatcascade[©] is ontwikkeld op basis van modelleren, simuleren, kalibreren en valideren; zie paragraaf 1.10 en figuur 17.1

In het analytisch rekenmodel [1] is met behulp van wetenschappelijke technische gegevens uit het repertoire van de klimaatingenieur een wiskundige beschrijving gegeven van de fenomenen van warmteoverdracht, stroming en drukopbouw op macroniveau - zie hoofdstuk 10.

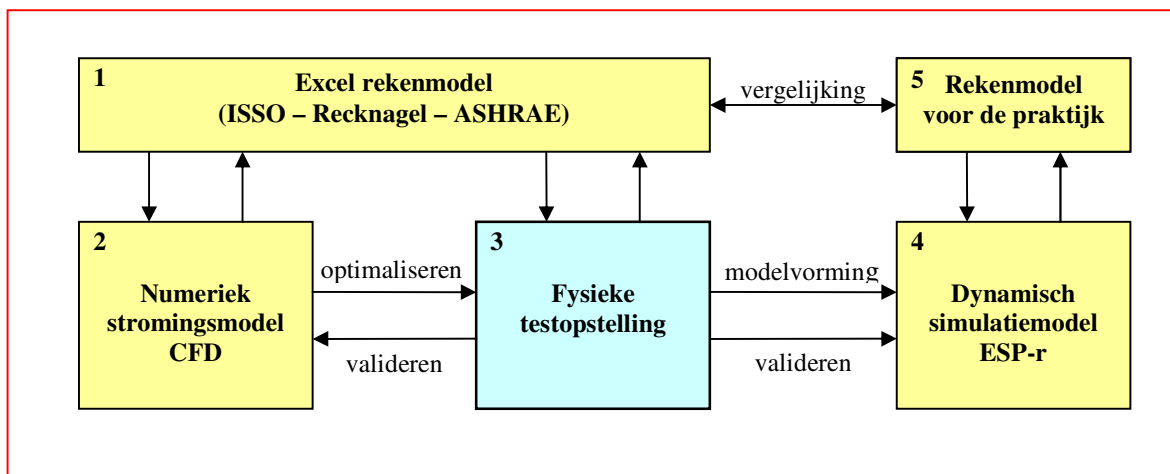
Met behulp van het numerieke stromingsmodel in CFD (Computational Fluid Dynamics) [2] is een virtueel prototype gemaakt dat inzicht geeft in deze fenomenen op microniveau, waardoor de fysische effecten nader konden worden geanalyseerd – zie hoofdstuk 16.

Met behulp van het gevalideerde dynamische simulatiemodel ESP-r [4] kunnen de prestaties van de betreffende responsieve bouwdelen worden gesimuleerd in een wisselend buitenklimaat en bij de statistisch relevante klimaatomstandigheden van een bepaald referentiejaar – zie hoofdstuk 18.

Voor gebruik in de bouw- en installatiepraktijk is een praktisch rekenmodel nodig [5]. De sproeierselectie speelt hierbij een essentiële rol, en daarom wordt voorlopig het analytisch rekenmodel gebruikt in combinatie met het CFD model, zoals omschreven in paragraaf 16.5 t/m 16.7.

Een *case study* van een concreet gebouw, ontworpen op basis van de Earth, Wind & Fire concepten, moet tenslotte uitwijzen in hoeverre de doelstellingen van het onderzoeksproject in een referentie klimaatjaar kunnen worden gerealiseerd met betrekking tot het jaarlijkse energiegebruik – zie deelrapport (IV) hoofdstuk 15.

Met behulp van de fysieke testopstelling [3] zijn de in werkelijkheid optredende fenomenen van warmteoverdracht, stroming en drukopbouw in een Klimaatcascade[®] gemeten. Een vergelijking met de in het analytisch rekenmodel en het numerieke stromingsmodel berekende waarden heeft nader inzicht geboden in het functioneren van een Klimaatcascade[®] verdiept. Het grootste belang is echter dat het ESP-r simulatiemodel op basis van de reële meetgegevens kon worden gekalibreerd en gevalideerd.



Figuur 17.1 – Modelleren – Simuleren – Kalibreren – Valideren

17.3 Locatie en afmetingen van de testopstelling

Met het oogmerk kosten te besparen is in eerste instantie onderzocht of de infrastructuur van de Zonneschoorsteen en het data-acquisitiesysteem ook voor de Klimaatcascade[®] zou kunnen worden gebruikt. Door de top van de Zonneschoorsteen te verbinden met de bovenkant van de Klimaatcascade[®] ontstaat de mogelijkheid geconditioneerde lucht aan de cascade toe te voeren en kan een hoogte van 11 m worden gerealiseerd, gelijk aan die van de Zonneschoorsteen.

Voor deze oplossing zou echter een nieuwe bouwvergunning en welstandsverklaring nodig zijn die een ongewenste vertraging met zich mee zou kunnen brengen. Ook zou door de buitenopstelling de constructie duurder worden, o.a. door windbelasting, noodzakelijke isolatie en hoge welstandeisen. Deze nadelen wogen niet op tegen de vermeende voordelen, en derhalve werd besloten het testmodel van de Klimaatcascade[®] te bouwen in het laboratorium van Peutz bv te Molenhoek. De beschikbare vrije hoogte is hier 6,5m.

Het ontwerp van de testopstelling is bepaald op pragmatische gronden en kostenoverwegingen. Voor de Klimaatcascade[®] werd een minimum doorsnede van 1 m² noodzakelijk geacht. Om de omvang van het luchtcirculatiesysteem en de benodigde vermogens voor verwarming en bevochtiging van de lucht te

beperken is gekozen voor een luchtsnelheid van $0,5 \text{ m.s}^{-1}$. In praktische toepassingen wordt weliswaar een hogere luchtsnelheid toegepast, $2,0 \dots 2,5 \text{ m.s}^{-1}$, maar berekeningen met behulp van het analytisch rekenmodel wijzen uit dat de koelprestatie slechts in geringe mate door de luchtsnelheid wordt beïnvloed –zie figuren 11.2 en 11.6 in hoofdstuk 11.

17.4 Ontwerp van de testopstelling

17.4.1 Algemeen

Het detailontwerp van de testopstelling is onder auspiciën van het onderzoeksteam gemaakt door Peutz bv, die ook alle metingen heeft uitgevoerd en verwerkt –zie figuur 17.2, 17.3 en 17.14.

Voor een gedetailleerde omschrijving van de testopstelling wordt verwezen naar het rapport van Peutz, ref. Hbr/Hbr/LvL/B 1099-5-ME d.d. 25 mei 2010.

17.4.2 Meetschacht

- De meetschacht met een doorsnede $1000 \times 1000 \text{ mm}$ en een hoogte van 6000 mm , is uitgevoerd in thermisch verzinkt plaatstaal, uitwendig geïsoleerd.
- Proceslucht wordt op het hoogste punt via een toevoerplenum met leidschoepen en een geperforeerde plaat aan de meetschacht toegevoerd, waardoor een gelijkmatige instroming wordt gerealiseerd. De lucht wordt aan de onderzijde van de meetschacht via een druppelvanger afgevoerd.
- De meetschacht is voorzien van gootjes voor het opvangen van het sproeiwater dat op de wanden terechtkomt, waardoor deze hoeveelheid kan worden gemeten. Verder is de meetschacht op 4 hoogten voorzien van 2 inspectieramen, terwijl aan de onderzijde een afsluitbare inspectiedeur is aangebracht.
- De meetschacht staat op een wateropvangbak, aangesloten op de riolering.

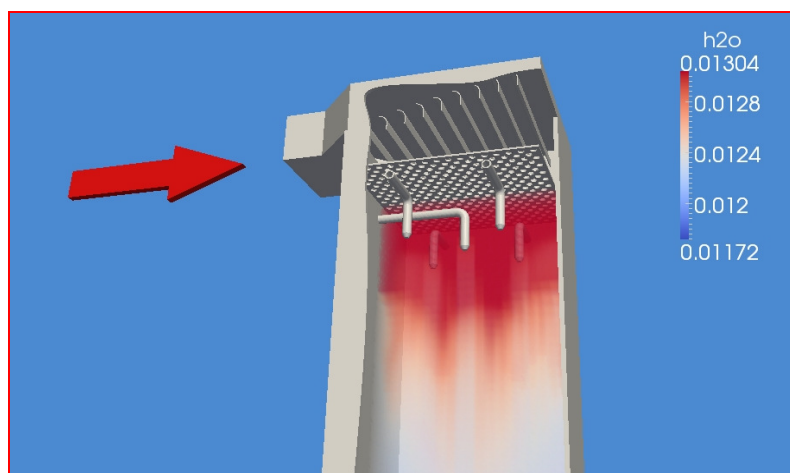
17.4.3 Ventilatiesysteem

- Proceslucht wordt op de gewenste conditie gebracht met behulp van een luchtbehandelingskast met een nominale luchtverplaatsing van $1.800 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, uitgevoerd met regelbare ventilator, elektrische luchtverwarmer en stoombevochtiger.
- Een koelinstallatie voor de lucht is niet voorzien; voor de wintermetingen moest daarom worden gewacht op geschikte buitencondities. De ontwerp winterconditie van $\theta_e = -10^\circ\text{C}$ heeft zich in de meetperiode echter niet voorgedaan; de metingen zijn daarom uitgevoerd bij de laagst mogelijke intredetemperaturen $\theta_e = -3,7^\circ\text{C}$ en $-4,7^\circ\text{C}$ voor respectievelijk BETA en ALPHA
- Met behulp van handbediende kleppen kan de lucht van buiten worden aangezogen en weer op de buitenlucht afgevoerd, dan wel via de laboratorium hal worden gerecirculeerd.
- Het luchtdebiet wordt met behulp van de regelbare ventilator en een meetkruis in het toevoerkanaal handmatig geregeld

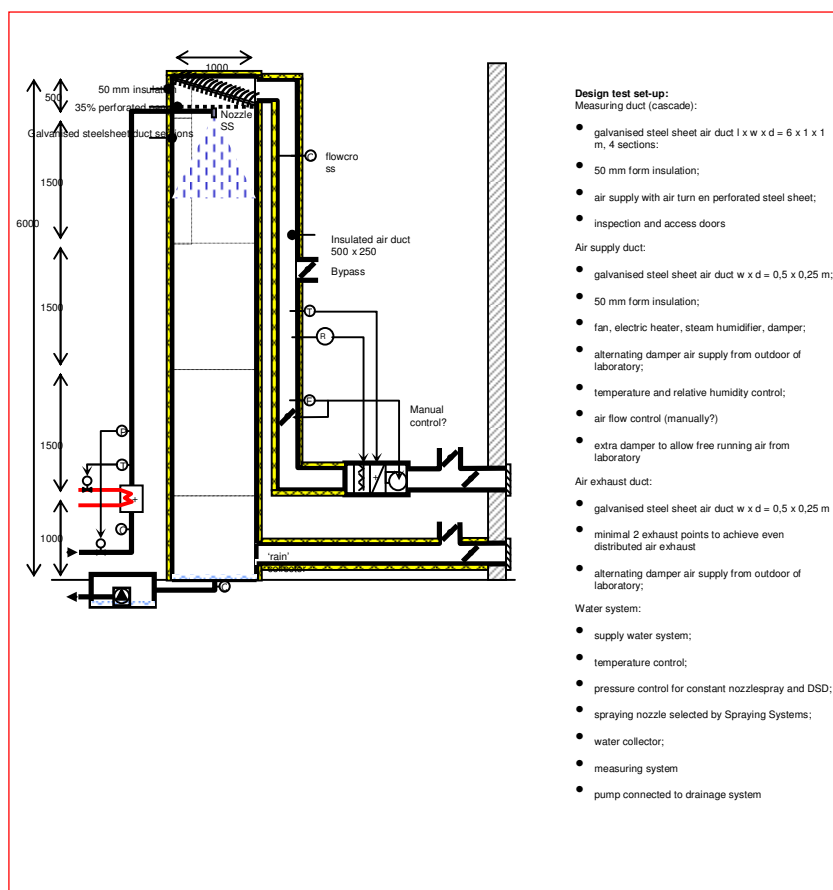
17.4.4 Sproeisysteem

- De metingen zijn uitgevoerd met de door Spraying Systems GmbH geselecteerde sproeiers, 5 stuks type Fulljet[®]3/4GG-3050 –zie paragraaf 16.7, via kogelkranen op het watertoevoersysteem aangesloten.
- De sproeiers zijn direct op de waterleiding aangesloten. De temperatuur van het leidingwater is seizoensafhankelijk en kan fluctueren tussen 10°C en 15°C . Via een tegenstroomapparaat kan het water zo nodig op de gewenste temperatuur worden gebracht. Koeling is niet voorzien, hetgeen inhoudt dat metingen bij de meest voorkomende watertemperatuur van 13°C niet in de zomer plaats kunnen vinden.
- Met behulp van een regelventiel wordt de voordruk op de sproeiers op de gewenste druk van $0,5 \text{ bar}$ geregeld. Het waterdebiet wordt met behulp van een digitale flowmeter geregistreerd.

Earth, Wind & Fire – Airconditioning zonder Ventilatoren
(III) Onderzoek Geo-Klimaatconcept®



Figuur 17.4 - CFD simulatie luchtintrede en sproeiers in de meetschacht



Figuur 17.2 – Ontwerp van de testopstelling



Figuur 17.3 – De Klimaatcascade[®] in de laboratoriumhal

17.5 Instrumentatie

17.5.1 Luchttemperaturen – totaal 21 meetpunten

- Aanzuiglucht – 1 meetpunt
- Inblaaslucht na verwarming – 2 meetpunten
- Inblaaslucht na bevochtiging – 2 meetpunten
- Intredetemperatuur lucht bovenzijde meetschacht – 4 meetpunten
- Luchttemperatuur in de meetschacht op 2 hoogten - $2 \times 4 = 8$ meetpunten
- Uittredetemperatuur lucht onderzijde meetschacht - 4 meetpunten

17.5.2 Relatieve vochtigheid – totaal 5 meetpunten

- Na stoombevochtiging – 1 meetpunt
- Intrede bovenzijde meetschacht – 2 meetpunten
- Uittrede onderzijde meetschacht – 2 meetpunten

17.5.3 Druk – 4 meetpunten

- Ter plaatse van luchttoevoer, boven de sproeiers – 1 meetpunt
- Aan onderzijde meetschacht, boven de uitstroomopening – 1 meetpunt
- Op 2 tussenliggende hoogten – 2 meetpunten

17.5.4 Overige – 3 meetpunten

- Waterdebiet – 2 meetpunten
- Voordruk op sproeiers – 1 meetpunt

17.6 Meetprogramma

17.6.1 Uitgangspunten

De berekening van de psychometrische prestaties van een Klimaatcascade[®] en de selectie van de hiervoor noodzakelijke sproeiers is gebaseerd op CFD simulaties –zie paragraaf 16.7. De metingen zijn dan ook in eerste instantie bedoeld om het CFD simulatiemodel ad hoofdstuk 16 te kalibreren en te valideren. Een voorselectie van sproeiers vindt plaats op basis van het te verwachten sproeispectrum, dat wordt berekend met behulp van het analytisch rekenmodel ad hoofdstuk 10 –zie paragraaf 16.5 en 16.6. Uitgangspunt hiervoor is de koelprestatie van een Klimaatcascade[®] in de koelperiode. De metingen zijn in tweede instantie bedoeld om het analytisch rekenmodel te kalibreren en te valideren.

17.6.2 CFD simulaties Gebouw/Klimaatmodel BETA

Tabel 17.1 laat de resultaten zien van de uitgevoerde CFD simulaties volgens paragraaf 16.11

	Eenheid	Invoercondities simulaties – Gebouw/Klimaatmodel BETA			
		Zomer		Winter	
		Ontwerp	Gemiddeld	Gemiddeld	Ontwerp
		Case B1	Case B2	Case B3	Case B5
Luchtdruk	kPa	100	100	100	100
Luchttemperatuur in	⁰ C	28	20	5	-10
Relatieve vochtigheid in	%	55	80	90	90
Luchtsnelheid	m.s ⁻¹	0,5	0,5	0,5	0,5
Lucht volumestroom	m ³ .h ⁻¹	1.800	1.800	1.800	1.800
Lucht massastroom	kg.s ⁻¹	0,574	0,576	0,626	0,671
Luchttemperatuur uit	⁰ C	18,3	15,8	8,8	5,1
Relatieve vochtigheid uit	%	95	95	100	95
Watertemperatuur in	⁰ C	13	13	13	15,4
Water volumestroom	l.min ⁻¹	40,4	40,4	40,4	40,4
Water volumestroom	m ³ .h ⁻¹	2,42	2,42	2,42	2,42
Water massastroom	kg.s ⁻¹	0,672	0,672	0,672	0,672
Water/Luchtfactor	-	1,17	1,17	1,07	1,00

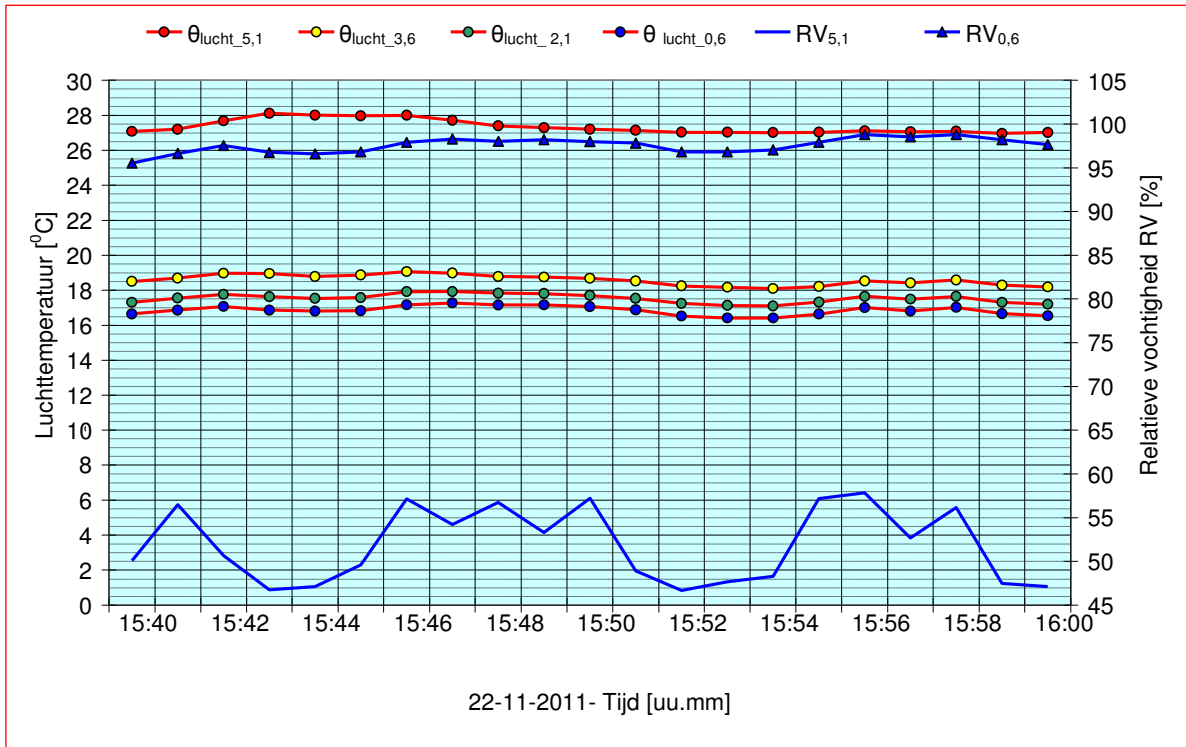
Tabel 17.1 – Invoercondities voor de simulaties fysieke onderzoeksmodel –Gebouw/Klimaatmodel BETA

17.7 Varianten B1 – Gebouw/Klimaatmodel BETA – Ontwerp zomercondities

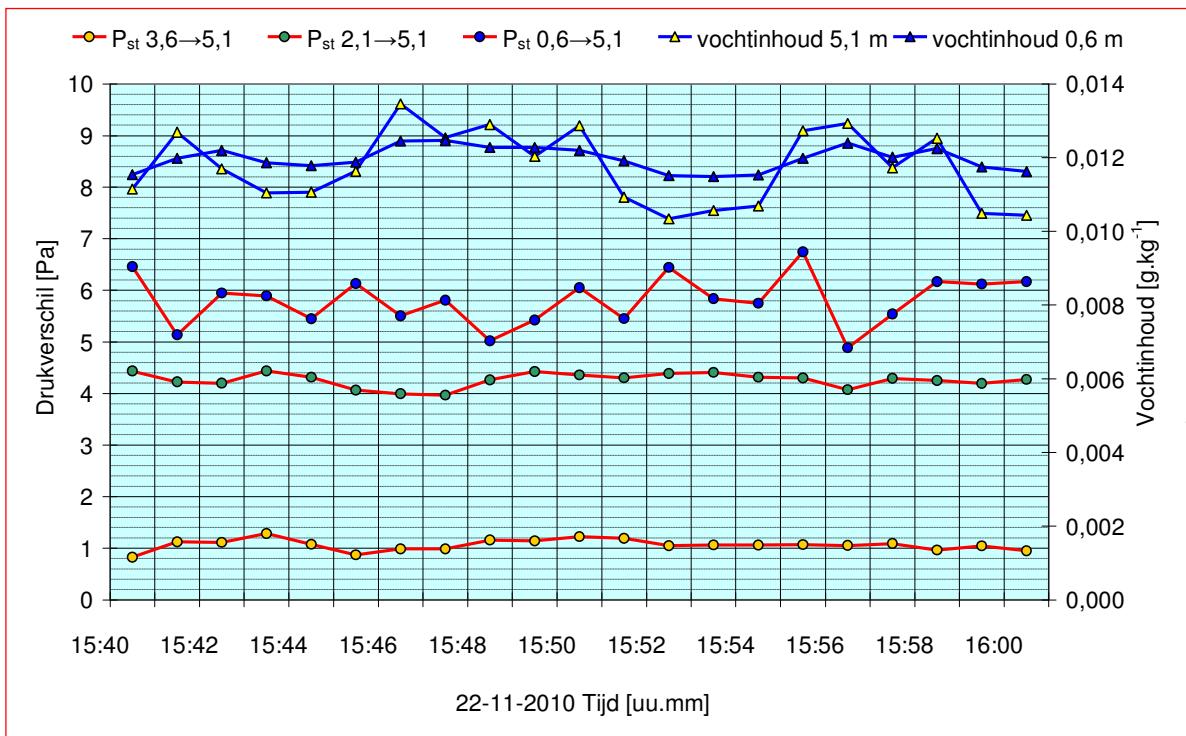
17.7.1 Variant B1/1 – Water/Luchtfactor $R_{w/L} = 1,17$ conform CFD simulatie

De metingen zijn uitgevoerd over een periode van enkele uren. Figuur 17.4 en 17.5 laten de meetresultaten zien over een tijdsbestek van 20 minuten.

Earth, Wind & Fire – Airconditioning zonder Ventilatoren
 (III) Onderzoek Geo-Klimaatconcept®



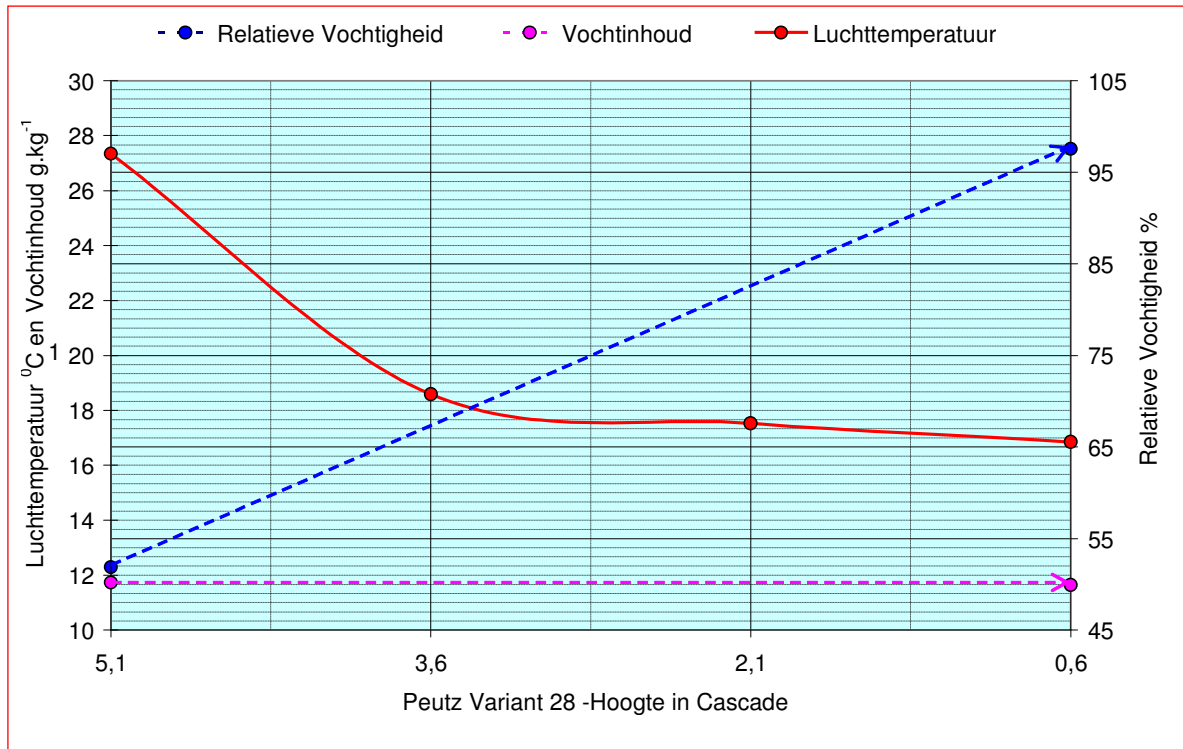
Figuur 17.4 – Variant B1/1 – Luchttemperatuur en Relatieve Vochtigheid als functie van de tijd



Figuur 17.5 – Variant B1/1 – Drukverschil en Vochtinhoud als functie van de tijd

Het in de cascade opgebouwde drukverschil ligt tussen 4,9 en 6,75 Pa met een gemiddelde van 5,8 Pa – zie figuur 17.5. Dit komt goed overeen met de waarde die met de CFD simulaties is berekend. In figuur 17.5 is tevens de vochtinhoud aangegeven.

Figuur 17.6 toont de resultaten van deze meetsessie als functie van de hoogte in de cascade. De luchttemperaturen zijn op de aangegeven 4 posities gemeten. De relatieve en absolute luchtvochtigheid zijn alleen op het hoogste en laagste niveau gemeten; de verbindingslijnen geven alleen de richting aan van het vochtigheidsverloop.



Figuur 17.6 – Variant B1/1 – Ontwerp Zomerconditie – $R_{w/L} = 1,164$

Deze meetsessie heeft betrekking op de ontwerp zomercondities in een BETA gebouw. In het conceptueel psychometrisch ontwerp werd uitgegaan van een uittredeconditie van 17°C bij een relatieve vochtigheid van 90% –zie paragraaf 8.4. De Klimaatcascade[®] voldoet met een gemeten temperatuur van 16,85°C geheel aan de gewenste voelbare koelcapaciteit.

De gewenste relatieve vochtigheid van 90% wordt echter door de geringe daling van de vochtinhoud niet gerealiseerd. De latente capaciteit is hierdoor zeer beperkt. De CFD simulaties voor case B1 lieten een relatieve vochtigheid zien van 95% -zie paragraaf 16.11.3.

De (te) geringe latente capaciteit kan in principe 3 oorzaken hebben:

- Het koelproces is aan de voet van de cascade door de beperkte hoogte van de testopstelling nog niet voltooid. Zie hiervoor ook paragraaf 16.11.3, waarin voor de resultaten van de CFD simulatie van case B1 een dergelijke veronderstelling werd geuit.
- Het waterdebiet is te klein, te weinig waterdruppels → te gering druppeloppervlak, en/of
- Het sproeispectrum is te grof → te gering druppeloppervlak.

In enkele aanvullende meetsessies is nagegaan of met een verandering van de testomstandigheden een verhoging van de latente capaciteit zou kunnen worden gerealiseerd.

In de aanwezige testopstelling is het niet mogelijk het sproeispectrum aan te passen. Verhoging van het waterdebiet zou mogelijk zijn, maar dat impliceert tevens verandering van het sproeispectrum. Voor nader

onderzoek blijft dan als enige mogelijk over het verhogen van de water/luchtfactor door verlaging van het luchtdebiet - zie meetsessies B1/2 t/m B1/4 in de volgende paragraaf.

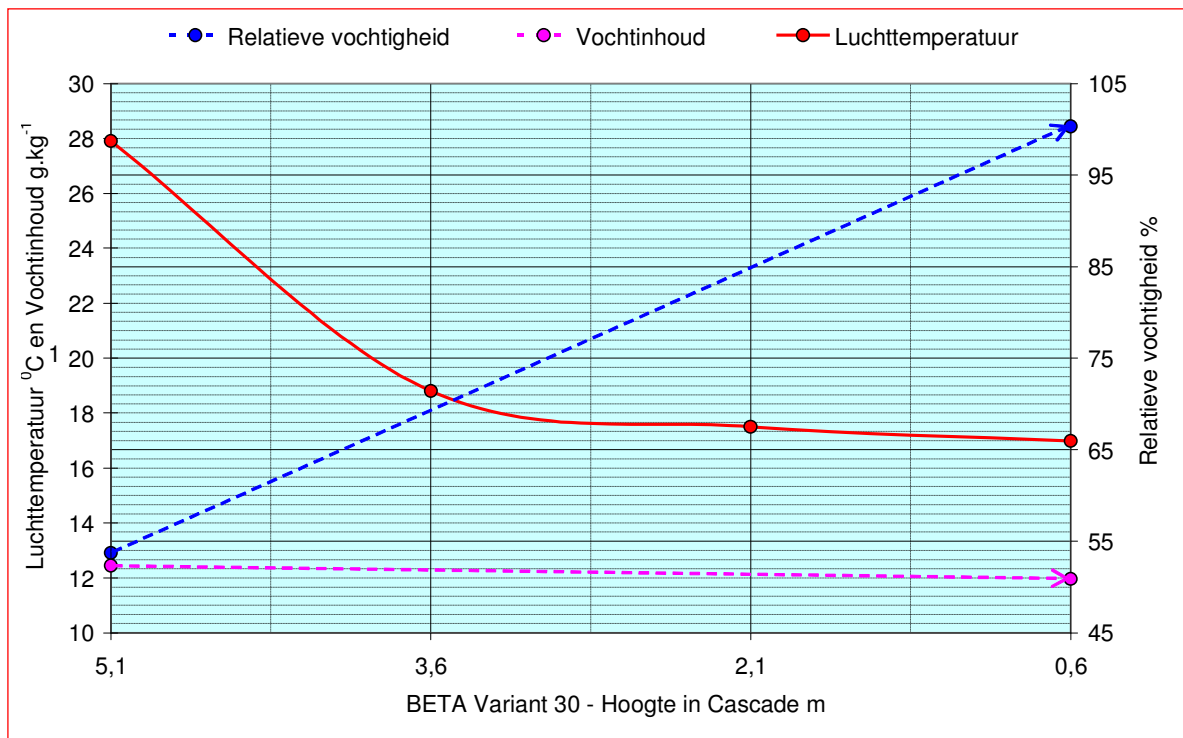
17.7.2 Meetsessie B1/2 – Verhoogde Water/Luchtfactor $R_{w/L} = 1,37$

De water/luchtfactor van $R_{w/L} = 1,17$ is gebaseerd op de energiebalans water/lucht. Dit is een theoretische waarde, waarbij ervan is uitgegaan dat de warmteoverdracht volledig plaatsvindt in het sproeispectrum. Een -voorlopig onbekend- deel van het water komt echter op de wanden terecht en heeft daarmee een aanzienlijk kleiner koeffect dan in het sproeispectrum –zie paragraaf 11.4 en figuur 11.6. Dit kan gecompenseerd worden door een vergroting van de water/luchtfactor.

Bij metingen is gebleken dat in de testopstelling ca 10% van het koelwater op de wanden terecht komt. Als het koeffect van de wanden wordt verwaarloosd zou het waterdebiet dus met 10% moeten worden verhoogd, hetgeen neerkomt op een stijging van de water/luchtfactor van 1,17 naar 1,29.

Verder is ook een grovere druppelgrootteverdeling te verwachten dan het bij de CFD simulaties gehanteerde sproeispectrum. Bij gebruik van meerdere kleine sproeiers gaan de afzonderlijke stralen elkaar op enige afstand beïnvloeden, waardoor druppels kunnen gaan coaguleren met als gevolg een grover sproeispectrum. zie paragraaf 16.10. Ook dit effect kan worden gecompenseerd door een groter waterdebiet.

Om het effect van een verhoogd waterdebiet te kunnen bepalen is de meting voor de ontwerp zomerconditie, case B1/1, herhaald met een water/luchtfactor van 1,37 –zie figuur 17.7. Het sproeisysteem is hierbij gehandhaafd, waardoor het waterdebiet en het sproeispectrum niet wordt gewijzigd. Derhalve is in deze meetsessie het luchtdebiet verminderd tot . Hierdoor wordt de luchtsnelheid in de cascade kleiner, maar dit heeft weinig invloed op de warmteoverdracht –zie paragraaf 11.4 en figuur 11.16.



Figuur 17.7 – Meetsessie B1/2 – Ontwerp zomerconditie - $R_{w/L} = 1,37$

Figuur 17.7 toont de resultaten van deze meetsessie. Conclusies:

- De lucht wordt gekoeld van 28^o naar 17^oC en voldoet daarmee aan de verwachtingen. De hogere water/luchtfactor heeft nauwelijks invloed op de voelbare koelcapaciteit.

- Het absolute vochtgehalte van de lucht daalt van $\approx 12,5$ naar $\approx 12,0 \text{ g.kg}^{-1}$; de latente koelcapaciteit is dus hoger dan bij meetsessie B1/1.
- De relatieve luchtvochtigheid stijgt van $\approx 50\%$ naar $\approx 100\%$.
- Het profiel van de temperatuurdaling en stijging van de RV over de hoogte van de meetschacht vertoont veel gelijkenis met die in meetsessie B1/1.

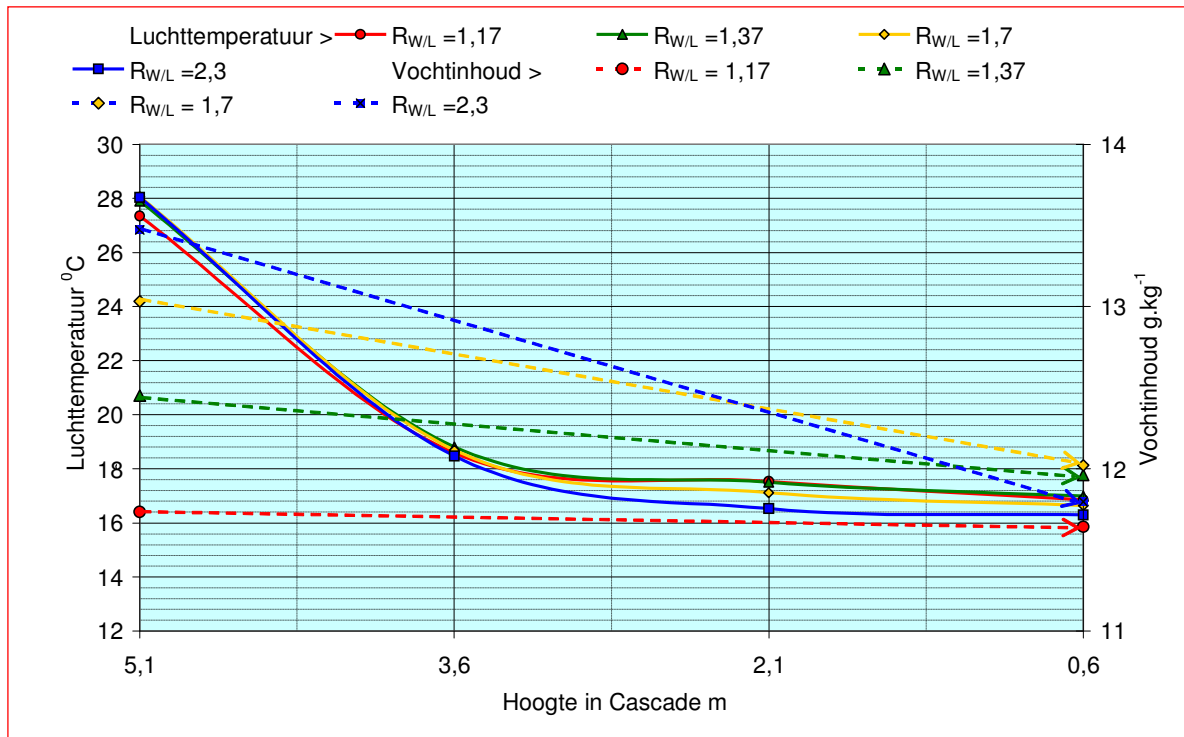
Het in de cascade opgebouwde drukverschil ligt tussen 5,0 en 6,4 Pa met een gemiddelde van 5,7 Pa, vrijwel gelijk aan meetsessie B1/1, hoewel door het hogere waterdebiet een hogere waarde zou mogen worden verwacht. Dit komt goed overeen met de waarde die met de CFD simulaties is berekend.

17.7.3 Meetsessies B1/3 en B1/4 – Nogmaals verhoogde Water/Luchtfactor

Met een water/luchtfactor van 1,37 is voor de zomer ontwerpconditie nu enige droging gemeten van $\Delta x \approx -0,5 \text{ g.kg}^{-1}$. Volgens de CFD simulatie case B1 zou dit $\Delta x = -1,12 \text{ g.kg}^{-1}$ moeten zijn, en volgens de psychometrische uitgangspunten van hoofdstuk 8 zou zelfs $\Delta x = -2,0 \text{ g.kg}^{-1}$ gewenst zijn. Om na te gaan of verhoging van de latente koelcapaciteit mogelijk is zijn aanvullende metingen uitgevoerd met water/luchtfactoren van $R_{w/L} = 1,7$ en $2,3$, gerealiseerd door verlaging van het luchtdebiet bij gelijkblijvend waterdebiet.

Figuur 17.8 brengt de meetresultaten van de meetsessies B1/1 t/m B1/4 in beeld. Verhoging van de water/luchtfactor levert een iets hogere $\Delta\theta$ [K] en Δx [g.kg^{-1}] op maar wel bij verschillende intredecondities - zie paragraaf 17.7.4.

De resultaten van alle meetgegevens en de daarop gebaseerde berekeningen zijn in tabel 17.2 samengevat die daarom een betere prestatievergelijking mogelijk maakt.



Figuur 17.8 – Temperatuur en Vochtinhoud als functie $R_{w/L}$ en hoogte in de cascade

Meetsessie >			B1/1	B1/2	B1/3	B1/4
Variant Peutz >			28	30	31	32
Water/Luchtfactor	$R_{w/L}$	kg.kg^{-1}	1,17	1,37	1,7	2,3

WATER						
Volumedebiet	q_v	$\text{dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	2422	2397	2408	2424
Massadebiet	q_m	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	0,673	0,666	0,669	0,673
Aanvoertemperatuur	$\theta_{w,\text{in}}$	$^{\circ}\text{C}$	12,85	13,06	13,06	13,03
Afvoertemperatuur	$\theta_{w,\text{uit}}$	$^{\circ}\text{C}$	15,11	15,24	15,08	14,73
LUCHT						
Volumedebiet	q_v	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	1789	1508	1222	910
Dichtheid	ρ (rho)	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1,16	1,16	1,16	1,16
Massadebiet	q_m	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	2075	1749	1417	1056
Massadebiet	q_m	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	0,576	0,486	0,394	0,293
Intredeconditie:						
Temperatuur	$\theta_{l,\text{in}}$	$^{\circ}\text{C}$	27,34	27,90	28,06	28,04
Relatieve vochtigheid	RV	%	51,88	53,75	54,33	55,65
Absolute vochtigheid	x	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	11,74	12,45	13,03	13,47
Enthalpie	h	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	57,59	60,00	61,66	62,76
Uitredeconditie:						
Temperatuur	$\theta_{l,\text{in}}$	$^{\circ}\text{C}$	16,85	16,99	16,64	16,29
Relatieve vochtigheid	RV	%	97,56	100,32	100,51	99,90
Absolute vochtigheid	x	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	11,64	11,96	12,02	11,80
Enthalpie	h	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	46,57	47,52	47,32	46,39
PRESTATIE						
Enthalpieverschil	Δh	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	-11,02	-12,48	-14,34	-16,37
Temperatuurverschil	$\Delta \theta$	K	-10,49	-10,92	-11,42	-11,75
Verschil Vochtinhoud	Δx	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	-0,09	-0,49	-1,01	-1,67
Totaal thermisch vermogen	P_{tot}	kW	-6,35	-6,06	-5,65	-4,80
MLTD	$\Delta T_{\text{log, gelijk}}$	K	6,02	6,12	5,95	5,94
Voelbaar vermogen	P_v	kW	-6,05	-5,30	-4,50	-3,44
Voelbare warmtefactor	VWF	$\Delta \theta / \Delta h$	0,95	0,87	0,80	0,72
Drukverschil	Δp	Pa	5,8			

Tabel 17.2 – Overzicht van de meetresultaten

17.7.4 Conclusies meetsessies B1/1 t/m B1/4

Tabel 17.2 maakt duidelijk dat bij alle varianten de relatieve vochtigheid van de uitgaande lucht op $\approx 100\%$ ligt, bij slechts geringe verschillen in temperatuur. Verhoging van de water/luchtfactor van $R_{w/L}$ van 1,17 \rightarrow 2,3 kan dus geen invloed hebben op de vochtinhoud van de lucht. De gewenste verdere droging van de lucht door verhoging van $R_{w/L}$ is onmogelijk. De conclusie is zelfs gerechtvaardigd dat beperking van de water/luchtfactor tot $R_{w/L} = 1,17$ of wellicht nog lager voorkeur verdient, omdat bij deze waarde de gewenste voelbare koelcapaciteit wordt gerealiseerd bij een relatieve vochtigheid $< 100\%$. Ook is een zo laag mogelijke waarde gewenst in verband met de benodigde pompenergie –zie hoofdstuk 8.

Figuur 17.8 en tabel 17.2 geven het beeld van toenemende prestaties van de cascade bij verhoging van de water/luchtfactor. Een nadere beschouwing van deze tabel leert het volgende –zie kolom PRESTATIE:

- **Enthalpieverschil Δh :** Bij verhoging van $R_{w/L}$ van 1,17 \rightarrow 2,3 stijgt het enthalpieverschil van $\Delta h = -11,02 \rightarrow -16,37$, een verschil van 5,35 kJ.kg⁻¹. Dit verschil kan echter grotendeels worden toegeschreven aan de verschillen in intredeconditie, $h = 57,59 \rightarrow 62,76$, een verschil van 5,17 kJ.kg⁻¹.
- **Temperatuurverschil:** Bij verhoging van $R_{w/L}$ van 1,17 \rightarrow 2,3 stijgt het temperatuurverschil $\Delta\theta = -10,49 \rightarrow -11,75$ K een verschil van 1,26K. Dit verschil kan gedeeltelijk worden toegeschreven aan de verschillen in intredetemperatuur, $\theta_{l,in} = 27,34 \rightarrow 28,04$, een verschil van 0,7 K. Verder speelt de iets lagere MLTD, gevolg van de lagere afvoertemperatuur van het water, een rol.
- **MLTD – Mean Logarithmic Temperature Difference $\Delta T_{log, gelijk}$:** Bij verhoging van $R_{w/L}$ van 1,17 \rightarrow 2,3 blijft het MLTD, berekend met formule (8.1) vrijwel onveranderd. Aangezien door handhaving van het sproeispectrum ook het werkzaam oppervlak in de cascade en de warmteoverdrachtscoëfficiënt tussen water en lucht niet of nauwelijks veranderd, houdt dit in dat verhoging van de water/luchtfactor weinig of geen invloed heeft op de voelbare koelcapaciteit.
- **Voelbaar vermogen:** Het verschil in voelbaar vermogen, $P = -6,05 \rightarrow -3,44$, factor 1,75, is globaal evenredig met het verschil in luchtdebiet, $q_v = 1789 \rightarrow 910$, factor 1,96. Verder speelt de iets lagere MLTD, gevolg van de lagere afvoertemperatuur van het water, een rol.
- **Voelbare warmtefactor VWF:** Dit is de verhouding $\Delta\theta/\Delta h$ tussen temperatuurverschil en enthalpieverschil, oftewel de verhouding tussen voelbaar vermogen en totaal vermogen P_v/P_{tot} . Psychometrisch komt verlaging van de VWF normaliter tot stand door verhoging van het voelbare vermogen P_v , ten opzichte van het totaal thermisch vermogen P_t hetgeen in de cascade echter niet het geval is. De tabel laat zien dat bij verhoging van $R_{w/L}$ van 1,17 \rightarrow 2,3 het enthalpieverschil sneller oploopt dan het temperatuurverschil met een dalende VWF als gevolg.

17.8 Varianten B1 t/m B5 – Gebouw / Klimaatmodel BETA – Zomer en Wintercondities

17.8.1 Overzicht van de meeresultaten

Tabel 17.3 geeft een overzicht van de meetresultaten en enkele afgeleide waarden. Enkele observaties:

- Bij de ontwerp zomercondities – meetsessie B1 - is met een VWF = 0,95 de overdracht van voelbare warmte dominant. Er treedt slechts een geringe luchtdroging op. De Klimaatcascade[®] functioneert voornamelijk als luchtkoeler.
- Bij gemiddelde zomercondities -meetsessie B2 -is met een VWF = 0,77 de overdracht van voelbare warmte eveneens dominant, maar er treedt eveneens een duidelijke luchtdroging op. De Klimaatcascade[®] functioneert als luchtkoeler en -droger.
- Bij wintercondities – meetsessies B2A, B3 en B5 - zijn met een VWF \approx 0,5 de overdracht van voelbare en latente warmte ongeveer in evenwicht. Naast verwarming van de lucht treedt een aanzienlijke luchtbevochtiging op. De Klimaatcascade[®] functioneert als (voor)verwarmer en luchtbevochtiger.
- De relatieve vochtigheid van de uitgaande lucht ligt bij alle metingen dicht bij 100%.
- De in de tabel vermelde relatieve vochtigheid van de ruimtelucht is berekend op basis van de vochtinhoud van de uitredende lucht + een vochtafgifte van personen van $\Delta x \approx 0,6$ g.kg⁻¹, gebaseerd op een ventilatiedebiet van 50 m³.h⁻¹ per persoon –zie paragraaf 12.12. De comfortgrenzen worden hierbij niet overschreden.
- De drukopbouw

Gebouw / Klimaattype BETA							
Variant >		B1/1	B2	B4	B3	B5	
Meetsessie Peutz >		28	40b	38	34	42b	
Figuur		17.6	17.9	17.10	17.11	17.12	
Water/Luchtfactor	$R_{w/L}$	kg.kg ⁻¹	1,164	1,109	1,061	1,049	1,029
WATER							
Volumedebiet	q_v	dm ³ .h ⁻¹	2422	2425	2410	2427	2427

Earth, Wind & Fire – Airconditioning zonder Ventilatoren
(III) Onderzoek Geo-Klimaatconcept[®]

Massadebiet	q_m	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	0,673	0,674	0,670	0,674	0,674
Aanvoertemperatuur	$\theta_{w,\text{in}}$	$^{\circ}\text{C}$	12,85	13,03	12,83	13,10	12,93
Afvoertemperatuur	$\theta_{w,\text{uit}}$	$^{\circ}\text{C}$	15,11	14,37	12,13	11,00	8,50
LUCHT							
Volumedebiet	q_v	$\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$	1789	1832	1836	1836	1807
Dichtheid	ρ (rho)	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1,16	1,19	1,24	1,26	1,31
Massadebiet	q_m	$\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$	2081	2186	2272	2314	2359
Massadebiet	q_m	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	0,578	0,607	0,631	0,643	0,655
Intredeconditie							
Temperatuur	$\theta_{i,\text{in}}$	$^{\circ}\text{C}$	27,34	20,00	10,08	5,32	-3,70
Relatieve vochtigheid	RV	%	51,88	77,73	101,37	95,27	57,48
Vochtinhoud	x	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	11,74	11,38	7,76	5,21	1,62
Enthalpie	h	$\text{Kj}\cdot\text{kg}^{-1}$	57,59	49,14	29,79	18,48	0,32
Uitredeconditie							
Temperatuur	$\theta_{i,\text{in}}$	$^{\circ}\text{C}$	16,85	15,21	11,60	9,54	5,78
Relatieve vochtigheid	RV	%	97,56	100,41	98,87	97,72	95,91
Vochtinhoud	x	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	11,64	10,87	8,38	7,149	5,39
Enthalpie	h	$\text{Kj}\cdot\text{kg}^{-1}$	46,57	42,91	32,90	27,68	19,39
PRESTATIES							
Enthalpieverschil	Δh	$\text{Kj}\cdot\text{kg}^{-1}$	-11,02	-6,23	3,12	9,21	19,07
Temperatuurverschil	$\Delta\theta$	K	-10,49	-4,79	1,52	4,22	9,48
Verschil Vochtinhoud	Δx	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	-0,09	-0,52	0,62	1,94	3,76
Thermisch vermogen	P	Kw	-6,37	-3,78	1,97	5,92	12,50
MLTD	$\Delta T_{\log,\text{gel}}$	K	-6,01	-2,90	1,35	3,77	7,69
Voelbaar vermogen	P	Kw	-6,07	-2,91	0,96	2,71	6,21
Totaal vermogen	P	Kw	-6,37	-3,78	1,97	5,92	12,50
Latent vermogen	P	Kw	-0,30	-0,88	1,01	3,20	6,28
Voelbare warmte factor	VWF	$\Delta\theta/\Delta h$	0,95	0,77	0,49	0,46	0,50
Drukopbouw	Δp	Pa	5,81	6,18	7,17	8,44	9,77
RV IN DE RUIMTE							
Bij ruimtetemperatuur 20 ^o C	RV_i	%	nvt	nvt	61%	53%	41%
Bij ruimtetemperatuur 22 ^o C	RV_i	%	nvt	69%	54%	47%	36%
Bij ruimtetemperatuur 24 ^o C	RV_i	%	65%	61%	48%	41%	32%
Bij ruimtetemperatuur 26 ^o C	RV_i	%	57%	54%	nvt	nvt	nvt

Tabel 17.3 – Overzicht meetresultaten en bewerkingen Gebouw / Klimaatype BETA

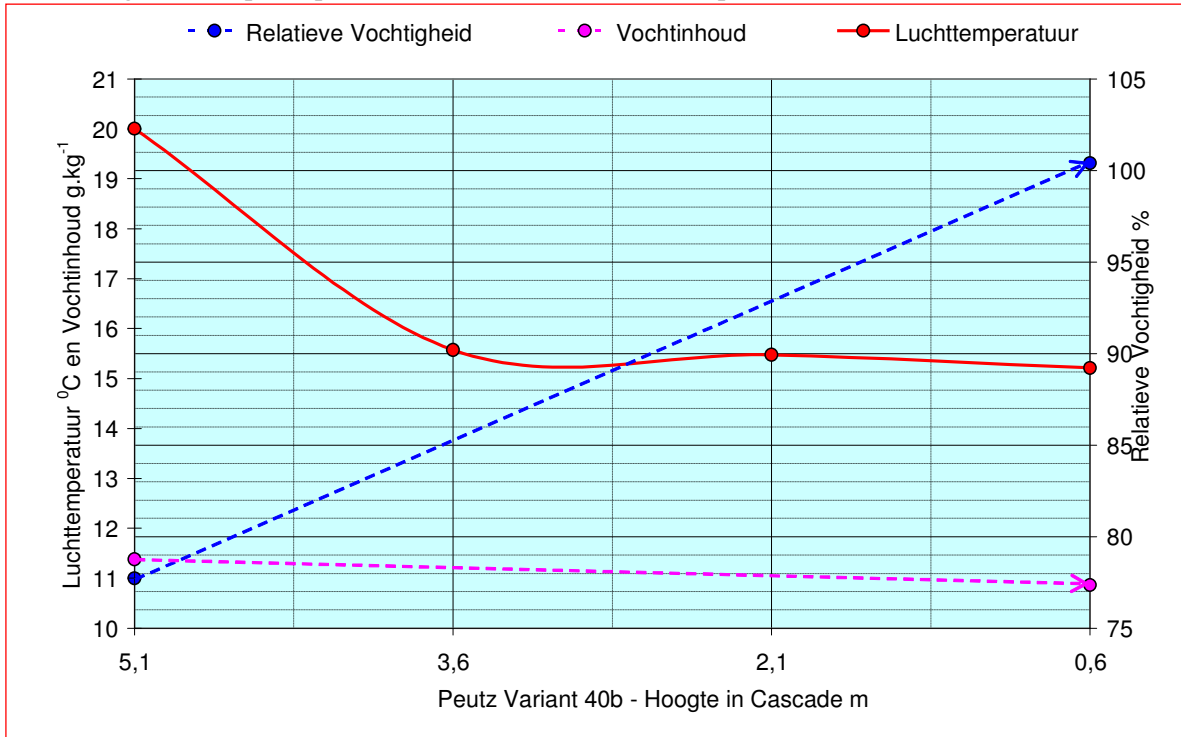
De hierna volgend paragrafen brengen het verloop van de warmteoverdracht in beeld over de hoogte van de Klimaatcascade.

17.8.2 Variant B1/1 - Ontwerpcondities zomer Gebouw / Klimaatype BETA

Zie paragraaf 17.7.1 en figuur 17.6

17.8.3 Variant B2 - Gemiddelde zomercondities Gebouw / Klimaattype BETA

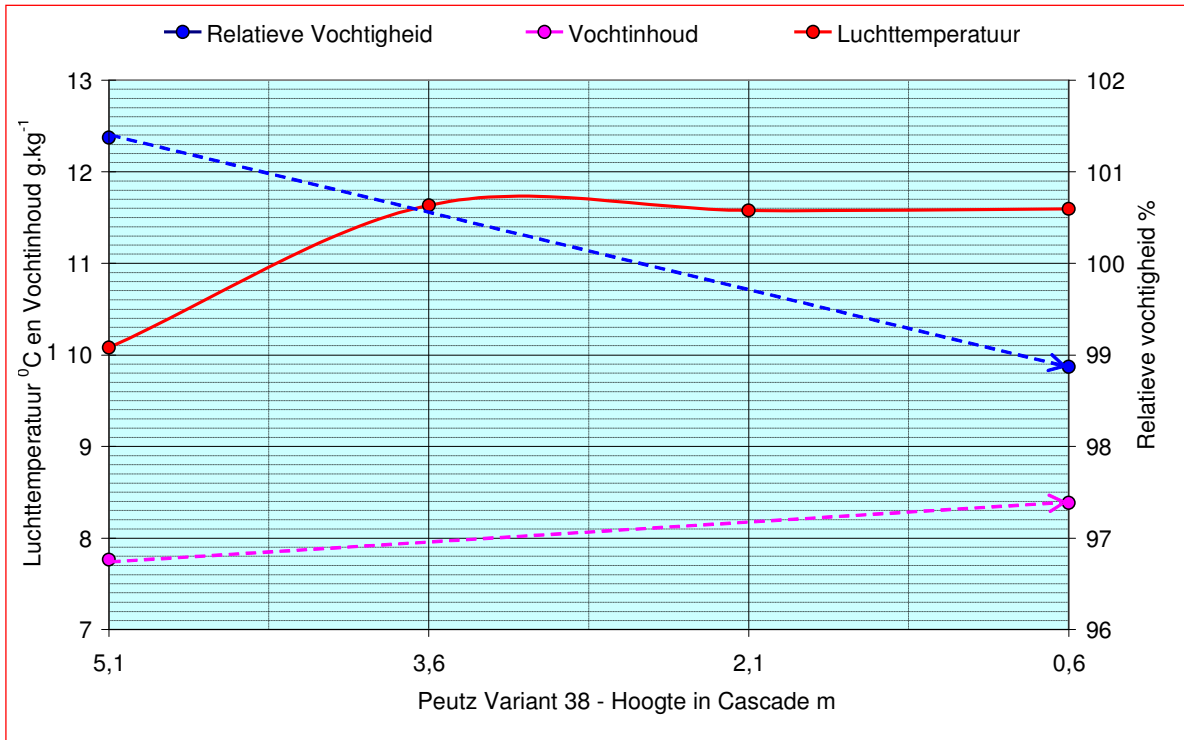
De lucht wordt gekoeld tot 15,2°C waarbij tevens de vochtinhoud met $\approx 0,5 \text{ g.kg}^{-1}$ wordt verlaagd. Uitgaande van een gewenste uittrede temperatuur van 17°C kan worden gesteld dat de voelbare koelcapaciteit hoger is dan gevraagd. De gemeten luchtdroging is echter wel gewenst en de vraag doet zich voor of en hoe het psychometrisch proces in een Klimaatcascade[®] kan worden beïnvloed. De meest gereede optie hiervoor is het aanpassen van de water/luchtfactor R_{WL} door sproeiers uit te schakelen bij handhaving van het sproeispectrum en een constante watertemperatuur van 13°C - zie hoofdstuk 21.



Figuur 17.9 - Variant B2 – Gemiddelde zomerconditie BETA

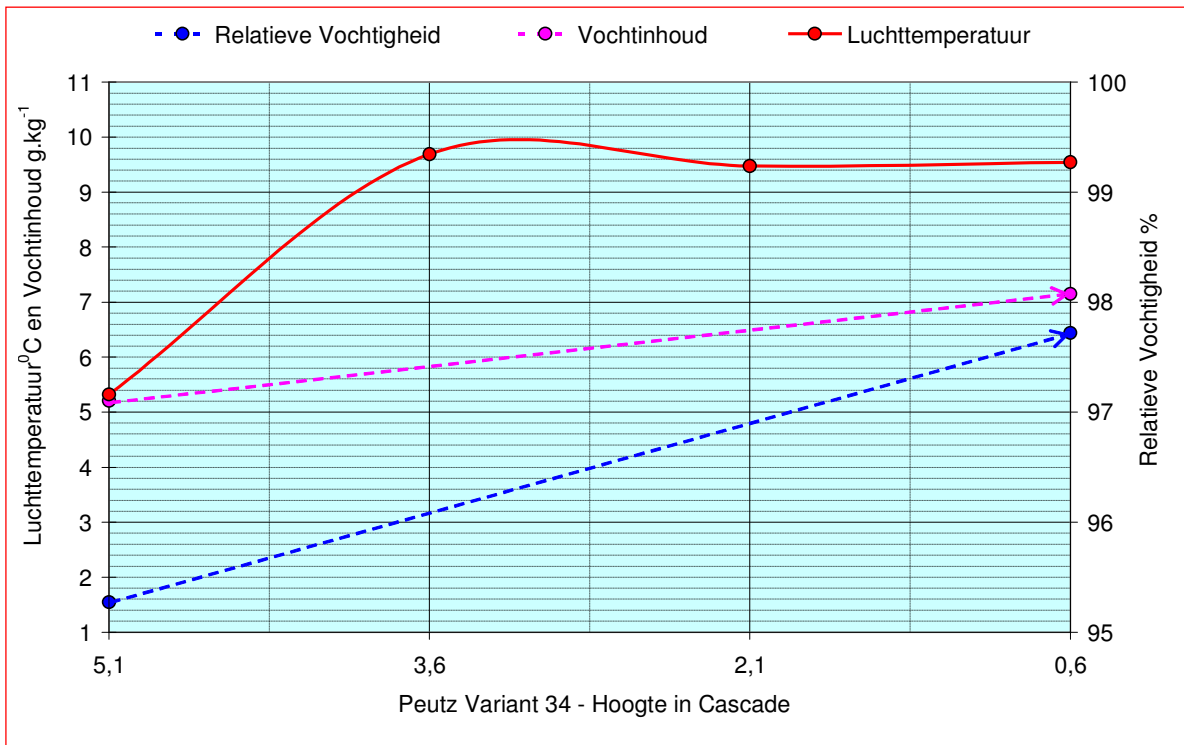
17.8.4 Variant B4 - Voorjaar/Najaarscondities Gebouw / Klimaattype BETA

Deze meetsessie, waarvan geen CFD simulatie beschikbaar is, is naderhand toegevoegd. De intredeconditie is 10°C bij >100% RV, en de uittredeconditie 11,6°C bij <100% RV. De lucht- en watertemperaturen liggen hier dicht bij elkaar en de psychometrische prestatie van de Klimaatcascade[®] is beperkt tot een geringe voorverwarming en bevochtiging van de lucht.



Figuur 17.10 - Variant B4 – Gemiddelde najaar/voorjaarsconditie BETA

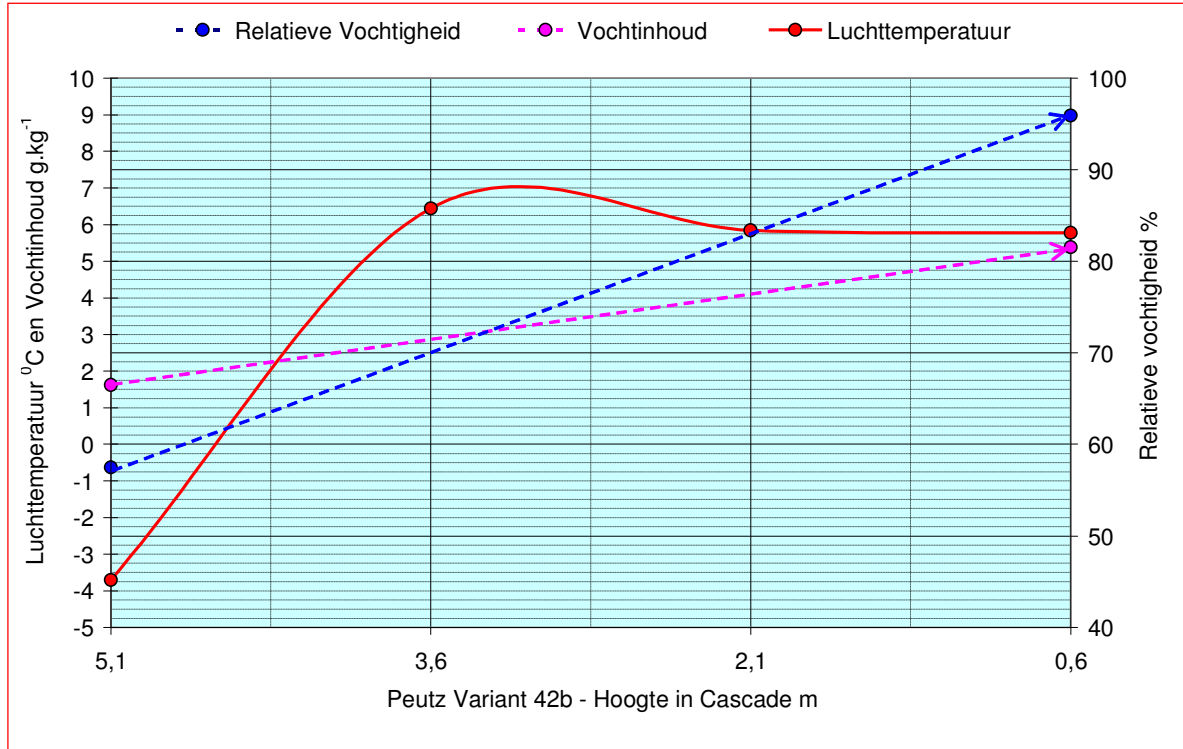
17.8.5 Variant B3 - Gemiddelde winterconditie Gebouw / Klimaattype BETA



Figuur 17.11 - Variant B3 – Gemiddelde winterconditie BETA

17.8.6 Variant B5 - Ontwerp wintercondities Gebouw / Klimaattype BETA

De ontwerp winterconditie van $\theta_e = -10^{\circ}\text{C}$ heeft zich in de meetperiode niet voorgedaan; de metingen zijn daarom uitgevoerd bij de laagst mogelijke intredetemperatuur van $\theta_e = -3,7^{\circ}\text{C}$ – zie paragraaf 17.4.3.



Figuur 17.12 - Variant B5 – Ontwerp winterconditie BETA

17.9 Meet sessies A1 t/m A5 - Gebouw/Klimaatmodel ALPHA – Zomer en Wintercondities

17.9.1 Inleiding

Voor het ALPHA model zijn door budgetbeperkingen geen CFD simulaties uitgevoerd. De metingen hiervoor dienen dus niet voor de kalibratie van het CFD model, maar ter verificatie en kalibratie van het analytisch rekenmodel.

Voor het ALPHA model is de gewenste uitredetemperatuur van de lucht hoger dan in het BETA model, 20°C i.p.v. 17°C , en is de gewenste koelprestatie navenant lager. Bij gebruikmaking van de in de testopstelling aanwezige sproeierconfiguratie en handhaving van sproeiwaterdebiet en voordruk als bij het BETA model is dus een groter luchtdebiet mogelijk.

De analyses met het analytisch rekenmodel leverden voor het ALPHA model een gewenste water/luchtfactor op van $R_{w/L} = 0,4$ – zie paragraaf 11.3. Rekening houdend met 10% waterverlies dat op de wanden terecht komt, alsmede enige coagulatie van druppels in het sproeispectrum – zie paragraaf 17.7.2- zou dus moeten worden gemeten met een water/luchtfactor van $R_{w/L} \approx 0,45$.

Bij handhaving van 5 sproeiers met een massastroom van $0,672 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ – zie tabel 17.1- zou dan een luchtdebiet van $(0,672/0,45) \cdot (3600/1,16) \approx 4600 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ nodig zijn, resulterend in een luchtsnelheid van $\approx 1,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Het is echter niet mogelijk het luchtdebiet in de testopstelling op te voeren.

Besloten werd het luchtdebiet te handhaven op $1.800 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ en 3 van de 5 sproeiers af te sluiten, waardoor het waterdebiet werd gereduceerd tot nominaal $(2.400 \cdot 2/5) = 960 \text{ dm}^3\cdot\text{h}^{-1}$ bij een water/luchtfactor $R_{w/L} = 0,44$. Het asymmetrische sproeipatroon dat hierbij ontstaat moest worden geaccepteerd.

17.9.2 Overzicht van de meeresultaten

Tabel 17.4 geeft een overzicht van de meetresultaten en enkele afgeleide berekende waarden. Enkele observaties:

- Variant A1: Deze heeft betrekking op de ontwerp zomercondities in een ALPHA gebouw. In het conceptueel psychometrisch ontwerp werd uitgegaan van een uittredeconditie van 20°C bij een relatieve vochtigheid van 90% –zie paragraaf 8.4. De Klimaatcascade[®] voldoet met een gemeten temperatuur van 20,1°C geheel aan de gewenste voelbare koelcapaciteit. De gewenste relatieve vochtigheid van 90% wordt echter door een geringe stijging van de vochtinhoud niet gerealiseerd. Er treedt hierdoor een ongewenste, zij het beperkte adiabatische koeling op waardoor de latente capaciteit negatief is
- Variant A2: De lucht wordt gekoeld tot 16,6°C waarbij tevens een geringe verlaging van de vochtinhoud plaatsvindt. Uitgaande van een gewenste uittredetemperatuur van 20°C kan worden gesteld dat de voelbare koelcapaciteit hoger is dan gevraagd. De gemeten luchtdroging is echter wel gewenst en de vraag doet zich voor of en hoe het psychometrisch proces in een Klimaatcascade[®] kan worden beïnvloed. De meest gereede optie hiervoor is het aanpassen van de water/luchtfactor $R_{w/L}$ door sproeiers uit te schakelen bij handhaving van het sproeispectrum en een constante watertemperatuur van 13°C - zie hoofdstuk 21
- Bij wintercondities is de overdracht van latente warmte dominant. Er treedt een aanzienlijke luchtbevochtiging op. De Klimaatcascade[®] functioneert als (voor)verwarmer en luchtbevochtiger.
- De relatieve vochtigheid van de uitgaande lucht ligt bij alle metingen dicht bij 100%.
- De relatieve vochtigheid van de ruimtelucht is berekend met een vochtafgifte van personen van $\Delta x \approx 0,6 \text{ g.kg}^{-1}$ gebaseerd op een ventilatiedebiet van $50 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ per persoon –zie paragraaf 12.12. De comfortgrenzen worden hierbij niet overschreden.

Gebouw / Klimaatype ALPHA							
Variant >			A1	A2	A3	A4	A5
Meetsessie Peutz >			45	40a	39	36	44a
Figuur >			17.13	17.14	17.15	17.16	17.17
Water/Luchtfactor	$R_{w/L}$	kg.kg^{-1}	0,458	0,447	0,431	0,421	0,414
WATER							
Volumedebiet	q_v	$\text{dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	972	969	975	962	974
Massadebiet	q_m	kg.s^{-1}	0,270	0,269	0,271	0,267	0,271
Aanvoertemperatuur	$\theta_{w,\text{in}}$	$^{\circ}\text{C}$	12,87	13,19	13,04	12,89	13,02
Afvoertemperatuur	$\theta_{w,\text{uit}}$	$^{\circ}\text{C}$	16,64	15,24	11,52	9,75	4,77
LUCHT							
Volumedebiet	q_v	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	1831	1818	1826	1812	1795
Dichtheid	ρ (rho)	kg.m^{-3}	1,16	1,19	1,24	1,26	1,31
Massadebiet	q_m	$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	2123	2168	2261	2287	2354
Massadebiet	q_m	kg.s^{-1}	0,590	0,602	0,628	0,635	0,654
Intredeconditie							
Temperatuur	$\theta_{l,\text{in}}$	$^{\circ}\text{C}$	28,07	20,13	10,01	4,87	-4,73
Relatieve vochtigheid	RV	%	58,25	77,97	90,84	101,54	23,44
Vochtinhoud	x	g.kg^{-1}	13,55	11,51	6,92	5,37	0,61
Enthalpie	h	kJ.kg^{-1}	63,00	49,59	27,60	18,43	-3,25
Uittredeconditie							

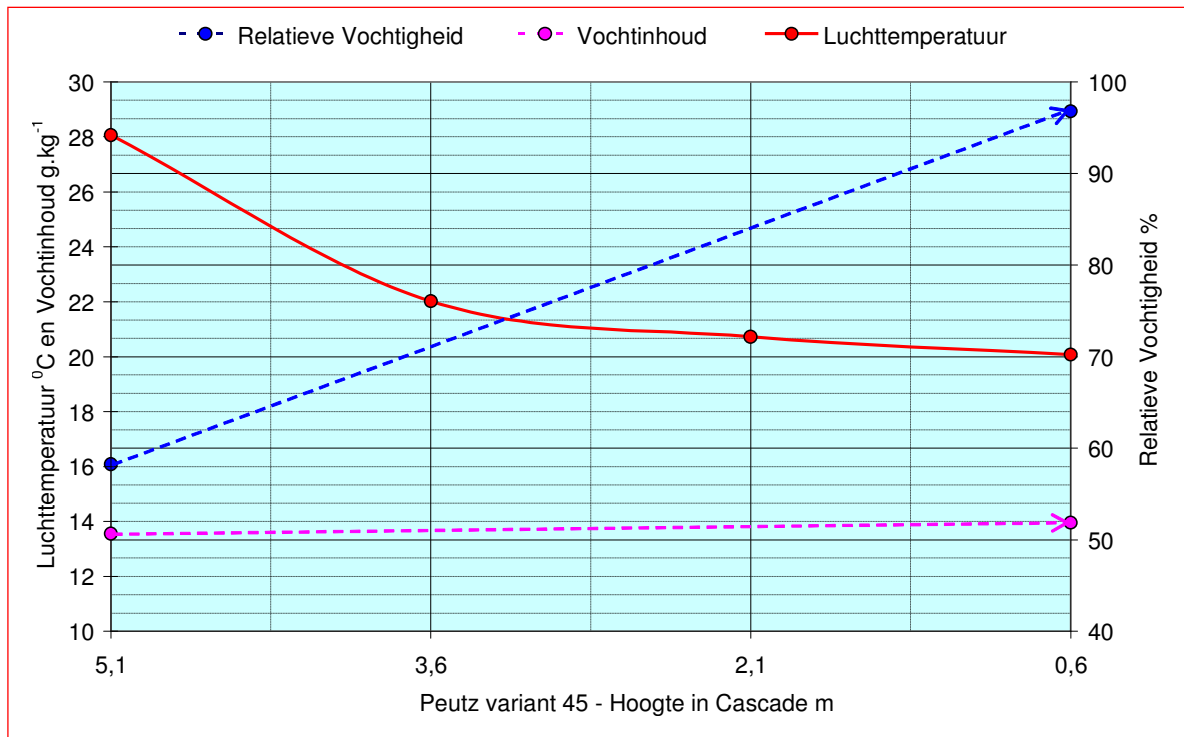
Earth, Wind & Fire – Airconditioning zonder Ventilatoren
(III) Onderzoek Geo-Klimaatconcept[®]

Temperatuur	$\theta_{l, in}$	$^{\circ}\text{C}$	20,08	16,56	10,56	7,80	1,32
Relatieve vochtigheid	RV	%	96,79	96,87	98,31	98,38	95,42
Vochtinhoud	x	g.kg^{-1}	13,96	11,44	7,78	6,38	3,87
Enthalpie	h	kJ.kg^{-1}	55,78	45,75	30,33	23,96	11,04
PRESTATIES							
Enthalpieverschil	Δh	kJ.kg^{-1}	-7,21	-3,84	2,73	5,53	14,29
Temperatuurverschil	$\Delta \theta$	K	-7,99	-3,56	0,55	2,93	6,05
Verschil Vochtinhoud	Δx	g.kg^{-1}	0,40	-0,07	0,86	1,01	3,26
Thermisch vermogen	P	kW	-4,25	-2,31	1,72	3,51	9,34
MLTD	$\Delta T_{\log, \text{geelijk}}$	K	-7,91	-3,39	1,80	4,29	8,72
Voelbaar vermogen	P	kW	-4,71	-2,14	0,34	1,86	3,96
Totaal vermogen	P	kW	-4,25	-2,31	1,72	3,51	9,34
Latent vermogen	P	kW	0,46	-0,17	1,37	1,65	5,39
Voelbare warmte factor	VWF	$\Delta \theta / \Delta h$	1,11	0,93	0,20	0,53	0,42
Drukopbouw	Δp	Pa	0,98	2,08	3,68	4,52	6,87
RV IN DE RUIMTE							
Bij ruimtetemperatuur 20 ^o C	RV _i	%	nvt	77%	53%	43%	26%
Bij ruimtetemperatuur 22 ^o C	RV _i	%	nvt	68%	47%	38%	23%
Bij ruimtetemperatuur 24 ^o C	RV _i	%	73%	61%	42%	34%	21%
Bij ruimtetemperatuur 26 ^o C	RV _i	%	65%	54%	nvt	nvt	nvt

Tabel 17.4 – Overzicht meetresultaten en bewerkingen Gebouw / Klimaatype ALPHA

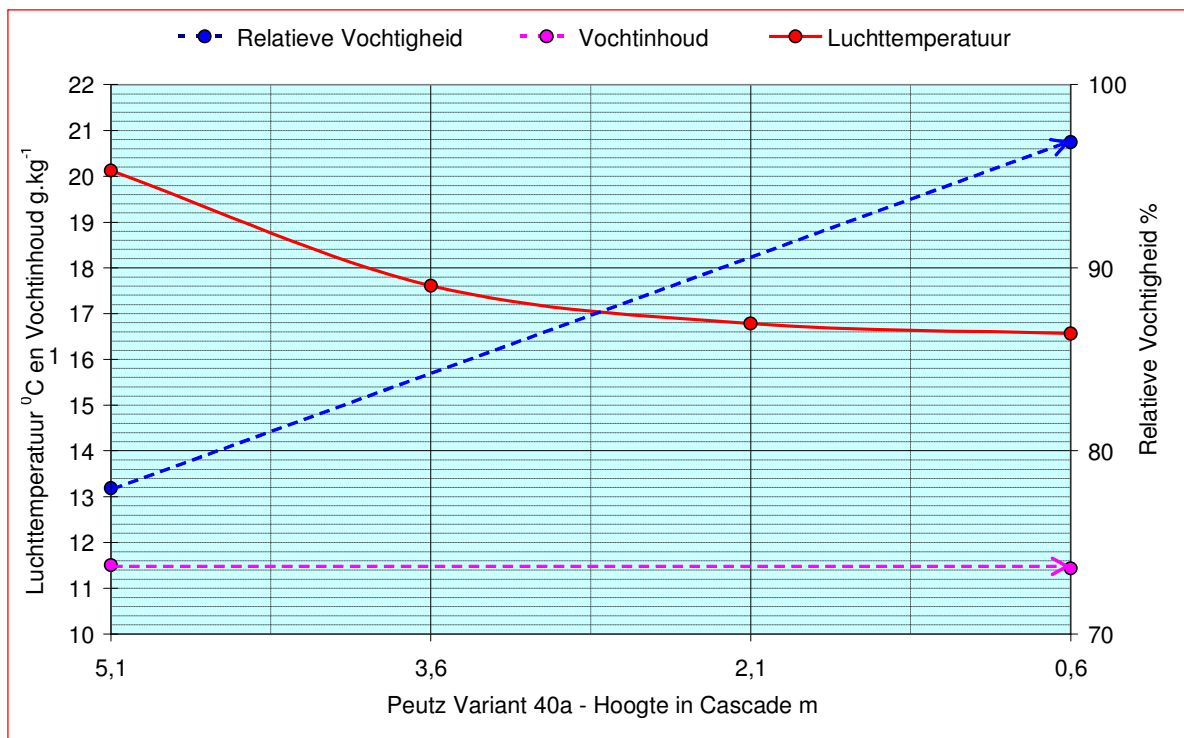
De hierna volgend paragrafen brengen het verloop van de warmteoverdracht in beeld over de hoogte van de Klimaatcascade.

17.9.3 Variant A1 - Ontwerpcondities Zomer Gebouw / Klimaatttype ALPHA



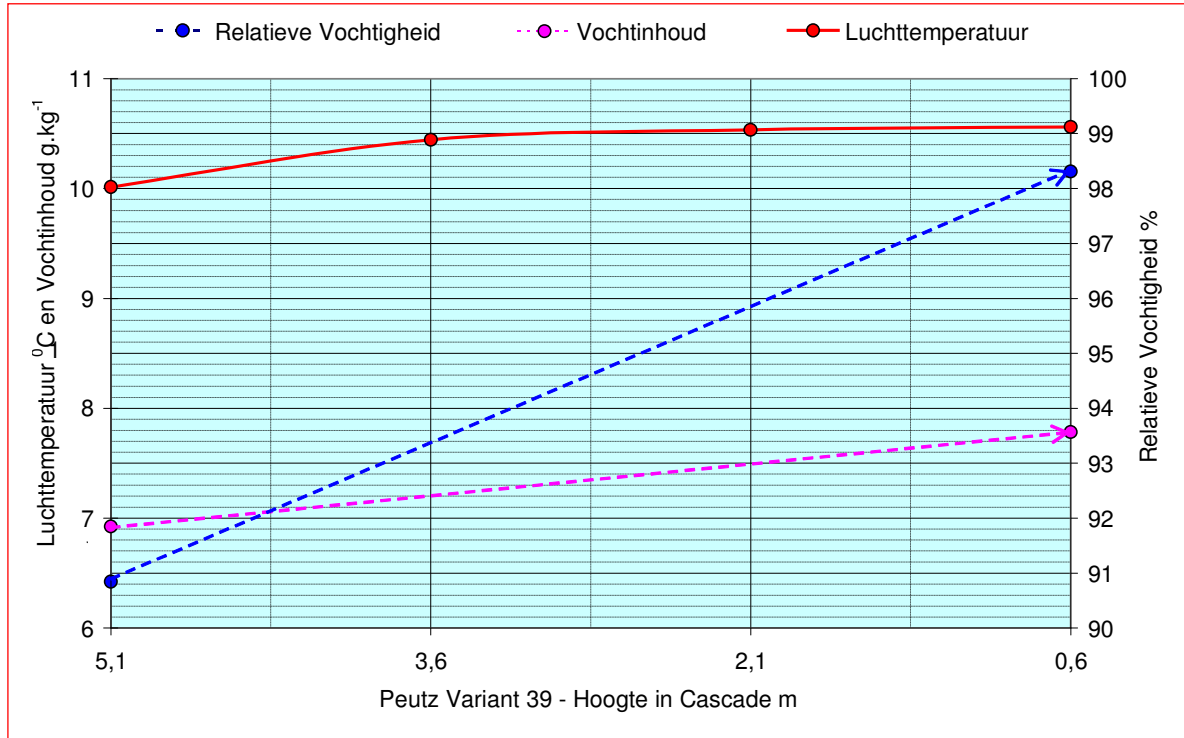
Figuur 17.13 – Ontwerp condities zomer – ALPHA

17.9.4 Variant A2 - Gemiddelde zomercondities Gebouw / Klimaatttype ALPHA



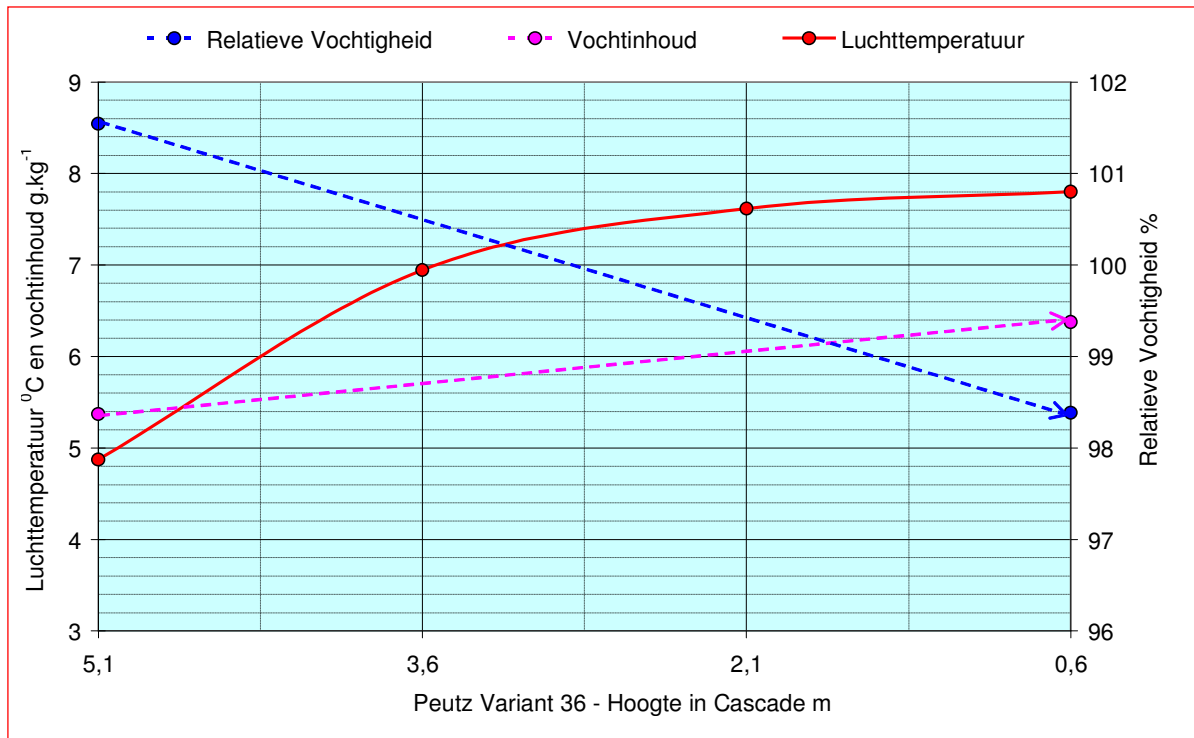
Figuur 17.14 – Variant A2 – Gemiddelde zomerconditie ALPHA

17.9.5 Variant A3 - Gemiddelde voorjaar/najaarscondities Gebouw / Klimaattype ALPHA



Figuur 17.15 – Variant A3 – Gemiddelde voorjaar/najaarconditie ALPHA

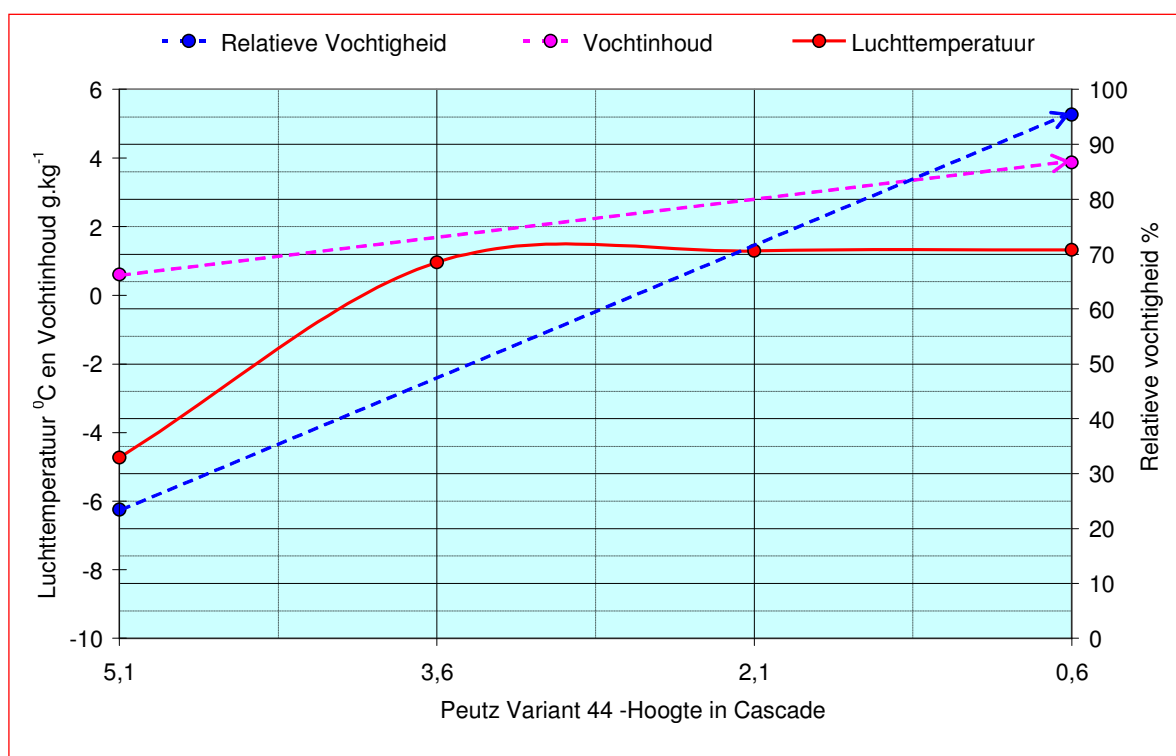
17.9.6 Variant A4 - Gemiddelde wintercondities Gebouw / Klimaattype ALPHA



Figuur 17.16 – Variant A4 – Gemiddelde winterconditie ALPHA

17.9.7 Variant A5 - Ontwerp wintercondities Gebouw / Klimaattype ALPHA

De ontwerp winterconditie van $\theta_e = -10^{\circ}\text{C}$ heeft zich in de meetperiode echter niet voorgedaan; de metingen zijn daarom uitgevoerd bij de laagst mogelijke intredetemperatuur $\theta_e = -4,7^{\circ}\text{C}$ – zie paragraaf 17.4.3.



Figuur 17.17 – Variant A5 – Ontwerp winterconditie ALPHA

17.10 Condensrisico in het gebouw

17.10.1 Gebouw / Klimaatmodel BETA

Voor de laagst gemeten buitentemperatuur van $-3,7^{\circ}\text{C}$ is voor temperatuurfactoren van 0,5 en 0,65 de maximum toegestane relatieve vochtigheid in de ruimte berekend. Hierbij is ervan uitgegaan dat de RV nabij een constructie niet langdurig hoger mag zijn dan 80% – zie paragraaf 12.12.

Tabel 17.4 laat de resultaten van deze berekening zien in vergelijking met de waarden die optreden als gevolg van het psychometrisch proces in de Klimaatcascade[®] volgens tabel 17.3. Slechts bij een ruimtetemperatuur van 20°C en een f-waarde van 0,5 wordt de maximum toegestane RV met 41% versus 37% licht overschreden. Bij een meer realistische ruimtetemperatuur van 22°C , een iets hogere f-waarde en/of een RV nabij een constructie iets hoger dan 80% ligt de relatieve vochtigheid in de ruimte op een veilig niveau.

Geconcludeerd kan worden dat condensrisico op uitwendige scheidingsconstructies als gevolg van gebruik van de Klimaatcascade[®] in de winterperiode niet aanwezig is. Thermische bruggen en meerdimensionale aansluitingen moeten uiteraard zorgvuldig worden gedetailleerd en berekend.

Buitentemperatuur $\theta_e = -3,7^{\circ}\text{C}$								
Ruimtetemperatuur	θ_i	$^{\circ}\text{C}$	20	22	24	20	22	24
Temperatuurfactor	f-waarde	-	0,50			0,65		
Minimum oppervlaktetemp.	$\theta_{i,opp,min}$	$^{\circ}\text{C}$	8,15	9,15	10,15	11,70	13,00	14,30
Maximum vochtinhoud - 80%RV	x_{max}	g.kg^{-1}	5,44	5,82	6,23	6,91	7,55	8,22
Maximum RV bij θ_i	RV_{max}	%	37%	35%	33%	47%	45%	44%
Werkelijke RV bij θ_i	RV	%	41%	36%	32%	41%	36%	32%

Tabel 17.4 – Maximum relatieve vochtigheid met betrekking tot condensrisico – BETA

17.10.2 Gebouw / Klimaatmodel ALPHA

Op identieke wijze als vermeld in paragraaf 17.9.1 is het condensrisico onderzocht, nu voor een buitentemperatuur van $-4,73^{\circ}\text{C}$, de laagst gemeten waarde in de test. De relatieve vochtigheid in de ruimte ligt nu in alle gevallen ruim beneden de maximum toegestane waarde – zie tabel 17.5.

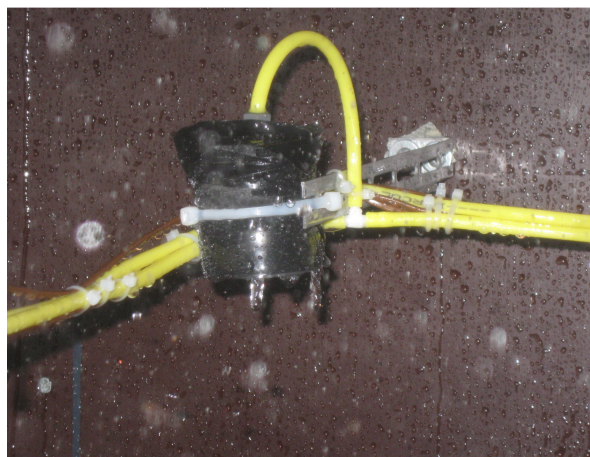
Buitentemperatuur $\theta_e = -4,73^{\circ}\text{C}$								
Ruimtetemperatuur	θ_i	$^{\circ}\text{C}$	20	22	24	20	22	24
Temperatuurfactor	f-waarde		0,50			0,65		
Minimum oppervlaktetemp.	$\theta_{i,opp,min}$	$^{\circ}\text{C}$	7,64	8,64	9,64	11,34	12,64	13,94
Maximum vochtinhoud - 80%RV	x_{max}	g.kg^{-1}	5,25	5,62	5,93	6,75	7,37	8,02
Maximum RV bij θ_i	RV_{max}	%	36%	34%	32%	46%	44%	43%
Werkelijke RV bij θ_i	RV	%	26%	23%	21%	26%	23%	21%

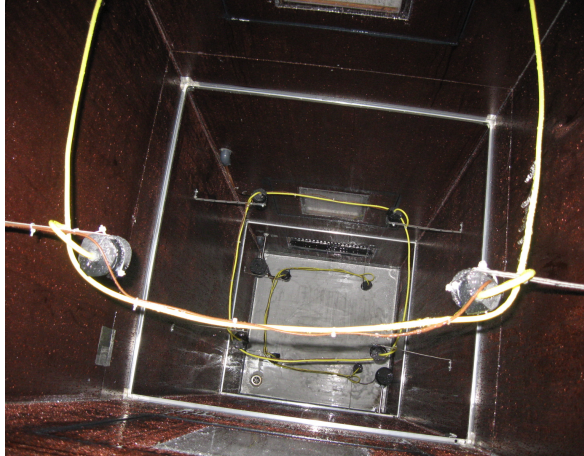
Tabel 17.5 – Maximum relatieve vochtigheid met betrekking tot condensrisico - ALPHA

17.11 De Klimaatcascade in een vorstperiode

Een interessante waarneming betreft de ontmoeting van kleine waterdruppels in de sproeistraal en de lucht bij temperaturen onder het vriespunt. Het risico op ijsvorming is het grootst bij de lage water/luchtverhouding $R_{w/L}$ van 0,44 voor Gebouw / Klimaatmodel ALPHA.

Figuur 17.18 van meetsessie 42a laat zien dat onder deze condities geen sprake is van ijsvorming. Als bij deze condities door het afsluiten van één van de twee sproeiers de water/luchtverhouding wordt gereduceerd naar 0,22 vindt enige ijsafzetting plaats – zie figuur 17.19. Dit is echter geen normale bedrijfsconditie.

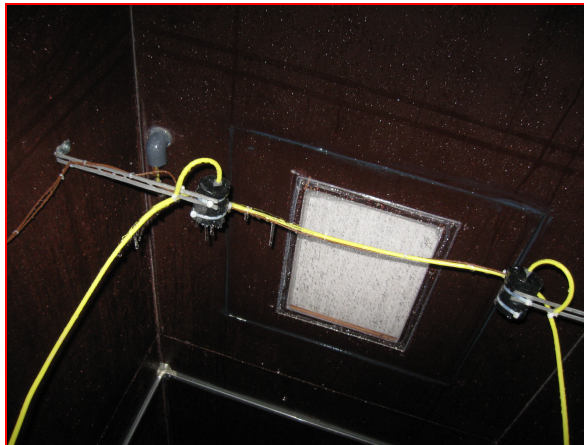




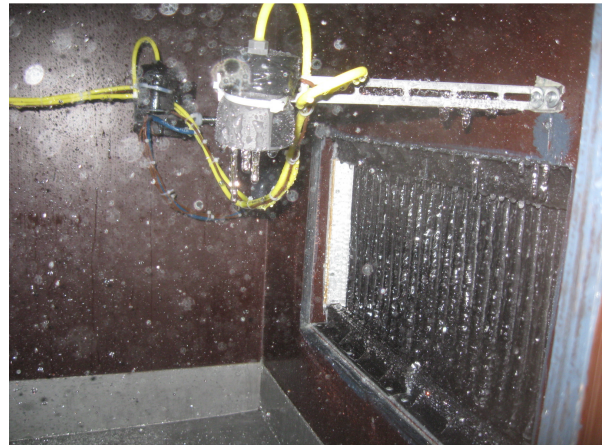
Figuur 17.18 – Meetsessie 42a
 $\theta_e = -4^{\circ}\text{C}$ – 2 sproeiers – $R_{WL} = 0,44$



Figuur 17.19 - Meetsessie 44b
 $\theta_e = -6^{\circ}\text{C}$ – 1 sproeier - $R_{WL} = 0,22$



Figuur 17.18a – Meetsessie 42a
 $\theta_e = -4^{\circ}\text{C}$ – 2 sproeiers – $R_{WL} = 0,44$



Figuur 17.19a - Meetsessie 44b
 $\theta_e = -6^{\circ}\text{C}$ – 1 sproeier - $R_{WL} = 0,22$

Earth, Wind & Fire – Airconditioning zonder Ventilatoren
(III) Onderzoek Geo-Klimaatconcept[®]

18. VALIDATIE VAN DE SIMULATIEMODELLEN

18.1 Inleiding en Samenvatting

De metingen in de fysieke testopstelling ad hoofdstuk 17 zijn gebruikt voor de validatie van het Excel rekenmodel ad hoofdstuk 10 en het CFD simulatiemodel ad hoofdstuk 16.

Voor het Excel rekenmodel zijn berekeningen uitgevoerd voor de varianten B1 t/m B5 en A1 t/m A5 met dezelfde invoercondities als in het meetprogramma volgens hoofdstuk 17. Om de gevoeligheid van het model voor de water/lucht factor te testen zijn tevens berekeningen gemaakt voor de varianten B1/1 t/m B1/4.

Conclusies varianten B1 t/m B5:

- Door beperkingen in het rekenmodel voor wat betreft de valsnelheid van de druppels zijn de berekende en de gemeten profielen van het psychometrisch proces in de Klimaatcascade[®] niet congruent. Dit heeft echter weinig invloed op het eindresultaat.
- Met het Excel rekenmodel kunnen de luchttemperaturen, en daarmee de voelbare prestaties van de Klimaatcascade[®], met een hoge tot zeer hoge graad van nauwkeurigheid worden berekend.
- De berekening van de vochtinhoud van de lucht, en daarmee van de latente prestaties is minder nauwkeurig. Zowel in de koelperiode als in de verwarmingsperiode is de gemeten latente capaciteit lager dan de berekende waarden. De verschillen liggen globaal tussen $\approx -0,5$ en $-1,0 \text{ g.kg}^{-1}$.

Conclusies varianten A1 t/m A5:

- Bij de ontwerp zomerconditie, variant A1, is de berekende luchttemperatuur substantieel hoger dan de gemeten waarde, waardoor de voelbare prestatie van de Klimaatcascade[®] aanzienlijk wordt ondergewaardeerd.
- Bij de gemiddelde zomercondities, variant A2, zijn de verschillen kleiner, maar wordt de voelbare prestatie van de Klimaatcascade[®] nog steeds ondergewaardeerd.
- De latente prestaties van de Klimaatcascade[®] worden bij de varianten A1 en A2 aanzienlijk overgewaardeerd. De gemeten vochtinhoud van de lucht ligt aanzienlijk boven de berekende waarden.
- Voor de voorjaar/najaar en wintercondities A3 t/m A5 komen de berekende waarden voor zowel de luchttemperatuur als de vochtinhoud goed tot zeer goed overeen met de gemeten waarden.

Conclusies varianten B1/1 t/m B1/4:

- Voor wat betreft de voelbare prestaties is het effect van een verhoogde water/luchtfactor bij de berekeningen sterker dan bij de metingen. Bij verhoging van de water/luchtfactor $R_{w/L}$ van $1,17 \rightarrow 1,37$ komen de berekende en gemeten luchttemperaturen zeer dicht bij elkaar te liggen om daarna bij $R_{w/L} = 1,37 \rightarrow 2,3$ weer te divergeren.
- Voor wat betreft de latente prestaties is het beeld minder duidelijk. Het verschil tussen de berekende en gemeten vochtinhoud neemt bij $R_{w/L}$ van $1,17 \rightarrow 1,37 \rightarrow 1,7$ toe om daarna weer af te nemen. De betrouwbaarheid van het rekenkundig model is voor alle lucht/waterfactoren onvoldoende.

Het Excel rekenmodel is dus gevoelig voor het temperatuurverschil water/lucht en voor de water/luchtfactor. Voor het meest voor de hand liggende Gebouw/Klimaatype BETA en een water/luchtfactor 1,2 tot 1,4 geeft het model goede resultaten.

De cases B1 t/m B3 van de numerieke CFD simulaties ad hoofdstuk 11 zijn eveneens gevalideerd op basis van de meetresultaten, waarbij alleen de luchttemperaturen zijn beoordeeld. Het beeld komt in grote trekken overeen met de resultaten van de overeenkomstige simulaties met het Excel rekenmodel.

Geconcludeerd wordt dat met zowel het Excel rekenmodel als het CFD simulatiemodel een betrouwbaar beeld kan worden verkregen van de voelbare prestaties van een Klimaatcascade[®]. Het Excel rekenmodel scoort iets beter dan het CFD simulatiemodel.

18.2 Uitgangspunten

De berekeningen zijn uitgevoerd met de bèta versie van het Excel rekenmodel –zie hoofdstuk 10. Eén van de uitvoerparameters van het model is de relatieve vochtigheid van de lucht, die echter door de temperatuurafhankelijkheid een lastig te interpreteren waarde is. Aan het model is daarom een berekening van de vochtinhoud van de lucht toegevoegd, die direct inzicht geeft in de latente capaciteit van de Klimaatcascade[©]. In de hierna volgende prestatievergelijkingen is daarom als parameter de absolute luchtvochtigheid in g.kg^{-1} gebruikt.

De vochtinhoud is berekend met de formule (ISSO 2002)

$$x = 0,622 \cdot \frac{p_d}{p_1 - p_d}$$

(18.1)

Waarin x = vochtinhoud [kg.kg⁻¹]
 p_d = partiële druk van de waterdamp [Pa]
 p_1 = totale druk (barometerstand) [Pa] (101.325 Pa)

In de overzichten met meetgegevens is de barometerstand tijdens de metingen niet vermeld. Uitgegaan is van een gemiddelde waarde van 101.325 Pa.

De berekeningen zijn uitgevoerd met een watertemperatuur van $\approx 13^\circ\text{C}$ en een volumedebiet van 2.400 $\text{dm}^3.\text{h}^{-1}$ voor Gebouw / Klimaatype BETA en 970 $\text{dm}^3.\text{h}^{-1}$ voor ALPHA. Voor de verschillende varianten zijn de exacte waarden aangehouden zoals vermeld in de tabellen van hoofdstuk 17.

Het in het model ingevoerde sproeispectrum is conform de voor de sproeiers in de fysieke testopstelling gemeten waarden, en ligt tussen de gedefinieerde spectra 8 en 9 in. Voor de berekeningen zijn waarden gehanteerd van D_{30} (VMD) = 1,048 mm en D_{32} (SMD) = 1,317 mm –zie paragraaf 16.9.

Bij een voordruk van 0,5 bar is de theoretische beginsnelheid van de druppels 10 m.s^{-1} . De eindsnelheid van $\approx 3 \text{ m.s}^{-1}$ wordt voor deze kleine druppels al na $\approx 0,4$ sec bereikt - zie figuur 9.6 in hoofdstuk 9. Voor de validatie is daarom gerekend is met een constante gemiddelde druppelsnelheid van 3 m.s^{-1} .

Deze simplificatie geeft overigens een verkeerd beeld van de beginfase van het psychometrisch proces, waarin de druppelsnelheid hoger is dan de gemiddelde snelheid. De snelheidsafhankelijke warmte- en stofoverdachtscoëfficiënten zijn in de beginfase hoger dan gemiddeld waardoor de berekende waarden afwijken van de gemeten waarden. Gedurende de eerste 0,4 sec van het psychometrisch proces is de gemiddelde druppelsnelheid ongeveer $(10+3)/2 \approx 6,5 \text{ m.s}^{-1}$ waarin de druppels $(0,4*6,5) \approx 2,6$ m in de Klimaatcascade[©] afleggen. Het is in deze fase dat de grootste afwijkingen tussen berekeningen en metingen optreden. In geval van koeling zijn de berekende waarden te hoog en bij verwarming te laag. De incongruentie van de profielen van berekening en meting tijdens het psychometrisch proces in de Klimaatcascade[©] is afhankelijk van de water/luchtfactor en het temperatuurverschil tussen water en lucht. In de hierna volgende grafische weergave van de verschillende cases is dit duidelijk te zien..

Er is van afgezien in het Excel rekenmodel het werkelijke snelheidsverloop van de druppels in te voeren. Het hiervoor nodige rekenalgoritme is gecompliceerd en uit de resultaten van de validaties blijkt dat het gebruik van een gemiddelde druppelsnelheid voor het betreffende fijne sproeispectrum goede resultaten oplevert. Voor een grover spectrum, waarin het langer duurt voordat de eindsnelheid van de druppels is bereikt, kan het wenselijk zijn het werkelijke snelheidsverloop van de druppels in het rekenmodel te integreren. Dit is mede afhankelijk van de totale valtijd van de druppels, die weer afhangt van de hoogte van de Klimaatcascade[©] - zie figuur 9.7 in hoofdstuk 9.

Het is een interessante vraag of verschillen tussen berekeningen en metingen te wijten zijn aan onnauwkeurigheid van het rekenmodel of van de metingen. Temperatuurmetingen zijn in het algemeen nauwkeuriger dan vochtmetingen. Vooral een nauwkeurige meting van de relatieve vochtigheid rond de verzadigingsgrens is niet eenvoudig. In verschillende metingen werd een $\text{RV} > 100\%$ gerapporteerd, hetgeen fysisch niet mogelijk is.

Bij de hierna volgende beoordeling van de kwaliteit van het rekenmodel is ervan uitgegaan dat de meetgegevens juist zijn en dat eventuele verschillen tussen berekening en metingen aan het rekenmodel worden geweten. De waardering voor de kwaliteit is als volgt uitgedrukt:

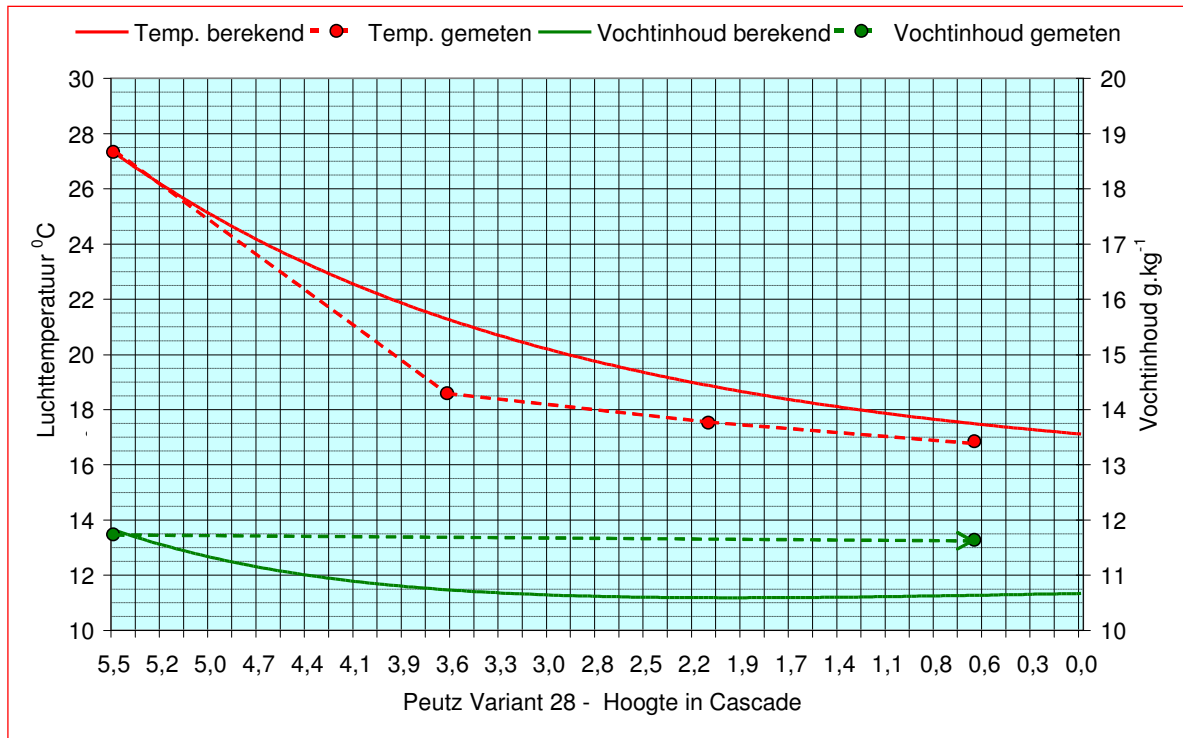
- Zeer goed → Temperatuur $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ – Vochtinhoud $\pm 0,5 \text{ g.kg}^{-1}$
- Goed → Temperatuur $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ – Vochtinhoud $\pm 1,0 \text{ g.kg}^{-1}$
- Matig → Temperatuur $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ – Vochtinhoud $\pm 1,5 \text{ g.kg}^{-1}$
- Slecht → Temperatuur $\pm 2,0^{\circ}\text{C}$ – Vochtinhoud $\pm 2,0 \text{ g.kg}^{-1}$

18.3 Excel Rekenmodel Varianten B1 t/m B5

18.3.1 Variant B1/1 – Ontwerpcndities zomer

Zie figuur 18.1:

- Luchttemperatuur volgens berekening $27,3^{\circ}\text{C} \rightarrow 17,5^{\circ}\text{C}$
- Luchttemperatuur volgens meting $27,3^{\circ}\text{C} \rightarrow 16,9^{\circ}\text{C}$
- Beoordeling rekenmodel temperatuur goed
- Vochtinhoud volgens berekening $11,7 \text{ g.kg}^{-1} \rightarrow 10,6 \text{ g.kg}^{-1}$
- Vochtinhoud volgens meting $11,7 \text{ g.kg}^{-1} \rightarrow 11,6 \text{ g.kg}^{-1}$
- Beoordeling rekenmodel vocht matig



Figuur 18.1 – Variant B1/1 – Ontwerpcndities zomer

18.3.2 Variant B2 – Gemiddelde zomercondities

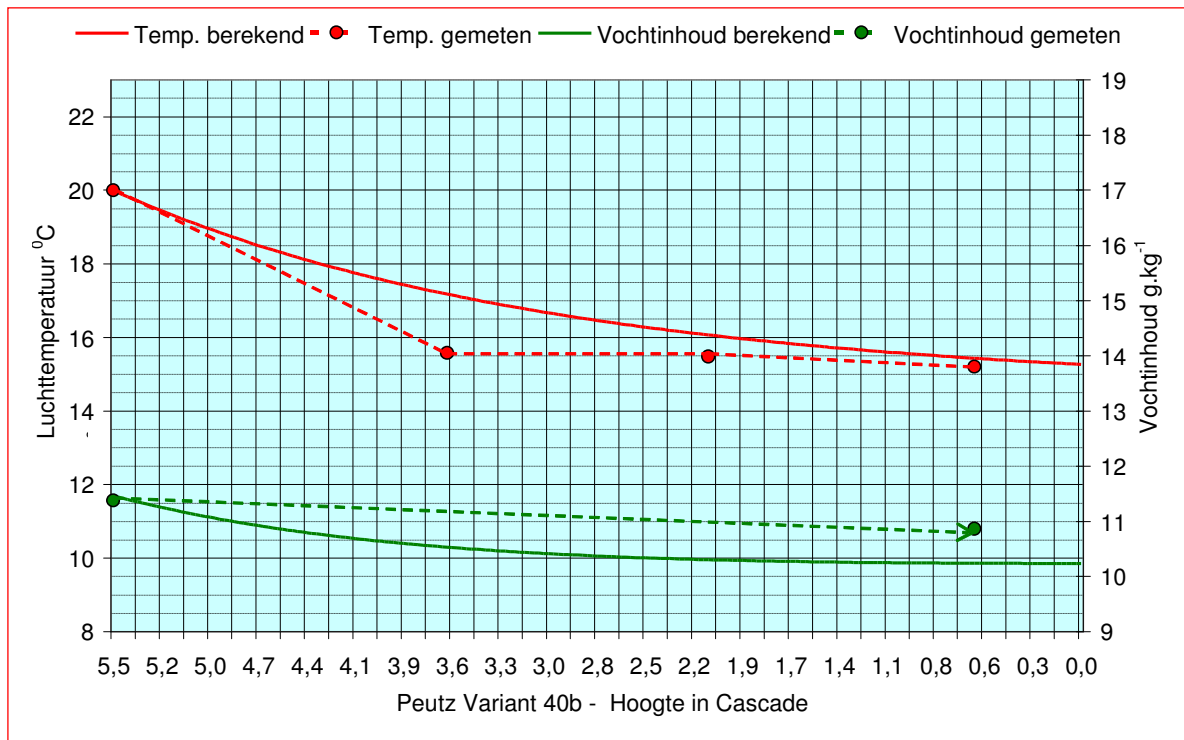
Zie figuur 18.2:

- Luchttemperatuur volgens berekening $20,0^{\circ}\text{C} \rightarrow 15,4^{\circ}\text{C}$
- Luchttemperatuur volgens meting $20,0^{\circ}\text{C} \rightarrow 15,2^{\circ}\text{C}$
- Beoordeling rekenmodel temperatuur zeer goed
- Vochtinhoud volgens berekening $13,6 \text{ g.kg}^{-1} \rightarrow 12,4 \text{ g.kg}^{-1}$
- Vochtinhoud volgens meting $13,6 \text{ g.kg}^{-1} \rightarrow 14,0 \text{ g.kg}^{-1}$
- Beoordeling rekenmodel vocht slecht

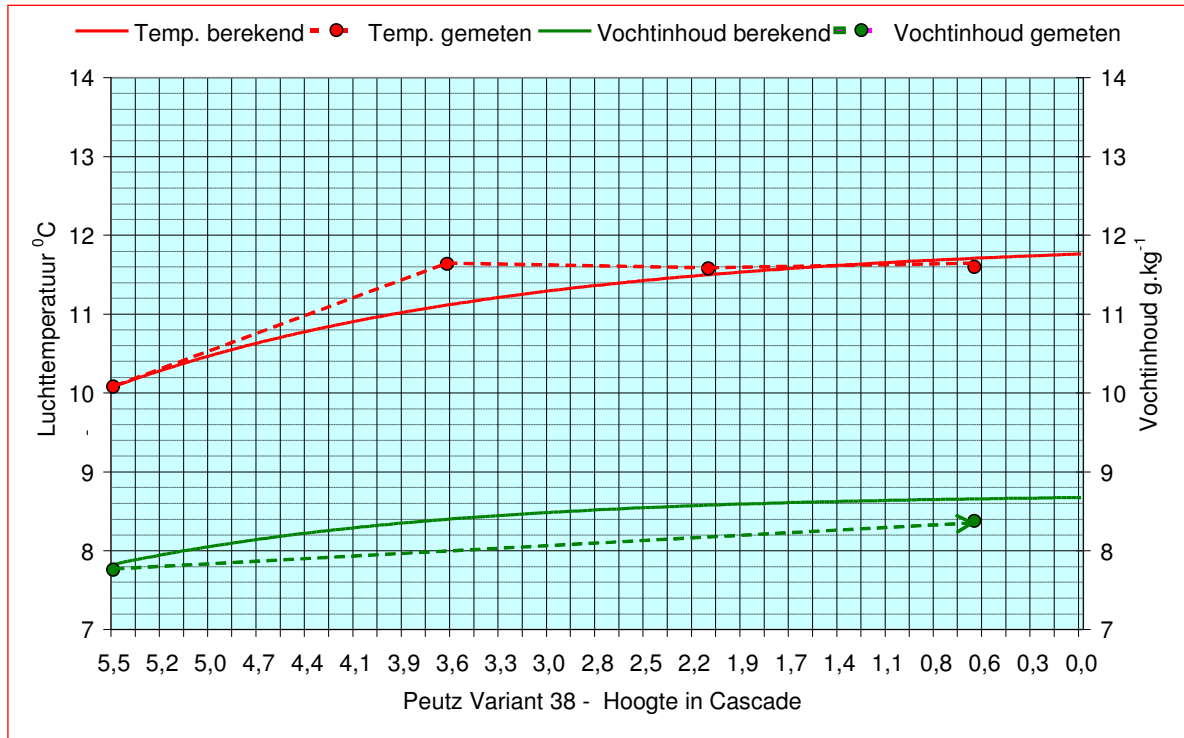
18.3.3 Variant B4 – Voorjaar / Najaarscondities

Zie figuur 18.3: In deze variant vindt enige verwarming en bevochtiging van de lucht plaats.

- Luchttemperatuur volgens berekening $10,1^{\circ}\text{C} \rightarrow 11,7^{\circ}\text{C}$
- Luchttemperatuur volgens meting $10,1^{\circ}\text{C} \rightarrow 11,6^{\circ}\text{C}$
- Beoordeling rekenmodel temperatuur zeer goed
- Vochtinhoud volgens berekening $7,8 \text{ g.kg}^{-1} \rightarrow 8,7 \text{ g.kg}^{-1}$
- Vochtinhoud volgens meting $7,8 \text{ g.kg}^{-1} \rightarrow 8,4 \text{ g.kg}^{-1}$
- Beoordeling rekenmodel vocht zeer goed



Figuur 18.2 – Variant B2 – Gemiddelde zomercondities zomer

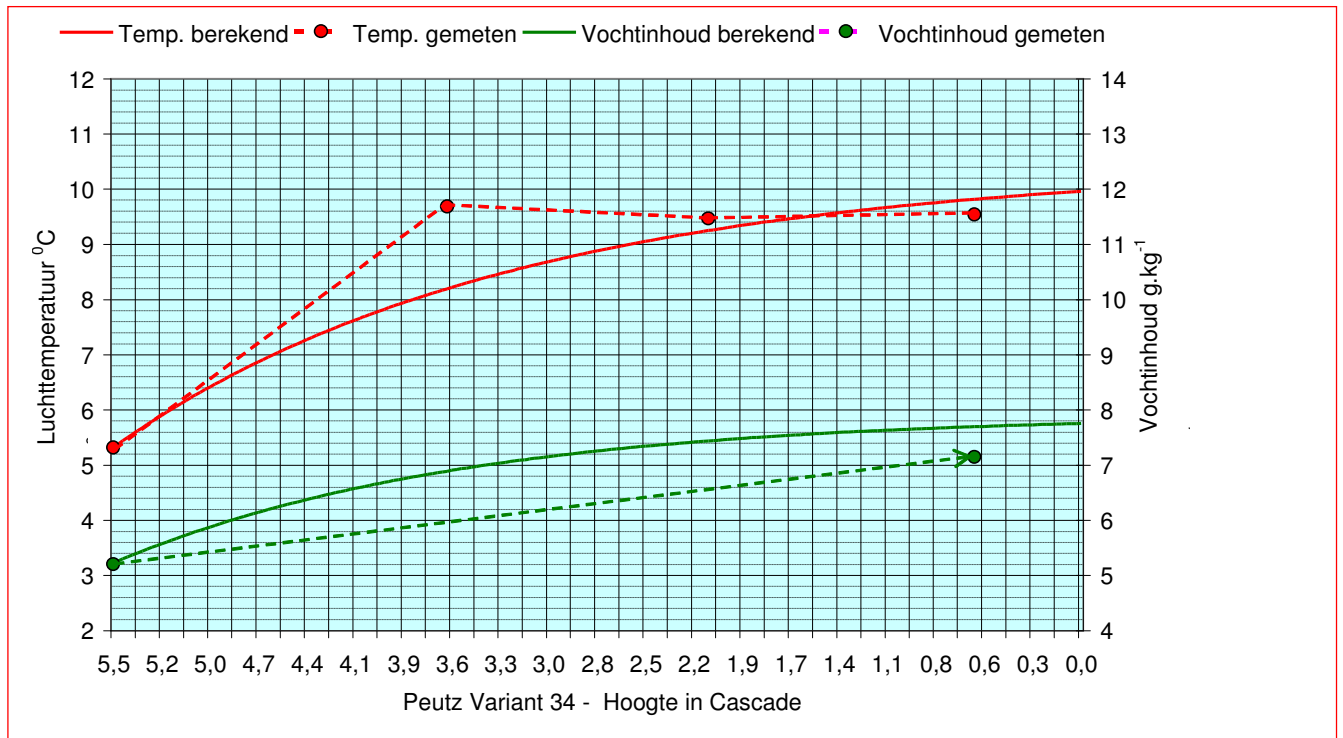


Figuur 18.3 – Variant B4 – Voorjaar / Najaarscondities

18.3.4 Variant B3 – Gemiddelde Wintercondities

Zie figuur 18.4:

- Luchttemperatuur volgens berekening 5,3⁰C → 9,8⁰C
- Luchttemperatuur volgens meting 5,3⁰C → 9,5⁰C
- Beoordeling rekenmodel temperatuur zeer goed
- Vochtinhoud volgens berekening 5,2 g.kg⁻¹ → 7,7 g.kg⁻¹
- Vochtinhoud volgens meting 5,2 g.kg⁻¹ → 7,2 g.kg⁻¹
- Beoordeling rekenmodel vocht goed



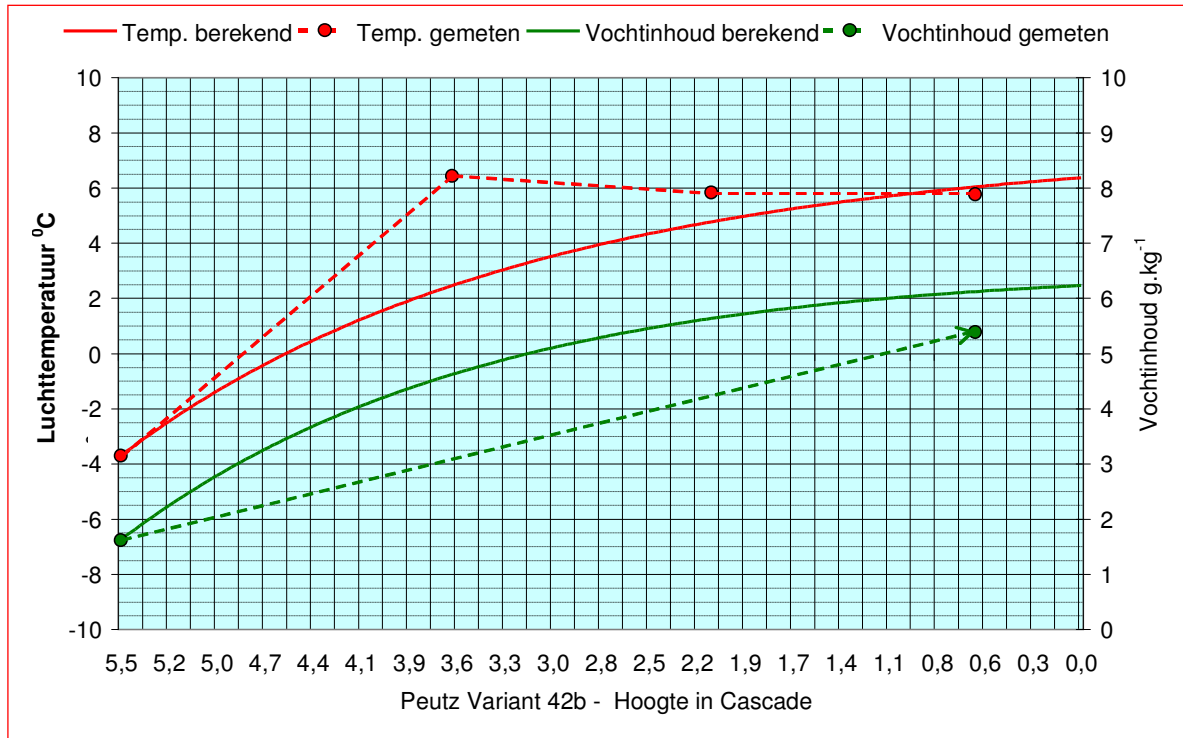
Figuur 18.4 – Variant B3 – Gemiddelde winterconditie

18.3.5 Variant B5 – Ontwerp Wintercondities

De ontwerp winterconditie van $\theta_e = -10^0\text{C}$ heeft zich in de meetperiode niet voorgedaan; de metingen zijn daarom uitgevoerd bij de laagst mogelijke intredetemperatuur van $\theta_e = -3,7^0\text{C}$ –zie paragraaf 17.4.3 en 17.8.6

Zie figuur 18.5:

- Luchttemperatuur volgens berekening -3,7⁰C → 6,0⁰C
- Luchttemperatuur volgens meting -3,7⁰C → 5,8⁰C
- Beoordeling rekenmodel temperatuur zeer goed
- Vochtinhoud volgens berekening 1,6 g.kg⁻¹ → 6,1 g.kg⁻¹
- Vochtinhoud volgens meting 1,6 g.kg⁻¹ → 5,4 g.kg⁻¹
- Beoordeling rekenmodel vocht goed



Figuur 18.5 – Variant B5 – Ontwerp winterconditie

18.3.6 Conclusies Varianten B1 t/m B5

- Door beperkingen in het Excel rekenmodel voor wat betreft de valsnelheid van de druppels zijn de berekende en de gemeten profielen van het psychometrisch proces in de Klimaatcascade[®] niet congruent. Dit heeft echter weinig invloed op het eindresultaat.
- Met het Excel rekenmodel kunnen de luchttemperaturen en daarmee de voelbare prestaties van de Klimaatcascade[®] met een hoge tot zeer hoge graad van nauwkeurigheid worden berekend.
- De berekening van de vochtinhoud van de lucht, en daarmee van de latente prestaties is minder zeker. Zowel in de koelperiode als in de verwarmingsperiode is de gemeten latente capaciteit lager dan de berekende waarden. De verschillen liggen globaal tussen $\approx 0,5$ en $1,0 \text{ g.kg}^{-1}$.

18.4 Excel Rekenmodel Varianten A1 t/m A5

18.4.1 Variant A1 – Ontwerpcondities zomer

Zie figuur 18.6:

- Luchttemperatuur volgens berekening $28,1^{\circ}\text{C} \rightarrow 22,3^{\circ}\text{C}$
- Luchttemperatuur volgens meting $28,1^{\circ}\text{C} \rightarrow 20,1^{\circ}\text{C}$
- Beoordeling rekenmodel temperatuur slecht
- Vochtinhoud volgens berekening $13,6 \text{ g.kg}^{-1} \rightarrow 12,4 \text{ g.kg}^{-1}$
- Vochtinhoud volgens meting $13,6 \text{ g.kg}^{-1} \rightarrow 14,0 \text{ g.kg}^{-1}$
- Beoordeling rekenmodel vocht slecht

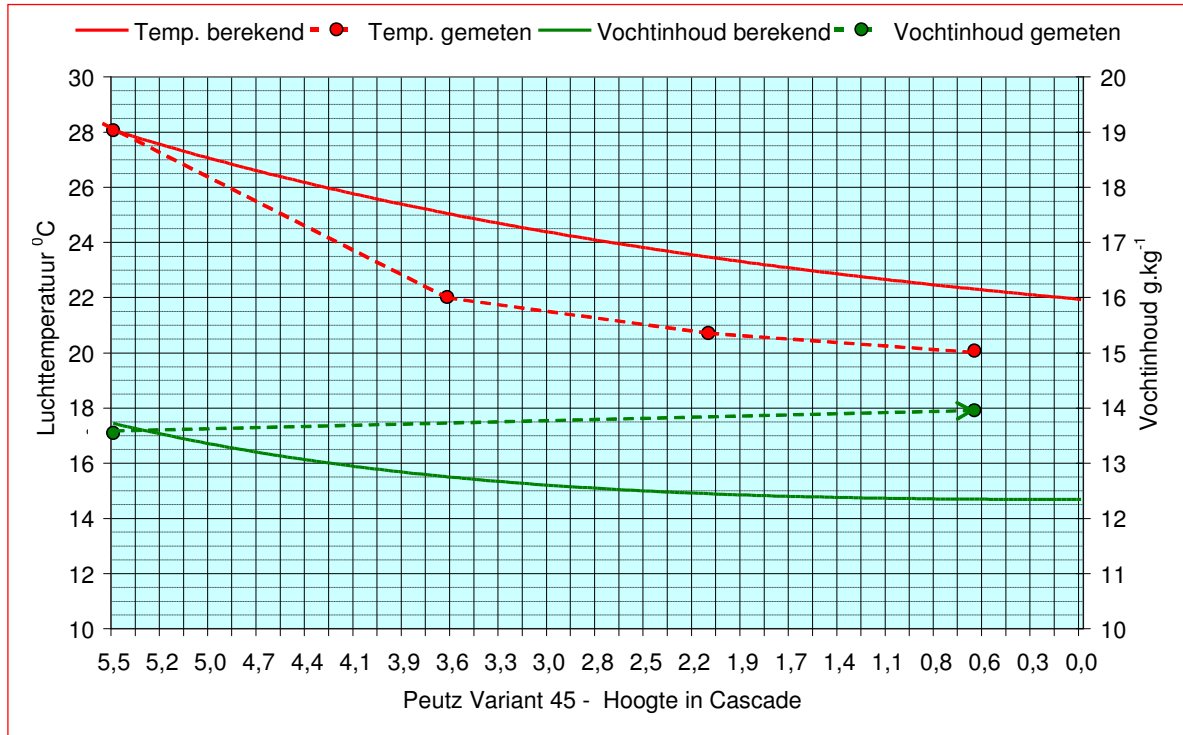
Opmerking: Bij de meting is een luchtbevochtiging van $\approx 0,4 \text{ g.kg}^{-1}$ vastgesteld. Er treedt hierbij dus een geringe adiabatische koeling op.

18.4.2 Variant A2 - Gemiddelde zomercondities

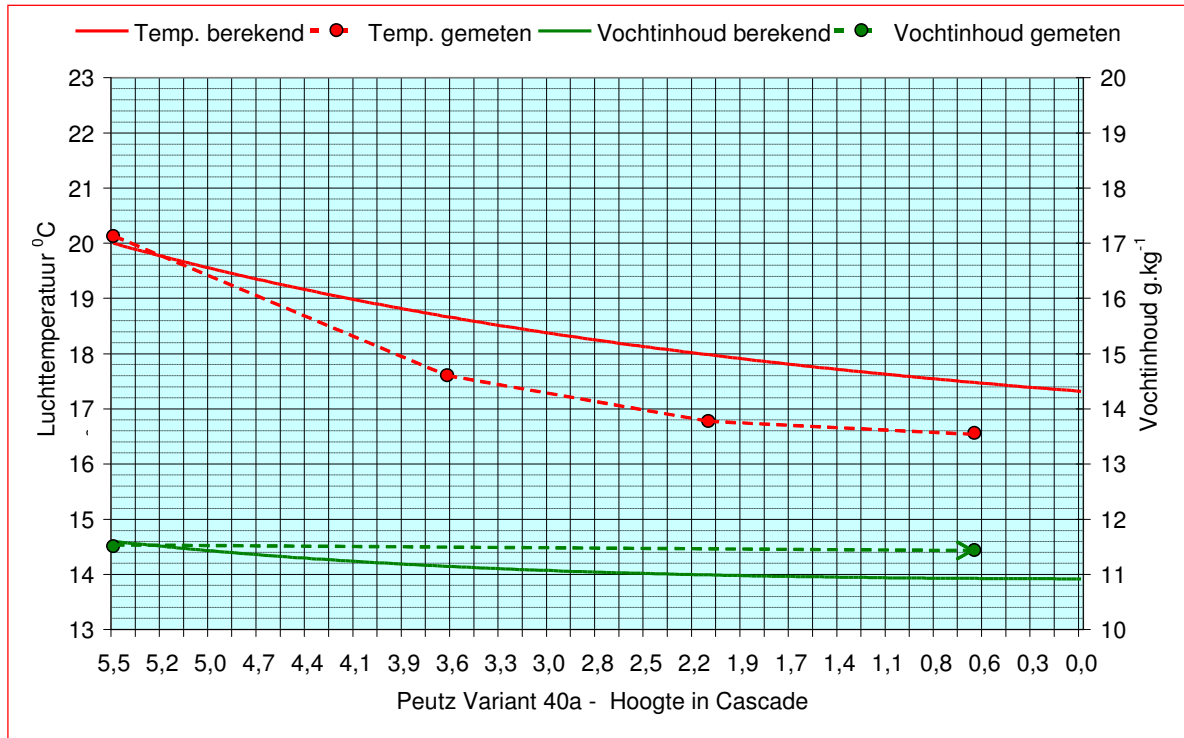
Zie figuur 18.7:

- Luchttemperatuur volgens berekening $20,1^{\circ}\text{C} \rightarrow 17,5^{\circ}\text{C}$
- Luchttemperatuur volgens meting $20,1^{\circ}\text{C} \rightarrow 16,6^{\circ}\text{C}$

- Beoordeling rekenmodel temperatuur goed
- Vochtinhoud volgens berekening $11,5 \text{ g.kg}^{-1} \rightarrow 10,9 \text{ g.kg}^{-1}$
- Vochtinhoud volgens meting $11,5 \text{ g.kg}^{-1} \rightarrow 11,4 \text{ g.kg}^{-1}$
- Beoordeling rekenmodel vocht goed



Figuur 18.6 – Variant A1 – Ontwerp zomercondities

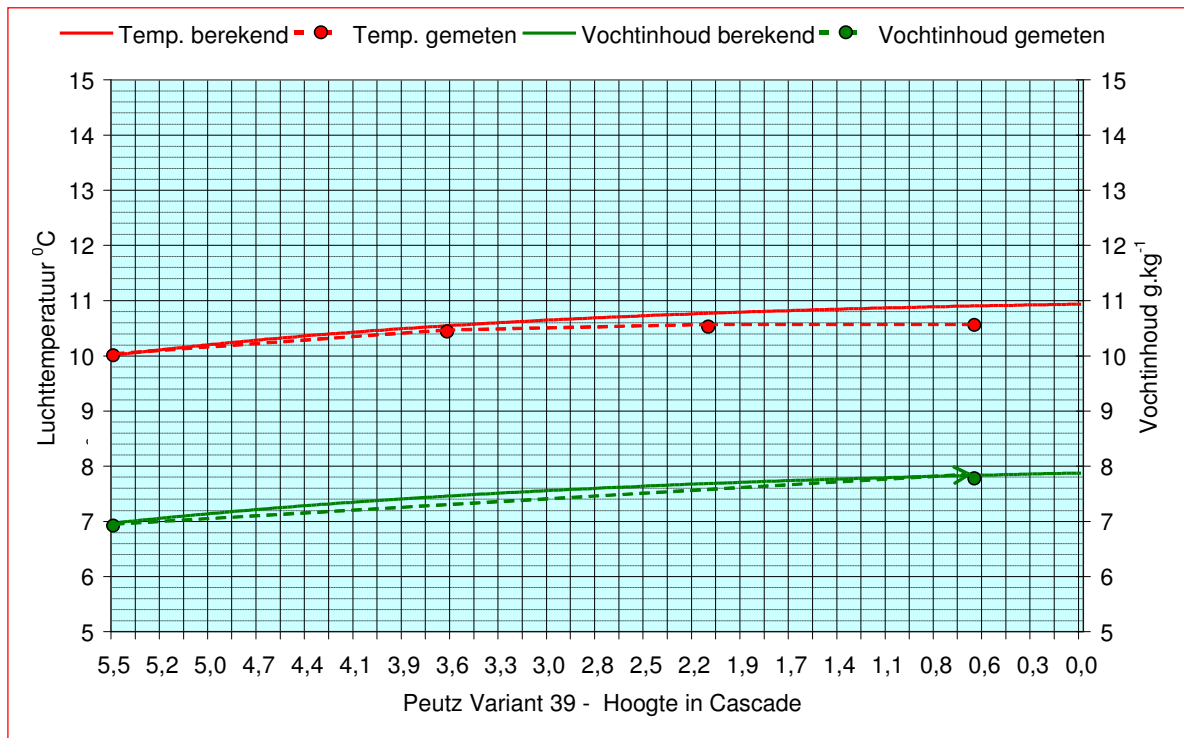


Figuur 18.7 – Variant A2 – Gemiddelde zomercondities

18.4.3 Variant A3 – Gemiddelde voorjaar / najaarscondities

Zie figuur 18.8:

- Luchttemperatuur volgens berekening 10,0^oC → 10,9^oC
- Luchttemperatuur volgens meting 10,0^oC → 10,6^oC
- Beoordeling rekenmodel temperatuur zeer goed
- Vochtinhoud volgens berekening 6,9 g.kg⁻¹ → 7,8 g.kg⁻¹
- Vochtinhoud volgens meting 6,9 g.kg⁻¹ → 7,8 g.kg⁻¹
- Beoordeling rekenmodel vocht zeer goed

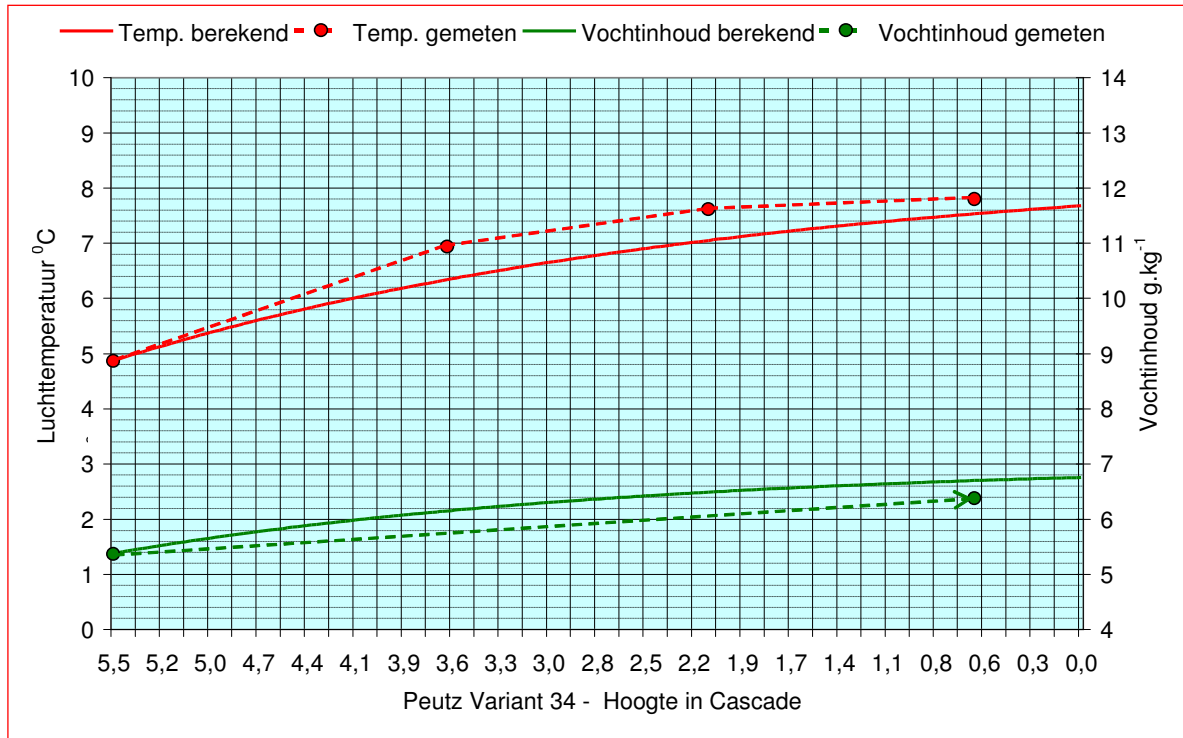


Figuur 18.8 – Variant A3 – Gemiddelde voorjaar / najaarscondities

18.4.4 Variant A4 – Gemiddelde wintercondities

Zie figuur 18.9:

- Luchttemperatuur volgens berekening 4,9^oC → 7,5^oC
- Luchttemperatuur volgens meting 4,9^oC → 7,8^oC
- Beoordeling rekenmodel temperatuur zeer goed
- Vochtinhoud volgens berekening 5,4 g.kg⁻¹ → 6,7 g.kg⁻¹
- Vochtinhoud volgens meting 5,4 g.kg⁻¹ → 6,4 g.kg⁻¹
- Beoordeling rekenmodel vocht zeer goed



Figuur 18.9 – Variant A4 – Gemiddelde wintercondities

18.4.5 Variant A5 – Ontwerp wintercondities

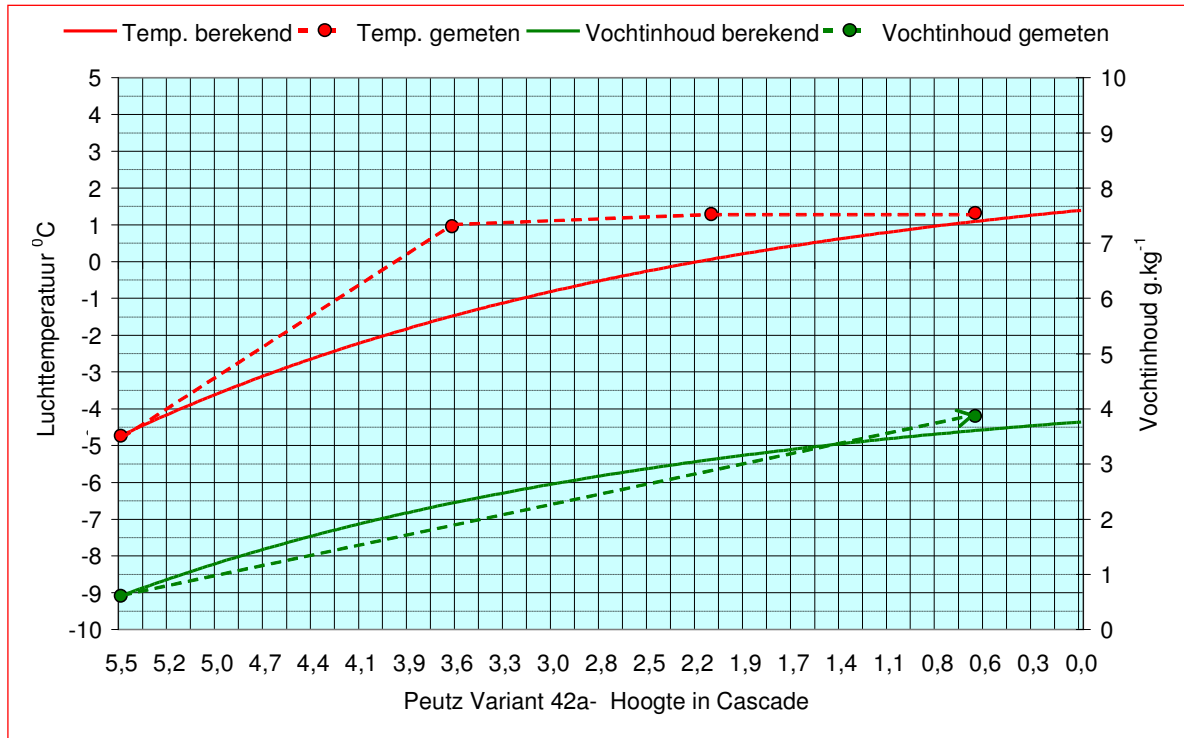
De ontwerp winterconditie van $\theta_e = -10^{\circ}\text{C}$ heeft zich in de meetperiode niet voorgedaan; de metingen zijn daarom uitgevoerd bij de laagst mogelijke intredetemperatuur van $\theta_e = -4,7^{\circ}\text{C}$ –zie paragraaf 17.4.3 en 17.8.6

Zie figuur 18.10:

- Luchttemperatuur volgens berekening $-4,7^{\circ}\text{C} \rightarrow 1,1^{\circ}\text{C}$
- Luchttemperatuur volgens meting $-4,7^{\circ}\text{C} \rightarrow 1,3^{\circ}\text{C}$
- Beoordeling rekenmodel temperatuur zeer goed
- Vochtinhoud volgens berekening $0,61 \text{ g.kg}^{-1} \rightarrow 3,61 \text{ g.kg}^{-1}$
- Vochtinhoud volgens meting $0,61 \text{ g.kg}^{-1} \rightarrow 3,87 \text{ g.kg}^{-1}$
- Beoordeling rekenmodel vocht zeer goed

18.4.6 Conclusies Varianten A1 t/m A5

- Bij de ontwerp zomerconditie, variant A1, is de berekende luchttemperatuur substantieel hoger dan de gemeten waarde, waardoor de voelbare prestatie van de Klimaatcascade[®] aanzienlijk wordt ondergewaardeerd.
- Bij de gemiddelde zomercondities, variant A2, zijn de verschillen kleiner, maar wordt de voelbare prestatie van de Klimaatcascade[®] nog steeds ondergewaardeerd.
- De latente prestaties van de Klimaatcascade[®] worden bij de varianten A1 en A2 aanzienlijk overgewaardeerd. De gemeten vochtinhoud van de lucht ligt aanzienlijk boven de berekende waarden.
- Voor de voorjaar/najaar en wintercondities A3 t/m A5 komen de berekende waarden voor zowel de luchttemperatuur als de vochtinhoud goed tot zeer goed overeen met de gemeten waarden.



Figuur 18.10 – Variant A5 – Ontwerp wintercondities

18.5 Excel Rekenmodel Varianten B1/1 t/m B1/4 – Verhoogde Water/Luchtfactor

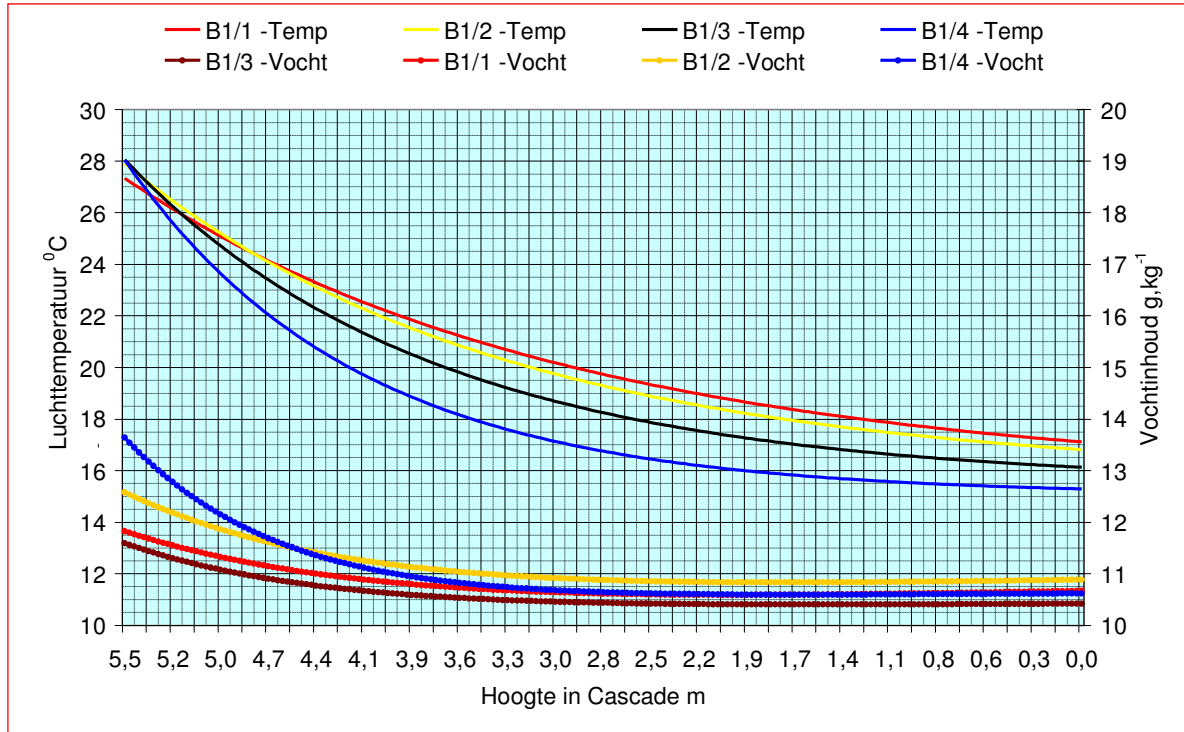
Voor de varianten B1/1 t/m B1/4 zijn berekeningen uitgevoerd met invoercondities die overeenkomen met die van de metingen –zie figuur 18.12. De voor deze condities berekende prestaties van de Klimaatcascade[®] zijn vergeleken met de voor deze varianten gemeten waarden –zie paragraaf 17.7, tabel 17.2 en tabel 18.1.

Voor wat betreft de voelbare prestaties is het effect van een verhoogde water/luchtfactor bij de berekeningen sterker dan bij de metingen. Bij verhoging van de water/luchtfactor $R_{w/L}$ van 1,17→1,37 komen de berekende en gemeten luchttemperaturen zeer dicht bij elkaar te liggen om daarna bij $R_{w/L} = 1,37 \rightarrow 2,3$ weer te divergeren.

Voor wat betreft de latente prestaties is het beeld minder duidelijk. Het verschil tussen de berekende en gemeten vochtinhoud neemt bij $R_{w/L}$ van 1,17→1,37→1,7 toe om daarna weer af te nemen. De betrouwbaarheid van het Excel rekenmodel is voor alle lucht/waterfactoren onvoldoende -zie ook paragraaf 18.3.1.

Variant		$R_{w/L}$	Temperatuur °C				Vochtinhoud g.kg ⁻¹			
Case	Peutz		berekend		gemeten		berekend		gemeten	
			traject	$\Delta\theta$	traject	$\Delta\theta$	traject	$\Delta\theta$	traject	$\Delta\theta$
B1/1	28	1,17	27,34 ↓ 17,49	9,85	27,34 ↓ 16,85	10,49	11,74 ↓ 10,64	1,1	11,74 ↓ 11,64	0,1
B1/2	30	1,37	27,9 ↓ 17,14	10,76	27,9 ↓ 16,99	10,91	12,45 ↓ 10,68	1,77	12,45 ↓ 11,96	0,49
B1/3	31	1,7	28,6 ↓ 16,37	12,23	28,6 ↓ 16,64	11,96	13,03 ↓ 10,83	2,2	13,03 ↓ 12,02	1,01
B1/4	32	2,3	28,04 ↓ 15,42	12,62	28,04 ↓ 16,29	11,75	13,47 ↓ 10,61	2,86	13,47 ↓ 11,8	1,67

Tabel 18.2 - Varianten B1/1 t/m B1/4 met verhoogde Water/Luchtfactor



Figuur 18.12 – Varianten B1/1 t/m B1/4 met verhoogde Water/Luchtfactor

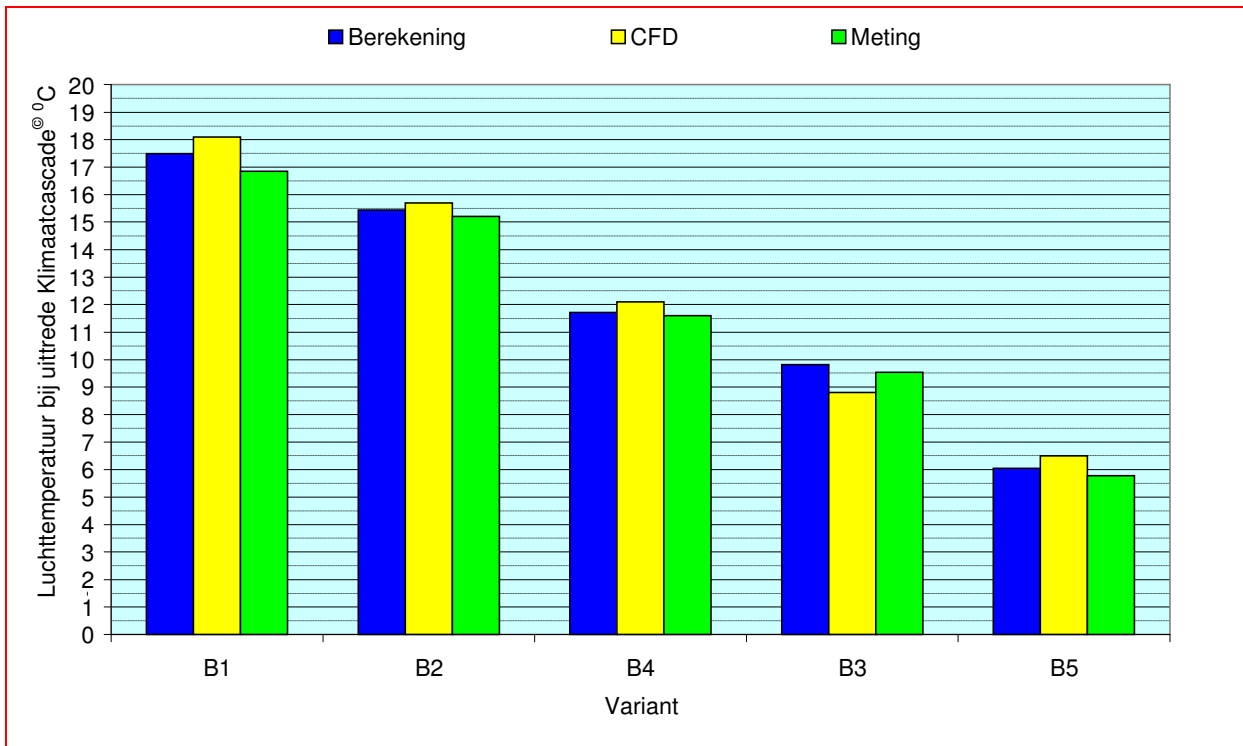
18.6 Vergelijking reken- en simulatieresultaten met de metingen

Figuur 18.13 laat de uitgaande luchttemperaturen zien voor de varianten B1 t/m B5 zoals gemeten in de fysieke testopstelling en volgens de berekeningen met het Excel rekenmodel en het CFD simulatiemodel. Het Excel rekenmodel scoort in de meeste gevallen iets beter dan het CFD simulatiemodel. De berekende temperaturen liggen iets boven de gemeten waarden, waardoor de voelbare prestaties van de Klimaatcascade[®] iets worden ondergewaardeerd.

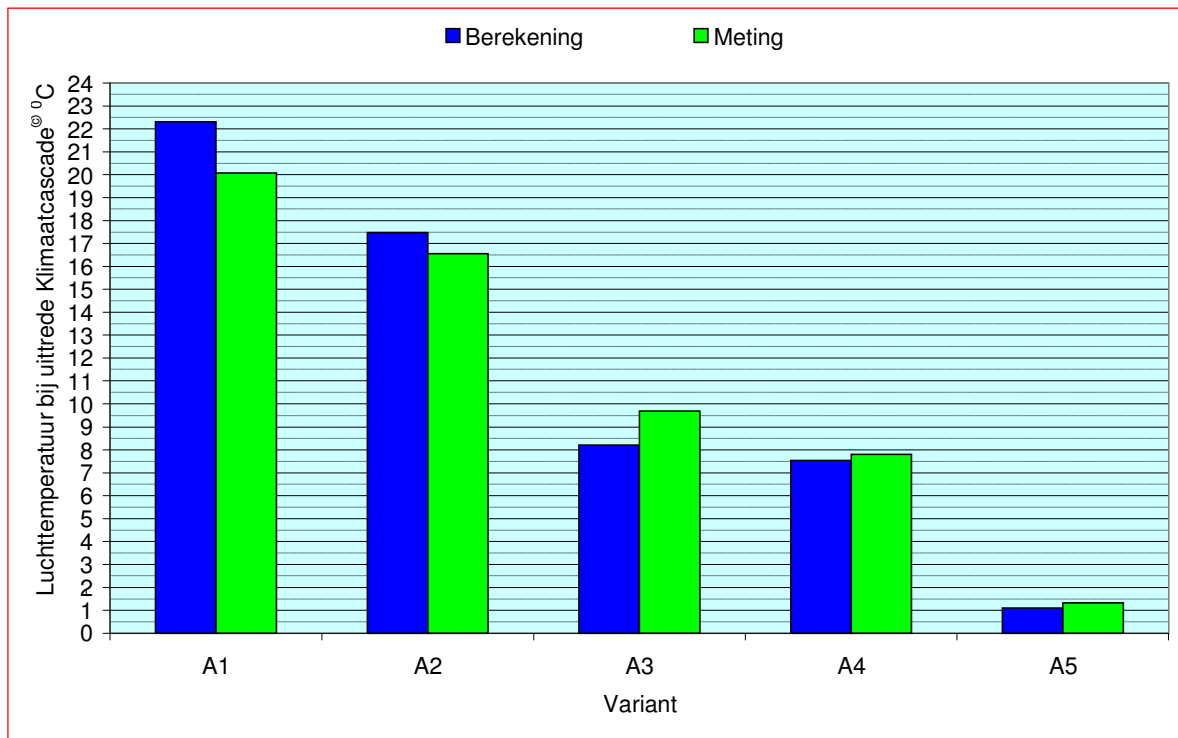
Figuur 18.14 geeft het overeenkomstig beeld voor de varianten A1 t/m A5. CFD simulaties zijn voor deze varianten niet gemaakt.

Bij zomercondities liggen de berekende temperaturen 1^o tot 2^oC boven de gemeten waarden, waardoor de voelbare prestaties van de Klimaatcascade[®] worden ondergewaardeerd. Tijdens wintercondities scoort het rekenmodel goed.

De algemene conclusie is dat het Excel rekenmodel betrouwbare resultaten oplevert voor de prestatieberekeningen van een Klimaatcascade[®] en de voorselectie van het benodigde sproeispectrum.



Figuur 18.13 – Vergelijking Excel rekenmodel en CFD model met de metingen - Varianten B1 t/m B5

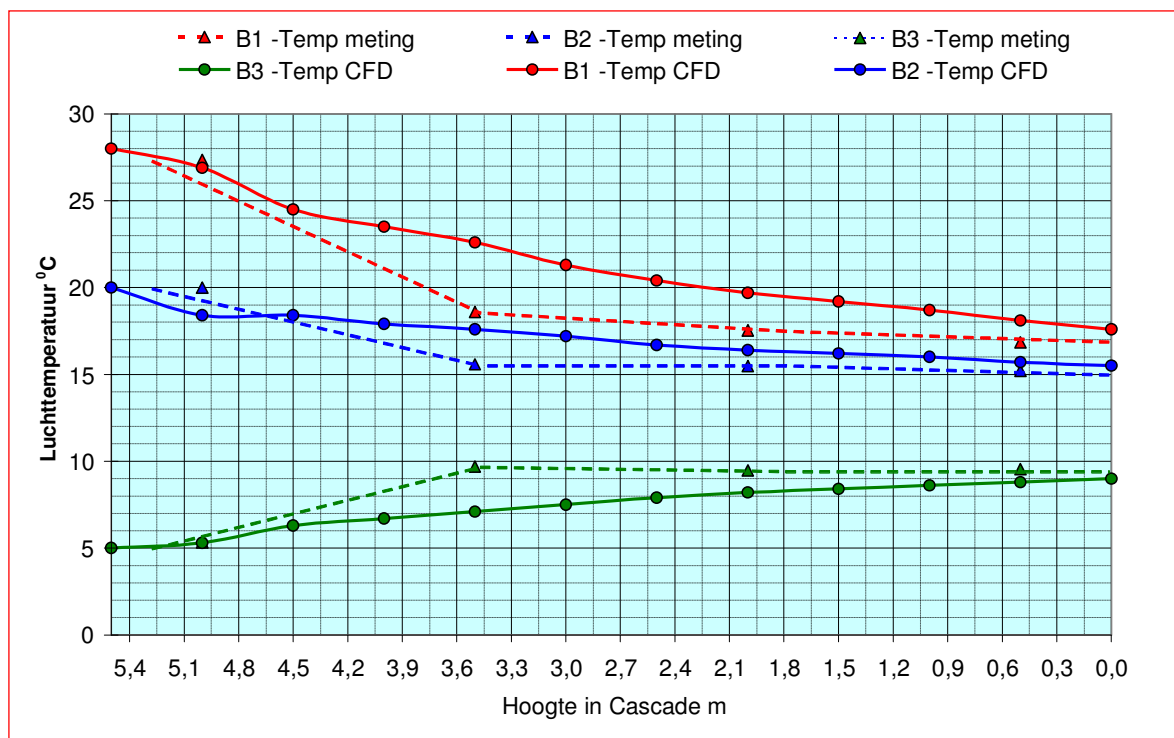


Figuur 18.14 – Vergelijking Excel rekenmodel met de metingen - Varianten A1 t/m A5

18.7 Numeriek Simulatiemodel CFD

Volledigheidshalve is ook voor de cases B1 t/m B3 van de CFD simulaties ad paragraaf 16.11 het temperatuurprofiel bepaald van het koelproces als functie van de hoogte, gevalideerd op basis van de meetresultaten– zie figuur 18.15; hierbij zijn alleen de luchttemperaturen opgenomen. Het beeld komt in grote trekken overeen met de resultaten van de overeenkomstige simulaties met het Excel rekenmodel.

Geconcludeerd kan worden dat de CFD simulaties een betrouwbaar beeld geven van de voelbare prestaties van een Klimaatcascade[©].



Figuur 18.15 – Temperaturen volgens CFD en metingen als functie van de hoogte in de Klimaatcascade[©]

18.8 Vervolgonderzoek

Het Excel rekenmodel is gevoelig voor het temperatuurverschil water/lucht en de water/luchtfactor. Een modelverbetering is gewenst waarbij tevens het werkelijke snelheidsverloop van de druppels zou moeten worden ingevoerd in plaats van de eindsnelheid of de gemiddelde druppelsnelheid.

De latente prestaties van de Klimaatcascade[©] worden met het Excel rekenmodel in de meeste varianten overgewaardeerd, een lagere vochtinhoud in de zomerperiode en een hogere vochtinhoud in de winterperiode.

Een mogelijke verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat de invloed van kleine ten opzichte van grotere druppels onvoldoende in het rekenmodel wordt gewaardeerd. Kleine druppels hebben door hun lagere eindsnelheid een langere verblijfstijd in de cascade dan grotere druppels, waardoor onderin de cascade per m³ ruimte verhoudingsgewijs meer kleinere druppels voorkomen dan bovenin. De temperatuur van deze kleine druppels ligt ook dicht bij de luchttemperatuur dan van grotere druppels, 's zomers hoger en 's winters lager. Dit heeft naar verwachting een grotere invloed op de vochtinhoud dan op de temperatuur van de lucht.

Het rekenmodel zou moeten worden uitgebreid door de berekeningen uit te voeren per druppelgrootte-bin met variabele valsnelheden.

Earth, Wind & Fire – Airconditioning zonder Ventilatoren
(III) Onderzoek Geo-Klimaatconcept[®]

19. DYNAMISCH SIMULATIEMODEL ESP-R

19.1 Samenvatting

Door specialisten van de unit Building Physics and Systems (BPS) van de Technische Universiteit Eindhoven is een simulatiemodel van de Klimaatcascade[©] ontworpen in de ESP-r omgeving. Het model is gebaseerd op het Excel Rekenmodel voor warmte- en massatransport – zie hoofdstuk 10- en is voor wat betreft de voelbare prestaties gekalibreerd en gevalideerd op basis van de metingen in de fysieke testopstelling.

De resultaten van de validatie zijn vergeleken met het Excel Rekenmodel, het CFD model en de metingen in de fysieke testopstelling. In de meeste gevallen is er sprake van een goede tot zeer goede overeenkomst waardoor het ESP-r model geschikt is om betrouwbare voorspellingen te kunnen doen over de voelbare energieprestatie van een Klimaatcascade[©]. Voor wat betreft de latente prestaties is verbetering van het model gewenst.

Aerodynamische en hydraulische trek zijn voorshands nog niet in het stromingsnetwerk van het ESP-r model geïntegreerd, waardoor het model geen voorspellingen kan doen over het energiegebruik ten behoeve van luchttransport.

Het ESP-r model van de Klimaatcascade[©] kan in principe in het gebouwmodel worden geïntegreerd, hetgeen enerzijds een grotere gebruiksflexibiliteit biedt, maar anderzijds complicerend werkt voor implementatie en gebruik. Dit was de reden om de Klimaatcascade[©] als *stand-alone* element te simuleren voor het preconditioneren van ventilatielucht. De psychometrische prestaties worden geïmplementeerd in het gebouwmodel, waardoor de energieprestaties over het referentiejaar kunnen worden voorspeld.

Voor de perfectionering van het ESP-r model is aanvullend onderzoek nodig met betrekking tot de integratie van functies voor de aerodynamische en hydraulische trek in het stromingsnetwerk en verbetering van de functies voor de latente prestaties,.

19.2 Inleiding algemeen

Een belangrijke doelstelling van het onderzoek “Earth, Wind & Fire” is klimaatingenieurs en architecten te voorzien van betrouwbare ontwerpgegevens voor dit innovatieve concept van klimaatregeling. Pas als deze beschikbaar zijn zullen opdrachtgevers en ontwerpers bereid kunnen worden gevonden het concept in concrete bouwwerken tot uitvoering te brengen. Deze doelstelling kan met behulp van gevalideerde simulaties worden verwezenlijkt.

Simulatie is het proces van het maken van een vereenvoudigd model van een complex systeem en het gebruik van dit model om het gedrag van het werkelijke systeem te analyseren en te voorspellen (Hensen, J. 2003).

Verschillende studies hebben uitgewezen dat gebouwsimulatie meer is dan alleen maar software; het dient als een “kunde” worden beschouwd waarvoor twee essentiële vaardigheden vereist zijn

(1) *De kennis en kunde om het complexe systeem met bijbehorende interrelaties te begrijpen, ofwel voldoende domeinkennis;*

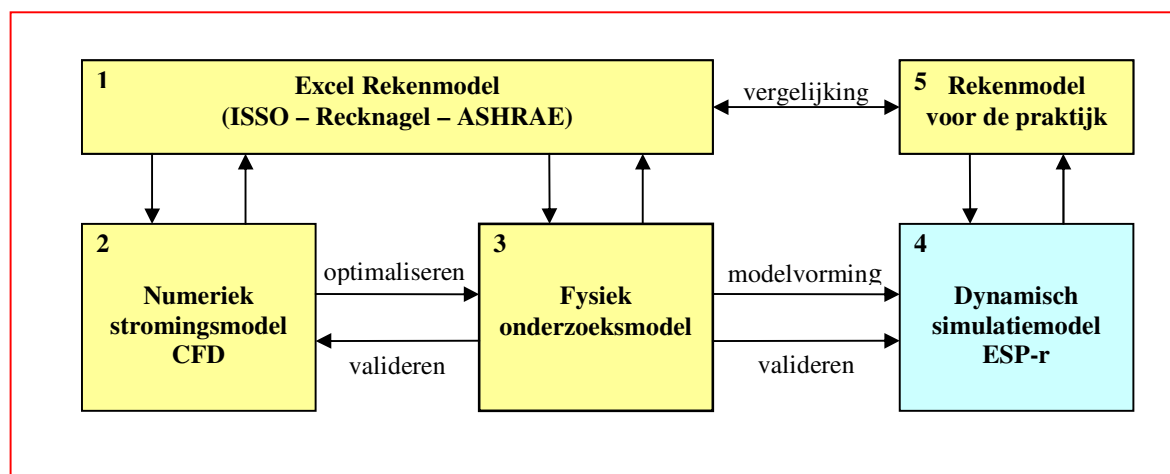
(2) *De bekwaamheid om dit begrip te vertalen in een voor de simulatiesoftware geschikte, logische representatie.*

(Hensen, J. 2004):

De Klimaatcascade[©] is ontwikkeld met behulp van modelleren, simuleren, kalibreren en valideren, zie figuur 18.1. Computersimulaties zijn uitgevoerd door deskundigen die over de bovengenoemde vaardigheden beschikken.

Met behulp van het Excel Rekenmodel en het numerieke CFD model kunnen de prestaties van de Klimaatcascade[©] bij verschillende condities onder stationaire omstandigheden worden bestudeerd. Met behulp van het dynamisch simulatiemodel ESP-r kunnen de energieprestaties van de Klimaatcascade[©] worden gesimuleerd in een wisselend buitenklimaat. In het onderzoek worden hiervoor de klimaatomstandigheden van het referentiejaar NEN 5060:2008 gebruikt.

Voor de positionering van het dynamisch simulatiemodel ESP-r zie figuur 18.1. Het ESP-r model is gekalibreerd en gevalideerd op basis van metingen aan de fysieke testopstelling -zie hoofdstuk 17.



Figuur 18.1 – Modelleren - Simuleren – Kalibreren – Valideren

19.3 Inleiding dynamisch simulatiemodel ESP-r

ESP-r is een simulatieomgeving voor algemene doeleinden die een fundamentele bepaling mogelijk maakt van alle factoren die de energie- en milieuprestaties van gebouwen beïnvloeden.

Doelstelling van ESP-r is het simuleren van gebouwprestaties die realistisch zijn en nauw aansluiten bij werkelijke fysische verschijnselen. Toepassing is mogelijk in de verschillende ontwerpfasen van globaal tot gedetailleerd. ESP-r maakt een integrale en evenwichtige prestatiebeoordeling mogelijk van alle relevante aspecten.

ESP-r is in 1974 ontworpen op de universiteit van Strathclyde, Glasgow en sindsdien continue doorontwikkeld. ESP-r is gebaseerd op een eindig volume methode, waarbij een probleem wordt omgezet in een set vergelijkingen met behoud van energie, massa, impuls etc. Deze vergelijkingen worden in opeenvolgende tijdstappen geïntegreerd als reactie op veranderingen in de variabelen.

Door zich gelijktijdig op alle relevante aspecten te richten biedt ESP-r aan ontwerpers de mogelijkheid om de complexe relaties te bestuderen tussen het buiten- en binnenklimaat van een gebouw op basis van architectuur, bouwmassa, luchtstromingen en klimaatvoorzieningen inclusief regelsysteem. Het is flexibel en krachtig, en daardoor zeer geschikt voor het simuleren van innovatieve technieken. Voor het gebruik wordt een geoefende gebruiker verondersteld met een grondige kennis van de te simuleren fysische processen. (U.S. Department of Energy 2008).

Processen worden in ESP-r gemodelleerd met behulp van een thermisch- en een stromingsnetwerk opgebouwd uit knooppunten. Hiermee worden onderling gekoppelde warmte- en massastromen gesimuleerd. Aan elk knooppunt wordt een temperatuur en een druk toegekend, die berekend zijn met respectievelijk het thermische- en het stromingssimulatiemodel. De knooppunten zijn verbonden met zgn. stromingscomponenten; dit zijn vergelijkingen waarmee de massastroom kan worden berekend op basis van het drukverschil tussen de betreffende knooppunten. Het thermische- en het stromingsnetwerk zijn intergerelateerd: Een temperatuurstijging van de lucht induceert een opwaartse thermische trek die een stroming tot stand brengt en vice versa. De omvang van de stroming bepaalt op zijn beurt weer de temperatuur van de lucht.

Het ESP-r model kan *stand-alone* worden toegepast voor het simuleren van de prestaties van de Klimaatcascade[©] als afzonderlijke klimaatvoorziening. Het thermisch netwerk en het stromingsnetwerk kunnen ook in het ESP-r model van een gebouw worden geïntegreerd. De jaarlijkse energieprestaties van de Klimaatcascade[©] kunnen hierdoor afzonderlijk en van een gebouw als geheel worden gesimuleerd..

Voor het werken met ESP-r zijn geoefende gebruikers nodig met een grondige kennis van de te simuleren fysische processen. De ESP-r modellen en de simulaties zijn daarom ontworpen en uitgevoerd door specialisten van de unit Building Physics and Systems (BPS) van de Technische Universiteit Eindhoven, een toonaangevend instituut op dit gebied, en tevens onderzoekspartner. De simulaties zijn gekalibreerd en gevalideerd op basis van metingen in de fysieke testopstelling waardoor ze voldoende betrouwbaar zijn.

19.4 ESP-r model Klimaatcascade[®]

19.4.1 Algemeen

Het ESP-r simulatiemodel voor de Klimaatcascade[®] is gebaseerd op het Excel Rekenmodel voor warmte- en massatransport, ontwikkeld door Dr.ir. Wim van der Spoel en Dr. Regina Bokel van TU Delft en omschreven in hoofdstuk 10. Het op basis hiervan ontwikkelde ESP-r model is ontworpen door Dr. Dipl.-Ing. Marija Trcka en Dr. Daniël Costola van de Unit BPS van de TU Eindhoven. De validatie op basis van de metingen in de fysieke testopstelling is uitgevoerd door Dr. Daniel Cóstola. Het gehele simulatieproces stond onder auspiciën van Prof. Dr. Ir. Jan Hensen, hoofd van de Unit BPS. Voor een volledig verslag wordt verwezen naar (Costola, Daniel e.a.2012).

Het ESP-r model van de Klimaatcascade[®] kan in het gebouwmodel worden geïntegreerd dan wel als *stand-alone* klimaatvoorziening worden behandeld –zie de volgende paragrafen.

19.4.2 Integratie van de Klimaatcascade[®] in het ESP-r gebouwmodel

Het thermisch netwerk en het stromingsnetwerk van de Klimaatcascade[®] worden hierbij in het ESP-r model van het gebouw geïntegreerd. Voordelen van deze benadering zijn:

- Flexibiliteit in de regeling: De invloed van variërende invoerparameters, zoals waterdebiet, sproeispectrum en watertemperatuur, kunnen direct op gebouwniveau worden gesimuleerd.
- Flexibiliteit in de systeemconfiguratie: De Klimaatcascade[®] kan op willekeurige plaatsen in de klimaatinstallatie worden opgenomen, en gecombineerd met andere installatiecomponenten.
- Nauwkeurigheid: Door convergentie van gebouwmodel, thermisch netwerk en stromingsnetwerk wordt de beste nauwkeurigheid van het simulatieresultaat verkregen.

Deze benadering heeft echter enkele belangrijke nadelen:

- Complexiteit zowel in implementatie als in het gebruik van de drie modules.
- Convergentieproblemen die hierdoor ontstaan.
- Lastig en omslachtig in de toepassing: de gebruiker moet in elke module de gebouwkenmerken invoeren, dat tijdrovend is en de kans op fouten vergroot.

De flexibiliteit in regeling en systeemconfiguratie zijn ook niet nodig. De Klimaatcascade[®] werkt met vast waterdebiet, sproeispectrum en watertemperatuur –zie hoofdstuk 12, en heeft een vaste plaats in het Geo-Klimaatconcept[®] -zie hoofdstuk 6. De Klimaatcascade[®] is derhalve niet geïntegreerd in het ESP-r gebouwmodel, maar als *stand-alone* element gesimuleerd met vaste instelpunten voor de regeling –zie paragraaf 19.4.3.

19.4.3 Stand-alone simulatie op gebouwniveau

De Klimaatcascade[®] wordt hierbij gesimuleerd als *stand-alone* element voor het preconditioneren van ventilatielucht, met vaste waterzijdige invoergegevens. De psychometrische prestaties worden geïmplementeerd in het gebouwmodel, waardoor de energieprestaties over het referentiejaar kunnen worden berekend.

19.5 Thermisch netwerk

Het thermisch netwerk van de Klimaatcascade[®] is gemodelleerd op basis van de bètaversie van het Excel rekenmodel –zie hoofdstuk 10. Er zijn dus geen grote verschillen tussen beide modellen te verwachten. Voor wat betreft de bedrijfsvoering is uitgegaan van systeemvariant A1, waarbij het sproeisysteem het gehele jaar in werking blijft, zonder voorverwarming van de lucht –zie paragraaf 12.4.

19.6 Stromingsnetwerk

Het stromingsnetwerk is in ESP-r uitsluitend gekoppeld aan het thermisch netwerk, maar dit is in de Klimaatcascade[®] niet voldoende. Aerodynamische en hydraulische trek spelen hierin een wisselende, en onder omstandigheden zelfs dominante rol, en daarom zou het stromingsnetwerk moeten worden uitgebreid met een koppeling aan de functies die hiervoor zijn afgeleid –zie hoofdstuk 13. In verband met budgetbeperkingen kon deze koppeling binnen de huidige projectomvang niet worden gerealiseerd, hetgeen impliceert dat met het ESP-r model alleen de thermische prestaties van de Klimaatcascade[®] kunnen worden gesimuleerd.

19.7 Uitgevoerde simulaties

ESP-r simulaties zijn uitgevoerd voor dezelfde varianten als voor de CFD simulaties- zie hoofdstuk 18, weergegeven in tabel 18.3. De simulaties zijn beperkt tot het valideren van het ESP-r model met betrekking tot luchttemperaturen en de inherente voelbare prestaties. Validatie met betrekking tot de luchtvochtigheid en de inherente latente prestaties is niet uitgevoerd.

Het ESP-r simulatiemodel voor de Klimaatcascade[®] is gebaseerd op dezelfde fysische wetmatigheden als het Excel Rekenmodel en de simulatieresultaten zijn derhalve identiek. Voor de weergave hiervan zie paragraaf 18.7.

19.8 Jaarlijkse energieprestaties

Het gevalideerde ESP-r model wordt gebruikt voor de voorspelling van de jaarlijkse energieprestaties van het gebouw voor de *case study*- zie hoofdstuk 14 van deelrapport (IV).

19.9 Conclusies

De onderzoekers concluderen dat

“... the Climate Cascade model in ESP-r is validated, although there is much space for improvement and further tests are needed. The Climate Cascade concept shows promising results and it is applicable to whole-year pre-conditioning of air in buildings in the Dutch climate.”

19.10 Vervolgonderzoek

Het ESP-r model van de Klimaatcascade[®] is gevalideerd op basis van voelbare prestaties, maar nog niet compleet. Voor de perfectionering van het model is aanvullend onderzoek nodig met betrekking tot

- Integratie van functies voor de aerodynamische en hydraulische trek in het stromingsnetwerk – zie paragraaf 19.6.
- Verbetering van de functies voor de latente prestaties, luchtbevochtiging en –droging in het thermisch netwerk – zie paragraaf 19.7.
- Optimalisatie van regelstrategieën en integratie met de modellen van het de Zonneschoorsteen en het Ventecdak[®] – zie de deelrapporten (I) en (II).
- Eventuele integratie van de Klimaatcascade[®] in het ESP-r gebouwmodel – zie paragraaf 19.4.2.

Om het model van de Klimaatcascade[®] voor alle ESP-r gebruikers toegankelijk te maken verdient het aanbeveling de volgende versie op te nemen in de digitale ESP-r bibliotheek.

20. INDIRECTE ADIABATISCHE VERDAMPINGSKOELING

20.1 Samenvatting

In een Klimaatcascade[©] wordt water gebruikt als koelmedium, niet als koudemiddel. Er wordt dus geen gebruik gemaakt van de verdampingswarmte van water en er is dus geen sprake van directe adiabatische verdampingskoeling.

Mede door de groeiende populariteit van indirecte adiabatische verdampingskoeling, zogenaamde dauwpuntskoeling, is globaal nagegaan of dit systeem in het Geo-Klimaatconcept[©] als alternatief voor de Klimaatcascade[©] zou kunnen worden toegepast. Geconcludeerd wordt dat dit om de volgende redenen niet het geval is:

- Het drukverlies is voor een natuurlijk ventilatiesysteem te hoog.
- Er is geen neerwaartse hydraulische trek beschikbaar, waardoor het systeem sterk afhankelijk is van de hulpventilator.
- De gewenste luchttemperatuur van 17⁰C voor Gebouw/Klimaatmodel BETA is moeilijk te realiseren.

20.2 Directe adiabatische verdampingskoeling

Water kan als koudemiddel een belangrijke rol spelen bij de klimaatregeling van gebouwen. De verdampingswarmte van water is ca 2.400 kJ.kg⁻¹ bij 20⁰C en dit betekent dat 1 m³ water bij verdamping ca 680 kWh koude kan leveren.

Bij een conventioneel koelsysteem bestaande uit een waterkoelinstallatie met watergekoelde condensor en natte koeltoren en een gemiddelde koudefactor (COP) in het koelseizoen van 5 à 7 – zie paragraaf 8.9- zou hiervoor ca 100 à 135 kWh elektrische stroom nodig zijn. De kostenverhouding is ca € 2,- voor een m³ water tegenover ca € 30,- voor de elektrische stroom. De waterverdamping is bovendien milieuvriendelijk.

Directe adiabatische verdampingskoeling in een PDEC²², zoals beschreven in hoofdstuk 7, maakt gebruik van verdamping van water in de ventilatielucht. De verdampingswarmte wordt aan de lucht onttrokken waardoor deze wordt gekoeld en tevens bevochtigd. De enthalpie (warmte-inhoud) van de lucht blijft hierbij onveranderd.

In het Nederlandse klimaat is een directe bevochtiging van de ventilatielucht bij de meeste klimaatomstandigheden echter niet aanvaardbaar. De relatieve vochtigheid in de ruimte zou te hoog zou worden met als resultaat een klam en onaangenaam binnenklimaat.

20.3 Indirecte adiabatische verdampingskoeling

Er zijn verschillende systemen van indirecte verdampingskoeling ontwikkeld, waarbij de gebruikte afvoerlucht adiabatisch wordt gekoeld. Met behulp van warmtewisselaars wordt hiermee aansluitend de verse ventilatielucht gekoeld (Bronsema, B. 1993). De twee luchtstromen van verse en gebruikte ventilatielucht moeten in principe in de warmtewisselaars bij elkaar worden gebracht. Voor het Geo-Klimaatconcept[©] is dit een beperkende voorwaarde waaraan moeilijk kan worden voldaan. Ook de temperatuur van de afvoerlucht, die in de zonneschoorsteen wordt verwarmd, en daardoor als koelmedium minder geschikt is, is een complicerende factor.

20.4 Indirecte dauwpuntskoeling (Static Cooling)²³

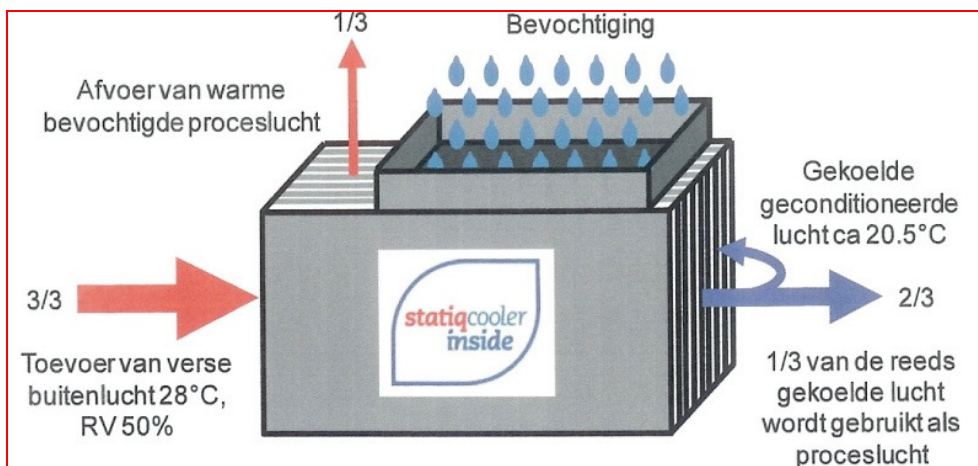
Een mogelijk alternatief zou kunnen worden gevormd door een bijzondere vorm van indirecte adiabatische verdampingskoeling, de zogenaamde dauwpuntskoeling,. Zonder diep op dit systeem in te gaan worden de toepassingsmogelijkheden in dit hoofdstuk summier onderzocht. De werking is als volgt –zie figuur 20.1:

²² Passive Draught Evaporative Cooling

²³ Merknaam van Static Cooling B.V. te Rijssen

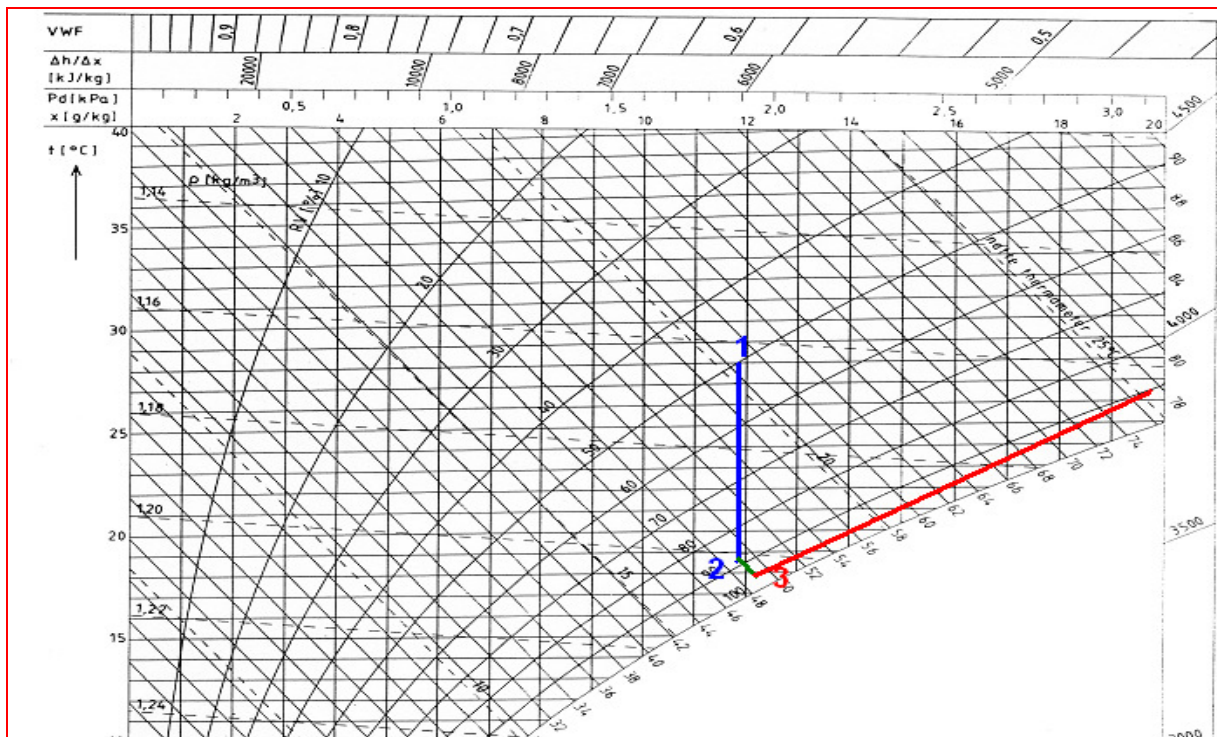
De aangezogen buitenlucht wordt als primaire lucht afgekoeld in een warmtewisselaar. Aan het einde van deze warmtewisselaar wordt een deel van de primaire luchtstroom in tegenstroom teruggesleurd als secundaire (proces) luchtstroom. Deze proceslucht neemt het vocht op dat verdampt uit een hygroscopische laag. Deze is aangebracht aan de proceskant (buitenzijde) van de platen waaruit de warmtewisselaar is opgebouwd.

De voor het verdampen benodigde warmte wordt onttrokken aan de door de warmtewisselaarplaat stromende primaire lucht die daardoor op haar beurt wordt afgekoeld bij gelijkblijvend vochtgehalte; zie figuur 20.1. Het verdampte vocht wordt met de proceslucht naar buiten afgevoerd en komt dus niet in de te ventileren ruimte terecht. (Kouwenhoven, H.J.L. e.a. 2008, Uges, P.G.H. 2006, 2008).



Figuur 20.1 – Principe indirecte dauwpuntkoeling

Het psychometrisch proces is in het Mollier diagram figuur 20.2 in beeld gebracht:



Figuur 20.2 – Dauwpuntkoeling in Mollier diagram

- 1 Primaire lucht van 28°C / 50% R.V. (punt 1) wordt gekoeld tot 18,5°C / 87% R.V. (punt 2);
- 2 Aan het eind van de warmtewisselaar wordt ca 1/3 van deze gekoelde lucht in richting omgekeerd en wordt dan proceslucht;
- 3 Op punt 2 stroomt de proceslucht het bevochtigde procesoppervlak binnen en wordt daar adiabatisch gekoeld tot punt 3, 17,8°C / 95% R.V.
- 4 Vanaf punt 3 stopt het adiabatisch koelproces en neemt de proceslucht warmte en vocht op langs het bevochtigde oppervlak van de warmtewisselaar, om tenslotte met ca 26,5°C / 92% naar buiten te stromen.

20.5 Beperkingen en conclusies dauwpuntskoeling

Voor toepassing in het Geo-Klimaatconcept heeft het systeem van Static Cooling enkele beperkingen, te weten:

20.5.1 Drukverlies:

Normaliter wordt gewerkt met een primaire luchtsnelheid van ca 4,5 m.s⁻¹, waarbij het drukverlies ca 300 Pa bedraagt, hetgeen voor het Geo-Klimaatconcept[®] veel te hoog is. Als de snelheid aan de primaire zijde zou worden verlaagd naar 2,0 m.s⁻¹ zou het drukverlies uit kunnen komen op ca 60 Pa. Voor een gebouw van 10 verdiepingen of meer zou hiervoor bij vrije uitloop van de cascade voldoende thermische trek beschikbaar zijn.

Het drukverlies van de proceslucht is normaliter ca 190 Pa bij een luchtsnelheid $\leq 2,0$ m.s⁻¹. Ook dit drukverschil zou moeten worden verlaagd. De verhouding primaire lucht / proceslucht moet altijd gelijk blijven.

De afmetingen van de dauwpuntskoeler worden door een dergelijke ingreep uitaard aanzienlijk verhoogd.

20.5.2 Luchttransport:

Anders dan in een Klimaatcascade[®] met sproeisysteem is bij indirecte verdampingskoeling geen hydraulische trek beschikbaar. Benedenwaartse thermische trek is alleen in het koelseizoen beschikbaar. Het luchttransport zou dus een groot deel van de bedrijfstijd met behulp van winddruk en/of hulpventilator moeten worden gerealiseerd.

20.5.3 Koelprestaties:

Voor Gebouw/Klimaatmodel ALPHA is uitgegaan van een koeling van de ventilatielucht tot $\approx 20^{\circ}\text{C}$, hetgeen met dauwpuntskoeling kan worden gerealiseerd.

Voor een Gebouw/Klimaatmodel BETA is een temperatuur nodig van $\approx 17^{\circ}\text{C}$, die met dauwpuntskoeling moeilijk bereikbaar is.

20.5.4 Conclusies

Geconcludeerd kan worden dat indirecte dauwpuntskoeling geen goed alternatief kan zijn voor de Klimaatcascade[®] met sproeisysteem.

Earth, Wind & Fire – Airconditioning zonder Ventilatoren
(III) Onderzoek Geo-Klimaatconcept[®]

21. REFERENTIES

Hoofdstuk 1 - Earth, Wind & Fire – In het Kort

- CEN (2006). *Energy Performance of Buildings Directive EPBD*. <http://www.epbd-ca.org>
- EP en EC (2009). *On the promotion of the use of energy from renewable sources...* Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council.
- EP en EC (2010). *Energy Performance of Buildings Directive Recast*. http://www.ecee.org/buildings/EPBD_Recast/
- EP en EC (2002). *Energy Performance of Buildings Directive*. <http://www.epbd.nl>
- Heller, Jonathan et al. (2011). *Sensitivity Analysis: Comparing the Impact of Design, Operation, and Tenant Behaviour on Building Energy Performance*. New Buildings Institute. <http://www.newbuildings.org/sites/default/files/NBISensitivityReport.pdf>
- IEA ECBS²⁴ Annex 44 (2011). *Integrating Environmentally Responsive Elements in Buildings*. <http://www.ecbs.org/annexes/annex44.htm>
- Lente-akkoord (2008). Een initiatief van Aedes, Bouwend Nederland, NEPROM, NVB, de minister van VROM en de minister van WWI. <http://www.lente-akkoord.nl>
- Lysen, Erik H. (1996). *The Trias Energetica - Solar Energy Strategies for Developing Countries*. Proceedings Eurosun Conference, Freiburg, 16-19 Sept 1996. <http://www.senternovem.nl/duurzameenergie>
- Verbeeck, Griet (2011). *Renovation versus demolition of old dwellings: comparative analysis of costs, energy consumption and environmental impact*. 27th International conference on Passive and Low Energy Architecture PLEA 2011.

Hoofdstuk 2 - Architectuur en Klimaattechniek

- Banham, Reyner (1984). *The Architecture of the Well-tempered Environment*. The University of Chicago Press, Chicago 60637. ISBN 0-226-03698-7
- Bronsema, Benjamin (2003). *Een duurzame toekomst voor de installatietechniek*. Themadag TU Delft – Duurzame installaties in gebouwen – Delft
- Groot Zwaafink, Miranda W.H. et al (2010). *Rijksgebouwendienst pakt faalkosten aan*. TVVL Magazine | 06 | 2010
- Hawkes, Dean en Forster, Wayne (2002). *Architecture, Engineering and Environment*. Laurence King Publishing Ltd London. ISBN 1 85669 322 8.
- Hendriks, Jeroen (2010). *Geïntegreerd en interdisciplinair ontwerpen*. TVVL Magazine | 06 | 2010
- Rooijackers, Gerard e.a. (2010) *Faalkosten en de kosten van het falen*. TVVL Magazine | 06 | 2010
- USP Marketing Consultancy 2008. *Faalkosten in de bouw naar hoogtepunt*. http://www.usp-mc.nl/UserFiles/File/persberichten/april08_1.pdf

Hoofdstuk 5 - Luchtreiniging

- ASHRAE 2000. *ASHRAE Handbook HVAC Systems and Equipment*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta GA, USA. ISBN 1-883413-81-8.
- Bronsema, B. 1995. *Over lucht en luchtfilters*. TVVL Magazine 11/95. www.bronconsult.org (publicaties/wetenschappelijk)
- Bronsema, B. 1997. *An Air Handling Unit for the Next Century Part 1 and 2* Healthy Buildings / IAQ '97 Conference Volume 1. www.bronconsult.org (publicaties/wetenschappelijk)
- Bronsema, B. 2001. *The First Principle of Air Filter Technology: "Keep the Filter Dry"*. Proceedings 7th REHVA World Congress CLIMA 2000/Napoli 2001. www.bronconsult.org (publicaties/wetenschappelijk)

²⁴ Energy Conservation in Buildings and Community Systems

- Bronsema B. 2002B. *De klimaatinstallatie – Vriend of Vijand? (1)*. TVVL Magazine 4/2002. www.bronconsult.org (publicaties/wetenschappelijk)
- Bronsema, B. 2002C. *Luchtfilters voor een beter milieu*. Nationale Milieu Techniekdag 2002. www.bronconsult.org (publicaties/wetenschappelijk)
- Bronsema, B. 2005. *De klimaatinstallatie – Vriend of Vijand? (2)*. TVVL Magazine 12/2005. www.bronconsult.org (publicaties/wetenschappelijk)
- NNI 2004. *Ventilation for non-residential buildings – Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems*. NEN-EN 13779:2004 en
- Fanger, P.O. 1987. *A solution for the Sick Building Mystery*. Proceedings Indoor Air Conference 1987.
- ISSO 2002. *Handboek Installatietechniek*. ISSO. Kennisinstituut voor de installatiesector. ISBN 90-5044-094-0
- TÜH 1997. *Untersuchungsbericht über Ozonmessungen an der Klimaanlage der Deutschen Bundesbank in Frankfurt*. Technischer Überwachung Hessen GmbH – Aktenzeichen 4028/5612.

Hoofdstuk 6 – Het Geo-Klimaatconcept[®]

- Bronsema, B. 2002. *Een duurzame toekomst voor de installatietechniek*. Symposium Duurzame Installaties 7 maart 2002 – Technische Universiteit Delft.
- Cooper, G. 1998. *Air-conditioning America. Engineers and the Controlled Environment 1900 – 1960*. John Hopkins University Press, Baltimore, Maryland. ISBN 0-8018-5716-3
- Will, H.M. 1999. *The First Century of Air-conditioning*. ASHRAE. ISBN 1-883413-76-1.

Hoofdstuk 7 – Klimaatcascade[®] voor adiabatiscie koeling

- Bowmen, N. e.a. 1997. *Application of Passive Draught Evaporative Cooling (PDEC) to Non-Domestic Buildings*. Renewable Energy, Vol. 10, No. 2/3, pp 191-196.
- Bowmen, N.T. e.a. 2000. *Passive Draught Evaporative Cooling I. Concepts and Precedents*. Indoor Built Environment 2000; 9: 284 – 290.
- Cook, M.J. e.a. 2000. *Passive Draught Evaporative Cooling II. Airflow Modelling*. Indoor Built Environment 2000; 9: 325 - 334.
- Erell, Evyatar e.a. 2007. *A multi-stage down-draft evaporative cool tower for semi-enclosed spaces: Aerodynamic performance*. Solar Energy 82 (2008) pp 420-429.
- Lomas, K.J. e.a. 2004. *Building bioclimatic charts for non-domestic buildings and passive draught evaporative cooling*. Building and Environment 39, (2004) pp 661 – 676.
- Martinez, D. e.a. 2000. *Predicted Comfort Envelopes for Office Buildings with Passive Draught Evaporative Cooling*. Roomvent 2000, Reading, UK, Conference Proceedings p 53.
- Pearlmutter, D. e.a. 2007. *A multi-stage down-draft evaporative cool tower for semi-enclosed spaces: Experiments with a water spraying system*. Solar Energy 82 (2008) pp 430-440.
- Robinson, D. e.a. 2004. *Passive Draught Evaporative Cooling III. Thermal Modelling of an Office Building*. Indoor Built Environment 2004; 13: 205 - 221.
- Salméron, J.M. e.a. 2009. *Passive and hybrid draught cooling in buildings and software design*. REHVA Journal - december 2009.
- Yajima, S. e.a. 1997. *Experimental Performance of the Shower Cooling Tower in Japan*. Renewable Energy, Vol. 10, No 2/3, pp 179-183.

Hoofdstuk 8 – Klimaatcascade[®] voor diabatische koeling

- NNI 2008. *Ventilation for non-residential buildings – Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems*. NEN EN 13779:2004 en.
- TNO en Deerns 2007. *Keuzewijzer voor koelinstallaties in de utiliteitsbouw*. In opdracht van SenterNovem.
- Willemsen, A. en van Harlingen, S.M. 2002. *De bodemtechnische basisprincipes van energieopslag*. TVVL Magazine 10/2002

Hoofdstuk 9 – De Klimaatcascade[®] als warmtewisselaar

- Ambrosini, W. e.a. 2002. *Statistical characteristics of a water film falling down a flat plate at different inclinations and temperatures*. International Journal of Multiphase Flow 28 (2002) pp 1521-1540
- Beard, K.V. 1976. *Terminal Velocity and Shape of Cloud and Precipitation Drops Aloft*. Journal of the atmospheric sciences Volume 33, May 1976.
- Doniec, A. 1988. *Flow of a laminar liquid film down a vertical surface*. Chemical Engineering Science Vol. 43, No.4 pp 847-854.
- El-Morsi, M.S. 2002. *Optimization of Direct-Contact-Spray-Coolers*. Dissertation University of Wisconsin-Madison 2002.
- Gosh S. e.a. 1994. *Induced air velocity within droplet driven sprays*. Proceedings: Mathematical and Physical Sciences, Vol. 444, No. 1920 (Jan. 8, 1994), 105-127.
- Hemeon, W.C.L. (1999). *Hemeon's Plant & Process Ventilation – Third Edition Edited by D. Jeff Burton*. Lewis Publishers, Boca Raton, Fl. ISBN 1-56670-347-6.
- Jones, A. e.a. 1995. *Discussions on the use of fine water sprays or mists for fire suppression*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 8, Issue 1, 1995, Pages 17-22
- Kandlikar, Satish G. 2006. *Heat transfer and fluid flow in minichannels and microchannels*. Elsevier Ltd. London. ISBN:0-0804-4527-6
- Mikeliewicz, J. e.a. 1976. *Minimum thickness of a liquid film flowing vertically down a solid surface*. International Journal of Heat and Mass Transfer Vol. 19, pp 771-776.
- Portalski, S. 1963. *Studies of falling liquid film flow – Film thickness on a smooth vertical plate*. Chemical Engineering Science, 1963, Vol. 18, pp 787-804.
- Ranz, W. E. and Marshall, W. R., 1952, Evaporation from drops. Chem. Engng. Prog. 48(3), 141-146 (Part I); 48(4),173-180 (Part II).
- Rao, B.K. 1999. *Heat transfer to a falling power-law fluid film*. International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 20, Issue 4, August 1999, pp 429-436.
- Rawle, A. 2001-2005. *Particle Sizing – An Introduction*. <http://www.silver-colloids.com/Tutorials/psintro.html>
- Spilhaus, A.F. 1948. *Raindrop size, shape and falling speed*. Journal of Meteorology Volume 5, June 1948.
- Tekasakul, P. e.a. 2002. *Evaporation from non- spherical particles: the equivalent-volume and inscribed sphere approximations for nearly spherical particles*. Journal of Aerosol Sciences Vol. 33 (2002) pp 307-317.
- Terblanche, R. e.a. 2009. *Drop size distribution below different wet-cooling tower fills*. Applied Thermal Engineering 29 (2009) pp 1552-1560.
- Yan, W.M. e.a. 1990. *Combined heat and mass transfer in natural convection between parallel plates with film evaporation*. International Journal of Heat and Mass Transfere Vol. 33, No. 3, pp 529-541.
- Zhou, D.W. e.a. 2009. *Measurement of falling film thickness to flat plate using confocal chromatic sensing technique*.

Hoofdstuk 10 – Rekenmodel Klimaatcascade[®]

- ISSO 2002. *Handboek Installatietechniek*. ISSO Kennisinstituut voor de installatiesector. ISBN 90-5044-094-0
- Mills, Anthony F. 2001. *Mass transfer*. Prentice Hall. ISBN 013032829-4
- El-Morsi, M.S. 2002. *Optimization of Direct-Contact-Spray-Coolers*. Dissertation University of Wisconsin-Madison 2002.
- De Wit, M.H. 2008. *Heat and Moisture in building envelopes*. Colledictaat TU Eindhoven
- Ranz, W.E. & Marshall, W.R. 1952. *Evaporation from drops. Part I & II*. Chem. Eng. Progr. 48:141-6; 173-80

Hoofdstuk 11 – Koelprestaties Klimaatcascade[®]

Hoofdstuk 12 – De Klimaatcascade[®] buiten het koelseizoen

- Bronsema, B. 2001B. *The First Principle of Air Filter Technology: “Keep the Filter Dry”*. Proceedings 7th REHVA World Congress CLIMA 2000/Napoli 2001. www.bronconsult.org (publicaties/wetenschappelijk)
- NNI 2011. NEN-EN-ISO 13788:2011. *Hygrothermische prestatie van bouwcomponenten en -elementen - Binnenoppervlaktetemperatuur om kritische oppervlaktevochtigheid te vermijden en berekening van de condensatie in bouwdelen - Berekeningsmethode*
- NNI 2001. NEN 1068:2001 nl. Thermische isolatie van gebouwen - Rekenmethoden
- ISSO 2002. Handboek Installatietechniek. ISSO Kennisinstituut voor de installatiesector. ISBN 90-5044-094-0

Hoofdstuk 13 – Luchtverplaatsing en -Regeling

- Gosh S. e.a. 1994. *Induced air velocity within droplet driven sprays*. Proceedings: Mathematical and Physical Sciences, Vol. 444, No. 1920 (Jan. 8, 1994), 105-127.
- Rothe P.H. e.a. 1977. *Aerodynamic behaviour of liquid sprays*. International Journal of Multiphase Flow Vol.3, pp 2673-272.

Hoofdstuk 14 – Fysisch / Chemische aspecten

- Andersen Ib e.a. 2008. *Before the big bang of indoor climate research*. Proceedings Indoor Air 2008, Copenhagen – Paper ID: Su17K1.
- ASHRAE 1994. *The Ins and Outs of Ozone*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta GA, USA. ISBN 1-883413-12-5.
- CIBSE Guide A (1999). *Environmental Design*. The Chartered Institute of Building Services Engineers London – ISBN 0 900953 96 9
- Fletcher, L.A. e.a. 2008. *Air Ion Behaviour in Ventilated Rooms*. Indoor and Built Environment 2008; 17; 2: pp 173-182.
- Fletcher Louise e.a. 2008 B. *The bacterial effects of negative ions in air*. Proceedings Indoor Air 2008, Copenhagen – Paper ID: 46.
- Grinshpun, S.A. 2005. *Evaluation of ionic air purifiers for reducing aerosol exposure in confined indoor spaces*. Indoor Air 2005: 15: pp 235-245.
- Hawkins, L.H. 1981. *The influence of air ions, temperature and humidity on subjective wellbeing and comfort*. Journal of Environmental Psychology (1981) 1, 279-292.
- Huang, R. e.a. 2008. *Removal of viable bio aerosol particles with a low-efficiency HVAC filter enhanced by continuous emission of unipolar air ions*. Indoor Air 2008: 18: pp 106-112.
- ISSO 2002. Handboek Installatietechniek. ISSO Kennisinstituut voor de installatiesector. ISBN 90-5044-094-0
- ISSO 2008. *Legionellapreventie in klimaatinstallaties – Publicatie 55.3*. ISSO Kennisinstituut voor de installatiesector. ISBN 978-90-5044-160-5.
- Jerrett, M. 2009 e.a. *Long-term ozone exposure and mortality*. New England Journal of Medicine 360(11) pp 1085 – 1095.
- Luts Aare e.a. 2009. *Some air electricity phenomena caused by waterfalls: Correlative study of the spectra*. Atmospheric Research 91 (2009) pp 229 – 237.
- Mendell Mark J. 1993. *Non-specific Symptoms in Office Workers: A Review and Summary of the Epidemiologic Literature*. Indoor Air 1993: 3: pp 227-236.
- Recknagel Sprenger Schramek 2009. *Taschenbuch für HEIZUNG + KLIMATECHNIK 74. Auflage*. Oldenburg Industrieverlag, München, ISBN 978-3-8356-3134-2.
- Seyffer, Charles 2012. *Ozone and Air Filters*. ASHRAE Journal February 2012 pp 82 – 84.

- Waring, Michael S. 2008. *Indoor air quality implications of using ion generators in residences*. Proceedings Indoor Air 2008, Copenhagen – Paper ID; 598.
- Weschler, Charles J. 2000. *Ozone in Indoor Environments: Concentration and Chemistry*. Indoor Air 2000; 10: 269-288.
- Yates, Alayne e.a. 1986. *Air ions: Past problems and future directions*. Environment International, Vol. 12, pp 99-108, 1986.
- Yu, B.F. e.a. 2009. *Review of research on air-conditioning systems and indoor air quality control for human health*. International Journal of Refrigeration 32 (2009) pp 3 – 20.

Hoofdstuk 15 – Concept uitwerking en Dimensionering

Hoofdstuk 16 – Numerieke Stromingssimulatie Klimaatcascade[©]

- Blocken B. 2010. *CFD voor een gezonde en comfortabele stedelijke omgeving*. BOUWFYSICA 1,2010 pp 16-19
- Markus, Stefan 2010A. *Test Report Drop size analysis*. Spraying Systems Deutschland GmbH, Project No P 100165-A d.d. 29-09-2010.
- Markus, Stefan 2010B. *CFD Simulations Climate Cascade for Project EARTH, WIND & FIRE*. Spraying Systems Deutschland GmbH. Project-No.: P100165-A d.d. 07.12.2010
- Schick, Rudolf J. 2010. *Spray Technology Reference Guide: Understanding Drop Size*. Spray Analysis and Research Services – A Service of Spraying Systems Co.
<http://www.SprayConsultants.com>
- Mendell M.J. 2000. “*Ventilation Systems and Building-Related Symptoms: An Epidemiological Perspective*”. Healthy Buildings conference 2000.

Hoofdstuk 17 – Fysieke Testopstelling

- Bruggema, Harry 2011. *Reactie Modeltest klimaatcascade concept D 100311*. Rapport Peutz 25 mei 2010 - HBr/HBr/LvI/B 1099-5-ME

Hoofdstuk 18 – Validatie van de Simulatiemodellen

- ISSO 2002. *Handboek Installatietechniek*. ISSO Kennisinstituut voor de installatiesector. ISBN 90-5044-094-0

Hoofdstuk 19 – Dynamisch Simulatiemodel ESP-r

- Costola, Daniel e.a. 2012. *Earth, Wind & Fire Project – Climate Cascade – ESP-r models*. Report Version 2, 26-02-2012. Eindhoven University of Technology – Building Physics & Systems

Hoofdstuk 20 – Indirecte adiabatiese verdampingskoeling

- Bronsema B. 1993. *Adiabatiese koeling bij comfortinstallaties deel [1] en [2]*. TG Techniek in de Gezondheidszorg Januari 1993
- Kouwenhoven, H.J.L. 2008. *Verdampingskoeling verklaard vanuit het Mollier diagram*. Koude & Luchtbehandeling februari 2007.
- Uges, P.G.H. 2006. *Air-conditioning using R718 (water) as refrigerant*. 7th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids, Trondheim, Norway, May 28-2006
- Uges, P.G.H. 2009. *Verdampingskoeling: betrouwbaar en milieubesparend*. Verwarming en Ventilatie juni 2009.

Earth, Wind & Fire – Airconditioning zonder Ventilatoren
(III) Onderzoek Geo-Klimaatconcept[®]

22. BIJLAGE: MODEL VOOR WARMTE- EN MASSATransport IN DE KLIMAATCASCADE

Wim van der Spoel, TU Delft
Datum: 28 maart 2012

INLEIDING

In vergelijking met het document van 1 maart 2010 is het rekenmodel uitgebreid met

- hoogteafhankelijke valsnelheid van de druppels
- berekening massa- en warmteoverdracht voor een druppelgrootteverdeling

Tevens wordt aan het einde van het document een vergelijking gemaakt met meetresultaten en enkele verschillende rekenmodeltypen onderling.

Modelvorming

Ten behoeve van de modelvorming wordt uitgegaan van de differentiaalvergelijkingen voor warmte- en massatransport, waarna vervolgens de gediscretiseerde differentievergelijkingen daaruit worden afgeleid..

Aanname:

De belangrijkste aannames/vereenvoudigingen die in het eerste model voor de cascade worden gemaakt zijn:

- Aanname van ronde waterdruppels ten behoeve van bepaling wateroppervlakte
- Geen plaatsafhankelijkheid van temperatuur *in* een waterdruppel
- Waterdruppels hebben geen interactie met elkaar

Voor de aannamen wat betreft de invloed van de wanden wordt verwezen naar de betreffende paragraaf.

DIFFERENTIAALVERGELIJKINGEN VOOR MASSA- EN WARMTE

Definities

Bovenin de klimaatcascade komt water in de vorm van druppels met een totale massastroomdichtheid van q_w (in $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$) met een temperatuur T_w . Ook komt bovenin binnen een massastroomdichtheid lucht van q_l (in $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$) met een temperatuur T_l . In de lucht zit een hoeveelheid waterdamp met een temperatuur T_l . De binnenkomende lucht heeft een relatieve luchtvochtigheid rh_{in} (%).

De relatie tussen massastroomdichtheid, massadichtheid en snelheid is als volgt:

Water:

$$q_w = v_w \rho'_w \quad (1)$$

Waterdamp:

$$q_d = v_l \rho_d \quad (2)$$

Lucht:

$$q_l = v_l \rho_l \quad (3)$$

Hierin is ρ'_w een bulkdichtheid, d.w.z. de totale massahoeveelheid water per m^3 ruimte.

De snelheid van de waterdruppels hangt af van de positie (hoogte) in de klimaatcascade en van de druppelgrootte.

De snelheden zijn overigens positief gedefinieerd in de negatieve richting van h (hoogte) Dit in tegenstelling tot de normale conventie.

Transportvergelijkingen voor water

Massa

Massavergelijking voor water,

$$\frac{\partial \rho'_w}{\partial t} = \frac{\partial v_w \rho'_w}{\partial h} + g_{d \rightarrow w} \quad (4)$$

Waarin $g_{d \rightarrow w}$ de stofoverdracht per volume-eenheid ($\text{kg/m}^3\text{s}$) voor de overgang van waterdamp naar vloeibaar water.

Gediscretiseerde (in de plaats) massavergelijking voor water over de hoogte dh en oppervlakte A

$$Adh \frac{d\rho'_w}{dt} = A(v_w(h)\rho'_w(h) - v_w(h-dh)\rho'_w(h-dh)) + Adh \cdot g_{d \rightarrow w} \quad (5)$$

Energie

Energievergelijking voor water:

$$c_w \frac{\partial(\rho'_w T_w)}{\partial t} = c_w \frac{\partial(v_w \rho'_w T_w)}{\partial h} + e_{lat,d \rightarrow w} + e_{voel,l \rightarrow w} \quad (6)$$

Hierin staat $e_{lat,d \rightarrow w}$ voor het vermogen van de latente warmte per volume-eenheid ($\text{J/m}^3\text{s}$) bij de overgang van waterdamp naar vloeibaar water, en $e_{voel,l \rightarrow w}$ voor de voelbare warmteoverdracht door convectie tussen lucht en waterdruppels ($\text{J/m}^3\text{s}$).

Gediscretiseerde (in de plaats) energievergelijking voor water over de hoogte dh en oppervlakte A

$$c_w Adh \frac{\partial(\rho'_w T_w)}{\partial t} = c_w A(v_w(h)\rho'_w(h)T_w(h) - v_w(h-dh)\rho'_w(h-dh)T_w(h-dh)) + Adh \cdot (e_{lat,d \rightarrow w} + e_{voel,l \rightarrow w})$$

Transportvergelijkingen voor waterdamp en lucht

Massa

Massavergelijking voor waterdamp:

$$\frac{\partial \rho_d}{\partial t} = \frac{\partial v_l \rho_d}{\partial h} + g_{w \rightarrow d} \quad (7)$$

Waarin $g_{w \rightarrow d}$ de stofoverdracht per volume-eenheid ($\text{kg/m}^3\text{s}$) voor de overgang van water naar waterdamp

Gediscretiseerde (in de plaats) massavergelijking voor waterdamp over de hoogte dh en oppervlakte A

$$Adh \frac{\partial \rho_d}{\partial t} = A(v_l(h)\rho_d(h) - v_l(h-dh)\rho_d(h-dh)) + Adh \cdot g_{w \rightarrow d} \quad (8)$$

Massavergelijking voor lucht (geen bron- of verliestermen), onder de aanname dat $v_l = \text{constant}$:

$$\frac{\partial \rho_l}{\partial t} = \frac{\partial v_l \rho_l}{\partial h} \quad (9)$$

Gediscretiseerde (in de plaats) massavergelijking voor lucht over de hoogte dh en oppervlakte A

$$A dh \frac{d\rho_l}{dt} = A (v_l(h)\rho_l(h) - v_l(h-dh)\rho_l(h-dh)) \quad (10)$$

Enthalpie

Enthalpievergelijking voor waterdamp+lucht (ten opzichte van lucht+water bij 0 °C)

$$c_d \frac{\partial(\rho_d T_l)}{\partial t} + L_w^0 \frac{\partial \rho_d}{\partial t} + c_l \frac{\partial(\rho_l T_l)}{\partial t} = c_d \frac{\partial(v_l \rho_d T_l)}{\partial h} + c_l \frac{\partial(v_l \rho_l T_l)}{\partial h} + L_w^0 \frac{\partial v_l \rho_d}{\partial h} + e_{lat,w \rightarrow d} + e_{voel,w \rightarrow l} \quad (11)$$

Hierin is L_w^0 (J/kg) de verdampingswarmte van water van 0 °C naar waterdamp van 0 °C.

Gediscretiseerde (in de plaats) energievergelijking voor waterdamp+lucht over de hoogte dh en oppervlakte A , onder het gegeven dat v_l niet van de hoogte afhangt:

$$\begin{aligned} c_d A dh \frac{\partial(\rho_d T_l)}{\partial t} + L_w^0 A dh \frac{\partial \rho_d}{\partial t} + c_l A dh \frac{\partial(\rho_l T_l)}{\partial t} = \\ c_d A (v_l(h)\rho_d(h)T_l(h) - v_l(h-dh)\rho_d(h-dh)T_l(h-dh)) + \\ c_l A (v_l(h)\rho_l(h)T_l(h) - v_l(h-dh)\rho_l(h-dh)T_l(h-dh)) + \\ L_w^0 A (v_l(h)\rho_d(h) - v_l(h-dh)\rho_d(h-dh)) + A dh \cdot (e_{lat,w \rightarrow d} + e_{voel,w \rightarrow l}) \end{aligned} \quad (12)$$

Stof- en warmteoverdracht tussen water en waterdamp

Voor het stoftransport als gevolg van verdampen/condenseren per m^3 ruimte geldt

$$g_{w \rightarrow d} = -g_{d \rightarrow w} \quad (13)$$

en voor de vermogensdichtheid van de latente warmteoverdracht:

$$e_{lat,d \rightarrow w} = -e_{lat,w \rightarrow d} \quad (14)$$

en voor de vermogensdichtheid van de voelbare warmteoverdracht door convectie tussen lucht en water:

$$e_{voel,l \rightarrow w} = -e_{voel,w \rightarrow l} \quad (15)$$

Discretisatie voor een tijdsafhankelijk proces (steady-state case)

Voor een tijdsafhankelijk proces is de linkerzijde van vergelijkingen (4) t/m (12) gelijk aan 0. Met invullen van de vergelijkingen voor stof- en warmteoverdracht (daarvoor worden voorsnog de bekende variabelen op hoogte h gebruikt, us niet op hoogte $h-dh$, zodat sprake is van een eenvoudige expliciete discretisatie) krijgen we:

Massa

Uit vergelijking (5)

$$\rho'_w(h-dh) = \frac{1}{v_w(h-dh)} \left(v_w(h) \rho'_w(h) + dh \cdot g_{d \rightarrow w}(h) \right) \quad (16)$$

En uit vergelijking (8)

$$\rho_d(h-dh) = \frac{1}{v_l(h-dh)} \left(v_l(h) \rho_d(h) - dh \cdot g_{d \rightarrow w}(h) \right) \quad (17)$$

En uit vergelijking (10) en (3)

$$v_l(h-dh) \rho_l(h-dh) = v_l(h) \rho_l(h) = q_l = \text{constant} \quad (18)$$

of, gebruik makend van de ideale gaswet voor lucht en verwaarlozen van het effect van de verandering van het luchtvochtgehalte op de dichtheid:

$$v_l(h) = \frac{v_l(H)(T_l(h) + 273.15)}{T_l(H) + 273.15} \quad (19)$$

Met H de hoogte van de klimaatcascade en met de luchttemperatuur in graden Celsius.

Enthalpie

Uit vergelijking **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**

$$T_w(h-dh) = \frac{1}{c_w v_w(h-dh) \rho'_w(h-dh)} \left(c_w v_w(h) \rho'_w(h) T_w(h) + dh (e_{lat,d \rightarrow w}(h) + e_{voel,l \rightarrow w}(h)) \right) \quad (20)$$

En uit vergelijking (12)

$$T_l(h-dh) = \frac{1}{c_d v_l(h-dh) \rho_d(h-dh) + c_l v_l(h-dh) \rho_l(h-dh)} \cdot \left(c_d v_l(h) \rho_d(h) T_l(h) + c_l v_l(h) \rho_l(h) T_l(h) + L_w^0 (v_l(h) \rho_d(h) - v_l(h-dh) \rho_d(h-dh)) - dh \cdot (e_{lat,d \rightarrow w} + e_{voel,l \rightarrow w}) \right) \quad (21)$$

Nu zijn de vergelijkingen (17), (19) en (21) gekoppeld. Om de berekeningen toch relatief eenvoudig in een spreadsheet programma uit te voeren, wordt een iteratief proces gevolgd waarin eerst de luchttemperatuur op hoogte $h-dh$ wordt bepaald zonder het effect van de snelheidsverandering van de lucht, en vervolgens de waterdampconcentratie en opnieuw de luchttemperatuur met de snelheidsverandering uit de vorige stap. De stappen zijn als volgt:

Eerst initialisatie:

$$v_l^{(0)}(h) = v_l^{(0)}(h-dh) = v_l(H) \quad (22)$$

Vervolgens iteratief voor $n = 0, 1, \dots$:

- stap 1

$$\rho_d^{n+1}(h-dh) = \frac{1}{v_l^{(n)}(h-dh)} \left(v_l^{(n)}(h) \rho_d(h) - dh \cdot g_{d \rightarrow w}(h) \right) \quad (23)$$

- stap 2, gebruik makend van vergelijking (18)

$$T_l^{(n+1)}(h-dh) = \frac{1}{c_d v_l^{(n)}(h-dh) \rho_d(h-dh) + c_l q_l} \cdot \left(c_d v_l^{(n)}(h) \rho_d(h) T_l(h) + c_l q_l T_l(h) + L_w^0 (v_l^{(n)}(h) \rho_d(h) - v_l^{(n)}(h-dh) \rho_d(h-dh)) - dh \cdot (e_{lat,d \rightarrow w} + e_{voel,l \rightarrow w}) \right) \quad (24)$$

-stap 3

$$v_l^{(n+1)}(h) = \frac{v(H) T_l^{(n+1)}(h)}{T_l(H)} \quad (25)$$

$$v_l^{(n+1)}(h-dh) = \frac{v(H) T_l^{(n+1)}(h-dh)}{T_l(H)}$$

In het spreadsheet programma wordt gestopt bij n = 2.

STOF- EN WARMTEOVERDRACHT TUSSEN WATER EN WATERDAMP

Er wordt uitgegaan van bolvormige druppels met diameter d . Tevens wordt aangenomen dat de druppels niet vervormen, uit elkaar vallen of samenklonteren.

Stof- en warmteoverdracht

Voor het stoftransport als gevolg van verdampen/condenseren per m³ ruimte geldt

$$g_{d \rightarrow w} = -g_{w \rightarrow d} = a_{drup} \cdot \beta_x (x_{d,l} - x_{d,opp}) \quad (26)$$

ofwel:

$$g_{d \rightarrow w} = -g_{w \rightarrow d} = 6.2 \cdot 10^{-6} \cdot a_{drup} \cdot \beta_x (p_{d,l}(h) - p_{d,opp}(h)) \quad (27)$$

met

$$p_{d,l} = \rho_d R_w T_l \quad \text{en} \quad p_{d,opp} = p_{sat}(T_w) \quad (28)$$

In deze vergelijkingen is β_x de stofoverdrachtcoëfficiënt [kg/m²s] (zie later), $x_{d,l}$ het vochtgehalte (kg/kg) van de lucht en $x_{d,opp}$ het vochtgehalte (kg/kg) van de lucht ter plaatse van het waterdruppeloppervlak, R_w de gasconstante van water (462 J kg⁻¹ K⁻¹) en $p_{sat}(T_w)$ de verzadigde waterdampdruk bij watertemperatuur T_w .

Bij constante dichtheid van de lucht en atmosferische druk (10⁵ Pa) geldt de volgende relatie tussen luchtvochtgehalte en partiële waterdampdruk:

$$x_d = \frac{\rho_d}{\rho_l} \approx 6,2 \cdot 10^{-6} p_d \quad (29)$$

De vermogensdichtheid van de latente warmteoverdracht is gelijk aan:

$$e_{lat,w \rightarrow d} = -e_{lat,d \rightarrow w} = g_{w \rightarrow d} (L_w^0 + c_d T_w) \quad (30)$$

en de vermogensdichtheid van de voelbare warmteoverdracht door convectie tussen lucht en water wordt gegeven door:

$$e_{voel,l \rightarrow w} = -e_{voel,w \rightarrow l} = a_{drup} \cdot h_c (T_l - T_w) \quad (31)$$

Stofoverdrachtcoëfficiënt β_x

Voor niet te kleine Re-waarden geldt (Lewis):

$$Nu \cdot Re^{-1} \cdot Pr^{-1/3} = Sh \cdot Re^{-1} \cdot Sc^{-1/3} \quad (32)$$

Met

$$Sh = \frac{\beta_x \cdot d}{\rho_l D}, \quad Nu = \frac{h_c \cdot d}{\lambda}, \quad Sc = \frac{\nu}{D}, \quad Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu}{\rho_l \cdot c_l} \lambda \quad (33)$$

ν = kinematische viscositeit [m²/s]

D = diffusiecoëfficiënt [m²/s]

d = karakteristieke afmeting [m]

kunnen we schrijven:

$$\beta_x = \frac{h_c}{c_p} \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^{2/3} \quad (34)$$

En ingevuld bij 20 graden C (Sc = 0.63 en Pr = 0.71):

$$\beta_x = \frac{h_c}{1007} \left(\frac{0.71}{0.63} \right)^{2/3} = 1.08 \cdot 10^{-3} \cdot h_c \quad (35)$$

[Opm.: K in het installatiehandboek is gedefinieerd als $\beta_x = K\rho$]

Verzadigde waterdampdruk

$$p_{sat}(\theta) = 100 \exp \left(18.956 - \frac{4030.18}{\theta + 235} \right)$$

waarin θ de temperatuur in °C.

Numerieke waarden voor de soortelijke warmte en verdampingswarmte

De verdampingswarmte L_w van water is 2257000 J/kg (water van 100 °C naar waterdamp van 100 °C).

De soortelijke warmtes (handboek installatietechniek, tabel 1.2.6 bij 20 graden C, tabel 1.2-8 bij 20 graden C) bedragen:

$$c_w = 4184 \text{ J/kg K}$$

$$c_l = 1007 \text{ J/kg K}$$

$$c_d = 1864 \text{ J/kg K (bij 100 graden)}$$

zodat

$$L_w^0 = L_w + c_w(100 - 0) - c_d(100 - 0) = 2489000 \text{ J/kg.}$$

Warmteoverdrachtscoëfficiënt h_c als functie van druppelgrootte

Ranz and Marshall suggested the following two correlations for single droplets [Morsi (2002), Ranz en Marshall 1952, deel 1

$$Nu = \frac{h_c \cdot d}{\lambda} = 2 + 0.6 \cdot Pr^{1/3} Re^{1/2} \quad (36)$$

where Nu is the Nusselt number, Sh is the Sherwood number, and Re is the relative Reynolds number based on the relative speed between the droplet and the carrier gas.

$$\text{Re} = \frac{\rho_{air} |v_l - v_w| d}{\mu_{air}} \quad (37)$$

met d de diameter van een waterdruppel. Pr is the Prandtl number defined by

$$\text{Pr} = \frac{\mu_{air} c_l}{\lambda_{air}} \quad (38)$$

where μ_{air} and λ_{air} are the dynamic viscosity and the thermal conductivity of air in kg/ms and W/mK, respectively.

Hieruit volgt:

$$h_c = \frac{\lambda \text{Nu}}{d} = \frac{\lambda (2 + 0.6 \cdot \text{Pr}^{1/3} \text{Re}^{1/2})}{d} = \frac{\lambda \left(2 + 0.6 \cdot (0.7)^{1/3} \left(\frac{\rho_{air} |v_l - v_w| d}{\mu_{air}} \right)^{1/2} \right)}{d}$$

Koppelingcoëfficiënt voor stof- en warmteoverdracht bij een druppelspectrum

Bij een druppelspectrum moet rekening gehouden worden met het gegeven dat in formule (27) en (31) het oppervlak van de druppels en de overdrachtscoëfficiënten niet los van elkaar berekend mogen worden.

De koppelingcoëfficiënt voor warmte-overdracht, $a_{drup} \cdot h_c$ wordt gegeven door

$$a_{drup} h_c = \frac{6\rho'_w \int_0^\infty u^2 h_c(u) p(u) du}{\rho_w \int_0^\infty u^3 p(u) du} = \frac{6\lambda\rho'_w \int_0^\infty \left(2u + 0.6 \cdot (0.7)^{1/3} \left(\frac{\rho_{air} |(v_l - v_w)(u)|}{\mu_{air}} \right)^{1/2} u^{1.5} \right) p(u) du}{\rho_w \int_0^\infty u^3 p(u) du} \quad (39)$$

Hierin is $p(u)$ de kansdichtheidsfunctie van de druppelgrootteverdeling van de sproeier(s) met u de druppeldiameter.

Voor de koppelingcoëfficiënt voor stofoverdracht geldt

$$a_{drup} \beta_x = 1.08 \cdot 10^{-3} (a_{drup} h_c) \quad (40)$$

met $a_{drup} h_c$ gegeven door formule (39).

Deze uitdrukkingen dienen te worden gebruikt in formule (26), (27) en (30)

Oppervlak waterdruppels per m³ ruimte

Ter informatie, het totale oppervlak a_{drup} van de waterdruppels per m³ ruimte is gelijk aan:

$$a_{drup} = \frac{\rho'_w \int_0^\infty 4\pi \left(\frac{u}{2} \right)^2 p(u) du}{\rho_w \int_0^\infty 4\pi \left(\frac{u}{2} \right)^3 p(u) du} = \frac{6\rho'_w \int_0^\infty u^2 p(u) du}{\rho_w \int_0^\infty u^3 p(u) du} = \frac{6\rho'_w}{\rho_w d_{32}} \quad (41)$$

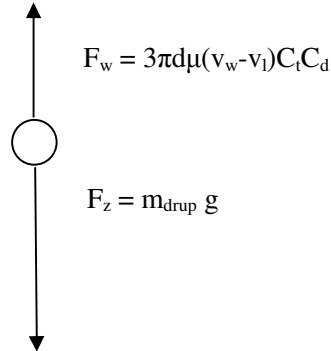
waarin d_{32} de Sauter Mean Diameter.

VALSNELHEID VAN DE DRUPPELS

De valsnelheid van de druppels kan afhankelijk zijn van de hoogte. Met F_w de wrijvingskracht en F_z de zwaartekracht, is de verandering van het snelheidsverschil tussen de waterdruppels en de lucht over de tijd gegeven door:

$$m_{drup} \frac{dv_w}{dt} = F_z - F_w \quad (42)$$

met m_{drup} de massa van 1 waterdruppel.



De krachten F_w en F_z worden als volgt gedefinieerd:

$$F_w = 3\pi d\mu(v_w - v_l)C_t C_d \quad (43)$$

$$F_z = m_{drup} g \quad (44)$$

Met de weerstandscoefficiënt C_t gegeven door

$$C_w = 1 + \frac{1}{6} \text{Re}^{2/3} \quad (45)$$

met Re gegeven door vergelijking (37)

en de vormcoëfficiënt C_d gegeven door

$$C_d = 1 + 0.013 \left(\frac{\rho_a (v_w - v_a)^2 d}{\sigma} + 2.28 \right)^{2.12} - 0.0746 \quad (46)$$

Gebruik makend van de totale tijdsafgeleide en het feit dat de partiele tijdsafgeleide van de druppelsnelheid gelijk is aan nul (op één bepaalde hoogte is de valsnelheid constant) geeft (v_w is positief gedefinieerd in negatieve richting van h)

$$\frac{dv_w}{dt} = \frac{\partial v_w}{\partial t} - v_w \frac{\partial v_w}{\partial h} = -v_w \frac{\partial v_w}{\partial h}$$

zodat we vergelijking (42) kunnen schrijven als

$$-m_{drup} v_w \frac{\partial v_w}{\partial h} = m_{drup} g - 3\pi d\mu(v_w - v_l)C_t C_d \quad (47)$$

Een discrete vorm daarvan wordt gegeven door:

$$-m_{drup} v_w \frac{v_w(h) - v_w(h - dh)}{dh} = m_{drup} g - 3\pi d\mu(v_w - v_l)C_t C_d \quad (48)$$

ofwel

$$v_w(h-dh) = v_w(h) + \frac{dh}{v_w} \left(g - \frac{18\mu(v_w - v_l)C_l C_d}{\rho_w d^2} \right) \quad (49)$$

where the second term at the right hand side is evaluated at height h (explicit differencing).

WARMTEOVERDRACHT MET DE WANDEN VAN DE KOELWASSER

Dit is een eerste aanzet voor een model. Ten behoeve van de eenvoud worden de volgende aannamen gedaan:

1. hoge massa-uitwisselingsnelheid tussen water in de cascade en water tegen de wand zodat
 - de temperatuur van de wanden gelijk aan de watertemperatuur in de cascade op die hoogte
 - warmteoverdracht met de wanden direct effect heeft op de temperatuur van het water in de cascade
2. de wanden zijn adiabatisch (geen warmteoverdracht naar de omgeving)
3. de wanden zijn volledig bedekt met een laagje water
4. de advectieve warmteoverdracht van (eventueel) afstromend water wordt verwaarloosd

In feite komt het erop neer dat het oppervlak van het water wordt verhoogd door aanwezigheid van de natte wand.

Met betrekking tot alleen methode 2 zijn de formules als volgt.

Het wandoppervlak per m³ ruimte is gelijk aan:

$$a_{w,wand} = \frac{2(b_w + l_w)}{b_w l_w} \quad (50)$$

waarin l_w en b_w respectievelijk de lengte en breedte van de koelwasser.

Voor het stoftransport als gevolg van verdampen/condenseren per m³ ruimte geldt weer

$$g_{d \rightarrow w, wand} = -g_{w \rightarrow d, wand} = 6.2 \cdot 10^{-6} \cdot a_{w,wand} \cdot \beta_x (p_{d,l}(h) - p_{d,wand}(h)) \quad (51)$$

De vermogensdichtheid van de latente warmteoverdracht, plus de voelbare warmteoverdracht door convectie met de wand, wordt gegeven door

$$e_{w \rightarrow d, wand} = g_{w \rightarrow d, wand} (L_w^0 + c_d T_w) + a_{w,wand} \cdot h_{wand} (T_l - T_w) \quad (52)$$

Deze term dient te worden toegevoegd aan vergelijking (27) en met min-teken aan vergelijking (21), en aan de uitdrukkingen die daaruit voortvloeien.

KOELVERMOGEN VAN DE KLIMAATCASCADE

Het koelvermogen van klimaatcascade met betrekking tot de inkomende lucht is te onderscheiden in een voelbaar en latent deel. Hiervoor worden de volgende formules gehanteerd:

Voelbaar deel:

$$P_{voelbaar} = Aq_l \left(c_l + \frac{\rho_{d,in}}{\rho_l} c_d \right) (T_{l,in} - T_{l,uit}) \quad (53)$$

Latent deel:

$$P_{latent} = \frac{Aq_l}{\rho_l} (L_w^0 + c_d T_{l,uit}) (\rho_{d,in} - \rho_{d,uit}) \quad (54)$$

REFERENTIES

1. Handboek installatietechniek, januari 2002.
2. Mass transfer, A.F. Mills, 2001, ISBN 013032829-4
3. Optimization of Direct-Contact-Spray-Coolers, PhD by Mohamed S. El-Morsi, 2002
4. Heat and Moisture in building envelopes, Prof. dr. ir. M.H. de Wit, jan. 2008
5. Ranz en Marshall 1952, deel 1

MODELTYPEN

Afhankelijk van de mate van gedetailleerdheid zijn op basis van bovenstaande theoretische beschrijving verschillende typen rekenmodellen in te zetten. Deze worden hieronder toegelicht

Type 1a: SMD, constante valsnelheid,

De stof-en warmteoverdracht tussen waterdruppeltjes en lucht op basis van effectieve vergelijkingen voor een spectrum, vgl. (39) en (40). De eindvalsnelheid van een druppeltje met SMD-diameter wordt bepaald en geacht te gelden over de volledige hoogte van de cascade.

Type 1b: SMD, variabele valsnelheid

De stof-en warmteoverdracht tussen waterdruppeltjes en lucht op basis van effectieve vergelijkingen voor een spectrum, vgl. (39) en (40). De valsnelheid van een druppeltje met SMD-diameter wordt hoogteafhankelijk bepaald. Beginsnelheid op te geven.

Type 2a: Per druppelspectrum-bin , constante valsnelheid

De stof-en warmteoverdracht tussen waterdruppeltjes en lucht wordt bepaald per diameter-bin van het druppelspectrum. De eindvalsnelheid van een druppeltje met diameter d (spectrum-bin) wordt bepaald en geacht te gelden over de volledige hoogte van de cascade.

Type 2b: Per druppelspectrum-bin, variabele valsnelheid

De stof-en warmteoverdracht tussen waterdruppeltjes en lucht wordt bepaald per diameter-bin van het druppelspectrum. De valsnelheid van een druppeltje met diameter d (spectrum-bin) wordt hoogteafhankelijk bepaald. Beginsnelheid per spectrum-bin op te geven.

VERGELIJKING RESULTATEN MODELTYPEN

De uitkomsten van de verschillende rekenmodellen worden met elkaar vergeleken om te beoordelen in hoeverre deze gevoelig zijn voor de verschillende aannamen. Hierbij zijn de omstandigheden van de metingen in de proefopstelling van de klimaatcascade als uitgangspunt gekozen.

Karakterisering druppelspectrum

Het druppelspectrum van de FullJet nozzle 3/4GG-3050 is door Spraying Systems Deutschland GmbH bepaald in een gebied van 0 – 4 mm met een binbreedte van 60 μm voor de druppeldiameter. Om dit gemeten spectrum te karakteriseren (en te gebruiken in de modelberekeningen) is het spectrum gefit met een gemodificeerde Rosin-Rammler verdeling. De cumulatieve kansdichtheidsfunctie van deze gemodificeerde verdeling wordt beschreven met:

$$R_{RR}(d) = e^{-\left(\frac{d-d_{\text{cutoff}}}{\bar{d}-d_{\text{cutoff}}}\right)^{\eta_{RR}}} \quad (55)$$

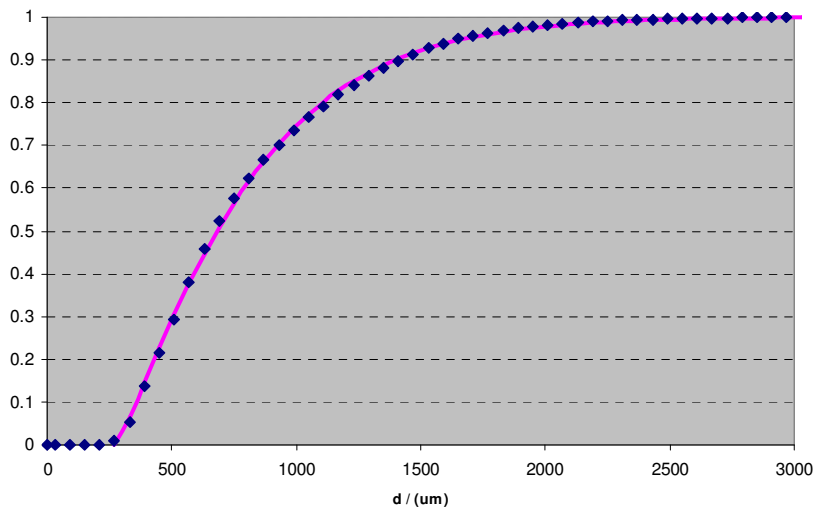
waarin d_{cutoff} de kleinste voorkomende druppeldiameter in het spectrum, \bar{d} een gemiddelde diameter en η_{RR} een exponent. Een kleinste-kwadraten fit van deze parameters aan het gemeten spectrum geeft de volgende waarden:

$$d_{\text{cutoff}} = 270 \mu\text{m}$$

$$\bar{d} = 831 \mu\text{m}$$

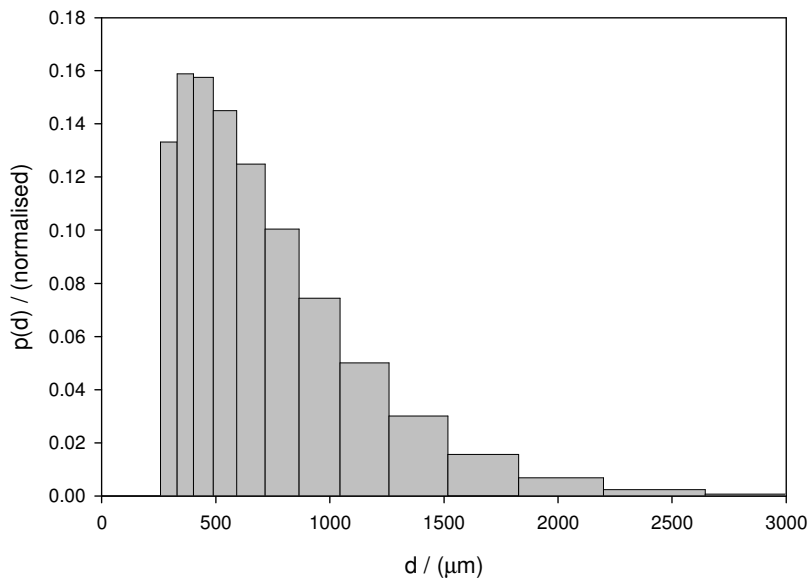
$$\eta_{RR} = 1.194$$

In onderstaande figuur is de gefitte verdeling (magenta lijn) en de gemeten data (blauwe markers) weergegeven.



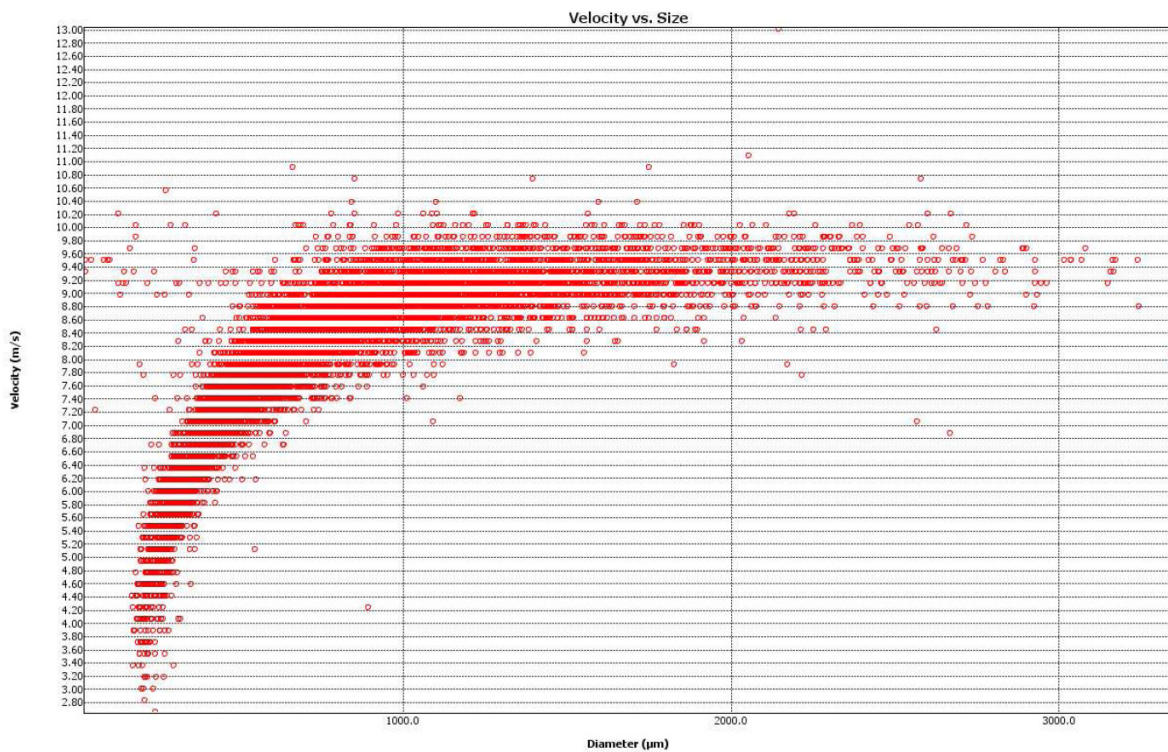
Discreet druppelspectrum in de modelberekeningen

In de type 2 modelberekeningen is het druppelspectrum opgedeeld in 15 bins met variabele binbreedte. In onderstaande figuur is deze opdeling getoond. In deze figuur is het oppervlak van de getoonde staven evenredig met het aantal druppeltjes in de betreffende bin.

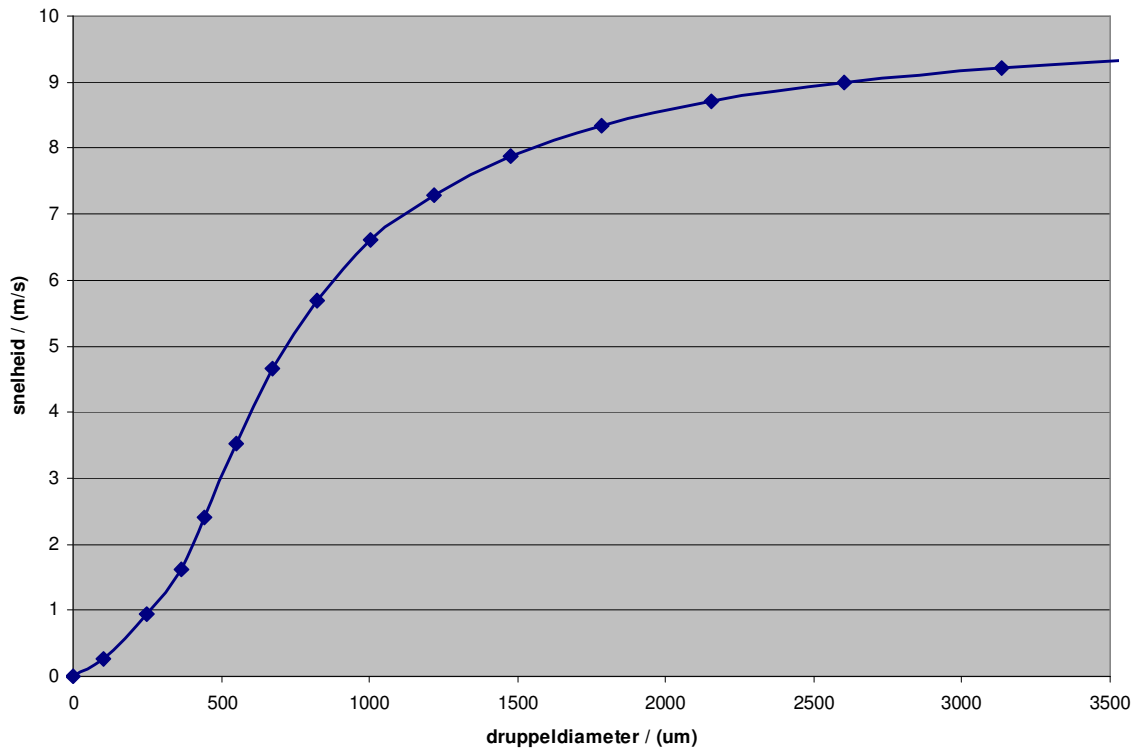


Beginsnelheid druppels

Voor b-type berekeningsvariant moet de beginsnelheid van de druppeltjes worden opgegeven. Op basis van het meetrapport van Spraying Systems Deutschland GmbH, bedraagt de druppelsnelheid op 1 m afstand van de nozzle voor druppeltjes groter dan 1 mm in doorsnede ca. 9 m/s. Kleinere druppels worden over de eerste afstand van 1 m al sterk afgeremd door de wrijving met de lucht. Deze meetresultaten zijn weergegeven in onderstaande figuur



De modelberekening van de druppelsnelheid op 1 m afstand van de nozzle is in onderstaande figuur gegeven.



Er is een duidelijk verschil tussen meting en model voor druppeldiameters kleiner dan 1 mm. De gemeten valsnelheid is in dit gebied aanzienlijk hoger dan berekend. Vooral nog is niet duidelijk wat de achterliggende oorzaak is van dit verschil. Mogelijk dat een break-up in kleinere druppels plaatsvindt in het traject tot 1 m afstand, en niet ter plaatse van de opening van de sproeikop.

In de model berekeningen van de klimaatcascade is voor de beginsnelheid van de druppels voor alle druppeldiameters een waarde van 9 m/s aangehouden.

Modelberekeningen klimaatcascade

De berekeningen met de verschillende modeltypen zijn uitgevoerd voor meetvariant A1 t/m A5 en B1 t/m B5.

In deze berekeningen is een hoogte van de cascade aangehouden **van 5,1 m**. De resultaten staan in onderstaande tabellen.

Het blijkt dat de modellen onderling niet zo veel verschillen. Het eenvoudigste model, type 1a, lijkt nog de beste resultaten te geven.

Gebouw / Klimaattype ALPHA							
Variant >			A1	A2	A3	A4	A5
Meetsessie Peutz >			45	40a	39	36	44a
Figuur >			17.13	17.14	17.15	17.16	17.17
Water/Luchtfactor	R _{w/L}	kg.kg ⁻¹	0,458	0,447	0,431	0,421	0,414
WATER							
Volumedebiet	q _v	dm ³ .h ⁻¹	972	969	975	962	974
Massadebiet	q _m	kg.s ⁻¹	0,270	0,269	0,271	0,267	0,271
Aanvoertemperatuur	θ _{w,in}	°C	12,87	13,19	13,04	12,89	13,02
Afvoertemperatuur	θ _{w,uit}	°C	16,64	15,24	11,52	9,75	4,77
LUCHT							
Volumedebiet	q _v	m ³ .h ⁻¹	1831	1818	1826	1812	1795
Dichtheid	ρ (rho)	kg.m ⁻³	1,16	1,19	1,24	1,26	1,31
Massadebiet	q _m	m ³ .h ⁻¹	2123	2168	2261	2287	2354
Massadebiet	q _m	kg.s ⁻¹	0,590	0,602	0,628	0,635	0,654
Intredeconditie							
Temperatuur	θ _{l,in}	°C	28,07	20,13	10,01	4,87	-4,73
Relatieve vochtigheid	RV	%	58,25	77,97	90,84	101,54	23,44
Vochtinhoud	x	g.kg ⁻¹	13,55	11,51	6,92	5,37	0,61
Uittredeconditie temperatuur							
Meting	θ _{l,uit}	°C	20,08	16,56	10,56	7,80	1,32
Type 1a	θ _{l,uit}	°C	23,07	17,80	10,85	7,28	0,49
Type 1b	θ _{l,uit}	°C	23,35	17,92	10,82	7,16	0,25
Type 2a	θ _{l,uit}	°C	23,23	17,91	10,70	7,01	-0,25
Type 2b	θ _{l,uit}	°C	23,43	17,99	10,69	6,96	-0,35
Uittredeconditie vochtgehalte							
Meting	x	g.kg ⁻¹	13,96	11,44	7,78	6,38	3,87
Type 1a	x	g.kg ⁻¹	12,22	10,88	7,66	6,52	3,28
Type 1b	x	g.kg ⁻¹	12,24	10,89	7,63	6,47	3,16
Type 2a	x	g.kg ⁻¹	12,60	11,04	7,59	6,36	3,03
Type 2b	x	g.kg ⁻¹	12,57	11,03	7,57	6,34	2,96

Gebouw / Klimaatype BETA							
Variant >			B1/1	B2	B4	B3	B5
Meetsessie Peutz >			28	40b	38	34	42b
Figuur			17.6	17.9	17.10	17.11	17.12
Water/Luchtfactor	R _{w/L}	kg.kg ⁻¹	1,164	1,109	1,061	1,049	1,029
WATER							
Volumedebiet	q _v	dm ³ .h ⁻¹	2422	2425	2410	2427	2427
Massadebiet	q _m	kg.s ⁻¹	0,673	0,674	0,670	0,674	0,674
Aanvoertemperatuur	θ _{w,in}	°C	12,85	13,03	12,83	13,10	12,93
Afvoertemperatuur	θ _{w,uit}	°C	15,11	14,37	12,13	11,00	8,50
LUCHT							
Volumedebiet	q _v	m ³ .h ⁻¹	1789	1832	1836	1836	1807
Dichtheid	ρ (rho)	kg.m ⁻³	1,16	1,19	1,24	1,26	1,31
Massadebiet	q _m	m ³ .h ⁻¹	2081	2186	2272	2314	2359
Massadebiet	q _m	kg.s ⁻¹	0,578	0,607	0,631	0,643	0,655
Intredeconditie							
Temperatuur	θ _{l,in}	°C	27,34	20,00	10,08	5,32	-3,70
Relatieve vochtigheid	RV	%	51,88	77,73	101,37	95,27	57,48
Vochtinhoud	x	g.kg ⁻¹	11,74	11,38	7,76	5,21	1,62
Uitredeconditie temperatuur							
Temperatuur	θ _{l,uit}	°C	16,85	15,21	11,60	9,54	5,78
Type 1a	θ _{l,uit}	°C	18,61	15,94	11,57	9,43	5,21
Type 1b	θ _{l,uit}	°C	19,01	16,12	11,51	9,27	4,85
Type 2a	θ _{l,uit}	°C	18,84	16,15	11,42	8,97	4,21
Type 2b	θ _{l,uit}	°C	19,12	16,27	11,39	8,89	4,03
Uitredeconditie vochtgehalte							
Meting	x	g.kg ⁻¹	11,64	10,87	8,38	7,149	5,39
Type 1a	x	g.kg ⁻¹	10,61	10,22	8,48	7,39	5,66
Type 1b	x	g.kg ⁻¹	10,61	10,35	8,45	7,32	5,52
Type 2a	x	g.kg ⁻¹	11,10	10,48	8,38	7,13	5,21
Type 2b	x	g.kg ⁻¹	11,06	10,48	8,37	7,10	5,15