

TNO PUBLIEK

**Buildings, Infrastructure &
Maritime**Leeghwaterstraat 44
2628 CA Delft
Postbus 6012
2600 JA Delftwww.tno.nl

T +31 88 866 22 00

TNO-rapport**TNO 2021 R11313 | Eindrapport****Onderzoek naar oplossingen voor lokale
all-electric klimatisering in ziekenhuizen**

Datum	16 augustus 2021
Auteur(s)	R.A. Bezemer, TNO L.G. Bakker, TNO S.P.M. van Heumen, TNO J.J. Koot, TNO A.A.L. Traversari, TNO R. Nijhuis, Daikin P. Noom, Kropman P. Ruiter, AAF S.C. Hamm, UMC Groningen S.G. de Jong, Alrijne Zorggroep G.B. Middelkoop, UMC Utrecht
Aantal pagina's	102 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	11
Opdrachtgever	RVO
Projectnaam	Ontwikkeling van een systeem voor een gasloos ziekenhuis met lokale klimatisering
Projectnummer	060.32420

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2021 TNO

TNO PUBLIEK

Inhoudsopgave

1	Inleiding en algemene projectgegevens	3
1.1	Aanleiding	3
1.2	Probleemstelling	3
1.3	Doelstellingen project	4
1.4	Innovatieve aspecten	5
2	Werkwijze	7
2.1	WP1&2 Context en randvoorwaarden voor toepassing; Programma van eisen	7
2.2	WP3&4 Functioneel ontwerp; toetsing aan het PvE	8
2.3	WP5&6 Detail systeemontwerp; toetsing, bijstelling en go/no go beslissing	9
2.4	WP7 Realisatie van het systeem als 'proof of concept'	9
2.5	WP8 Simulatietesten	9
3	Resultaten ontwerpproces en uitwerking van het systeem als 'proof of concept'	17
3.1	Context en randvoorwaarden voor toepassing (WP 1)	17
3.2	Programma van eisen en wensen (WP 2)	17
3.3	Systeemontwerp (WP 3)	17
3.4	Toetsing systeemconcepten (WP 4)	23
3.5	Gedetailleerd systeemontwerp (WP5)	26
3.6	Toetsing systeemontwerp (WP6)	33
3.7	Bouw van het systeem (WP7)	33
4	Bureautest: werking onderdelen en filterbelasting (WP8)	36
4.1	Opstelling bureautest	36
4.2	MBPC - hardware en interface	36
4.3	Filterbelasting	38
5	Resultaten labtest (WP8)	40
5.1	Testen, evaluatie, bijstellen van het systeem	40
6	Model Based Predictive Control: regeling en onderhoud luchtfilters	46
6.1	Model Based Predictive Control (MBPC)	46
6.2	Model based onderhoud	48
6.3	Vervangingskosten filters in MBPC	48
6.4	Modellen	49
7	Energiebesparing van het systeem	50
8	Inhoudelijke conclusies	55
9	Aandachtspunten doorontwikkeling	56
9.1	Algemeen	56
9.2	Aandachtspunten bij doorontwikkeling	56
10	Ondertekening	58

1 Inleiding en algemene projectgegevens

Algemene gegevens

RVO-projectnummer: 1721203

Projecttitel: Gasloos Ziekenhuis

Penvoerder: TNO

Mede-aanvragers: UMC Groningen

UMC Utrecht

Alrijne Zorggroep

Kropman

Daikin Nederland BV

AAF International BV

Projectperiode: 1 januari 2019 t/m 31 januari 2021

1.1 Aanleiding

Het energieverbruik van ziekenhuizen is met een energiedichtheid van circa 26 $\text{m}^3_{\text{aardgas}}/\text{m}^2_{\text{BVO}}$ per jaar en 123 kWh/ m^2_{BVO} per jaar [Routekaart Verduurzaming van het Zorgvastgoed - Ziekenhuizen, 2019, op basis van verbruiksgegevens CBS, 2016] relatief hoog. Ca. 40% van het elektriciteitsgebruik wordt gebruikt voor de ventilatie en luchtbehandeling van het ziekenhuis. Daarbij maken veel ziekenhuizen nog gebruik van fossiele brandstof (aardgas) voor de productie van stoom, warm water en elektriciteit. Vanuit de doelstellingen in het Klimaatakkoord en de ontwikkeling in de bouwregelgeving (Bijna Energie Neutraal Gebouw, BENG) staat dit ook bij ziekenhuizen bij nieuwbouw en grootschalige renovatie onder druk. Ook ontstaat er een steeds grotere maatschappelijke druk om minder fossiele energie in de zorgsector te gebruiken. Deze trend is niet alleen nationaal maar ook op internationaal niveau zichtbaar (Healthcare without Harm). De directe CO₂-emissie van een ziekenhuis moet volgens het Klimaatakkoord en de Green Deal duurzame zorg 2.0 worden gereduceerd met 49% in 2030 en 95% in 2050 ten opzichte van het peiljaar 1990. Met behulp van een portefeuilleuroutekaart moet een ziekenhuis hiervoor op zoek naar oplossingen om het gasverbruik vergaand te reduceren. Door de vanuit de medische processen gestelde voorwaarden, het centrale en, mede door aanpassingen door de jaren heen, complexe karakter van de huidige klimatiserings- en energiesystemen is het reduceren van de energievraag en de transitie naar een gasloze energievoorziening voor ziekenhuizen een grote uitdaging.

1.2 Probleemstelling

Fossiele brandstoffen

Veel ziekenhuizen in Nederland zijn afhankelijk van fossiele brandstoffen (vooral aardgas). Fossiele brandstoffen worden binnen de ziekenhuizen veelvuldig ingezet voor verwarming en de productie van stoom, warmwater en elektriciteit. Fossiele brandstoffen zijn eindig en voor ziekenhuizen zijn nog geen systemen beschikbaar die geen fossiele brandstoffen vragen, of die kosteneffectief kunnen worden toegepast. Op termijn moeten alternatieve duurzame systemen beschikbaar komen voor de energievoorziening.

Reductie energiegebruik

Studies en energiebalansen van ziekenhuizen, opgesteld ten behoeve van portefeuilleroutekaarten, geven aan dat het energiegebruik van ventilatoren in ziekenhuizen ongeveer 40% ($40 \text{ kWh/m}^2_{\text{vloeroppervlak}}$ per jaar) van het totale elektriciteitsgebruik van ziekenhuizen betreft.

Veranderende omgeving

De context waarbinnen ziekenhuizen functioneren, is aan snelle veranderingen onderhevig, waardoor gebouwen en bouwdelen van ziekenhuizen vrijwel continu muteren. Dit is kostbaar en wordt sterk beperkt door de al aanwezige systemen zoals ventilatiekanalen en leidingen. Hierdoor is het vrijwel onmogelijk om het energiesysteem optimaal in te regelen.

Beperkende invloed van kanalen en leidingen

Bij veel verbouwactiviteiten blijkt niet de bouwkundige constructie (binnenwanden, binnendeuren, plafonds), maar juist de technische infrastructuur (o.a. kanalen en leidingen) een beperkende, kostenbepalende risicofactor te zijn. Daarnaast is deze infrastructuur onderhoudsintensief en leidt tot relatief hoge verliezen (warmte, koude en transportweerstand).

Deze aspecten leiden ertoe dat er behoefte is aan concepten waarbij het energiegebruik wordt gereduceerd en het mogelijk wordt om zonder inzet van fossiele brandstof een ziekenhuis te bedienen met een klimatiseringssysteem dat eenvoudig aangepast kan worden aan het gebruik van de ruimte, met een minimum aan technische infrastructuur.

1.3 Doelstellingen project

Het doel van het project is:

het ontwikkelen van een minimaal 15% energiebesparend decentraal all-electric klimatiseringstoestel, waarmee een 'intelligent' gestuurd en eenvoudig aanpasbaar systeem ontstaat.

Het toestel (een klimatiseringsunit) verzorgt verwarming, koeling en ventilatie en wordt decentraal toegepast, per ziekenhuiskamer. Het toestel moet flexibel ingezet kunnen worden bij een veranderende gebouwindeling.

Met dit systeem wordt beoogd om voor ziekenhuizen kostenefficiënt een energiebesparing ten opzichte van het energiegebruik van het referentiesysteem te realiseren, waarbij tevens een reductie van de CO₂-emissie ontstaat en een belangrijke stap wordt gezet in het gasloos maken van ziekenhuizen. Tevens moet het toestel een goed comfort voor de gebruikers realiseren, gebaseerd op metingen bijvoorbeeld met behulp van CO₂-sensoren. Het ontwikkelde toestel is eenvoudig en flexibel inpasbaar, stelt zichzelf in, past zich optimaal aan de buitenomstandigheden en de comfortwensen aan en heeft een minimale onderhoudsfrequentie. Tevens kunnen onderdelen eenvoudig modulair uitgewisseld worden in geval van storingen. Hierdoor wordt het onderhoud eenvoudiger en is de downtijd zo kort mogelijk.

Bij het bepalen van de besparing wordt als referentie een systeem aangehouden met een centrale warmwatervoorziening middels gasgestookte ketels en warmte uit

een warmtekracht koppeling (WKK)¹ -installatie in combinatie met een centraal luchtbehandelingssysteem waarbij geen vraagsturing plaatsvindt, dus waarbij ventileren, verwarmen en koelen niet plaatsvinden op basis van een daadwerkelijke behoefte. Voor de koeling wordt hierbij uitgegaan van een koelsysteem bestaande uit een absorptiekoelmachine (aangedreven door warmte van de WKK) in combinatie met een mechanische koelinstallatie, Tabel 1. Dit is een typisch systeem voor ca. 80% van de Nederlandse ziekenhuizen.

Tabel 1. Referentiesysteem t.b.v. bepaling energiebesparing.

Opwekker	Systeemrendement	Aandeel
Gasgestookte warmwaterbereider	85% (bovenwaarde)	70%
Restwarmte uit WKK	n.v.t. - brandstof WKK is aan elektriciteitsproductie toegerekend	30%
Mechanische koeling	COP = 3	75%
Absorptiekoelmachine	n.v.t. - brandstof WKK is aan elektriciteitsproductie toegerekend	25%

De geplande resultaten van het project zijn:

- A. Een in het laboratorium getest 'proof of concept' van een all-electric toestel voor het lokaal klimatiseren van een (meerpersoons) patiëntenkamer met een vloeroppervlak van ca. 48 m² exclusief sanitair en een inhoud van 144 m³.
- B. Een adaptief modelgebaseerd regelsysteem dat het toestel automatisch en optimaal kan instellen in een netwerk van toestellen.

1.4 Innovatieve aspecten

De innovatie in dit project vindt plaats op een aantal gebieden:

Systeemontwerp:

Het systeem moet toegepast kunnen worden in een breed scala aan ruimten in ziekenhuizen. De plaatsing is bij voorkeur niet boven het verlaagde plafond in de patiëntenkamer zelf, maar in een kast aan de gangzijde. Dit systeemontwerp is gemakkelijk bereikbaar voor onderhoud en is geluidarm

Onderhoudsindicatie:

Het toestel moet zelf aangeven op welke termijn welk soort onderhoud noodzakelijk is, zodat dit eenvoudig kan worden ingepland. Daarbij moet dit onderhoud minimaal nodig zijn en eenvoudig en snel kunnen plaatsvinden. Daarvoor is het met name belangrijk om vervuiling van filters te beperken.

Regeling:

Het systeem moet automatisch kunnen inregelen/instellen binnen de toegepaste omgeving, leidend tot optimalisatie van de financiële prestaties (energiegebruik en onderhoud) van het gehele systeem. De verschillende lokale toestellen moeten de

¹ Een WKK-installatie, ook wel cogeneratie genoemd, wordt in ziekenhuizen ingezet om een generator aan te drijven en daarmee elektriciteit op te wekken. De warmte die vrijkomt vanuit de gasmotor wordt om een dergelijk systeem economisch interessant te laten zijn ook nuttig ingezet. Vaak zijn deze installaties warmtevraag-gestuurd en komen alleen in bedrijf als er gelijktijdig een warmte- en elektriciteitsvraag is.

mogelijkheid hebben om met elkaar verbonden te zijn, om suboptimalisatie te voorkomen.

2 Werkwijze

De projectuitvoering is vanaf het begin van het project verdeeld in acht werkpakketten, Tabel 2.

Tabel 2. Overzicht werkpakketten in het project.

WP of Fase	Korte beschrijving	Uitvoerders (met namen)	Resultaat	Geplande begin- en einddatum
1	De context en randvoorwaarden m.b.t. klimaat, inpassing en beheer en onderhoud binnen de ziekenhuizen worden in kaart gebracht.	TNO, UMCG, Alrijne, UMCU	Heldere beschrijving van de probleemstelling waarin het systeem moet functioneren	1 JAN 2019 – 15 MRT 2019
2	Opstellen van de specificaties op basis van het programma van eisen (URS) en het toetsen hiervan bij andere ziekenhuizen	TNO, Kropman, Daikin, AAF, UMCG, Alrijne, UMCU	Programma van eisen en wensen	15 MRT 2019 – 1 JUN 2019
3	Genereren van (functionele) systeemconcepten.	Kropman, TNO, Daikin, AAF	Een of meerdere (functionele) systeemconcepten	1 JUN 2019 – 1 SEPT 2019
4	Toetsing van de systeemconcepten aan het Programma van eisen en selectie van een concept.	TNO, Alrijne, Kropman, Daikin, UMCG, UMCU	Een getoetst en vastgelegd systeemconcept/ functioneel ontwerp.	1 JUN 2019 – 1 SEPT 2019
5	Uitwerking van het systeemconcept tot een gedetailleerd systeemontwerp.	Daikin, TNO, Kropman, UMCG, Alrijne, UMCU, AAF.	Gedetailleerd uitgewerkt systeemontwerp	1 SEPT 2019 – 15 NOV 2019
6	Toetsing van het systeemontwerp aan het Programma van eisen en zo nodig bijstellen van het ontwerp. Een go/no beslissing om met de bouw van de regeling en toestel te starten.	Kropman, TNO, UMCG, Alrijne, UMCU	Definitief systeemontwerp	1 SEPT 2019 – 15 NOV 2019
7	Bouwen van een prototype.	Daikin, Kropman, TNO	Functionerend prototype	15 NOV 2019 – 15 FEB 2020
8	Testen, evaluatie prototype en bijstellen van het ontwerp.	TNO, Kropman, Daikin, AAF, Alrijne, UMCG, UMCU	Goed werkend prototype dat in eventuele 2e fase praktijkproef gebruikt kan worden.	15 JAN 2020 – 15 MEI 2020
Alg.	Projectmanagement	TNO		1 JAN 2019 – 30 JUN 2020

De aanpak per werkpakket is hieronder kort weergegeven, inclusief waar in de praktijk afgeweken is van de oorspronkelijk voorziene aanpak (indien van toepassing).

2.1 WP1&2 Context en randvoorwaarden voor toepassing; Programma van eisen

In WP1 is de context beschreven waarbinnen het systeem moet functioneren. De eisen en randvoorwaarden zijn gedefinieerd vanuit het perspectief van de gebruiker. Er is een “ruimtedefinitielijst” opgesteld, die op een eenduidige manier de belangrijkste functionele parameters (klimaat-eisen, drukhiërarchieën, etc.) en ruimtelijke definities (o.a. bouwkundige aspecten) benoemt. Hiermee is een zo volledig mogelijk overzicht verkregen van de informatie die nodig is voor het opstellen van het programma van eisen.

Aan deze contextbeschrijving hebben primair de drie deelnemende ziekenhuizen UMCG, UMCU en het Alrijne ziekenhuis bijgedragen, begeleid door TNO. Om hiertoe te komen, hebben drie bijeenkomsten plaatsgevonden, op 28 maart (tevens kick-off), 19 april en 26 april 2019 (afrondding).

In WP2 is het programma van eisen opgesteld voor zowel het systeem als geheel (klimatiseringstoestel en bijbehorende infrastructuur) als de individuele apparaten daarbinnen. Daaraan hebben alle projectpartners bijgedragen. Belangrijk aandachtspunt hierbij betreft het inpassen van het systeem en de (de)centrale apparaten binnen de complexe omgeving en systemen. De regeling en aansturing van het systeem is hierbij van groot belang voor het totale functioneren van het

systeem. Dit werkpakket is uitgevoerd aan de hand van een gedetailleerd overzicht van 51 onderwerpen. Deze zijn ingedeeld naar 7 categorieën:

1. Systeemeigenschappen
2. Systeemlocatie
3. Installatie & onderhoud
4. Bouwtechnische aspecten
5. Regeling binnenklimaat
6. Gebruikersinterface
7. Model Based Predictive Control software & hardware

Bij het definiëren van de eisen, de beoordelingscriteria en door risicoscores aan de verschillende eisen toe te kennen bij de beoordeling van systeemconcepten zijn de risico's met betrekking tot de patiëntveiligheid en het personeel impliciet ingeschat en meegewogen. Om tot het programma van eisen te komen, hebben twee bijeenkomsten plaatsgevonden, op 26 april (incl. afronding WP1) en 24 mei 2019.

Het resultaat is vastgelegd in een Excel-document, zie bijlage A "TKI Gasloos ziekenhuis – User Requirements definitief".

Bij enkele onderwerpen is er uitsluitend sprake van bepaling van de context, zoals (no 16) de bedoeling dat we vanuit de Green Deal Zorg werken en (48) de afspraak dat de gebruikersinterface op de patiëntenkamer komt. Verder zijn bij nagenoeg alle onderwerpen gebruikerseisen en veelal kwantitatieve prestatie-eisen gesteld, waarvan de prioriteit is aangegeven via de MoSCoW-indeling (Must have / Should have / Could have / Won't have).

2.2 WP3&4 Functioneel ontwerp; toetsing aan het PvE

In WP3 is een functioneel ontwerp van het systeem, de deelsystemen en de onderlinge relaties opgesteld, met een processchema. Dit is een invulling van het Programma van Eisen.

De drie deelnemende bedrijven Kropman, Daikin en AAF hebben primair bijgedragen, met Kropman als WP-leider, in afstemming met TNO en de deelnemende ziekenhuizen in verband met de eisen en inpasbaarheid. Het functioneel ontwerp is tot stand gekomen en besproken tijdens bijeenkomsten op 21 juni, 12 juli, 6 september en 18 oktober 2019.

Tot het functionele ontwerp is gekomen met behulp van een sterk methodische benadering. "Methodisch ontwerpen" is een wetenschappelijke methode om te komen tot een ontwerp, waarbij verschillende fases worden doorlopen. Deze worden geïtereerd zodat onjuistheden of onvolledigheden die het resultaat negatief beïnvloeden, worden geëlimineerd. Bijlage B gaat dieper in op deze ontwerpmethode.

Parallel aan de ontwerpactiviteiten zijn maatregelen geformuleerd om de risico's voor patiënten en personeel te minimaliseren en te beheersen, voor zover die samenhangen met het nieuwe klimatiseringssysteem.

In WP4 hebben de eindgebruikers (ziekenhuizen) onder leiding van TNO het functionele ontwerp getoetst aan het programma van eisen opgesteld in WP2. Daarbij is de Kesselring-methode toegepast, die de mate van voldoen aan

functionele eisen en de realiseerbaarheid inzichtelijk maakt, zie Bijlage B voor verdere toelichting. Trade-off's en keuzes in het functionele ontwerp zijn gemaakt en onderbouwd. Dit is hoofdzakelijk gebeurd in de bijeenkomst op 18 oktober 2019.

2.3 WP5&6 Detail systeemontwerp; toetsing, bijstelling en go/no go beslissing

In WP5 is op basis van het functioneel ontwerp (WP3) en eventuele aanpassingen in de toetsing (WP4) een detailontwerp van het systeem en de individuele componenten opgesteld, onder leiding van Daikin. Daaronder valt ook de regeling/besturing inclusief de bijbehorende intelligentie. Het detailontwerp van het systeem met zijn componenten en de intelligentie was zodanig vormgegeven dat het geheel als 'proof of concept' gebouwd kon worden (in WP7).

In WP6 is onder leiding van Kropman het detailontwerp door de eindgebruikers (deelnemende ziekenhuizen) getoetst m.b.t. het voldoen aan het programma van eisen opgesteld in WP2 en conformiteit aan het getoetste functioneel ontwerp uit WP3 en 4. Afhankelijk van de mate waarin afgeweken wordt van de eisen of van het functioneel ontwerp kan het ontwerp worden aangepast.

Vervolgens hebben de projectpartners op basis van het detailontwerp een besluit genomen over het voldoen van het ontworpen systeem, de componenten en de regeling aan de het programma van eisen en het functioneel ontwerp. Dit besluit is een Go-beslissing geworden, waarna de realisatiefase (WP7) gestart kon worden.

Bijeenkomsten hebben plaatsgevonden op 24 januari, 20 februari, 23 april en 14 mei 2020.

2.4 WP7 Realisatie van het systeem als 'proof of concept'

In de zomer en het najaar van 2020 is in WP7 door de partners Daikin en Kropman op basis van het detailontwerp (WP6) een systeem samengesteld als 'proof of concept'. Gezien de beperkt beschikbare tijd voor het uitvoerig ontwikkelen, testen, certificeren en documenteren van een volwaardig prototype, is in deze fase besloten om in plaats daarvan een 'proof of concept' te maken dat direct getest kon worden. Het systeem is opgebouwd uit bestaande en beschikbare componenten, waarin alle functionaliteiten van het te ontwikkelen prototype aanwezig zijn en waarmee de functionele test 'op tijd' kon worden uitgevoerd.

2.5 WP8 Simulatietesten

2.5.1 Bureautest

Om de werking van de afzonderlijke componenten van het systeem in WP8 te testen, heeft eind augustus 2020 allereerst een bureautest bij Kropman in Rijswijk plaatsgevonden. Daarbij is getest of de regeling van TNO, het gebouwbeheersysteem van Kropman en de overige componenten van het systeem goed functioneren en met elkaar communiceren. Getoetst is of meldingen binnenkomen en of de commando's vanuit de regeling de componenten op de gewenste wijze aansturen. Eventuele functioneringsproblemen konden hiermee nog opgelost worden voordat de definitieve testopstelling in het laboratorium werd geïnstalleerd.

2.5.2 Simulaties functioneren Model Based Predictive Control (MBPC)

De koppeling van de regeling van TNO (MBPC) met het gebouwbeheersysteem van Kropman is getest in bovengenoemde bureautest.

De MBPC is verder getest door meerdere use cases te definiëren en de respons van de MBPC te analyseren (zie bijlage K met figuren) voor:

- 1- Het op tijd starten met verwarmen of koelen (Figuur K7).
- 2- Het vergelijken van de MBPC-geregelde zonwering met een conventioneel geregelde zonwering (neer boven 250 W/m² op de gevel) (figuren K8, K9, K10).
- 3- CO₂ geregelde ventilatie (Figuur K9).
- 4- Energetisch optimale aansturing WTW-bypass (Figuren K9, K10).
- 5- Energetisch optimale toepassing van vrije koeling (Figuren K10, K12).
- 6- Minimalisatie stofconcentraties (Figuren K11, K12).
- 7- Robuustheid van de regeling (pendelgedrag e.d.) (alle figuren).

2.5.3 Labtest

Tijdens de experimenten in de laboratoriumomgeving zijn alle onderdelen van het systeem voor het eerst gecombineerd en is de gehele installatie aangesloten en in bedrijf gesteld. Het doel van de experimenten in de laboratoriumomgeving was tweeledig:

- Valideren van het naar behoren functioneren van het systeem bestaande uit verschillende deelcomponenten, inclusief externe aansturing vanuit het gebouwbeheersysteem InsiteView van Kropman;
- Bepaling van een aantal prestatiekenmerken van het systeem, ter validering van het programma van eisen en als input voor de Model Based Predictive Control (MBPC) regelstrategie.

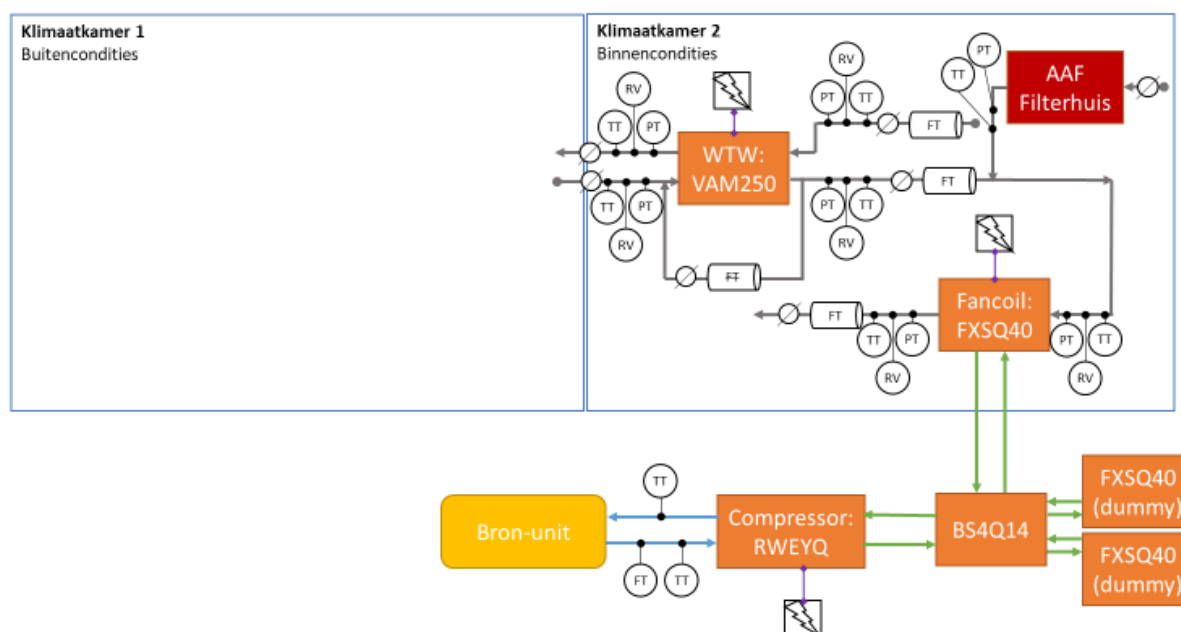
De uitgevoerde experimenten worden in deze paragraaf toegelicht aan de hand van de testopstelling en het testprogramma.

2.5.3.1 Testopstelling

Voor de tests van het systeem is de duoklimaatkamer van TNO gebruikt. Dit zijn twee gespiegelde maar verder identieke klimaatkamers, elk circa 40 m² groot, waarbij de temperatuur en luchtvochtigheid per klimaatkamer individueel en afzonderlijk van elkaar geregeld kunnen worden. Hierdoor kan bijvoorbeeld zowel het binnen- als buitenklimaat worden nagebootst. De klimaatkamers grenzen direct aan elkaar en zijn gescheiden door middel van een geïsoleerde wand. Door openingen in deze wand kunnen kanalen worden aangebracht waardoor het warmteterugwinningssysteem “lucht van buiten” kan aanzuigen.

In Figuur 1 is schematisch de testopstelling van het systeem weergegeven. De opbouw wordt nader toegelicht in hoofdstuk 3.7. Het binnendeel bestaat uit een warmteterugwinnings- (WTW-)toestel VAM250, ventilatorconvactor FXSQ40 (systeem bestaande uit een ventilator en warmtewisselaars voor luchtverwarming en -koeling) en het AAF Filterhuis en is geheel in klimaatkamer 2 geplaatst. Het compressordeel van de warmtepomp (RWEYQ) en de selectiebox (BS4Q14) zijn buiten de klimaatkamer geplaatst. Daarnaast zijn twee ventilatorconvectoren (FXSQ40) buiten de klimaatkamer opgesteld maar niet in bedrijf geweest om het systeem te kunnen laten werken. Deze twee zijn noodzakelijk omdat het compressordeel, om te functioneren, minimaal drie aangesloten ventilatorconvectoren vereist. Deze beperking is door de fabrikant opgelegd.

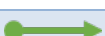
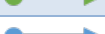
Om de ringleiding uit het ontwerp te kunnen nabootsen, is met een specifieke opstelling (de bron unit) water aan het systeem geleverd met de gewenste temperatuur (15-25 °C, zie testprogramma in 2.5.3.2) en het vereiste debiet (minimaal 3 m³/h). Alle onderdelen zijn vervolgens met luchtkanalen, water- en koudemiddelleidingen volgens ontwerp aangesloten. Ook alle sensoren en meetpunten die vereist zijn voor het testprogramma zijn aangebracht. Een legenda van alle meetpunten en leidingen is opgenomen in Tabel 3.



Figuur 1. Schematische weergave van de 'proof of concept' testopstelling, inclusief de meetpunten in de duoklimaatkamer.

De VAM250, FXSQ40 en het filterhuis zijn gedefinieerd als het 'binnendeel' van het systeem omdat deze delen direct gekoppeld zijn met de te conditioneren ruimte.

Tabel 3. Legenda voor schematische testopstelling.

Symbol	Definitie
	Temperatuuropnemer
	Drukopnemer
	Sensor voor Relatieve (lucht)Vochtigheid
	Flowmeter voor het bepalen van waterdebiet
	Flow tube, voor het bepalen van luchtdebiet door middel van een differentiaaldruk meting door een bekende restrictie (meetflens)
	Vermogensmeter voor elektrisch vermogen
	Handbediende regelkleppen (type irisklep)
	Luchtkanaal
	Koudemiddelleiding
	Waterleiding
	Elektrische verbinding

2.5.3.2 Testprogramma

Het testprogramma had tot doel het bepalen van:

1. De invloed van de filterweerstand op het opgenomen (ventilator)vermogen van het binnendeel (FXSQ40 en VAM250).
2. De energetische prestaties van het gehele systeem.
3. Het effect van de bypass en de stand van het WTW-toestel (VAM250) op het opgenomen (ventilator)vermogen van het binnendeel (VAM250 en FXSQ40).

Resultaten uit de eerste twee tests geven input voor het optimalisatiealgoritme waarbij de vervangingsmomenten van de filters worden bepaald en het optimale punt voor bypass ventileren en warmteterugwinning. De derde test geeft een beeld van de energetische prestaties bij een aantal gedefinieerde buitencondities.

Het opdoen van ervaringen met het systeem als 'proof of concept' tijdens installatie, inregelen en uitvoeren van het testprogramma is een essentieel resultaat van de experimenten in het laboratorium. Dit geeft een goede basis voor de conclusies en aanbevelingen voor verdere ontwikkeling. Resultaten van de experimenten en opgedane ervaringen zijn gerapporteerd vanaf hoofdstuk 4 van dit rapport.

Invloed van filterweerstand op opgenomen elektrisch vermogen van het binnendeel

Bij deze experimenten is bestudeerd wat de invloed is van filterweerstand op het opgenomen elektrische ventilatorvermogen van het binnendeel (VAM250 en FXSQ40). Alle debieten en drukken in de luchtkanalen zijn hierbij gemeten, alsmede het opgenomen elektrische vermogen van het binnendeel.

Hierbij zijn vier verschillende filtercombinaties onderzocht, Tabel 4. Bij combinaties 1 en 2 is een aanvullende filterweerstand gesimuleerd door de klep aan de inlaatzijde van het filterhuis te sluiten, waardoor per stap 20 Pa extra (filter)weerstand wordt toegevoegd. De filterweerstand wordt bepaald door het drukverschil tussen de druk in de klimaatkamer en de uitlaatzijde van het filterhuis te meten. De beschreven experimenten worden uitgevoerd voor drie ventilatiestanden van de ventilatorconvactor (L = low, M = medium en H = high).

Tabel 4. Filtercombinatie voor test naar effect van filterweerstand op opgenomen ventilatorvermogen.

Filter-combinatie	Omschrijving	Filters
1.	In een vervuilde omgeving moeten de filters capaciteit hebben om stof in het filter op te kunnen slaan, waarbij de stijging van de weerstand zo laag mogelijk is.	1 ^e trap DriPak NX+ EPM1 65% 2 ^e trap VariCel V XLE, F9 EPM1 80%
2.	In een minder vervuilde omgeving kan 1 deeltjesfilter de stof opvangen. Rendement is hoog i.v.m. de gewenste reinheid van de ruimte. Het filter heeft voldoende stofvangcapaciteit.	1 ^e trap DriPak NX, EPM1 85%
3.	In een minder vervuilde omgeving met deeltjesfilter en chemisch (koolstof) filter.	1 ^e trap DriPak NX, EPM1 85% 2 ^e trap VariSorb XL, EPM2,5 50%
4.	Alleen het chemisch (koolstof) filter met voorfilterlaag.	1 ^e trap VariSorb XL, EPM2,5 50%

Het viel niet binnen de scope van de laboratoriumtest om met een gedefinieerde hoeveelheid stof het filter te belasten en het fractionele rendement van de filters te meten. Wanneer in twee trappen filters worden geïnstalleerd, wordt het niet inzichtelijk wat de individuele verhoging is, omdat door het smoren van de klep de flow lager wordt en de weerstand van het filter dus ook lager. Dat zou beperkte informatie opleveren voor het model, maar heeft wel effect op het energieverbruik en de beschikbare opvoerhoogte van de ventilator. Deze gegevens zijn van belang voor het voorspellende filtermodel. Het model zelf kan gevoed worden door de testgegevens van de betreffende filters. In de praktijk komen deze waarden uit de metingen tijdens het gebruik.

Het chemisch (koolstof) filter is in de laboratoriumopstelling niet beproefd op VOC (Vluchtige Organische Componenten), ammonia of zuren. Alleen de weerstand is gemeten.

Bovenstaande testbeschrijving leidt voor het vaststellen van het effect van de filterweerstand op het opgenomen elektrische vermogen van de ventilatoren tot de testmatrix in Tabel 5.

Tabel 5. Testmatrix voor het vaststellen van het effect van de filterweerstand op het opgenomen elektrische vermogen van de ventilatoren. Elke regel in deze tabel beschrijft de condities voor één test.

Testnr.	Filter-combinatie	Ventilator FXSQ40	Ventilator VAM250	Aanvullende filterweerstand
1	1	H	L	0
2	1	H	L	+20 Pa per test, totdat 100 Pa aanvullende filterweerstand is aangebracht of het debiet door de ventilatorconvactor onder de 300 m³/h zakt
3	1	M	L	0
4	1	M	L	+20 Pa per test, totdat 100 Pa aanvullende filterweerstand is aangebracht of het debiet door de ventilatorconvactor onder de 300 m³/h zakt
5	1	L	L	0
6	1	L	L	+20 Pa per test, totdat 100 Pa aanvullende filterweerstand is aangebracht of het debiet door de ventilatorconvactor onder de 300 m³/h zakt
7	2	H	L	0
8	2	H	L	+20 Pa per test, totdat 100 Pa aanvullende filterweerstand is aangebracht of het debiet door de ventilatorconvactor onder de 300 m³/h zakt
9	2	M	L	0
10	2	M	L	+20 Pa per test, totdat 100 Pa aanvullende filterweerstand is aangebracht of het debiet door de ventilatorconvactor onder de 300 m³/h zakt
11	2	L	L	0
12	2	L	L	+20 Pa per test, totdat 100 Pa aanvullende filterweerstand is aangebracht of het debiet door de ventilatorconvactor onder de 300 m³/h zakt
13	3	H	L	0
14	3	M	L	0
15	3	L	L	0
16	4	H	L	0
17	4	M	L	0
18	4	L	L	0

Energetische prestaties van het gehele systeem

De energetische experimenten hebben tot doel het bepalen van het maximale koel- en verwarmingsvermogen van de ventilatorconvactor. Tevens wordt de efficiëntie van het WTW-toestel bepaald. Hierbij wordt uitgegaan van het systeem als geheel. Het bepalen van de energy efficiency ratio (EER) van de warmtepomp (het geleverde koel- of verwarmingsvermogen ten opzichte van de opgenomen elektrische energie) valt buiten de scope van deze experimenten: het gebruik van slechts één aangesloten systeem (FXSQ40) op de compressor-unit (RWEYQ) waar ten minste 4 systemen op moeten zijn aangesloten voor een juiste werking is niet representatief voor de werkelijke efficiëntie in de praktijk. De reden hiervoor is tweeledig:

- De compressor werkt bij inzet van slechts één afgiftetoestel op een zeer laag modulatie-niveau, waardoor deze in een ongunstig werkgebied opereert.

- Bij gebruik van meerdere afgiftetoestellen is het mogelijk dat er warmte uitwisseling tussen de toestellen plaatsvindt, waardoor de inzet van een enkele ventilatorconvactor niet representatief is voor de praktijk.

De metingen zijn uitgevoerd bij twee zomercondities en twee wintercondities, Tabel 6.

Tabel 6. Testcondities voor bepaling thermische prestaties, met T = temperatuur en RV = relatieve luchtvochtigheid. Elke regel beschrijft de condities voor één experiment.

Testnr.	Seizoen	Buitenconditie		T [°C]	Binnenconditie		T ringleiding [°C]
		T [°C]	RV [%]		RV [%]	Thermostaat-instelling [°C]	
1	Winter	-7	60	22,5	40	32	15
2	Winter	5	86,6		60	16	25
3	Zomer	35	32,4		40		
4	Zomer						

De binnenconditie wordt gedefinieerd door het programma van eisen. Voor de buitenconditie is een extreem warme en een zeer koude dag gekozen. Daarnaast is nog een frequent voorkomende winterdag uit het standaard referentiejaar (NEN5060) gekozen waarbij de buitentemperatuur 5°C is. Ten slotte is een tweede zomerconditie met een lagere luchtvochtigheid binnen toegevoegd. De luchtvochtigheden voor de buitenconditie zijn representatief voor de dagen waarop de betreffende temperaturen voorkomen. De thermostaat is ingesteld op de maximale verwarmings- of koeltemperatuur, om zeker te zijn dat het maximale koel- of verwarmingsvermogen wordt geleverd. De temperatuur van de ringleiding is ook afgestemd op het seizoen. Hierbij is een worst case benadering aangehouden waardoor in de winter wordt uitgegaan van de minimale temperatuur (15°C) en in de zomer van de maximale temperatuur (25°C) in de ringleiding die kan/mag optreden conform het programma van eisen.

De tijdens de experimenten gebruikte luchtdebieten zijn weergegeven in Tabel 7. De waarden voor deze luchtdebieten zijn ingesteld bij functionerende ventilatoren van zowel WTW-unit als de ventilatorconvactor bij de zomerconditie. Debieten kunnen tijdens experimenten variëren, bijvoorbeeld door veranderingen van de luchttemperatuur waardoor de soortelijke massa van de lucht varieert, door condensatie van waterdamp op de warmtewisselaar van de ventilatorconvactor in koelbedrijf, of door de regeling.

Tabel 7. Luchtdebieten als startpunt van de energetische tests zonder koelen/verwarmen.

Debiet	Waarde [m ³ /h]	Verklaring
Aanvoer WTW	134	Maximaal debiet door aanvoertak dat op de laagstand van het WTW-toestel werd behaald (paragraaf 0).
Afzuiging WTW	121	Maximaal debiet door afzuigtak dat op de laagstand van het WTW-toestel werd behaald (paragraaf 0). Een lager afzuigdebiet dan aanvoerdebiet werd als representatief beschouwd i.v.m. aanwezigheid van andere afzuigpunten in patiëntenkamer (toilet/badkamer).
Ventilatorconvector	701	Ontwerpconditie.
Recirculatie over WTW	12,8	Circa 10% van aanvoerdebiet

Bij aanvang van elk experiment worden de gewenste condities ingesteld en wordt gewacht totdat alle gemeten temperaturen stabiel zijn. Vanaf dit moment wordt gedurende één uur data verzameld met een meetfrequentie van elke 10 seconden. Deze data wordt gemiddeld over de tijd en gebruikt om de energetische prestaties te bepalen. Bij de koeltest (conditie zomer) wordt ook de hoeveelheid en temperatuur van het condensaat bepaald, om een nauwkeurigere berekening van de latente koeling mogelijk te maken.

Effect van bypass en warmteterugwinningstand op het opgenomen ventilatorvermogen van het WTW-toestel

Het WTW-toestel zal normaal gesproken warmte of koude en vocht terugwinnen uit de afvoerlucht en daarmee de aanvoerlucht opwarmen of koelen. Het toestel kan echter ook in bypass-mode fungeren om “bevriezing” van het vocht in de afgevoerde luchtstroom en daarmee het geheel of gedeeltelijk blokkeren van de luchtstroom door de warmtewisselaar te voorkomen. In deze situatie wordt de uitlaatlucht *niet* langs de warmtewisselaar geleid, maar direct naar buiten afgevoerd. Dit geeft een extra regelmogelijkheid aan de slimme regeling. Voor de optimalisatiestrategie is het wel belangrijk inzicht te hebben in het effect van deze bypass op het debiet en/of opgenomen ventilatorvermogen.

Bij het testprogramma wordt de ventilatorconvector alleen op de hoogste ventilatorstand gebruikt. De ventilatorstand en de ventilatiemodus (stand van de bypass) op het WTW-toestel (VAM250) worden gevarieerd volgens Tabel 8. Verder worden de filterconfiguratie en de nominale debieten gebruikt zoals aangegeven in de voorgaande paragraaf.

Tabel 8. Ventilatorstand en ventilatiemodus

Ventilator FXSQ40	Ventilator VAM250	Ventilatiemodus
H	L	Bypass
H	L	WTW
H	H	Bypass
H	H	WTW

3 Resultaten ontwerpproces en uitwerking van het systeem als ‘proof of concept’

Dit hoofdstuk beschrijft per werkpakket de resultaten van WP 1 t/m 7. Daarbij worden de belangrijkste knelpunten en dilemma's weergegeven die gedurende de uitvoering zijn opgetreden, evenals besluiten met hun onderbouwing. Veelal zijn de resultaten opgeleverd in de vorm van documenten. Die zijn bij dit rapport opgenomen als bijlagen.

3.1 Context en randvoorwaarden voor toepassing (WP 1)

Dit werkpakket is ingevuld vanuit het perspectief van de gebruikers, de drie ziekenhuizen. Dat heeft geleid tot een overzicht van relevante parameters waaraan eisen zijn gesteld of wensen kenbaar gemaakt. Daarmee is de context gedefinieerd waarbinnen het systeem moet gaan functioneren.

Deze activiteiten hebben al snel het karakter gekregen van een opstap naar WP2, het definiëren van het programma van eisen. De vastlegging van context en randvoorwaarden is daardoor samengegaan met de vastlegging van het PvE, dat onder WP2 gerapporteerd wordt.

3.2 Programma van eisen en wensen (WP 2)

Het resultaat van het in paragraaf 2.1 beschreven proces is vastgelegd in een Excel-document, zie bijlage A “TKI Gasloos ziekenhuis – User Requirements definitief”. Deze bevat een lijst met 51 eisen en wensen.

Bij enkele onderwerpen is er uitsluitend sprake van bepaling van de context, zoals de bedoeling dat we vanuit de Green Deal Zorg werken (no. 16) en de afspraak dat de gebruikersinterface op de patiëntenkamer komt (no. 48). Verder zijn bij nagenoeg alle onderwerpen gebruikerseisen en veelal kwantitatieve prestatie-eisen gesteld, waarvan de prioriteit is aangegeven via de MoSCoW-indeling (Must have / Should have / Could have / Won't have).

3.3 Systeemontwerp (WP 3)

3.3.1 Werkwijzebepalende fase

Naar aanleiding van het PvE is er door de bovenstaande stappen te doorlopen een morfologisch schema opgesteld (bijlage C). Dit schema geeft de verschillende functies weer, zoals: ventilatie, ontvochtigen, bevochtigen, etc. Alle eisen vanuit het PvE zijn gekoppeld aan de verschillende functies. Per functie zijn de mogelijke oplossingsvarianten weergegeven. Het gerealiseerde morfologisch overzicht geeft een overzicht van de verschillende functies, eisen en oplossingen.

3.3.2 Keuzebepalende fase

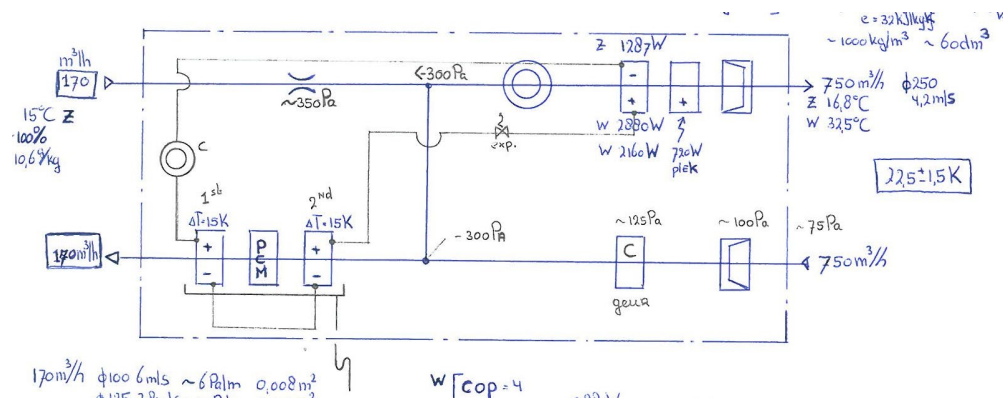
In de detailleringfase zijn de alternatieve oplossingen getoetst op hun prestaties. Op basis hiervan zijn mogelijke combinaties van oplossingen gegeven die uiteindelijk hebben geleid tot de volgende zes concepten voor de klimatiseringsunit:

1. Variant 1
2. Variant 2
3. Variant 3

4. Variant 4 (warmtepomp)
5. Variant 5 (WTW-unit)
6. Variant 6

3.3.2.1 Variant 1

Het systeem is uitgelegd om lokaal te koelen, verwarmen en ventileren. In verband met ERP (Energy-Related Products) regeling (warmteterugwinning), bevochtiging (beheersing legionella), ontvochtiging (minimaliseer condensatie) en voorbehandeling (capaciteitsreductie en filtratie) wordt het ventilatiedeel (170 m³/h) centraal uitgevoerd. Figuur 2 geeft variant 1 schematisch weer.



Figuur 2. Schematische weergave van variant 1.

Lokaal (decentraal) kan het systeem aanvullend koelen en verwarmen door middel van een (omkeerbare) koelmachine. Het piekvermogen bij verwarmen wordt uitgevoerd door middel van een elektrische (weerstand)verwarming. Omdat het ventilatiedeel gering is, is het beperkt mogelijk om overtollige energie hierin af te voeren. Daarom het voorstel om dit in 2 stappen te doen waarbij de 2^e stap door middel van PCM (Phase Change Materials) wordt gedempt. Op basis van een piekvraag van 3 uur is circa 2 x 55 kg PCM noodzakelijk (i.v.m. verschillende temperatuurtrajecten). Het systeem is all-electric (stekkerklaar) en vraagt voor normaal gebruik alleen een condensafvoer aan de afvoerzijde van de lucht. De unit is voorzien van een filteropstelling. De koeler krijgt een condensafvoer voor calamiteiten (b.v. nat reinigen van de ruimte). In verband met het gewicht zal deze unit opgedeeld moeten worden waarbij de PCM los geplaatst kunnen worden.

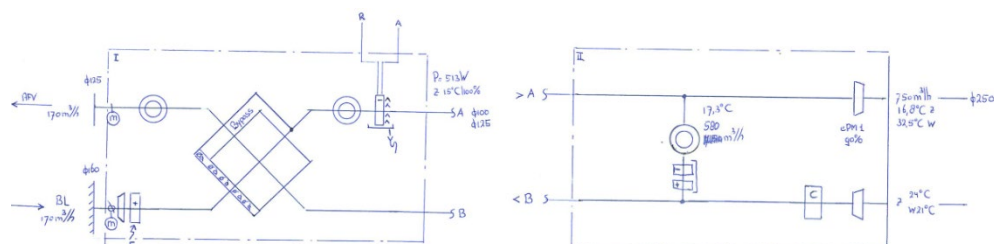
Benodigde externe voorzieningen:

- 1x elektra voedingspunt;
- 1x condensafvoer;
- centraal luchttransportsysteem.

3.3.2.2 Variant 2

Het systeem is geheel lokaal (decentraal). Dit betekent dat per kamer twee buitengeveldoorvoeringen noodzakelijk zijn om wederzijdse beïnvloeding en contaminatie te voorkomen. Het systeem heeft een eigen warmteterugwinvoorziening (170 m³/h) met een elektrische (weerstands)verwarming om dichtrijpen van de kruisstroomwisselaar te voorkomen. Deze unit koelt (en condenseert) en bevochtigt lokaal. De bevochtiging moet in verband met legionellabeheersing en infrastructuur nog verder worden uitgewerkt.

In het WTW-deel wordt de lucht centraal gekoeld of verwarmd via een gecombineerde lucht/water warmtewisselaar. Figuur 3 geeft variant 2 schematisch weer.



Figuur 3. Schematische weergave van variant 2.

In het recirculatiedeel wordt een ventilator geplaatst voor het luchtdebiet voor koelen en/of verwarmen en dit deel is in feite een “standaard” ventilatorconvector. De energie komt van een centrale energiecentrale. De unit is voorzien van een filteropstelling. Het is een samenstel van beproefde technieken en is eenvoudig in opzet qua ontwerp, onderhoud en beheer.

Benodigde externe voorzieningen:

- 1x elektra aansluiting;
- 1x condensafvoer;
- 2x GKW aansluiting;
- 2x CV aansluiting;
- 1x water t.b.v. bevochtiging;
- geveldoorvoeren t.b.v. lucht toe- en afvoer.

3.3.2.3 Variant 3

Het systeem is uitgelegd om centraal en lokaal te koelen, verwarmen en ventileren. In verband met de ERP-regeling (warmteterugwinning), bevochtiging (beheersing legionella), ontvochtiging (minimalisering condensatie) en voorbehandeling (capaciteitsreductie en filtratie) wordt het ventilatiedeel (170 m³/h) centraal uitgevoerd.

In het recirculatiedeel wordt een ventilator geplaatst voor het luchtdebiet voor koelen en/of verwarmen en dit deel is in feite een “standaard” ventilatorconvector. De energie komt van een centrale energiecentrale. De unit is voorzien van een filteropstelling. Het is een samenstel van beproefde technieken en is eenvoudig in opzet qua ontwerp, onderhoud en beheer.

Benodigde externe voorzieningen:

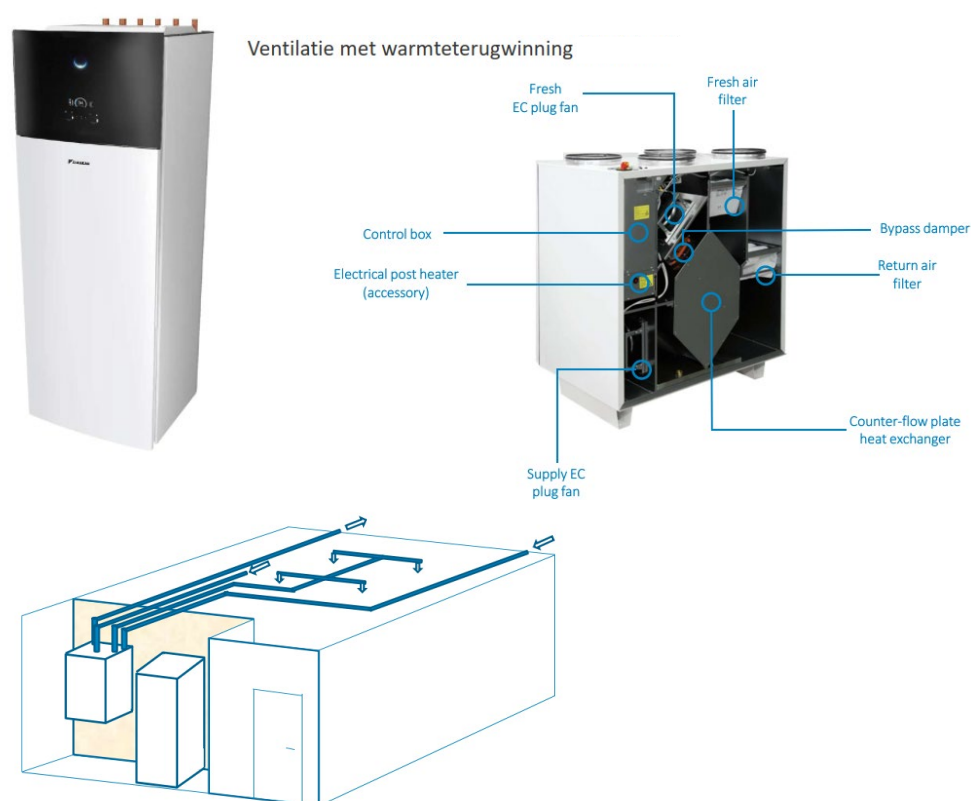
- 1x elektra aansluiting;
- 1x condensafvoer;
- 2x GKW aansluiting;
- 2x CV aansluiting;
- centraal luchtbehandelingssysteem;
- bevochtiging (lokaal) n.v.t.

3.3.2.4 Variant 4 (warmtepomp)

Deze variant is een combinatie van een Altherma Geo 3 warmtepomp en een nader te ontwerpen WTW-unit, Figuur 4. De Altherma Geo 3 is een nieuwe

doorontwikkelde water-water warmtepomp voor lage temperatuur verwarming en actieve koeling. Met de beschikbare capaciteiten kunnen tot maximaal drie patiëntenkamers aangesloten worden. De warmtepomp is leverbaar in 8 kW en 10 kW (thermisch vermogen) en de keuze voor het afgiftesysteem in de patiëntenkamer is nog nader te bepalen. De techniek is beproefd en betreft een lokaal 'stekkerklare' warmte- en koude opwekker die aangesloten dient te worden op een centrale watervoerende ringleiding. Tevens is er een mogelijkheid om tot 180 liter warmtapwater te bereiden. Voordelen zijn hoge rendementen (ook in deellast) en het zeer lage geluidsniveau.

Voor de ventilatie inclusief filtratie wordt een nader te ontwerpen/selecteren WTW-unit toegepast in staande uitvoering per patiëntenkamer, zoals in variant 5. In de WTW-unit dient een waterverwarming/koelblok aangebracht te worden dat aangesloten wordt op de lokale warmtepomp.



Figuur 4. Variant warmtepomp (variant 4) met WTW-unit (variant 5).

Benodigde externe voorzieningen:

- 1x elektra aansluiting 3~/50/400;
- 1x waterzijdige ringleiding -10~30°C evt. met glycol.

3.3.2.5 Variant 5 (WTW-unit)

Naast de warmtepomp zoals in variant 4 is een ventilatie-unit voorgesteld met warmteterugwinning die per patiëntenkamer geplaatst kan worden. Deze unit is vergelijkbaar met een professionele luchtbehandelingskast en geschikt voor staande opstelling. In de WTW-unit kan een koel- en verwarmingsblok geplaatst worden die waterzijdig aangesloten wordt op de naastgelegen warmtepomp.

Tevens is de WTW-unit ook stekkerklaar en eenvoudig te plaatsen, waarbij lucht via

de geveldoorvoer toe- en afgevoerd kan worden. Bij toepassing van de WTW is er geen centrale luchtbehandelingskast benodigd. Er zijn (nog) geen voorzieningen meegenomen voor bevochtiging. CO₂-regeling en bypass regeling voor vrije koeling zijn wel mogelijk. De warmtepomp betreft een mono-block en kan zonder f-gas handelingen geplaatst worden (koudemiddel betreft 1,7 kg R-32).

Benodigde externe voorzieningen:

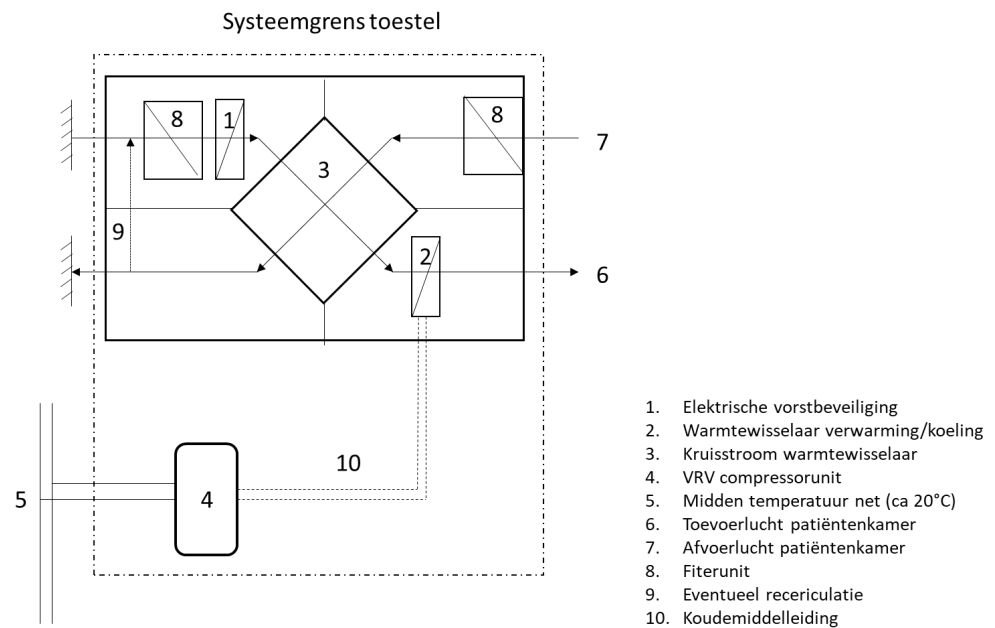
- 1x elektra aansluiting 1~/50/230;
- 1x condensafvoer;
- geveldoorvoeren t.b.v. luchttoe- en afvoer;
- roosters, dempers, inregelkleppen;
- bevochtiging (lokaal) n.v.t.

3.3.2.6 Variant 6

Dit concept bestaat uit een gemodificeerde warmteterugwin unit (WTW-unit) en een aangepaste variable refrigerant flow (VRF) of volume (VRV) systeem, Figuur 5.

Het VRV-systeem onttrekt koude of levert warmte aan de luchtstroom (SUP) die aan de patiëntenkamer wordt toegevoerd. Afhankelijk van de capaciteit van het VRV-systeem kunnen één of meerdere WTW-units met geïntegreerde (DX) warmtewisselaars op één VRV-systeem worden aangesloten, dus kunnen één of meerdere patiëntenkamers apart worden gekoeld of verwarmd. Omdat de temperatuur van het distributiesysteem nagenoeg gelijk is aan de omgevingstemperatuur in het gebouw zullen de verliezen beperkt zijn waardoor isoleren vermoedelijk niet noodzakelijk is. De koelleidingen dienen geïsoleerd te worden volgens de specificaties van de fabrikant.

Per ruimte wordt er een kanaal binnendeel geplaatst dat is aangesloten op het VRV-systeem en de ruimtelucht circuleert en verwarmt of koelt. Aan de achterzijde van de recirculatie-unit wordt verse lucht vanuit de WTW-unit toegevoerd. De binnendelen zijn aangesloten op een watergekoelde VRV-warmtepomp. De warmtepompen zijn aangesloten op een centrale ringleiding en wisselen onderling ook warmte uit. Deze installatie kan modulair opgebouwd worden waardoor er geen beperkingen zijn aan de systeemgrootte.



Figuur 5. Schematische weergave variant 6.

De WTW-unit is voorzien van ventilatoren met een hoge efficiency en kan door de geringe benodigde luchthoeveelheid relatief beperkt in omvang worden. In de WTW-unit wordt een groot deel secundaire lucht (SEC) gebruikt, slechts de minimale hoeveelheid verse buitenlucht (ODA) wordt toegevoerd om een gezond binnenklimaat te realiseren.

In geval dat de warmtewisselaar dreigt dicht te vriezen komt de elektrische voorverwarming in bedrijf.

Benodigde voorzieningen:

- 1x elektra aansluiting;
- 1x condensafvoer;
- geveldoorvoeren t.b.v. lucht toe- en afvoer;
- bevochtiging (lokaal) n.v.t.;
- ringleiding als bron voor het systeem.

3.3.2.7 Filterkeuze

Het morfologische schema van de filterkeuze is weergegeven in bijlage D.

De keuze van het filter is vanuit het morfologisch schema bepaald. Er is gekozen voor een filter waarmee niet alleen de vaste deeltjes uit de luchtstroom worden gefilterd maar ook de chemische verontreiniging (geur) die door de patiënten, reinigingsmiddelen of medicijnen aan de lucht wordt afgegeven. De geurbelasting die verwacht wordt is afkomstig van urine, fecaliën en lichaamslucht.

In het schema is rekening gehouden met een combinatiefilter waarin de filterfuncties voor fijnstof en geuren zijn geïntegreerd, maar ook met de mogelijkheid van twee afzonderlijke filters. De keuze hiervan wordt beïnvloed door de aanwezige contaminatie, de gewenste standtijd en energieverbruik van de ventilator.

De totale kosten van het filter worden bepaald door:

- Aanschafprijs van het filter.
- Montage van het filter.
- Drukval over het filter (energieverbruik ventilator).
- Levensduur (drukstijging in tijd door stofbelasting).
- Demontage en filter afvoerkosten.

Door het filter continu in tijd te monitoren kan het “ideale” wisselpunt van het filter bepaald worden. Deze informatie, die in de tijd gegenereerd wordt, leidt tot optimalisatie van de filterkeuze. Bij een lage stofbelasting kan een filter met een hoog rendement maar lagere stofvangcapaciteit geselecteerd worden en kan een combinatie filter de beste keuze zijn. Bij een hogere stofbelasting of een groot verschil in standtijd tussen het chemische filter en het deeltjes filter heeft het de voorkeur om beide filters te splitsen.

Om meer grip te krijgen op de belasting van het filter in een patiëntenkamer zijn er voor de testfase in WP8 sensoren geplaatst in twee ziekenhuizen (zie hoofdstuk 4).

3.4 Toetsing systeemconcepten (WP 4)

Alle geselecteerde structuuro oplossingen zijn getoetst en vergeleken met elkaar. De toetsing en de zwaarte van een bepaalde eis zijn bepaald aan de hand van het PvE. De zwaarte van de eis is weergegeven door middel van weegfactoren. Door het toekennen van een waarde aan de verschillende oplossingen ontstaat er een ranking die zichtbaar maakt welke keuze de optimale oplossing is.

Naast de morfologische schema's is er ook een overzicht gegenereerd met de verschillen tussen de varianten op de essentiële (PvE) onderdelen, Tabel 9. Daarbij zijn de weegfactoren per onderdeel uit het PvE gezamenlijk met het gehele projectteam vastgesteld, Tabel 10.

Tabel 9. Overzicht met verschillen tussen de zes varianten op essentiële eisen, en de beoordeling (slecht --; matig -; neutraal 0; goed +; uitstekend ++).

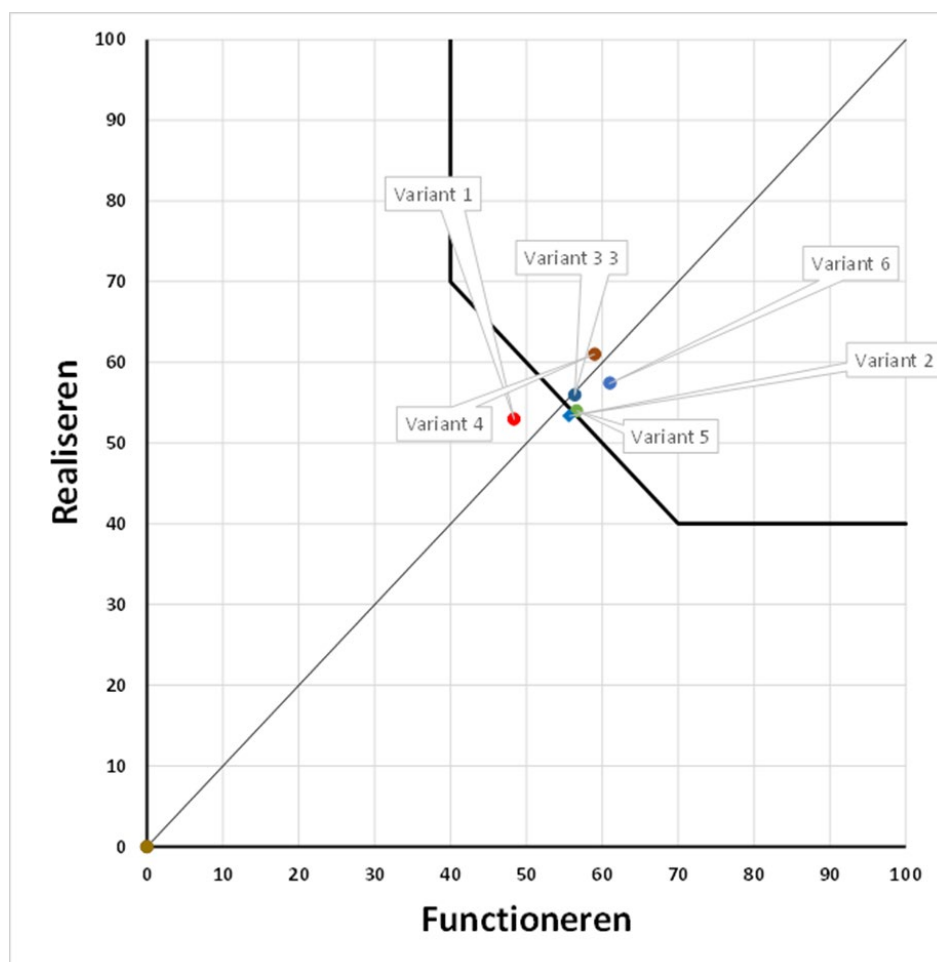
Aspect ↓ Variant →	1	2	3	4	5	6
Geluid	Compressor en ventilator -	0	Centrale lbk met lokale FCA +	Compressor en ventilator +	Compressor en ventilator, meer geluid dan var. 4 -	Watergekoeld VAV + 2x ventilator WTW <i>tussen var. 4 en 5 in</i>
Gewicht	Zware PCM inhoud, gaat niet stuk! -	Wtw + recirculatie 0	Alleen FCU +	Zwaar a.g.v. WP: + 180kg -	+ 200 kg -	WTW + VRV (VRV is vanaf 180 kg) -
Afmetingen	Zware PCM inhoud, gaat niet stuk! -	0	Lokaal is het gunstig, nog wel centraal nodig +	1,8 x 0,6 x 0,6	1 x 0,6 x 0,6	1 x 0,7 x 0,6
Afvoer, riool	Ontvochtiging centraal, alleen riool bij calamiteit +	Lokale ontvochtiging, vaste aansluiting op riool -	Lokale ontvochtiging, vaste aansluiting op riool -	WP lokale ontvochtiging, vaste aansluiting op riool	HTK geen vocht, geen vocht op WP maar wel bij WTW	Zeer beperkt, mogelijk bij hoge vochtigheid buiten zal vocht ontstaan
Recirculatie lucht	Maximaal	Maximaal		Geen		Maximaal
Energie	Rendementsverlies a.g.v. lage capaciteiten	Meest gunstige voor KRO concepten, centr. voorbehandeling en watersysteem (bijv. mogelijk op wko), wel transportverliezen		Beste van Daikin	Minder efficiënt, maar wel modulair	Hoogste rendement DX-systeem, 3 pijpsysteem ++
Secundair warmte-koudenet	Niet	Wel, centrale systeem regelen		Wel		Wel, htk (geen isolatie)
Nieuwbouw / renovatie	Grote omvang, geen bestaande installaties nodig	Minder groot, bestaande infra nodig		Grote omvang, geen bestaande install. nodig, wel LTV (goede schil)	Grote omvang, ringleiding nodig, wel LTV (goede schil)	Waterzijdig ringleiding en koelleidingen (wel klein)
Alleen stekker	Ja	Ook 2x verwarming en koeling		1x verwarming, 1x koeling		
Regelbereik	Wel regelbaar, maar beperkt	Vrij regelbaar, behoudens lucht	Vrij regelbaar, meer mogelijk met lucht	Compleet, maar plug and play	Eigen regeling toevoegen	Compleet, maar plug and play

Tabel 10. Eisen uit het PvE met bijbehorende weegfactoren, vastgesteld door het projectteam.

Eis	Weeg-factor	Eis	Weeg-factor
#1: Nieuwbouw & renovatie	5	#23: Tochtarm	5
#5: 4 personen	3	#23: Geen te openen ramen	1
#6: Niet op riool aansluiten	5	#23: Geen dauerlftung	1
#6: Zelf verdampen	1	#23: $R_c \geq 3\text{m}^2\cdot\text{K/W}$	1
#6: Geen microbiologische groei	5	#23: $\leq 45\%$ Raam	1
#7: $RV \geq 50\%$	1	#23: $q_v, 10 = 1\text{dm}^3/\text{s/m}^2$	1
#8: $T = 22,5^\circ\text{C} \pm 1,5\text{K}$	5	#24: Plug-and-play	5
#9: 30dB(A) in patiëntenkamer	5	#25: Filter niet in patiëntenkamer	5
#10: SUP1	5	#29: Voorsignalering	5
#11: Bouwbesluit	5	#30: OH beurt max. 4uur	5
#11: Ventilatie-effectiviteit	3	#34: Storing eenvoudig oplossen	3
#11: Urine	5	#34: Instellingen overnemen	5
#11: Fecaliën	5	#35: Geen recirculatie bij brand	5
#11: Lichaamslucht	5	#36: 30dB(A) in verblijfsgebied	5
#11: Ruimtebeslag < 80%	3	#38: Niet brandbaar	5
#12: 60 W/m ²	3	#41: 800 ppm; max.1200 ppm	5
#12: 37,5 W/m ²	3	#42: PM1 2,5mg/m ³	3
#13: 3,6 kW (16A/230V)	3	#42: PM2,5 < 25% van buiten	3
#15: max. 23 kg	5	#44: $RV \geq 50\%$	0
#19: 48m ² ;144m ³	3	#45: Hersteltijd 60 minuten	5
#20: Niet in kamer	5	#45: $22,5 \pm 3\text{K}$ stand-by	1
#20: Liever niet op hoogte	3	Regelbereik	5
#21: Geen secundair warmte/koudenet	1	Energie	5
#21: Alleen voeding	1		
#22: Geen luchtuitwisseling	1	Gemiddelde	3,5

Keuzemodellen

Om de zes varianten goed met elkaar te kunnen vergelijken zijn ze op basis van de beoordeling op functioneren (x-as) en het realiseren (y-as) beoordeeld, Figuur 6. De scores van de varianten ontlopen elkaar weinig. De varianten met de hoogste score op basis van de beoordeling zijn varianten 4 en 6. Variant 4 moet nog aangevuld worden met een WTW-unit; het resultaat komt nagenoeg overeen met variant 6, die daarmee het uitgangspunt vormt voor verdere detailengineering in WP5.



Figuur 6. Kesselring-diagram voor de zes varianten.

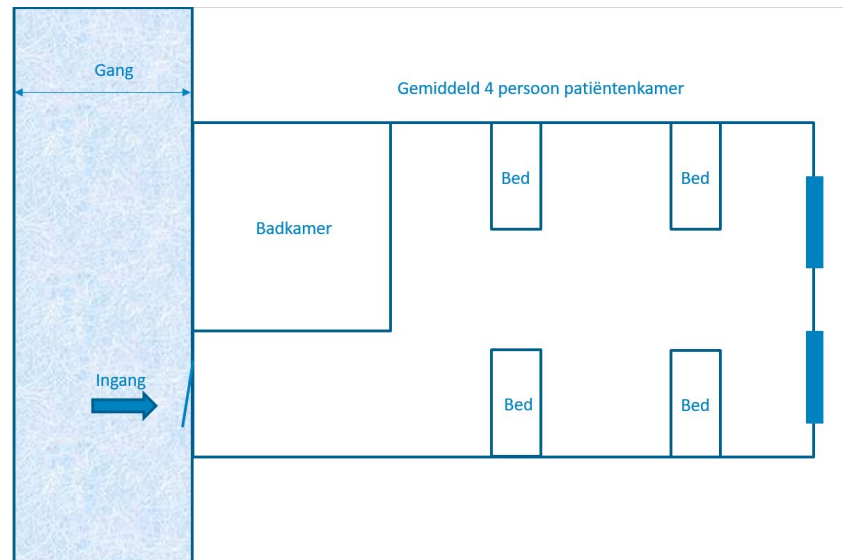
3.5 Gedetailleerd systeemontwerp (WP5)

3.5.1 Uitwerking variant 6

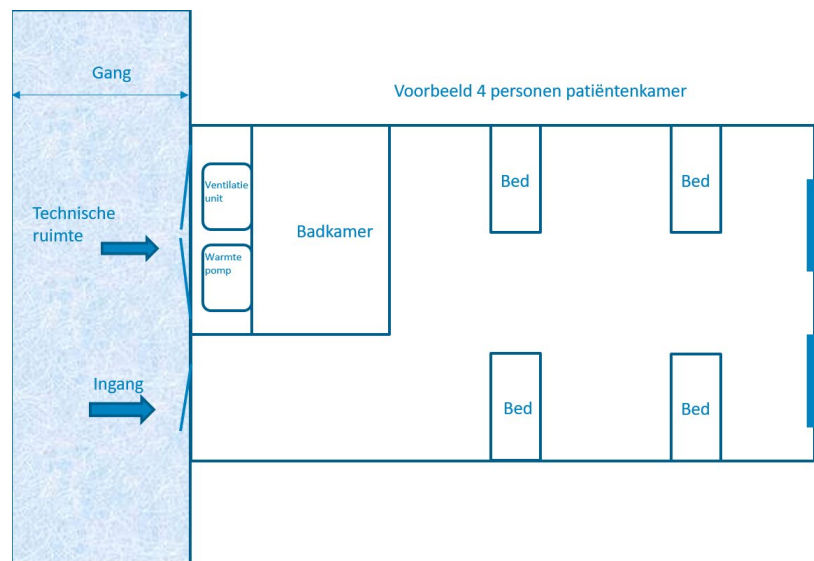
Er is gekozen voor één apparaat voor verwarmen, koelen, ventileren en regeling, met een gewicht van 24 kg voor de WTW-unit en 28,5 kg voor de ventilatorconvactor, 230V stekkerklaar en geschikt voor een 4-persoons patiëntenkamer. Dit komt overeen met variant 6. De ontwikkeling van een dergelijke klimatiseringsunit vraagt de nodige tijd, geld en overige resources. Het is niet eenvoudig om te voldoen aan het gewenste gewicht en aan de wens om het stekkerklaar uit te voeren.

Daikin heeft verschillende ventilatie-units met warmteterugwinning in het leveringsprogramma, echter deze voldoen niet aan de eisen voor het systeem als een 'proof of concept'. De wens is dat de WTW-unit niet in de patiëntenkamer in het verlaagde plafond ingebouwd wordt. Een WTW-unit die beschikbaar is, betreft de Modular-L, echter deze is gemaakt voor plafond inbouw en verwarmt/koelt met water. Deze WTW-unit zou ontwikkeld moeten worden in een staande uitvoering en uitgevoerd met een DX batterij voor verwarmen/koelen. Tevens moeten de te selecteren filters ook nog ingebouwd kunnen worden. In overleg met de fabriek bleek dit niet realistisch haalbaar binnen de strakke projectplanning. Filters zijn daarom op een andere manier in het geheel opgenomen.

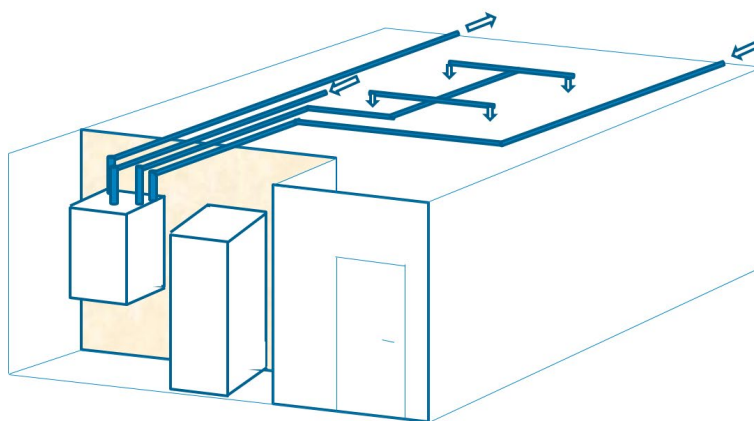
In Figuur 7 is een standaard 4-persoons patiëntenkamer weergegeven. Het idee is om een deel van de badkamer aan de gangzijde in te richten als technische ruimte en daar in de toekomst de techniek op te stellen om een patiëntenkamer te conditioneren, Figuur 8 en Figuur 9.



Figuur 7. Standaard 4-persoons patiëntenkamer.



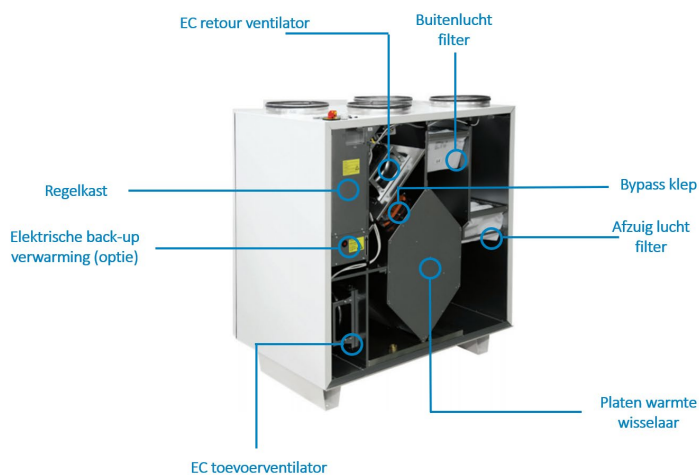
Figuur 8. Aangepaste 4-persoons patiëntenkamer met de technische ruimte in een deel van de badkamer.



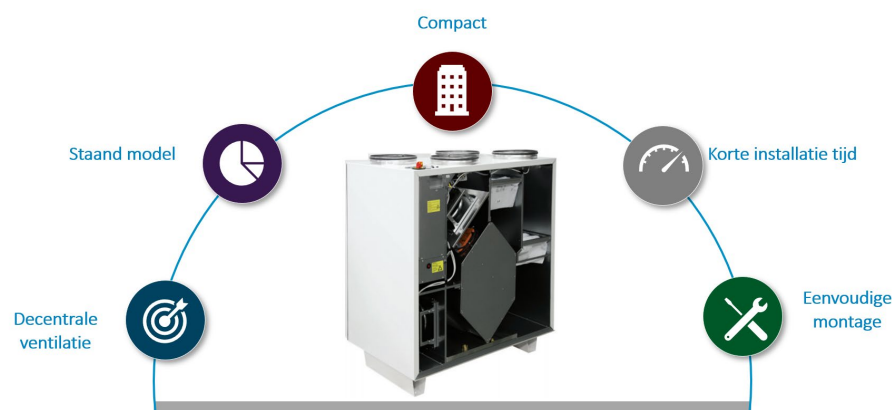
Figuur 9. 3D-weergave van de technische ruimte aan de gangzijde.

De WTW-unit zal ontwikkeld moeten worden in een staande uitvoering voor montage in een technische ruimte aan de gangzijde, Figuur 10. Hiervoor zal er een beperkte deelruimte van de badkamer opgeofferd moeten worden. Deze oplossing is voor zowel nieuwbouw als renovatie realiseerbaar. De WTW-unit is compact te ontwikkelen, licht in gewicht en stekkerklaar en per patiëntenkamer toe te passen, Figuur 11.

1. Ventilatie met warmteterugwinning

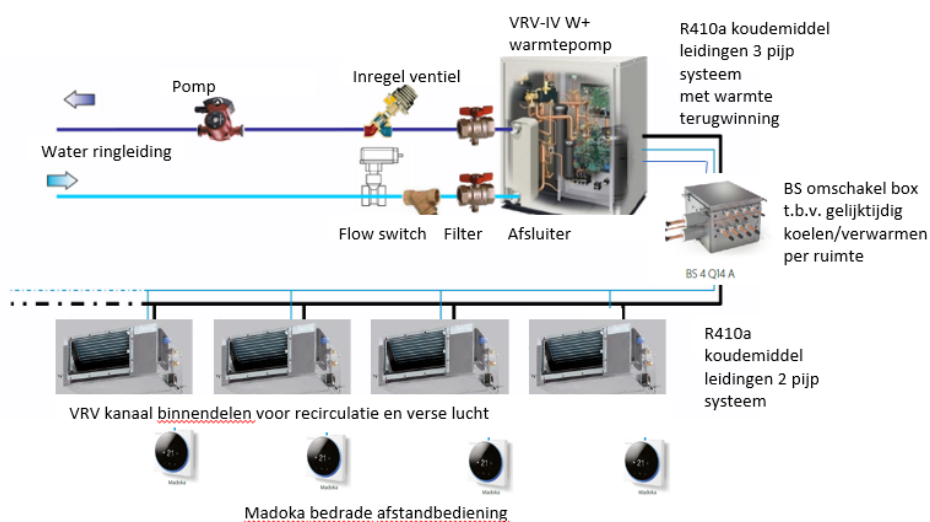


Figuur 10. WTW-unit in staande uitvoering.



Figuur 11. Voordelen lokale WTW-unit.

Met een watergekoeld VRV-IV W+ systeem ("Variable Refrigerant Volume") is het mogelijk om zowel in nieuwbouw als in renovatie een installatie modulair op te bouwen, Figuur 12. In de kleinste uitvoering kunnen ca. 6 patiëntenkamers aangesloten worden op één compressordeel. Het maximaal aantal patiëntenkamers is ongelimiteerd. Elke patiëntenkamer heeft een eigen binnendeel, dus lucht wordt niet uitgewisseld tussen kamers. Alleen de warmtepomp voor de aangesloten ruimten is voor deze ruimten "centraal" waardoor het systeem relatief eenvoudig kan worden uitgebreid of aangepast. Deze "centrale" warmtepomp kan in een separate omkasting in de gang of een andere ruimte worden opgesteld.



Figuur 12. Basisopstelling watergekoeld VRV-systeem.

Alle warmtepompen in een gebouw worden aangesloten op een waterringleiding waarin de temperatuur tussen de 10°C en 25°C gehouden wordt. De ondergrens mag eventueel ook naar -10°C met toevoeging van glycol in de gecirculeerde vloeistof. De warmtepompen onttrekken warmte aan het water in de ringleiding of geven warmte af aan het water afhankelijk of er gekoeld/verwarmd wordt. De verschillende te conditioneren ruimtes kunnen bij tegengestelde vraag

(verwarmen/koelen) energie uitwisselen binnen één systeem. Daarnaast kunnen de verschillende aangesloten systemen via de ringleiding ook energie uitwisselen.

Het VRV-IV W+ systeem kan waterzijdig op meerdere manieren aangesloten worden. Daarmee is dit systeem flexibel in zowel nieuwbouw als in bestaande bouw. Om een volledig beeld te krijgen van het totale systeem zijn de verschillende mogelijkheden voor het waterzijdig aansluiten hieronder aangegeven (toegelicht in Bijlage E):

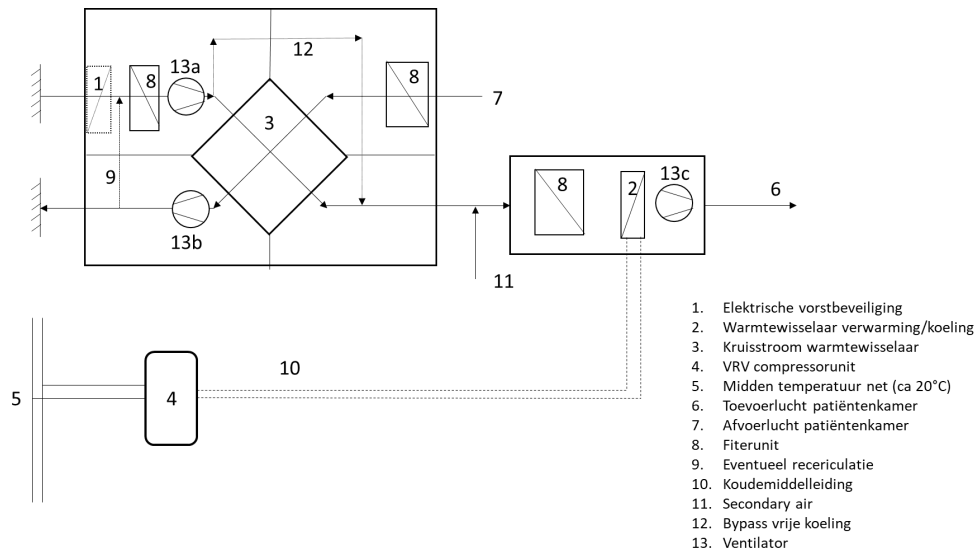
- Optie A: Boiler/CV ketel + koeltoren
- Optie B: Warmtepomp chiller
- Optie C: Warmtepomp chiller en droge koeler
- Optie D: WKO geothermisch open bron
- Optie E: WKO geothermisch gesloten bron

3.5.2 *Model Based Predictive Control (MBPC)*

Een onderdeel van het systeemontwerp betreft de regeling van het systeem, waarvoor is gekozen om deze uit te werken volgens een Model Based Predictive Control (MBPC) regelstrategie.

MBPC is een geavanceerde methode van procesbesturing die wordt gebruikt om een proces te besturen en tegelijkertijd aan een reeks randvoorwaarden te voldoen die conflicterend kunnen zijn, zoals de wens om comfort te combineren met laag energieverbruik. Het wordt sinds de jaren tachtig gebruikt in de procesindustrie, chemische fabrieken en olieraffinaderijen. In de afgelopen jaren is het ook gebruikt in balansmodellen voor vermogenssystemen en in vermogenselektronica. Het belangrijkste voordeel van MBPC in de te ontwikkelen klimatiseringsunit is het feit dat het mogelijk is de klimaatsturing voor ieder tijdslot te optimaliseren, terwijl rekening wordt gehouden met toekomstige ontwikkelingen zoals verwachte verandering in zontoetreding, temperatuur, etc.. Dit wordt bereikt door een eindige tijdhorizon te optimaliseren, maar alleen de huidige regelparameters te implementeren en vervolgens opnieuw te optimaliseren, herhaaldelijk.

Er is bepaald welke parameters van de klimatiseringsunit door de regeling kunnen worden beïnvloed op basis van welke gemeten grootheden. Figuur 13 toont het schema van de unit en Tabel 11 geeft de componenten weer die in de klimatiseringsunit kunnen worden aangestuurd. In Figuur 13 wordt links de WTW-unit weergegeven en rechts de ventilatorconvactor.



Figuur 13. Schema van de klimatiseringsunit: links de WTW-unit en rechts de ventilatorconvector (Altherma Geo 3), waarvoor aansturing door MBPC onderzocht is.

Tabel 11. Ansturing componenten systeemconcept.

Component	Aansturing
Toevoer ventilator (13a)	Traploos
Afvoer ventilator (13b)	Traploos
Elektrisch verwarmingselement (1)	Aan/uit
Bypassklep vrije koeling (12)	Open/dicht
Ventilator secondary air (13c)	Traploos
Capaciteit warmtewisselaar (2)	Temperatuur setpoint ruimte

De grootheden die in de klimatiseringsunit worden gemeten zijn in Tabel 12 weergegeven.

Tabel 12. Te meten grootheden in de klimatiseringsunit.

Groothed	Eenheid	Range
Buitenlucht temperatuur (centraal)	°C	-20 – 40 °C
Ruimtetemperatuur	°C	10 – 30 °C
Temperatuur middentemperatuurnet	°C	5 – 40 °C
Temperatuur van aan de ruimte toegevoerde lucht	°C	10 – 30 °C
Drukverschil buitenlucht filter (8a)	Pa	0 – 50 Pa
Drukverschil secondary air filter (8b)	Pa	0 – 50 Pa
Stofconcentratie buitenlucht (centraal)	µg/m ³	PM 2,5
Stofconcentratie buitenlucht inblaas na filter	µg/m ³	PM 2,5
Stofconcentratie retour (ruimte)	µg/m ³	PM 2,5
CO ₂ niveau in de ruimte	ppm	500-2000
Zonstraling geveloriëntatie (centraal)	W/m ²	0-1200
24-uurs weersvoorspelling via internet		

De signalen die vanuit de klimatiseringsunit aan het gebouwbeheersysteem (GBS) worden overgedragen via modbus zijn in Tabel 13 weergegeven. Deze lijst is tot stand gekomen door analyse van de benodigde signalen voor de regeling van het systeem waarmee voldaan kan worden aan de regeltechnische eisen uit het programma van eisen.

Tabel 13. Overgedragen signalen aan GBS.

Groothed	Eenheid	Range
Acute storing (systeem werkt niet)	-	0 - 1
Niet urgente storing: 1 Ruimtetemperatuur sensor defect 2 Temperatuursensor van aan de ruimte toegevoerde lucht defect 3 Drukverschil sensor buitenlucht filter (8a) defect 4 Drukverschil sensor secondary air filter (8b) defect 5 Stofconcentratie buitenlucht sensor (centraal) defect 6 Stofconcentratie sensor ruimte defect 7 Connectie weersvoorspelling 8 Geen luchtdebiet verse buitenlucht (ODA) 9 Geen luchtdebiet afvoer uit ruimte (EXT) 10 Geen luchtdebiet secondary air unit (SEC)	-	0 - 11
Filters (groep van dicht bij elkaar gelegen filters) moeten binnen een bepaalde periode worden vervangen voor optimaal functioneren	maand	0-2
Systeem heeft onderhoud nodig	maand	0-2

3.5.3 Filterkeuze

Vier combinaties van filters zijn voorgesteld, zie paragraaf 2.5.3.2:

- 1^e trap DriPak NX+ EPM1 65%; 2^e trap VariCel V XLE, F9 EPM1 80%;
- 1^e trap DriPak NX, EPM1 85%;
- 1^e trap DriPak NX, EPM1 85%; 2^e trap VariSorb XL, EPM2,5 50%;
- 1^e trap VariSorb XL, EPM2,5 50%.

Een keuze tussen deze mogelijkheden is voorafgaande aan de labtests nog niet gemaakt, omdat er geen duidelijke 'beste keuze' is. De vier combinaties zijn alle getest. De definitieve keuze voor een filtersysteem is mede afhankelijk van de buitenluchtcondities en de stofproductie in de patiëntenkamer zelf, Figuur 18 en Figuur 19.

De mogelijkheid bestaat om de filtercombinatie in de tijd te optimaliseren naar aanleiding van de belasting op het filter, m.a.w. optimalisatie op basis van real-time gegevens in de tijd en geoptimaliseerd op basis van de daadwerkelijke belasting die in verschillende ziekenhuizen zal verschillen.

Om flexibel te kunnen zijn in de filterkeuze heeft AAF in eerste instantie een filterhuis geleverd waarbij verschillende filters al dan niet gecombineerd getest kunnen worden, Figuur 14. Hierbij is vooralsnog voorbij gegaan aan de integratie van het filter in de unit van Daikin, omdat eerst meer gegevens nodig zijn voor de definitieve filterselectie.



Figuur 14. Filterhuis AAF

3.6 Toetsing systeemontwerp (WP6)

Het uitgewerkte ontwerp van de klimatiseringsunit is in WP6 getoetst aan de uitgangspunten in het PvE en waar nodig bijgesteld om te komen tot een systeem als 'proof of concept'. In deze fase is in plaats van een elektrisch verwarmingselement als vorstbeveiliging gekozen voor een bypass over de warmtewisselaar. Deze keuze is gemaakt om in het 'proof of concept' zo veel mogelijk gebruik te maken van bestaande componenten.

3.7 Bouw van het systeem (WP7)

Gekozen Concept

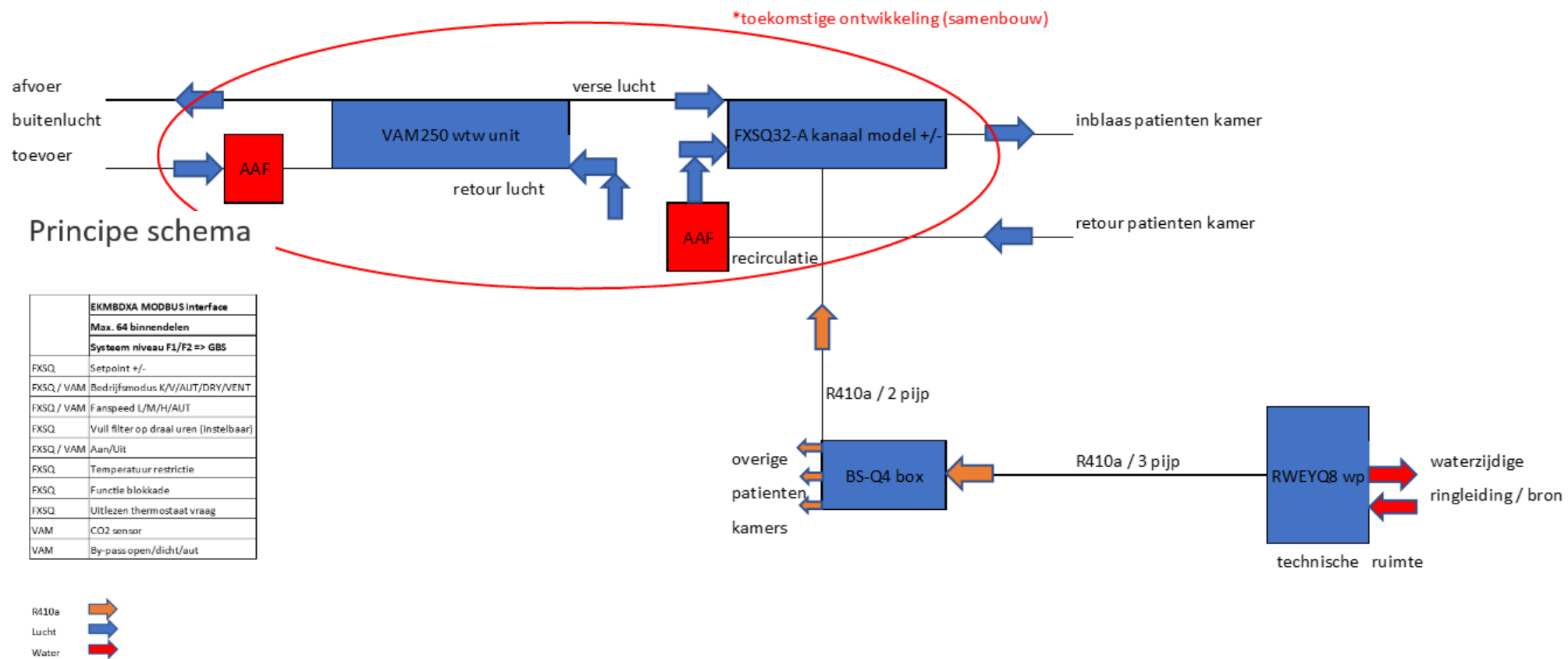
Zoals in paragraaf 3.5 is beschreven is ervoor gekozen om de klimatiseringsunit uit te voeren met een water-lucht warmtepomp (watergekoeld VRV-IV W+ systeem) met een nieuw te ontwikkelen WTW-unit. Hierbij zijn enige praktische uitdagingen geconstateerd, in relatie tot de beschikbare tijd in kader van ontwikkeling, testen, certificeren en documenteren. Daarom is er voor gekozen om een systeem als 'proof of concept' te maken met het idee om met bestaande en beschikbare componenten de functionele testen uit te voeren. Hiertoe werd een voorstel gedaan om het prototype dat ontwikkeld dient te worden, op te splitsen in een recirculatie-unit en een WTW-unit en deze in het TNO-lab luchtzijdig met elkaar te koppelen. Aangezien alle functionaliteiten van het te ontwikkelen prototype aanwezig zijn, zou de test 'op tijd' door kunnen gaan. Na de test zou blijken op welke punten van het PvE zou worden voldaan en waar nog verbeterpunten zijn. Nadat dit uitvoerig is besproken binnen het projectteam is hier een positief en unaniem besluit over genomen. De klimatiseringsunit moet gezien worden op het niveau van een 'proof

of concept'; Figuur 15 toont hiervan het principeschema, dat overeenkomt met Figuur 13.

De rode ovaal in Figuur 15 toont de toekomstige ontwikkeling en samenstelling voor het prototype. Voor de test is dit systeem ontworpen op basis van beschikbare losse componenten welke zijn opgebouwd en samengesteld in het TNO-lab. Hiermee is het mogelijk gemaakt om een functionele test te kunnen uitvoeren zoals beschreven in paragraaf 2.5.1.

De klimatiseringsunit is ten behoeve van de test in het TNO-lab als volgt samengesteld:

In het schetsontwerp is een VAM250 WTW-toestel geselecteerd voor klimatisering van de patiëntenkamer. Deze unit levert maximaal ca. 250 m³/h en is voorzien van een bypass regeling. Optioneel kan de unit aangesloten worden op een CO₂-sensor. Het WTW-toestel blaast verse buitenlucht in aan de achterzijde van een kanaalunit (recirculatie-unit) type FXSQ40. Deze kanaalunit heeft een verwarmings- en koelcapaciteit van ca. 3,5 kW en wordt koeltechnisch aangesloten op een watergekoeld VRV-IV W+ systeem type RWEYQ8-T9, schematisch weergegeven in Bijlage F. De warmtepomp is waterzijdig aangesloten op een watercircuit dat temperaturen kan simuleren in winter- en zomerbedrijf. De filters van AAF zijn in het luchtzijdige kanalenstelsel ingebouwd en filteren de aangezogen buitenlucht en de gerecirculeerde ruimtelucht. Om de werking te kunnen garanderen tijdens de test moesten er nog twee extra binnendelen (VAM250's) worden aangesloten, omdat de warmtepomp minimaal 50% belast moet kunnen worden om correct te kunnen werken. De twee extra aangesloten VAM250's hoeven daarbij tijdens de test niet ingeschakeld te zijn. Verder is afgestemd welke optie qua elektronica (printplaten) en gateways benodigd zijn om de koppeling te maken met de regeling van TNO en het gebouwbeheersysteem (InsiteView) van Kropman. Tenslotte is er door Kropman een luchtzijdig ontwerp gemaakt met roosters, inregelkleppen etc., schematisch weergegeven in Bijlage G, dat akkoord is bevonden door alle participanten.



Figuur 15. Principeschema van de klimatiseringsunit.

4 Bureautest: werking onderdelen en filterbelasting (WP8)

4.1 Opstelling bureautest

Voordat de testopstelling werd gebouwd in het lab van TNO, is besloten om een bureautest uit te voeren bij Kropman in Rijswijk om te zien of de regeling van TNO, het gebouwbeheersysteem (InsiteView) van Kropman en de overige componenten (o.a. de ConnectBox en de Gateway van Daikin) functioneerden en met elkaar communiceerden. Met andere woorden of meldingen binnenkwamen en de gewenste commando's vanuit de regeling componenten op de juiste wijze zouden aansturen. Eventuele uitdagingen hierin kunnen zo worden opgelost voordat de gehele opstelling in het laboratorium wordt geïnstalleerd. Tijdens deze test hebben specialisten op het gebied van regeltechniek van Kropman, TNO en Daikin een meetopstelling gebouwd, waarin de regeling en de communicatie tussen verschillende componenten goed functioneerde, Figuur 16.



Figuur 16. Meetopstelling bureautest.

4.2 MBPC - hardware en interface

Figuur 17 geeft schematisch de koppeling tussen de actuatoren (WTW- en binnenunits) en de interface-componenten weer. Om de MBPC-software van TNO te kunnen laten communiceren met de installatie is ervoor gekozen om gebruik te

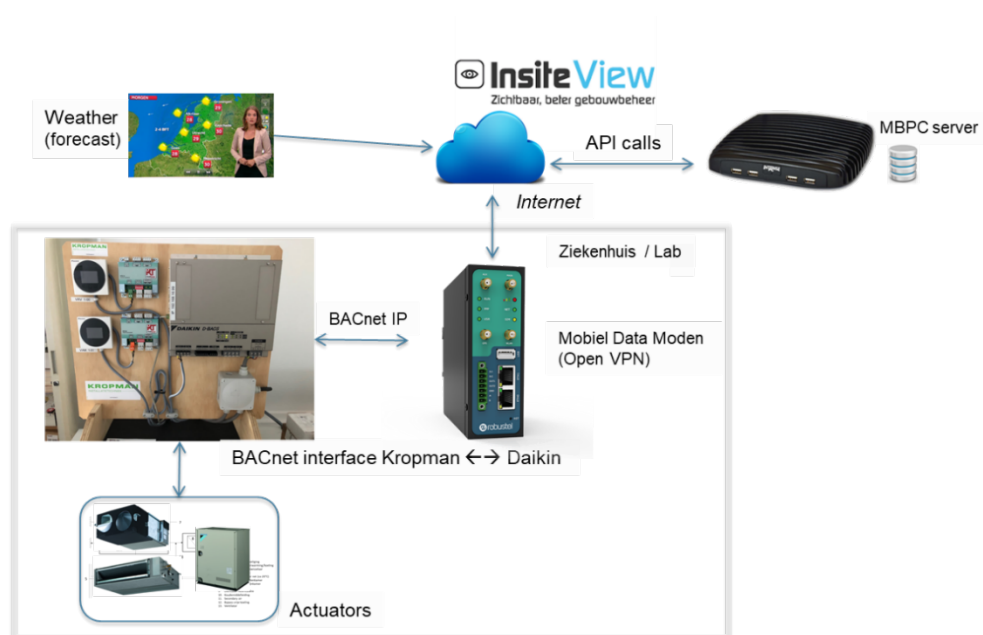
maken van diverse producten die Kropman standaard in zijn portfolio heeft om installaties te benaderen.

Op locatie in de testkamer is via een beveiligde Open VPN verbinding contact gemaakt met het dienstenplatform van Kropman. Er is gekozen om met een connectie via het 4G netwerk te communiceren om niet afhankelijk te zijn van het wifi netwerk in de testlocatie. Dit online platform biedt de mogelijkheid om deze verbinding te gebruiken voor de InsiteView software waardoor de klimatiseringsunit vanuit dit pakket te bedienen is.

In het gebouwbeheersysteem (InsiteView) is een project aangemaakt waarmee de BACnet adressentabel is ingelezen en vertaald naar namen waardoor deze leesbaar is geworden. De Daikin BACnet Gateway werkt met een reeks van 35 adressen. In dit InsiteView project zijn de aan te sturen apparaten benoemd en toegevoegd.

Dit InsiteView project is gekoppeld aan het internet. Door middel van InsiteRestAPIs kan de klimatiseringsunit bediend worden en is deze beschikbaar voor de MBPC-software van TNO om door middel van API Calls de diverse parameters aan te sturen en uit te lezen.

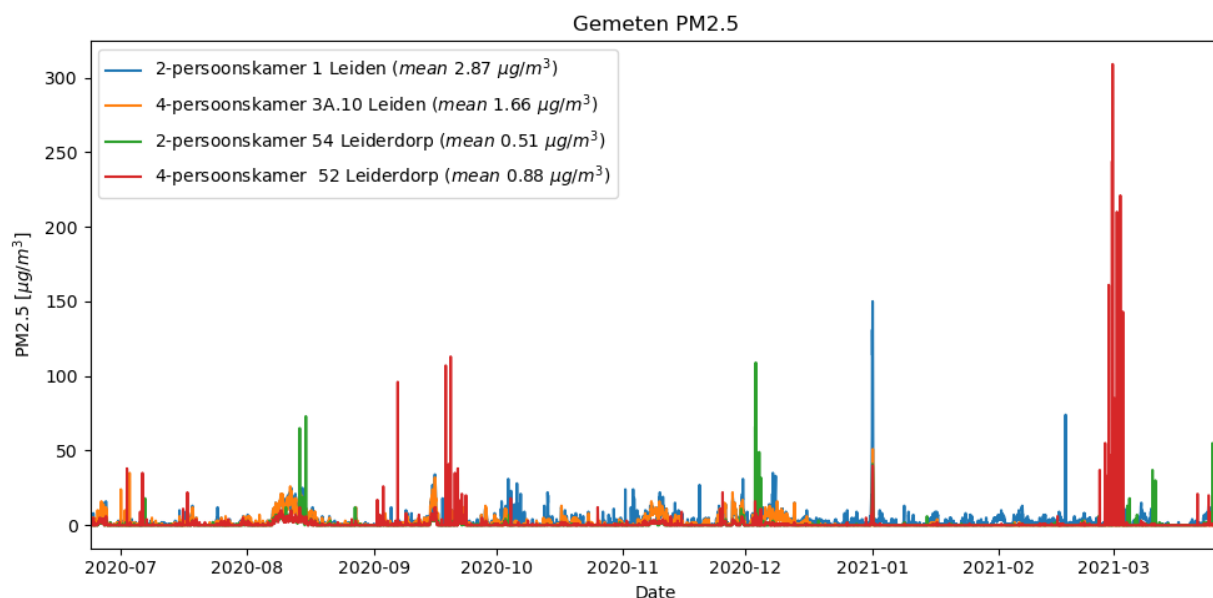
In bijlage G worden het bedradingsschema van de testopstelling en de API commando's nader toegelicht.



Figuur 17. Schema meetopstelling bureautest.

4.3 Filterbelasting

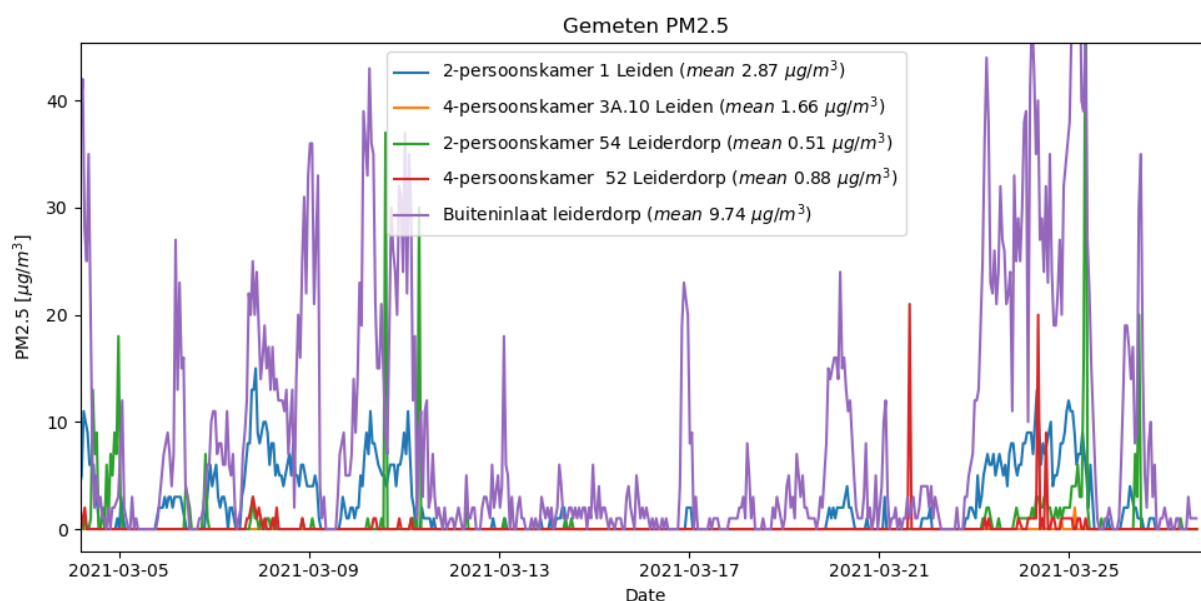
Om inzicht te krijgen in de filterbelasting zijn sensoren geplaatst in vier patiëntenkamers in twee verschillende ziekenhuizen. Bij beide ziekenhuizen worden de patiëntenkamers gevoed door een luchtbehandelingskast met hoge luchtfiltratie. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 18.



Figuur 18. PM2.5 concentraties in patiëntenkamers in Leiden en Leiderdorp, gemeten gedurende 9 maanden. De kortdurende pieken kunnen vele oorzaken hebben, zowel afkomstig van buiten als binnen.

Uit de metingen in de patiëntenkamers blijkt de gemiddelde fijnstofconcentratie (PM_{2,5}) met ca. 0,5 tot ca. 3 µg/m³ relatief laag te zijn. Uit de frequentieverdeling van de concentraties blijkt verder dat deze vooral wordt bepaald door de pieken. De aan de ruimtes toegevoerde lucht betreft voorgefilterde lucht met een lage deeltjesconcentratie. Verder worden door de ziekenhuizen materialen toegepast (beddengoed) die zeer weinig stof afgeven volgens het beleid van de betreffende ziekenhuizen.

Om een beter beeld te krijgen van de te verwachten concentraties zijn vanaf maart 2021 ook deeltjesmeters geplaatst die de concentratie in de buitenlucht meten.



Figuur 19. Gemeten PM2.5 concentraties in patiëntenkamers in Leiden en Leiderdorp en in de buitenlucht.

In Figuur 19 is het concentratieverloop voor PM2.5 voor zowel buiten als in de patiëntenkamers weergegeven. Bij de 2-persoonskamer (blauw) lijkt het erop dat er relatief meer van de PM2.5 rechtstreeks (ongefilterd) van buiten naar binnen komt. Mogelijk komt dit door een minder goede luchtdichtheid.

De gemiddelde gemeten buitenwaarden liggen met ca. $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wat lager dan het landelijk jaargemiddelde in Nederland (ca. $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

In Bijlage A (User Requirements) is als eis gesteld dat PM2.5 maximaal 25% mag zijn van de buitencondities. Daar wordt nu in 3 van de 4 ruimtes aan voldaan, uitgaande van $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Het is duidelijk dat ook voor het ontwikkelde concept filters nodig zullen zijn om aan de gestelde eis te voldoen en dat het mogelijk in sommige kamers kritisch wordt om aan de PM2.5 eis van maximaal 25% van de buitencondities te voldoen, afhankelijk van de bouwtechnische kwaliteit van de ruimte (o.a. luchtdoorlatendheid en te openen ramen).

Hierbij moet worden bedacht dat het gekozen systeem van beddengoed, schoonmaak, patiënten en personeel de PM2.5 concentraties sterk kunnen beïnvloeden.

5 Resultaten labtest (WP8)

5.1 Testen, evaluatie, bijstellen van het systeem

5.1.1 Labtest

In deze paragraaf worden de belangrijkste resultaten uit de labexperimenten (zie paragraaf 2.5.3) beschreven. Een samenvatting van de meetresultaten is opgenomen in de bijlage J. De installatie is op 5 en 6 november 2020 in bedrijf gesteld. De testopstelling is weergegeven in Figuur 20.



Figuur 20. Hardware in labopstelling. Op de bovenste afbeelding zijn van links naar rechts te zien: de deur naar de klimaatkamer; de compressorunit, de twee dummy-toestellen en de selectiebox; de opstelling voor simulatie van de circulatieleiding. Op de onderste afbeelding zijn te zien: de ventilatorconvector (linksonder), het WTW-toestel (midden achteraan) en het filterhuis (rechtsboven). De drie kanalen met zwart isolatiemateriaal zijn de meetbuizen.

In de week van 9 t/m 13 november 2020 zijn de volgende experimenten uitgevoerd:

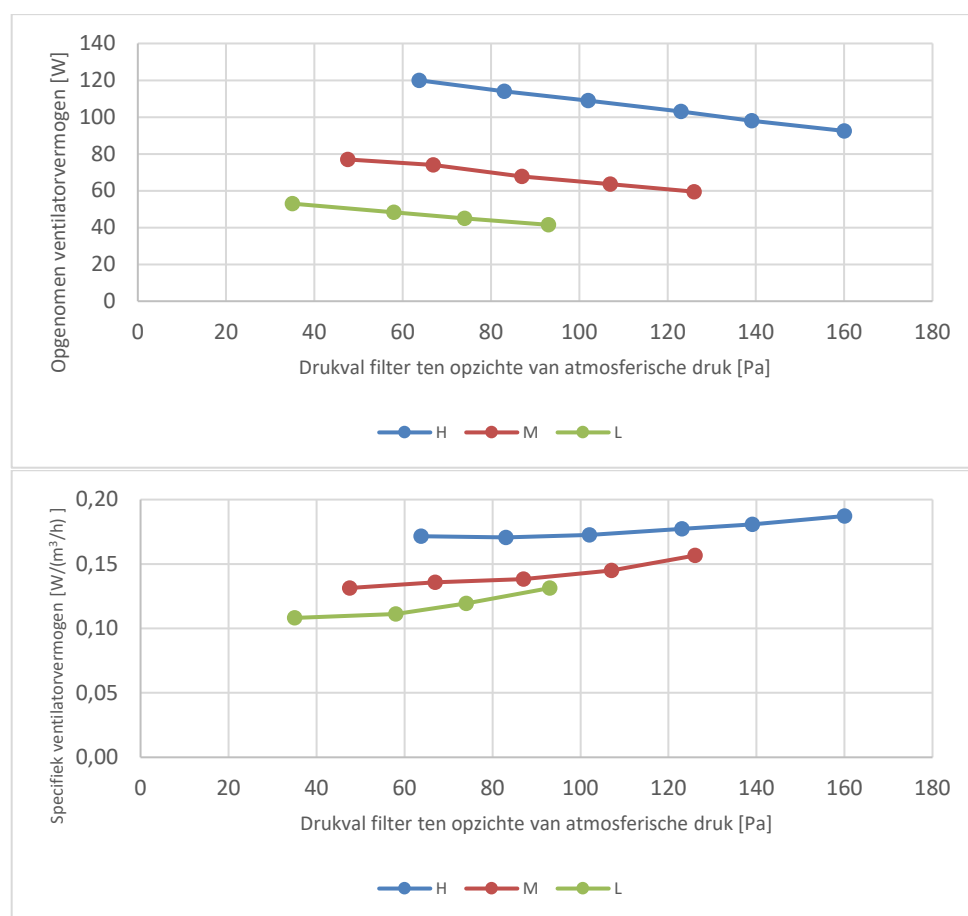
- Bepalen van de invloed van de filterweerstand op het opgenomen (ventilator)vermogen van het binnendeel (FXSQ40 en VAM250).
- Bepalen van de energetische prestaties van het gehele systeem.
- Bepalen van het effect van de bypass en de stand van het WTW-toestel (VAM250) op het opgenomen (ventilator)vermogen van het binnendeel (VAM250 en FXSQ40).

De regeling van het systeem (model-based predictive control) is niet experimenteel beproefd.

5.1.1.1 Invloed van filterweerstand op opgenomen vermogen van het binnendeel (WTW-toestel VAM250, ventilatorconvector FXSQ40, AAF Filterhuis)

Het testprogramma voor de invloed van filterweerstand op het opgenomen vermogen van de binnendelen is uitgevoerd volgens de methode besproken in paragraaf 2.5.3.2. De testresultaten van de eerder gekozen filtercombinatie (1^e trap DriPak NX+ EPM1 65%; 2^e trap VariCel V XLE, F9 EPM1 80%) worden beschreven in deze paragraaf. De experimenten met andere filtercombinaties gaven vergelijkbare resultaten.

In Figuur 21 is het opgenomen vermogen van de ventilatorconvector weergegeven als functie van de drukval over de filters, gemeten aan het eind van het filterhuis (na de filters) ten opzichte van de aanzuig, waar atmosferische druk heerst. Uit de grafiek (boven) blijkt dat voor toenemende drukval, het opgenomen vermogen en de volumestroom van de ventilator afneemt. Het specifieke ventilatorvermogen (het opgenomen vermogen per eenheid van debiet) neemt door de niet evenredige afname van vermogen en volumestroom wel toe.

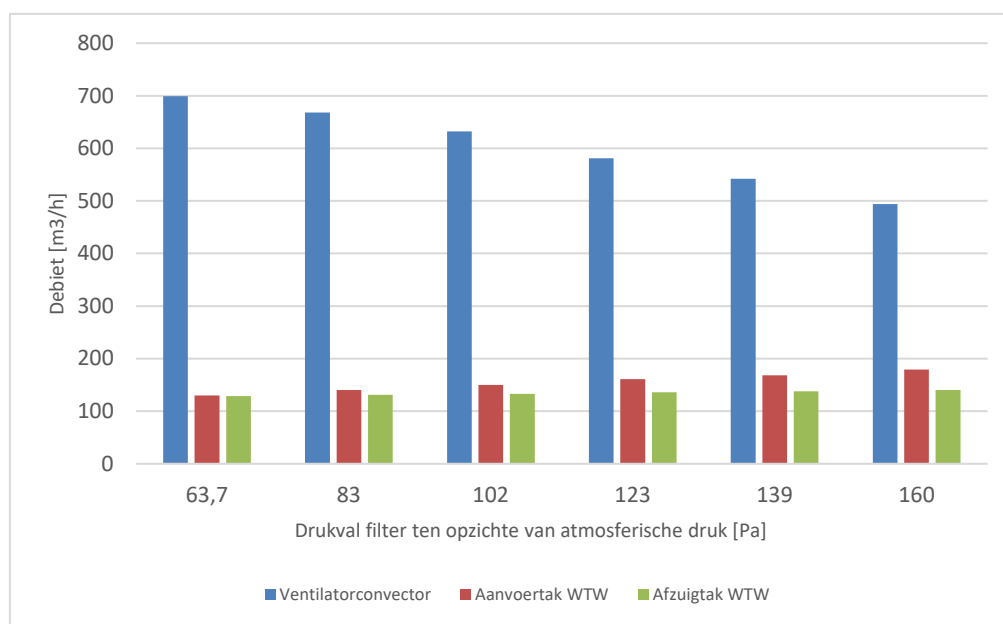


Figuur 21. (Boven) Opgenomen vermogen van de ventilatorconvector ten gevolge van toenemende drukval over het filterhuis. Lijnen H, M en L geven de ventilatorstand van de ventilatorconvector weer (hoog, midden en laag respectievelijk). (Onder) Specifiek opgenomen vermogen voor toenemende drukval over het filterhuis.

Ook het opgenomen vermogen van het WTW-toestel is tijdens het testprogramma gemeten. De spreiding in het opgenomen ventilatorvermogen van dit toestel ten gevolge van de variatie in filtercombinatie en daarmee filterweerstand is echter marginaal, 57,7 tot 58,8 Watt. Het effect van filterweerstand op het opgenomen elektrische vermogen van het WTW-toestel wordt daarom als verwaarloosbaar beschouwd.

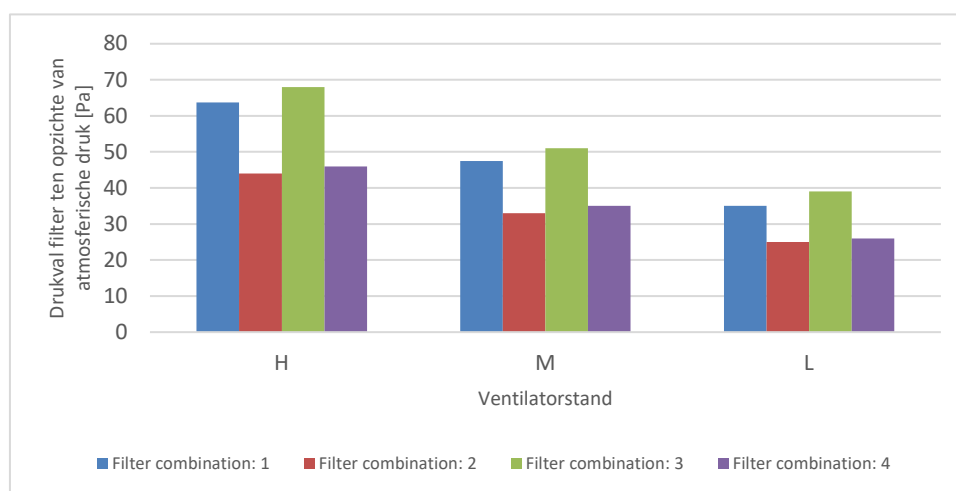
Voor de hoogste ventilatorstand zijn de debieten door de ventilatorconvector, aanvoertak en afzuigtak² weergegeven in Figuur 22. Duidelijk zichtbaar is dat voor toenemende filterweerstand het debiet door de ventilatorconvector substantieel afneemt. Meer lucht wordt daarentegen door de aanvoertak van de WTW aangevoerd. Dit zorgt voor meer ventilatie en daardoor in potentie ook tot meer energieverlies bij verwarmen en koelen. De grafiek maakt inzichtelijk dat de filterweerstand slechts een beperkte invloed heeft op het debiet door de afzuigtak van de WTW.

² Zie voor illustratie Figuur 1. Aanvoertak (Luchttoevoer): luchtflow van buiten naar patiëntenkamer. Afvoertak (luchtafvoer): luchtflow komend uit patiëntenkamer naar buiten.



Figuur 22. Debieten op drie verschillende posities voor toenemende drukval over het filter op ventilatorstand hoog (ventilatorconvactor)

Uit Figuur 23 blijkt dat de combinaties met een dubbele filter (combinaties 1 en 3) een grotere drukval veroorzaken, met name combinatie 3. Filtercombinatie 2 geeft de laagste drukval.



Figuur 23. Vergelijking filterweerstand voor verschillende filtercombinaties en ventilatorstanden.

5.1.1.2 Energetische prestaties van het gehele systeem

In deze paragraaf worden de prestaties van het systeem op hoofdlijnen aangegeven. Details zijn in bijlage J weergegeven.

De totale hoeveelheid warmte of koude (Q) die door het systeem wordt geleverd, is de som van de warmte/koude van de WTW-unit (toegevoegd aan de aanvoertak) en de ventilatorconvactor:

$$Q_{\text{proof-of-concept}} = Q_{\text{WTW}} + Q_{\text{ventilatorconvactor}}$$

Tevens kan een systeemrendement in de vorm van een COP worden bepaald: de verhouding tussen opgewekte warmte/koude en de ingaande elektrische energie:

$$COP_{proof-of-concept} = \frac{Q_{proof-of-concept}}{P_{WTW} + P_{ventilatorconvector} + P_{compressor}}$$

De opgewekte warmte/koude en de bijbehorende COP³ wordt per verwarmings- of koelingsscenario weergegeven in Tabel 14. De hier gerapporteerde COP-waarden zijn niet representatief voor een installatie in de praktijk om de in paragraaf 2.5.2.2 genoemde redenen: in een praktijktoepassing met een goed gedimensioneerde compressorunit zal de COP vermoedelijk hoger zijn.

Het valt verder op dat het verwarmingsvermogen ongeveer 11% hoger is bij -7 °C buitentemperatuur dan bij de testtemperatuur van 5 °C. Dit is vermoedelijk te verklaren door een grotere efficiëntie van de WTW-unit bij het grotere temperatuurverschil tussen aanvoer- en afvoertak. Bovendien zal de ventilatorconvector een iets grotere capaciteit hebben omdat de inlaattemperatuur lager is. Bovenstaande verklaringen kunnen ook voor een groot deel het verschil in COP verklaren.

De hogere koelcapaciteit bij koelen met een hogere luchtvochtigheid wordt verklaard door het toegenomen (latente) koelvermogen van de ventilatorconvector. Hetzelfde gaat op voor de COP.

Tabel 14. Totaal koel- en verwarmingsvermogen van het systeem in de vier geteste scenario's en de bijbehorende indicatieve COP-waarden. De binnentemperatuur was altijd 22,5 °C.

Scenario	$Q_{proof-of-concept}$	$COP_{proof-of-concept}$
Verwarmen, buitentemperatuur 5 °C	6,2 kW	2,7
Verwarmen, buitentemperatuur -7 °C	6,9 kW	3,2
Koelen, buitentemperatuur 35 °C en 60% RV binnen	5,0 kW	5,6
Koelen, buitentemperatuur 35 °C en 40% RV luchtvochtigheid binnen	4,8 kW	4,7

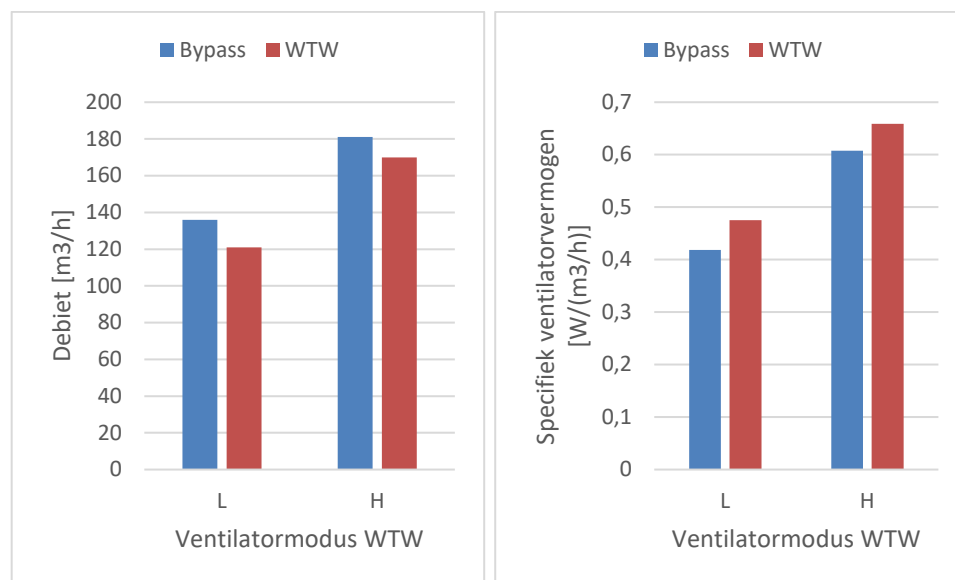
5.1.1.3 Effect van bypass (zomerstand) en warmteterugwinningsmodi op het opgenomen ventilatorvermogen van het WTW-toestel

De WTW heeft een bypass-modus, waarbij de uitgaande lucht direct naar buiten wordt afgevoerd en niet door de warmtewisselaar stroomt. Zo kan geventileerd worden zonder dat de toegevoerde buitenlucht wordt voorverwarmd. Deze bypass kan worden gebruikt om de temperatuur in de patiëntenkamer in de nachtperiode te verlagen door extra te ventileren met koele lucht (nachtventilatie).

Het effect van de ventilatormodus (bypass of WTW) op het opgenomen ventilatorvermogen is verwaarloosbaar. Voor de laagstand is het opgenomen vermogen 56,9 W in de situatie met volledige bypass en 57,5 W zonder bypass

³ De gerapporteerde COP is inclusief de vochtuitwisseling in de WTW en eventuele ontvochtiging in de ventilatorconvector (koelbedrijf).

(WTW-modus). Bij hoogstand zijn de vermogens respectievelijk 110 W en 112 W. Het ventilatiedebiet door de aanvoertak van de VAM250 en door de ventilatorconvactor wordt niet beïnvloed door de ventilatiemodus. Het debiet door de afvoertak van het WTW-toestel wordt wel beïnvloedt door de ventilatiemodus. In de situatie met bypass is het debiet iets hoger (11-15 m³/h) dan zonder bypass (WTW-modus). Als gevolg hiervan is het specifieke ventilatorvermogen hoger als warmteterugwinning plaatsvindt, Figuur 24.



Figuur 24. Debiet en specifiek ventilatorvermogen WTW-toestel bij verschillende ventilatormodi.

5.1.1.4 Conclusies op basis van de testresultaten

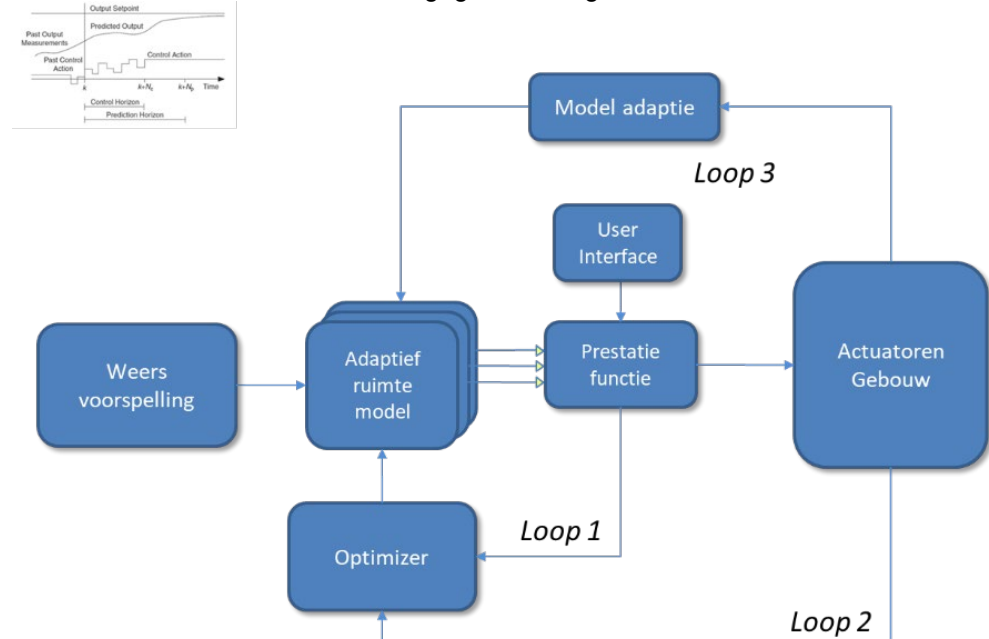
Tijdens de experimenten is een aantal verbeterpunten gesignaleerd. Dit betreft:

1. Het aantal ventilatorstanden van het WTW-toestel is beperkt. Hierdoor wordt het luchtzijdig inregelen van de opstelling bemoeilijkt. Het gewenste debiet van 150 m³/h door de aanvoertak werd niet gehaald op de laagstand, terwijl de hoogstand een te hoog debiet opleverde. Het was vooraf bekend dat de componenten, op basis waarvan het proof of concept is samengebouwd, niet de beschikking hadden over een traploze ventilator, hoewel dit wel wenselijk was. Het belang van deze functionaliteit bij een vervolgon ontwikkeling is dus ook in deze labtest aangetoond.
2. Doordat de luchtstromingen door de verschillende takken elkaar beïnvloeden (wisselwerking), leidt een verstoring van het luchtdebiet in de luchtkanalen, bijvoorbeeld door het toenemen van het drukverschil over het filter, tot ongewenste veranderingen in de luchthoeveelheden die door het WTW-toestel en de ventilatorconvactor stromen. Uiteindelijk dient het product zelfinstellend te worden. Door ventilatoren met *constant volume control* te gebruiken, kan relatief eenvoudig een constante volumestroom worden gewaarborgd.

6 Model Based Predictive Control: regeling en onderhoud luchtfilters

6.1 Model Based Predictive Control (MBPC)

Een schema van de MBPC is weergegeven in Figuur 25.



Figuur 25. Model Based Predictive Control.

Zoals in voorgaande hoofdstukken toegelicht optimaliseert de modelgebaseerde regeling de instelpunten van de actuatoren (hoeveelheid verse lucht, hoeveelheid recirculatie, verwarming, koeling, bypass) van het systeem op basis van weersvoorspelling, een prestatiefunctiemodel waarmee de prestatiefunctie kan worden gekwantificeerd en een softwarematige optimizer die de actuatorstanden berekent per kwartier voor een tijdhorizon van 24 uur (Loop 1 in Figuur 25), waarbij de prestatiefunctie maximaal is. De prestatiefunctie bestaat uit twee onderdelen, waarbij het binnenklimaat wat zwaarder wordt gewogen dan de kosten:

- 1- Kosten (energie voor verwarmen, koelen, ventilatie) en filters (incl. de installatie en vervanging van de filters). Hoe hoger de kosten, des te lager de prestatiefunctie.
- 2- Binnenklimaat (thermisch comfort) en binnenluchtkwaliteit (fijnstof, CO₂). Hoe meer de gewenste temperatuur afwijkt van de gewenste waarde en hoe hoger de fijnstof- en CO₂-concentraties, des te lager de prestatiefunctie.

Daarna worden steeds de actuatorstanden van de eerste tijdstap geïmplementeerd (Loop 2). Ten slotte worden de adaptieve modellen gefit op basis van de metingen (Loop 3).

6.1.1 Energiekosten

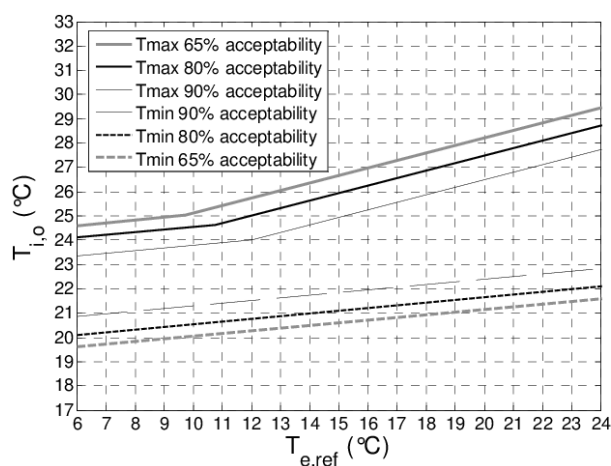
De energiekosten voor verwarmen, koelen en ventileren worden in eerste instantie per kamer bepaald op basis van energievraag en energetische efficiëntie. In tweede instantie wordt daarnaast de uitwisseling tussen warmtepompsystemen (ervan

uitgaande dat die vier ruimtes bedienen) via het centrale circulatienet beschouwd in de optimalisatie.

6.1.2 Binnenklimaat

Binnenklimaat bestaat uit 1) thermisch comfort en 2) luchtkwaliteit.

Voor het thermisch comfort wordt vooralsnog gewerkt met vaste setpoints (gewenste waarde) voor de binnentemperatuur, zoals nu gebruikelijk in de betrokken ziekenhuizen. Het is niet bekend in hoeverre deze waarden in de huidige praktijk worden overschreden tijdens warmere zomerperioden. Als alternatief is het daarom mogelijk om de adaptieve temperatuur grenswaarde methode (ATG-methode) toe te passen, waarbij de binnentemperatuur afhankelijk is van de gewogen gemiddelde buitentemperatuur waarbij gestreefd wordt om binnen de 90% blijven (ISSO publicatie 74), zie voorbeeld in Figuur 26. Het idee is dat bij toenemende buitentemperatuur mensen langzaam wennen aan hogere temperaturen en daardoor ook een hogere binnentemperatuur prefereren.



Figuur 26. ATG-methode voor situatie te openen ramen.

In de prestatiefunctie zullen binnentemperaturen buiten de 90% band zwaar worden 'bestraft' zodat deze praktisch niet zullen optreden als het systeem daarvoor voldoende capaciteit heeft.

Het systeem zal binnen grenswaarden voor de hoeveelheid stof en CO₂-niveau blijven op basis van een CO₂-sensor en een fijnstofsensor. Het regelen op de concentratie fijnstof met de MBPC is daarbij optioneel, mede omdat uit stofmetingen op twee ziekenhuislocaties binnen het project is gebleken dat dit in die situaties, vermoedelijk door goede voorfiltratie en het gebruik van materialen die weinig deeltjes (stof) afgeven niet altijd nodig is.

In bijlage K wordt de fysische modelvorming, wat betreft de ontwikkeling van de CO₂- en fijnstofconcentratie en het thermisch-energetische gedrag, nader toegelicht.

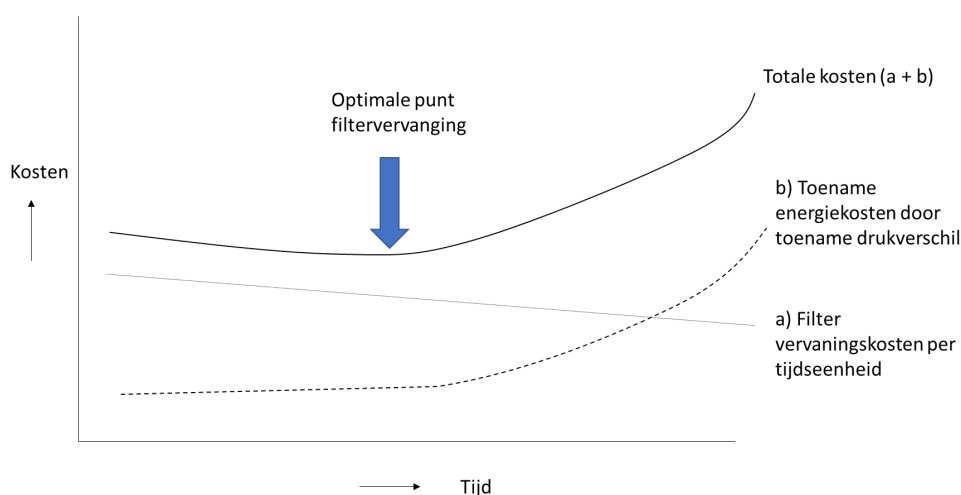
Mocht de MBPC een storing vertonen, buiten de wenselijke grenzen komen of niet werken, dan wordt overgegaan op de fall-back regeling (zie bijlage K).

6.2 Model based onderhoud

Voorwaarde voor brede acceptatie is een systeem dat een minimaal niveau aan onderhoud vergt. In de praktijk worden luchtfilters in ziekenhuizen vaak niet op het optimale punt vervangen. Dit kan op een te laat moment gebeuren met energie-inefficiëntie door deels vervuilde filters als gevolg, maar ook op een te vroeg moment waardoor onnodige kosten worden gemaakt. In het project heeft daarom een ontwikkeling plaatsgevonden om te komen tot een 'model based predictive maintenance' module om het optimale vervangmoment van luchtfilters te bepalen op gebouw- of gebouwclusterniveau.

Bij model based onderhoud zijn de volgende punten van belang:

1. Vervangingskosten per filter nemen af met het aantal filters (daarom moeten filters periodiek in batches worden vervangen).
2. De drukval over een filter (ΔP) neemt toe met de vervuiling (opgevangen hoeveelheid materiaal) van het filter volgens (bekende) curves. De vervuiling van het filter wordt bepaald op basis van het luchtvolume dat door het filter is gestroomd en de PM2.5 concentratie van deze lucht. De ontwikkeling van de vervuiling van het filter kan op basis van het actuele drukverschil over het filter worden gemeten en gevolgd. Hiermee kan samen met de PM2.5 concentratie in de lucht en de luchthoeveelheid het ideale moment van vervangen worden voorspeld.
3. Op basis van de actuele vervuiling gerepresenteerd door het drukverschil, de PM2.5 concentratie in de lucht (buitenlucht t.b.v. ODA filter en secondary air t.b.v. SEC filter) en de gemiddelde volumestroom (bijvoorbeeld op basis van een historisch gemiddelde) kan het tijdstip (datum) worden voorspeld waarop het filter op het ideale moment vervangen moet worden. Dit kan worden gebruikt om te zien welke filters vervangen moeten worden op vervangmomenten en om vervangmomenten te plannen, zie Figuur 27.



Figuur 27. Optimaal vervangingsmoment.

6.3 Vervangingskosten filters in MBPC

Op basis van bovenstaande worden gemiddelde kosten per eenheid gefilterde lucht bepaald om de kosten van het filteren van binnen- en buitenlucht mee te nemen in de MBPC. De filterkosten kunnen dan worden meegenomen in de optimalisatie.

Hiervoor zal de gemiddelde gemeten luchtvervuiling worden bepaald (binnen en buiten) zodat kan worden gecorrigeerd voor een hogere of lagere momentane vervuiling. De aanname hierbij is dat het vervuilen van het filter proportioneel is met het debiet en de gemeten vervuiling (binnen en buiten).

6.4 Modellen

Het optimale vervangmoment van een set filters is gemodelleerd op basis van de kosten voor installatie en vervanging van filters, energiekosten in relatie tot het opgenomen vermogen en de energieprijs. Dit model is in de praktijk toepasbaar gemaakt door een generieke 'filtermanager' te ontwikkelen, waarin voor elk filter de status wordt bijgehouden op basis van drukmetingen en bekende filterkarakteristieken. Naast de filtermanager is een filter-/ventilatormodel ontwikkeld dat past bij de geteste klimatiseringsunit, op basis van de praktijkmetingen van druk, debiet en opgenomen vermogen.

De mathematische totstandkoming van deze modellen is beschreven in Bijlage K.

7 Energiebesparing van het systeem

Voor het bepalen van de potentiële energiebesparing door het ontwikkelde systeem is minimaal één referentiesituatie nodig van een nu gebruikelijk systeem in ziekenhuizen.

Uitgangspunt voor de referentiesituatie is een systeem met centraal opgestelde luchtbehandeling, welke voorzien is van filters, warmteterugwinning (Warmtewiel), verwarming, koeling en ventilatoren voor de toevoer en afzuiging van de geconditioneerde lucht. Vaak zijn deze systemen nog voorzien van stoombevochtiging, waarbij de stoomopwekking decentraal plaatsvindt. Bij deze systemen wordt het verwarmen en/of koelen voornamelijk door centraal opgestelde ketels (stoomketels bij combinatie met bevochtiging) en koelmachines verzorgd en via distributiesystemen naar de luchtbehandelingskasten getransporteerd. De geconditioneerde buitenlucht wordt dan via toevoerkanalen aan de diverse ruimtes toegevoerd en via afzuigkanalen weer naar de luchtbehandelingskast afgevoerd en na uitwisseling van warmte en vocht via het warmtewiel weer uitgeblazen naar de buitenlucht. Voor de warmtebehoefte in de koude periode zijn er aanvullend radiatoren onder de ramen tegen de gevel geplaatst. Koeling in de zomerperiode gebeurt door de centraal in de luchtbehandelingskast gekoelde lucht aan de ruimtes toe te voeren. Waar nodig worden er luchtzijdig na-verwarmers en/of -koelers gemonteerd om aanvullend verwarmings- of koelvermogen voor individuele ruimtes te kunnen leveren.

De regeling van de luchtbehandeling met warmtewielen is veelal voorzien van een stooklijn regeling, waarbij op basis van buitentemperatuur de inzet van warmtewiel + verwarmers, alleen warmtewiel, warmtewiel + koeler of alleen koeler geregeld worden. De toevoer- en afvoerluchthoeveelheden worden op basis van kanaaldrukmetingen geregeld, hierbij worden prestatieverliezen door filtervervuiling gecompenseerd. Tevens biedt dit de mogelijkheid om bij uitgebreide systemen de invloed van zogenaamde zonnekleppen en/of variabele lucht volumeboxen (tijdelijke afsluiting of verminderde luchthoeveelheid van clusters van ruimtes) zonder hinderlijke toename van dynamische drukken in de resterende kanalen te borgen. Voorwaarde hiervoor is wel dat de ventilatoren voorzien zijn van frequentieregelingen, veronderstellend dat inmiddels de vroeger toegepaste Dahlander elektromotoren (hoog-laag toeren regeling) op basis van meer-jaren onderhoudsplanung in de luchtbehandelingssystemen vervangen zijn. De regeling voorziet veelal in verschillende dag-nacht luchthoeveelheden (ten gevolge van verschillende activiteitsniveaus) die op basis van kloktijden ingesteld kunnen worden. De inblaastemperatuur wordt constant gehouden; alleen bij hoge buitentemperaturen ($> 28^{\circ}\text{C}$) loopt de inblaastemperatuur mee bij verder oplopende buitentemperatuur.

Mechanische ventilatie BD25 1e t/m 4e verd						NACHT				DAG			
						Verwarmer		Stoom		Koeler		Verwarmer	
						14 kW _e		73 kW _e		52 kW _e		0,0 kW _k	
						29 kW _e		116,2 kW _{th}		82,7 kW _{st}		0,0 kW _k	
Aanzuigkast	48.500 m³/h	80 Pa	48.000 m³/h	78 Pa	30.000 m³/h	68 Pa							
Luchtaanzuig	48.500 m³/h	100 Pa	48.000 m³/h	98 Pa	30.000 m³/h	88 Pa							
Filter F7	48.500 m³/h	126 Pa	48.000 m³/h	123 Pa	30.000 m³/h	113 Pa							
WTW	48.500 m³/h	21 Pa	48.000 m³/h	21 Pa	30.000 m³/h	11 Pa							
Verwarmer	48.500 m³/h	64 Pa	48.000 m³/h	63 Pa	30.000 m³/h	53 Pa							
Koeler	48.500 m³/h	1.356 Pa	48.000 m³/h	874 Pa	30.000 m³/h	697 Pa	8,8 kW _e					17,7 kW _e	
Ventilator	48.500 m³/h	120 Pa	48.000 m³/h	118 Pa	30.000 m³/h	108 Pa							
Filter F9	48.500 m³/h	30 Pa	48.000 m³/h	29 Pa	30.000 m³/h	19 Pa							
Bevochtiger	48.500 m³/h	4 Pa	48.000 m³/h	4 Pa	30.000 m³/h	1 Pa							
Inblaasklep	48.500 m³/h	260 Pa	48.000 m³/h	255 Pa	30.000 m³/h	150 Pa							
Wegblaas	48.500 m³/h												
Radiatoren							140,0 kW _{th}					140,0 kW _{th}	
Patiëntenkamer 4 p	46 m²	2,8 m	481 m³/h		300 m³/h		142 We	2.129 W	518 W	0 W		285 We	2.565 W
Energie jaar berekening							848 kWh	2.292 kWh	509 kWh	221 kWh		801 kWh	946 kWh
Retourkast													
Luchtaanzuig	48.500 m³/h	200 Pa	48.000 m³/h	196 Pa	30.000 m³/h	120 Pa							
Aanzuigklep	48.500 m³/h	4 Pa	48.000 m³/h	4 Pa	30.000 m³/h	1 Pa							
Filter F7	48.500 m³/h	60 Pa	48.000 m³/h	59 Pa	30.000 m³/h	49 Pa							
Ventilator	48.500 m³/h	816 Pa	48.000 m³/h	537 Pa	30.000 m³/h	428 Pa	5,4 kW _e					10,8 kW _e	
WTW	48.500 m³/h	126 Pa	48.000 m³/h	123 Pa	30.000 m³/h	113 Pa							
Wegblaas	48.500 m³/h	70 Pa	48.000 m³/h	69 Pa	30.000 m³/h	59 Pa							

Figuur 28. Jaaroverzicht energieverbruik luchtbehandelingskast UMCG bouwdeel 25, 4.519 m².

In Figuur 28 is het jaarlijkse energieverbruik van een centraal opgestelde luchtbehandelingskast van het UMCG weergegeven. De relevante getallen zijn geel gearceerd. Nadere gegevens:

- Dagstand luchthoeveelheid = 48.000 m³/h.
- Nachtstand luchthoeveelheid = 30.000 m³/h.
- Ventilatievoud Dag = 3,7 per uur.
- Ventilatievoud Nacht = 2,3 per uur.
- Totaal aangesloten oppervlak = 4.519 m².
- Elektriciteitsverbruik (ventilatoren) voor een 4-persoons patiëntenkamer van 46 m² = 1.649 kWh/jaar.
- Luchthoeveelheid voor 46 m² = 481 m³/h Dag en 300 m³/h Nacht.

Het elektrische ventilatorvermogen in relatie tot het gebruiksoppervlak bedraagt ca. 6,2 W/m² (dagbedrijf) en het verbruik 35,85 kWh/m² per jaar. Tabel 15 geeft een overzicht van het jaarlijkse energieverbruik voor een 4-persoons patiëntenkamer.

Tabel 15. Jaarlijks energieverbruik elektriciteit, verwarmen, koelen en bevochtigen luchtbehandelingskast en aanvullende warmteradiatoren UMCG voor een 4-persoons patiëntenkamer.

Type	Jaarverbruik (kWh)
Elektriciteit	1.649
Centrale verwarming	2.463
Warmte luchtbehandelingskasten	775
Koude	626
Stoom	792

Zoals in de oorspronkelijke doelstelling van dit project omschreven, dient de te ontwerpen klimatiseringsunit minimaal 15% energiebesparing t.o.v. de referentiesituatie te behalen, uitgaande van centraal opgestelde ketels in combinatie met restwarmte vanuit WKK voor directe verwarming of indirecte omzetting tot koeling in absorptiekoeler en aanvullende compressiekoeling. De rendementen en verhoudingen zijn weergegeven in Tabel 1 in paragraaf 1.3.

Het huidige systeemontwerp is als 'proof of concept' in de lab-omgeving van TNO uitvoerig getest, zie ook hoofdstuk 5. Uitgangspunt binnen dit project was het samenstellen van marktconforme componenten voor een conceptuele testopstelling. De gekozen warmtepomp van Daikin (kleinste model) voorziet in het aansluiten van 6 ventilatorconvectoren (dus feitelijk 6 ruimtes). Door het aansluiten van maar één ventilatorconvector op de compressorunit van de warmtepomp werd deze laag in deellast bedreven en tevens was er geen mogelijke warmte uitwisseling tussen ventilatieconvectoren (ruimtes) mogelijk. De gemeten energetische prestaties van het gehele systeem zijn daarom indicatief.

Om een vergelijking van de energieprestaties met betrekking tot ventilatie van de twee systemen uit te voeren, is het gemiddelde specifieke vermogen (vermogen per m³/s luchtdebiet) voor beide systemen berekend, Tabel 16. Duidelijk wordt dat de centraal opgestelde luchtbehandelingsunit aanzienlijk meer vermogen per m³/s luchtdebiet nodig heeft. Oorzaak hiervan is te vinden in de grotere weerstanden door drievoudige filtratie (Voor-filter F7, Na-filter F9 en Retourluchtfilter F7), twee warmtewisselaars (Koeling, Verwarming) en de benodigde compensatie voor het drukverlies in het kanalenstelsel. Bij het referentiemodel (LBK UMCG) levert het warmtewiel 126 Pa en de extra warmtewisselaar (koeler) 63 Pa en zijn er in totaal drie filtersystemen 280 Pa in dagbedrijf, wat gepaard gaat met extra weerstand. Daarnaast kenmerkt zich het huidige ontwerp door toepassing van een kruistroomwisselaar (WTW-unit) en een warmtewisselaar (verwarmen/koelen m.b.v. koudemiddel in reversed cycle) in de ventilatorconvector.

Voor de berekening van de prestaties van de WTW-unit zijn de meetwaarden van de laagste ventilatorstand gebruikt. Het gemiddelde vermogen (Hoog, Midden, Laag bedrijf) voor de ventilatorconvector zonder simulatie van filtervervuiling komt op 854 W / (m³/s).

Tabel 16. Gemiddelde vermogen per debiet (in W/(m³/s)) voor de ventilatorconvector en WTW-unit samen, zonder filtervervuiling (boven) en referentie LBK UMCG Dag/Nacht bedrijf (onder).

Ventilatorconvector				WTW	
Ventilatorbedrijf	dP [Pa]	V [m ³ /h]	Power [W]	Power [W]	Specifiek W / [m ³ /s]
Hoog	63.7	699	120	58	917
Midden	47.5	586	77	58	829
Laag	35	490	53	58	816
				Gemiddelde	854

LBK UMCG Bouwdeel 25

		Toevoer	Afvoer		
Ventilatorbedrijf		V [m ³ /h]	Power [W]	Power [W]	Specifiek W / [m ³ /s]
Dag		48000	17700	10800	2138
Nacht		30000	8800	5400	1704
				Gemiddelde	1921

Echter, het systeem is nog niet voorzien van een filtersysteem om de WTW-unit tegen vervuiling te beschermen (dit geeft een slechtere prestatie), de ventilator van de ventilatorconvector is nog niet traploos regelbaar (dit geeft een betere prestatie) en de afmetingen van de recirculatie-filterbox zijn nog niet afgestemd met de uitgangspunten vanuit het PvE (onbekend effect op de prestatie). De resultaten van de berekeningen zijn daardoor indicatief.

Naast de energiebesparing op basis van minder ventilatorvermogen kenmerkt het systeem zich door zijn flexibiliteit. Bedrijfstijden, binnenklimaat, zonwering en mate van luchtverversing op basis van CO₂-meting kunnen per 4-persoons patiëntenkamer individueel geregeld worden, hierdoor kan bij geen of minder bezetting significant energie bespaard worden.

Om een indicatie van de mogelijke besparing te krijgen, is berekend wat de potentiële energiebesparing voor het ventilatiedeel is aan de hand van een 4-persoons patiëntenkamer van het UMCG (46 m²). Uit data van het UMCG blijkt dat de kamer een gemiddeld ventilatiedebiet heeft van 358 m³/u. Voor het specifiek ventilatorvermogen is gebruik gemaakt van de waarden uit Tabel 16. Op basis van het gemiddeld debiet, specifiek ventilatorvermogen en verwachte jaarlijks bedrijfstijd is een schatting gemaakt van het jaarlijkse elektriciteitsverbruik, gepresenteerd in Tabel 17.

Tabel 17 Indicatie van jaarlijks elektriciteitsverbruik voor ventilatie in de huidige situatie (LBK bij UMCG) en bij het decentrale concept.

	Gem. debiet [m ³ /u]	Specifiek ventilator- vermogen [W/m ³ s]	Bedrijfstijd [uren/jaar]	E-verbruik [kWh/jaar]
LBK bij UMCG	358	1921	8760	1673
Decentraal concept	358	854	8760	744
Decentraal concept met 10% leegstand	358	854	7884 (10% minder)	670

In het huidige conceptontwerp kan naar verwachting ongeveer 930 kWh/jaar elektriciteit (56%) bespaard worden op de ventilatie. Daarnaast is er de mogelijkheid om het systeem volledig uit te schakelen als er geen personen in de ruimte zijn, en alleen voor temperatuurbewoud binnen de vastgestelde uitgangspunten de kamer kortstondig te koelen en/of te verwarmen. Bij een veronderstelde leegstand van 10% bedraagt de berekende totale besparing op de ventilatie ongeveer 1000 kWh/jaar (60%).

Naast de besparing op elektriciteitsverbruik voor ventilatie zijn er mogelijkheden voor efficiëntere thermische inpassing. Zo kunnen bij toepassing binnen nieuwbouwprojecten de benodigde waterzijdige systemen voor opwekking van koude en warmte voor de warmtepomp op duurzame bronnen aangesloten worden. De waterzijdige bedrijfstemperatuur van de warmtewisselaar van de VRV-unit ligt tussen de 10 en 45°C, hiermee bestaat de mogelijkheid om deze zowel op conventionele bestaande ketels en koelinstallaties als ook op WKO-systemen (open of gesloten), koeltoren (gesloten of droge) en/of warmtepompen aan te sluiten. Generiek kan gesteld worden dat de VRV-unit door zijn gunstige temperatuurbereik (10°C - 45°C) bij inpassing in bestaande gebouwen en hun distributiesystemen het mogelijk maakt om de opwekkingtemperatuur van centrale verwarming vergaand te verlagen en van koelinstallaties te verhogen. Dit effect zorgt voor een energie-efficiëntere opwekking en biedt mogelijkheden voor de inzet van andere vormen van warmte- en koude-opwekking voor de ringleiding.

Door slim te regelen met de MBPC kan de warmte- en koude-vraag worden gereduceerd. Door op ruimteniveau op basis van CO₂-metingen de noodzakelijke hoeveelheid luchtverversing te regelen, wordt energie bespaard t.o.v. centrale

luchtbehandeling welke normaliter alleen voorzien is van Dag-Nacht regeling en dus gedurende het jaar het gehele gebouw voorziet van goede luchtverversing.

Door toepassing van een bypass om de kruisstroomwarmtewisselaar heen is het mogelijk om zomer-nacht ventilatie voor het 'terug koelen' van de ruimte toe te passen. Hierdoor kan naar verwachting ook een aanzienlijke energiebesparing worden gerealiseerd.

Het tijdig sturen van een geautomatiseerde zonwering voorkomt extra zonbelasting en vermindert de koelvraag of kan onder gegeven omstandigheden wel extra zoninstraling toelaten om de verwarming te helpen, al naar gelang de door de MBPC berekende forecast.

Het volledig uitschakelen van de WTW-unit, bij geen bezetting van de patiëntenkamer behoort ook tot de mogelijkheden, voor behoud van de binnentemperatuur kan dan op gegeven momenten de ventilatorconvactor zorg dragen.

Daarnaast is het concept ontwerp voorzien van een zogenaamde keuze box (koudemiddel selectie voor verwarmen of koelen), deze maakt het mogelijk om bij aansluiting van meerdere ventilatorconvectoren thermisch energie tussen de systemen uit te wisselen, waarbij bij grotere systemen afhankelijk van de ligging van de patiëntenkamers onderling (bv. Noord-Zuid oriëntatie) thermische energie uitgewisseld gaat worden.

De indicatieve besparingen zijn op basis van het nu voorliggende en in context van de benoemde beperkingen en onzekerheden van het concept ontwerp bepaald. In een eventueel vervolgtraject dient tijdens de test van een prototype de haalbare energiebesparing bepaald te worden.

8 Inhoudelijke conclusies

De resultaten van uitgevoerde experimenten aan het proof of concept laten zien dat het proof of concept goed functioneert, goed presteert en ca. 55% energie aan de meter kan besparen (totaal verwarming, koeling en ventilatie) t.o.v. de referentiesituatie.

Daarnaast is de basis ontwikkeld voor een intelligente sturing en zijn experimenten uitgevoerd om de werking daarvan te analyseren. De ontwikkeling heeft zich vooral gericht op de optimalisatie van filtervervanging en regeling. De gebruikersinterface voor de technische dienst, het medisch personeel en de patiënten heeft nog aandacht nodig.

Het ontwikkelde concept is goed binnen de betrokken ziekenhuizen inpasbaar en kan relatief eenvoudig worden aangepast. Bij installatie en aanpassingen van het systeem kan de warmtepomp op de gang worden geplaatst of in een separate ruimte. Vanuit deze locatie wordt een aantal aangesloten ruimten bediend. Punt van aandacht hierbij is de koudemiddelleidingen tussen de warmtepompen en het systeem in de betreffende ruimte.

Er zou op basis van het ontwikkelde en geteste proof of concept nog wel een optimalisatie moeten worden doorgevoerd om tot een prototype te komen. Met een dergelijk prototype zou een praktijkexperiment bij een aantal ziekenhuizen kunnen worden uitgevoerd.

Er is voldoende kennis gegenereerd om de stap van proof of concept naar prototype door te ontwikkelen. Dit betreft op hoofdlijnen de volgende punten:

- Toepassen van traploos regelbare ventilatoren.
- Integreren van het filtersysteem.
- Combineren van het filtersysteem met de WTW-unit en de convectorunit tot één compact systeem.
- Interface voor de patiënt en technische dienst van de Model Based Predictive Control (MBPC).

Uit de simulaties met de MBPC is gebleken dat de MBPC de energievraag minimaliseert bij het realiseren van de ingestelde comfortparameters (temperatuur en CO₂-concentratie) en zich daarbij logisch en robuust gedraagt.

De ontwikkelde Filtermanager module is flexibel en voldoet aan de eisen. Voor toepassing in de praktijk moet wel een gebruikersinterface worden toegevoegd.

Daikin onderzoekt onder welke voorwaarden men het proof of concept wil doorontwikkelen tot een prototype dat gebruikt kan worden in een vervolgonderzoek in de praktijk van een ziekenhuis.

Een aantal ziekenhuizen die deel uitmaken van het TKI consortium hebben zich bereid verklaard om een dergelijk toekomstig praktijkexperiment uit te voeren.

9 Aandachtspunten doorontwikkeling

9.1 Algemeen

Bij het proof of concept vindt recirculatie (secondary air SEC) alleen plaats op ruimteniveau. Hierdoor vindt geen verspreiding van eventuele geurtjes, virussen of micro-organismen plaats naar andere ruimtes. Dit wordt als groot voordeel gezien voor grote uitbraken of nieuwe pandemieën.

Door het proof of concept worden de flexibiliteit en vrijheid om bouwkundige aanpassingen door te voeren vergroot. De benodigde ruimte voor de technische infrastructuur wordt per ruimte groter, maar dit betreft decentrale systemen waardoor de centrale infrastructuur beduidend eenvoudiger wordt.

Op basis van berekening is vastgesteld dat het systeem een energiebesparing van ca. 55% aan de meter kan realiseren (verwarmen, koelen en ventileren). Hiermee wordt ruimschoots voldaan aan de energetische doelstelling van een reductie van ten minste 15%. Tijdens een pilotfase waarbij een aantal toestellen in patiëntenkamers van ziekenhuizen worden geïnstalleerd en in de praktijk worden gemonitord, kan de energiebesparing nauwkeuriger worden bepaald. Het energiegebruik van het referentiesysteem blijft hierbij echter een aanname.

Bij het huidige systeem is gekozen voor individuele verwarming en koeling met daarbij één warmtepomp per groep van ruimten. Het aantal aangesloten ruimten bedraagt ten minste vier en kan oplopen tot een hoger aantal ruimten, afhankelijk van de capaciteit van de warmtepomp. Dit lijkt beter aan te sluiten bij bestaande systemen.

9.2 Aandachtspunten bij doorontwikkeling

Het gebruik van CO₂-sensoren is in de setup niet getest. Dit moet in een latere fase met een prototype plaatsvinden. Op basis van de ervaringen in andere projecten worden hiermee geen problemen verwacht. Hierbij moet echter wel worden bedacht dat de CO₂-regeling moet kunnen worden overruled in de regeling. Hiermee moet het mogelijk zijn om ook bij hoge CO₂-concentraties er toch voor te kiezen recirculatie toe te passen indien dat om welke reden dan ook wenselijk is.

Uit de experimenten blijkt overduidelijk dat het wenselijk is om gebruik te maken van traploos regelbare ventilatoren. Deze eis was ook in het programma van eisen opgenomen, echter doordat ervoor gekozen is om gebruik te maken van bestaande componenten kon dat in het proof of concept niet worden gerealiseerd.

Verstoring van het luchtdebiet in de luchtkanalen, bijvoorbeeld door het toenemen van het drukverschil over het filter, leidt tot ongewenste veranderingen in de luchthoeveelheden die door het WTW-toestel en de ventilatorconvactor stromen. Door ventilatoren met *constant volume control* te gebruiken, kan relatief eenvoudig een constante volumestroom worden gewaarborgd.

Zeer waarschijnlijk is een goede filtratie van de toegevoerde buitenlucht noodzakelijk (ODA) om de binnenstofconcentratie (PM_{2,5}) laag te houden. Uit de metingen in een aantal patiëntenkamers bleek dat de stofconcentratie erg laag was. Dit is vermoedelijk veroorzaakt door a) goede voorfiltratie van de buitenlucht en b) door materialen toe te passen die weinig deeltjes (stof) afgeven.

De uitdaging is met name om het prototype te miniaturiseren. In andere woorden de filterunit, de WTW-unit en de verwarmers/koeler in een zo klein mogelijke behuizing te plaatsen met een beperkte hoogte. Andere aandachtspunten hierbij zijn het minimaliseren van de geluidsproductie en een eenvoudige toegang voor filterwisselingen. Door het toepassen van één warmtepomp voor meerdere ruimten is het ook zeer de vraag of het beeld van de inpassing (Figuur 8) nog standhoudt. Als meerdere ventilatiesystemen op één warmtepomp worden aangesloten, kan de ventilatie-unit mogelijk effectiever als plafondunit worden uitgevoerd.

Door gebruik te maken van een eenvoudig centraal circulatiesysteem om warmte toe en af te voeren ontstaat een systeem dat eenvoudig kan worden aangesloten c.q. kan worden toegepast in combinatie met een warmte-/koudeopslagsysteem. Uiteindelijk is dus ook voor het ontwikkelde proof of concept een centraal systeem noodzakelijk. Dit wordt door de betrokken ziekenhuizen echter niet als probleem gezien omdat dit geen luchtkanalen betreft. Door deze keuze neemt het totale installatievolume af. Dit centrale circulatiesysteem hoeft waarschijnlijk niet zwaar te worden geïsoleerd omdat de verliezen naar verwachting beperkt zullen zijn. Het temperatuurniveau zal in het algemeen in de buurt liggen van de omgevingstemperatuur van 20-25°C. Mogelijk dat indien de temperatuur van dit systeem onder de omgevingstemperatuur komt, isolatie noodzakelijk is om condensvorming op deze leidingen te voorkomen.

Een aandachtspunt bij doorontwikkeling is een interface voor de bediening door de patiënt, medisch personeel en de technische dienst en informatie voor de technische dienst. In de huidige praktijk is er geen interface voor patiënten en de ziekenhuizen hebben daar ook minder goede ervaringen mee. Dit zal in een vervolgtraject in overleg met de betrokken partijen (ziekenhuizen, Kropman, TNO) kunnen worden gedefinieerd, ontwikkeld en getest in het systeem van Kropman (InsiteView).

Tot slot zal de besturing en interactie met het gebouwbeheersysteem (GBS) moeten worden doorontwikkeld om energie-efficiëntie en comfort verder te optimaliseren. De koppeling tussen de MBPC en InsiteView is in dit project gerealiseerd en getest. Hiermee kan de MBPC worden gekoppeld aan het GBS. Verdere verbetering van energie-efficiency en comfort, gebruikmakend van deze koppeling, is mogelijk, bijvoorbeeld door het koppelen van automatische zonwering aan de MBPC. Daarbij kan per ruimte, meerdere ruimtes of gevel de zonwering worden meegenomen in de regeling.

10 Ondertekening

Delft, 16 augustus 2021

TNO

Ir. A.C. Westerlaken
Research Manager

Drs. R.A. Bezemer
Auteur

A TKI Gasloos ziekenhuis – User Requirements definitief

Project: TKI Gasloos Ziekenhuis - Programma van Eisen				
WP1: Context en Randvoorwaarden / WP2: Opstellen Programma van Eisen				
Met antwoorden uit werksessie 19 april 2019, met Stephan Hamm (UMCG), Gerbrand Middelkoop (UMCU), Simke de Jong (Alrijne), Stefan van Heumen, Roberto Traversari (TNO)				
Aangepast en vastgesteld op 24 mei 2019				
			Focus: prestaties, evt. over functies heen	
#	Vragen ter bepaling gebruikerseisen	Gebruikerseisen	Performance Eisen (SMART)	MoSCoW ⁴
Systeemeigenschappen				
1	Wensen we een universeel systeem of meerdere varianten (verschillende capaciteiten, koppelbaar modulair systeem)?	Deze keus is aan de ontwerpers. Moet wel geschikt zijn voor zowel nieuwbouw als renovatie.	n.v.t.	
2	Wat zijn de afmetingen en gewicht van het systeem, de buizen etc.?	Componenten moeten niet te zwaar zijn (zie verderop), toestel moet passen in zone tussen gang en patiëntenkamer. Er moet hoe dan ook nog een bed door de gang van het ziekenhuis kunnen en het mag de zorgprocessen niet hinderen. Eventuele vervanging van het toestel bij storingen moet door één persoon kunnen plaatsvinden. Het heeft de voorkeur om het toestel op de vloer te plaatsen i.v.m. onderhoud. Als tweede optie wordt de ruimte boven het verlaagd plafond aangegeven. Het toestel moet vanuit de niet medische ruimte (gang) toegankelijk zijn voor onderhoud, inspectie en vervanging.	Componenten moeten binnen Arbo-eisen door één persoon kunnen worden vervangen; gangen moeten min. 1,8 m breed blijven. Zie ook eis 1.	M
5	Voor welke ruimte / functies moet het toestel minimaal geschikt zijn?	De een- of meerpersoons patiëntenkamer, maximaal 4 patiënten	Toestel minimaal geschikt voor één patiëntenkamer met maximaal 4 patiënten	M
6	=> hoeveelheid ontvochtiging, hoe om te gaan met afvoer van vocht?	RV: zie onder. Verder: komt later in ontwerpseisen	Toestel moet kunnen ontvochtigen. Het eventueel ontstane condens moet door het toestel zelf verdampen, het is niet wenselijk dat er een aansluiting op het riool noodzakelijk is. Ook mag	M

⁴ Must / Should / Could / Won't

			het condens niet tot microbiologische groei in het toestel of de kanalen leiden.	
7	=> hoeveelheid bevochtiging, hoe om te gaan met toevoer van vocht?	<i>RV: zie onder. Verder: komt later in ontwerpeisen; nieuwe patiëntenkamers worden over het algemeen niet meer bevochtigd.</i>	Toestel moet kunnen bevochtigen. Tot RV ten minste 50% in de ruimte i.v.m. griep virus (conform artikel Yang et al 1), ofwel in absolute zin 7,72 g/kg. RV-grens mag enige tijd (n.t.b.) worden overschreden. "PROGRAMMA VAN EISEN Gezonde Kantoren 2018: Ontwikkeld door het Platform Gezond Binnenklimaat" d.d. November 2018 geeft aan minimaal 35% bij 21°C (5,39 g/kg)	M
8	=> temperatuur: range en stabiliteit	<i>Zie onder</i>	Tot 22,5 +/- 1,5 °C	M
9	=> maximale geluidsproductie/ geluidsniveau	<i>Zie onder</i>	Maximaal 30 dB(A) installatiegeluid in patiëntenkamer	M
10	=> toevoer luchtkwaliteit	<i>Zie onder</i>	SUP 1 volgens NEN-EN 16798-3 "SUP 1 = Supply air with very low concentration of particulate matter and/or gases" en "In cases where supply air level of SUP 1 or 2 is required and where the outdoor air quality based on gaseous components is of level ODA 2 or ODA 3 it is recommended to complete the particle filtration with suitable gas phase filtration (Table 17) to reduce harmful levels of CO, NOx, SOx, VOC and O ₃ ." Doel hiervan is te voldoen aan publicatie "PROGRAMMA VAN EISEN Gezonde Kantoren 2018: Ontwikkeld door het Platform Gezond Binnenklimaat" d.d. November 2018"	M
11	=> hoeveelheid lucht	Homogeniteit: ventilatie-efficiency zodat hele ruimte doorspoeld wordt; reductie huidige kanalsysteem met 80%	Voldoende zijn voor een veilige omgeving uitgaande van de eisen uit het Bouwbesluit (per persoon ten minste 25 m ³ /h aan verse lucht). De mensen in de ruimte mogen niet langdurig "geurtjes" waarnemen zoals urine, fecaliën, lichaamslucht. Na een maximale geurbelasting moet deze binnen een bepaalde tijd (overeenkomend met een vv van 3) zijn weggenomen. Wens is te voldoen aan "PROGRAMMA VAN EISEN	M

			Gezonde Kantoren 2018: Ontwikkeld door het Platform Gezond Binnenklimaat" d.d. November 2018, die geeft aan minimaal 35% bij stel 21°C (5,39 g/kg) en geeft voor klasse A "zeer goed" aan dat per persoon ten minste 60 m³/h aan verse lucht toegevoerd wordt.	
12	=> vermogen verwarming en koeling	Komt later in ontwerpeisen (60 W/m² verwarming, 100 W/m² koeling); warm tapwater buiten scope; per unit/ruimte minimaal 4,8 kW koelvermogen		S
13	Wat kan het maximale aansluitvermogen zijn?	Uitgangspunt voor toestel: 230 V, 16 A	Maximaal 3,6 kW (16 A x 230 V)	S
14	Wat is de maximale kostprijs ?	Optioneel: In geval van leaseconstructie: EUR per m³ geconditioneerde lucht nog te bepalen. Uitgaan van all-in prijs (inclusief onderhoud en beheer).	n.v.t.	
15	Wat is het maximale gewicht?	Componenten moeten niet te zwaar zijn	Te vervangen componenten max. 23 kg.	M
16	...	Vanuit circulariteit / Green Deal Zorg: geen eigenaar van toestel, leaseconstructie voor 25 jaar. In dat geval is levensduur voor de gebruiker niet van belang.	n.v.t.	C
Systeemlocatie (ruimte, locatie, geometrie, kleur systeem)				
17	Voor welke locaties moet het systeem geschikt zijn (b.v. zeeklimaat, nabij snelwegen, buitenland)?		Geschikt voor alle Nederlandse locaties.	
18	Voor welke ruimtes moet het systeem geschikt zijn (b.v. kantoren, verblijfruimtes, patiëntenkamers)?	We beperken ons in eerste instantie tot één ruimte: de patiëntenkamer met maximaal 4 patiënten	Geschikt voor patiëntenkamers.	
19	Wat is de minimale ruimte (m², m³) die één systeem moet kunnen klimatiseren ?	Minimaal één patiëntenkamer voor 4 patiënten van 4 x 12 m² = 48 m² excl. sanitair (ter indicatie: 1-persoonskamer UMCG = 19 m², 1-persoonskamer UMCU = 40 m², 2-persoonskamer UMCG = 25 m²)	Minimaal 48 m² en 144 m³	M
20	Waar moet het systeem komen (b.v. vals plafond, gang, ...) ?	Niet in de patiëntenruimte zelf; voorkeur <u>niet</u> op hoogte onder/boven plafond	Niet in de patiëntenruimte zelf; voorkeur <u>niet</u> op hoogte onder/boven plafond. Zie ook eis 1	W
21	Hoe verbindingen te maken (voeding, luchtleidingen, mechanisch en elektronisch)?	Liever een leiding dan een kanaal; liever alleen een stekker; hoeft dus niet op warmte/koude net	Standalone, niet aangesloten op centraal ventilatiesysteem of warmte/koudenet.	S

22	Kan het voorkomen dat meerdere systemen bij één ruimte toegepast worden?	Voorlopig niet.	Geen luchtwisseling (SEC) tussen patiëntenkamers via het systeem	M
23	...	Uitgangspunt: geen te openen ramen en ventilatieroosters; geen tocht of koudeval; Rc-gevel = 3,0; 45% open geveloppervlak; qv-10 = 1;	n.v.t.	
Installatie en onderhoud				
24	Hoe moet het systeem geïnstalleerd worden (b.v. 1 man, gereedschappen, tijdsduur, maatsysteem, ...)?	Plug-and-play	Plug-and play te installeren.	C
25	Waar moet het filter worden vervangen en hoe kom je er bij (b.v. gang)?	Niet in de patiëntenruimte zelf; voorkeur in een verkeers- / technische ruimte	Niet in de patiëntenruimte zelf; voorkeur in een verkeers- / technische ruimte	W
27	Hoe kom je bij het systeem in geval van storing of onderhoud (b.v. luikje of van plafond halen)?	Service en onderhoud moet vanaf de gang	Service en onderhoud moet vanaf de gang	M
28	Wat is het gewenste onderhoudsinterval?	Er is aangegeven dat het acceptabel zou zijn als er 1 maal per jaar naar het toestel wordt gekeken onder voorwaarde dat dit ruim van tevoren (ten minste één maand) wordt aangegeven.		C
29	Hoe moet de signalering van onderhoudsbehoefte van een toestel worden aangegeven?		Voorsignalering voor aankomend onderhoud: een maand	C
30	Hoelang mag een "onderhoudsbeurt" duren?	Plug-and-play vervangen unit door reserve-unit op voorraad	Maximaal 4 uur.	S
31	Wat moet de minimale beschikbaarheid van het toestel zijn?			M
34	...	Eenvoudige storing graag makkelijk zelf op te lossen. Plug-and-play vervangen. Kamer-/patiënten-instelling automatisch overnemen bij vervanging.		C
Bouwtechnisch				
Brandveiligheid				
35	Welke eisen moeten er gesteld worden i.v.m. brandveiligheid?	Geen recirculatie bij brand	Gekoppeld aan brandmeldings- of sprinklerinstallatie via GBS, recirculatie moet automatisch stoppen bij brandmelding	M
Geluid				
36	Hoeveel geluid mag het systeem produceren?		Inclusief inblaas: maximum 30 dB(A) (conform Bouwbesluit voor verblijfsgebied)	M

	Elektrische veiligheid			
37	Aan welke eisen moet worden voldaan?		Alle wettelijke eisen	M
38	Eisen aan koudemiddelen (b.v. toxiciteit, corrosie, risico lekkage)?		Geen brandbare koudemiddelen.	
39	Eisen aan condensvorming?	Geen condenswaterafvoer gewenst, maar ook geen bacteriële groei in het toestel	n.v.t., zie ook eis 6	
40	...	Mogelijk eisen stellen aan rendement: beter dan de referentie. Hoeveel energie verbruikt je per patiëntenkamer? Nader te bepalen (op basis van gegevens UMCG per m ²)		
Regelen binnenklimaat				
41	Hoe schoon moet de lucht binnen zijn (eisen luchtkwaliteit)?	Omgaan met verneveling medicatie (is mogelijk de zwaarste eis). Lichaamsgeur, medicatie, urine, fecaliën > Afh. van aantal patiënten in de kamer 'on demand' lucht verversen	Regeling op maximum CO ₂ -gehalte in de ruimte, deze mag niet meer bedragen dan + 400 ppm boven de buitenluchtconcentratie. Alarmering/signalering vindt plaats bij 1.200 ppm (maximale waarde Bouwbesluit). "PROGRAMMA VAN EISEN Gezonde Kantoren 2018: Ontwikkeld door het Platform Gezond Binnenklimaat" d.d. November 2018 geeft voor klasse A "zeer goed" aan dat het CO ₂ -niveau niet meer mag bedragen dan maximaal + 400 ppm boven de buitenluchtconcentratie.	M
42	Zijn filters altijd nodig / welke filterkwaliteit is nodig (micron)?		Ruimteconditie: fijnstofconcentratie PM1 2,5 mg/m ³ ; "PROGRAMMA VAN EISEN Gezonde Kantoren 2018: Ontwikkeld door het Platform Gezond Binnenklimaat" d.d. November 2018 geeft als eis voor een A-klasse een gecorrigeerde PM 2,5 (fijnstof) concentratie van maximaal 10 microgram/m ³ en fijnstofconcentratie PM2,5 < 25% van de buitenconcentratie i.v.m. NOx en roet.	M
43	Welke actuatoren moet het systeem aansturen (b.v. ook optioneel zonwering, verlichting, ...)?	Geen koppeling aan zonwering (gaat al automatisch via GBS)	Mocht er een raam openstaan (als die optie er is) moet het toestel automatisch uitschakelen	
44	Welke eisen zijn er aan de te regelen parameters (b.v. min en max temperatuur)?	Zo laag mogelijke overlevingskans micro-organismen; comfortabele verblijfsomgeving	RV ten minste 50% in de ruimte (conform artikel Yang et al ¹), ofwel in absolute zin 7,72 g/kg bij 21°C. RV-grens mag enige tijd (n.t.b.) worden	M

			overschreden. Zie ook publicatie "PROGRAMMA VAN EISEN Gezonde Kantoren 2018: Ontwikkeld door het Platform Gezond Binnenklimaat" d.d. November 2018	
45	Hoe snel moet een ruimte kunnen opwarmen en afkoelen, en onder welke condities?		Hersteltijd na uitschakeling of als er geen aanwezigheid is geweest: 60 minuten is acceptabel. Bij afwezigheid van mensen mag de temperatuur variëren tussen de 22,5 +/- 3 °C	S
46	Zijn er eisen vanuit regelgeving of vanuit de ziekenhuizen of anders?	EIA subsidie moet gegeven kunnen worden; kan de producent de eisen m.b.t. circulariteit definiëren?		C
Gebruikersinterface				
47	Voor welke stakeholders komt er een gebruikersinterface (b.v. gebouwbeheer, medisch personeel, patiënten)?	Optioneel: patiënt/verpleegkundige kan binnen bandbreedte temperatuur inregelen; voor spreek-/onderzoekskamer (vooralsnog out-of-scope) is dit voorwaarde		M
48	Waar is de gebruikersinterface (b.v. telefoon, tablet, display op de wand)?	Op patiëntenkamer		M
MBPC (Model Based Predictive Control) software				
49	Welke informatie is verder nodig, b.v. vanuit het gebouw (zoals zonbelasting)?	weerstation + stand zonwering		
MBPC hardware				
50	Welke communicatienetwerken zijn beschikbaar en welke eisen worden daaraan gesteld?	Voorkeur protocollen over IP	Bac-net en/of MOD-Bus	M
51	Welke eisen zijn er voor systeemveiligheid, privacy, e.d.?	Beveiliging via VLAN / ICT-ziekenhuisnetwerk.	Geen rechtstreekse communicatie met toestel mogelijk anders dan via MOD-BUS aangesloten op het beveiligde ICT-netwerk.	M

1) Yang W, Elankumaran S, Marr LC (2012) Relationship between Humidity and Influenza A Viability in Droplets and Implications for Influenza's Seasonality. PLoS ONE 7(10): e46789. doi:10.1371/journal.pone.0046789.

B Methodisch ontwerpen

Een steeds meer toegepaste methode voor ontwerpen is Methodisch Ontwerpen. Hierbij maakt men gebruik van morfologische schema's die een overzicht geven van oplossingen voor bepaalde functies. Uit deze schema's komen concepten tot stand die door de Kesselring methode⁵ (zie verderop onder "Keuzebepalende fase") beoordeeld worden op toepasbaarheid (WP4).

De methode zorgt ervoor dat er tijdens het ontwerpen een goed overzicht is van de mogelijke oplossingen voor een specifiek probleem. Hierdoor wordt er minder snel een oplossing over het hoofd gezien. Door het systeem te beoordelen aan de hand van de Kesselring methode is er direct en naderhand een juiste weergave waarom er voor een bepaald specifiek systeem gekozen is. De verantwoording aan de klant is hierdoor goed verklaarbaar en eenduidig (ook na verloop van tijd).

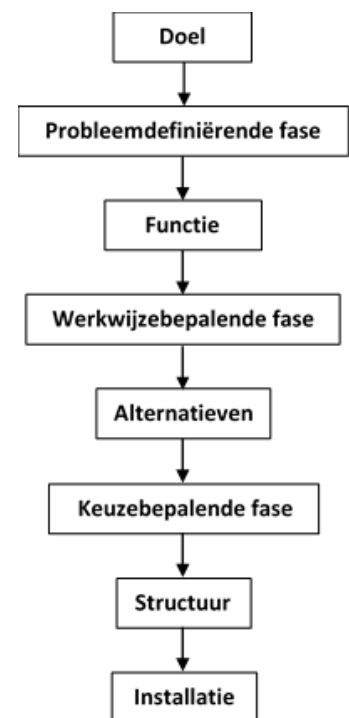
Methodisch Ontwerpen volgt een wetenschappelijke methode, die bruikbaar is voor een ontwerper tot het komen tot een ontwerp. Er zijn twee vragen die men stelt bij methodisch ontwerpen:

- Wat is de essentie van het gebouw of ontwerp?
- Hoe moet het ontwerpproces aangepakt worden zodat om effectief en efficiënt bruikbaar te zijn?

Deze twee vragen zijn te vertalen naar vier hoofdfases, zie ook Figuur B1:

1. probleemdefiniërende fase;
2. werkwijzebepalende fase;
3. keuzebepalende fase;
4. vormgevende fase.

Het doorlopen van deze fases biedt hulp bij het komen tot een ontwerp. Het is echter niet zo dat men het proces één keer doorloopt. In elke fase komen onjuistheden of onvolledigheden naar boven welke het resultaat beïnvloeden. Hierdoor is het noodzakelijk terug te keren naar de bovenliggende fase en de nieuwe informatie mee te nemen in de keuze van de oplossing.



Figuur B1. Verschillende fases van het ontwerpproject

Probleemdefiniërende fase

In deze fase stelt een ontwerper, uitgaande van het gestelde doel, een eisenpakket of programma van eisen op (WP2) dat aan de behoefte van de gebruiker voldoet. Vanuit de doelstelling en het eisenprogramma wordt de te vervullen functie van het ontwerp bepaald.

⁵ Kesselring, F.: Technische Kompositionslehre, Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1954

Werkwijzebepalende fase

Het doel van deze fase is om verschillende functies te definiëren en hierbij de mogelijke oplossingen weer te geven in een functieblokschema en zodoende een zo volledig mogelijk overzicht te verkrijgen van mogelijke oplossingen. Het resultaat van deze fase is een overzicht van oplossingen dat als structuur voor de detailleringsfase gebruikt wordt.

Werkwijze

Door de opsplitsing van de hoofdfunctie in deelfuncties wordt het makkelijker om oplossingen te bepalen voor een kleiner specifiek probleem. Door de deelfuncties concreet weer te geven in principeschetsen wordt onduidelijkheid voorkomen.

Morfologisch overzicht

Het morfologisch schema is opgedeeld in deelfuncties op de verticale as, en oplossingen ('varianten') op de horizontale as, zie Figuur B2. Door de vele oplossingen per deelfunctie te vertalen naar specifieke fysische verschijnselen, kunnen vaker minder voor de hand liggende bruikbare toepassingen of mogelijkheden worden gedetecteerd.

		Varianten					
		1	2	3	4	5	6
Deelfuncties	Ventilatie	#5: 4 personen. #11: Bouwbesluit #11: Ventilatie-effectiviteit #19: 48m ² ;144m ³ #22: Geen luchtuitwisseling. #23: tochtarm #35: geen recirculatie bij brand #41: 800ppm; max.1200ppm	Mechanisch lucht toevoeren en afvoeren.	Mechanisch lucht toevoeren en natuurlijk afvoeren.	Bufferen	CO ₂ actief verwijderen	Hoog inductievoud met weinig impuls energie
	Ontvochtigen	#6: niet op riool aansluiten. #6: zelf verdampen #6: geen micro-biologische groei	Oppervlakte-condensatie	Absorptie	Hydroscopie	Veilige aansluiting op riool	Vochtbelasting reduceren

Figuur B2. Deel van een morfologisch overzicht met oplossingen

Uitkomsten van de werkwijzebepalende fase

- alternatieve oplossingen voor de te vervullen functies of deelfuncties.

Keuzebepalende fase

In de detailleringfase worden de alternatieve oplossingen getoetst op hun prestaties. Alle aspecten worden bekeken en aan de hand van het eisenpakket wordt een keuze gemaakt welke alternatieven verder uitgewerkt worden.

Structuur

Figuur B3 toont oplossingen voor ventilatie (5) en voor ontvochtigen (5). In het overzicht zijn dus 25 combinaties mogelijk. Niet alle combinaties in het schema zijn mogelijk en het morfologisch schema dient dan ook alleen als hulpmiddel om realistische keuzes te maken.

		Varianten					
		1	2	3	4	5	6
Deelfuncties	Ventilatie	#5: 4 personen. #11: Bouwbesluit #11: Ventilatie-effectiviteit #19: 48m ² ;144m ³ #22: Geen luchtuitwisseling. #23: tochtarm #35: geen recirculatie bij brand #41: 800ppm; max.1200ppm	Mechanisch lucht toevoeren en afvoeren.	Mechanisch lucht toevoeren en natuurlijk afvoeren.	Bufferen	CO ₂ actief verwijderen	Hoog inductievoud met weinig impuls energie
	Ontvochtigen	#6: niet op riool aansluiten. #6: zelf verdampen #6: geen micro-biologische groei	Oppervlakte-condensatie	Absorptie	Hydroscopie	Veilige aansluiting op riool	Vochtbelasting reduceren

Figuur B3. Deel van een morfologisch overzicht met mogelijke combinaties

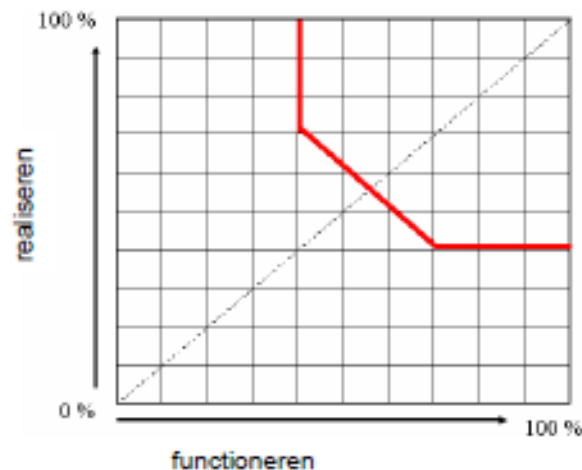
Verantwoording

Elke gekozen structuuroplossing wordt getoetst en vergeleken met de andere oplossingen. De toetsing en de zwaarte van een bepaalde eis wordt bepaald aan de hand van het eisenpakket. De zwaarte van de eis wordt weergegeven door middel van weegfactoren. Door het toekennen van een waarde voor de verschillende oplossingen ontstaat er een score waarmee inzichtelijk wordt gemaakt wat de beste oplossingen zijn.

Keuzemodellen

Om de verschillende oplossingen/varianten goed met elkaar te kunnen vergelijken wordt er gebruik gemaakt van de Kesselring-methode. Deze maakt gebruik van een grafiek die bestaat uit het functioneren (x-as) en het realiseren (y-as) van de

installatie (Figuur B4). De optimale oplossing bevindt zich zo ver mogelijk rechts bovenaan in het oplossingsdiagram, zo dicht mogelijk bij de diagonale lijn in het diagram. Het rood omlijnde gebied geeft de 40% limiet weer. Binnen dit gebied wordt voor meer dan 40% aan alle eisen op het gebied van functioneren en realiseren voldaan.



Figuur B4. Kesselring/S-diagram

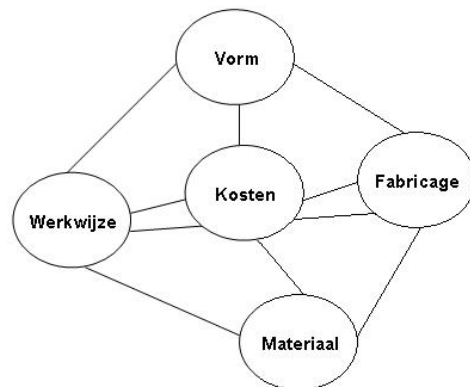
Uitkomsten van de detailleringfase

- één of meerdere oplossingen welke verder worden uitgewerkt.

Vormgevende fase (WP5)

In de vormgevende fase wordt een overzicht van verschillende zinvolle combinaties van componenten en onderdelen opgesteld. Uit dat overzicht moet vervolgens aan de hand van de gestelde eisen een keuze worden gemaakt voor combinaties die leiden tot het definitieve ontwerp.

Bij het uiteindelijke definitieve ontwerp wordt er gestreefd naar een zo optimaal mogelijke afstemming van vorm, werkwijze, fabricage, materialen en kosten. De onderlinge factoren zijn weergegeven in Figuur B5, waarbij de kosten centraal staan.



Figuur B5. Onderlinge relaties van het definitieve ontwerp

Door het combineren en variëren van de componenten wordt tot meerdere mogelijkheden gekomen die voorgelegd worden aan de beslissers. Na verantwoording van het uiteindelijk gekozen ontwerp worden de keuzes verwerkt tot concrete tekeningen en voorschriften.

Uitkomsten van de vormgevende fase

- bestektekeningen, werktekeningen, montage-, gebruiks- en onderhoudsvorschriften.

C Morfologisch overzicht oplossingsvarianten

Morfologisch schema 6 september 2019

[illegible]

Deelfuncties

Luchtkwaliteit	#10: SUP1															
	#42: PM1 2.5mg/m³	Zakkenfilter	Compactfilters	Paneelfilters												
	#42: PM2.5<25% van buiten.															
Geurbelasting	#11: urine															
	#11: faecaliën.	Koolfilter	Doseren prettige geur		Nieuwe filterconcepten met absorptie c.q. chemisch binden van ongewenste bestanddelen											
	#11: lichaamslucht															
Infra	#1: Nieuwbouw & renovatie	Minimaliseren behoefte	Hogere snelheden	Korte leidingen	Niet in hoofdinfra plaatsen	Warme toe- en afvoer via een (dunne) voestofleiding. Geen luchtkanalen buiten de patiëntenkamer.										
	#11: ruimtebeslag <80%															
	#20: niet in kamer															
	#20: Liever niet op hoogte.															
Elektra	#13: 3.6kW (16A/230V)	Beperk behoefte	Minimaliseer gelijktijdigheid	Energiezuinige oplossing(en)												
	#21: Alleen voeding															
Gewicht	#15: max. 23 kg.	Gebruik lichte materialen	Splitst op in delen	Toestel eenvoudig uitwisselbaar als deze op de vloer staat met iets van een speciale steekwagen.												
Koudemiddel	#38: Niet brandbaar.	CO ₂	R134a	R410a	R1234ze	Water										
Bouwkundig	#23: geen te openen ramen.	Geen natuurlijke ventilatie														
	#23: geen dauerlftung															
	#23: tochtarm															
	#23: R _d >3m².KW															
	#23: ≤45% Raam															
#23: q _{v,10} =1dm³/s/m²																
Onderhoud	#24: Plug-and play	Standaardisatie	Weinig actieve componenten	Robuust systeemontwerp	Lange standtijd	Eenvoud	Intelligente signalering toepassen	Kies secundaire locatie	Locatie bij voorkeur laag en goed bereikbaar	Scheiding besturing & instellingen	Toestel eenvoudig uitwisselbaar als deze op de vloer staat met iets van een speciale steekwagen.					
	#25: Filter niet in patiëntenkamer															
	#29: Voorsignalering															
	#30: OH beurt max. 4uur															
	#34: Storing eenvoudig oplossen															
#34: Instellingen overnemen																

D Morfologisch schema filterkeuze

TKI Lucht filter, Filter optie 1									Opmerkingen
1	Filter principe	Mechanisch	Mechanisch / statisch geladen	Moleculair	Elektrisch	Mechanisch / Moleculair	Elektrisch / chemisch	ionisatie van de lucht	De te bouwen modulaire kast zal compact zijn en statische lucht is niet gewenst. Het combineren van een moleculaire filter media met een mechanisch filter media is dan de eenvoudigste oplossing.
2	media type	Glass media	Synthetisch media	Membrane media	combination laag glasvezel / Moleculair	Combination laag synthetisch / moleculair	Combination laag membraam / moleculair	Metaal	Energie verbruik is belangrijk en membraam media's hebben de laagste weerstand. De compacte bouw is eenvoudiger te bouwen met een gecombineerd media
3	media vorm	Deep pleat media	Midi Pleat media	Mini Pleat media	Vlak media	Rond			Voor deep en midi pleat hebben we niet voldoende ruimte en is de maatvoering beperkt door de constructie. Met een mini pleat hebben we meer vormvrijheid in de afmetingen
4	Filter behuizing type	rechthoekig filter	V-Bank filter	Box met flenzen					Een V-Bank filter heeft een hoge investering voor de gietdelen omdat de bestaande delen te groot zijn voor de toepassing. Een rechthoekig filter is energetisch beter omdat meer media geïnstalleerd kan worden omdat er geen ruimteverlies is door de flenzen.
5	filter behuizing materiaal	Aluminium	HIPS	RVS	gelakt staal	gelakt aluminium	Karton		Aluminium and plastic (HIPS) hebben de voorkeur omdat RVS zwaar en duurder is, gelakt aluminium hier niet nodig en Karton door het hoge vochtgehalte stabiliteitsproblemen kan krijgen.
6	Moleculair media	General adsorbant	Media for acid type contamination	Media for base type contamination	Media for acid and base, carbon based	Media for acid and base type contamination, ion exchange with carbon based	Karton		Reinigingsmiddelen zijn vaak op zuur basis terwijl de geurbelasting door mensen basen zijn. Een filter laag voor 1 specifieke verontreiniging zal hierdoor niet goed kunnen functioneren.

TKI Lucht filter, 2 - filter optie, optie A									Opmerkingen
1	Filter principe	Mechanisch	Mechanisch / statisch geladen	Elektrisch	ionisatie van de lucht				de markt stapt weg van energie voorziening naar filters om het rendement te verhogen. Om betere aanvangsrendement te creëren kan een statisch geladen media een optie zijn.
2	media type	Glass media	Synthetisch media	Membrane media	Metaal				Materiaal met de hoogste stofvangcapaciteit
3	media vorm	Deep pleat media	Midi Pleat media	Mini Pleat media	Zakken	Rond			Lage weerstand bij grote stofvangcapaciteit. Rekening mee houden in het ontwerp i.v.m. inbouwwolume
4	Filter behuizing type	rechthoekig filter	V-Bank filter	Box met flenzen					verkant of rechthoekig is veruit het eenvoudigste om te bouwen
5	filter behuizing materiaal	Aluminium	Kunststof	RVS	Staal	gelakt aluminium	Karton	hout	bij de keuze moet rekening gehouden worden met sustainability en de zogenaamde "cradle to cradle" filosofie. Het kan zijn dat een stalen frame de laagste ecologische footprint heeft.

TKI Lucht filter, gecombineerd moleculair filter									Opmerkingen
1	Filter principe	Moleculair	ionisatie van de lucht						Een moleculair filter kan onworpen worden om specifieke gassen te kunnen afvangen. De generieke werking van Ozon is niet voldoende om een goed afvangen van moleculaire verontreiniging te kunnen garanderen.
2	media type	Chemische media, ontworpen voor specifieke moleculaire verontreiniging	Breed spectrum mix van media	Chemisch media, combinatie van Zuren en Basen					Reinigingsmiddelen zijn vaak op zuur basis terwijl de geurbelasting door mensen basen zijn. Een media keuze voor 1 specifieke verontreiniging zal hierdoor niet goed kunnen functioneren.
3	media vorm	pallets in media pakket gevouwen	Vlak media	Rond	gefoamd materiaal	bulk verdeling			het combineren van verschillende type moleculaire media in meerdere lagen is op compacte wijze mogelijk in een gevouwen media pakket
4	Filter behuizing vorm	rechthoekig filter	V-Bank filter	Box met flenzen					verkant is veruit het eenvoudigste om te bouwen
5	filter behuizing materiaal	Aluminium	Plastic	RVS	gelakt staal	gelakt aluminium	Karton	hout	bij de keuze moet rekening gehouden worden met sustainability en de zogenaamde "cradle to cradle" filosofie. Het kan zijn dat een stalen frame de laagste ecologische footprint heeft.
6	Moleculair media	General adsorbant	Media for acid type contamination	Media for base type contamination	Media for acid and base, carbon based	Media for acid and base type contamination, ion exchange with carbon based			dit type media heeft de hoogste opname capaciteit en daarmee de langste standtijd.

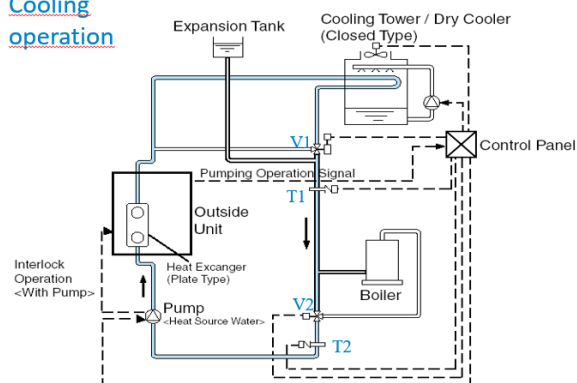
TKI Lucht filter, 2 - filter optie, optie B									Opmerkingen
1	Filter principe	Mechanisch	Mechanisch / statisch geladen	Elektrisch	ionisatie van de lucht				de markt stapt weg van energie voorziening op filters. Om betere aanvangsrendement te creëren kan een statisch geladen media een optie zijn.
2	media type	Glass media	Synthetisch media	Membrane media	Metaal				Materiaal met de hoogste stofvangcapaciteit
3	media vorm	Deep pleat media	Midi Pleat media	Mini Pleat media	Zakken	Rond			Lage weerstand bij grote stofvangcapaciteit. Vergt wel wat inbouwwolume
4	Filter behuizing type	rechthoekig filter	V-Bank filter	Box met flenzen					vierkant is veruit het eenvoudigste om te bouwen
5	filter behuizing materiaal	Aluminium	Kunststof	RVS	Staal	gelakt aluminium	Karton	hout	bij de keuze moet rekening gehouden worden met sustainability en de zogenaamde "cradle to cradle" filosofie. Het kan zijn dat een stalen frame de laagste ecologische voetafdruk heeft.
TKI Lucht filter, Moleculair filter, 2 filters met media dat geschikt is voor specifieke verontreinigingen									
1	Filter principe	Moleculair	ionisatie van de lucht						Een moleculair filter kan onworpen worden om specifieke gassen te kunnen afvangen. De generieke werking van Ozon is niet voldoende om een goed afvangen van moleculaire verontreiniging te kunnen garanderen.
2	media type	Chemische media, ontworpen voor specifieke moleculaire verontreiniging	Breed spectrum mix van media	Chemisch media, combinatie van Zuren en Basen					Reinigingsmiddelen zijn vaak op zuur basis terwijl de geurbelasting door mensen basen zijn. Een media keuze voor 1 specifieke verontreiniging zal hierdoor niet goed kunnen functioneren.
3	media vorm	pallets in media pakket gevouwen	Vlak media	Rond	gefoamed material	bulk verdeling			het combineren van verschillende typen moleculaire media in meerdere lagen is op compacte wijze mogelijk in een gevouwen media pakket
4	Filter behuizing vorm	rechthoekig filter	V-Bank filter	Box met flenzen					vierkant is veruit het eenvoudigste om te bouwen
5	filter behuizing materiaal	Aluminium	Plastic	RVS	(gelakt) staal	gelakt aluminium	Karton	hout	bij de keuze moet rekening gehouden worden met sustainability en de zogenaamde "cradle to cradle" filosofie. Het kan zijn dat een stalen frame de laagste ecologische voetafdruk heeft.
6	Moleculair media	General adsorbant	Media for acid type contamination	Media for base type contamination	Media for acid and base, carbon based	Media for acid and base type contamination, ion exchange with carbon based			Per contaminant een ander media zodat een langere standtijd gecreëerd kan worden en de werking geoptimaliseerd

E Opties waterzijdig aansluiten systeem

In the summer season:

- the bypass of the 3-way valve **V1** will be opened when the cooling water temperature is below the preset temperature value of **T1**;
- the bypass of the 3-way valve **V1** will close when the water temperature exceeds value **T1** and more water will be send to the cooling tower to lower its temperature.
- the start/stop control of the fan and pump of the closed type cooling tower is following the command of **V1**.

Cooling operation

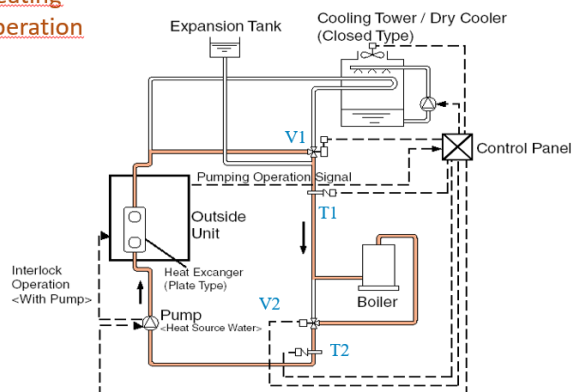


Figuur E1. Optie A Boiler/CV ketel + koeltoren koelbedrijf

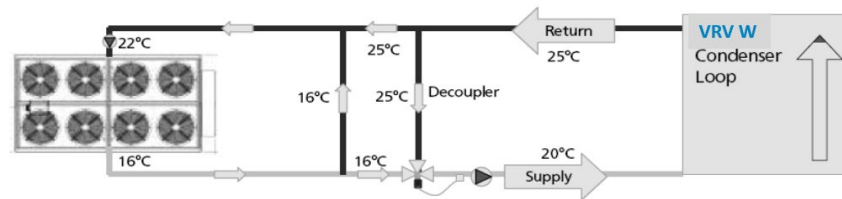
In the winter time:

- if the water temperature drops below 15° C, **V2** will allow the circulation of water through the boiler to keep the circulation water temperature above the preset value of **T2**
- when the water pump stops, **V2** closes automatically the access of water to the boiler

Heating operation



Figuur E2. Optie A Boiler/CV ketel + koeltoren verwarmingsbedrijf

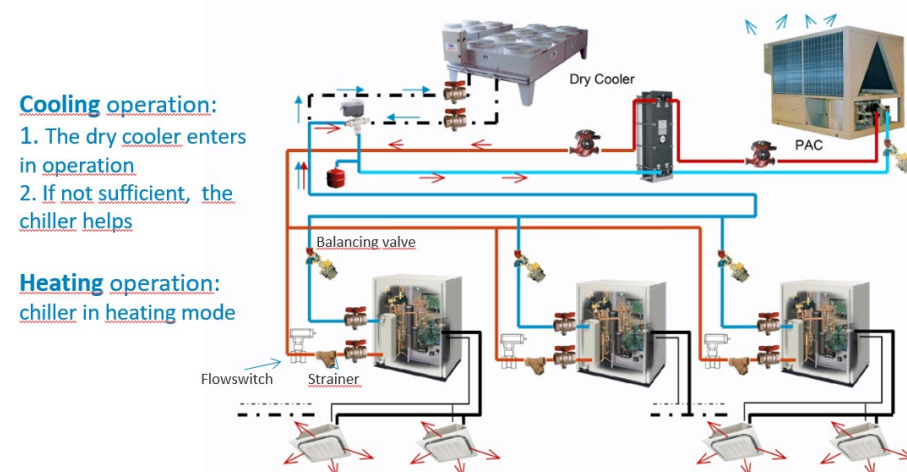


Remark1: as the water circuit temperatures on VRV-W are typically outside chiller operating ranges, the piping configuration is important (mixing needed).

Remark2: to ensure maximum operating efficiency select:

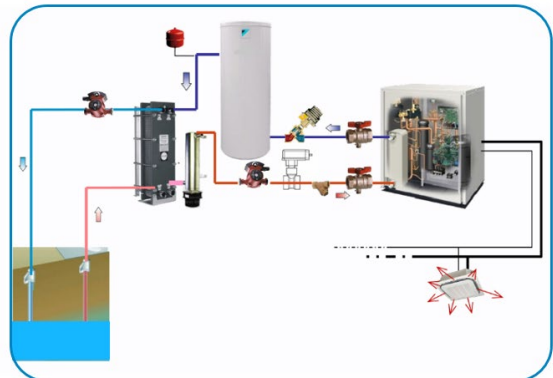
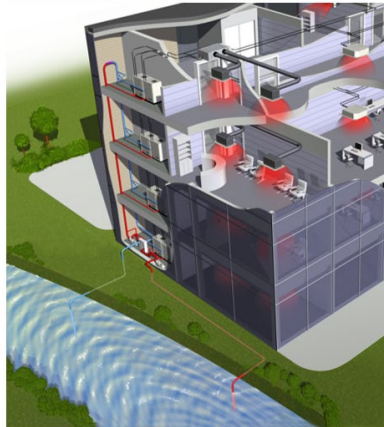
- Leaving chilled water temp chiller = maximum value (cooling mode)
- Leaving hot water temp chiller = minimum value (heating mode)

Figuur E3. Optie B Warmtepomp chiller



Figuur E4. Optie C Warmtepomp chiller en droge koeler

Open loop systems draw ground water directly into the building to heat or cool the heat pumps.



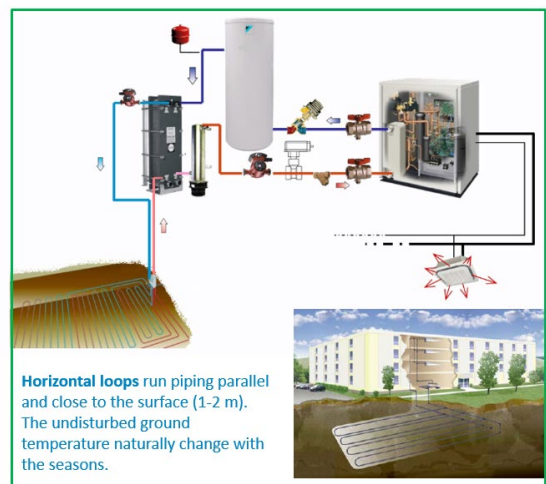
Figuur E5. Optie D WKO geothermisch open bron

The Geothermal systems utilize the heat accumulated in ground (this heat is continually supplied by sun).

At a depth of approximately 10 meters the ground temperature remains fairly constant with an average temperature between 10-20° C year-round (Europe), depending on the region, terrain and soil type.



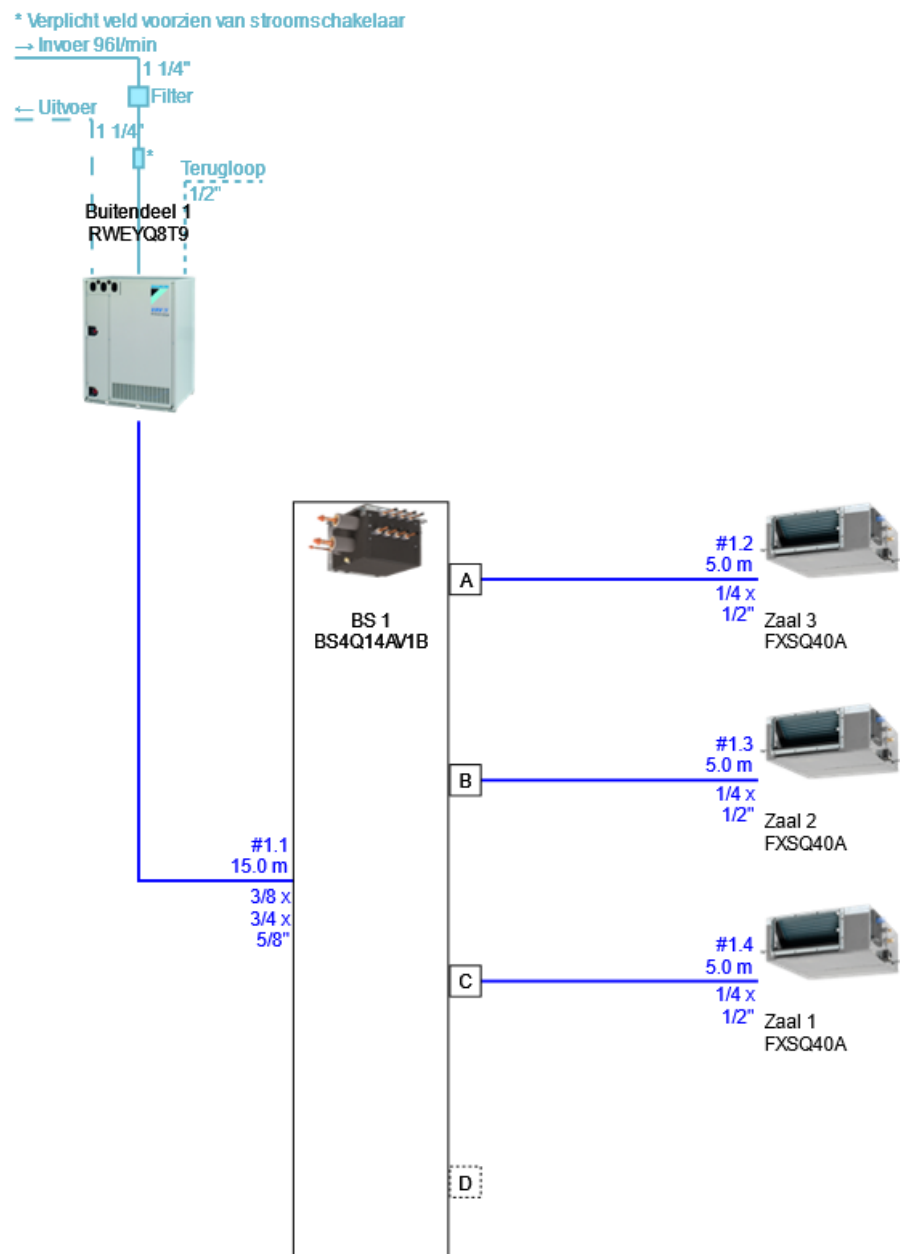
Vertical loops run perpendicular to the surface and the holes can be several hundred meters deep (80-200 m). At these depths, the undisturbed ground temperature does not change throughout the year.



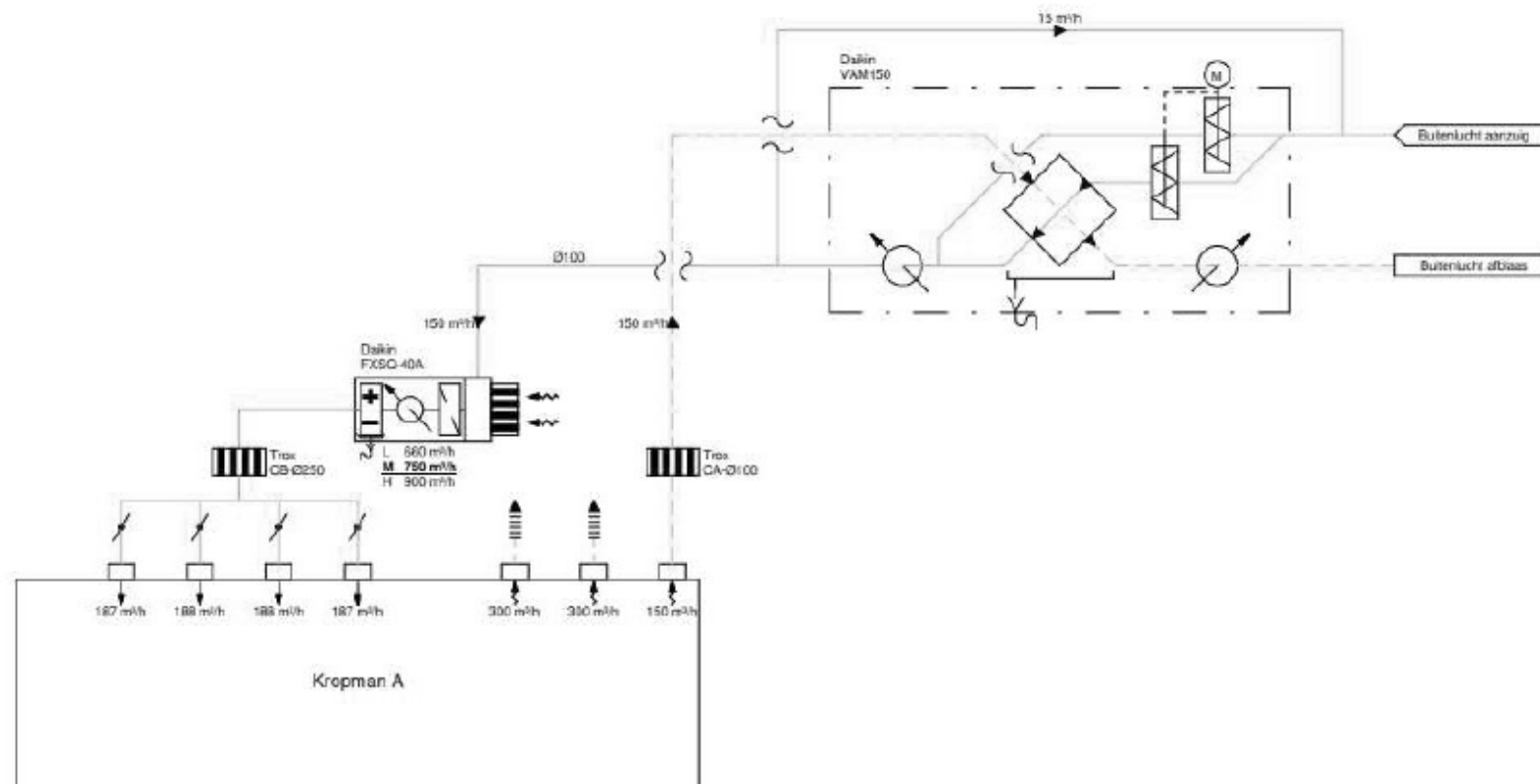
Horizontal loops run piping parallel and close to the surface (1-2 m). The undisturbed ground temperature naturally change with the seasons.

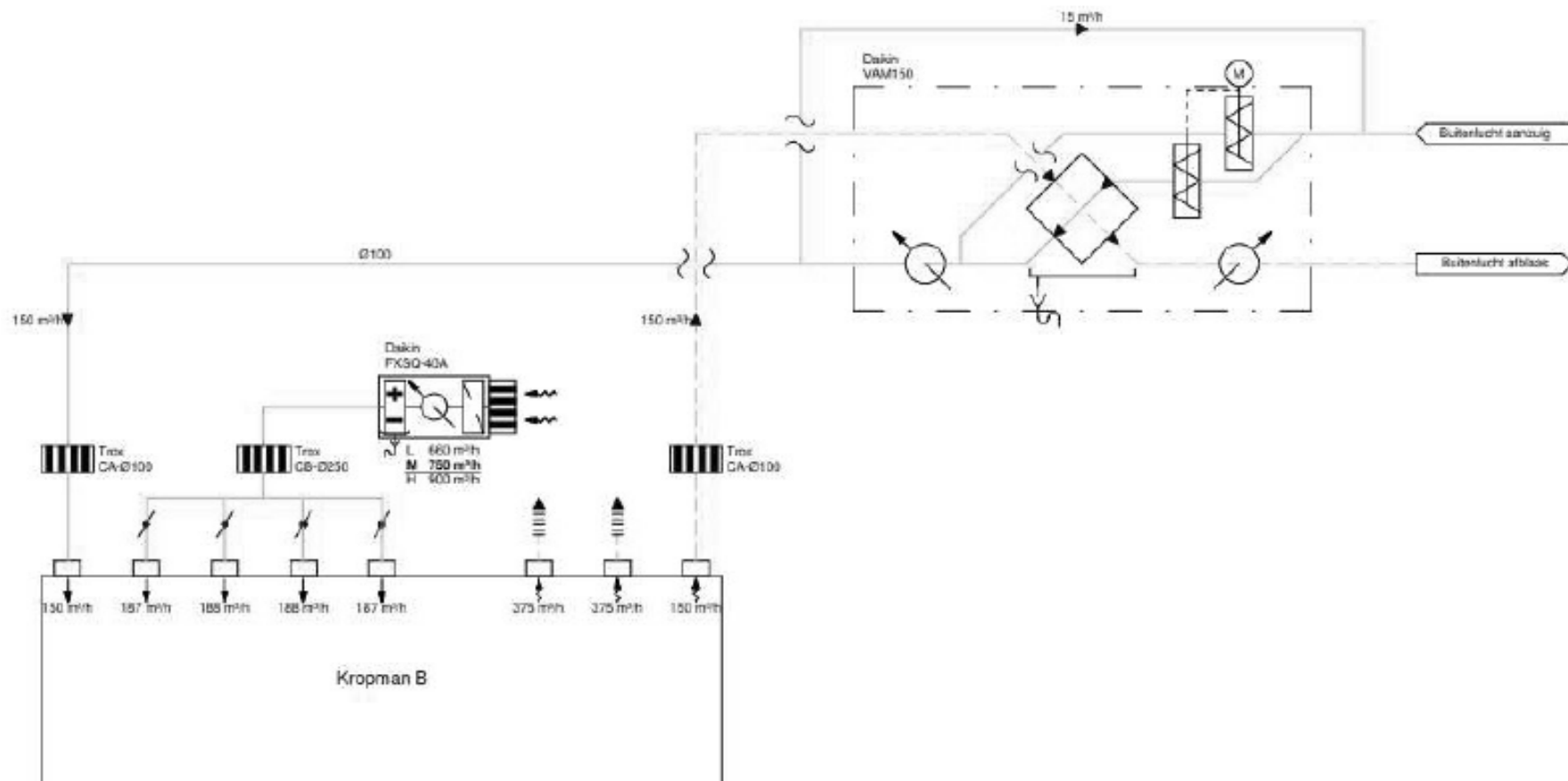
Figuur E6. Optie E WKO geothermisch met gesloten bron

F Koeltechnisch en waterzijdig aansluitschema



G Luchtzijdig ontwerp (2 varianten)





H Optimale filtervervangings, filtermanager, modellering

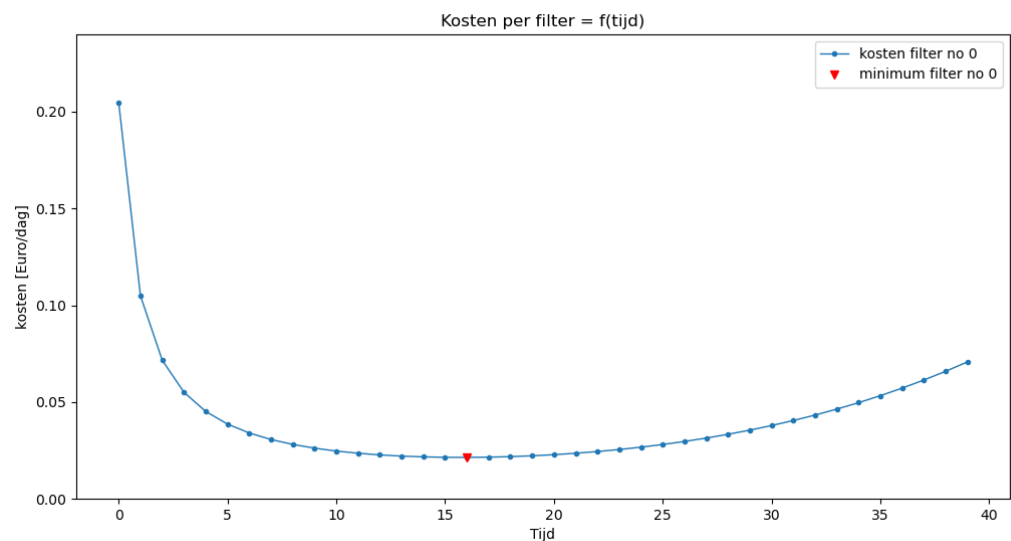
Centraal staat het bepalen van het economisch optimale vervangmoment van de luchtfilters van een gebouw of van een gebouwcluster. Voor de kosten voor het filteren van de lucht geldt:

$$Kosten_t = Kosten_{voorrij} + Kosten_{filter+verv} + \int_0^t P_{ventilator} dt * energieprijs/kWh$$

Waarbij: $P_{ventilator}$ het opgenomen vermogen is van de ventilator in Watt.
Het ideale vervangmoment of de ideale standtijd is per filter het moment waarbij de totale filtergerelateerde kosten gedeeld door de totale levensduur van het filter zich in een minimum bevinden.

$$Min\left(\frac{Kosten_t}{t}\right)$$

De totale kosten ($Kosten_t$) zijn na filtervervangings op $t=0$ de kosten voor het vervangen van het filter inclusief voorrijkosten e.d. Daarna volgen de energiekosten.



Figuur H1. Voorbeeld verloop filterkosten per dag in de tijd.

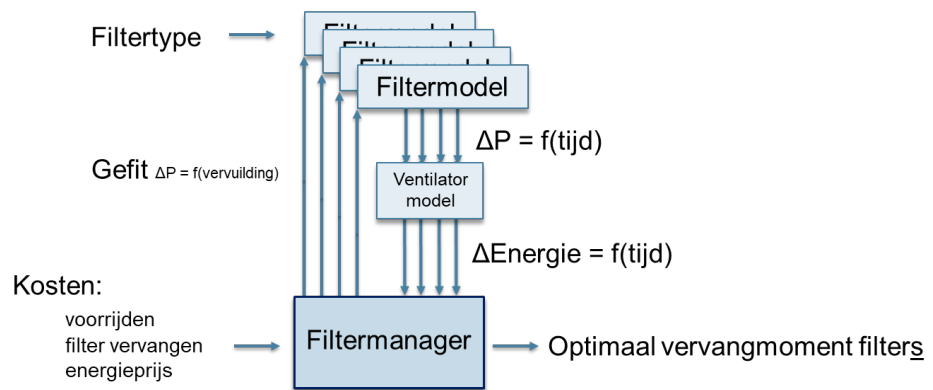
Aanvankelijk nemen de vaste kosten per dag snel af omdat deze over steeds meer dagen worden gedeeld. Na verloop van tijd nemen de energiekosten voor de ventilator door de geaccumuleerde vervuiling in het filter zodanig toe dat deze de afname van de vaste kosten compenseren en waardoor de totale kosten per dag weer toenemen. Dit is economisch gezien het gunstigste moment om het filter te vervangen. Voor dat optimale vervangmoment geldt:

$$\frac{d\left(\frac{Kosten_{t_{optimaal}}}{t_{optimaal}}\right)}{dt} = 0$$

Dit geldt voor een enkel filter. Voor een set filters wordt het economische optimale vervangmoment bepaald door de ontwikkeling van de gemiddelde kosten van de alle filters. Daarnaast kan het economisch gunstiger zijn om een deel van de filters pas een volgend vervangmoment of een daarop volgend vervangmoment te vervangen en het optimale vervangmoment te herberekenen voor de te vervangen filters.

Filtermanager

Om dit in de praktijk toepasbaar te maken is door TNO een filtermanager ontwikkeld.



Figuur H2. Model based predictive air-filter maintenance module

In de filtermanager wordt voor elk individuele filter de status bijgehouden op basis van de gemeten druk over het filter en een filtermodel van het toegepaste filter. Het ventilatormodel beschrijft de energievraag als functie van de drukval over het filter en de volumeflow. Op basis van de vervuilingsgraad van de filters, het filtermodel en het ventilatormodel kan de toename van de luchtweerstand voor de komende periode worden voorspeld en daarmee het economisch optimale moment om de filters te vervangen. De filtermanager is ontwikkeld in Python en daarom vrij van licentiekosten. Om de werking van de filtermanager te demonstreren en te duiden is in bijlage K een aantal generieke voorbeelden opgenomen van het gesimuleerde verlopen van kosten en economisch ideale vervangmomenten.

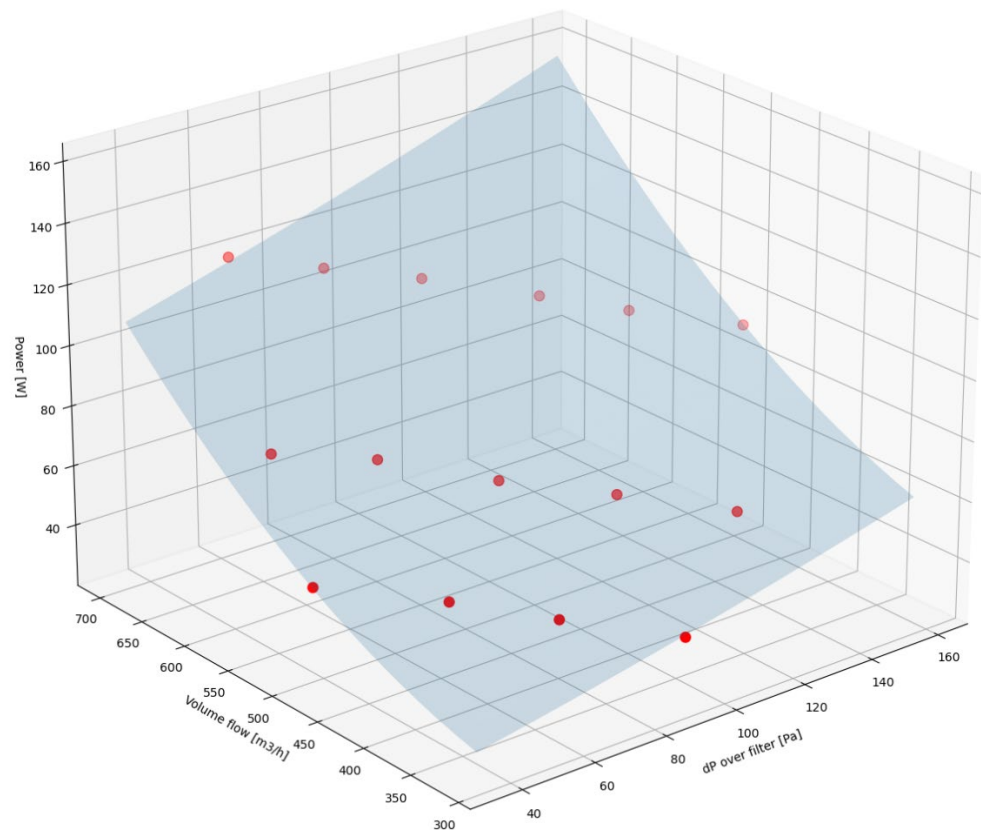
Naast deze generieke voorbeelden is een aantal modellen ontwikkeld die zijn toegespitst op het ontwikkelde systeemconcept zoals een filter- en ventilatormodel. Een ventilatormodel is samengesteld op basis van de beschreven TNO-metingen en een filtermodel op basis gedetailleerde specificaties van een filter. Daarnaast zijn energiekosten en filterkosten gespecificeerd.

Ventilatormodel voor het systeem op basis van de TNO metingen

De filtermanager maakt gebruik van een ventilatormodel dat het opgenomen vermogen van de ventilator als functie van het drukverschil over het filter en de volumeflow beschrijft. Deze functie is bepaald voor het ontwikkelde systeem op basis van de metingen in het TNO-laboratorium.

Tabel H1. In het TNO-laboratorium gemeten opgenomen ventilatie-energie bij verschillende ventilatorstanden en luchtweerstand

dP [Pa]	V [m ³ /h]	Power [W]
63.7	699	120
83	668	114
102	632	109
123	581	103
139	542	98
160	494	92.5
47.5	586	77
66.9	545	74
87	490	67.8
107	438	63.5
126	380	59.5
35	490	53
58	433	48.2
74	377	45
93	316	41.5



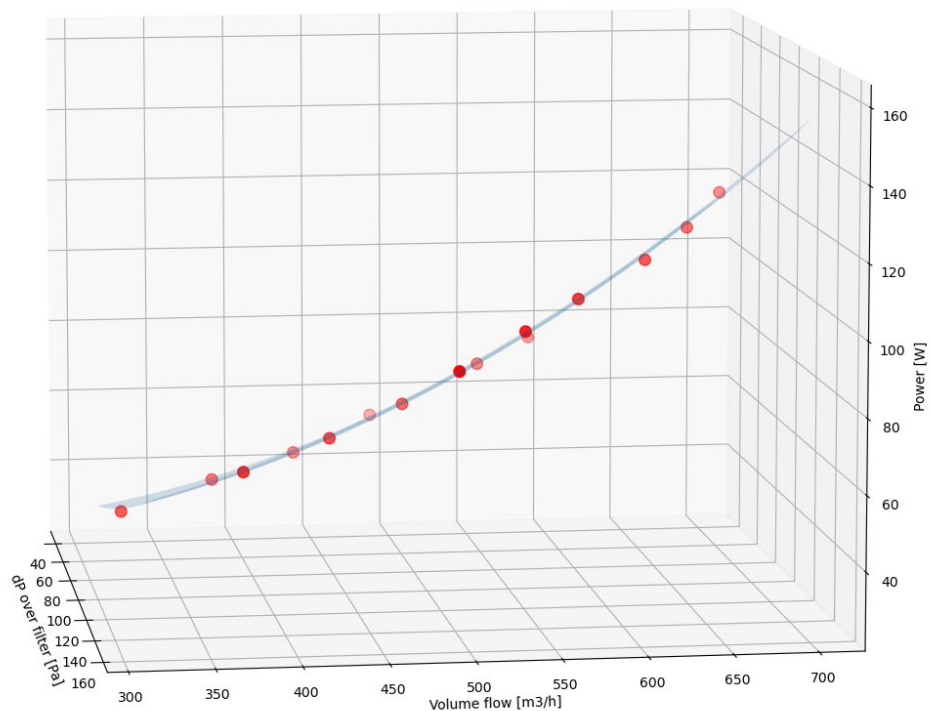
Figuur H3. Opgenomen vermogen door de ventilator als functie van druk over het filter en de volumestroom door het filter, meetpunten en gefitte functie

In Figuur H3 zijn de meetpunten bij de laag, midden en hoogstand van de ventilator weergegeven en de 2^e orde polynoom die door deze meetpunten is gefit:

$$P_{ventilator} = 34 + 0.082dP - 0.15V + 0.000325dP \cdot V + 0.000382dP^2 + 0.000341V^2$$

Waarbij :

- $P_{ventilator}$ = opgenomen vermogen [W]
- dP = drukverschil over het filter [Pa]
- V = volumestroom [m³/h]



Figuur H4. Doorsnede van de gefitte functie en gemeten punten. De punten liggen in het vlak.

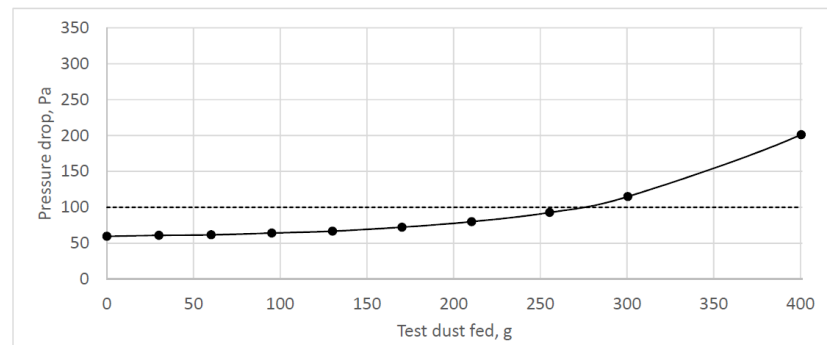
Figuur H4 laat het vlak van de gevonden polynoom in doorsnede zien in combinatie met de meetpunten. Duidelijk is dat de meetpunten mooi samenvallen met de gevonden functie en dus met een 2^e orde polynoom het gedrag goed beschreven kan worden.

De gevonden functie beschrijft het gedrag van het ontwikkelde systeemconcept en kan voor elk willekeurig filter worden gebruikt. Er is dan wel nog een filtermodel nodig.

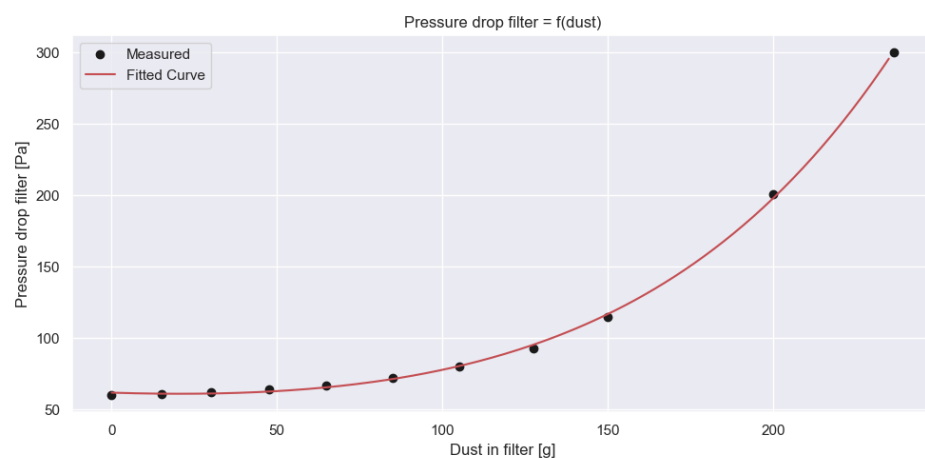
Filtermodel

Het filtermodel moet het drukverschil als functie van de mate van vervuiling en de volumeflow beschrijven voor het toegepaste filter. Het drukverschil over het filter is gemeten voor een aantal drukverschillen over het filter bij een vaste flow. Uitgangspunt is dat het drukverschil binnen een bepaald gebied proportioneel is met de volumeflow.

Air filter: VariSorb XL SAAFcity M5 592x592x292
 Energy Efficiency Evaluation of Air filter
 Eurovent 4/21:2016
 Filter class ISO ePM 2.5 50 %
 Air flow rate qV 0.944 m³/s
 Initial pressure drop Δp_i 60 Pa
 Test dust loading M 400 g
 Average pressure drop Δp 100 Pa
 Fan efficiency η 0.50 %
 Time of operation t 6000 h
kep 0.570
 Yearly energy consumption W 1085 kWh/Annum



Figuur H5. Gemeten toename drukverschil over het filter als functie van in het filter opgenomen stof bij een volume stroom van 0.944 m³/s en een filteroppervlak van 592 * 592 mm = 0.35 m²



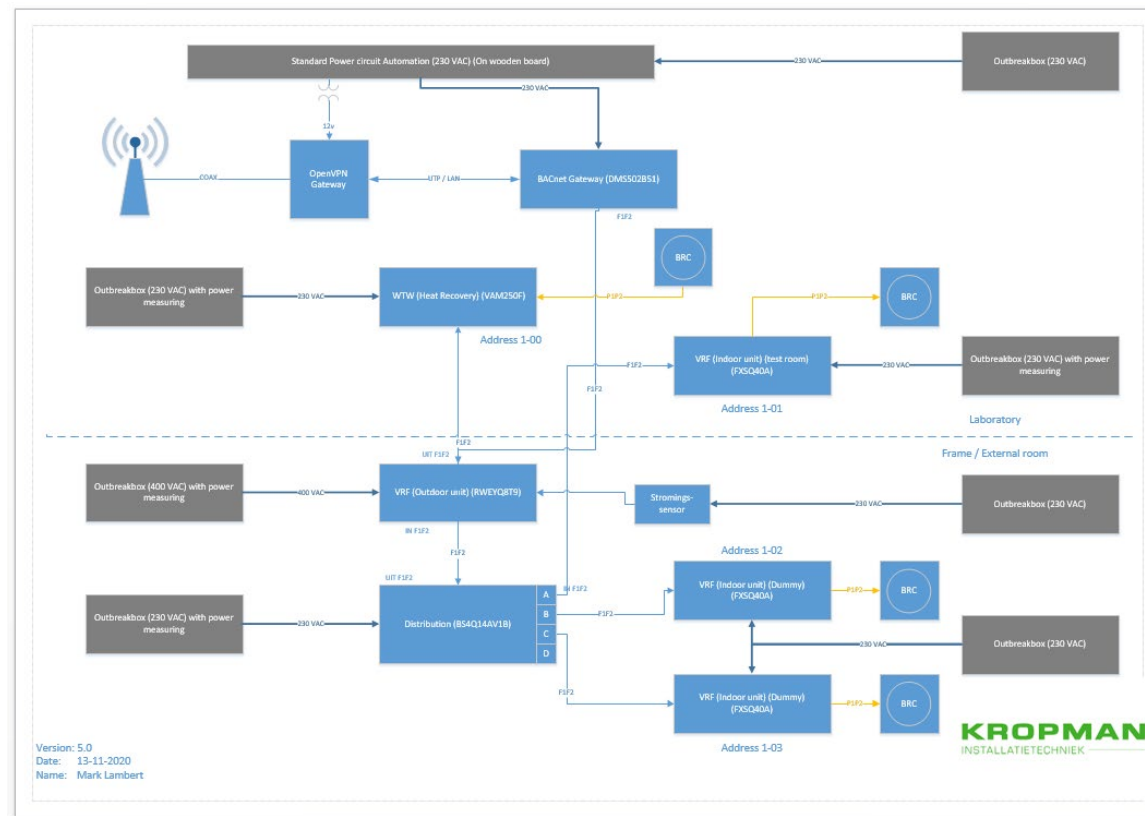
Figuur H6. Drukval over het filter als functie van in het filter opgenomen stof (filter 0.175 m²)

In bovenstaande grafiek zijn de meetpunten en de gevonden functie weergegeven voor een filter met een filteroppervlak van 0.175 m²:

$$dP_{filter} = 36.88 + 24.903 * (1.00132343)^{\frac{dust}{0.11876781}} - 0.3492 * dust$$

Deze functie kan worden gebruikt om de actuele vervuiling van dit type filter te bepalen op basis van de gemeten druk over het filter en welke mate van vervuiling kan worden verwacht in een toekomstig tijdstip met de daarbij te verwachten drukval over het filter.

I Bedradingsschema interface testopstelling



Figuur I1. Schema Bedrading Opstelling in laboratorium

Bovenstaand het bedradingsschema van de testopstelling. De stippellijn toont de splitsing van de installatie binnen en buiten de testkamer.

De bedrading loopt vanaf het Open VPN modem (ConnectBox), welke verbinding heeft met de online omgeving van Kropman, naar de Gateway van Daikin. De Gateway kent de achterliggende installatie en vertaalt de BACnet commando's naar de door Daikin gebruikte databus. Om de apparatuur op de Daikin bus te vinden dient er in elk apparaat een adres te worden geprogrammeerd met de ruimtebediening (BRC).

De databus start met de VRF-buitenunit en splitst zich af naar de WTW-unit en de distributie-unit. Vanaf de distributie-unit worden drie afgaande bussen gekoppeld met de binnen-units. De drie binnen-units en de WTW-unit hebben elk een lokale bediening voor het aansturen van de respectievelijke units.

In InsiteView is een project aangemaakt waarmee de BACnet adressentabel is ingelezen en vertaald naar namen waardoor deze leesbaar is geworden. De Daikin BACnet Gateway werkt met een reeks van 35 adressen welke zich repeteren per apparaat, dit telt op. Voorbeeld: Adres 1 is het startcommando voor apparaat 1-00 en ditzelfde commando is adres 257 voor apparaat 1-01, enz. In dit project zijn vier apparaten benoemd welke zijn toegevoegd aan het InsiteView project.

	Waarde
1-00.Startstopcommand.Value.input	0
1-00.Startstopstatus.Value.input	1
1-00.Alarm.Value.input	0
1-00.Malfunctioncode.Value.input	1
1-00.Airconmodecommand.Value.input	1
1-00.Airconmodestatus.Value.input	3
1-00.Airflowratecommand.Value.input	1
1-00.Airflowratestatus.Value.input	2
1-00.Roomtemp.Value.input	21,3 °C
1-00.Tempadjust.Value.input	0,0
1-00.Filtersign.Value.input	0
1-00.Filtersignreset.Value.input	0
1-00.Remotecontrolstart.Value.input	0
1-00.Remotecontrolairconmodeset.Value.input	0
1-00.Remotecontroltempadjust.Value.input	0
1-00.Cl_rejection.Value.input	0
1-00.Communicationstatus.Value.input	0
1-00.Systemforcedoff.Value.input	0
1-00.Airdirectioncommand.Value.input	0,0
1-00.Airdirectionstatus.Value.input	0,0
1-00.Forcedthermooffcommand.Value.input	0
1-00.Forcedthermooffstatus.Value.input	0
1-00.Energyefficiencycommand.Value.input	0
1-00.Energyefficiencystatus.Value.input	0
1-00.Thermostatus.Value.input	0
1-00.Compressorstatus.Value.input	0
1-00.Indoorfanstatus.Value.input	1
1-00.Heaterstatus.Value.input	0
1-00.Ventilationmodecommand.Value.input	
1-00.Ventilationmodestatus.Value.input	
1-00.Ventilationamountcommand.Value.input	
1-00.Ventilationamountstatus.Value.input	

Figuur I2. Overzicht van de beschikbare commando's per apparaat

J Samenvatting meetresultaten lab-experimenten

Voor een WTW-unit worden twee soorten warmteterugwin-efficiëntie onderscheiden (NEN 13141-7:2010). Dit betreft het temperatuurrendement η_θ en het enthalpierendement η_h . Deze zijn gedefinieerd als:

$$\eta_\theta = \frac{\theta_{22} - \theta_{21}}{\theta_{11} - \theta_{21}} \cdot \frac{q_{m22}}{q_{m11}}$$

$$\eta_h = \frac{h_{22} - h_{21}}{h_{11} - h_{21}} \cdot \frac{q_{m22}}{q_{m11}}$$

Waarin:

η_θ is het dimensieloze temperatuurrendement

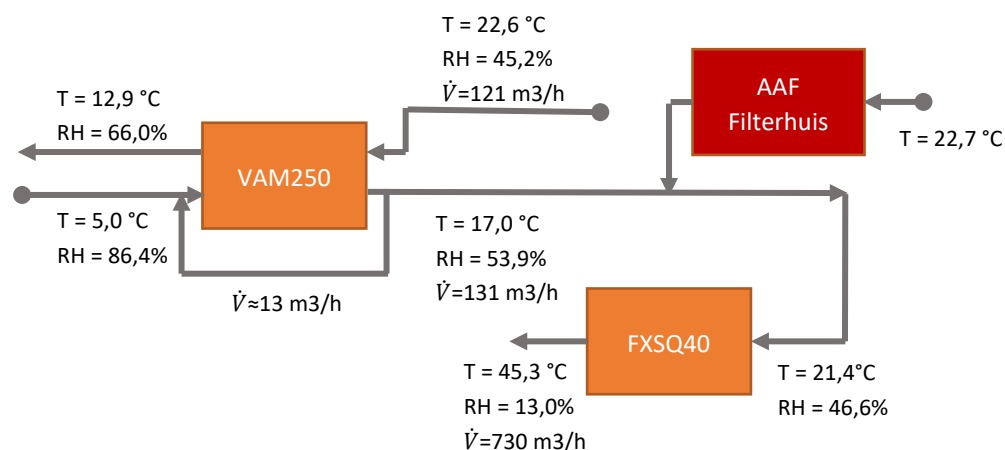
q_m is de massastroom door de warmtewisselaar in kg/s

De subscripten geven aan op welke plek de waarden worden gemeten en worden aangegeven in tabel J1.

Tabel J1. Aan- en afvoerposities van WTW-toestel

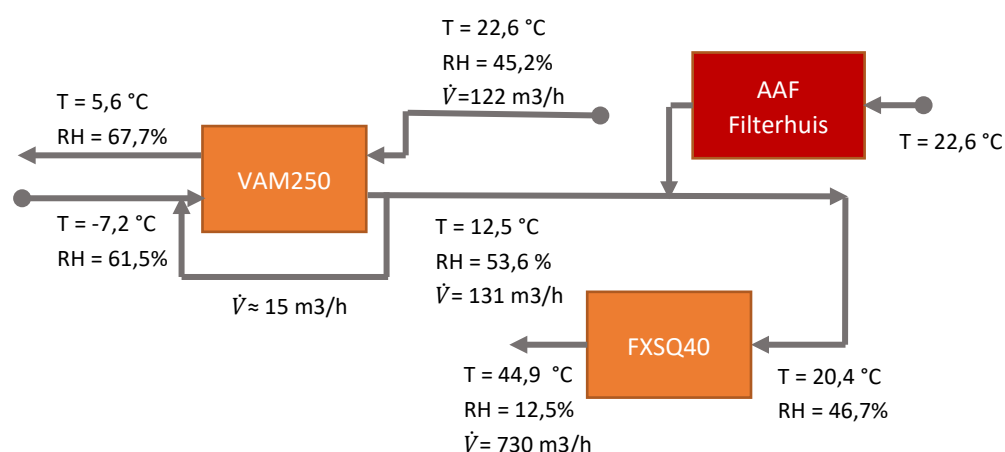
Subscript	Locatie
11	Afzuig uit ruimte
12	Afblaas naar buiten
21	Aanzuig van buiten
22	Aanvoer naar ruimte

Verwarmen, buitentemperatuur 5 °C



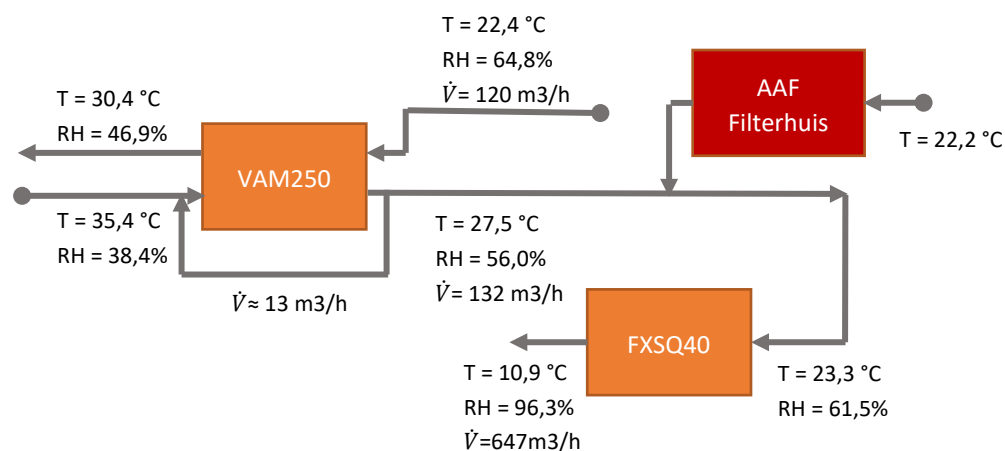
Grootheid	Waarde
Watertemperatuur in/uitlaat zijde compressorunit	15,0 °C / 13,7 °C
Waterdebiet ringleiding	3,02 m ³ /h
E-vermogen compressor	2121 W
E-vermogen ventilatorconvector	116 W
E-vermogen WTW-toestel	59 W
Afgeleide grootheden	
Temperatuurrendement	75%
Efficiëntie WTW enthalpie	72%
Verwarming ventilatorconvector (totaal)	5,4 kW
Verwarming ventilatorconvector (voelbaar)	5,4 kW
Verwarming ventilatorconvector (latent)	n.v.t. bij verwarmen

Verwarmen, buitentemperatuur -7 °C



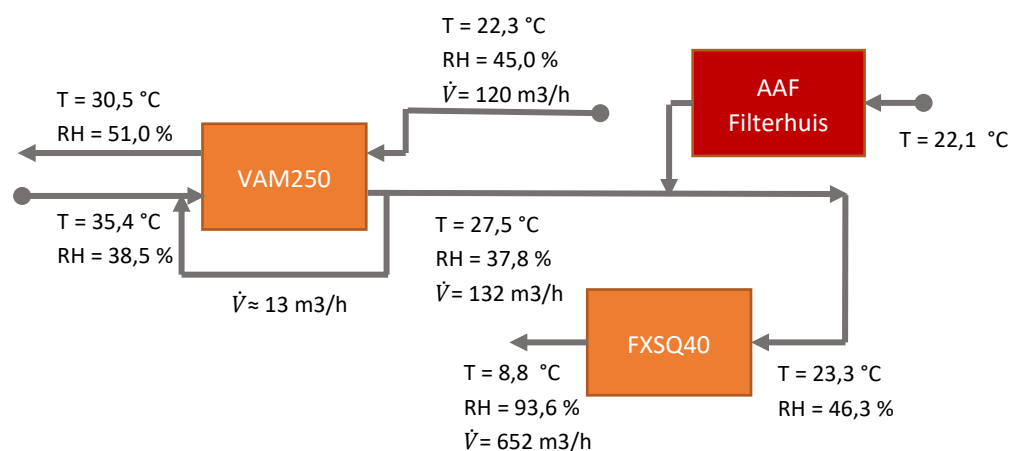
Grootheid	Waarde
Watertemperatuur in/uitlaat zijde compressorunit	15,0 °C / 13,7 °C
Waterdebiet ringleiding	3,02 m ³ /h
E-vermogen compressor	2003 W
E-vermogen ventilatorconvector	116 W
E-vermogen WTW-toestel	60 W
Afgeleide grootheden	
Temperatuurrendement	74%
Efficiëntie WTW enthalpie	69%
Verwarming ventilatorconvector (totaal)	5,6 kW
Verwarming ventilatorconvector (voelbaar)	5,6 kW
Verwarming ventilatorconvector (latent)	n.v.t. bij verwarmen

Koelen, buitentemperatuur 35 °C en hoge luchtvochtigheid binnen



Groothed	Waarde
Watertemperatuur in/uitlaat zijde compressorunit	24,9 °C / 26,5 °C
Waterdebiet ringleiding	3,02 m ³ /h
E-vermogen compressor	720 W
E-vermogen ventilatorconvector	119 W
E-vermogen WTW-toestel	57 W
Afgeleide grootheden	
Temperatuurrendement	66%
Efficiëntie WTW enthalpie	56%
Koeling ventilatorconvector (totaal)	4,5 kW
Koeling ventilatorconvector (voelbaar)	2,8 kW
Koeling ventilatorconvector (latent)	1,7 kW

Koelen, buitentemperatuur 35 °C en lage luchtvochtigheid binnen



Grootheid	Waarde
Watertemperatuur in/uitlaat zijde compressorunit	24,9 °C / 26,4 °C
Waterdebiet ringleiding	3,02 m ³ /h
E-vermogen compressor	830 W
E-vermogen ventilatorconvector	120 W
E-vermogen WTW-toestel	57 W
Afgeleide grootheden	
Temperatuurrendement	65%
Efficiëntie WTW enthalpie	49%
Koeling ventilatorconvector (totaal)	4,2 kW
Koeling ventilatorconvector (voelbaar)	3,3 kW
Koeling ventilatorconvector (latent)	0,88 kW

Uit de meetresultaten kan het volgende worden geconcludeerd:

Bij verwarmen varieert het temperatuurrendement tussen 74 en 75% en bij koelen tussen de 65 en 66%. Voor het enthalpierendement is dat respectievelijk 69 tot 72% en 49 tot 56%.

K Fysische modelvorming MBPC en voorbeelden filtermanager-module en MBPC

Fysische modelvorming MBPC

De volgende differentiaalvergelijking beschrijft de ontwikkeling van de CO₂-concentratie:

$$\frac{d[CO_{2\text{binnen}}]}{dt} = \frac{bron_{CO_2}}{Volume} + \frac{[CO_{2\text{buiten}}]\Phi_{WTW_{\text{buiten} \rightarrow \text{binnen}}} - [CO_{2\text{binnen}}]\Phi_{WTW_{\text{binnen} \rightarrow \text{buiten}}}}{Volume}$$

Waarbij:

$[CO_2]$	= CO ₂ concentratie binnen / buiten	[ppm]
$bron$	= bron CO ₂	[g/sec]
Φ_{WTW}	= Volumeflow	[m ³ /sec]
$Volume$	= Volume patiëntenkamer	[m ³]

Als $\Phi_{WTW_{\text{buiten} \rightarrow \text{binnen}}} = \Phi_{\text{binnen} \rightarrow \text{buiten de ruimte}}$ geldt:

$$\frac{d[CO_{2\text{binnen}}]}{dt} = \frac{bron_{CO_2}}{Volume} + \frac{[CO_{2\text{buiten}}] - [CO_{2\text{binnen}}]}{Volume} \Phi_{WTW}$$

Voor de ontwikkeling van de fijnstofconcentratie geldt:

$$\frac{d[fijnstof]}{dt} = \frac{bron_{fijnstof}}{Volume} + ([fijnstof_{\text{buiten}}](1 - \eta_{\text{filter}}) - [fijnstof]) \left(\frac{\Phi_{WTW}}{Volume} \right) - [fijnstof](1 - \eta_{\text{filter}}) \left(\frac{\Phi_{WW} - \Phi_{WTW}}{Volume} \right)$$

Waarbij:

$[fijnstof]$	= concentratie fijnstof binnen	[μg/m ³]
$bron_{fijnstof}$	= bron fijnstof	[μg/sec]
η_{filter}	= filter efficiency	[-]
Φ_{WTW}	= Volumeflow WTW	[m ³ /sec]
Φ_{WW^*}	= Volumeflow door warmtewisselaar	[m ³ /sec]
$Volume$	= Volume patiëntenkamer	[m ³]

De differentiaalvergelijkingen voor het thermisch-energetische gedrag geldt:

$$\frac{dT_{\text{lucht}}}{dt} = \frac{1}{C_{\text{lucht}}} \left(\left(\frac{T_{\text{buiten}} - T_{\text{lucht}}}{R_{\text{buiten-lucht}}} \right) + \left(\frac{T_{\text{massa}} - T_{\text{lucht}}}{R_{\text{massa-lucht}}} \right) + f_{zl} I_{\text{zon}} + f_{iz} I_{\text{int}} \right)$$

$$\frac{dT_{\text{massa}}}{dt} = \frac{1}{C_{\text{massa}}} \left(\left(\frac{T_{\text{buiten}} - T_{\text{massa}}}{R_{\text{buiten-massa}}} \right) + \left(\frac{T_{\text{lucht}} - T_{\text{massa}}}{R_{\text{massa-lucht}}} \right) + I_{\text{vent}} + f_{zm} I_{\text{zon}} + f_{im} I_{\text{int}} \right)$$

Waarbij:

T_{lucht}	= temperatuur luchtknooppunt [°C]
T_{massa}	= temperatuur gebouwmassa knooppunt [°C]
T_{buiten}	= temperatuur buiten [°C]
$R_{buiten-lucht}$	= warmteweerstand tussen buiten en luchtknooppunt [K/W]
C_{lucht}	= thermische capaciteit luchtknooppunt [Joule/K]
I_{zon}	= zonbelasting [W]
I_{int}	= interne belasting [W]
I_{vent}	= warmtestroom t.g.v. ventilatie [W]
I_{verw}	= warmtestroom verwarming [W]
f_{zl}	= fractie zonbelasting afgegeven aan luchtknoop [-]

Verder geldt:

$$I_{vent} = \Phi_{WTW} * (1 - \eta_{WTW}) * \rho_{lucht} * C_p * (T_{buiten} - T_{lucht})$$

Waarbij:

Φ_{WTW}	= Volumeflow van buiten naar binnen [m³/sec]
ρ_{lucht}	= soortelijke massa lucht [kg/m³]
C_p	= soortelijke warmte lucht [J/K]
η_{WTW}	= energie efficiency WTW (≈0 bypass) [-]

$$I_{zonbelasting} = I_{op\ beglazing} * A_{beglazing} * g_{beglazing} * f_{zonwering}$$

Waarbij:

$I_{op\ beglazing}$	= zonnebelasting op de gevel [W/m²]
$A_{beglazing}$	= oppervlakte beglazing [m²]
$g_{beglazing}$	= g waarde beglazing [-]
$f_{zonwering}$	= reductiefactor zonwering [-]

Penaltyfunctie

De penaltyfunctie wordt in het model meegenomen om te voorkomen dat de waarden van bepaalde parameters buiten acceptabele grenzen vallen. De penaltyfunctie bestaat uit componenten gericht op thermisch comfort, CO₂-concentratie, fijnstofconcentratie, energiekosten en filterkosten:

$$P_{therm\ comfort} = f_{tc} \left((T_{air} < T_{air\ min})(T_{air\ min} - T_{air}) + (T_{air} > T_{air\ max})(T_{air} - T_{air\ max}) \right)$$

$$P_{CO_2} = f_{CO_2} \left(([CO_2] > [CO_2\ max])([CO_2] - [CO_2\ max]) \right)$$

$$P_{fijnstof} = f_{fijnstof} \left(([fijnstof] > [fijnstof\ max])([fijnstof] - [fijnstof\ max]) \right)$$

$$P_{energy\ costs} = C_h \eta_h I_{heating} + C_c \eta_c I_{cooling} + C_v I_{WTW} + C_r I_{WW}$$

$$P_{filter\ costs\ WTW} = f_{fcWTW} \Phi_{WTW} [fijnstof] \eta_{fijnstof} \left(\frac{\text{kosten aanschaf + installatie}}{\text{max total stof}} \right)$$

Waarbij:

$$\begin{aligned} P_{therm\,comf} &= \text{Penalties discomfort} && [\text{discomfort}] \\ P_{energy\,costs} &= \text{Energy costs} && [\text{Euro}] \end{aligned}$$

De regeling minimaliseert de penaltyfunctie:

$$\text{Min} \int_{t=0}^{24h} (P_{thermcomf} + P_{CO_2} + P_{fijnstof} + P_{energiekosten} + P_{filterkostenWTW} + P_{filterkostenWW}) dt$$

Waarbij:

$$\begin{aligned} 0 &\leq I_{heating} \leq I_{heating_{max}} \\ 0 &\leq I_{cooling} \leq I_{cooling_{max}} \\ 0 &\leq \Phi_{WTW} \leq \Phi_{WTW_{max}} \\ 0 &\leq \Phi_{WW} \leq \Phi_{WW_{max}} \\ bypass &\in \{0,1\} \\ 0 &\leq f_{zonwering} \leq f_{zonwering_{max}} \quad (\text{optioneel}) \end{aligned}$$

Fall-back regeling

Mocht de MBPC niet werken, dan wordt overgegaan op de fall-back regeling.

Regeling vrije koeling

De bypass klep (12) gaat open als aan de volgende voorwaarde wordt voldaan:

- Er is een koelvraag **AND**
- De koelvraag blijft op basis van MPC nog ten minste 1 uur bestaan **AND**
- De buitenluchttemperatuur is lager dan de ruimtetemperatuur

De koeling via de warmtewisselaar (2) komt in bedrijf als:

- De temperatuur in het middentemperatuurnet (5) $> 10^{\circ}\text{C}$ **AND**
- Als er voldoende flow is (geen storing) in het middentemperatuurnet (5) **AND**
- Het CO₂-niveau in de ruimte is hoger dan het ongestoorde niveau (er zijn dus mensen aanwezig of we moeten dit op een andere wijze bepalen) **AND**
- De gewenste temperatuur op basis van MPC niet alleen kan worden gehaald met vrije koeling **OR**
- De gewenste temperatuur is na 1 uur vrije koeling nog niet bereikt

Regeling luchthoeveelheid (ODA)

De hoeveelheid verse buitenlucht (ODA) wordt geregeld op basis van het CO₂-niveau in de ruimte. De CO₂-sensor is geïntegreerd in de secondary air unit.

Ventilator (13a) wordt als volgt aangestuurd:

Is het CO₂-niveau 30 minuten lager dan de gewenste waarde, schakel de ventilator dan één stand terug.

Is het CO₂-niveau 15 minuten hoger dan de gewenste waarde, schakel de ventilator dan één stand omhoog.

Als “vrije koeling” dan ventilator (13a) op één stand hoger schakelen (vrije koeling overruled de regeling op basis van de CO₂-sensor).

Als “vrije koeling” 15 minuten actief is en de ruimtetemperatuur niet is gedaald dan ventilator (13a) op één stand hoger schakelen.

Regeling luchthoeveelheid (SEC)

De ventilator van de secundaire air (13c) toert op als:

Er sprake is van koeling: de temperatuur van de toegevoerde lucht (6) (SUP) onder een temperatuur komt waarbij condensvorming kan optreden **OR**

Er sprake is van verwarming: de temperatuur van de toegevoerde lucht (6) (SUP) hoger wordt dan de ruimtetemperatuur plus 5°C.

De ventilator van de secundaire air (13c) toert af als:

Er langer dan 15 minuten geen verwarmings- of koudevraag is **AND**

De MPC voorspelt dat het opvolgend uur er geen warmte- of koudevraag is **AND**

De ventilatorstand (13c) “hoger” is dan “laag”

Regeling vorstbeveiliging

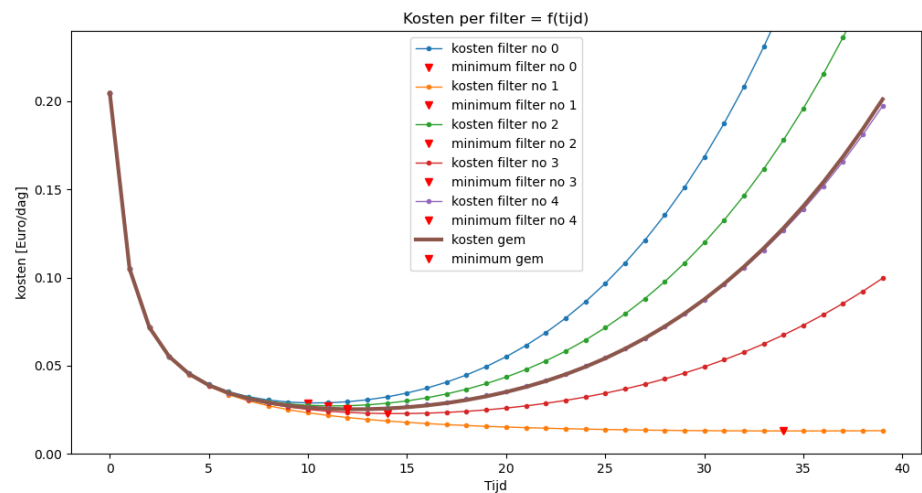
Om te voorkomen dat de warmtewisselaar van de WTW-unit dichtvriest waardoor er minder lucht uit de ruimte kan worden afgevoerd of de luchtzijdige weerstand sterk toeneemt is het systeem voorzien van een vorstbeveiliging. De vorstbeveiliging draagt er zorg voor dat de intredetemperatuur van de buitenlucht niet lager wordt dan -2°C.

De meest eenvoudige regeling is om het elektrische voorverwarmingselement (1) in te schakelen als de buitenluchttemperatuur lager is dan -2°C.

Een meer complexere regeling is om lucht die wordt afgevoerd uit de ruimte bij te mengen met de verse buitenlucht zodat de intredetemperatuur niet lager wordt dan -2°C. Een definitieve keuze hiervoor moet nog worden gemaakt.

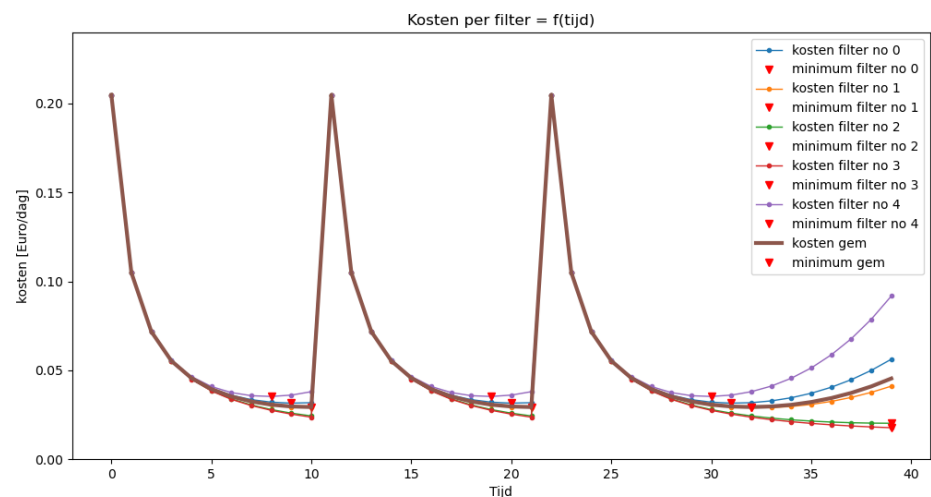
Filtermanager voorbeelden

Hieronder volgen een aantal generieke voorbeelden van het gesimuleerde verlopen van kosten en economisch ideale vervangmomenten om de werking van de Filtermanager te demonstreren en duiden.



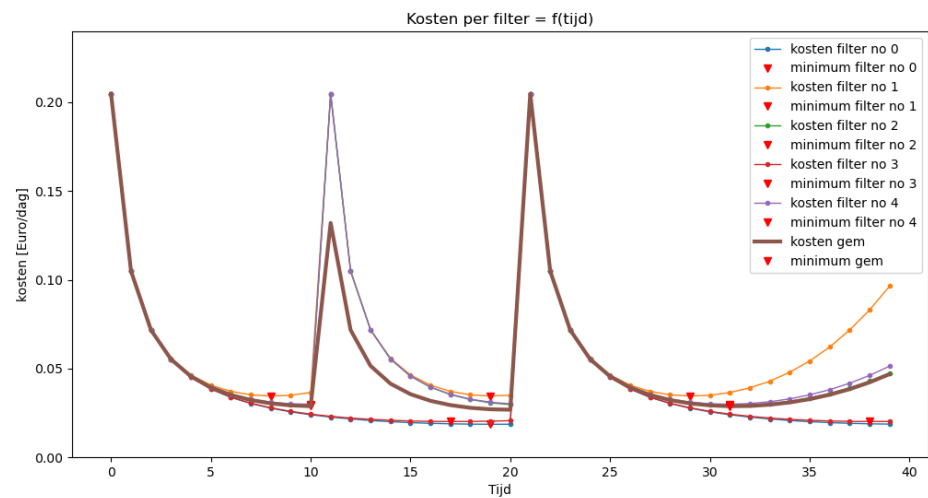
Figuur K1. Voorbeeld gesimuleerd verloop filterkosten per dag in de tijd voor 5 filters incl. gemiddeld en kostenminima

Het bovenstaande voorbeeld laat de totale kosten zien in de tijd per filter en gemiddeld voor de 5 filters en ook het punt met de minimum kosten. Te zien is dat de totale kosten eerst dalen omdat de vaste kosten aanvankelijk over een langere periode worden verdeeld. Daarna nemen de energiekosten progressief toe door de extra weerstand van de luchtfilters veroorzaakt door de vervuiling van de filters.



Figuur K2. Voorbeeld gesimuleerd verloop filterkosten per dag inclusief vervangingen (alle filters tegelijk)

Bovenstaande voorbeeld laat zien dat de filtermanager niet alleen het economisch meest gunstige moment(en) kan bepalen, maar ook dat meerdere vervangmomenten van de filters in de tijd kunnen worden gesimuleerd.

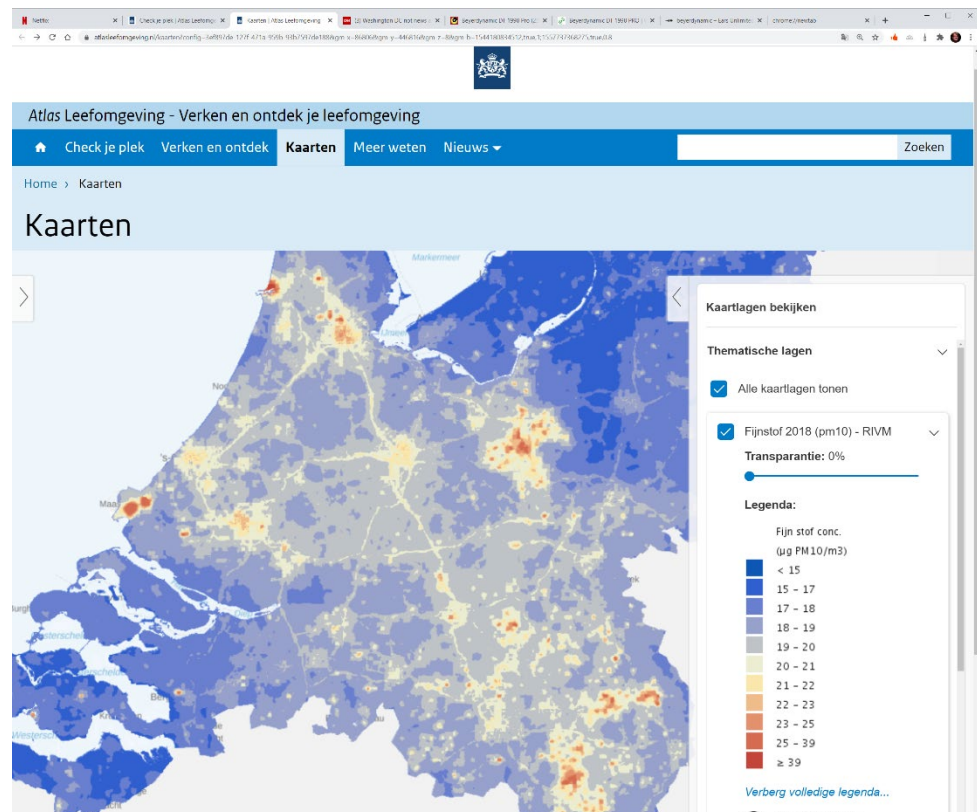


Figuur K3. Voorbeeld gesimuleerd verloop filterkosten (alleen filters vervangen waarvoor dat economisch voordelig is)

Bovenstaand voorbeeld demonstreert de optie van de filtermanager-module waarbij filters een volgend vervangmoment of een daarop volgend vervangmoment mogen worden vervangen als dit economisch gunstiger is.

Stofconcentratie buitenlucht

Er zijn verschillende bronnen voor stofconcentraties van de buitenlucht zowel momentaan als gemiddeld over een periode. Een voorbeeld is de RIVM fijnstof kaart 2018 (zie onder).

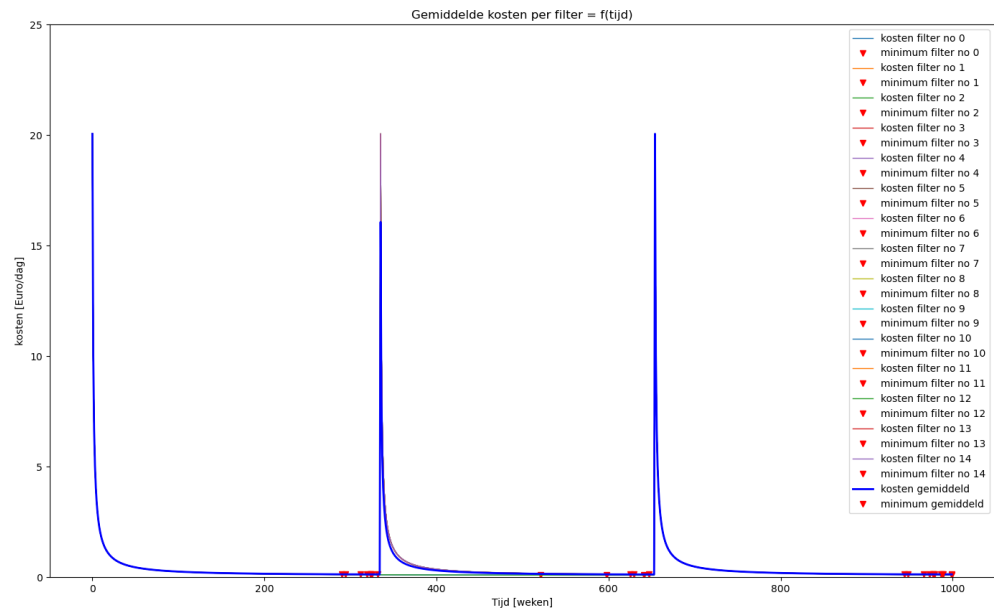


Figuur K4. RIVM fijnstof kaart 2018 als voorbeeld

Voor het onderstaande uitgewerkte voorbeeld gaan we uit van een fijnstofconcentratie van $20 \mu\text{g pm}_{10} / \text{m}^3$.

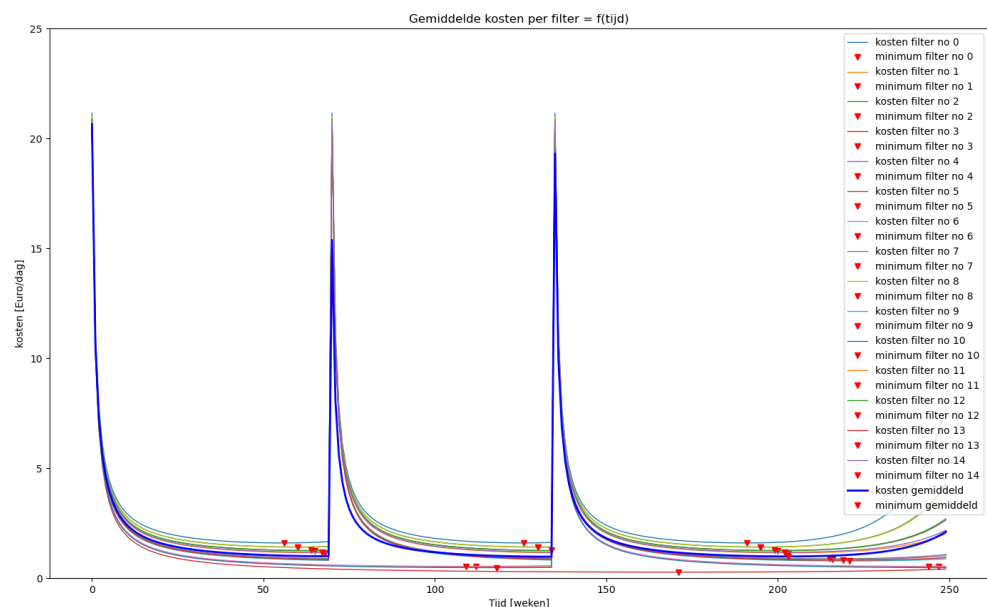
Uit stofconcentratie metingen tijdens het project in twee ziekenhuizen blijkt de stofconcentraties in patiëntenkamers zeer beperkt t.o.v. de buitenconcentraties, daarom wordt het eerste verwaarloosd.

Bovenstaande modellen zijn geïntegreerd in de Filtermanager-module en een voorbeeld is uitgewerkt met de volgende aannamen: buitenlucht met $20 \mu\text{g pm}_{10} / \text{m}^3$; gemiddeld 20 euro per filter bij vervangen; 0,09 eurocent per kWh en een ventilatievoud tussen 1 en 3.



Figuur K5. Voorbeeld van de resultaten van door de Filtermanager-module berekende resultaten

Uit bovenstaande resultaten blijkt dat het economische optimum voor het vervangen van de filters steeds wordt bereikt na ca. 340 weken en verder dat het economische gunstig is om enkele, minder vervuilde filters een volgende of een daarop volgend keer te vervangen.

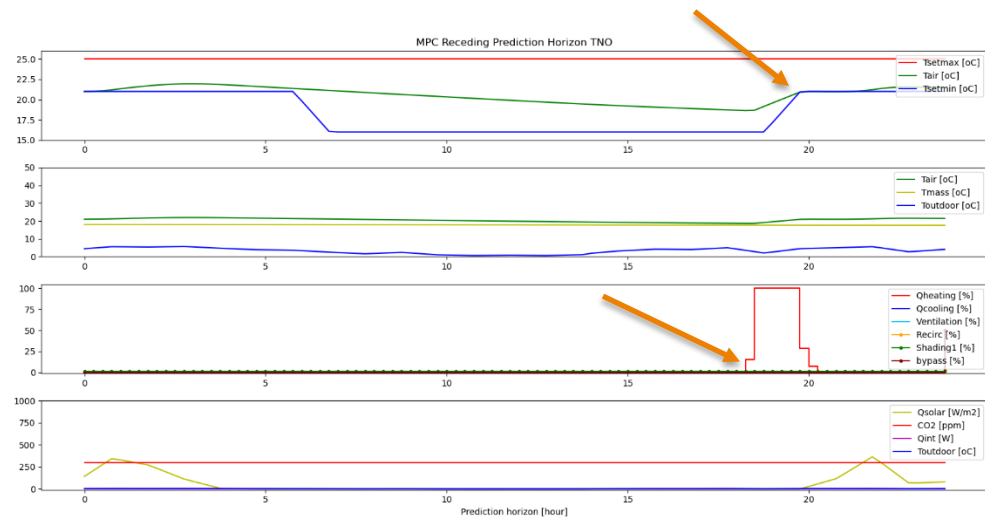


Figuur K6. Voorbeeld van de resultaten van door de Filtermanager-module berekende resultaten

Uit bovenstaande resultaten blijkt dat het economische optimum voor het vervangen van de filters steeds wordt bereikt na ca. 70 weken en verder dat het economische gunstig is om enkele, minder vervuilde filters een volgende of een daarop volgend keer te vervangen.

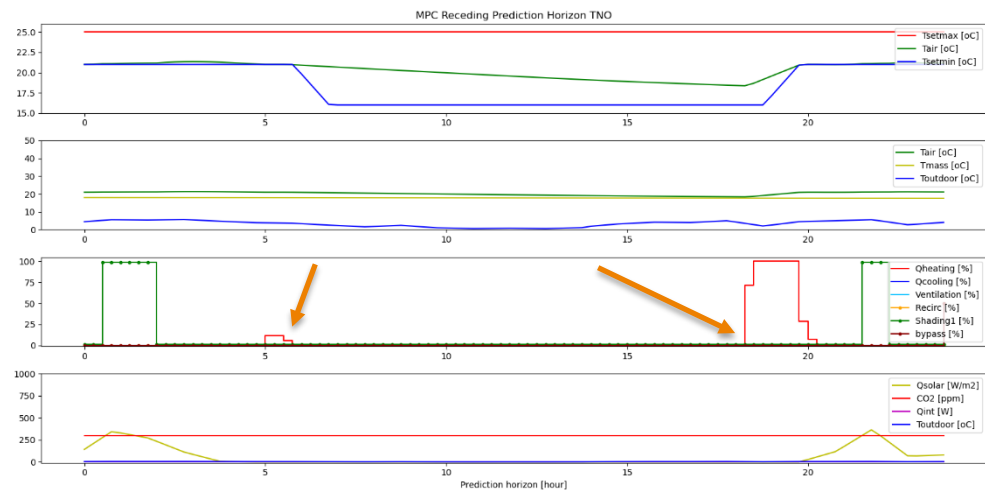
Uitleg MBPC aan de hand van voorbeelden

De MBPC is gerealiseerd op basis van bovenstaande vergelijkingen en berekent voor een horizon van 24 uur met stappen van 15 minuten de geoptimaliseerde instellingen voor de actuatoren op basis van de beschreven Penalty functie.



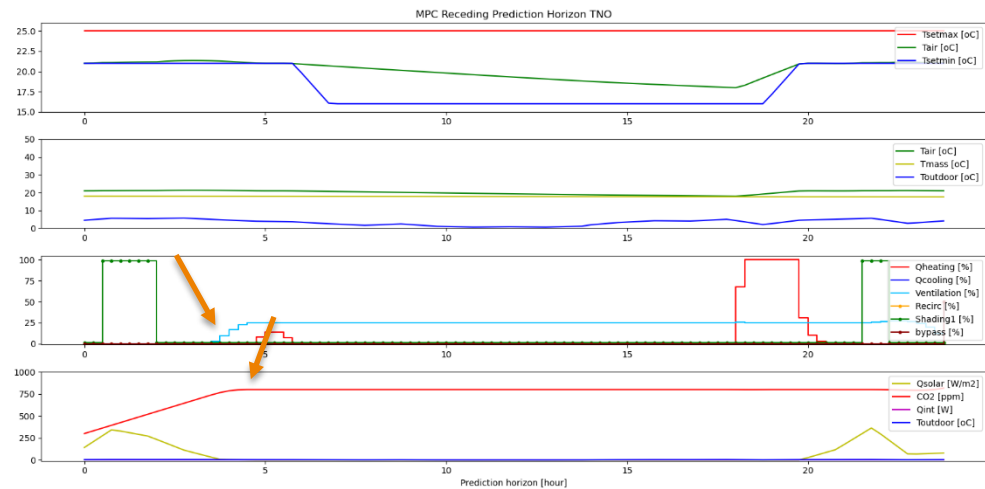
Figuur K7. MBPC in actie:

- 1- 18-20h: Verwarming al toepassen voordat Tair < Tsetmin op basis van voorspelling
- 2- 0-24h: Bypass WTW gesloten om verwarming te minimaliseren
- 3- 0-24h: Zonwering open om verwarming te minimaliseren



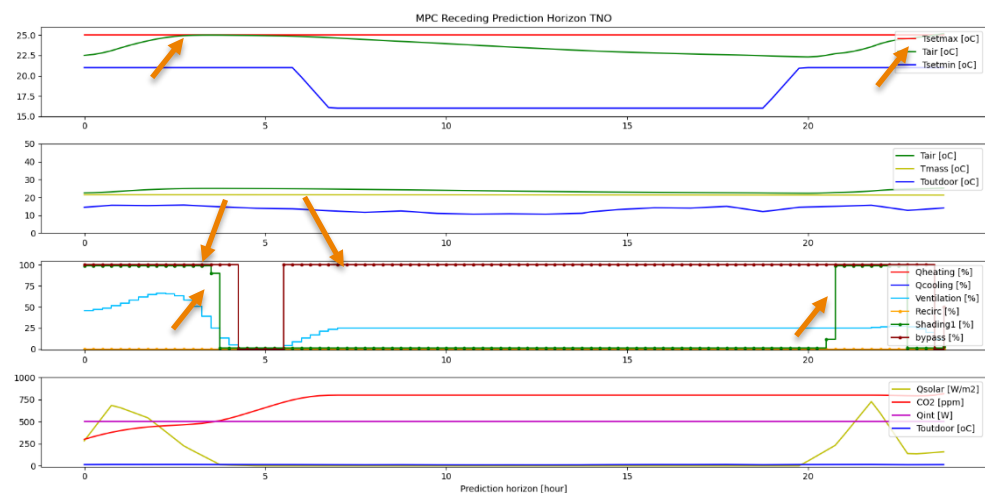
Figuur K8. Bovenstaand met automatische zonwering (neer bij 250W/m²):

- 1- Meer verwarming nodig t.o.v. MBPC geregelde zonwering



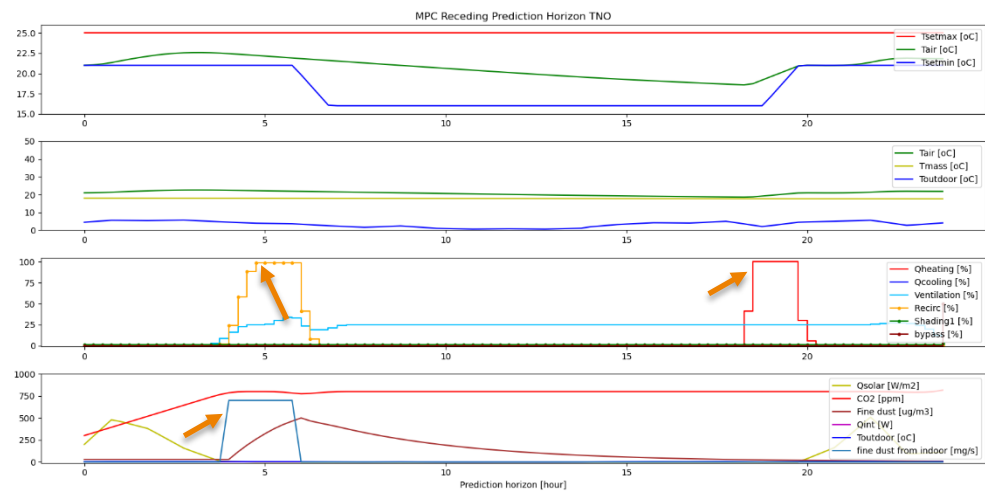
Figuur K9. Als bovenstaand met CO₂ ventilatie regeling

- 1- 3:30h-: Ventilatie al eerder toepassen voordat CO₂ > 800 ppm op basis van voorspelling
- 2- 0-24h: Bypass WTW gesloten om verwarming te minimaliseren
- 3- Zonwering gesloten als zonbelasting op de gevel > 250 W/m²



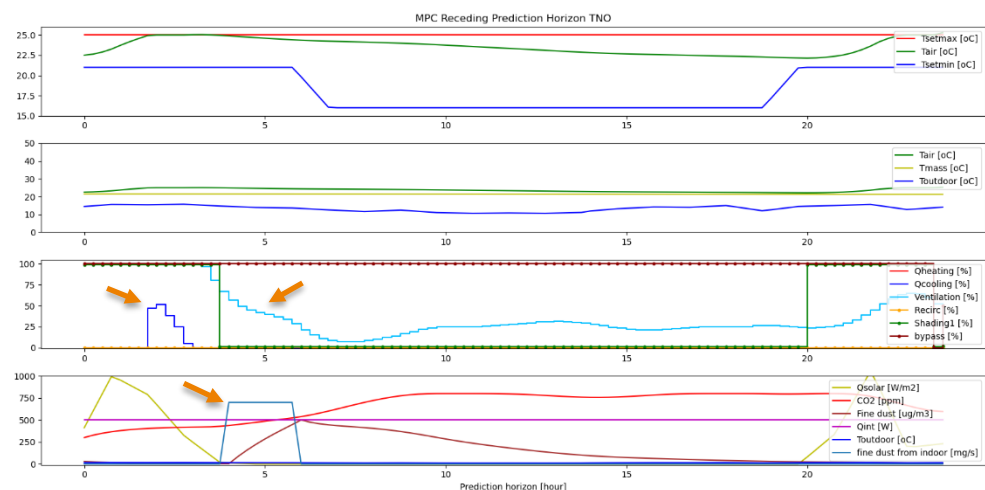
Figuur K10. MBPC in warme periode

- 1- 0-24h: Gebruik ventilatie en WTW met bypass op te koelen met buitenlucht
- 2- 0-4h en 20:30-: Zonwering tijdelijk sluiten om thermisch discomfort te voorkomen



Figuur K11. Aansturing recirculatie om fijnstof te minimaliseren

- 1- 4-6h: fijnstof van productie (onderste grafiek lichtblauw)
- 2- 4-6h: toename recirculatie en ventilatie om fijnstof concentratie terug te brengen
- 3- 0-24h: verhouding ventilatie en recirculatie energetisch geoptimaliseerd verwarming minimaliseren



Figuur K12. Aansturing recirculatie om fijnstof te minimaliseren

- 1- 4-6h: fijnstof van productie (onderste grafiek lichtblauw)
- 2- 4-6h: ventilatie i.p.v. recirculatie om fijnstofconcentratie terug te brengen
- 3- 0-24h: ventilatie energetisch geoptimaliseerd (om koeling te minimaliseren)