
Potentiële energiebesparing bij toepassing van vraaggestuurde ventilatie in schoolgebouwen



PEUTZ

**HOGESCHOOL
UTRECHT**

Auteur	Studentnr.	Afstudeerrichting	Afstudeerbedrijf	Curcuscode	Datum
Erik Bogerd	1530715	Bouwfysica	Adviesbureau Peutz	TBWK-AFF8-03	4 juni 2013

Docenten	ir. K. (Karin) Grooten
	ing. V. (Vincent) Frowijn M.Arch

P o t e n t i ë l e e n e r g i e b e s p a r i n g b i j t o e p a s s i n g v a n v r a a g g e s t u u r d e v e n t i l a t i e i n s c h o o l g e b o u w e n

Gegevens student

Student	Erik Bogerd
Adres	Merenborch 120
Woonplaats	Vianen
Studentnummer	1530715
Opleiding	Bouwkunde
Afstudeerrichting:	Bouwfysica
Datum:	4 juni 2013

Gegevens bedrijf

Bedrijf	Peutz bv
Adres	Paletsingel 2
Plaats	Zoetermeer
Bedrijfsbegeleider 1	ir. J.A. (Jérôme) Eijsackers
Functie bedrijfsbegeleider 1	Senior adviseur bouwfysica & duurzaamheid
Bedrijfsbegeleider 2	ir. M. (Marco) van beek
Functie bedrijfsbegeleider 2	Adviseur bouwfysica & duurzaamheid

Gegevens school

Hogeschool Utrecht	FNT Instituut voor Gebouwde Omgeving
Adres	Nijenoord 1
Plaats	Utrecht
Afstudeerbegeleider HU (1)	ir. K. (Karin) Grooten
Afstudeerbegeleider HU (2)	ing. V. (Vincent) Frowijn M.Arch
Cursuscode	TBWK-AFF8-03

Samenvatting

In dit onderzoek is er gekeken naar de potentiële energiebesparing die te behalen is bij toepassing van vraaggestuurde ventilatie, in dit geval op basis van CO₂-sturing. Het doel hiervan was om in kaart te brengen wat de potentiële energiebesparing is bij het gebruik van vraaggestuurde ventilatie en de invloedsfactoren hiervan. Er is gekeken naar wat voor invloed het heeft wanneer er alleen 11-jarigen in het gebouw zijn en wanneer de school leerlingen heeft met verschillende leeftijden. Er is hiervoor een schoolgebouw voor basisonderwijs als case-studie gebruikt.

Er is hierbij gekeken naar een gemiddeld verbruik, berekend is dat de ventilatie door CO₂-sturing aanging van 6,5 uur aanging t.o.v. 9 uur in de beginsituatie. Ook is hierbij meegenomen dat het ventilatiesysteem op woensdag drie uur draait door afwezigheid in de middag.

Door CO₂-sturing toe te passen zorgde dit bij ventilatie op basis van CO₂-sturing en aanwezigheid van gemiddelde leeftijden in het schoolgebouw (5, 8 en 11 jaar) ervoor dat er 46 % minder geventileerd werd. Daardoor werd er 42 % minder energie verbruikt door de aandrijfmotor van de ventilator.

De verwachting was dat er daardoor ook minder lucht verwarmd of gekoeld hoefde te worden. Na de simulatie in Vabi Elements bleek dat de gestelde afname in ventilatie de volgende effecten hebben op het thermisch energieverbruik:

Thermische energiebesparing

1. Het centraal verwarmen: -51 %
2. Het centraal koelen: -45 %
3. Het lokaal verwarmen: -4 %
4. Het lokaal koelen: +58 %

Centraal verwarmen en koelen nam ongeveer evenredig af met de afname in ventilatiehoeveelheid. Er was te zien dat koelen als enige onderdeel relatief veel toeneemt. Doordat er door de CO₂-sturing minder lucht werd afgevoerd, bleef er in de zomer meer warme lucht binnen hangen, waardoor de koeling vaker aanging. Lokaal verwarmen nam gering af, doordat er net zoals in de zomer meer warmte bleef hangen doordat er minder lucht werd afgevoerd. Echter was deze temperatuur niet hoog genoeg om de koeling aan te laten gaan, daarom werd er op deze momenten minder lokaal verwarmd.

Werkelijke energiebesparing

Doordat de opwekking voor warmte en koude niet vergelijkbaar met elkaar is, is dit omgerekend naar het energieverbruik wat door de installatie wordt verbruikt. Uiteindelijk kwam dit neer op een potentiële energiebesparing voor de volgende onderdelen:

1. Verwarmen: -19 %
2. Koelen: +23 %
3. Ventilatie: -42 %

Deze besparing was te behalen bij elke soort opwekkingsinstallatie voor verwarmen en koelen, per onderdeel blijft de besparing in percentage gelijk. Het maakt echter wel uit voor een gebouw wat de verhouding van het energieverbruik is tussen de aandelen verwarmen, koelen en ventilatie.

Totale energiebesparing

Wanneer dit energieverbruik bij elkaar op werd geteld leverde dit een totale energiebesparing op van 21 %, bij installaties waarbij het aandeel verwarmen en koelen relatief minder hoog is, liep dit op tot een besparing van 26 %. Dit laatste is het geval bij het gebruik van bijvoorbeeld warmtepompen, waar er relatief minder energie benodigd is voor verwarmen en koelen.

V o o r w o o r d

Voor u ligt de afstudeerscriptie *Potentiële energiebesparing bij toepassing van vraaggestuurde ventilatie in schoolgebouwen*. Deze afstudeerscriptie is gedurende vijf maanden tot stand gekomen door middel van mijn afstudeerstage bij Adviesbureau Peutz, te Zoetermeer. Deze periode heb ik ervaren als intensief, maar ook zeer leerzaam en interessant. Dit onderwerp sprak mij aan door de combinatie van bouwkunde, installaties en duurzaamheid.

Voor de totstandkoming wil ik meerdere mensen bedanken. Als eerste wil ik Marco van Beek en Jérôme Eijsackers bedanken voor de goede begeleiding. Er kwamen nogal wat obstakels bij kijken, niet elke daarvan waren snel op te lossen. Bij elk mogelijk obstakel waren zij bereid om erover te brainstormen en mee te denken. Met name mijn directe begeleider Marco was altijd bereid om mee te denken voor een oplossing zodat ik in elk geval verder kon met mijn onderzoek.

Ook wil ik mijn docenten Karin Grooten en Vincent Frowijn bedanken. Regelmatig kon ik met hun mijn resultaten bespreken en feedback krijgen.

Behalve mijn begeleiders wil ik ook de directrice van de Paulusschool, Wietke van Overbeek en de directrice van De Vijverburgh, Dusty Duijzer bedanken. Zij waren bereid om hun volle medewerking te geven m.b.t. mijn onderzoek. Door hun medewerking had ik de mogelijkheid om het schoolgebouw meerdere keren te bezoeken waardoor ik een goed beeld kreeg van het gebruik van de school. Ook had ik toestemming om loggers te plaatsen voor de bepaling van de CO₂-verloop en het temperatuurverloop in enkele lokalen.

Behalve de medewerking van De Paulusschool en De Vijverburgh kreeg ik ook de medewerking van Ron de Schepper en Eddy Boer, van de gemeente Zoetermeer. Op deze manier kreeg ik meer informatie over de installaties in het schoolgebouw, die gebruikt is als case-studie.

Ik hoop dat mijn onderzoek een meerwaarde kan hebben voor energiebesparing in de praktijk.

Veel leesplezier toegewenst,

Erik Bogerd

Utrecht, juni 2013

Inhoudsopgave

Inleiding	6
1. Achtergrond ventilatie	7
1.1. Achtergrond ventilatie	8
1.2. Programma van Eisen Frisse Scholen 2012	11
1.3. Ventilatie-eisen	12
1.4. Effect ventilatie op leerprestaties	14
1.5. Effect van ventilatie op gezondheid	15
1.6. Praktijkmetingen in schoolgebouwen	16
2. CO ₂ -gestuurde ventilatie	17
2.1. Ventilatiesystemen	18
2.2. CO ₂ -gestuurde ventilatie	19
3. Het schoolgebouw als case-studie	21
3.1. Beschrijving schoolgebouw	22
3.2. Bouwkundig	23
4. Methode onderzoek	24
5. CO ₂ -concentratie bepalen	25
5.1. Het bepalen van de CO ₂ -concentratie in een ruimte	26
5.2. Verloop CO ₂ -concentratie bij ventilatie	31
5.3. Benodigde debieten per leeftijd	32
6. Het schoolgebouw als case-studie	33
6.1. Temperatuurmetingen	34
6.2. CO ₂ -metingen	35
7. Gebouwinvoer Vabi Elements	36
7.1. Uitgangspunten Vabi	37
7.2. Vabi Problemen & oplossingen	39
8. Variantenonderzoek	40
8.1. Uitgangspunten varianten	41
8.2. Het thermisch binnenklimaat	42
8.3. Het energieverbruik t.b.v. verwarmen	43
8.4. Het energieverbruik t.b.v. koelen	43
8.5. Totaal energieverbruik verwarming/koelen	43
8.6. Energieverbruik installaties	44
8.7. Energieverbruik ventilator	45
8.8. Energieverbruik totaal	46
8.9. Verband ventilatie en energiebesparing	47

9. Brandveiligheid	48
9.1. Brandcompartimentering	48
9.2. Gestelde maatregelen doorvoeringen	49
9.3. Brandwerende maatregelen deuren	50
9.3. Brandwerende maatregelen doorvoeringen	53
9.4. Brandwerende maatregelen kozijnen/beglazing	57
10. Gevolgen CO ₂ -sturing	58
Conclusie	60
Aanbevelingen	61
Discussie	61
Verklarende woordenlijst	62
Bronnen	63
Bijlagen	64
Bijlage A1: Plattegrond begane grond	65
Bijlage A2: Plattegrond 1 ^e verdieping	66
Bijlage A3: Plattegrond 2 ^e verdieping	67
Bijlage A4: Gevelaanzicht Zuid & West	68
Bijlage A5: Gevelaanzichten Noord & Oost	69
Bijlage B1: Ventilatie 12-jarigen	70
Bijlage B2: Ventilatie 8-jarigen	71
Bijlage B3: Ventilatie 5-jarigen	72
Bijlage C: Ventilatorgrafiek	73
Bijlage D1: Brandveiligheid begane grond	74
Bijlage D2: Brandveiligheid 1 ^e verdieping	75
Bijlage D3: Brandveiligheid 2 ^e verdieping	76

Inleiding

1.1 Omschrijving

Deze scriptie is opgesteld in het kader van het afstudeeronderzoek 'potentiële energiebesparing door het toepassen van vraaggestuurde ventilatie in schoolgebouwen'.

Dit onderzoek heeft plaatsgevonden in semester 8 van de opleiding bouwkunde aan de Hogeschool Utrecht, FNT Instituut voor Gebouwde Omgeving. Het onderzoek is tot stand gekomen in overleg met Peutz bv. Het afstuderen heeft plaatsgevonden in de periode maandag 4 februari tot vrijdag 28 juni op de vestiging Peutz te Zoetermeer. In deze periode is onderzocht wat de energiebesparing is bij het gebruik van vraaggestuurde ventilatie bij schoolgebouwen.

1.2 Aanleiding onderzoek

Sinds de komst van het *Programma van Eisen Frisse Scholen* en het Bouwbesluit 2012 wordt met een relatief groot ventilatiedebiet geventileerd. Door deze toenemende eisen wordt er een goede luchtkwaliteit gerealiseerd, maar tegelijk een hoge energievraag.

De oorzaak van een hogere energievraag zijn:

- Opwarming van een groter volume buitenlucht.
- Koelen van een groter volume buitenlucht.
- Ventilatoren die meer lucht moeten verwerken.

Met behulp van slimme regelstrategieën, te denken aan het regelen op basis van aanwezigheid of CO₂, is er naar verwachting een grote energiebesparing te realiseren. In dit onderzoek wordt er gekeken naar het regelen op basis van CO₂.

Door een bestaand schoolgebouw als case-studie te gebruiken wordt in kaart te gebracht wat de potentiële energiebesparing is. Tevens wordt er gekeken naar welke aspecten van invloed zijn op de potentiële energiebesparing en welk effect dit precies teweeg brengt. Wanneer blijkt dat de energiebesparing relatief hoog is, zal dit meehelpen bij de overweging om vraaggestuurde ventilatie toe te passen in schoolgebouwen.

1.3 Leeswijzer

Deel 1 van deze scriptie omvat de literatuurstudie. Hier wordt gekeken naar de achtergrond van ventilatie, wat het effect is van veel of weinig ventilatie en welke ventilatie-eisen er zijn.

Deel 2 van deze scriptie bevat de case-studie. Hiervoor wordt een schoolgebouw in Zoetermeer als case gebruikt. Hier zijn enkele varianten doorgerekend met verschillende invloedsfactoren. Uiteindelijk is hier voor de onderdelen, verwarmen (centraal en lokaal), koelen (centraal en lokaal) en ventilatie bepaald wat de potentiële energiebesparing is die met CO₂-sturing is te halen.

Deel 3 is een onderdeel m.b.t. brandveiligheid. Hier is gekeken naar de brandveiligheids-eisen m.b.t. brandcompartimentering. Door de brandcompartimenteringen lopen kanalen, er is hier gekeken hoe dit opgelost wordt en of dit in het gebouw ook daadwerkelijk gedaan is. Ook is er gekeken naar het gebruik van branddeuren. De doelvraag hiervan is of er in de praktijk wel wordt voldaan aan wat er theoretisch aan brandveiligheid bedacht is en wat de benodigdheden zijn voor doorvoeringen.

1.4 Probleemstelling

Het ventileren met een groot debiet levert een goede luchtkwaliteit op, maar brengt een hoge energievraag met zich mee. Op momenten dat er geen luchtverversing nodig is (bij afwezigheid van personen), blijven de ventilatoren van ventilatiesystemen continu doordraaien. De verwachting is dat er een potentiële winst te behalen, doordat er minder geventileerd wordt en daarom minder buitenlucht opgewarmd of gekoeld hoeft te worden. Doordat de luchtkwaliteit in schoolgebouwen onder de maat is, is er in 2008 een *Programma van Eisen Frisse Scholen* opgesteld. Hier zijn de ventilatie-eisen aangescherpt zodat de luchtkwaliteit verbeterd werd. Door de hogere ventilatie-eisen is de marge vergroot waarin een winst te behalen is bij de energiebesparing van ventilatiesystemen.

1.5 Doelstelling project

Het onderzoek zal uitgevoerd worden door middel van een case-studie. Hiervoor zal een schoolgebouw in Zoetermeer worden gebruikt. Het beoogde gebouw betreft een basisschool aan de Dr. J.W. Palte- laan in Zoetermeer, die in 2010 gebouwd is. Het schoolgebouw voor basisonderwijs bestaat uit twee bouwlagen (21 lokalen met ondersteunende ruimten) en een fietskelder.

Doel van dit afstudeerproject is het in kaart brengen van de potentiële energiebesparing bij het toepassen van vraaggestuurde ventilatie. De huidige situatie zal vergeleken worden met varianten waarbij er sprake is van aanwezigheidsdetectie of CO₂-sturing. Deze varianten zullen inzicht geven in de potentiële energiebesparing en de invloedsfactoren op het energiegebruik.

1.6 Persoonlijke leerdoelen

- Meer inzicht krijgen in het binnenklimaat in gebouwen.
- Meer kennis opdoen op het gebied van ventilatiesystemen:

Veel theorie heb ik gehad over ventilatiesystemen. Nu is het de tijd dat ik me meer in kan verdiepen in de gedetailleerde werking van deze systemen.

- Meer ervaring krijgen in het opstellen van binnenklimaat-simulaties en energiegebruik:

Ervaring met het gebruik van VABI heb ik wel, echter is dit VABI 114 geweest en wordt er bij Peutz gebruik gemaakt van VABI Elements, een latere versie. Het modelleren hierin heb ik tot nu toe alleen voor woningen gedaan, het betreft hier een basisschool en is dus complexer dan de woningen die ik heb gesimuleerd.

- Het opstellen van een professioneel onderzoeksrapport:

Vanuit de Hogeschool Utrecht heb ik al weleens rapporten gemaakt en ook op mijn stage. Echter is dit nog nooit een rapport over een uitgebreid onderzoek geweest, die toch wat anders in elkaar zit dan de rapportages die ik tot nu toe gemaakt heb.

1.7 Eindresultaat

In de eindrapportage wordt de case-studie omschreven op bouwkundig en installatietechnisch gebied. Hier zal ook duidelijk worden hoe het schoolgebouw gebruikt wordt en hoe dit is meegenomen in het onderzoek. De uitkomsten van VABI Elements en het energiegebruik zullen als overzicht te vinden zijn in de eindrapportage. Dit is een overzicht van de huidige situatie en varianten met vraaggestuurde ventilatie. Hierin zal duidelijk worden wat de werkelijke besparing is bij het toepassen van vraaggestuurde ventilatie.

Achtergrond ventilatie

1

1.1 Achtergrond Ventilatie

Door o.a. mensen wordt de lucht verontreinigd met geurstoffen, ziektekiemen, allergenen, fijnstoffen en ook door verontreiniging via bouwstoffen. Dit wordt bevorderd als het aantal personen per m³ lucht-volume relatief hoog is. Mogelijke klachten zijn: Infectieziekten, astma, eczeem, onaangename geuren, slijmvlies- en huidklachten, hoofdpijn en moeheid (*Sick Building Syndrome*). Deze klachten worden genoemd in *Toetswaarden voor ventilatie in scholen en kindercentra* (Duijm, 2006). Laatstgenoemde zijn de klachten op de gezondheid, echter heeft het ook een negatief effect op de leerprestaties en het ziekteverzuim. Dit laatste wordt behandeld in de paragraaf effect op leerprestaties.

1.1.1 Achtergrond CO₂ concentratie

Door het *Programma van Eisen Frisse Scholen* wordt er uitgegaan van een CO₂-concentratie van 400 ppm als buitenconcentratie. In een onderzoek naar het binnenklimaat in scholen (Versteeg, 2007) wordt vermeld dat er uit verschillende onderzoeken is gekomen dat er een relatie bestaat tussen de CO₂-concentratie en het aantal bacteriën in de lucht. Volgens dit onderzoek bestaan er aanwijzingen waaruit blijkt dat de kans op infectie-ziekten van de luchtwegen afneemt, wanneer er met een groter debiet wordt geventileerd dan er gesteld wordt in bestaande normen. De GGD heeft daarom toetswaarden opgesteld voor de ventilatie in scholen en kindercentra. Deze waarden zijn afkomstig uit *Toetswaarden voor ventilatie in schoolgebouwen en kindercentra* (Duijm, 2006). Deze advieswaarden zijn in tabel 1.1 en 1.2 af te lezen.

1.1.2. Totstandkoming van toetswaarden

Door het eerder genoemde onderzoek (Duijm, 2006) zijn door de vakgroep van binnenmilieu en gezondheid van GGD Nederland, de toetswaarden bepaald voor ventilatie in scholen en kindercentra (dit is bedoeld voor een herziening van de Richtlijn Ventilatie Scholen).

Deze waarden zijn tot stand gekomen door te kijken naar de verwachting van de CO₂-concentratie in theoretisch opzicht en de vergelijking hiermee met wetenschappelijke onderzoeken die in het verleden zijn gedaan. Een tabel van vergelijkingen en tussen de gemeten en de theoretisch verwachte CO₂-concentratie is te zien op de volgende pagina.

Theoretisch heeft de CO₂-concentratie een relatie met de ventilatiestroom per persoon. Dit is te herleiden uit de formule in afbeelding 1.3, volgens (Woodcock, 2000). Deze formule is te gebruiken wanneer er sprake is van een goede menging van lucht binnen de betreffende ruimte.

ventilatieklasse	CO ₂ -gehalte binnen-buiten 98-percentiel	verse-luchtstroom per persoon	
		liter per sec.	m ³ per uur
0. zeer goed	< 250	> 25	> 90
I. goed	250 - 400	15 – 25	54 – 90
II. matig	400 - 600	10 - 15	36 - 54
III. onvoldoende	600 - 1000	6 - 10	22 - 36
IV. slecht	> 1000	< 6	< 22

Tabel 1.1: Gezondheidskundige toetswaarden voor ventilatie.
[Bron: Duijm, 2006]

Δ[CO ₂]		geschatte ventilatie	
in ppm		in m ³ /h per persoon	in l/s per persoon
250		40	11
400		25	7
670		15	4
800		12,5	3,5
1000		10	3
1430		7	2
2000		5	1,4

Tabel 1.2: Theoretisch verband tussen CO₂ en ventilatie.
[Bron: Duijm, 2006]

$$\Delta[\text{CO}_2] = N / Q$$

waarin $\Delta[\text{CO}_2] = [\text{CO}_2]_{\text{binnen}} - [\text{CO}_2]_{\text{buiten}}$ (in m³)

N = productie van CO₂ per persoon (in m³/h)

Q = luchttoevoer = luchtafvoer per persoon (in m³/h)

Afbeelding 1.3: Theoretische formule CO₂-concentratie.
[Bron: Duijm, 2006]

1.1. Achtergrond ventilatie

Naar aanleiding van onderzoeken waarbij de CO₂-concentratie en de volumestroom gemeten zijn is dit vergeleken met de theoretisch verwachte CO₂-concentratie. Bij deze onderzoeken is er gemeten in basisscholen, middelbare scholen en kinderdagverblijven. Deze vergelijkingen tussen de verwachte theoretische CO₂-concentratie en de gemeten CO₂-concentratie zijn te vinden in tabel 1.4. De linker kolom omschrijft de achternaam van de auteurs van de onderzoeken in het verleden en het jaartal.

Zoals te zien is wijkt de verwachte CO₂-concentratie erg af, deze ligt in de meeste gevallen te laag. Mogelijke oorzaken genoemd in het onderzoek van Duijm hiervan zijn:

- In sommige onderzoeken werd de CO₂-concentratie en ventilatiestroom niet gelijktijdig gemeten.
- In sommige onderzoeken is gemeten aan het einde van een les.
- De menging van de lucht is niet optimaal.
- Bij een erg lage ventilatiestroom treedt er meer infiltratie-gebonden ventilatie op bij een slechte kierdichting, volgens (Joosten, 2005).
- De invloed van te openen deuren en ramen.
- Kinderen die meer CO₂ produceren dan aangenomen.

Deze metingen en andere beschikbare wetenschappelijke gegevens zijn beoordeeld door een expert-groep en zo zijn de toetswaarden in tabel 1.1 tot stand gekomen.

Opmerking 1.1: Genoemde waarden in het onderzoek van Duijm voor CO₂-productie zijn niet aangehouden voor dit onderzoek. Tevens is er niet standaard gerekend met de ventilatiedebieten die genoemd worden om een bepaalde CO₂-concentratie te halen. Hiervan is aan de hand van ingevoerde ruimten zelf bepaald welke debieten er per persoon benodigd zouden zijn.

Tabel 4: vergelijking tussen gemeten [CO₂], Δ[CO₂] en verwachte Δ[CO₂].

	ventilatie in l/s pp	[CO ₂] gemiddeld	[CO ₂] bovenwaarde	Δ[CO ₂] gemiddeld	Δ[CO ₂] bovenwaarde	verwacht Δ[CO ₂] o.b.v. ventilatie
Smedje 2000	1.3		1050			2100
Van Bruchem 2005	1.7	1230				
Joosten 2005	1.9	1270 (P50)	1780 (P95)			
Bartlett 2004	(2)	1080				1400
Van Bruchem 2006	2.3	1940				
Joosten 2005	3.1	1500 (P50)	2130 (P95)	1000 (P50)	1630 (P95)	
Van Bruchem 2005	3.4	1270				
Smedje 2000	3.9		930			700
Smedje 2000	4.4		1020			630
Joosten 2005	4.7	890 (P50)	1120 (P95)			
Wargocki 2005	4.7	1050	1220	650	820	590
Joosten 2005	4.8	1180 (P50)	2130 (P95)			
Van Bruchem 2005	4.9	1220				
Wargocki 2005	5.7	950	1140	550	740	440
Vna Bruchem 2005	6.1	1260				
Smedje 1996	6.9		910			400
Noy 1998	6.9		940-1070			400
Bartlett 2004	(8)	850				340
Wargocki 2005	9.9	740	830	340	430	280
Smedje 2000	11.5		780			240
Joosten 2005	12.4	1250 (P50)	1880 (P95)			

Tabel 1.4: Vergelijking onderzoeken tussen theoretisch CO₂ en ventilatie.
[Bron: Duijm, 2006]

1.2 Programma van Eisen Frisse Scholen 2012

Het *Programma van Eisen Frisse Scholen* is een leidraad voor het bouwen en renoveren van scholen. Deze eisen hebben betrekking op de energiezuinigheid en de kwaliteit van het binnenmilieu. Dit Programma van Eisen is tot stand gekomen in opdracht van Agentschap NL en het Rijk. Deze eisen zijn bedoeld voor het basisonderwijs en het voortgezet onderwijs. In dit onderzoek zal er gekeken worden naar het basis- onderwijs.

Aan de hand van toetsingsinstrumenten, die vrij toegankelijk zijn voor opdrachtgevers en ontwerpers kan overzichtelijk bepaald worden wat de eisen zijn om vervolgens zelf hierbij aan te geven of er aan wordt voldaan. Er is sprake van drie klassen, respectievelijk A, B en C. Klasse C is daarbij de laagste klasse en A de hoogste. Elk van deze klassen zijn echter aanvullende eisen op het Bouwbesluit 2012, en zijn dus hogere eisen dan er gesteld worden in het Bouwbesluit 2012. Voor dit onderzoek zijn de onderdelen energiezuinige ventilatie, regeling ventilatie en ventilatiecapaciteit deels van invloed. Deze worden in dit paragraaf dan ook behandeld.

1.2.1. Energiezuinige ventilatie

Bij het onderdeel energiezuinige ventilatie worden per klasse de eisen gesteld, te zien in afbeelding 1.6. Bij eigenlijk alle moderne scholen wordt nu gebruik gemaakt van gebalanceerde ventilatie, zo ook in het schoolgebouw dat gebruikt wordt als case-studie. Voor dit onderzoek heeft dit onderdeel niet geen invloed.

1.2.2. Regeling ventilatie

Bij het onderdeel regeling ventilatie worden per klasse de eisen gesteld, zoals te zien in afbeelding 1.7. In de klassen wordt gebruik gemaakt van een tijdsafhankelijke of CO₂-gestuurde ventilatieregeling, oftewel vraaggestuurd. Voor dit onderzoek wordt een persoonsafhankelijke regeling onderzocht. Klasse A en B vallen onder een vraaggestuurd systeem, bij klasse B is er alleen een regeling afhankelijk van het gebruik. Hierbij is er sprake van een voorgeprogrammeerde regeling waarbij ingesteld is hoeveel lucht er geventileerd moet worden op welk tijdstip, dit is dus geen vraaggestuurde ventilatie.



Afbeelding 1.5: Een fris schoollokaal

Energiezuinige ventilatie

KLASSE C	KLASSE B	KLASSE A
Bij gebalanceerde ventilatie dient warmte terugwinning (wtw) met een rendement van minimaal 60% toegepast te worden.	Bij gebalanceerde ventilatie dient warmte terugwinning (wtw) met een rendement van minimaal 75% toegepast te worden.	Bij gebalanceerde ventilatie dient warmte terugwinning (wtw) met een rendement van minimaal 90% toegepast te worden.
Toelichting:	Toelichting:	Toelichting:
Deze eis geldt alleen bij een ventilatiesysteem met mechanische toevoer.	Deze eis geldt alleen bij een ventilatiesysteem met mechanische toevoer.	Deze eis geldt alleen bij een ventilatiesysteem met mechanische toevoer.

Afbeelding 1.6: Eisen energiezuinige ventilatie
[Bron: Programma van Eisen Frisse Scholen 2012]

Regeling ventilatie

KLASSE C	KLASSE B	KLASSE A
De ventilatie is voorzien van een regeling afhankelijk van het gebruik (bijv. tijd afhanke-lijk aan en uitschakelen).	De ventilatie is vraaggestuurd (tijdafhankelijk met verschillende standen of CO₂-gestuurd).	Er wordt volledige variabel volumeventilatie toegepast met traploos regelbare gelijk-stroomventilatoren. De regeling is CO₂-gestuurd.
Toelichting:	Toelichting:	Toelichting:
Deze eis geldt zowel voor ventilatiesystemen met mechanische als natuurlijke toevoer.	Deze eis geldt zowel voor ventilatiesystemen met mechanische als natuurlijke toevoer.	- Deze eis geldt zowel voor ventilatiesystemen met mechanische als natuurlijke toevoer. - Variabel volume is een systeem waarbij de temperatuur van een ruimte wordt geregeld door meer of minder gekoelde of verwarmde lucht toe te voeren.

Afbeelding 1.7: Eisen regeling ventilatie
[Bron: Programma van Eisen Frisse Scholen 2012]

1.2. Programma van Eisen Frisse Scholen 2012

1.2.3. Ventilatiecapaciteit

Bij het onderdeel ventilatiecapaciteit worden de onderstaande eisen gesteld, te zien in afbeelding 1.8. Voor klasse A, B en C geldt respectievelijk dat er een maximaal aantal ppm van 800, 950 en 1200 mag zijn. Het beschrijft hierbij het aantal parts per million. Dit betekent dat er bij klasse A, 800 CO₂-moleculen aanwezig mogen zijn per miljoen moleculen.

Om ervoor te zorgen dat dit maximaal aantal ppm niet wordt overschreden (en dus wél de eis behaald), wordt er respectievelijk bij klasse A, B en C een ventilatiecapaciteit van 12,0 dm³/s, 8,5 dm³/s en 6,0 dm³/s. Voor klasse C geldt dat dit een lagere ventilatie-eis heeft dan Bouwbesluit 2012. Wanneer er aan deze ventilatiecapaciteiten voldaan wordt, zou volgens het Programma van Eisen Frisse scholen in theorie het aantal ppm CO₂-moleculen onder de gestelde eisen terechtkomen. De keuze waarom CO₂ als een goede indicator geldt voor de kwaliteit van de binnenlucht komt door dat bij het uitademen van CO₂ a.d.h.v. het soort activiteiteniveau (metabolisme) en de productie van geurstoffen CO₂ vrijkomt. De CO₂-concentratie van de buitenlucht varieert van ca. 350 ppm in een landelijke omgeving tot ca. 400 ppm in een stedelijke omgeving.

In leslokalen wordt ervan uitgegaan door het Programma van Eisen Frisse scholen 2012 dat er minimaal 30 leerlingen en één docent in een lokaal aanwezig zijn (genoemd in het afbeelding 1.8). Aan de hand van het aantal leerlingen en docenten is de ventilatiecapaciteit per ruimte te bepalen.

Ventilatiecapaciteit

KLASSE C	KLASSE B	KLASSE A
De CO₂-concentratie in groepsruimten (in de ademzone) is tijdens gebruikstijd maximaal 1.200 ppm (parts per million).	De CO₂-concentratie in groepsruimten (in de ademzone) is tijdens gebruikstijd maximaal 950 ppm.	De CO₂-concentratie in groepsruimten (in de ademzone) is tijdens gebruikstijd maximaal 800 ppm.
Toelichting:	Toelichting:	Toelichting:
- De Klasse C-eis is beneden de wettelijke eis voor nieuwbouw (Bouwbesluit 2012) en is daarom alleen van toepassing bij bestaande bouw. - In het reguliere onderwijs dient uitgegaan te worden van minimaal 30 leerlingen en 1 docent per groepsruimte. Van een afwijkende bezetting kan worden uitgegaan indien die bezetting voorafgaand aan de bepaling van de ventilatiecapaciteit is afgesproken met betrokken partijen en formeel is vastgelegd (bijv. in het specifieke PVE van de school). - De hoeveelheid luchtverversing dient te worden bepaald conform de bepalingen uit de norm NEN-EN 13779. Om aan de Klasse C-eis te voldoen is normaliter een ventilatiecapaciteit vereist van minimaal 6 dm³/s (21,6 m³/uur) per persoon. - Bij de eis t.a.v. de CO₂-concentratie is uitgegaan van een CO₂-buitenconcentratie van 400 ppm. - De ventilatielucht wordt in de verblijfsruimten zó toegevoerd en afgevoerd, dat een goede doorspoeling van de ruimte mogelijk is (hoge ventilatie-effectiviteit). - De voorzieningen voor (natuurlijke) luchttoevoer zijn voor iedere ruimte afzonderlijk en eenvoudig door aanwezige volwassenen te bedienen (op ca. 1 meter hoogte).	Om aan de Klasse B-eis te voldoen is normaliter een ventilatiecapaciteit vereist van minimaal 8,5 dm³/s (30,6 m³/uur) per persoon.	Om aan de Klasse A-eis te voldoen is normaliter een ventilatiecapaciteit vereist van minimaal 12 dm³/s (43,2 m³/uur) per persoon.

Afbeelding 1.8: Eisen ventilatiecapaciteit
[Bron: Programma van Eisen Frisse Scholen 2012]

1.3. Ventilatie-eisen

1.3.1. Relatie Frisse Scholen met Bouwbesluit 2012

Er staat letterlijk in Bouwbesluit 2012: “Voor de grenswaarden voor niet tot bewoning bestemde gebouwen is voor nieuwbouw uitgegaan van een voor de desbetreffende activiteiten acceptabel geachte toename van het koolzuurgehalte, uitgaande van een nominaal gebruik van die ruimten (een CO₂-productie van gemiddeld 20 dm³/uur per persoon) en een CO₂-concentratie in de toegevoerde lucht van 330 ppm. Hierbij is uitgegaan van:

- Een CO₂-concentratie ≤ 800 ppm voor overnachten (in evenwichtssituatie $q_v \geq 11,91 \text{ dm}^3/\text{s}$ per persoon);
- Een CO₂-concentratie ≤ 1200 ppm voor langdurig verblijf, zonder overnachten (in evenwichtssituatie $q_v \geq 6,42 \text{ dm}^3/\text{s}$ per persoon);
- Een CO₂-concentratie ≤ 1800 ppm voor een situatie waarbij het merendeel van de mensen kort verblijft (in evenwichtssituatie $q_v \geq 3,80 \text{ dm}^3/\text{s}$ per persoon).

Voor een sportfunctie is uitgegaan van een hogere CO₂-productie van 33 dm³/uur per persoon, terwijl voor een kinderdagverblijf van een lagere CO₂-productie bij slapen van 10 dm³/s per persoon is uitgegaan (bij het spelen is vanwege het verhoogde activiteitsniveau van de kinderen van een CO₂-productie van 20 dm³/s per persoon uitgegaan)."

Opvallend is hierbij dat het Bouwbesluit 2012 uit gaat van een buitenconcentratie van 330 ppm, terwijl dit in geen enkel onderzoek aangehouden wordt. Dit is een concentratie die in een stedelijk gebied aannemelijk nooit zal voorkomen, in enkele gevallen misschien in een landelijk gebied.

1.3.2. Relatie Frisse Scholen met Bouwbesluit 1992/2003

In Bouwbesluit 1992 en 2003 is de ventilatiecapaciteit gekoppeld aan bezettingsklassen. In Bouwbesluit 2012 wordt dit niet meer gebruikt doordat de grote marges qua ventilatiecapaciteit per persoon in bezettingsklassen in veel gevallen te laag of te hoog werd. De ventilatiecapaciteit per m² werd toen bepaald aan de hand van een ventilatiecapaciteit p.p. maal (2/3) van het maximaal aantal personen van de bezettingsgraadklassen. Als er werd teruggerekend naar ventilatiecapaciteit per persoon leverde dit uiteenlopende capaciteiten op, doordat de bezettingsgraadklassen (tabel 1.9) relatief grote marges hebben. Dit had als effect dat er vaak een te hoge of te lage ventilatiecapaciteit verplicht was. Wanneer er één persoon meer dan de bezettingsgraadklasse aanwezig was, moest er geventileerd worden volgens een bezettingsgraadklasse hoger.

In Bouwbesluit 2003 was de ventilatie-eis (tabel 1.10) lager dan Bouwbesluit 2012, in 2008 is het Programma van Eisen 'Frisse Scholen' verschenen. Naar alle waarschijnlijkheid heeft dit ook invloed gehad om de ventilatie-eisen te verhogen. Dit betekent dat het verschil tussen Bouwbesluit 2003 groter was en het Programma van Eisen Frisse Scholen 2012, dan dit verschil tussen Bouwbesluit 2012.

klasse	bezettingsgraad	
	in m² gebruiksoppervlakte per persoon	in m² vloeroppervlakte aan verblijfsgebied per persoon
B1	$> 0,8 - \leq 2$	$> 0,5 - \leq 1,3$
B2	$> 2 - \leq 5$	$> 1,3 - \leq 3,3$
B3	$> 5 - \leq 12$	$> 3,3 - \leq 8$
B4	$> 12 - \leq 30$	$> 8 - \leq 20$
B5	> 30	> 20

Tabel 1.9: Bezettingsgraadklassen
[Bron: Bouwbesluit 1992/2003]

gebruiksfunctie			leden van toepassing							grenswaarde													
			aanwezigheid		capaciteit					capaciteit verblijfsgebied				capaciteit verblijfsruimte									
artikel			3.47		3.48					3.48													
lid			1	2	1	2	3	4	5	6	7	1				2							
												[dm³/s per m²]		[dm³/s]	[dm³/s per m²]		[dm³/s]						
8 Onderwijsfunctie			1	2	1	2	3	4	-	6	-	15	6	2,4	n.t.	n.t.	7	12	4,8	1,9	n.t.	n.t.	7
1 ruimte voor activiteiten die de binnenlucht verontreinigen												8,8	3,5	1,4	n.t.	n.t.	7	7	2,8	1,1	n.t.	n.t.	7
2 andere ruimte																							

Tabel 1.10: Ventilatie-eisen Bouwbesluit 1992/2003
[Bron: Bouwbesluit 2003]

1.3. Ventilatie-eisen

1.3.3. Vergelijking ventilatie-eisen Bouwbesluit en Frisse Scholen

Wanneer er gekeken wordt naar de ventilatie-eisen van het Bouwbesluit zijn deze door de jaren heen veranderd. In Bouwbesluit 2003 zijn de eisen zoals eerder genoemd omgerekend per persoon nogal uiteenlopend qua waarden. In Bouwbesluit 2012 zijn de bezettingsgraadklassen opgeheven doordat het in de praktijk te ingewikkeld was en doordat de waarden zo uiteen liepen. Daardoor is er een ventilatie-eis per persoon opgesteld (tabel 1.11).

Als er wordt gekeken naar de ventilatie-eisen van de *Programma's van Eisen Frisse Scholen* (2008, 2010 en 2012) zijn de ventilatie-eisen ook veranderd. Er werd in 2008 (tabel 1.12) uitgegaan van een lagere bezetting van 25 personen dan bij 2010 en 30 personen bij 2012. Wanneer dit omgerekend wordt per persoon wordt er een relatief hogere ventilatiecapaciteit verkregen, dit komt door de lagere bezetting (2,24 m² p.p.). Deze eis is niet gebonden aan een aantal personen, dus wanneer er meer personen aanwezig zijn in een lokaal wordt er nog steeds voldaan aan de eis.

Bij de versies 2010 (tabel 1.13) en 2012 (tabel 1.14) is de ventilatiecapaciteit wél gebonden aan het aantal personen. Een capaciteit per persoon wordt vermeld om theoretisch aan het aantal ppm CO₂ te voldoen. Er is te zien dat deze gestelde ventilatiecapaciteit per persoon in 2012 weer omhoog is gesteld. Naar verwachting is dit gedaan doordat in de praktijk bleek dat het ppm CO₂ alsnog te hoog was. Ook is in 2010 gesteld dat er in 95 % van de gebruikstijd niet boven het gestelde ppm CO₂ komt, in 2012 geldt dit voor 100 % van de gebruikstijd.

In Frisse Scholen 2008 wordt de eis genoemd in m³/h per m² vloeroppervlak, bij 2010 in m³/h per persoon, bij 2012 is dat in dm³/s per persoon. In de tabellen hiernaast zijn voor alle eisen de ventilatiedebieten omgerekend naar m² of per persoon, bepaald aan de hand van de uitgangspunten die er gesteld worden in het Programma van Eisen. Voor Frisse Scholen 2010 en 2012 worden er geen uitgangspunten voor de vloeroppervlakte van een lokaal genoemd, deze kunnen dus niet worden omgerekend.

Over het algemeen is te zeggen dat de ventilatie-eisen hoger zijn geworden. Bij elk Programma van Eisen is de achterliggende gedachte dat er een maximale CO₂-concentratie mag zijn. Deze zijn bijna bij elk Programma van Eisen hetzelfde, echter zijn de ventilatie-eisen verhoogd om dit te kunnen halen. Er wordt aangenomen dat in de praktijk toch in veel situaties met de lagere ventilatie-eisen de maximale CO₂-concentratie toch overschreden werd. In het eerste *Programma van Eisen Frisse Scholen* werd er net zoals Bouwbesluit 1992 en 2003 gerekend met een waarde per m². Indien er echter meer personen zich in een lokaal bevonden werd er in dezelfde mate geventileerd als het geval wanneer er minder personen aanwezig zijn. Dit bleek in de praktijk niet handig, dus moet van tevoren vastgesteld worden per ruimte hoeveel personen daar komen en aan de hand daarvan het ventilatiedebiet bepaald worden. Op deze manier wordt ervoor gezorgd dat elk persoon de juiste hoeveelheid lucht krijgt, in alle bezettingsmogelijkheden in een ruimte.

Ventilatie	Bouwbesluit 1992	Bouwbesluit 2003	Bouwbesluit 2012
Per m ² :			
B1	8,80 dm ³ /s / m ²	8,80 dm ³ /s / m ²	/
B2	3,50 dm ³ /s / m ²	3,50 dm ³ /s / m ²	/
B3	1,40 dm ³ /s / m ²	1,40 dm ³ /s / m ²	/
Per persoon:			
B1	8,80 - 11,40 dm ³ /s p.p.	8,80 - 11,40 dm ³ /s p.p.	8,5 dm ³ /s p.p.
B2	4,55 - 11,55 dm ³ /s p.p.	4,55 - 11,55 dm ³ /s p.p.	
B3	4,62 - 9,00 dm ³ /s p.p.	4,62 - 9,00 dm ³ /s p.p.	

Tabel 1.11: Overeenkomsten Bouwbesluit 1992, 2003 en 2012

Frisse scholen 2008			
Klasse C (1200 ppm)	12,50 m ³ /h / m ²	3,47 dm ³ /s / m ²	7,77 dm ³ /s p.p.
Klasse B (1000 ppm)	17,50 m ³ /h / m ²	4,86 dm ³ /s / m ²	10,89 dm ³ /s p.p.
Klasse A (800 ppm)	22,50 m ³ /h / m ²	6,25 dm ³ /s / m ²	14,00 dm ³ /s p.p.
Uitgaande van*:		25 leerlingen	56 m ²

* Gesteld in PvE.

Tabel 1.12: Ventilatie-eisen Frisse Scholen 2008 (omgerekend naar p.p.)

Frisse scholen 2010		
Klasse C (1200 ppm)	20,00 m ³ /h p.p.	5,55 dm ³ /s p.p.
Klasse B (1000 ppm)	26,00 m ³ /h p.p.	7,22 dm ³ /s p.p.
Klasse A (800 ppm)	40,00 m ³ /h p.p.	11,11 dm ³ /s p.p.
Uitgaande van**:		30 leerlingen + 1 docent

** : Oppervlakte niet bekend

Tabel 1.13: Ventilatie-eisen Frisse Scholen 2010

Frisse scholen 2012		
Klasse C (1200 ppm)	21,60 m ³ /h p.p.	6,00 dm ³ /s p.p.
Klasse B (950 ppm)	30,60 m ³ /h p.p.	8,50 dm ³ /s p.p.
Klasse A (800 ppm)	43,20 m ³ /h p.p.	12,00 dm ³ /s p.p.
Uitgaande van**:		30 leerlingen + 1 docent

** : Oppervlakte niet bekend

Tabel 1.14: Ventilatie-eisen Frisse Scholen 2012

1.4. Effect ventilatie op leerprestaties

1.4.1. Leerprestaties bij CO₂-gestuurde ventilatie

In het TNO rapport *Het effect van ventilatie op de cognitieve leerprestaties in basisscholen* (de Gids, 2007) is onderzocht wat de invloed is van ventilatie op de leerprestaties in basisscholen. Hierbij is gekeken naar vraaggestuurde ventilatie op basis van CO₂-concentraties. De prestaties van deze systemen zijn gemeten en vervolgens is bekeken of de invloed van vraaggestuurde ventilatie een positieve invloed heeft op de leerprestaties in vergelijking met een standaard ventilatiesysteem. In het geval van de vraaggestuurde ventilatie wordt de CO₂-concentratie op peil gehouden en bij de standaard situatie loopt de CO₂-concentratie op doordat er met een lager debiet continu wordt geventileerd. Dit onderzoek is gehouden onder leerlingen van groep 7 en 8 van vier basisscholen.

Uit dit onderzoek blijkt dat leerlingen minder taal- en rekenfouten maken bij vraaggestuurde ventilatie, dan bij een variant waar de CO₂-concentratie oploopt. Bij dit onderzoek werd er bij de situatie met vraaggestuurde ventilatie, de CO₂-concentratie op ongeveer 800 ppm gehouden. Het ventilatiedebiet is wat daarbij hoort is hierbij onbekend.

Soort ventilatie	Standaard	Vraaggestuurde ventilatie
Taalfouten	5,46	5,34
Rekenfouten	2,44	1,98

Hieruit blijkt dat de invloed van vraaggestuurde ventilatie een positief effect heeft op het cognitief leervermogen.

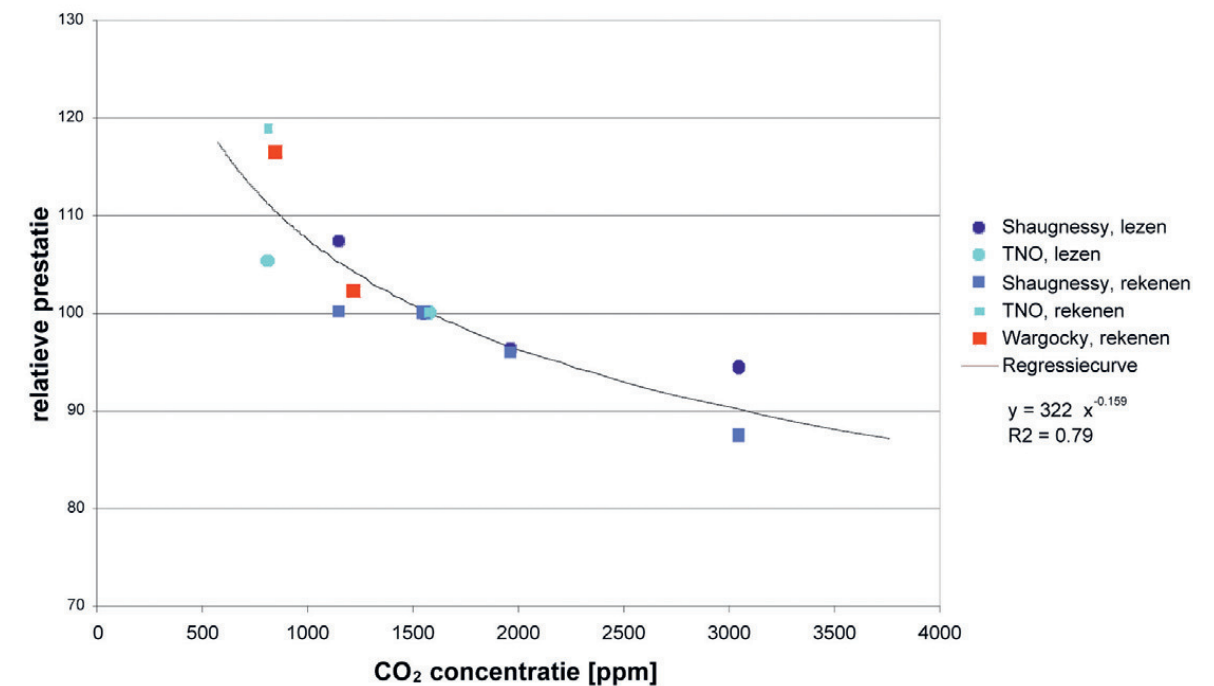
1.4.2. Verhouding leerprestaties en CO₂-concentratie

Als vervolg op 1.4.1 is er ook in andere landen onderzoek naar gedaan, in Denemarken is een soortgelijk onderzoek gehouden door Wargocki (2005). In de Verenigde Staten is er in 2006 onderzoek naar gedaan door Shaugnessy (2006). In het artikel *Prestatie-eisen ventilatie in klaslokalen* (Jacobs, 2007) is een vergelijking gemaakt tussen deze drie onderzoeken. In de onderzoeken van Wargocki, Shaugnessy en TNO zijn de leerprestaties getest bij verschillende CO₂-concentraties. Deze uitkomsten van de leerprestaties bij de gemeten CO₂-concentratie zijn te zien in grafiek 1.15.

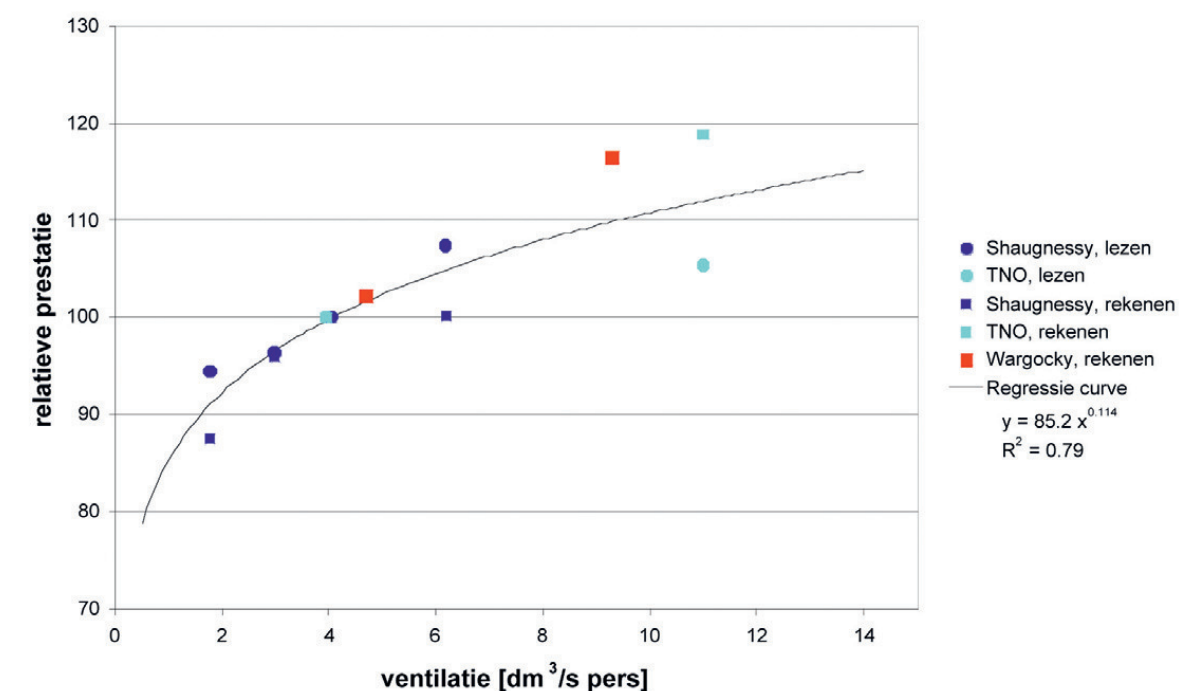
De vorige grafiek met de CO₂-concentratie is in het artikel van Jacobs, omgezet naar ventilatiecapaciteit per persoon. Daarbij is in dit artikel een CO₂-productie van 17 dm³/h per leerling aangenomen. De reden dat bij deze omzetting de lijn uit grafiek 1.15 niet gespiegeld is, komt doordat CO₂ niet op dezelfde manier afneemt wanneer er meer wordt geventileerd. Wanneer er tweemaal zoveel wordt geventileerd, zorgt dit niet voor een afname van 50 %. Wanneer dit letterlijk gespiegeld zou zijn, zou dit zeggen dat dit wél zo is (wat dus niet zo is). Daarom komt bij omrekening grafiek 1.16 er uit.

Als conclusie kan worden getrokken dat de ventilatiecapaciteit een grote invloed heeft op het de leerprestaties. Bij een CO₂-concentratie van minder dan 800 ppm zijn de leerprestaties het hoogst. Nog niet bekend is wat de grens is met betrekking tot de maximale ventilatiecapaciteit waar dit geen invloed meer heeft op de leerprestaties.

Opmerking 1.4.1: Bij grafiek 1.16 betekent het niet dat als er door CO₂-sturing op een moment niet wordt geventileerd, dat de leerprestaties omlaag gaan. Dit zijn de debieten die benodigd zijn om de CO₂ onder de grenzen van grafiek 1.15 te houden bij een volledige bezetting. De leerprestaties zijn gekoppeld aan de aanwezige CO₂-concentratie, en niet aan het ventilatiedebiet wat op een bepaald moment wordt gebruikt.



Grafiek 1.15: Verband tussen CO₂ en leerprestaties.
[Bron: Jacobs, 2007]



Grafiek 1.16: Verband ventilatie met leerprestaties
[Bron: Jacobs, 2007]

1.5. Effect van ventilatie op gezondheid

1.5.1. Gezondheid

Zoals eerder genoemd zijn de effecten van slechte luchtkwaliteit en dus slechte ventilatie het volgende:

- Last van de luchtwegen.
- Irritatie aan de ogen, neus en keel.
- Het vaker optreden van allergische reacties.
- Hoofdpijn.
- Concentratieproblemen.
- Huidirritaties.
- Hinder van geuren.
- *Sick Building Syndrome* (kenmerken zie afbeelding 1.17).

Op plaatsen waar veel mensen samenkomen is er een verhoogd risico op besmetting van *bio-aërosol*, dat zijn bacteriën en virussen die zich door de lucht verplaatsen.

Uit onderzoek (Li, 2007) blijkt dat er een verband zit tussen de verspreiding van infectieziekten en de mate waarin er geventileerd wordt, dit geldt voor alle gebouwen. Nog niet duidelijk is wat de minimum ventilatiecapaciteiten zijn om de kans op infectieziekten sterk te verminderen, wel is aangetoond (Milton en Rudnick, 2003) dat dit afhankelijk is van het type ziekteverwekker.

1.5.2. Kort ziekteverzuim

Er is op het gebied van basisscholen onderzoek geweest (Shendell et al., 2004) of er een verband bestaat tussen de mate waarin er geventileerd wordt en het ziekteverzuim. Hieruit blijkt dat er zeker een verband is. Als voorbeeld wordt gegeven dat wanneer er een vermindering is van een CO_2 -concentratie van 1000 ppm, het ziekteverzuim afneemt met zo'n 10 - 20 %. In het geval met kantoorgebouwen is het verband tussen kort ziekteverzuim en de mate waarin geventileerd wordt te zien in grafiek 1.18 (Milton en Rudnick, 2003). Aan de linkeras is niet het ziekteverzuim als percentage van het totaal aantal personen te zien. Dit is het percentage van het totaal aantal personen met een kort ziekteverzuim. Bij 1,0 geldt dus dat dit 100% van de mensen die met ziekteverzuim zijn als er geen ventilatie is. Hier is te zien dat er bij het verhogen van de ventilatiehoeveelheid, er minder ziekteverzuim is. Tot een ventilatiedebiet van $30 \text{ dm}^3/\text{s}$ per persoon heeft dit veel effect (vermindering van 65%), echter boven dit debiet neemt het effect af. Uiteindelijk is het ziekteverzuim niet verder te verminderen dan 90% ten opzichte van het aantal personen wat in een situatie zonder ventilatie met kort ziekteverzuim zijn.

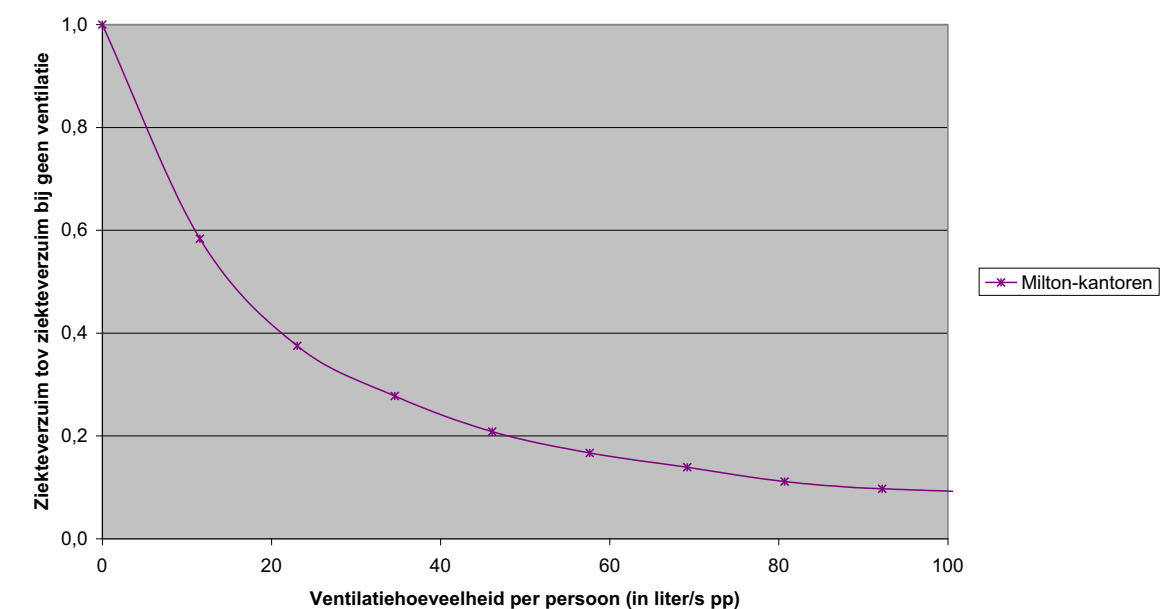
1.5.3. Lang ziekteverzuim

Er is nog niet uit onderzoeken gebleken dat het effect van ventilatie een effect heeft op het lange ziekteverzuim. Waarschijnlijk heeft dit wel een effect, maar is een lang ziekteverzuim niet toe te kennen aan de reden dat er te weinig geventileerd wordt. Dit komt doordat lange ziekteverzuimen incidenteel optreden, aan de hand van bijvoorbeeld een burn-out of letselschade.



Afbeelding 1.17: Kenmerken Sick Building Syndrome

Kort ziekteverzuim als functie van ventilatiehoeveelheid per persoon



Grafiek 1.18: Vermindering kort ziekteverzuim bij grotere ventilatiehoeveelheid
 [Bron: ISSO/REHVA handleiding 901 "Binnenmilieu en productiviteit"]

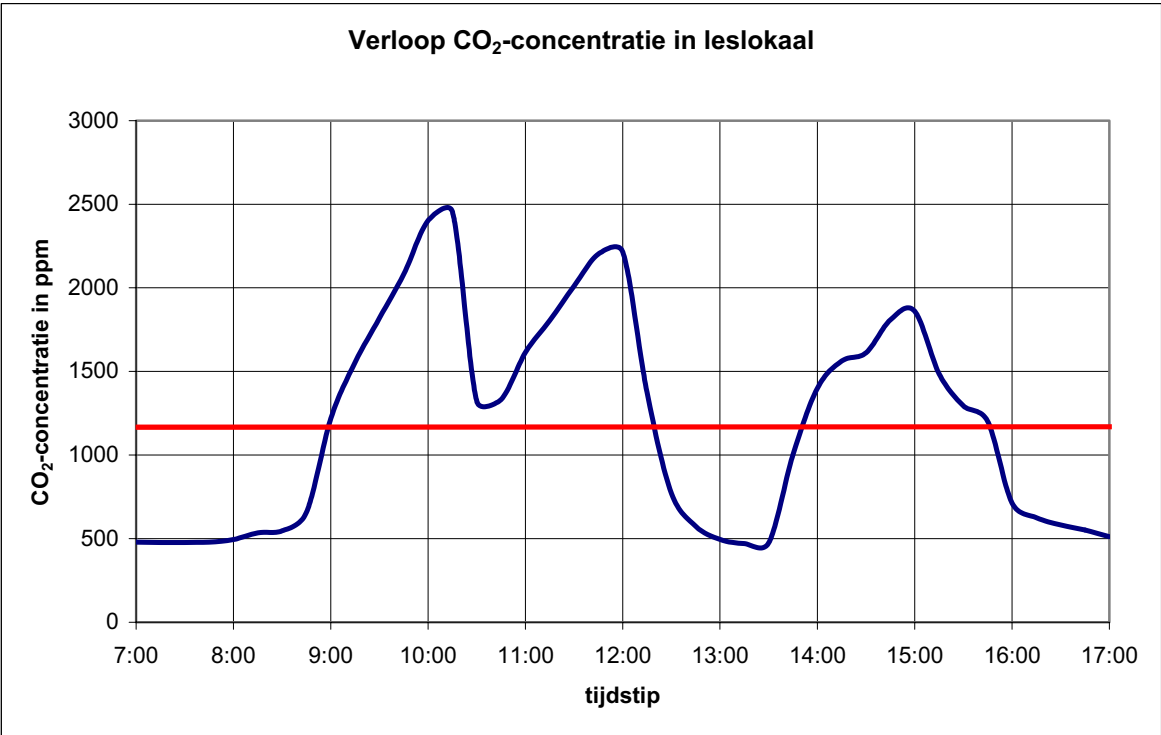
1.6. Praktijkmetingen in schoolgebouwen

Er is onderzoek gedaan naar de kwaliteit van het binnenmilieu in basisscholen (Versteeg, 2007). Dit onderzoek is gehouden onder 120 lokalen, in 60 schoolgebouwen verdeeld over Nederland. Hierbij is gekeken naar o.a. de luchtkwaliteit. Om de luchtkwaliteit te bepalen is de CO₂-concentratie gemeten gedurende een schooldag. Uit metingen komt het karakteristieke verloop van de CO₂-concentratie gedurende een schooldag, zonder vraaggestuurde ventilatie (zie grafiek 1.18). Te zien is dat de CO₂-concentratie oploopt wanneer de leerlingen in het klaslokaal zijn. Rond 10:15 is er een pauze, waardoor de CO₂-concentratie omlaag gaat en om 12:00 een lange pauze waardoor de CO₂-concentratie sterk omlaag gaat. Vervolgens gaat de CO₂-concentratie weer omlaag wanneer de leerlingen vrij zijn.

De rode lijn geeft een CO₂-concentratie van 1200 ppm weer. De grens van 1200 ppm is de bovengrens van wat een matige luchtkwaliteit. Boven de 1200 is de luchtkwaliteit slecht, onder de 1000 ppm is dit een goede luchtkwaliteit.

Dit onderzoek is gehouden onder verschillende lokaaltypen, te zien in tabel 1.19. Er staat bij wat het aantal lokalen zijn die steekproefsgewijs zijn gemeten en hoeveel hiervan ongeveer in Nederland voorkomen.

In dit onderzoek is gebleken dat de CO₂-concentratie in veel gevallen over de 1200 ppm heen gaat, namelijk 88 van de onderzochte leslokalen, dit is gemiddeld 41% van de lestijd het geval. De gemiddelde maximale CO₂-concentratie bedraagt hierbij over alle leslokalen gemiddeld 1811 ppm. Doordat het scholen betreft van alle bouwjaren, voldoet 74 % van de schoolgebouwen aan de wettelijke eisen die gesteld werden toen de scholen gebouwd werden. Voor 62 % van de totaal onderzochte schoolgebouwen zijn de ventilatie-eisen niet hoger dan Bouwbesluit 2003, omdat het merendeel van de schoolgebouwen relatief oud zijn. De CO₂-concentraties die voorkomen per lokaaltypen die onderzocht zijn, zijn te vinden in tabel 1.20.



Grafiek 1.18: Voorbeeld verloop CO₂-concentratie op een schooldag [Bron: Versteeg, 2007]

Indeling klaslokaaltypen

Type	Toevoer	Afvoer	voorkomen in NL (raming LBP)	Voorgenomen aantal leslokalen in steekproef
1	Natuurlijk via klepramen / uitzetramen		40%	30
2	Natuurlijk via ventilatieroosters	natuurlijk	20%	30
3	Natuurlijk via ventilatieroosters	mechanisch	35%	30
4	Mechanisch	mechanisch	5%	30

Tabel 1.19: Getoetste typen klaslokalen [Bron: Versteeg, 2007]

Overzicht gemiddelde en maximale CO₂-concentraties tijdens lestijd

CO ₂ -concentratie	Alle leslokalen (n=120)	Lokaaltype 1 (n=45)	Lokaaltype 2 (n=25)	Lokaaltype 3 (n=32)	Lokaaltype 4 (n=18)
Gemiddeld (P ₅₀)	1164	1176	1298	1188	889
Maximaal (P ₉₅)	1811	1906	1983	1889	1164

Tabel 1.20: Uitkomsten CO₂-concentratie per klastypen [Bron: Versteeg, 2007]

CO₂-gestuurde ventilatie

2

2.1. Ventilatiesystemen

2.1.1. Systemen

Op het gebied van ventilatie is dit onder te verdelen in vier soorten systemen (zie afbeelding 2.1):

Systeem A: Er is sprake van natuurlijke toe- en afvoer.

Systeem B: Er is sprake van natuurlijke toevoer, mechanische afvoer.

Systeem C: Er is sprake van mechanische toevoer, natuurlijke afvoer.

Systeem D: Er is sprake van mechanische toe- en afvoer.

Natuurlijke toe- en afvoer wordt geregeld door middel van ventilatieroosters in de gevel. Doordat de toevoer afhankelijk is van o.a. de wind, is het debiet waarmee dat gebeurt meestal erg verschillend. Mechanische afvoer wordt door roosters verwerkt die in verbinding staan met het ventilatiesysteem door middel van kanalen. Dit wordt vervolgens uitgeblazen naar buiten. Mechanische toevoer zuigt juist lucht aan vanuit buiten.

Buiten deze systemen om is er een verschil tussen decentraal en centraal ventileren. De verschillen tussen decentraal en centraal ventileren wordt hieronder uitgelegd.

2.1.2. Decentrale ventilatie

Indien er sprake is van een decentraal ventilatiesysteem, betekent dat, dat er meerdere ventilatie-units zijn. Elke ventilatie-unit regelt de luchtverwerking van een ruimte of een zone. De ventilatie-units bevinden zich dan ook in de ruimten of zones zelf. Nadeel hiervan is dat de ventilator dichterbij de verblijfsruimte zit en dus voor geluidsoverlast kan zorgen. Vandaar dat er bij decentrale ventilatie meer kans is dat er akoestische voorzieningen toegepast dienen te worden. Voor het kanalenverloop is er de mogelijkheid dat er individuele toe- en afvoerkanalen (die direct aan aan- en afvoerrooster gekoppeld zijn) zijn per ventilatie-unit, of dat de aan- en afvoerkanalen zijn aangesloten op een hoofdkanaal. Dit hoofdkanaal is dan aangesloten op een toe- en afvoerrooster.

2.1.3. Centrale ventilatie

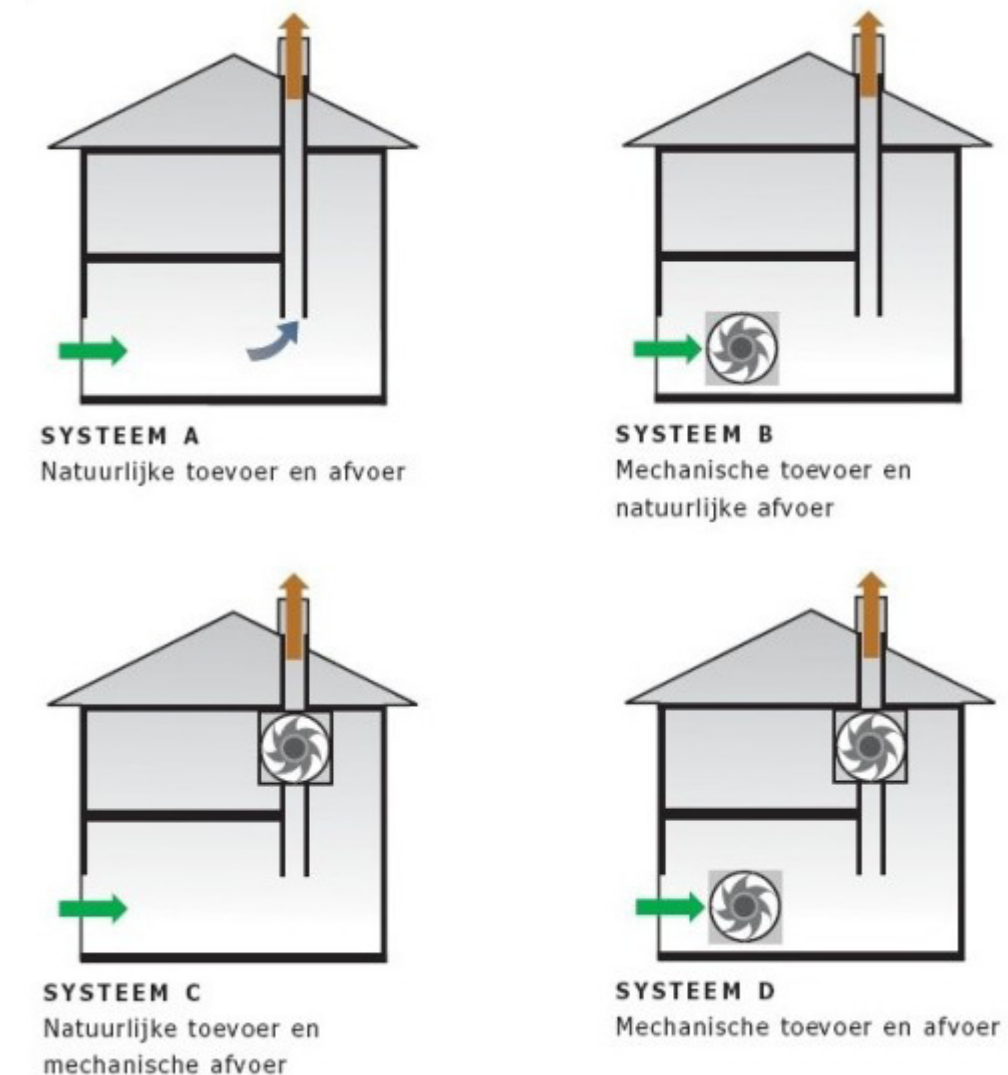
Indien er sprake is van een centraal ventilatiesysteem, betekent dat, dat er één ventilatie-unit is. Deze ventilatie-unit verwerkt dan de lucht voor het gehele gebouw of een zone. De lucht wordt centraal aangezogen en ook weer centraal uitgeblazen.

2.1.4. Benodigdheden CO₂-sturing

Om CO₂-sturing mogelijk te maken zijn de volgende onderdelen benodigd:

- CO₂-sensor/regelaar: Er zit verschil tussen een sensor die alleen het de CO₂-concentratie meet en sensoren die dit meet en vervolgens een ventilator of regelklep aan kan sturen.
- Signaalomvormer: Deze regelt de verschillende debieten, die aangestuurd wordt door de CO₂-sensor/regelaar. De waarden uit de CO₂-sensor/regelaar worden omgezet naar een signaal die het debiet kan aansturen.
- Ventilator: Deze moet geschikt zijn voor aansturing van meerdere standen.

De CO₂-sensor/regelaar is vaak voorzien van een interne signaalomvormer, die gelijk geschikt is voor aansluiting op een ventilatieunit. Voor deze aansluiting moet bij het soort signaal gekeken worden of deze overeenkomt met het signaal waarmee het debiet aangestuurd kan worden.



Afbeelding 2.1: Soorten ventilatiesystemen

2.2. CO₂-gestuurde ventilatie

2.2.1. Decentrale ventilatie (single zone)

Een voorbeeld van een decentrale ventilatie-unit is de Mishubishi LGH-RX5 (afbeelding 2.3). Dit is een mechanische ventilatie-unit die te plaatsen is tussen de kanalen boven de betreffende ruimte die geventileerd dient te worden. Deze unit heeft een ingebouwde standenschakelaar, waardoor het met verschillende debieten kan werken. Ook is deze ventilatie-unit voorzien van een aansluiting met een CO₂-sensor/regelaar op de printplaat, die het signaal zelf kan verwerken en aansturen op de ventilatoren.

In dit geval zijn er weinig extra onderdelen nodig, namelijk alleen de CO₂-sensor/regelaar. Dit heeft ook geen invloed op verandering van de kanalen. In de aula's in het gebouw zijn dezelfde units ook gekoppeld aan een CO₂-sensor/regelaar. Deze hebben in de kanalen zelf geen extra onderdelen zitten. In dit geval geldt dat de debieten softwarematig aangepast kunnen worden aan de vereiste debieten.

Voor andere soorten decentrale ventilatie-systemen is de printplaat waarmee de signalen verwerkt worden niet altijd standaard geschikt voor verwerking van het signaal van de CO₂-sensor/regelaar. Deze hebben dus zoals eerder genoemd een signaalomvormer nodig.

Voor de plaatsing van de CO₂-sensoren is dit het handigst om dit in elk lokaal te bevestigen. Dit doordat in elk lokaal (ook in dit voorbeeld) sprake is van een totaal ander gebruik. Dit komt vooral doordat leerlingen niet aanwezig zijn tijdens gymlessen. Doordat dit meestal op een andere plek gebeurt is dit gedurende een relatief lange periode op de dag. Ook zijn gymlessen per groep nooit op dezelfde tijden.

2.2.2. Plaatsing CO₂-sensoren

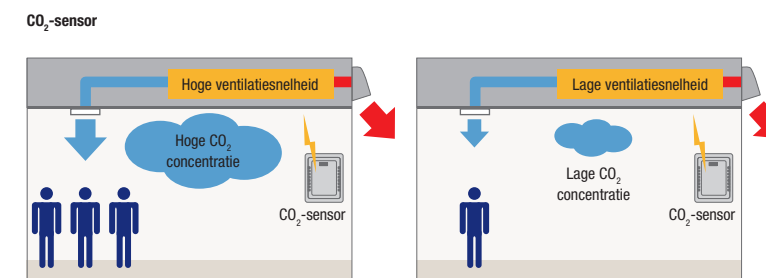
Zoals eerder genoemd wordt het aangeraden om per lokaal een CO₂-sensor te plaatsen (zie afbeelding 2.5 en 2.6), doordat elk lokaal een ander gebruik heeft. Als er per zone gestuurd werd, kan het voorkomen dat één lokaal afwezig is door gym, er in enkele andere lokalen niet meer geventileerd zou worden, terwijl er wel personen aanwezig zijn. In het lokaal dient de CO₂-sensor in elk geval niet nabij te openen ramen of deuren opgehangen te worden. Plaatsing nabij te openen ramen of deuren levert een veel lagere CO₂-concentratie op dan er in werkelijkheid in de rest van het lokaal is.

Er zijn ook CO₂-sensoren die bevestigd kunnen worden in het afvoerkanaal, en daar de CO₂-concentratie meten. Echter levert dit waarden op die doorgaans lager zijn dan de werkelijke concentratie, doordat de CO₂-concentratie in de lucht die verwerkt wordt, niet representatief is voor de rest van de lucht in de ruimte.

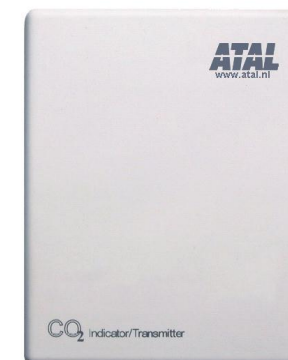
De optimale plaatsing is rond ooghoogte als iemand zit. CO₂ is zwaarder dan lucht en bevindt zich doorgaans aan de onderkant van de ruimten. In elk geval is het niet wenselijk om dit op het plafond te plaatsen, aangezien de concentratie daar lager zal zijn dan onder in de betreffende ruimte.



Afbeelding 2.3: Decentrale ventilatie-unit Mishubishi LGH-RX5



Afbeelding 2.4: Werking sturing via CO₂-sensor



Afbeelding 2.5: Voorbeeld CO₂-sensor

2.2. CO₂-gestuurde ventilatie

2.2.3. Centrale ventilatie (multi-zone)

In het geval van traditioneel centraal, mechanische ventilatie wordt de ventilatie verwerkt door een luchtbehandelingskast. Deze bestaat uit de onderdelen, genoemd in afbeelding 2.6. Afhankelijk van de onderdelen hoeven deze niet allemaal in de luchtbehandelingskast te zitten, maar kunnen ook in de kanalen zitten. Verwarming en koeling van de lucht is ook niet altijd benodigd. Wel wordt deze vaak voorverwarmd doordat er in de winter anders koude lucht in de betreffende ruimte wordt ingeblazen.

- Indien er sprake is van vraagsturing op basis van CO₂ heeft dit invloed op de volgende onderdelen:
- Ventilator: Dit is een ander soort ventilator dan bij decentraal ventileren. In de luchtbehandelingskast zit namelijk een ventilator met veel meer vermogen om de grote hoeveelheid lucht voor het gehele gebouw of zone te kunnen verwerken. Dit dient tevens een drukgeregelde ventilator te zijn, om afhankelijk van de vraag een debiet te kunnen leveren. Deze kan door middel van aansturing geleidelijk aan minder toeren maken, in plaats van dat er alleen meerdere debietstanden zijn voor ventilatie.
 - CO₂-sensor: Dit is dezelfde sensor als bij decentraal ventileren.
 - Signaalomvormer: Net als bij decentraal ventileren zet deze een signaal om, om een debiet te leveren. Echter dient bij een centrale regeling, deze signalen niet alleen de ventilatoren dienen aan te sturen, maar ook de regelkleppen.
 - Regelkleppen per kanaal: Deze wordt ook aangestuurd door de signalen omgezet uit CO₂-waarden.

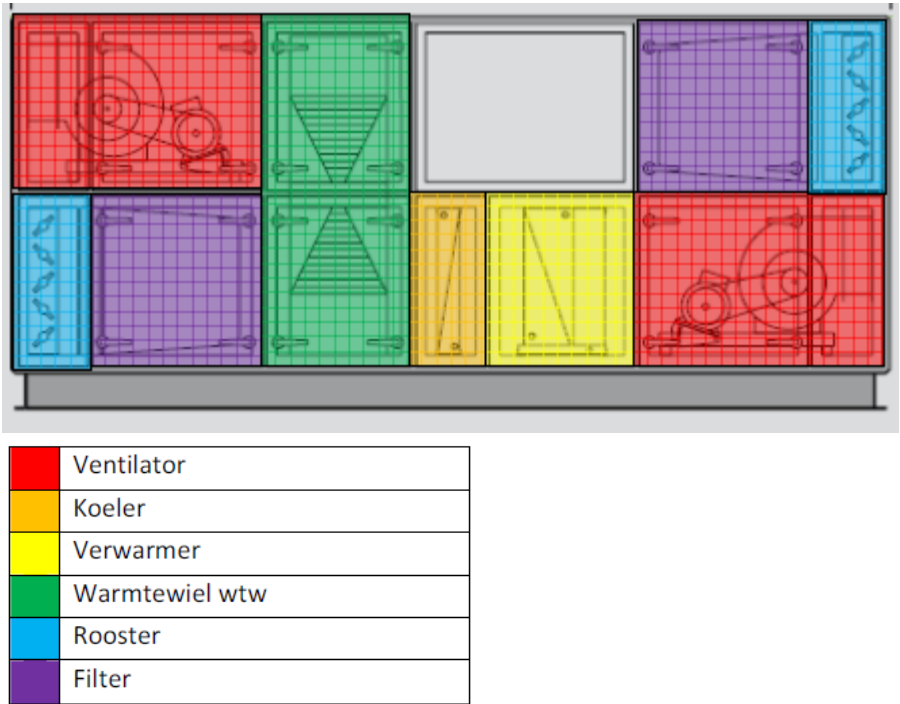
2.2.4. Regelkleppen

Bij een standaard systeem wordt er zo een constante luchthoeveelheid in de ruimte gestuurd. Dit kan per ruimte anders ingesteld worden door middel van CAV-units [Constant Air Volume]. Zoals in afbeelding 2.7 te zien is wordt er via een kanaal aangesloten op een CAV-unit, een constante hoeveelheid lucht door de roosters geblazen in de betreffende ruimte. Vervolgens wordt deze lucht weer via roosters in het plafond afgevoerd.

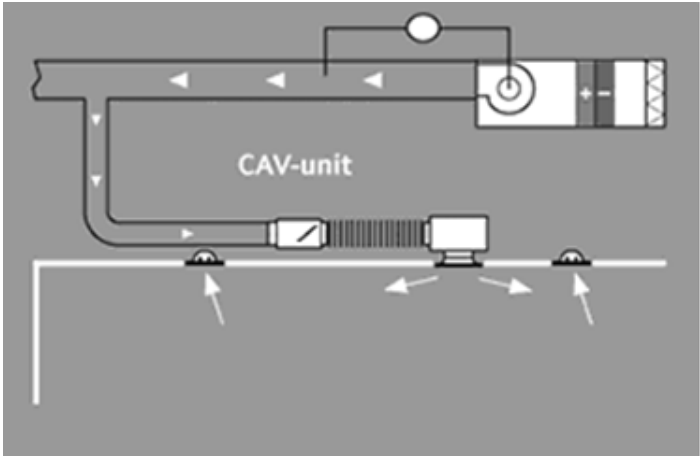
Ventilatie dat door middel van een VAV-unit [Variable Air Volume, zie afbeelding 2.8] verwerkt wordt heeft dezelfde werking als de CAV-unit, alleen is de luchtstroom variabel in te stellen. Dit kan door middel van een schakelaar die zich in de ruimte zelf bevindt, maar dit kan ook gekoppeld worden aan een CO₂- of aanwezigheidssensor.

De regelkleppen bevinden zich bij elke aftakking naar bijvoorbeeld een ruimte. Wanneer een CO₂-sensor waarden meet die laag genoeg zijn zodat er niet meer geventileerd hoeft te worden op dat moment, wordt een signaal gestuurd naar de VAV-units die zich in de kanalen bevinden en de ventilator van de luchtbehandelingskast [afbeelding 2.9]. De VAV-unit gaat in dat geval dicht zodat er geen lucht meer binnenkomt, de ventilator van de luchtbehandelingskast gaat minder omwentelingen per minuut maken om een lager debiet te leveren. Op deze manier kan aan de vraag worden voldaan per ruimte.

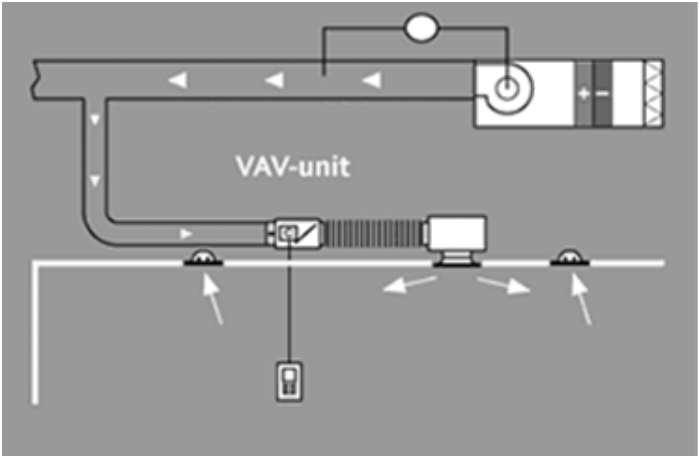
In hoofdstuk 10 zijn er tekeningen te zien met de benodigdheden voor een lokaal bij een situatie met constante ventilatie en bij een situatie met vraagsturing op basis van CO₂.



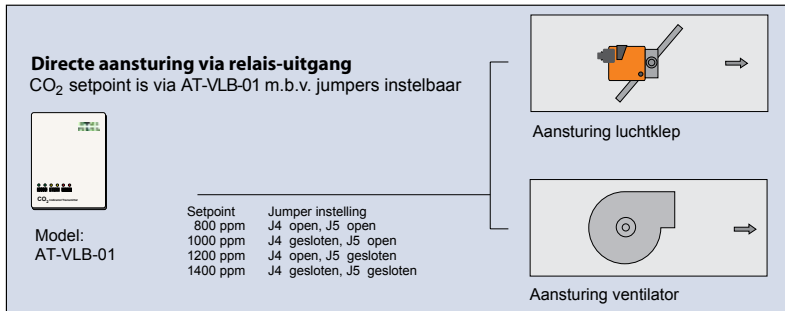
Afbeelding 2.6: Onderdelen luchtbehandelingskast



Afbeelding 2.7: CAV-unit



Afbeelding 2.8: VAV-unit



Afbeelding 2.9: Regeling op VAV-units en ventilator

Het schoolgebouw als case-studie

3

3.1. Beschrijving schoolgebouw

Het schoolgebouw aan de Dr. J.W. Paltelaan bestaat uit twee basisscholen, namelijk de Paulusschool en De Vijverburgh (zie afbeelding 3.1 - 3.5). Aan de linkerzijde zit de Paulusschool, welke relatief groter is dan De Vijverburgh (rechts). Deze zijn verbonden via een gemeenschappelijk deel wat een speellokaal heeft en een buitenschoolse opvang. Qua vorm hebben beide scholen een lessenaarsdak, waarvan een gedeelte plat is. Het schoolgebouw bestaat uit vier bouwlagen (21 lokalen met ondersteunende ruimten), een fietskelder en installatieruimten op het dak.

3.1.1. De Paulusschool

Deze basisschool heeft 364 leerlingen. Er zijn 13 groepen, met een leerlingenaantal van ongeveer 25 per groep. Groep 8 wordt gehuisvest op een andere school. Tussen de middag wordt er thuis geluncht, sommige leerlingen 'blijven over'.

3.1.2. De Vijverburgh

Deze basisschool bestaat uit 206 leerlingen en heeft de groepen 1-8. Verschil met de Paulusschool is dat er tussen de middag door de leerlingen wordt geluncht op school in het lokaal. De leeftijdscategoriën zijn vergelijkbaar met de Paulusschool.

3.1.3. Groepsamenstelling

Voor beide scholen geldt de groepsamenstelling zoals in onderstaand tabel. Hier zijn de werkelijke aantallen genoemd en de leeftijden.

Groep	Lokaal	Totaal aantal leerlingen	Leeftijd [jaren]
1-2A	P.0.18	31	5,5
1-2B	P.0.16	33	5,5
1-2C	P.0.14	32	5,5
1-2D	P.0.12	31	5,5
3A	P.0.08	26	7
3B	P.0.09	23	7
4A	P.0.11	28	8
4B	P.0.10	26	8
5	P.1.02	31	9
5&6	P.1.06	27	9,5
6	P.1.04	27	10,5
7A	P.1.10	24	11,5
7B	P.1.08	25	12

Groep	Lokaal	Totaal aantal leerlingen	Leeftijd [jaren]
1A	V.0.14	25	4,5
1B	V.0.03	23	4,5
1&2	V.0.12	26	5,5
3	V.0.06	19	7
4	V.0.05	18	8,5
5	V.1.02	24	9
6	V.1.03	24	10
7	V.1.04	27	11
8	V.0.04	20	12

3.1.4. Gevolg onderzoek

- Na het uiteenzetten van de roosters per lokaal, inclusief de afwezigheid door gymlessen en verschillende begin- en eindtijden bleek dit heel veel verschillen met elkaar te hebben. Wanneer dit gehanteerd zou worden voor de invoer in Vabi, zouden de uitkomsten voor het energieverbruik niet meer terug te leiden zijn tot de oorzaken. Daarom is ervoor gekozen om dit terug te brengen tot een gemiddeld verbruik. In dit tijdschema is er les van 9:00 tot 12:00 en om 13:00 tot 15:30.
- Ook de leerlingenaantallen en leeftijden verschilden per lokaal aanzienlijk, daarom is dit teruggebracht tot 28 leerlingen per lokaal met één leraar. De leeftijden in het schoolgebouw zijn onderverdeeld in drie verschillende gemiddelde leeftijden.
- In dit schoolgebouw stonden de deuren en ramen vaak open, in dit onderzoek is het effect van te openen ramen en deuren niet meegerekend. Een uitleg hierover volgt bij Aanbevelingen.
- Er is sprake van vloerverwarming en vloerkoeling, deze zijn ingevoerd als een 4-pijps fancoilunit door de verklaring in Vabi Problemen & oplossingen.
- Er is sprake van een decentraal ventilatiesysteem. Voor de invoer is een luchtbehandelingskast ingevoerd door de verklaring in Vabi Problemen & oplossingen.



Afbeelding 3.1: Schoolgebouw Dr. J.W. Paltelaan



Afbeelding 3.2 - 3.5: Foto's binnenkant schoolgebouw

3.2. Bouwkundig

Het schoolgebouw bestaat uit de hieronder genoemde opbouw van de gebouwschil.

Voor de plattegronden en gevelaanzichten zie afbeelding 3.6 - 3.9, deze zijn tevens te zien in bijlagen A.

3.2.1. Gevel

De ZO- en NW-gevel bestaat uit:

- Metselwerk [100 mm]
- Spouw [40 mm]
- Isover Mupan isolatie [120 mm, $\lambda = 0,035$ (W/m.K)]
- Kalkzandsteen [150 mm]

Dit levert een Rc-waarde op van 3,5 (m².K/W)

De ZW- en NO-gevel bestaat uit:

- Metselwerk [100 mm]
- Spouw [40 mm]
- Isover Systemroll 400 isolatie [2x 110 mm, $\lambda = 0,038$ (W/m.K)]
- Stijl- en regelwerk [2x 110 mm]
- Gipsplaat [12,5 mm]

Dit levert een Rc-waarde op van 3,5 (m².K/W)

3.2.2. Beganegrondvloer

- Anhydrietvloer [70 mm]
- Isolatielaag [30 mm]
- Druklaag [50 mm]
- Geïsoleerde kanaalplaat [200 mm]

Dit levert een Rc-waarde op van 3,5 (m².K/W)

3.2.3. Groen dak

- Sedumtapijt [100 mm]
- EPS isolatie [120 mm, $\lambda = 0,035$ (W/m.K)]
- Afwerklaag [50 mm]
- Kanaalplaat [200 mm]

Dit levert een Rc-waarde op van 3,5 (m².K/W)

3.2.4. Tussenvloer

- Anhydrietvloer [70 mm]
- Isolatielaag [30 mm]
- Druklaag [50 mm]
- kanaalplaat [200 mm]

3.2.5. Binnenwanden

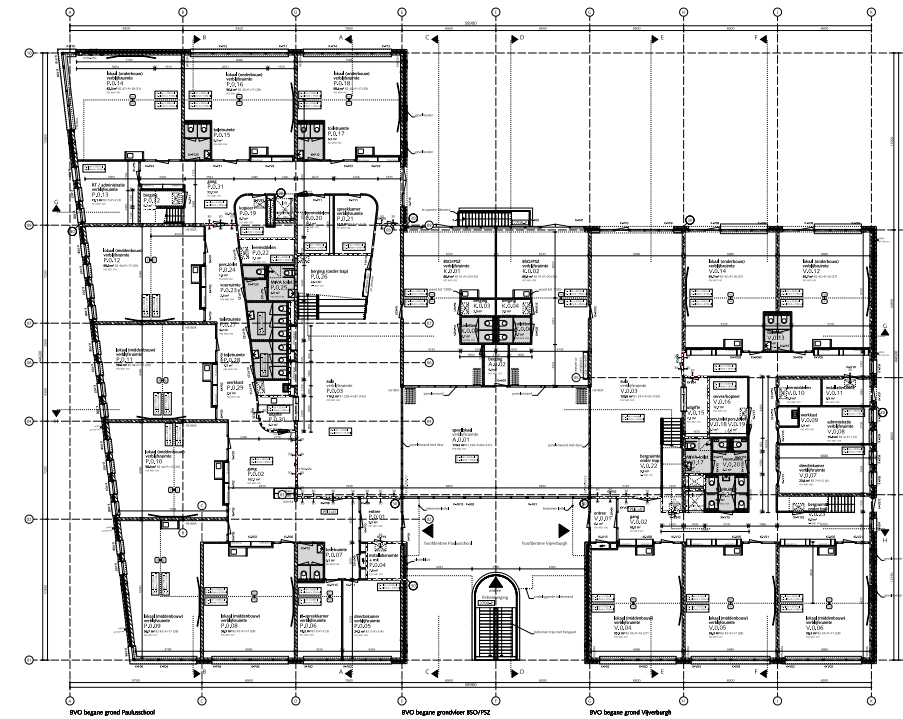
- Systeemwanden [90 mm, 100 mm]
- Kalkzandsteen [214 mm]

3.2.6. Kozijnen

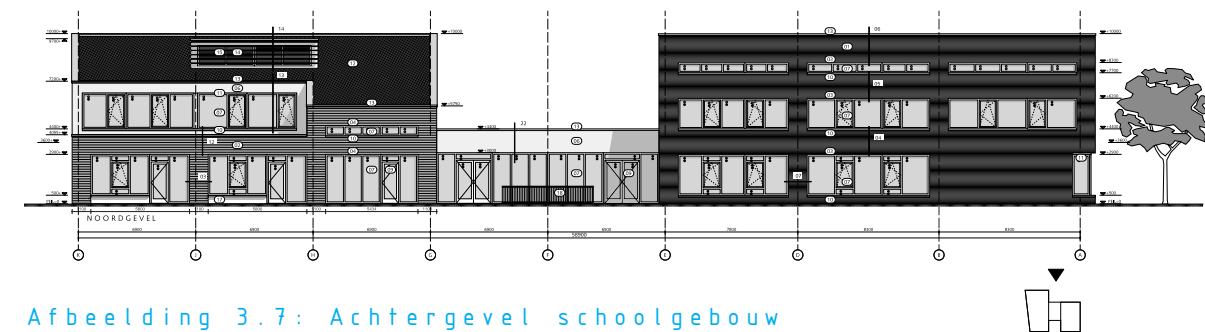
- Hr++ beglazing [$U=1,0$ (W/m².K), g-waarde=0,60]
- Houten kozijnen [$U=2,4$ (W/m².K)]

3.2.7. Deuren

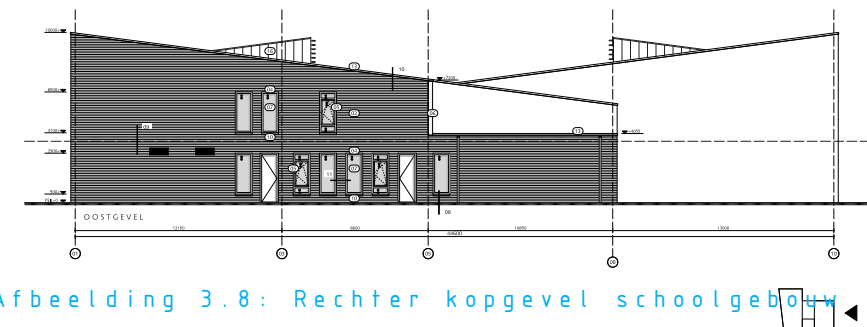
- Standaard houten buiten- en buitendeuren



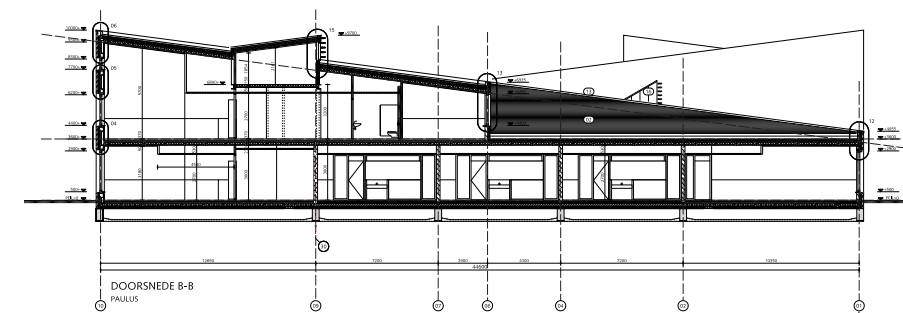
Afbeelding 3.6: Beganegrond schoolgebouw



Afbeelding 3.7: Achtergevel schoolgebouw



Afbeelding 3.8: Rechter kopgevel schoolgebouw



Afbeelding 3.9: Doorsnede Paulusschool

M e t h o d e o n d e r z o e k

4

4.1. Methode

Doel

De bedoeling van dit onderzoek is om van de case-studie de potentiële energiebesparing te bepalen die te behalen is bij het gebruik van CO₂-gestuurde ventilatie. Om dit te bepalen zijn er wat omwegen om dit te kunnen bepalen, doordat dit niet op een traditionele manier kan. In dit hoofdstuk zullen deze stappen uitgelegd worden, waardoor het mogelijk wordt om dit wél te kunnen bepalen.

H5. Bepaling CO₂-verloop klaslokalen

In dit onderzoek is een spreadsheet ontwikkeld met behulp van formules die de CO₂-concentratie per minuut kunnen uitrekenen. In deze spreadsheet is het aantal personen in te voeren die aanwezig zijn per minuut, de CO₂-productie van de leerlingen/leraar, de volume van de ruimte en het ventilatiedebiet.

Door dit in te voeren aan de hand van een realistische personenbezetting en gebruik van het lokaal is hiermee de CO₂-verloop gedurende een dag te zien.

H5. Bepaling ventilatiedebiet klaslokalen

Het bepalen van de CO₂-verloop is niet het uiteindelijke doel van de spreadsheet. De CO₂-verloop dient wel om te controleren of dit klopt met de werkelijkheid. Het uiteindelijke doel van de spreadsheet is echter om naar aanleiding van de CO₂-verloop het benodigde ventilatiedebiet te bepalen om de CO₂-concentratie onder de 950 ppm te houden. Dit is te bepalen bij constante ventilatie, maar ook bij variabele ventilatie waar er gedurende een bepaalde periode wordt geventileerd. Bij dit laatste geldt dat dit ook te gebruiken is om te berekenen met welk debiet er geventileerd wordt, maar ook hoelang er met dit debiet moet worden geventileerd om met een zo min mogelijk aantal ‘draaiuren’ onder de 950 ppm CO₂ te blijven.

Om CO₂-sturing hiermee te ‘simuleren’ is in deze spreadsheet geprogrammeerd dat er een setpoint in te voeren is voor het aantal ppm waarbij er geventileerd dient te worden. Ook het debiet is hier in te voeren. Dit komt overeen met de werkelijkheid waar ook ingesteld wordt op de CO₂-concentratie die gemeten wordt en vervolgens de ventilator met een bepaald debiet aanstuurt. Om een zo efficiënt mogelijke energiebesparing te behalen is één ventilatie-stand gebruikt.

H6. Valideren binnentemperaturen in schoolgebouw

In het hoofdstuk metingen zijn temperatuurmetingen uitgevoerd van de huidige situatie, om aan te tonen dat de temperaturen door warmteafgifte via zoninstraling en transmissie bij de uitvoer in Vabi kloppen met de werkelijkheid.

H6. Validatie CO₂-productie bij verschillende leeftijden

Er zijn CO₂-metingen uitgevoerd in verschillende lokalen om aan te tonen dat er bij verschillende leeftijden wel degelijk minder CO₂ wordt geproduceerd, om aan te tonen dat hier inderdaad een potentiële energiebesparing mee te behalen valt.

H7, H8. Thermisch energieverbruik bepalen

Om het benodigde thermisch energieverbruik te bepalen per ruimte voor verwarmen en koelen gedurende een jaar, is het schoolgebouw ingevoerd in Vabi Elements. Hiermee is te bepalen wat de installaties gedurende een jaar moeten leveren in kWh om te verwarmen en koelen. Warmte- en koudeverlies via kanalen en leidingen worden in Vabi aan de hand van de invoer voor de installaties automatisch doorerekend. Het aantal kWh wat uit Vabi komt is de energie die de installaties moeten leveren, oftewel thermische energie.

Aan de hand van de tekeningen, documentatie en bezoeken aan het schoolgebouw is de bouwkundige schil bepaald, de installaties en het gebruik van lokalen is dit in Vabi ingevoerd. Deze eigenschappen zijn per ruimte te koppelen. Hiermee berekent Vabi per ruimte de warmteverliezen: warmteverlies door de bouwkundige schil (transmissie) en warmteverlies door ventilatie. Warmtewinst is te behalen via zoninstraling naar binnen, de interne warmteproductie (personen, verlichting en apparatuur) en warmteopwekking door de installaties. Andersom wordt dit ook voor koeling bepaald. Vabi berekent hoeveel vermogen er moet worden geleverd aan verwarmen en koelen om te zorgen voor een aangenaam binnenklimaat.

Vraaggestuurde ventilatie op basis van CO₂ is nog niet standaard in te voeren in Vabi Elements. Op dit moment is dat nog in ontwikkeling. Daardoor wordt het op een andere manier ingevoerd dan gebruikelijk is, maar wel overeenkomt met de werkelijkheid.

De ventilatie is per ruimte in te voeren als een ventilatiedebiet voor de dag- en nachtstand. Deze wordt vervolgens aangestuurd door een tijdsschema van de afgiftesystemen. De ventilatie dient ingesteld te worden op een kortere tijdsduur en met een ingevoerd debiet. Het benodigde debiet en de uren waarop dit benodigd is, is bepaald aan de hand van de spreadsheet in stap 2.

Er zijn wat omwegen om dit in Vabi Elements te krijgen, deze omwegen zijn beschreven in hoofdstuk 5.

H8. Controleren daguitvoer met verwachtingen

Om te kijken of de varianten juist zijn ingevoerd, is er gekeken of de verwachtingen kloppen met de werkelijkheid. Hier gaat het met name om de afname van de ventilatie en centraal verwarmen en koelen.

H8. Bepalen energieverbruik opwekking installaties

Nadat de fouten uit Vabi gehaald waren is er berekend wat de installaties zouden verbruiken als deze de gewenste energie zou moeten leveren. Dit is doorerekend doordat verwarmen en koelen een verschillend opwekkingsrendement hebben. Door dit op deze manier door te rekenen is het totale energieverbruik op een eerlijke manier te vergelijken.

H8. Bepalen energieverbruik ventilatoren

Aan de hand van de ‘draaiuren’ en het debiet wat uit stap 2 volgde is te bepalen per variant hoeveel luchtverversing in totaal gedurende een jaar er nodig zou zijn. Aan de hand van een geschikte ventilator is bepaald hoeveel vermogen deze moet leveren voor de voorkomende luchtdebieten als gebouw in totaal. Hiermee is ook bepaald hoeveel electriciteit de aandrijvingsmotor precies moet leveren gedurende een jaar per variant.

H8. Totale energieverbruik bepalen

Aan de hand van de stappen 5 en 6 wordt het energieverbruik bij elkaar opgeteld, om een inzage te geven in de totale potentiële energiebesparing. Wel is de potentiële energiebesparing ook per onderdeel weergegeven, zodat ook de individuele besparing op verwarmen, koelen en ventilatie duidelijk wordt.

H8. Verband bepalen afname ventilatie en energiebesparing

Als aanvulling is m.b.v. de berekende waarden in stap 3 een verwacht verband aan te geven waarin duidelijk wordt wat het effect van afname van ventilatie in percentage voor effect heeft op verwarmen en koelen.

CO₂ - concentratie
bepalen

5

5.1. Het bepalen van de CO₂-concentratie in een ruimte

5.1.1. Theorie

Op basis van literatuur (Bouwman & Joosting, 1980) is door TNO software ontwikkeld waar de CO₂-concentratie kan worden bepaald aan de hand van de buitenconcentratie, CO₂-productie en ventilatie. Deze software gebruikt de formule in afbeelding 5.1 als bepaling van de CO₂-concentratie.

Aan de hand van deze formule kan de CO₂-concentratie bepaald worden. De uitkomsten hierbij komen echter uit in uren. Of de CO₂-concentratie in uren of minuten wordt berekend maakt niet uit, dit geeft hetzelfde resultaat. Het gaat erom dat het CO₂-verloop uit kleinere stappen bestaat als er per minuut wordt gerekend. Het CO₂-verloop is op deze manier nauwkeuriger te zien.

In het Zweedse simulatieprogramma IDE ICE (Indoor Climate and Energy) wordt de CO₂-concentratie berekend door de formule in afbeelding 5.2 (Pavlovas, 2003).

In het artikel van Pavlovas (2003) worden de uitkomsten van de berekende CO₂-concentratie vergeleken met de daadwerkelijke gemeten CO₂-concentratie in het gebouw, uitgezet in de tijd. Hier is te zien dat de berekende waarden relatief weinig afwijkingen hebben met de uiteindelijke gemeten waarden. In grafiek 5.3 is deze vergelijking te zien.

Om de formules te verduidelijken, eerst een uitleg van de grootheden die in de formules gebruikt worden en hoe deze te bepalen zijn.

5.1.2. Buitenconcentratie CO₂

De buiten-concentratie van CO₂ is zoals eerder genoemd gemiddeld 400 ppm, dit heeft echter plaatselijk afwijkende waarden. Toch wordt er vaak met dit gemiddelde gerekend. Vaak voorkomende waarden waarmee wordt gerekend zijn 350 ppm, 380 ppm en 400 ppm. Indien er veel auto's aanwezig zijn in een stedelijk gebied tijdens de spits, gaat de CO₂-concentratie omhoog. In meer landelijke gebieden is de CO₂-concentratie meestal 350 ppm. In het Programma van Eisen Frisse Scholen wordt er uitgegaan van 400 ppm als buitenconcentratie. 's Nachts gaat deze concentratie ook omlaag, echter is de ventilatie actief overdag's. Daarom is 400 ppm een aanneembare waarde.

$$C_t = C_{\text{buiten}} + p/q_v (1 - e^{-t/\tau})$$

waarin:

C_t = de concentratie op tijdstip t

C_{buiten} = de buiten concentratie

p = de bronsterkte CO₂ [m³/s]

q_v = de ventilatievolumestroom [m³/s]

τ = de ventilatietijdconstante[s] ($\tau=3600/\text{ventilatievoud}[\text{per uur}]$)

t = de tijd[s]

Afbeelding 5.1: CO₂-formule 1

$$C_r(t) = C_s + \frac{M}{V} - \left(C_s + \frac{M}{V} - C_{r(0)} \right) \exp \left(- \left(\frac{V}{v} \right) \tau \right)$$

$C_r(t)$ = CO₂-concentratie op tijdstip t [ppm]

C_s = CO₂-concentratie buitenlucht [ppm]

M = CO₂ CO₂-productie [kg/h]

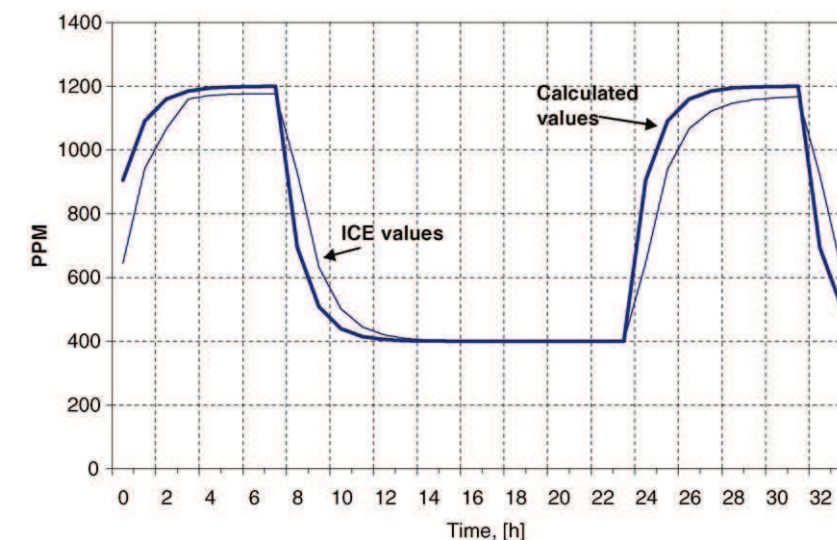
V = vent^{CO₂}-productie [kg/h]

$C_{r(0)}$ = oorspronkelijke CO₂-concentratie in de ruimte [ppm]

v = volume van de ruimte [m³]

τ = tijd [h]

Afbeelding 5.2: CO₂-formule 1



Grafiek 5.3: Vergelijking gemeten CO₂ en berekende CO₂

5.1. Het bepalen van de CO₂-concentratie in een ruimte

5.1.3. CO₂-productie door ademhaling van de mens

De CO₂-productie van de mens is geen constante waarde, in deze formule is dit de totale CO₂-productie van alle personen in de betreffende ruimte. De CO₂-productie is afhankelijk van het soort activiteit, de leeftijd, gewicht en lengte. Tevens treedt er bij vrouwen gedurende de zwangerschap meer productie van CO₂ op, doordat er als het ware voor twee wordt geademd.

Om de CO₂-productie te bepalen is de verhouding tussen CO₂-productie, metabolisme en leeftijd bepaald in afbeelding 5.4. Deze afbeelding komt uit het rapport Ventilatie, achtergrond en eisen (de Gids, 2011), gepubliceerd door het TNO. Te zien is dat een bij een hoger metabolisme er een hogere CO₂-productie plaatsvind. Bij kinderen is er een relatief lage CO₂-productie, echter neemt deze toe wanneer deze ouder worden. Er is te zien dat wanneer de mens rond de 18 jaar is, de CO₂-productie op zijn hoogste punt is, daarna begint dit geleidelijk af te lopen naarmate men ouder wordt.

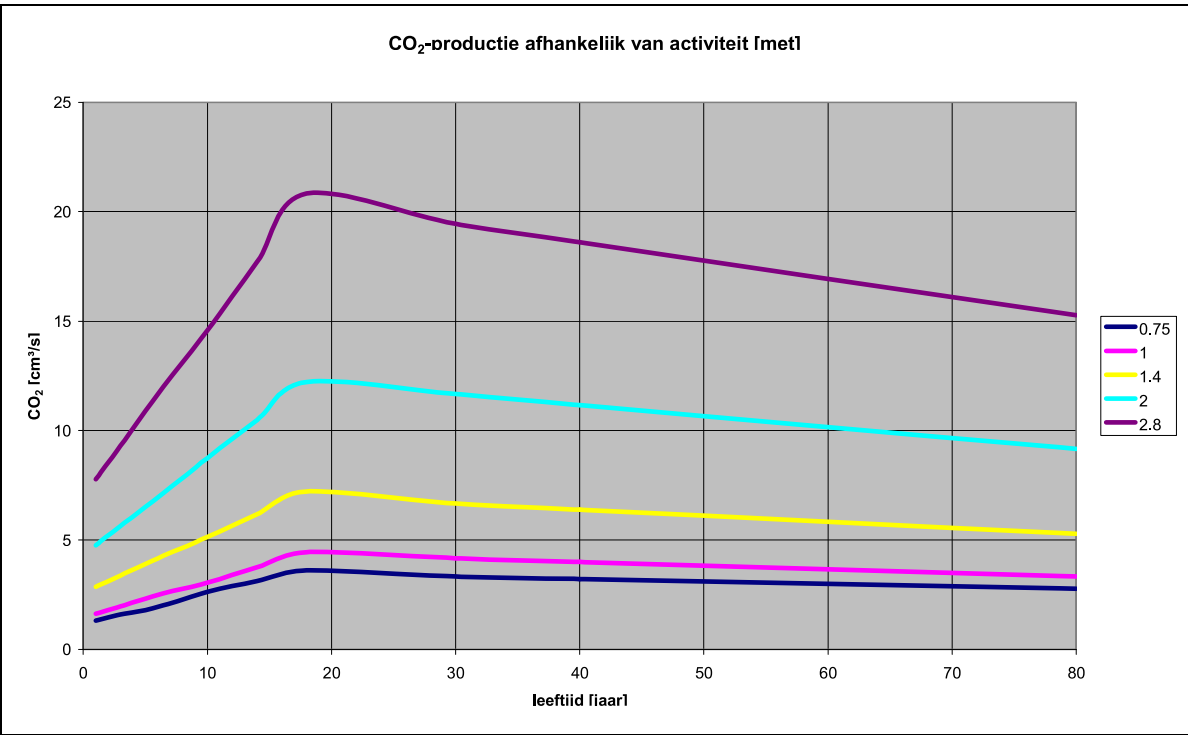
Het metabolisme is hierbij een eenheid [met] die aangeeft hoeveel warmte er afgegeven wordt. Bij 1 met wordt er 58 W/m² huidoppervlak naar de omgeving afgegeven. Het is als het ware de warmteproductie in het lichaam, wat gelijk is aan de uitgestraalde warmte door arbeid, straling, convector, geleiding en verdamping. Bij een zittende activiteit op school komt dit neer op 1.2 met.

Uitgaande van deze gegevens kan er geconcludeerd worden dat er bij de voorkomende leeftijden van de personen in het gebouw het volgende wordt geproduceerd aan CO₂, zoals te zien in tabel 5.5. Aan de hand van grafiek 5.4 zijn deze waarden berekend, bij een metabolisme van 1,2 met. Voor de leraar is als gemiddelde een persoon van 40 jaar genomen met een metabolisme van 1,4 met. De leeftijden in tabel 5.5 zijn de gemiddelde leeftijden van de klassen die voorkomen in de case-studie.

5.1.4. Ventilatievolumestroom (q_v)

Houdt in met hoeveel lucht er geventileerd wordt per tijdseenheid. Vaak is dit uitgedrukt in dm³/s of m³/h. Dit wordt ook wel ventilatiedebiet genoemd. De lucht die geventileerd wordt, wordt bepaald door de eisen die voor een functie gelden. In theorie houdt dit in het geval van deze formule ook in dat er infiltratie via kieren en naden wordt meegenomen. Via kieren en naden wordt er onbedoeld ook ‘mee-geventileerd’. Dit heeft als eenheid q_{v,10,ka}, en wordt uitgedrukt in dm³/s per m² gebruiksoppervlakte of geveloppervlakte.

Opmerking 5.1.1: De CO₂-productie in tabel 5.5 zijn in dit onderzoek aangehouden voor de invoer.



Grafiek 5.4: CO₂-productie per leeftijd aan de hand van metabolisme [Bron: de Gids, 2011]

Persoon	Leeftijd [jaren]	Metabolisme [met]	CO ₂ -productie p.p. [cm³/s]	CO ₂ -productie p.p. [m³/h]
Leerling	4,5	1,2 (zittende activiteit)	3,00	0,0108
Leerling	5,5	1,2 (zittende activiteit)	3,25	0,0117
Leerling	7	1,2 (zittende activiteit)	3,65	0,0131
Leerling	8	1,2 (zittende activiteit)	3,90	0,0140
Leerling	8,5	1,2 (zittende activiteit)	4,00	0,0144
Leerling	9	1,2 (zittende activiteit)	4,15	0,0149
Leerling	9,5	1,2 (zittende activiteit)	4,40	0,0158
Leerling	10	1,2 (zittende activiteit)	4,50	0,0162
Leerling	10,5	1,2 (zittende activiteit)	4,65	0,0167
Leerling	11	1,2 (zittende activiteit)	4,75	0,0171
Leerling	11,5	1,2 (zittende activiteit)	4,90	0,0176
Leerling	12	1,2 (zittende activiteit)	5,00	0,0180
Leraar	40	1,4 (zittend, af- en toe staand)	6,00	0,0216

Tabel 5.5: CO₂-productie per leeftijd

5.1. Het bepalen van de CO₂-concentratie in een ruimte

5.1.5. Formule CO₂-verloop in spreadsheet

In dit onderzoek is zelf een spreadsheet ontwikkeld om de CO₂-concentratie per minuut te benaderen. Het aantal ppm is uit te drukken in m³ per totale m³, kg per totale kg, etc. Het aantal ppm gaat namelijk om de verhouding tussen een gedeelte van het totaal. Omdat de volume en CO₂-productie veelal in m³ wordt aangegeven wordt in deze worksheet alles omgezet naar m³.

De CO₂-concentratie [m³] op tijdstip t is een optelling van:

- 1. De voorgaande CO₂-concentratie [m³].
- 2. De CO₂-productie op tijdstip t [m³].
- 3. De CO₂ die door middel van ventilatie van buiten naar binnen gaat [m³].
- 4. De CO₂ die door middel van ventilatie van binnen naar buiten gaat [m³].

De berekening van (1) wordt bepaald door:

Voorgaande CO₂-concentratie [m³] = CO₂-concentratie vorig tijdstip [ppm] * volume ruimte [m³] / 1e6.

De berekening van (2) wordt bepaald door:

CO₂-productie [m³] = [aantal personen * CO₂-productie [m³/h] p.p.] / 60 [minuten].

De berekening van (3) wordt bepaald door:

CO₂ (buiten naar binnen) [m³] = [CO₂-buitenconcentratie [ppm] / 1e6] * [(ventilatie-debiet [m³/h] + infiltratie-debiet [m³/h]) / 60 [minuten]].

De berekening van (4) wordt bepaald door:

CO₂ (binnen naar buiten) [m³] = [voorgaande CO₂-concentratie [m³] / volume ruimte [m³]] * (ventilatie-debiet [m³/h] / 60 [minuten]).

De CO₂-concentratie [m³] op tijdstip t:

(1) + (2) + (3) - (4)

Uiteindelijk is dan de totale CO₂-concentratie [m³] op tijdstip t bepaald, echter moet dit weer worden omgezet naar ppm. Dit gebeurt met de volgende formule:

CO₂-concentratie [ppm] op tijdstip t = [CO₂-concentratie [m³] * 1e6] / volume ruimte [m³].

In tabel 5.6 zijn de uitkomsten gedurende één uur van een lokaal te zien, met het werkelijke gebruik qua leerlingen en aanwezigheid. Per minuut worden in de spreadsheet de waarden uit de formules die hier-voor genoemd zijn berekend. Uiteindelijk zijn deze uren aan elkaar gekoppeld zodat dit over de gehele dag wordt doorerekend.

Lokaal P.1.08			
CO ₂ buiten:	400	ppm	
CO ₂ vorig uur:	943	ppm	Debiet ventilatie in: 835 m ³ /h
Luchtvolume ruimte:	158,2	m ³	Debiet infiltratie in: 0 m ³ /h
CO ₂ -productie p.p.:	0,0180	m ³ /h	Debiet ventilatie uit: 835 m ³ /h
CO ₂ -productie leerkracht:	0,0216	m ³ /h	

Tijd	Bezetting leerkracht [personen]	Bezetting leerlingen [personen]	CO ₂ -concentratie (voor) [m ³]	CO ₂ -productie [m ³ /m]	CO ₂ van buiten naar binnen [m ³]	CO ₂ uit [m ³]	CO ₂ -concentratie (na) [m ³]	CO ₂ -concentratie (na) [ppm]
11:00	0	0	0,1492	0,0000	0,0056	0,0131	0,1417	895
11:01	0	0	0,1417	0,0000	0,0056	0,0125	0,1348	852
11:02	0	0	0,1348	0,0000	0,0056	0,0119	0,1285	812
11:03	0	0	0,1285	0,0000	0,0056	0,0113	0,1227	776
11:04	0	0	0,1227	0,0000	0,0056	0,0108	0,1175	743
11:05	0	0	0,1175	0,0000	0,0056	0,0103	0,1127	713
11:06	0	0	0,1127	0,0000	0,0056	0,0099	0,1084	685
11:07	0	0	0,1084	0,0000	0,0056	0,0095	0,1044	660
11:08	0	0	0,1044	0,0000	0,0056	0,0092	0,1008	637
11:09	0	0	0,1008	0,0000	0,0056	0,0089	0,0975	616
11:10	0	0	0,0975	0,0000	0,0056	0,0086	0,0945	597
11:11	0	0	0,0945	0,0000	0,0056	0,0083	0,0917	580
11:12	0	0	0,0917	0,0000	0,0056	0,0081	0,0892	564
11:13	0	0	0,0892	0,0000	0,0056	0,0079	0,0870	550
11:14	0	0	0,0870	0,0000	0,0056	0,0076	0,0849	536
11:15	1	24	0,0849	0,0076	0,0056	0,0075	0,0905	572
11:16	1	24	0,0905	0,0076	0,0056	0,0080	0,0957	605
11:17	1	24	0,0957	0,0076	0,0056	0,0084	0,1004	635
11:18	1	24	0,1004	0,0076	0,0056	0,0088	0,1047	662
11:19	1	24	0,1047	0,0076	0,0056	0,0092	0,1086	687
11:20	1	24	0,1086	0,0076	0,0056	0,0096	0,1122	709
11:21	1	24	0,1122	0,0076	0,0056	0,0099	0,1154	730
11:22	1	24	0,1154	0,0076	0,0056	0,0102	0,1184	749
11:23	1	24	0,1184	0,0076	0,0056	0,0104	0,1211	766
11:24	1	24	0,1211	0,0076	0,0056	0,0107	0,1236	781
11:25	1	24	0,1236	0,0076	0,0056	0,0109	0,1259	796
11:26	1	24	0,1259	0,0076	0,0056	0,0111	0,1279	809
11:27	1	24	0,1279	0,0076	0,0056	0,0113	0,1298	820
11:28	1	24	0,1298	0,0076	0,0056	0,0114	0,1315	831
11:29	1	24	0,1315	0,0076	0,0056	0,0116	0,1331	841
11:30	1	24	0,1331	0,0076	0,0056	0,0117	0,1345	850
11:31	1	24	0,1345	0,0076	0,0056	0,0118	0,1358	858
11:32	1	24	0,1358	0,0076	0,0056	0,0119	0,1370	866
11:33	1	24	0,1370	0,0076	0,0056	0,0120	0,1380	873
11:34	1	24	0,1380	0,0076	0,0056	0,0121	0,1390	879
11:35	1	24	0,1390	0,0076	0,0056	0,0122	0,1399	884
11:36	1	24	0,1399	0,0076	0,0056	0,0123	0,1407	890
11:37	1	24	0,1407	0,0076	0,0056	0,0124	0,1415	894
11:38	1	24	0,1415	0,0076	0,0056	0,0124	0,1422	899
11:39	1	24	0,1422	0,0076	0,0056	0,0125	0,1428	903
11:40	1	24	0,1428	0,0076	0,0056	0,0126	0,1433	906
11:41	1	24	0,1433	0,0076	0,0056	0,0126	0,1439	909
11:42	1	24	0,1439	0,0076	0,0056	0,0127	0,1443	912
11:43	1	24	0,1443	0,0076	0,0056	0,0127	0,1448	915
11:44	1	24	0,1448	0,0076	0,0056	0,0127	0,1452	918
11:45	1	24	0,1452	0,0076	0,0056	0,0128	0,1455	920
11:46	1	24	0,1455	0,0076	0,0056	0,0128	0,1458	922
11:47	1	24	0,1458	0,0076	0,0056	0,0128	0,1461	924
11:48	1	24	0,1461	0,0076	0,0056	0,0129	0,1464	925
11:49	1	24	0,1464	0,0076	0,0056	0,0129	0,1467	927
11:50	1	24	0,1467	0,0076	0,0056	0,0129	0,1469	928
11:51	1	24	0,1469	0,0076	0,0056	0,0129	0,1471	930
11:52	1	24	0,1471	0,0076	0,0056	0,0129	0,1473	931
11:53	1	24	0,1473	0,0076	0,0056	0,0130	0,1474	932
11:54	1	24	0,1474	0,0076	0,0056	0,0130	0,1476	933
11:55	1	24	0,1476	0,0076	0,0056	0,0130	0,1477	934
11:56	1	24	0,1477	0,0076	0,0056	0,0130	0,1479	935
11:57	1	24	0,1479	0,0076	0,0056	0,0130	0,1480	935
11:58	1	24	0,1480	0,0076	0,0056	0,0130	0,1481	936
11:59	1	24	0,1481	0,0076	0,0056	0,0130	0,1482	937

CO ₂ eind	937
----------------------	-----

Tabel 5.6: Voorbeeld CO₂-uitkomsten voor één uur

5.1. Het bepalen van de CO₂-concentratie in een ruimte

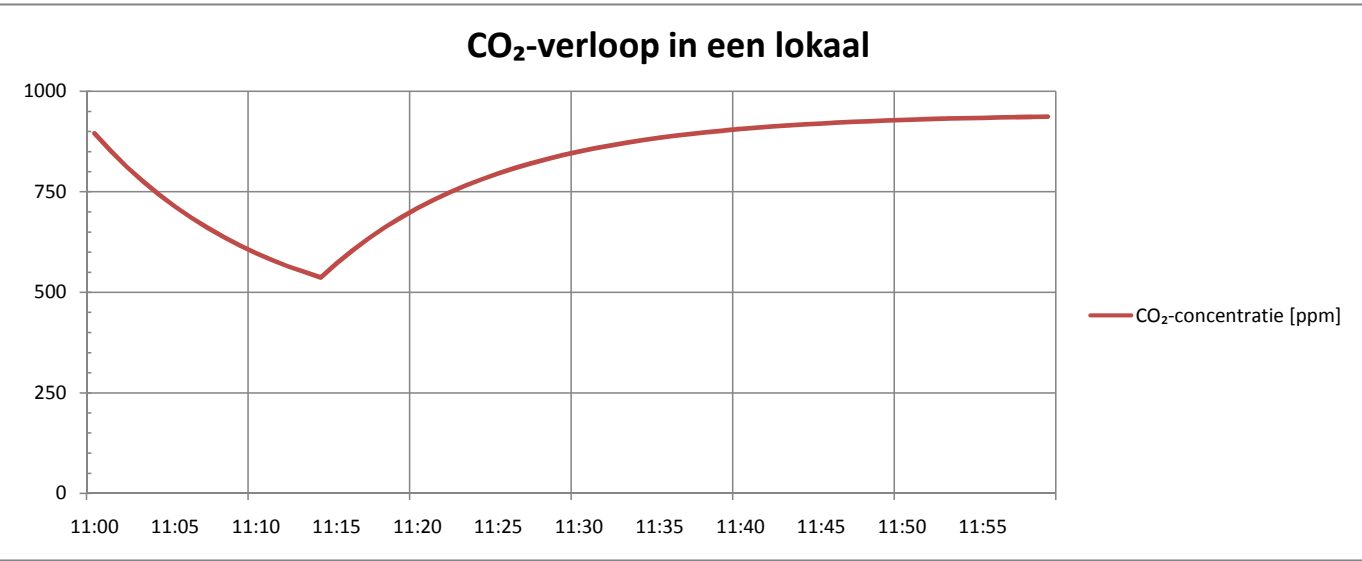
5.1.6. Uitkomsten in spreadsheet

In de ontwikkelde spreadsheet wordt zoals eerder vermeld per uur berekend wat de CO₂-concentratie in de betreffende ruimte zou moeten zijn. Deze waarden per minuut worden omgezet in grafiek 5.7, betreffende een uur.

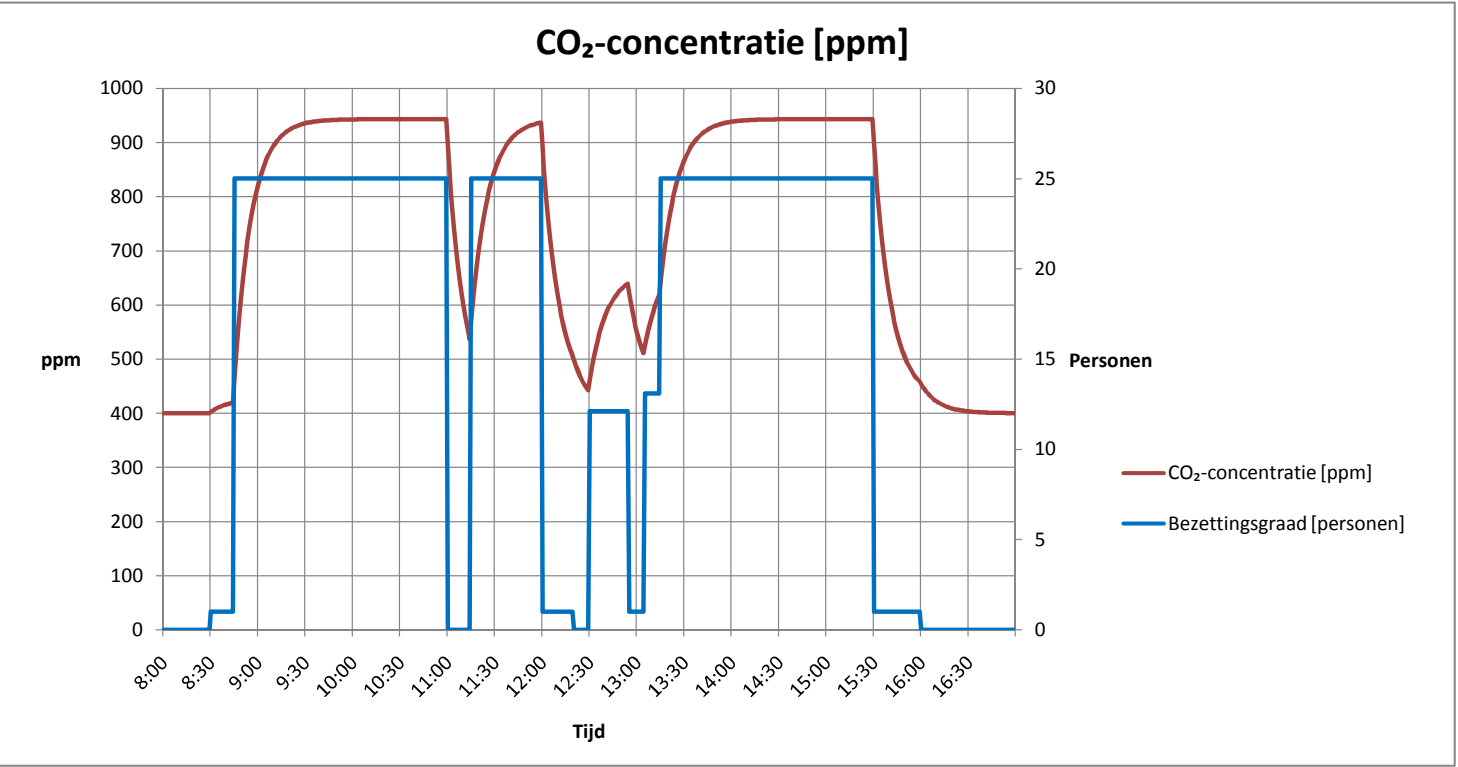
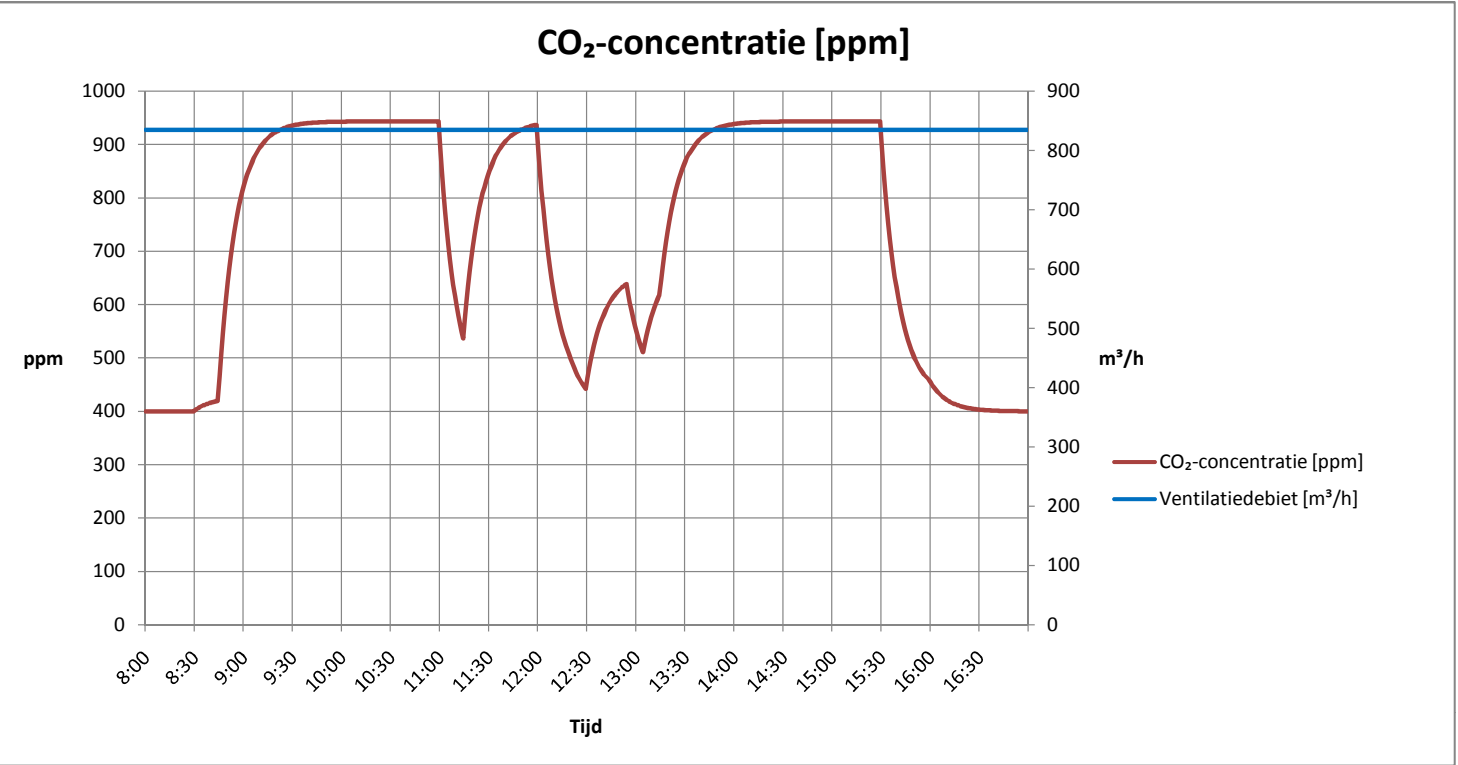
Uiteindelijk worden de uitkomsten per minuut gedurende een gehele dag berekend. Het verloop hiervan is te zien in grafiek 5.8. Dit is het verloop van de CO₂-concentratie, waarbij in dit voorbeeld ook het constante ventilatiedebiet waarmee wordt geventileerd te zien is als de blauwe lijn.

In grafiek 5.9 is tenslotte het verloop van de CO₂-concentratie te zien, gecombineerd met de veranderlijke bezetting van het aantal aanwezige personen. Hier is de link tussen de aanwezigheid en de CO₂-concentratie duidelijk te zien. Bij een volle bezetting neemt de CO₂-concentratie snel toe, van 400 ppm naar 950 ppm in één uur. De afname van de CO₂ in één uur gaat even snel als de toename in één uur.

Als voorbeeld is hier een uitkomst te vinden bij een lokaal in het schoolgebouw, met het werkelijk gebruik. Doel van deze berekening is aan de hand van het aantal personen, de leeftijden en het gebruik het benodigde ventilatiedebiet te bepalen om onder de grenswaarde van 950 ppm CO₂ te blijven.



Grafiek 5.7: Voorbeeld CO₂-verloop per uur



Grafiek 5.8 - 5.9: CO₂-verloop bij werkelijk gebruik met constante ventilatie

5.2 Verloop CO₂-concentratie bij ventilatie

Bij de gestelde ventilatie-eisen in het Programma van Eisen Frisse Scholen wordt er uitgegaan dat een bepaalde CO₂-concentratie te behalen is met de ventilatie-debietten per persoon. Voor elk van deze eisen geldt er dat er met een constante bezetting personen wordt gerekend, wat in de werkelijkheid natuurlijk niet zo is. In elk lokaal wordt een evenwichtssituatie bereikt doordat de CO₂-productie en de CO₂ die van buiten naar binnen gaat door de ventilatie tezamen gelijk is aan de CO₂ die de ruimte uit gaat door ventilatie. In elk van deze uitkomsten is de genoemde CO₂-concentratie, de waarde waarbij de evenwichtssituatie bereikt is. Daardoor neemt de CO₂-concentratie niet meer af, of toe. Deze gaat pas weer naar beneden wanneer er personen uit de betreffende ruimte vertrekken, waardoor dus de CO₂-productie omlaag gaat en dus de gehele CO₂-concentratie in de betreffende ruimte.

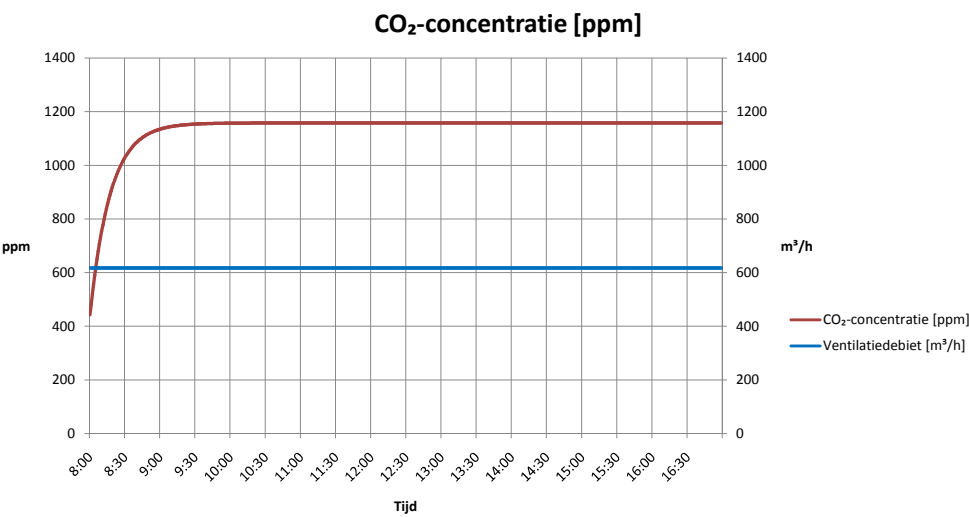
5.2.1. Constante bezetting personen

In deze twee voorbeelden (grafiek 5.10 en 5.11) is te zien dat er onafhankelijk van een bepaald ventilatiedebiet er altijd een evenwichtssituatie optreedt wanneer er met een constant debiet geventileerd wordt, en er een constant aantal personen in het lokaal aanwezig zijn. De eis gaat er daar wel van uit, terwijl dit in de werkelijkheid nooit zal voorkomen. Het verschil tussen deze twee komt doordat bij voorbeeld 1 er met een lager debiet geventileerd wordt dan bij voorbeeld 2. De CO₂-concentratie is daardoor bij voorbeeld 1 hoger, maar de evenwichtssituatie treedt later op dan bij voorbeeld 2. Conclusie is dus dat wanneer er met een hoger debiet wordt geventileerd, de CO₂-concentratie lager is, en wel op een eerder moment constant blijft.

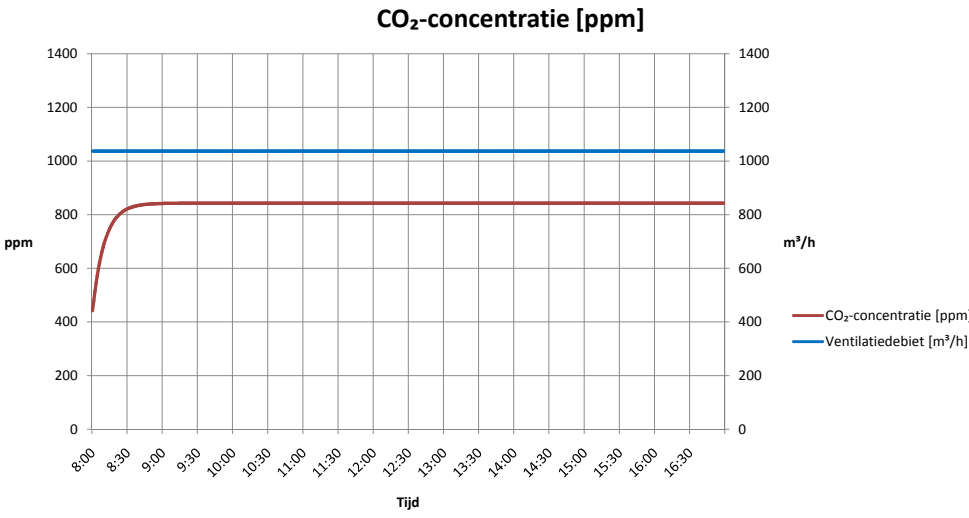
5.2.2. Variabele bezetting personen

Zoals eerder genoemd op deze pagina blijft bij constante bezetting de CO₂-concentratie gelijk nadat de evenwichtssituatie bereikt is. Echter is dit in de praktijk nooit zo, de CO₂-concentratie zal afnemen wanneer er geen personen in het lokaal aanwezig zijn. Afhankelijk van de tijdsduur dat er niemand aanwezig is zal de CO₂-concentratie afnemen. In één uur afwezigheid gaat deze CO₂-concentratie snel naar beneden, maar zelfs in 15 minuten afwezigheid gaat dit relatief snel omlaag.

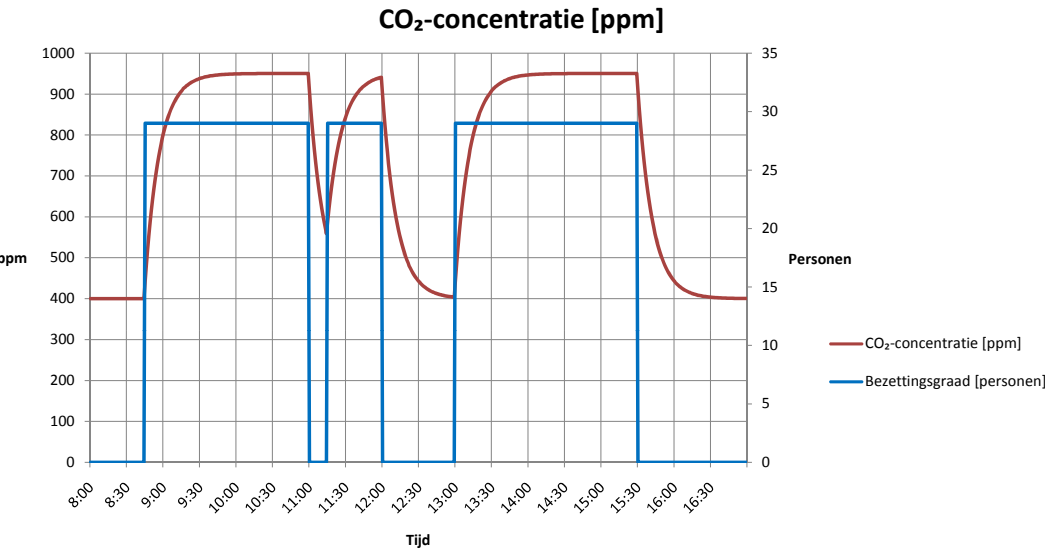
In afbeelding 5.12 is een situatie te zien dat er een sprake is van constante ventilatie (de lijn hiervan is niet aangegeven in dit afbeelding), met een afwisselende bezetting van personen. Bij de 15 minuten pauze is te zien dat de CO₂-concentratie gelijk met 400 ppm afneemt. Bij één uur pauze is dat 550 ppm, doordat de curve het laatste gedeelte van het uur minder snel afneemt doordat dit richting de minimale CO₂-concentratie van 400 ppm gaat. Ook in dit genoemde uur is te zien dat de afname in de eerste 15 minuten het snelst is.



Grafiek 5.10: Voorbeeld CO₂-verloop bij ventileren met relatief laag debiet



Grafiek 5.11: Voorbeeld CO₂-verloop bij ventileren met relatief hoog debiet



Afbeelding 5.12: Voorbeeld CO₂-verloop bij constant ventileren met een variabele bezetting

5.3. Benodigde debieten per leeftijd

Bij elke klasse van Frisse Scholen wordt er per persoon een debiet te gegeven. Deze waarden zijn erop gebaseerd dat een persoon 17-20 cm³/s produceert aan CO₂, de echte waarde wordt niet genoemd. Bij een jongere leeftijd is echter sprake van een lagere CO₂-productie. In de basisscholen is dit namelijk minder dan waar Frisse Scholen vanuit gaat. De CO₂-productie per leeftijd is omgerekend naar aanleiding van de afbeelding uit [de Gids, 2011] tot tabel 5.13. Hierbij is er uitgegaan dat de kinderen een metabo- lisme van 1,2 met hebben, wat overeenkomst met een zittende activiteit. Voor de leraar is een gemid- delde leeftijd genomen met een verhoogd metabolisme van 1,4 met, doordat deze ook een deel van de tijd staand doorbrengen.

Om te kijken met welke leeftijden deze ventilatie-eisen van Frisse Scholen als uitgangspunt zijn genomen is een kenmerkende ruimte qua volume en aantal personen doorgerekend. Uitgaande van het aantal per- sonen is er hier met 28 personen gerekend en één leraar. Om aan te geven dat er bij jongere mensen een minder hoog ventilatiedebiet benodigd is dan bij oudere mensen is dit ook doorgerekend. De leeftijden zijn gekozen aan de hand van de leeftijden in het schoolgebouw. Omdat het voorkomen van alle leeftijden een grote hoeveelheid aan data geeft als dit doorgerekend wordt, is er gekozen voor een drietal leeftijden. Dit is 5 jaar [gem. van 4, 5 en 6 jaar], 8 jaar [gem. van 7, 8 en 9 jaar] en 11 jaar [gem. van 10, 11 en 12 jaar].

De uitkomsten zijn in grafiek 5.14 te zien. De blauwe lijn staat voor klasse A, de rode voor klasse B en de groene voor klasse C. Bij de CO₂-productie van een 11-jarige komt er uit dat dit precies overeenkomt met het debiet per persoon dat Frisse scholen omschrijft voor klasse A, B en C. Dit is respectievelijk 12 dm³/s, 8,50 dm³/s en 6,0 dm³/s. In afbeelding 5.14 is te zien dat er respectievelijk 11,97 dm³/s, 8,50 dm³/s en 5,8 dm³/s uitkomt. Deze uitkomsten zijn dus vrijwel gelijk aan de ventilatie-eisen voor Frisse Scholen.

Bij elke klasse neemt bij een leeftijd van 8 jaar het benodigde ventilatie-debiet af met zo`n 20 %, bij 5-jarigen is dit 35 %. Bij deze uitkomsten is de infiltratie niet meegekend.

- Als er met infiltratie wordt gerekend:
- 5 jarigen: verlaging van 19 ppm van het maximum.
 - 8-jarigen: verlaging van 15 ppm van het maximum.
 - 11-jarigen: verlaging van 10 ppm van het maximum.

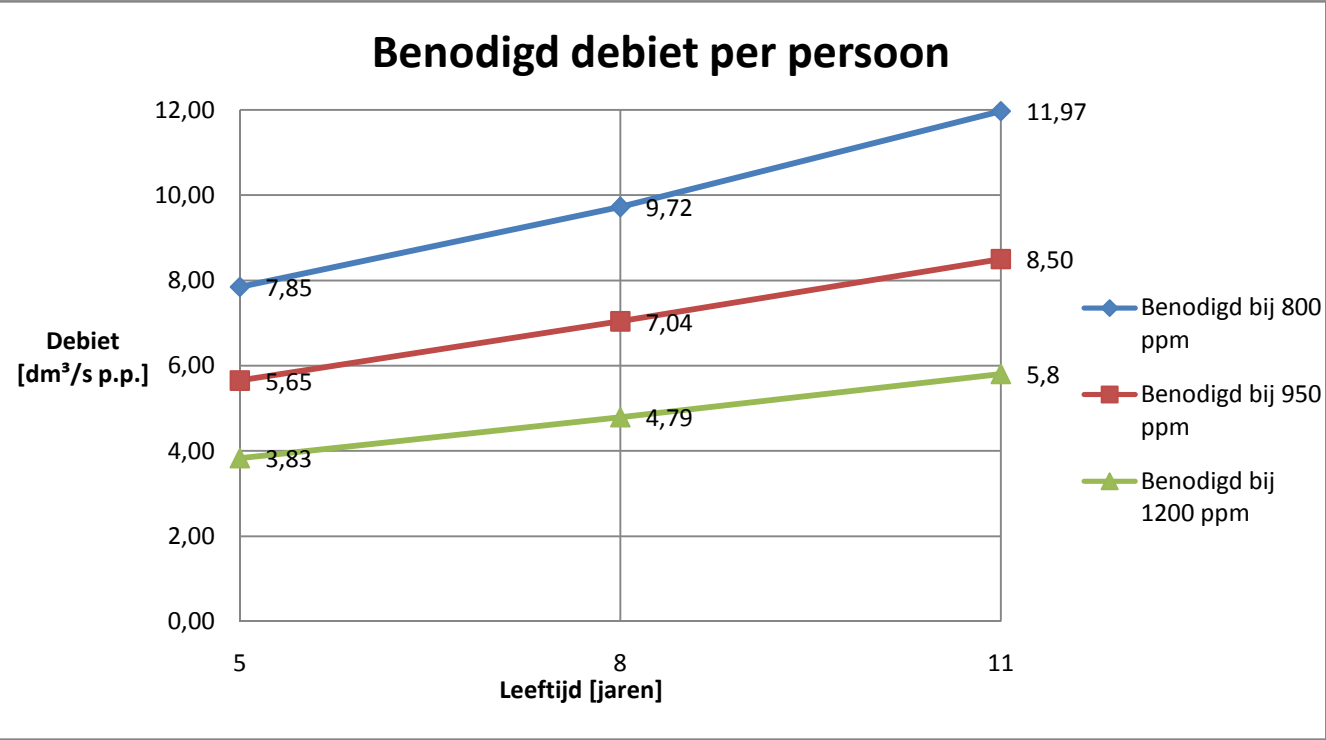
Opmerking 5.3.2: De waarden genoemd in tabel 5.13 is uitgegaan van de CO₂-productie van jongens, bij meisjes ligt dit 20% lager. Omdat de samenstelling van jongens en meisjes in een groep sterk kan afwijken, is in dit onderzoek met de CO₂-productie van jongens gerekend. Dit levert een hogere CO₂-concentratie op, maar zal bij de uiteindelijke uitkomsten garanderen dat deze besparing sowieso gehaald wordt als *worst case scenario*.

- Opmerking 5.3.3:** Voor het onderzoek is bepaald d.m.v de spreadsheet dat er in de schoolgebouwen met de volgende debieten moet worden geventileerd om onder de 950 ppm CO₂ te blijven:
- 5-jarigen: 590 m³/h. (zie bijlage B3)
 - 8-jarigen: 735 m³/h. (zie bijlage B2)
 - 11-jarigen: 890 m³/h. (zie bijlage B1)

Met deze debieten is er gerekend in de varianten die ingevoerd zijn in Vabi.

Persoon	Leeftijd [jaren]	Metabolisme [met]	CO ₂ -productie p.p. [cm ³ /s]	CO ₂ -productie p.p. [m ³ /h]
Leerling	4,5	1,2 (zittende activiteit)	3,00	0,0108
Leerling	5,5	1,2 (zittende activiteit)	3,25	0,0117
Leerling	7	1,2 (zittende activiteit)	3,65	0,0131
Leerling	8	1,2 (zittende activiteit)	3,90	0,0140
Leerling	8,5	1,2 (zittende activiteit)	4,00	0,0144
Leerling	9	1,2 (zittende activiteit)	4,15	0,0149
Leerling	9,5	1,2 (zittende activiteit)	4,40	0,0158
Leerling	10	1,2 (zittende activiteit)	4,50	0,0162
Leerling	10,5	1,2 (zittende activiteit)	4,65	0,0167
Leerling	11	1,2 (zittende activiteit)	4,75	0,0171
Leerling	11,5	1,2 (zittende activiteit)	4,90	0,0176
Leerling	12	1,2 (zittende activiteit)	5,00	0,0180
Leraar	40	1,4 (zittend, af- en toe staand)	6,00	0,0216

Tabel 5.13: Voorkomende CO₂-productie per leeftijd



Grafiek 5.14: Benodigd ventilatiedebiet per persoon per leeftijd

M e t i n g e n

6

6.1. Temperatuurmetingen

Gedurende 11-04-2013 tot 22-05-2013 zijn er temperatuurloggers geplaatst die elke 10 minuten de temperatuur in een lokaal heeft gemeten. Deze opgeslagen waarden zijn vervolgens omgezet naar de grafiek in grafiek 6.1. De gekozen lokalen zijn gekozen om zoveel mogelijk variatie in oriëntatie en ligging in het gebouw te krijgen. Ook is de buitentemperatuur gemeten.

Het gaat hierbij om de volgende lokalen:

- P.1.04: Oriëntatie glas NW, relatief koud verwacht.
- P.O.14: Oriëntatie glas ZW, relatief warm verwacht.
- P.O.10: Oriëntatie glas ZW, relatief warm verwacht.
- P.1.10: Oriëntatie glas ZO, relatief warm verwacht.
- V.O.14: Oriëntatie glas NW, relatief koud verwacht.
- V.1.03: Oriëntatie glas ZO, relatief warm verwacht.
- V.O.04: Oriëntatie glas ZW, relatief warm verwacht.

Zoals te zien zijn de lokalen P.O.10 en P.O.14 en V.O.14 het koudst. Qua oriëntatie zouden deze lokalen relatief warm moeten zijn, echter is de ZW-gevel voorzien van zonwering, waardoor deze juist relatief koud zijn. Deze lokalen variëren tussen de 19 °C en 22 °C.

V.O.04 is van de gemeten lokalen het warmst (hoogst gemeten temperatuur van 29 °C), dit was ook al verwacht door de oriëntatie. Daarna volgt lokaal P.1.10. De resterende lokalen liggen in het midden met een temperatuur variërend van 20 °C en 24 °C.

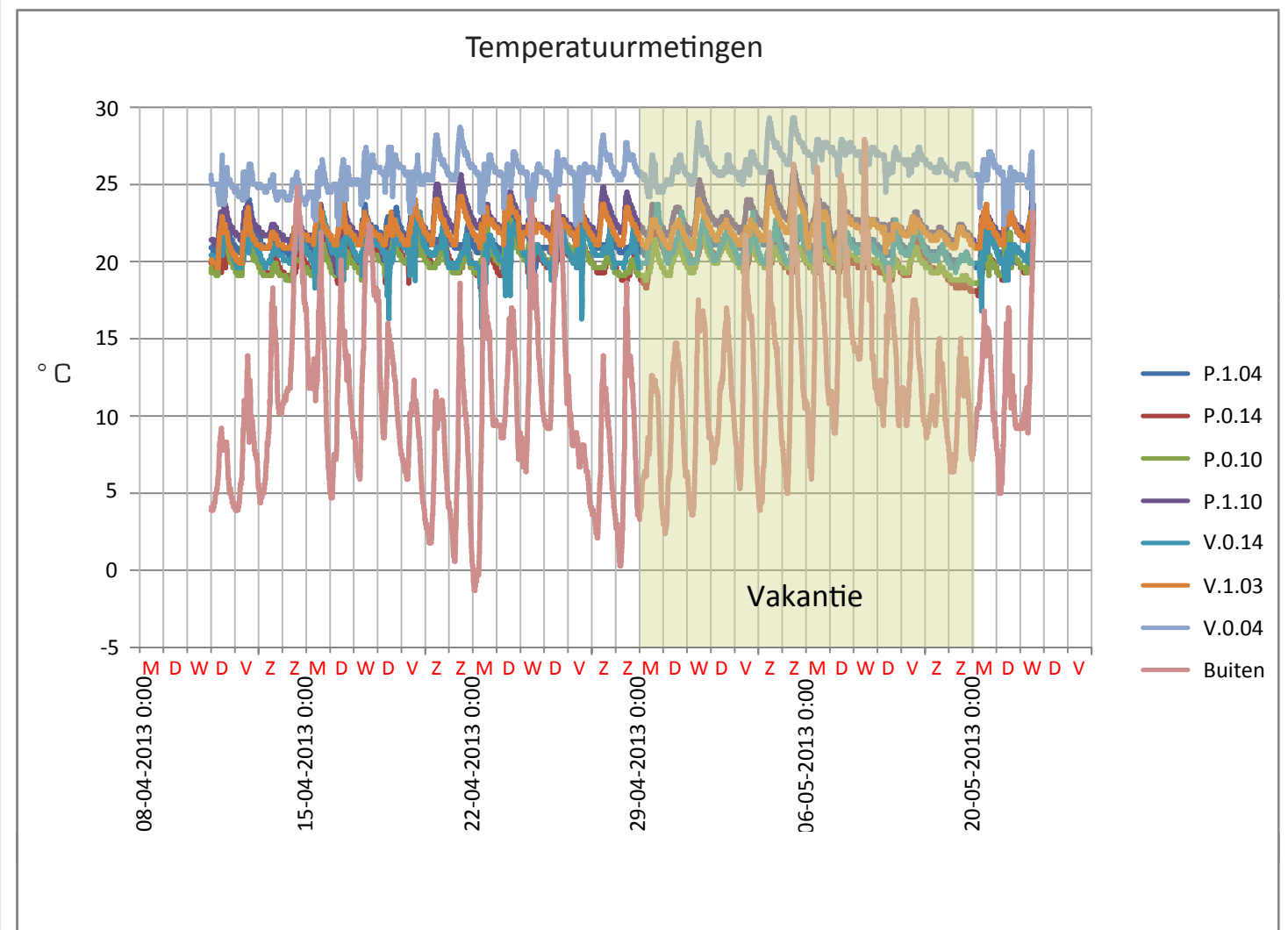
6.1.1. Validatie

Het doel van deze metingen zijn om de uitvoer in Vabi te valideren. Voor enkele lokalen is daar gekeken of de ruimten dezelfde afwijkingen hebben m.b.t. temperatuur als in de gemeten werkelijkheid. Door andere instellingen van verwarming en koelen is het zeer waarschijnlijk dat de temperatuur minder schommelt door bijvoorbeeld meer koelingsvermogen in de Vabi-simulatie. Wel is in dat geval te zeggen dat de ruimten die in dit geval het koudst zijn, ook het meeste vermogen nodig hebben om te verwarmen.

Energieverbruik van één jaar aan lokaal verwarmen bij de situatie met constante ventilatie:

- P.1.04: 1998 kWh
- P.O.14: 983 kWh
- P.O.10: 1282 kWh
- P.1.10: 1293 kWh
- V.O.14: 1611 kWh
- V.1.03: 1388 kWh
- V.O.04: 783 kWh

Er is te zien dat de ruimten die het meest warm zijn, minder vermogen nodig hebben voor verwarmen. Ter vergelijking geldt ook hier dat de lokalen die het kouds zijn, meer vermogen nodig hebben voor verwarmen, oftewel de invoer in Vabi klopt volgens deze metingen.



Grafiek 6.1.: Temperatuurmetingen schoolgebouw Paltelaan

6.2. CO₂-metingen

In het schoolgebouw zijn ook enkele CO₂-loggers geplaatst. Deze zijn in vijf lokalen geplaatst. Bij de lokaalkeuze is er gelet op de leeftijden in de betreffende lokalen en het aantal leerlingen. In deze lokalen zitten in werkelijkheid het genoemde aantal personen en de gemiddelde leeftijd van de leerlingen.

Het gaat hierbij om de volgende lokalen:

- P.1.10: 24 leerlingen, leeftijd 11,5 jaar.
- P.O.10: 26 leerlingen, leeftijd 8 jaar.
- P.1.04: 27 leerlingen, leeftijd 10,5 jaar.
- V.O.04: 20 leerlingen, leeftijd 12 jaar.
- Aula V.O.03: 23 leerlingen, leeftijd 4,5 jaar.

In grafiek 6.2 is de CO₂-concentratie te zien van de gehele periode. Er is te zien dat de luchtkwaliteit in het grootste gedeelte tussen de 600 - 1000 ppm zit (goede luchtkwaliteit), echter zijn er wel bij de lokalen P.O.10, P.1.04 en P.1.10 enkele uitschieters waardoor de CO₂-concentratie boven de 1000 ppm uitkomt tot soms wel 1400 ppm (matig-slechte luchtkwaliteit). Er is te zien in grafiek 6.3 bij de dagconcentratie op dinsdag 14-05-2013 dat er verschillende patronen zijn te vinden. Dit is terug te leiden door de gymlessen die op verschillende tijden gehouden worden.

Gekeken naar de CO₂-concentratie van laag naar hoog bij momenten met volle aanwezigheid:

1. Aula V.O.03: Bij aanwezigheid de laagste CO₂-concentratie.
2. V.O.04: Door de leeftijd van 12 jaar wordt er het meest aan CO₂ geproduceerd per persoon, echter doordat er maar 20 leerlingen zijn, is dit lokaal alsnog met de CO₂-concentratie relatief laag.
3. P.1.10: In het begin van de dag een relatief hoge CO₂-concentratie, daarna neemt deze af. De verwachte oorzaak is dat er de 2e helft van die dag minder leerlingen aanwezig waren.
4. P.O.10: Ligt in de buurt van lokaal P.1.10, deze heeft echter een wat hogere CO₂-concentratie, maar verschilt niet veel.
5. P.1.04: Deze heeft op deze dag de hoogste CO₂-concentratie. Dit komt door de relatief hoge leeftijd en door het relatief grote leerlingenaantal.

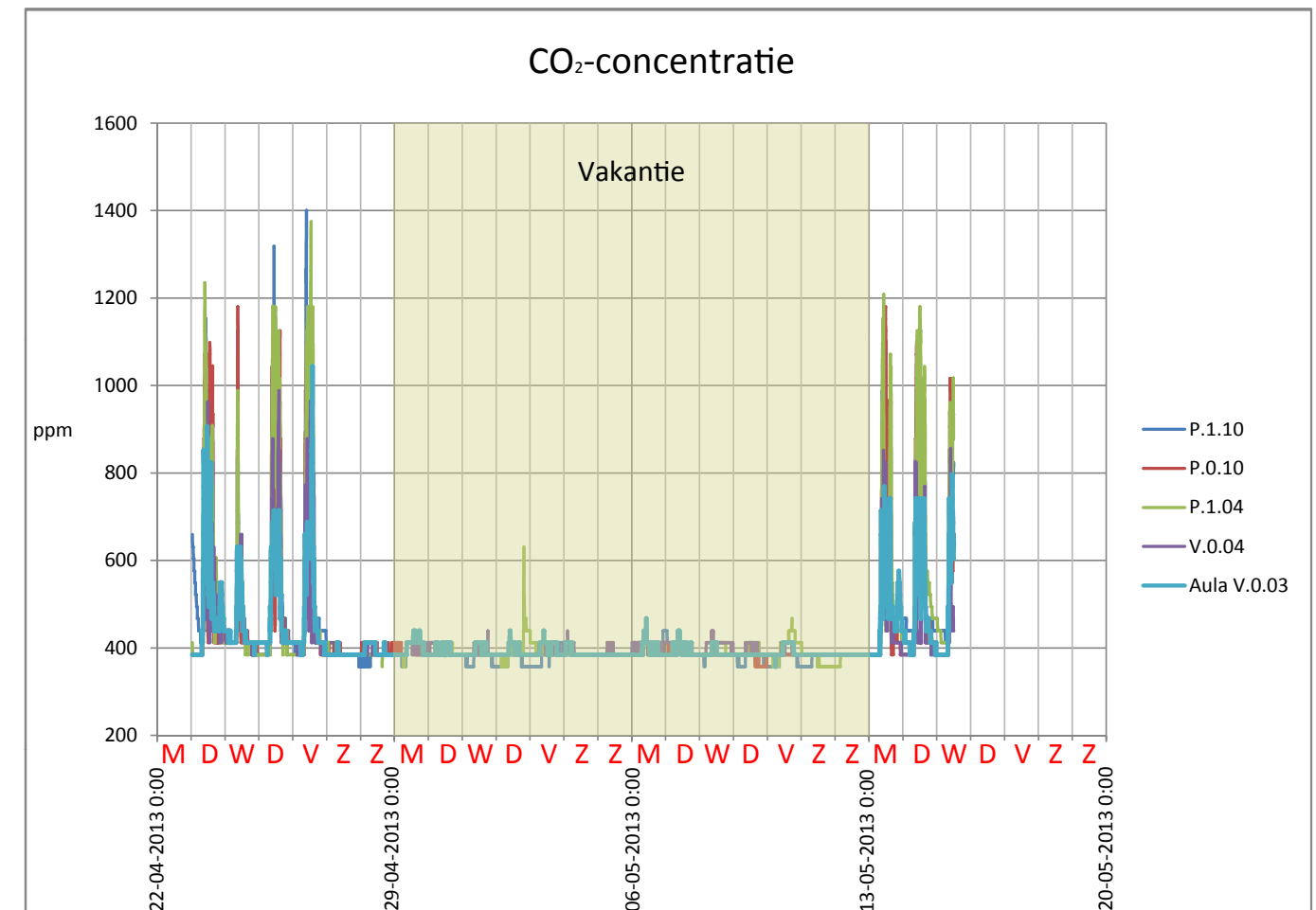
Dit is echter een periode van één dag. Indien er gekeken wordt naar de gemiddelde CO₂-concentratie gedurende alle dagen dat er leerlingen aanwezig waren, levert dit een meer betrouwbare conclusie op:

- | | | |
|-------------|---|---|
| 1. V.O.04 = | 464 ppm (20 leerlingen, leeftijd 12 jaar) | → relatief weinig CO ₂ -productie |
| 2. V.O.03 = | 481 ppm (23 leerlingen, leeftijd 4,5 jaar) | → relatief weinig CO ₂ -productie |
| 3. P.O.10 = | 507 ppm (26 leerlingen, leeftijd 8 jaar) | → relatief normale CO ₂ -productie |
| 4. P.1.10 = | 523 ppm (24 leerlingen, leeftijd 11,5 jaar) | → relatief hoge CO ₂ -productie |
| 5. P.1.04 = | 540 ppm (27 leerlingen, leeftijd 10,5 jaar) | → relatief hoge CO ₂ -productie |

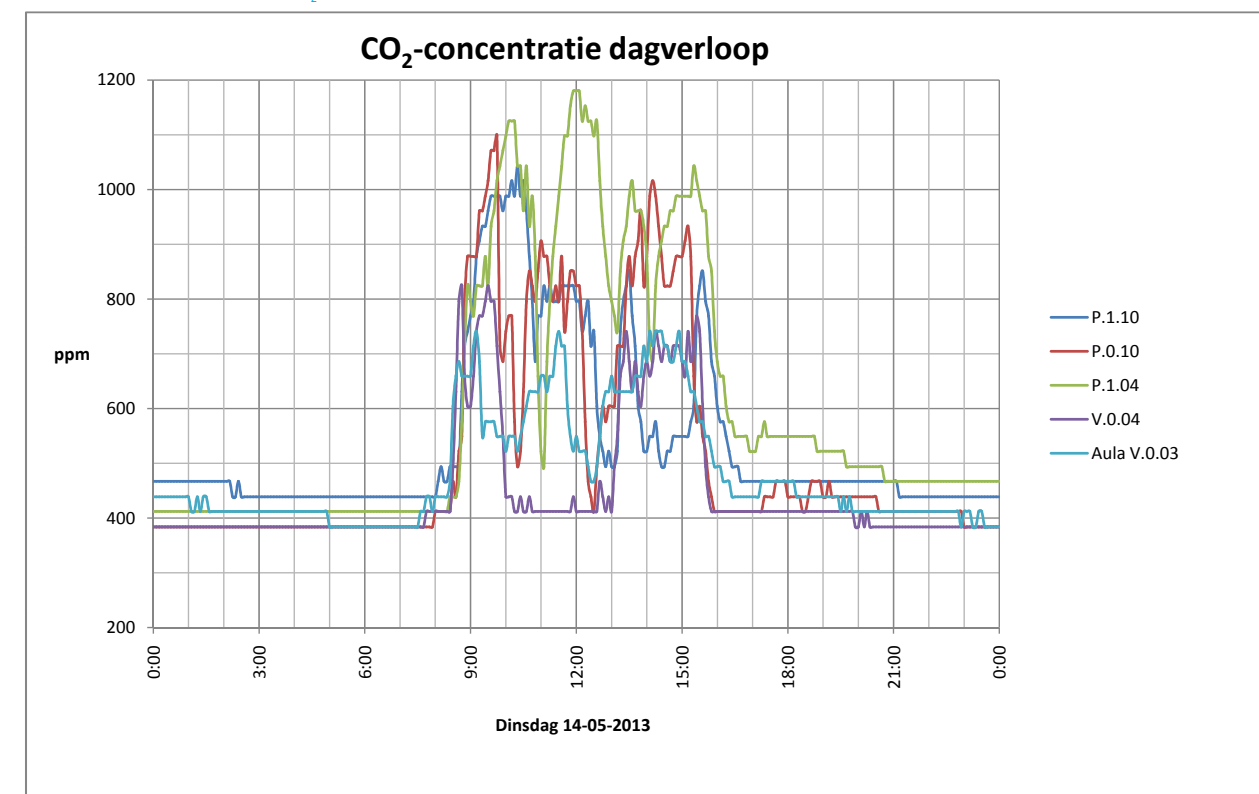
Opmerking 6.2.1.: Dit is het gemiddelde CO₂-concentratie gedurende de dagen dat er leerlingen aanwezig waren, echter is de nacht hierbij ook meegeteld. Dit is dus de gemiddelde concentratie van een hele week, dag en nacht. Dit is de reden dat dit gemiddelde zo laag is, ook de onderlinge verschillen zijn hier laag. Wanneer er een gemiddelde van de waarden van alleen de gebruikstijd zou worden berekend, zou dit onderling meer verschillen geven. Echter levert dit dezelfde conclusie op.

6.2.1. Validatie

De bovenstaande gegevens bevestigen dat bij lagere leeftijden en weinig leerlingen de CO₂-productie relatief laag is. Bij relatief een hogere leeftijd en veel leerlingen levert zoals te zien een hogere CO₂-productie op. Dit berekent dat de uitgangspunten voor dit onderzoek m.b.t. CO₂-productie klopt en dat er inderdaad energie te besparen is bij gebruik van CO₂-gestuurde ventilatie bij verschillende leeftijden.



Grafiek 6.2: CO₂-concentratie schoolgebouw Paltelaan



Grafiek 6.3: CO₂-concentratie; meting gedurende één dag

Gebouwinvoer Vabi Elements

7

7.1.
Uitgangspunten Vabi

7.1.1.
Interne warmtelast

Interne warmtelast is op te geven als personen, apparatuur of verlichting. Bij elk van deze mogelijkheden gaat het uiteindelijk om het afgegeven vermogen in W. Dit is in te voeren als W of W per m² vloeroppervlak. Wanneer het in W/m² wordt opgegeven wordt dit alsnog van een ruimte omgezet naar W voor de gehele ruimte.

7.1.2.
Apparatuur

Er is bepaald per lokaal welke apparatuur er aanwezig is. De omschrijving van de apparatuur, de aantallen en het afgegeven vermogen zijn te zien in afbeelding 2. Doordat deze apparatuur niet altijd aan staat, is dit gekoppeld aan een tijdschema waarbij de apparatuur voor 50 % aan staat. Dit is bepaald aan de hand van een bezoek aan de school en overleg met de docenten over het gebruik van de apparaten. Bij het tijdschema wordt dus voor apparatuur 50 % van de opgegeven warmte afgegeven. Gemiddeld werden vier computers per lokaal aangetroffen en een beamer of smartboard. Voor apparatuur komt dit neer op 10 W/m² aan voelbaar warmtevermogen.

7.1.3.
Personen

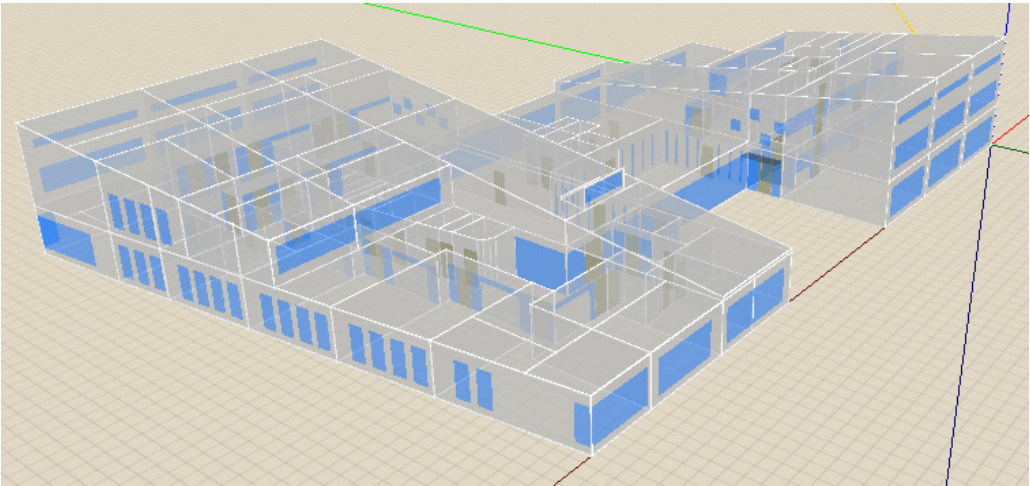
Activiteit: Zittende activiteiten passen bij een metabolisme van 1,2 “met”. De grootheid “met” staat voor afgegeven warmte in W per m² huidoppervlak, afhankelijk van het soort activiteit. Bij 1,2 met wordt er 130 W afgegeven aan voelbaar warmtevermogen.
 Kleding: In de zomer wordt er minder kleding gedragen en dus treedt er meer warmteafgifte op. Dit is afhankelijk van de clo-waarden, in de zomer is dit volgens ISSO 32 0,7 clo en in de winter 0,9 clo. Door deze weerstand van de kleding wordt er in de zomer 90 W afgegeven, in de winter 80 W. Hiervan wordt 50 % convectief afgegeven, oftewel in de zomer 45 W per persoon, in de winter 40 W.

7.1.4.
Verlichting

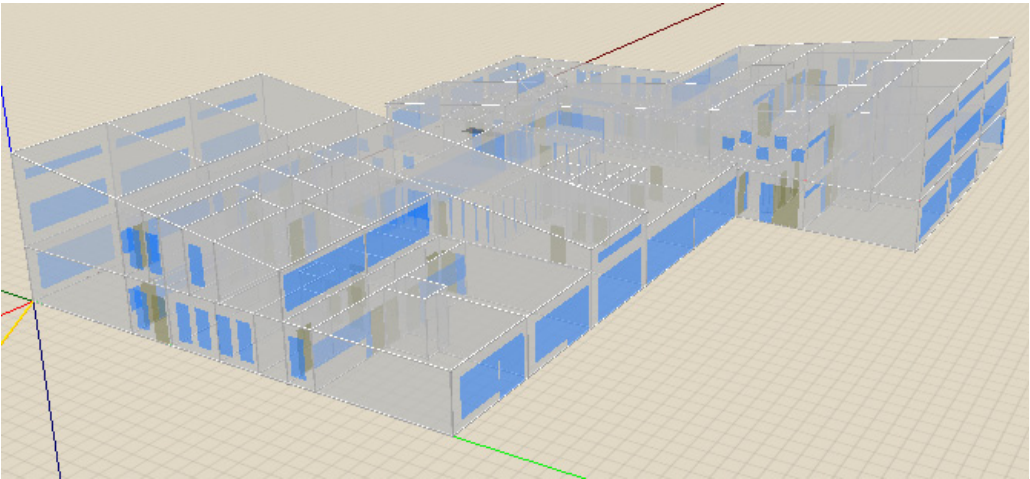
Als verlichting zijn er in het gebouw twee typen aangetroffen, te zien in tabel 7.3. Deze zijn als aantallen per ruimte ingevoerd, gemiddeld zijn er zes (dubbele) TL-armaturen te vinden in elk lokaal. Bij de aula’s, toiletten en bergingen waren de Philips spaarlampen te vinden. Voor de verlichting geldt dat deze de gehele tijd aan staat bij gebruikstijd. Bij de twee TL-armaturen bij het raam was een daglichtregeling te zien, echter was deze niet goed ingesteld en is deze dus ingevoerd als gewone verlichting. De verlichting is als inbouwarmatuur ingevoerd, zonder luchtafzuiging. Hierdoor wordt een convectiefactor van 0,72 aangehouden. Dit berekend dat 72 % van de opgegeven vermogen afgegeven wordt als convectief vermogen. Hierbij is zoals genoemd per TL-armatuur een conventioneel voorschakelapparaat van 10 W meegerekend. Voor verlichting komt dit neer op 7 W/m² aan voelbaar warmtevermogen.

7.1.5.
Zonwering

In het gebouw is zonwering aangetroffen aan de voorgevel en linkergevel. Deze hebben als oriëntatie respectievelijk Zuid-Oost en Zuid-West. In de overige gevels is er geen zonwering aangetroffen. Deze zonwering is handbediend en dient in Vabi opgegeven te worden als schakelwaarde. Wanneer de binnenkomende zonnewarmte boven de schakelwaarde is wordt de zonwering gebruikt. De binnenkomende zonnewarmte omvat de directe, diffuse en reflecterende zoninval. Bij handgeschakelde zonwering wordt volgens ISSO 32 een schakelwaarde van 300 W/m² aanbevolen, deze is dan ook ingevoerd in Vabi.
 Bij het gebruik van buitenzonwering, gaat er alsnog zonlicht naar binnen. Een deel van de zoninstraling wordt gereflecteerd door de zonwering. Indien de schakelwaarde van 300 W/m² overschreden wordt, wordt de g-waarde verlaagd. In dit geval wordt de zoninstraling door de zonwering met 23 % geabsorbeerd.



Afbeelding 7.1: Vabi invoer gebouw voorkant



Afbeelding 7.2: Vabi invoer gebouw achterkant

Plaatsing (aantal)	Apparatuur	Afgegeven vermogen
Lokalen Paulusschool (4)	Dell optiplex 790 (USFF)	52 W
Lokalen Paulusschool (4)	Samsung syncmaster 740B	34 W
Lokalen Vijverburgh (3)	HP Compaq 6200 (SFF)	32W
Lokalen Vijverburgh (3)	Philips LCD monitor 170B5CS 3	33 W
Lokalen Vijverburgh (1)	Beamer Epson EB-460	180 W
Lokalen (helft) Paulusschool (1)	Beamer Hitachi ED-A111	200 W
Lokalen (helft) Pauluschool (1)	Samsung TV	120 W

Plaatsing (aantal) *	Verlichting	Afgegeven vermogen
Aula (68), speellokaal (36), toiletten (4)	Philips spaarlamp	26 W**
Lokalen Pauluschool BG (8)	Philips Master TL5 HE 28W/83	28 W**
Lokalen Pauluschool 1e verdieping (12)	Philips Master TL5 HE 28W/83	28 W**
Lokalen Vijverburgh (12)	Philips Master TL5 HE 28W/83	28 W**

* Verlichting is per twee uitgevoerd, aantallen zijn per stuk genoemd
 ** Per twee TL5 komt daar nog 10 W aan voorschakelapparatuur bij

Tabel 7.3: Afgegeven vermogen van apparatuur en verlichting
 [Bron: fabrikanten apparatuur]

7.1. Uitgangspunten Vabi

7.1.5. Buitenklimaat

Voor het simuleren is een klimaatbestand nodig. Hierin staat de buitentemperatuur, zonninstraling, windsnelheid, windrichting en absolute luchtvochtigheid. Deze worden gebruikt om de transmissie van buiten naar binnen te bepalen. Als referentiejaar wordt een klimaatbestand gebruikt van het jaar 1964/1965. Deze start op 1 april 1964 en eindigt op 31 maart 1965. Dit klimaatjaar wordt gezien als een goed gemiddelde, waarin een goede lange koude periode en warme periode zit. Dit klimaatjaar zorgt voor betrouwbare eindresultaten, die dichtbij de werkelijkheid zitten. Er zijn ook nog nieuwere klimaatjaren uit 2008 (NEN 5060), die actueler zijn t.o.v. het huidige klimaat. Echter worden deze nog niet overal als standaard toegepast, daardoor is hier in dit geval niet mee gerekend.

7.1.6. Grondtemperatuur

Er is een kruipruimte aanwezig; volgens ISSO-publicatie 32 wordt dan een kruipruimtetemperatuur van 12°C aangehouden.

7.1.7. Infiltratie

Het infiltratieverlies is uitgedrukt in 0,1 m³ per m³ luchtinhoud per uur [0,1 m³.h]/[m³.h] volgens ISSO-publicatie 32. Deze is voor alle ruimten ingevoerd.

7.1.8. Ventilatie

Naar aanleiding van de eerder berekende CO₂-concentratie per ruimte, is hiervoor het benodigde debiet per ruimte bepaald. Als voorbeeld (afbeelding 7.4) is hier een tijdschema te zien met ventilatie van 9:00 tot 16:00. Deze debieten zijn op te geven als dag- en nachtstand. Deze kunnen gebruikt worden om twee standen op te geven, zie afbeelding 7.5. De gebruikte debieten zijn te vinden op pagina 37.

7.1.9. Luchtbehandeling

Deze is ingevoerd als een luchtbehandelingskast met een verwarmingsbatterij en koelbatterij. Tevens is hier een kruisstroom-warmtewisselaar met een rendement van 55 % toegepast.

7.1.10. Verwarming/koeling

Deze is ingevoerd als een 4 pijps-fancoilunit. Deze kan lokaal verwarmen én koelen. Vloerverwarming en vloerkoeling is niet ingevoerd door probleem 5 op pagina 40.

7.1.11. Bouwkundig

De bouwkundige uitgangspunten die aangehouden zijn, zijn beschreven op pagina 34.

7.1.12. Koppeling

Uiteindelijk worden deze eigenschappen als hulpmiddelen gekoppeld aan sjablonen. De ruimten zijn te koppelen aan slablonen voor de ruimte-eisen, gebruik, bouwkundig, ventilatie en afgiftesysteem.

Ruimte-eisen: Bevat de temperatuur setpoints voor de verwarming en koeling.

Gebruik: Bevat de interne warmteproductie door apparatuur, verlichting en personen.

Bouwkundig: Bevat de bouwkundige schil die genoemd is in hoofdstuk 5.

Ventilatie: Bevat de infiltratie en ventilatie die als m³/h op is te geven (afbeelding 1)

Afgiftesysteem: Bevat afgiftesystemen voor verwarming, koeling en ventilatie. Hier is dit ook te koppelen aan een tijdschema waarmee aan te geven is wanneer een installatie in gebruik is. Het tijdschema van afbeelding 2 geeft als voorbeeld aan dat er op vrijdag 9:00 tot 16:00 geventileerd wordt.

Maandag	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Dinsdag	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Woensdag	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Donderdag	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Vrijdag	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Zaterdag	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Zondag	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Feestdag	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Vakantiedag	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24

Bedrijfswijze:

Afbeelding 7.4: Vabi invoer tijdschema installatie

Omschrijving

Naam: Ventilatie constant 950 ppm 8 jaar, 28 personen
Omschrijving:
Visualisatie: 0; 255; 255

Infiltratie

Gebouwsimulatie: Eigen infiltratie (windafhankelijk)
Infiltratiedebiet windafhankelijk: 0 m/s 3 m/s 6 m/s Windsnelheid
0,10 0,10 0,10 1/h (m3/(m3.h))

Ventilatie:

Opgegeven ventilatiedebiet specificeert: Toevoer
Gebouwsimulatie: Eigen waarde
Ventilatiedebiet: Dag Nacht Nacht (voorwaardelijk)
735,0 0,0 0,0 m³/h
Ventilatiedebiet door open ramen: 0 m/s 3 m/s 6 m/s Windsnelheid
0,00 0,00 0,00 1/h (m3/(m3.h))

Afbeelding 7.5: Vabi invoer ventilatiedebiet/infiltratie

7.2. Vabi Problemen & oplossingen

Om de uitkomsten uit Vabi Elements zo nauwkeurig en betrouwbaar mogelijk te maken zijn er enkele omwegen gemaakt. Deze omwegen hebben als oorzaak dat Vabi Elements de onderstaande beperkingen/foutmeldingen heeft. Per beperking is hieronder uitgelegd wat de oorzaak is en wat voor oplossing er gehanteerd werd. Sommige oplossingen werden door een andere beperking weer teniet gedaan, in dat geval is er vermeld welke uiteindelijk gehanteerd is.

7.2.1. Ventilatie

Probleem 1: Het tijdschema heeft invloed op de ventilatie, verwarming en koeling. Wanneer dit tijdschema van 8:00 tot 17:00 ingesteld is, staat gedurende deze tijd de ventilatie, verwarming en koeling aan (verwarming en koeling alleen indien dit op het betreffende moment benodigd is). Dit is echter niet de situatie die gewenst is. Gedurende de overige tijden staan de installaties op nachtstand.

Oplossing 1: De setpoint voor binnentemperatuur voor verwarming en koeling staan in op de dag- en nachtstand expres op 20°C voor dag én nacht. Voor koeling is dit 24°C voor dag én nacht. Voor de ventilatie staat voor de nachtstand een debiet van 0 m³/h. Op deze manier blijft de verwarming en koeling `s nachts ook aan, maar gaat de ventilatie alleen aan wanneer dit aangestuurd is op het tijdschema. Wanneer in elke variant de verwarming en koeling in de nacht aan staan, blijft de potentiële energiebesparing hetzelfde wanneer dit bij elke variant uit zou staan.

Probleem 2: Er wordt alleen met gehele uren gerekend. Echter uit stap 2 is gebleken dat er op een normale dag 6,5 uur geventileerd dient te worden wanneer dit CO₂-gestuurd is.

Oplossing 2: Om dit in te voeren is de simulatie voor variant 4 en 5 ieder tweemaal uitgevoerd. Bij één simulatie is de tijd van 9:00 tot 15:00 aangehouden en bij de tweede simulatie 9:00 tot 16:00. Vervolgens is tussen deze twee voor elk onderdeel het gemiddelde bepaald.

Probleem 3: Het tijdschema is gekoppeld aan een luchtbehandelingskast. Bij gebruik van meerdere tijdschema`s wordt er bij één ingevoerde luchtbehandelingskast altijd teruggekoppeld op het tijdschema met de meeste uren. Bij meerdere tijdschema`s wordt er dus standaard gerekend met tijdschema 1, wat dus niet de bedoeling is.

Oplossing 3: Per verschillend tijdschema is er één luchtbehandelingskast aan gekoppeld (in de praktijk is dit nooit zo). Bij alle varianten zijn even veel tijdschema`s en luchtbehandelingskasten ingevoerd als bij de laatste variant. Echter hebben de tijdschema`s in de 1e varianten dezelfde uren. Voor de laatste varianten geldt dat elk tijdschema verschillende uren heeft. Dit is op deze manier gedaan om een eventuele afwijking met de varianten qua invoer, te voorkomen.

Opmerking: Deze oplossing werkt uiteindelijk niet door probleem 4. Dit probleem is gecorrigeerd met oplossing 5.

Probleem 4: Bij de invoer van meerdere luchtbehandelingskasten komt er een foutmelding dat er meerdere luchtbehandelingskasten voorkomen in het gebouw. Vabi Elements gaat er voor de invoer daarom van uit dat dit niet de bedoeling is en voert bij alle tijdschema`s automatisch dezelfde luchtbehandelingskast in. Daardoor wordt er per ruimte gerekend met hetzelfde tijdschema, wat dus niet de bedoeling is.

Oplossing 4: Het blijkt dat de oplossing uit probleem 4, niet ingevoerd kan worden in Vabi. Dit komt doordat het model maar één luchtbehandelingskast kan invoeren per gebouw. Er zijn maximaal vier verschillende tijdschema`s mogelijk in het gebouw. Wanneer er per berekening alleen de ruimten uitgerekend worden die aan tijdschema 1 gekoppeld is, geeft dit geen foutmelding en rekent dit gewoon door. Wanneer dit dus voor alle tijdschema`s afzonderlijk wordt gedaan, is het mogelijk de verschillende tijdschema`s in het gebouw door te rekenen. Er komen dus vier berekeningen uit: de ruimten gekoppeld aan tijdschema 1, de ruimten gekoppeld aan tijdschema 2, de ruimten gekoppeld aan tijdschema 3 en de ruimten gekoppeld aan tijdschema 4. Na deze berekeningen wordt alles bij elkaar opgeteld en komt er dus het juiste energieverbruik uit. Ook in overleg met de servicedesk van Vabi bleek dat er geen andere oplossing dan dit zou zijn. In de daguitvoeren is ook gecontroleerd of deze er op de opgegeven uren centraal wordt verwarmd, en dit bleek uiteindelijk te kloppen.

Opmerking: Deze oplossing werkt uiteindelijk niet door probleem 5. Dit probleem is gecorrigeerd met oplossing 5.

Probleem 5: Wanneer oplossing 4 wordt gehanteerd, neemt Vabi aan dat de aangrenzende ruimte die op dat moment niet doorgerekend is, een identieke ruimte is. Tussen lokalen geeft dit een geringe afwijking, maar tussen lokalen en ruimten als gangen gaat dit fout. In dat geval beschouwt Vabi de gang als lokaal, terwijl dit niet dezelfde binnentemperatuureigenschappen als een lokaal heeft. Dit heeft als gevolg dat de warmtetransmissie tussen ruimten niet goed wordt berekend. Dit geeft vervolgens een verkeerd beeld van het energieverbruik. Na verschillende correcties is bij benadering de afwijking niet verder terug te dringen van 5 %, wat voor dit onderzoek teveel is.

Oplossing 5: Door met één tijdschema voor het gehele gebouw te werken gaan probleem 3, 4 en 5 weg. In het oorspronkelijke idee zijn de ruimten als kantoren en aula`s als ruimten met constante ventilatie aangehouden (en dus andere tijdschema`s). In deze oplossing wordt er met één tijdschema gewerkt, de ventilatie bij de ruimten als kantoren en aula`s worden op 0 m³/h gezet, zodat de invloeden daarvan over alle varianten constant blijft. Omdat het bij dit onderzoek om de besparing in de lokalen gaat, is door de andere ruimten 'buiten spel' te zetten een betrouwbare energiebesparing te realiseren, die minder afhankelijk is van het soort gebouw.

7.2.2. Verwarming/koeling

Probleem 5: De invoer van vloerverwarming en vloerkoeling kan niet standaard ingevoerd worden doordat er dan teveel afgiftesystemen waren. In overleg met Vabi is deze daarom ingevoerd als betonker-nactivering, met de afwerklaag als thermisch actieve laag. Op deze manier zou dit overeenkomen met vloerverwarming en vloerkoeling. Echter leverde dit niet genoeg vermogen op wat benodigd was voor verwarmen en koelen, doordat Vabi zelf uitrekende wat het maximaal vermogen hiervan zou zijn aan de hand van de thermische laag.

Oplossing 5: Doordat de setpoints voor verwarmen en koelen op deze manier niet werden gehaald is er een fancoil-unit ingevoerd. Deze leverde voldoende vermogen op waardoor de setpoints wél werden gehaald.

V a r i a n t e n o n d e r z o e k

8

8.1. Uitgangspunten varianten

Per variant zijn er uitgangspunten aangehouden. Deze zijn te vinden in afbeelding 8.1. Deze uitgangspunten hebben betrekking op de invoer in Vabi. Bij het bepalen van deze uitgangspunten is er gekeken naar invloeden waarmee er potentiële energiebesparingen zijn te behalen. Bij variant 4 en 5 is uiteindelijk sprake van CO₂-gestuurde ventilatie. De genoemde ventilatiedebieten zijn bepaald aan de hand van de ontwikkelde spreadsheet. Daaruit bleek dat voor de varianten de genoemde debieten benodigd waren om onder CO₂-concentratie van 950 ppm te blijven.

Variant 1

Er is gekeken aan de hand van de plattegronden hoeveel ventilatie er per ruimte benodigd is aan de hand van de ventilatie-eisen van Bouwbesluit 2012. Deze ventilatie zou dus benodigd zijn indien het gebouw getoetst wordt aan Bouwbesluit 2012. Bij de lokalen geldt dan een ventilatiedebiet van 890 m³/h.

Variant 2

Bij deze variant is er gekeken met wat voor constant ventilatiedebiet er een CO₂-concentratie van 950 ppm te behalen is. Bij de lokalen geldt dan een ventilatiedebiet van 890 m³/h. Hierbij is te zien dat dit overeenkomt met variant 1. Dit komt doordat er berekend is dat het ventilatiedebiet van Bouwbesluit 2012 gelijk is aan het benodigde ventilatiedebiet wanneer er 11-jarigen in het lokaal aanwezig zijn. Oftewel, Bouwbesluit 2012 gaat voor de ventilatie-eisen van scholen uit van de CO₂-productie van een 11-jarige. De uitkomsten van deze variant zullen dus hetzelfde zijn als variant 1.

Variant 3

Bij deze variant is er gekeken met wat voor constant ventilatiedebiet er een CO₂-concentratie van 950 ppm te behalen is indien de lokalen verspreid zijn met 5-, 8- en 11-jarigen. Bij de lokalen geldt dan een ventilatiedebiet van 590 m³/h voor 5-jarigen, 735 m³/h voor 8-jarigen en 890 m³/h voor 11-jarigen. De grafieken van deze ventilatiedebieten zijn te zien in bijlagen B1 - B3.

Variant 4

Bij deze variant is er gekeken met wat voor variabel ventilatiedebiet (oftewel CO₂-gestuurd) er een CO₂-concentratie van 950 ppm te behalen is indien alle lokalen vol zitten met 11-jarigen. Er wordt met hetzelfde debiet als bij variant 2 geventileerd. Echter doordat dit CO₂-gestuurd is, is bepaald hoe vaak de ventilatie dan aan zou gaan om onder de 950 ppm te blijven. Er bleek dat dit dan 6,5 uur per dag met dit debiet geventileerd zou worden. Daarom is er een kortere ventilatietijd aangehouden van 9:00 tot 15:30.

Variant 5

Bij deze variant is er gekeken met wat voor variabel ventilatiedebiet (oftewel CO₂-gestuurd) er een CO₂-concentratie van 950 ppm te behalen is indien alle lokalen vol zitten met 5-, 8- en 11-jarigen. Bij de lokalen geldt dan een ventilatiedebiet van 590 m³/h voor 5-jarigen, 735 m³/h voor 8-jarigen en 890 m³/h voor 11-jarigen. Er wordt met hetzelfde debiet als bij variant 3 geventileerd, alleen dit dezelfde tijd benodigde als bij variant 4.

Opmerking:

Constante uitgangspunten voor het gebouw, de installaties en interne warmteproductie zijn beschreven in hoofdstuk 6: Uitgangspunten Vabi. Deze zijn daar beschreven doordat dit uitgangspunten zijn die constant voor alle varianten gelden. Op deze pagina zijn alle uitgangspunten beschreven die voor elke variant verschillend zijn.

Uitgangspunten per variant

- 1

Constant ventilatiedebiet
52 weken van 8:00-17:00 uur
Geen vakanties
Verwarming/koeling via 4-pijps fancoil-unit
Infiltratie 0,1 m³/h per m³ luchtvolume
Kruisstroom WTW luchtbehandelingskast (rendement = 0,55)
Periode 01-04-1964 tot 31-03-1965
11-jarigen
Aula, speellokaal, overige ruimten geen ventilatie
- 2

Constant ventilatiedebiet
52 weken van 8:00-17:00 uur
Geen vakanties
Verwarming/koeling via 4-pijps fancoil-unit
Infiltratie 0,1 m³/h per m³ luchtvolume
Kruisstroom WTW luchtbehandelingskast (rendement = 0,55)
Periode 01-04-1964 tot 31-03-1965
11-jarigen
Aula, speellokaal, overige ruimten geen ventilatie
- 3

Constant ventilatiedebiet
52 weken van 8:00-17:00 uur
Geen vakanties
Verwarming/koeling via 4-pijps fancoil-unit
Infiltratie 0,1 m³/h per m³ luchtvolume
Kruisstroom WTW luchtbehandelingskast (rendement = 0,55)
Periode 01-04-1964 tot 31-03-1965
5-,8-,11-jarigen verspreid over de lokalen
Aula, speellokaal, overige ruimten geen ventilatie
- 4

Variabele ventilatie d.m.v. CO₂-sturing
52 weken van 9:00-15:30 uur, wo van 9:00-12:00
Geen vakanties
Verwarming/koeling via 4-pijps fancoil-unit
Infiltratie 0,1 m³/h per m³ luchtvolume
Kruisstroom WTW luchtbehandelingskast (rendement = 0,55)
Periode 01-04-1964 tot 31-03-1965
11-jarigen
Aula, speellokaal, overige ruimten geen ventilatie
- 5

Variabele ventilatie d.m.v. CO₂-sturing
52 weken van 9:00-15:30 uur, wo van 9:00-12:00
Geen vakanties
Verwarming/koeling via 4-pijps fancoil-unit
Infiltratie 0,1 m³/h per m³ luchtvolume
Kruisstroom WTW luchtbehandelingskast (rendement = 0,55)
Periode 01-04-1964 tot 31-03-1965
5-,8-,11-jarigen verspreid over de lokalen
Aula, speellokaal, overige ruimten geen ventilatie

Afbeelding 8.1: Uitgangspunten varianten

8.2. Het thermisch binnenklimaat

Om te kijken of in Vabi precies gebeurt wat de bedoeling is, is er als voorbeeld gekeken wat er bij lokaal P.O.10 gebeurt.

De binnentemperatuur blijft in elke variant ongeveer gelijk door de setpoints van de verwarming en koeling. Hierdoor wordt er meer of minder vermogen afgegeven om deze setpoints te halen.

Onderstaand is per onderdeel uitgelegd wat er precies gebeurt tussen een variant waar er lang wordt geventileerd (variant 2) en de variant waar er relatief korter wordt geventileerd, oftewel wat er gebeurt wanneer er CO₂-sturing wordt toegepast. De inblaasttemperatuur geeft aan dat er op dat moment geventileerd wordt. Dit zijn daguitdraaien van een dag in april (verwarmen, grafiek 8.2 en 8.3) en een dag in de augustus (koelen, grafiek 8.4 en 8.5). De schaal van deze daguitdraai is verschillend, daarom is het maximum vermogen erbij vermeld waarmee er verwarmd of gekoeld wordt.

8.2.1. Centraal verwarmen

In afbeelding 8.2 (variant 2) is te zien dat er gedurende 8:00 tot 17:00 centraal wordt verwarmd. In afbeelding 8.3 (variant 5) is er te zien dat er van 9:00 tot 15:00 centraal wordt verwarmd.

Er is te zien dat het maximum vermogen bij variant 5 lager is dan bij variant 2. Ook wordt er gedurende een korte tijd centraal verwarmd, daardoor treedt er een ruime energiebesparing op.

8.2.2. Centraal koelen

In vergelijking met centraal verwarmen wordt in dit geval per variant met dezelfde tijden centraal gekoeld. Ook hier is te zien dat voor het centraal koelen vergeleken met variant 2 (grafiek 8.4) er minder lang gekoeld wordt bij variant 5 (grafiek 8.5), en met een lager maximum vermogen.

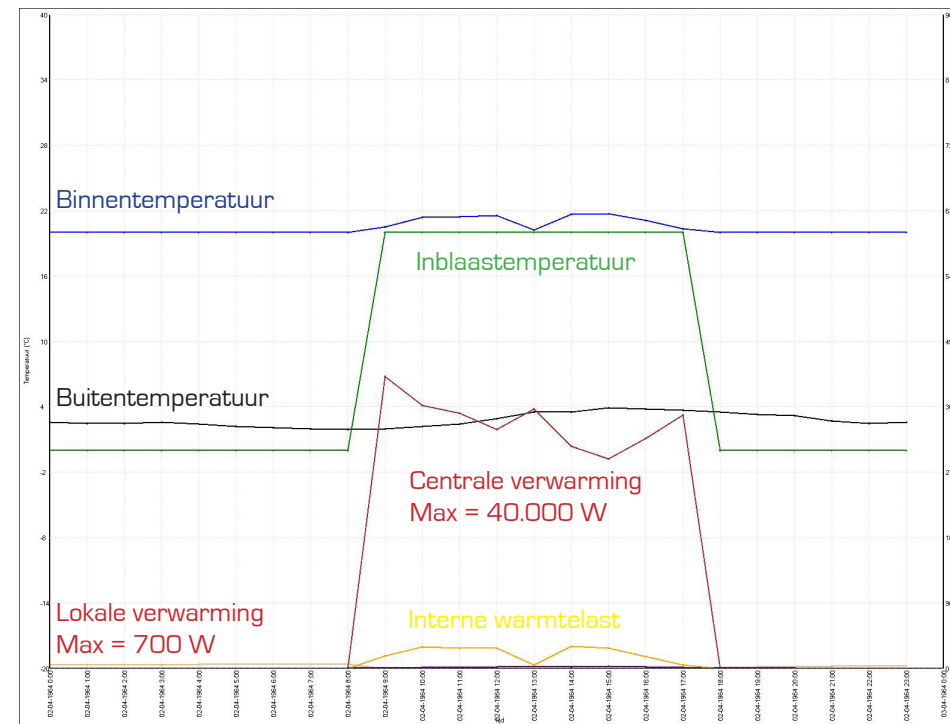
8.2.3. Lokaal verwarmen

Het is moeilijk te zien in grafiek 8.2 en 8.3, maar de lokale verwarming blijft ongeveer gelijk, deze blijft even lang verwarmen maar met een wat lager vermogen.

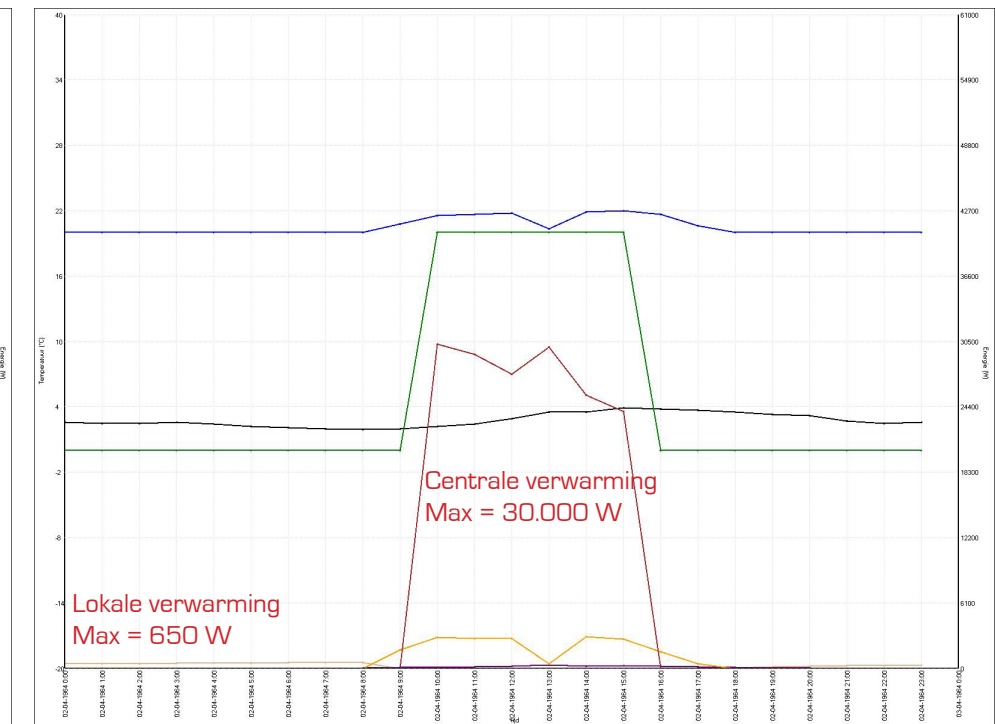
8.2.4. Lokaal koelen

Er is te zien in grafiek 8.4 en 8.5 dat de lokale koeling bij variant 2 met een hoger maximum vermogen gaat koelen en gaat gedurende deze tijd met een hoger vermogen koelen. Dit zorgt ervoor dat de lokale koeling relatief veel toeneemt.

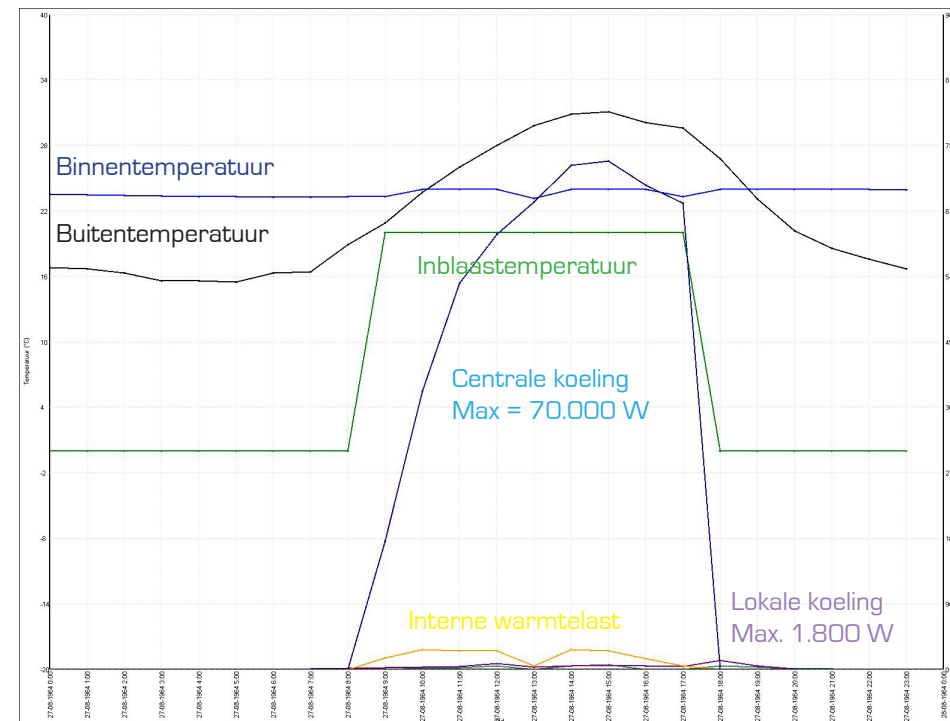
Opmerking 8.2.1: Het vermogen voor centrale verwarming en koeling is hier zo hoog omdat dit voor het gehele gebouw is. De lokale verwarming en koeling wordt hier wel alleen voor het betreffende lokaal aangegeven.



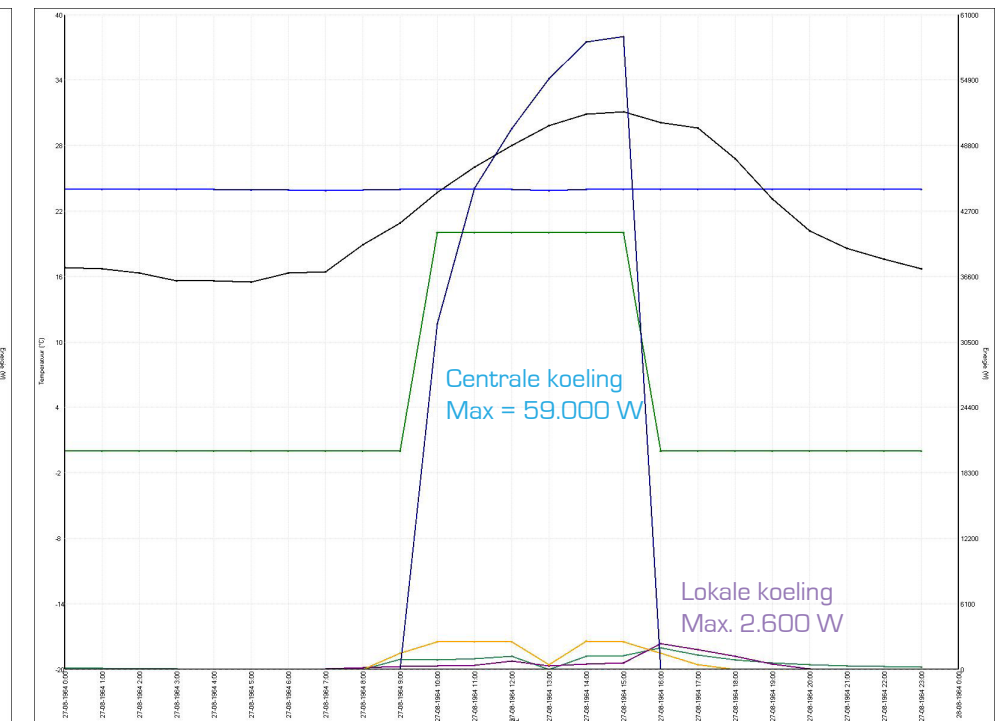
Grafiek 8.2: Lokaal P.O.10 verwarmen variant 2



Grafiek 8.3: Lokaal P.O.10 verwarmen variant 5



Grafiek 8.4: Lokaal P.O.10 koelen variant 2



Grafiek 8.5: Lokaal P.O.10 koelen variant 5

8.3. Het energieverbruik t.b.v verwarmen

Verwarming is te verdelen in lokale en centrale verwarming. Centrale verwarming wordt vanuit één centraal punt verwarmd. Dit geldt voor de verwarmingsbatterij in de luchtbehandelingskast, die de verwarmde lucht vervolgens door het gehele gebouw verspreid. Er is sprake van lokale verwarming als de warmte in de ruimten zelf worden afgegeven, in dit geval is dit dus de 4-pijps Fancoil-unit.

8.3.1. Centrale verwarming

In de uitkomsten (grafiek 8.6 en 8.7) is te zien dat het energieverbruik voor centraal verwarmen sterk afneemt. Doordat er minder lucht ververst wordt bij de toenemende varianten, hoeft er minder lucht verwarmd te worden in de winter door de verwarmingsbatterij. Hierdoor is er minder energie benodigd.

8.3.2. Lokale verwarming

Er wordt minder lucht ingeblazen met een temperatuur van 20 °C. De lokale verwarming zorgt ervoor dat de temperatuur van de ruimte boven de 20 °C blijft. Omdat T_i hierbij even warm is als $T_{inblaas}$ maakt het hierbij niet uit of er meer of minder lucht van 20 °C wordt ingeblazen. De lokale verwarming blijft dan evenveel stoken. Echter is te zien dat de lokale verwarming in de resultaten wel gering afneemt. De verklaring hiervoor is dat er minder lucht wordt ingeblazen, maar ook tegelijk minder lucht wordt afgezogen. Hierdoor blijft de warme lucht langer hangen in de ruimte en zal de lokale verwarming wat minder vermogen verbruiken, waardoor het energieverbruik gering afneemt.

8.4. Het energieverbruik t.b.v koelen

Ook koeling is te verdelen in lokale en centrale koeling. Centrale koeling wordt centraal gekoeld in de vorm van de koelingsbatterij die zich in de luchtbehandelingskast bevindt. Er is sprake van lokale koeling in de vorm van de 4-pijps Fancoil-unit die zich in de lokalen bevinden.

8.4.1. Centrale koeling

Er is te zien dat de centrale koeling sterkt afneemt, ook doordat net zoals bij centrale verwarming er minder lucht verwerkt hoeft te worden om te koelen. Hierdoor is er net zoals bij centrale verwarming minder energie benodigd.

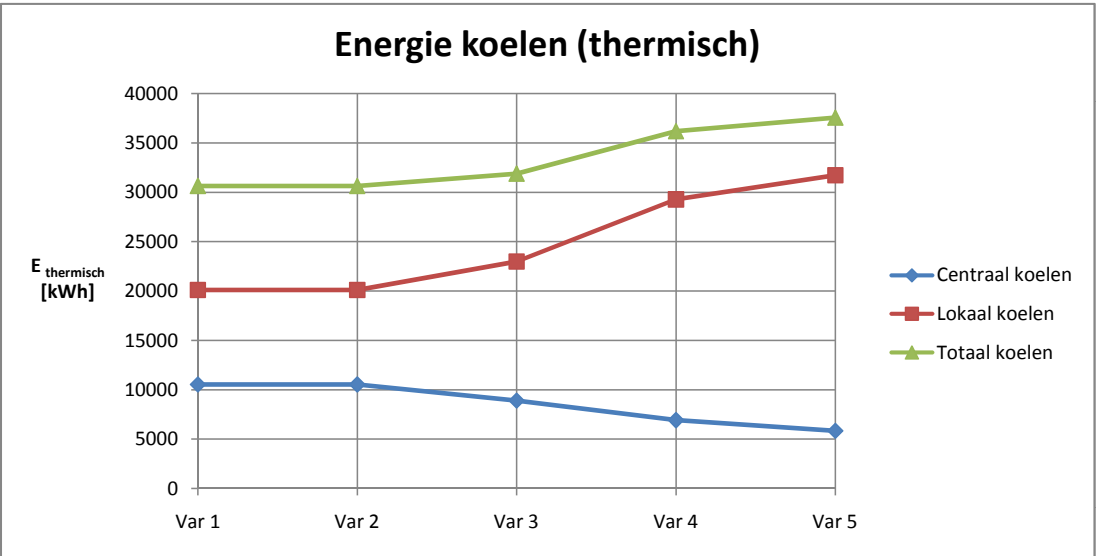
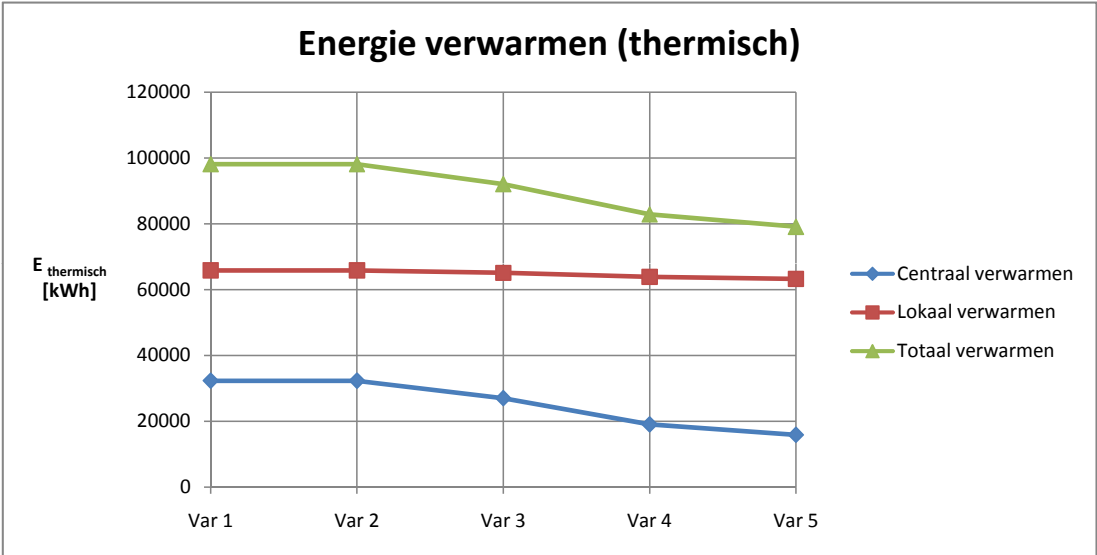
8.4.1. Lokale koeling

Voor de lokale koeling is te zien dat deze juist toeneemt bij minder ventilatie. In de zomer neemt de temperatuur zoveel toe door de interne warmtelast, de zoninstraling en de (in beperkte mate) gekoelde binnenlucht, dat de lokale koeling (vloerkoeling) vaker aangaat. In de zomer moet er zoveel interne warmte worden afgevoerd met een kleinere hoeveelheid lucht, dat dit niet goed genoeg lukt. Daardoor gaat de koeling vaker aan.

8.5. Totaal energieverbruik verwarmen/koelen

In tabel 8.8 is het totale energieverbruik te zien van het koelen en verwarmen per variant. Er is te zien dat de totale verwarming afneemt, maar de totale koeling toeneemt. Echter bedraagt het energie-verbruik door koeling in verhouding veel minder dan het energieverbruik door verwarmen. Daardoor gaat de totale energieverbruik alsnog naar beneden.

Opmerking 8.5.1: Het genoemde energieverbruik is hier uitgedrukt in kWh. Het gaat hierbij om het thermisch vermogen, oftewel de energie die de opwekker voor verwarmen en koelen levert aan het gebouw. Hierbij is er nog niet met de opwekkingsrendementen gerekend. Dit gebeurt in de paragraaf *Energieverbruik installaties*.



Grafiek 8.6 - 8.7: Thermisch energieverbruik verwarmen en koelen

	Var 1		Var 2		Var 3		Var 4		Var 5	
	Verwarmen	Koelen	Verwarmen	Koelen	Verwarmen	Koelen	Verwarmen	Koelen	Verwarmen	Koelen
Centraal [kWh]	32300	10543	32300	10543	26976	8910	19025	6929	15857	5850
Lokaal [kWh]	65836	20105	65836	20105	65090	22985	63850	29275	63243	31722
Totaal [kWh]	98136	30648	98136	30648	92066	31895	82875	36204	79100	37571
Centraal [%]	100%	100%	100%	100%	84%	85%	59%	66%	49%	55%
Lokaal [%]	100%	100%	100%	100%	99%	114%	97%	146%	96%	158%
Totaal [%]	100%	100%	100%	100%	94%	104%	84%	118%	81%	123%

Tabel 8.8: Waarden varianten thermisch energieverbruik en overgebleven energieverbruik in percentages.

8.6. Energieverbruik installaties

In de vorige paragraaf is het totaal thermisch energieverbruik bepaald. Echter is dit niet een helemaal eerlijke vergelijking, koeling heeft bijvoorbeeld andere opwekkingsrendementen vergeleken met verwarmen. Er is daarom naar twee installatieconcepten gekeken met verschillende opwekkingsinstallaties. De typen installaties met de daarbij behorende rendementen en COP die in de berekeningen zijn aangehouden. In tabel 8.9 is het totaal thermisch energieverbruik voor verwarmen en koelen uitgedrukt.

8.6.1. Installatie 1

- Verwarmen: HR-107 cv-ketel (rendement = 0,975)
- Koelen: Compressie koelmachine (COP = 3)

Installatie 1 gaat uit van één installatie voor opwekking van warmte, en één voor koude. Er is bij deze situatie al duidelijk te zien dat één kWh voor koeling ongeveer drie keer zo weinig energie nodig heeft in vergelijking met één kWh voor de opwekking van verwarming.

8.6.2. Installatie 2

- Verwarmen: Warmtepomp (COP = 4,81; Bétafactor = 0,80)
HR-107 cv-ketel (rendement bijstook = 0,95)
- Koelen: Warmtepomp (COP = 4,81; Bétafactor = 0,80)

Installatie 2 gaat uit van een meer duurzame installatie, waar de warmtepomp als hoofdopwekker werkt voor de verwarming en de cv-ketel als bijstook. De warmtepomp levert ook de koude voor koeling van het gebouw.

De Bétafactor die wordt vermeld laat de verhouding zien tussen het geleverde nominale vermogen door de warmtepomp en door de bijstook. Wanneer het maximum vermogen geleverd zou worden, zou in dat geval de warmtepomp 80 % van het vermogen leveren en de bijstook 20 %. Echter wordt in de praktijk het maximum vermogen bijna nooit bereikt. Vaak ligt dit benodigde vermogen veel lager, dus zal in dat geval de warmtepomp meer dan 80 % van het benodigde vermogen leveren. In tabel 8.10 uit NEN 7120 is te zien dat wanneer de warmtepomp 0,80 heeft als Bétafactor, de warmtepomp over een jaar 97 % van het totale energieverbruik aan verwarmen levert.

8.6.3. Verschillen

In tabel 8.11 is het energieverbruik te zien voor beide installaties. Doordat er bij installatie 2 meerdere opwekkingsinstallaties voor verwarmen zijn, is daar nog een totaalverbruik voor verwarmen en koelen te zien.

Er is te zien dat de benodigde energie voor installatie 1 veel hoger is dan bij installatie 2. Dit komt vanzelfsprekend doordat de warmtepomp voor elke kWh aan verbruik, er 4,81 kWh geleverd aan het gebouw. Omgerekend wordt er voor elk geleverde kWh, er ongeveer 0,2 kWh verbruikt door de warmtepomp. Echter wordt niet alles geleverd door de warmtepomp, in dit geval levert de cv-ketel 3 % van het totale verbruik voor verwarming. Als totaal voor verwarming is dit echter alsnog een grote besparing t.o.v. installatie 1 doordat een groot deel aan ‘gratis energie’ wordt opgewekt. Ook voor koeling geldt dat dit minder energie nodig heeft dan bij installatie 1.

Opmerking 8.6.1: Deze twee situaties met de bijhorende installaties zijn gekozen om de verschillen met de uiteindelijke energiebesparing te laten zien. In het geval van installatie 1 wordt er meer energie verbruikt dan bij installatie 2. De verwachting is dat de potentiële energiebesparing op de onderdelen verwarmen en koelen in verhouding hetzelfde zijn voor beide installaties. Ongeacht de installatie zal de besparing hetzelfde zijn doordat de installatie in alle doorgerekende varianten als het ware een constante factor is.

	Var 1		Var 2		Var 3		Var 4		Var 5	
	Verwarmen	Koelen	Verwarmen	Koelen	Verwarmen	Koelen	Verwarmen	Koelen	Verwarmen	Koelen
	32300	10543	32300	10543	26976	8910	19025	6929	15857	5850
	65836	20105	65836	20105	65090	22985	63850	29275	63243	31722
	98136	30648	98136	30648	92066	31895	82875	36204	79100	37571
Energie totaal verwarmen & koelen [kWh]	128784		128784		123961		119078		116670,5	
	100,0%		100,0%		96,3%		92,5%		90,6%	
	Verwarmen	Koelen	Verwarmen	Koelen	Verwarmen	Koelen	Verwarmen	Koelen	Verwarmen	Koelen
Energieverbruik [MJ]	353290	110333	353290	110333	331438	114822	298348	130333	284758	135256

Tabel 8.9: Totaal thermisch energieverbruik verwarmen en koelen

β	$F_{H;gen;sl,gpref}$	
	Woningen met individuele installatie	Overige gebouwen en installaties
0,00	0	0
0,05	0,15	0,12
0,10	0,30	0,25
0,15	0,43	0,35
0,20	0,55	0,48
0,30	0,75	0,79
0,40	0,85	0,91
0,50	0,95	0,92
0,60	0,98	0,94
0,70	1,00	0,95
0,80	1,00	0,97
0,90	1,00	0,98
1,00 of hoger	1,00	1,00
waarin:		
β	is de verhouding tussen het nominale vermogen van de preferente opwekkingstoestellen en het nominale vermogen van het warmteafgifte-systeem voor de desbetreffende rekenzone, bepaald volgens 14.6.3.2;	
$F_{H;gen;sl,gpref}$	is het aandeel in de warmtelevering van de preferente opwekkingsvoorziening of opwekkingsvoorzieningen.	

Tabel 8.10: Bétafactor warmtepomp en bijstook
[Bron: NEN 7120]

	Installatie 1	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4	Var 5
Verwarmen [MJ]	Hr-ketel	371884	371884	348882	314051	299745
Koelen [MJ]	Koude compressor	36778	36778	38274	43444	45085

	Installatie 2	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4	Var 5
Verwarmen [MJ]	Hr-ketel	10870	10870	10198	9180	8762
Verwarmen [MJ]	Warmtepomp*	71246	71246	66839	60166	57425
Koelen [MJ]	Warmtepomp*	22938	22938	23872	27096	28120
Totaal	Verwarmen	82116	82116	77037	69346	66187
	Koelen	22938	22938	23872	27096	28120

* Bij een bétafactor van 0,8; jaarrendement van 0,97%

Tabel 8.11: Elektrisch energieverbruik door installaties

8.7. Energieverbruik ventilator

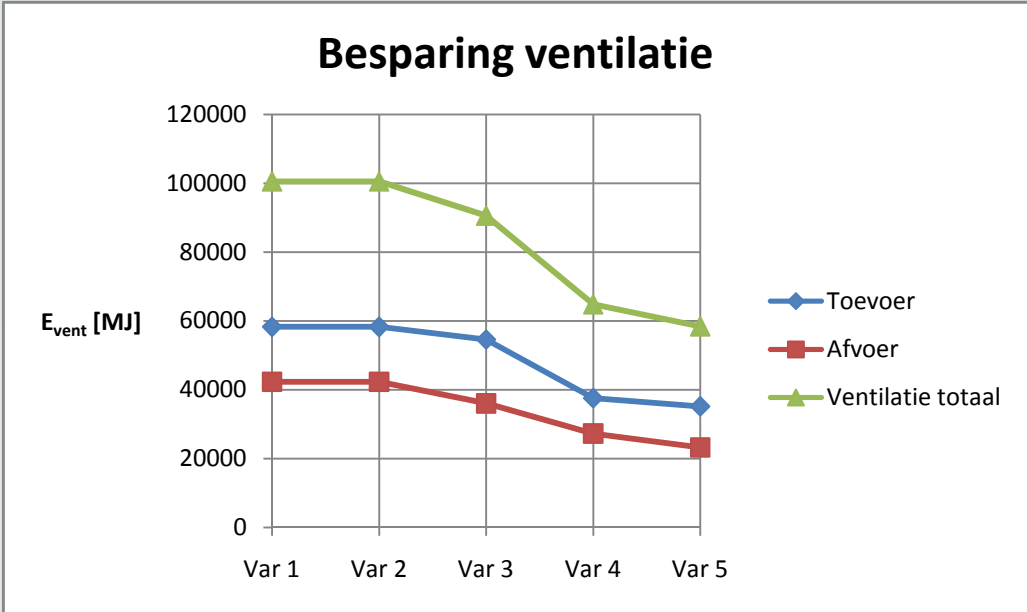
Een aanzienlijk deel van de energiebesparing ligt aan het energieverbruik door de ventilatoren, doordat deze minder hard gaan draaien. Als uitgangspunt zijn hierbij twee luchtbehandelingskasten genomen, één voor de Paulusschool en één voor De Vijverburgh. Bij het kiezen van een geschikte ventilator is het van belang dat deze toerengeregeld (druk geregeld) aangestuurd kan worden, het hoogste debiet wat er voor het gebouw benodigd is moet de ventilator aankunnen, maar ook het laagst mogelijke debiet moet het liefst in de grens zitten dat een zo hoog mogelijk rendement is te behalen. De ventilatoren leveren een bepaald asvermogen (P_{as}), om dit te leveren wordt de ventilator aangestuurd door een motor. De motor heeft per debiet een ander rendement wat te behalen is, dit is gemiddeld een rendement van 0,80. De vermogensgrafiek van de gekozen ventilator met de rendementen is te zien als bijlage C.

Per situatie is gekeken hoeveel debiet er maximaal benodigd is wanneer alle lokalen in gebruik zijn. In tabel 8.13 is te zien per situatie wat aangehouden is, gedurende hoeveel tijd dit gebruikt wordt, hier is het totaal van berekend en gecorrigeerd met het rendement wat hierbij hoort. Bij de toevoer is ervan uitgegaan dat het drukverschil wat overbrugt moet worden, 1000 Pa bedraagt. Dit is het drukverschil veroorzaakt door bochten in kanalen, weerstand door de luchtbehandelingskast, verwarming- en koelingbatterij en de warmteterugwinning. Bij de afvoer is uitgegaan van 700 Pa doordat deze lucht niet door de verwarming- en koelingbatterij gaat op de terugweg. In de praktijk wordt dit normaal berekend, maar het drukverschil ligt vaak rond deze waarden.

De energie benodigd voor de totale toe- en afvoer van het gebouw is voor alle varianten doorgerekend in grafiek 8.12. In tabel 8.14 staan de berekende waarden met de afname in percentages per variant. Er is te zien dat variant 4 de grootste besparing levert voor de energie voor de ventilatie, er gaat daar 25,7 % af t.o.v. variant 3. Bij variant 5 neemt de besparing toe tot 41,9 %.

Opmerking 8.7.1: In de werkelijke situatie is er sprake van decentrale ventilatie-units. Deze worden echter niet vaak toegepast. Voor dit onderzoek is er daarom gekeken naar de situatie waarbij een luchtbehandelingskast wordt gebruikt omdat dit voor o.a. een schoolgebouw, gebruikelijker is.

Opmerking 8.7.2: De waarden in tabel 8.14 is de energie in MJ die de aandrijfmotor verbruikt voor het aansturen van de ventilator. Het besparingspercentage slaat hier op het energieverbruik van de aandrijfmotor. Deze percentages zijn niet gelijk aan de afname in ventilatiehoeveelheid. De afname in ventilatiehoeveelheid is wat hoger doordat er hier verschillende rendementen voor de aandrijfmotor worden gerekend, door een verschillende efficiëntie per debiet.



Grafiek 8.12: Afname in energie ventilatie per variant

Paulusschool					
Toevoer 1000 Pa	Debiet [m³/h]	Tijd [s]	P _{as} [W] debiet	E _{vent} [MJ] ventilator	E _{vent} [MJ] motor
Variant 1	12460	8424000	3000	25272	31590
Variant 2	12460	8424000	3000	25272	31590
Variant 3	10185	8424000	2750	23166	28958
Variant 4	12460	5428800	3000	16286,4	20358
Variant 5	10185	5428800	2750	14929	18662

Afvoer 700 Pa	Debiet [m³/h]	Tijd [s]	P _{as} [W] debiet	E _{vent} [MJ] ventilator	E _{vent} [MJ] motor
Variant 1	12460	8424000	2200	18533	24385
Variant 2	12460	8424000	2200	18533	24385
Variant 3	10185	8424000	1800	15163	18954
Variant 4	12460	5428800	2200	11943	15715
Variant 5	10185	5428800	1800	9772	12215

De Vijverburgh					
Toevoer 1000 Pa	Debiet [m³/h]	Tijd [s]	P _{as} [W] debiet	E _{vent} [MJ] ventilator	E _{vent} [MJ] motor
Variant 1	8900	8424000	2500	21060	26658
Variant 2	8900	8424000	2500	21060	26658
Variant 3	7835	8424000	2400	20218	25592
Variant 4	8900	5428800	2500	13572	17180
Variant 5	7835	5428800	2400	13029	16493

Afvoer 700 Pa	Debiet [m³/h]	Tijd [s]	P _{as} [W] debiet	E _{vent} [MJ] ventilator	E _{vent} [MJ] motor
Variant 1	8900	8424000	1700	14321	17901
Variant 2	8900	8424000	1700	14321	17901
Variant 3	7835	8424000	1600	13478	17061
Variant 4	8900	5428800	1700	9229	11536
Variant 5	7835	5428800	1600	8686	10995

Tabel 8.13: Berekening energieverbruik door ventilatoren per variant

	E _{vent;toevoer} [MJ]	E _{vent;afvoer} [MJ]	E _{vent;totaal} [MJ]	E _{vent;toevoer} [%]	E _{vent;afvoer} [%]	E _{vent;totaal} [%]
Var 1	58248	42286	100534	0%	0%	0%
Var 2	58248	42286	100534	0%	0%	0%
Var 3	54549	36015	90565	-6%	-15%	-10%
Var 4	37538	27251	64789	-36%	-36%	-36%
Var 5	35154	23210	58364	-40%	-45%	-42%

Tabel 8.14: Afname in energie ventilatie per variant

8.8. Energieverbruik totaal

Het totale energieverbruik is onder te verdelen in energieverbruik voor koelen, verwarmen en de ventilatie. Dit is het totale energieverbruik wat de installaties verbruiken. De twee installatieconcepten zijn hier doorgerekend als totaal. Dit is ook voor het totaaloverzicht onderverdeeld voor twee installaties.

Installatie 1

In grafiek 8.67 is de afname van het totale energieverbruik van installatie 1 te zien, uitgedrukt in MJ. In tabel 8.15 is een overzicht te zien van het energieverbruik voor installatie 1 met het aantal MJ en de toe- of afname in percentage per onderdeel. Het energieverbruik voor verwarmen gaat 19 % omlaag. Voor koelen gaat dit als enige onderdeel echter omhoog met 23 %. De oorzaak hiervan is op pagina 43 beschreven. Het energieverbruik voor ventilatie gaat omlaag met 42 %. Bij variant 5 wordt er 46 % minder geventileerd. Bij vermindering van de ventilatiehoeveelheid gaat dus het energieverbruik daarvan ongeveer evenredig omlaag. Het totale energieverbruik gaat hier omlaag met 21 %.

Installatie 1	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4	Var 5
E verwarmen	371884	371884	348882	314051	299745
	0%	0%	-6%	-16%	-19%
E koelen	36778	36778	38274	43444	45085
	0%	0%	4%	18%	23%
E ventilatie	100534	100534	90565	64789	58364
	0%	0%	-10%	-36%	-42%
E totaal	509196	509196	477720	422284	403195
	0%	0%	-6%	-17%	-21%

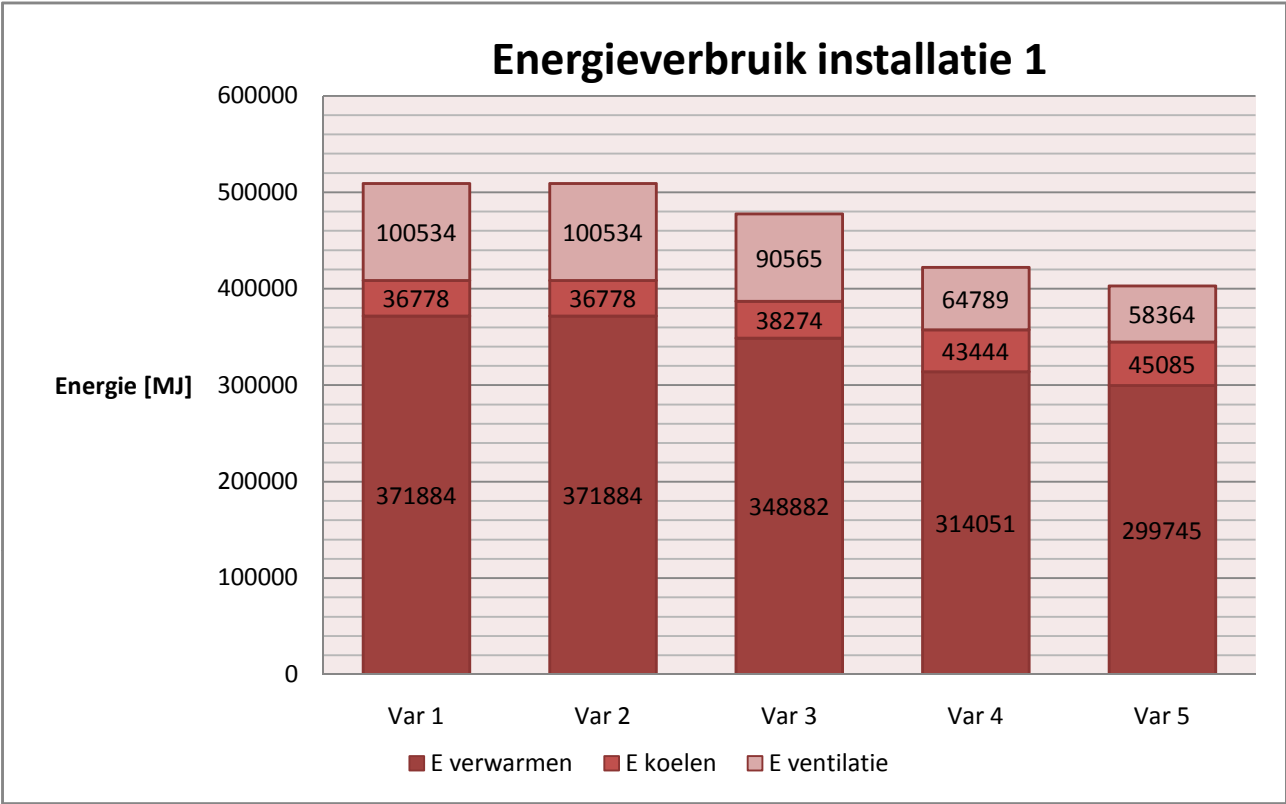
Tabel 8.15: Totale energiebesparing per onderdeel installatie 1

Installatie 2

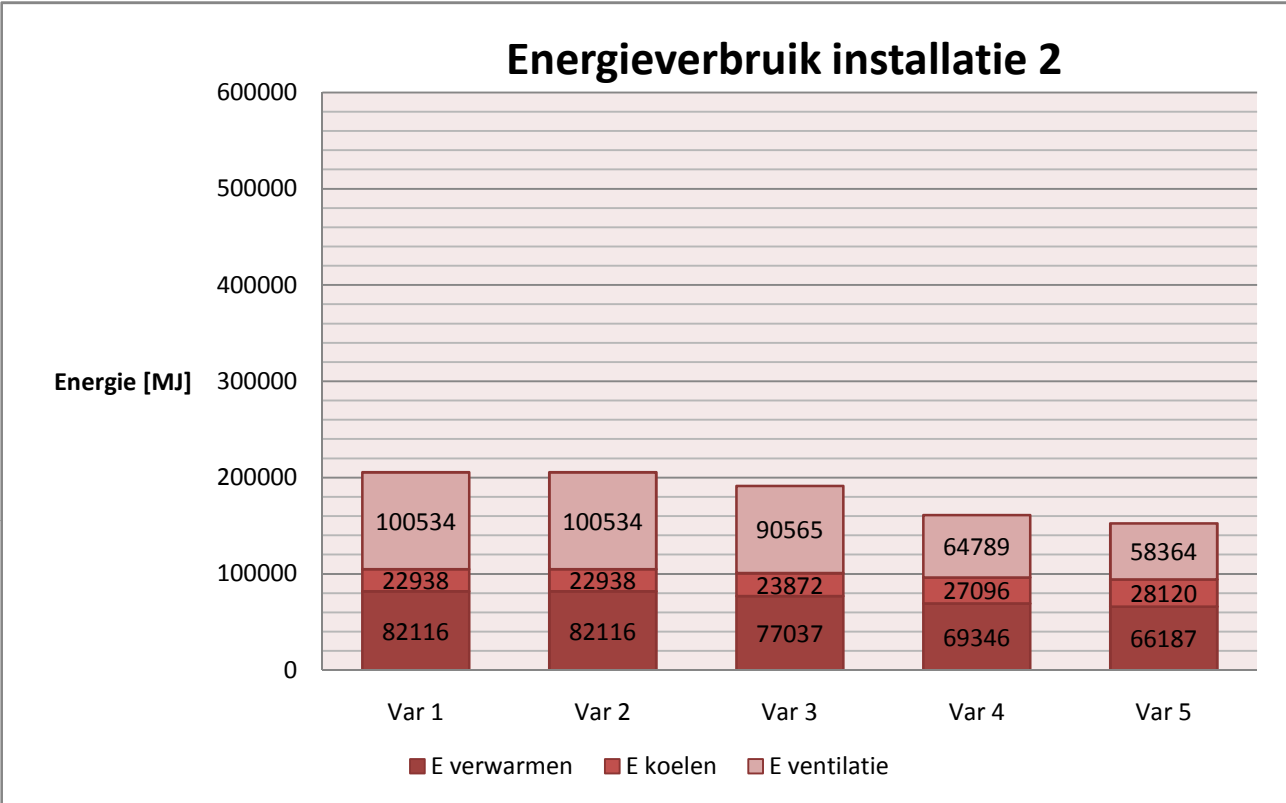
In grafiek 8.17 is te afname van het totale energieverbruik van installatie 2 te zien. In tabel 8.17 is een overzicht te zien van het energieverbruik voor installatie 2 met de toe- of afname in percentage. Er is te zien dat er veel minder energie wordt gebruikt in vergelijking met installatie 1. Dit was ook de verwachting zoals genoemd op pagina 44. Voor elk onderdeel van energieverbruik is te zien dat in percentage dezelfde toe- en afname te zien zijn als bij installatie 1. Echter bedragen hebben de onderdelen hier een andere verhouding dan bij installatie 1. Daarom is er uiteindelijk wel verschil het totaal percentage, deze gaat hier met omlaag met 26 %.

Installatie 2	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4	Var 5
E verwarmen	82116	82116	77037	69346	66187
	0%	0%	-6%	-16%	-19%
E koelen	22938	22938	23872	27096	28120
	0%	0%	4%	18%	23%
E ventilatie	100534	100534	90565	64789	58364
	0%	0%	-10%	-36%	-42%
E totaal	205589	205589	191473	161231	152671
	0%	0%	-7%	-22%	-26%

Tabel 8.17: Totale energiebesparing per onderdeel installatie 2



Grafiek 8.16: Totale energiebesparing per onderdeel installatie 1



Grafiek 8.18: Totale energiebesparing per onderdeel installatie 2

8.9. Verband ventilatie en energiebesparing

Deze paragraaf dient om het te verwachten verband aan te geven tussen de afname in ventilatiehoeveelheid in verhouding met de toe- of afname van het thermisch energieverbruik. Om de verhouding tussen alle onderdelen op een eerlijke manier uiteen te zetten is dit onderverdeeld in lokale verwarming/koeling en centrale verwarming/koeling. De blauwe punten zijn de berekende waarden met behulp van Vabi Elements. Hierbij is een lijn doorgetrokken met het verwachte verband.

8.9.1. Lokaal verwarmen

In grafiek 8.18 is te zien dat deze gering afneemt. Bij 50 % minder ventilatie wordt er ongeveer 4 % minder lokaal verwarmd.

8.9.2. Centraal verwarmen

In grafiek 8.19 is te zien dat dit ongeveer evenredig afneemt. Bij 50 % minder ventilatie wordt er ongeveer 50 % minder centraal verwarmd. Bij een afname van 100 % ventilatie is een extra berekeningswaarde toegevoegd, doordat er als er geen ventilatie is, er ook niet centraal verwarmd kan worden.

8.9.3. Lokaal koelen

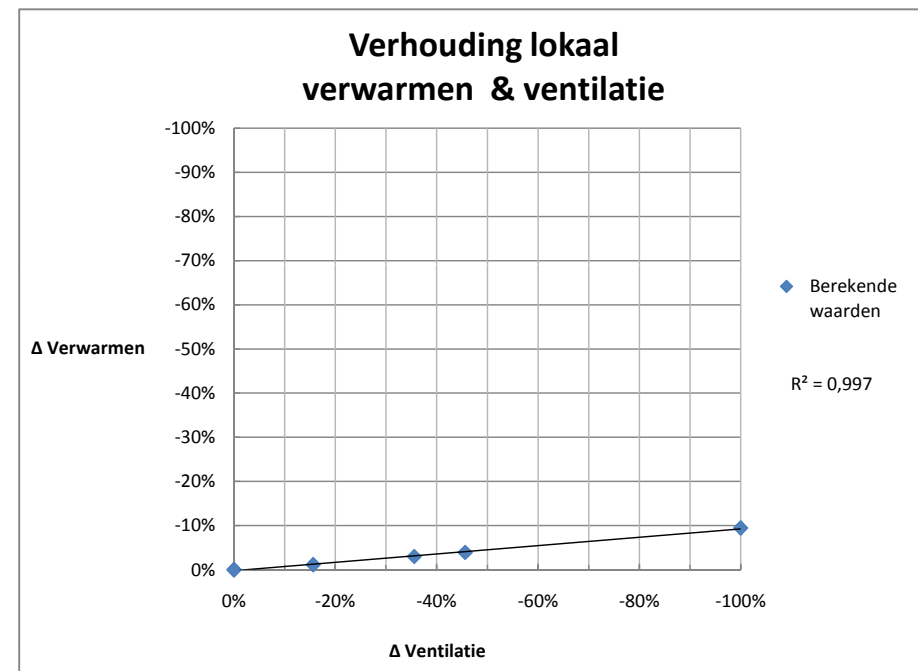
In grafiek 8.20 is te zien dat dit als enige onderdeel sterk toeneemt. Bij 50 % minder ventilatie wordt er ongeveer 60 % meer gekoeld.

8.9.4. Centraal koelen

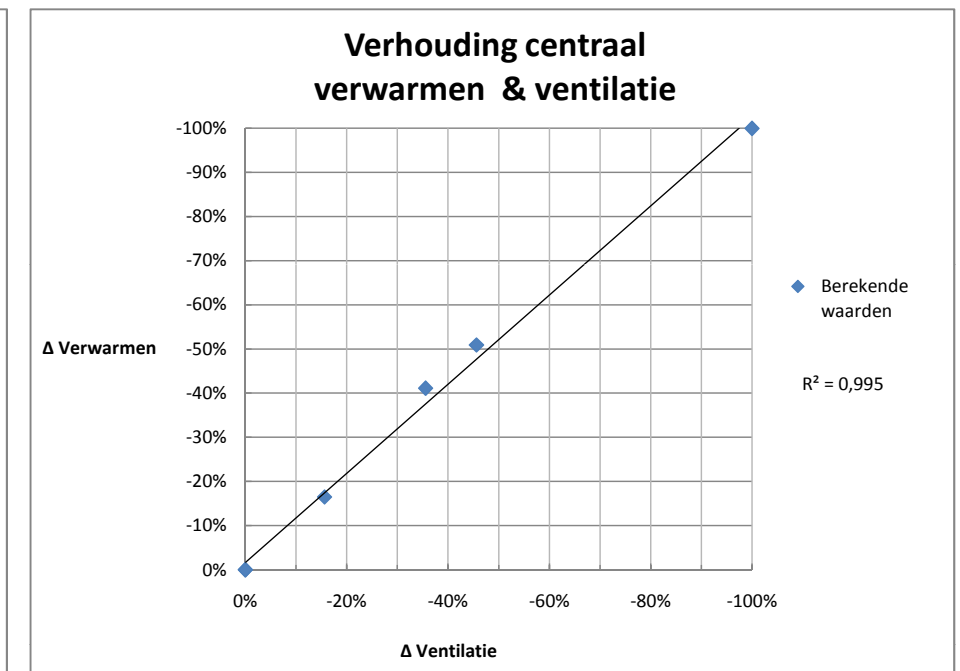
Net zoals bij centraal verwarmen is ook hier te zien in grafiek 8.21 dat dit ongeveer evenredig afneemt. Wel neemt dit wat minder snel af dan bij centraal verwarmen. Bij 50 % minder ventilatie wordt er ongeveer 45 % minder centraal verwarmd. Ook hier is weer een extra berekeningspunt toegevoerd, doordat bij een afname van de ventilatie, er niet centraal gekoeld kan worden.

Opmerking 8.9.1: Deze grafieken zijn voor de afname van de ventilatie uitgedrukt in afname in luchthoeveelheden en niet in energieverbruik door de ventilatoren. Er is hiervoor gekozen omdat de afname in ventilatiehoeveelheid eenvoudiger te bepalen is dan de afname in elektrisch energieverbruik van de ventilator-aandrijfmotor. Op deze manier is er een betere inschatting te maken wanneer er bijvoorbeeld een verwachting moet worden gegeven van dit effect op de toename van lokaal koelen.

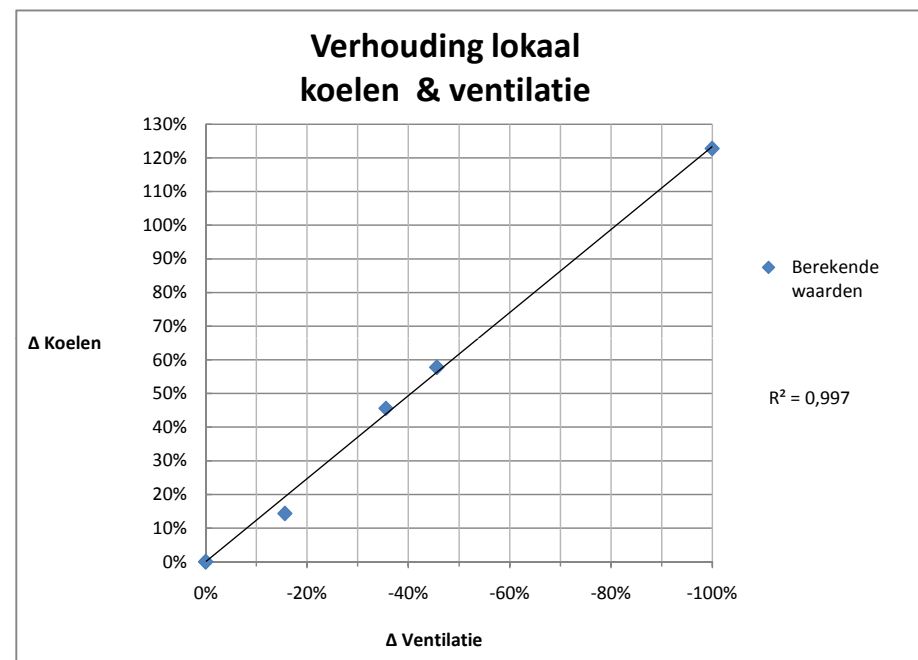
Opmerking 8.9.2. Wanneer er gekeken dient te worden op een verdere besparing op basis van afwezigheid van leerlingen of andere invloedsfactoren, is hiermee een indicatie te geven hoeveel er minder thermisch verwarmd en gekoeld zal gaan worden.



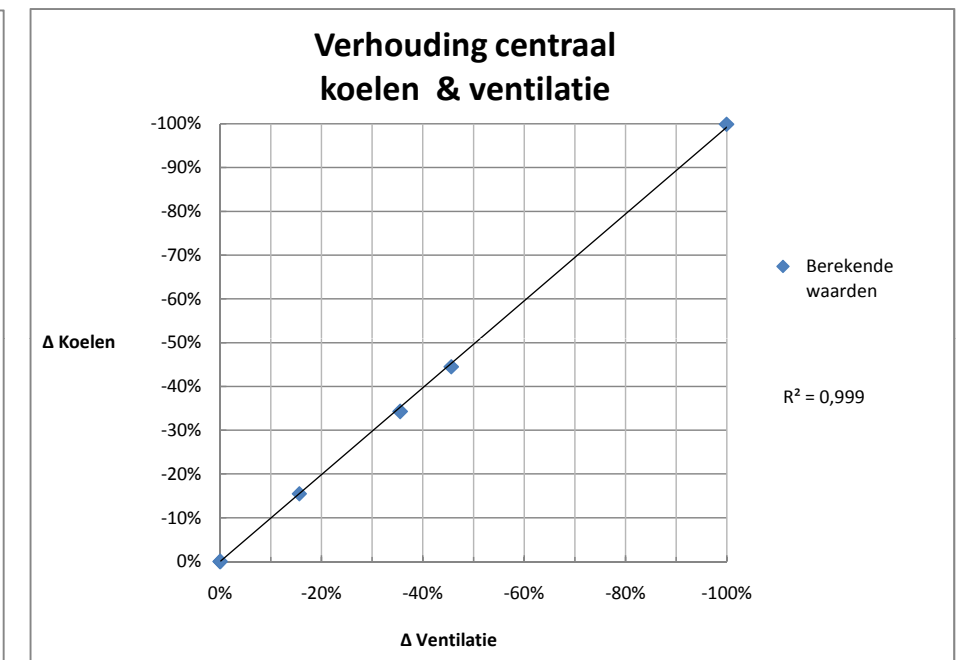
Grafiek 8.18: Verband afname (thermisch) lokaal verwarmen bij afname van ventilatie in percentage



Grafiek 8.19: Verband afname (thermisch) centraal verwarmen bij afname van ventilatie in percentage



Grafiek 8.20: Verband toename (thermisch) lokaal koelen bij afname van ventilatie in percentage



Grafiek 8.21: Verband afname (thermisch) centraal koelen bij afname van ventilatie in percentage

B r a n d v e i l i g h e i d

9

9.1. Brandcompartimentering

Indeling brandcompartimenten volgens Bouwbesluit 2003

Het schoolgebouw is ingedeeld in meerdere brandcompartimenten volgens de volgende punten, genoemd in Bouwbesluit 2003:

1. Volgens Bouwbesluit 2003 (artikel 2.104) wordt gesteld dat een besloten ruimte in een brandcompartiment dient te zitten (lid 1),
2. Er is sprake van een Weerstand tegen branddoorslag en brandoverslag (WBDBO)-eis van 30 minuten. Dit komt doordat in artikel 2.106 wordt gesteld dat wanneer de vloer van een verblijfsgebied niet hoger ligt dan de tabel 2.1.03 aangegeven grenswaarde (5 meter) ligt, er wordt voldaan met 30 minuten WBDBO. In het schoolgebouw liggen alle vloeren van verblijfsgebieden lager dan 5 meter, behalve twee technische ruimten. De technische ruimten vallen niet onder verblijfsgebied, dus er wordt voldaan aan lid 3 en de WBDBO-eis van 30 minuten.
3. In elke brandscheiding met de WBDBO-eis van 30 min mogen er alleen zelfsluitende deuren als beweegbaar constructie-onderdeel aanwezig zijn.
4. Elk brandcompartiment mag niet groter zijn dan 1000 m², gesteld in artikel 2.105.
5. Minimale afmetingen deuren in vluchtroute zijn 0,85 m * 2,3 m (b*h).
6. Draairichting in vluchtroute voert niet tegen de vluchtrichting in.
7. Vluchten via verblijfsruimten is toegestaan indien de betreffende ruimten minimaal twee toegangen heeft. Vluchten via verblijfsruimten gebeurd bij de aula's, deze hebben echter meer dan twee toegangen en is dus toegestaan.
8. Vluchtrouten hebben bij de functie onderwijs een maximale loopafstand van 30 meter, volgens artikel 2.172. De gecorrigeerde loopafstand voldoet niet altijd, de niet-gecorrigeerde loopafstand wel. De loopafstand in dit gebouw voldoet daarom.

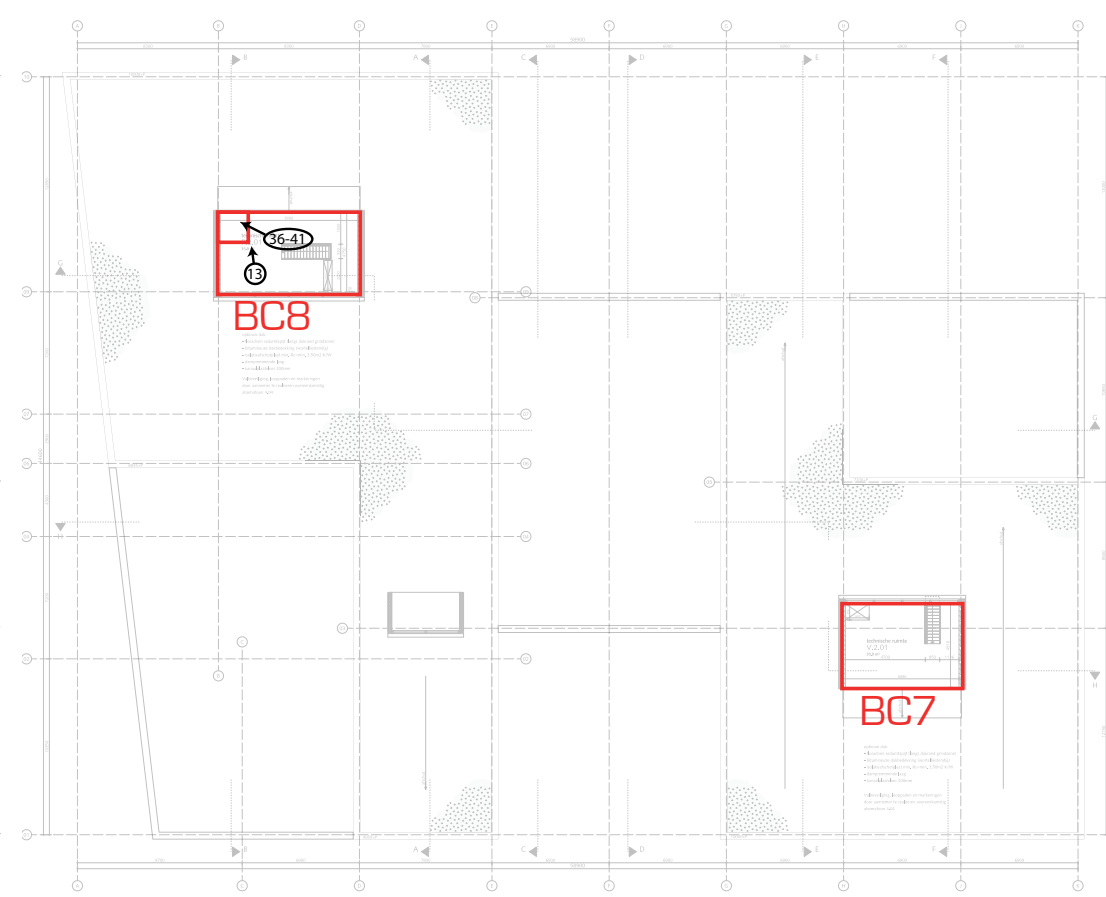
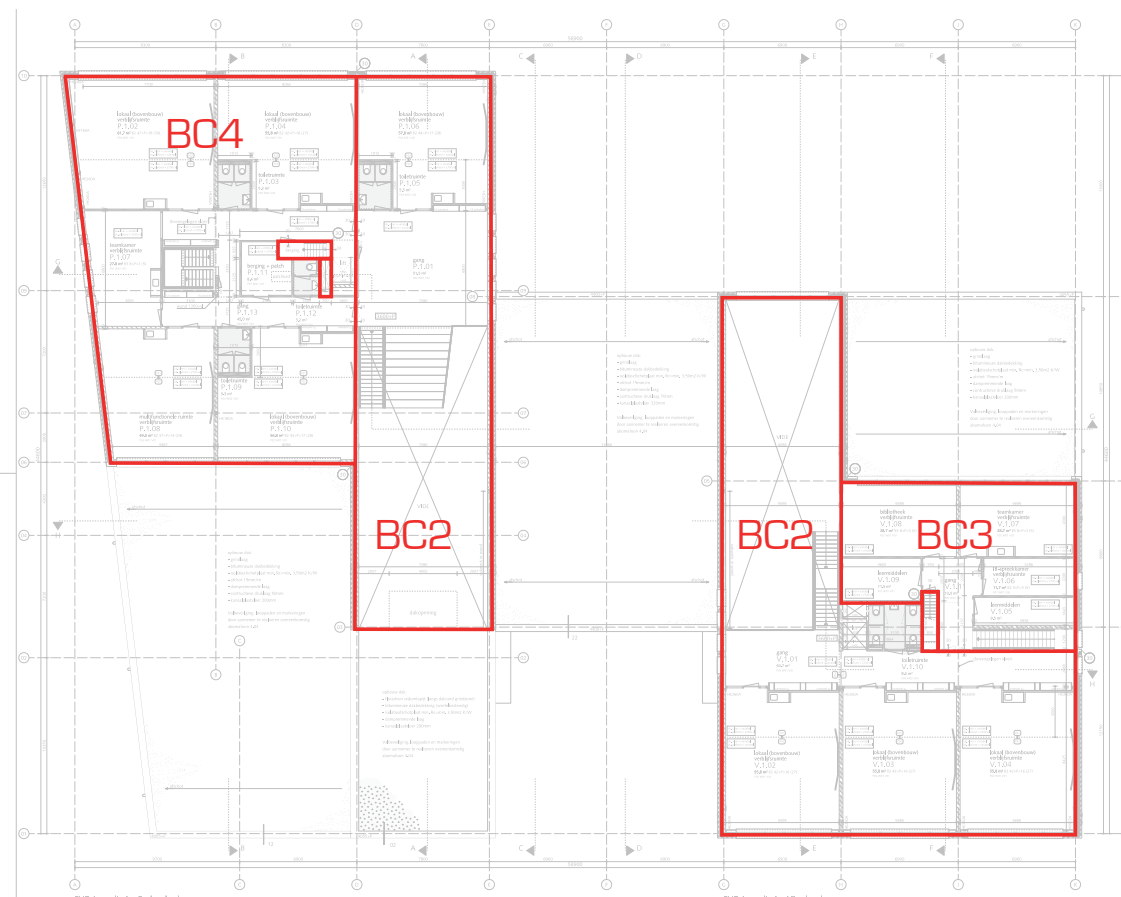
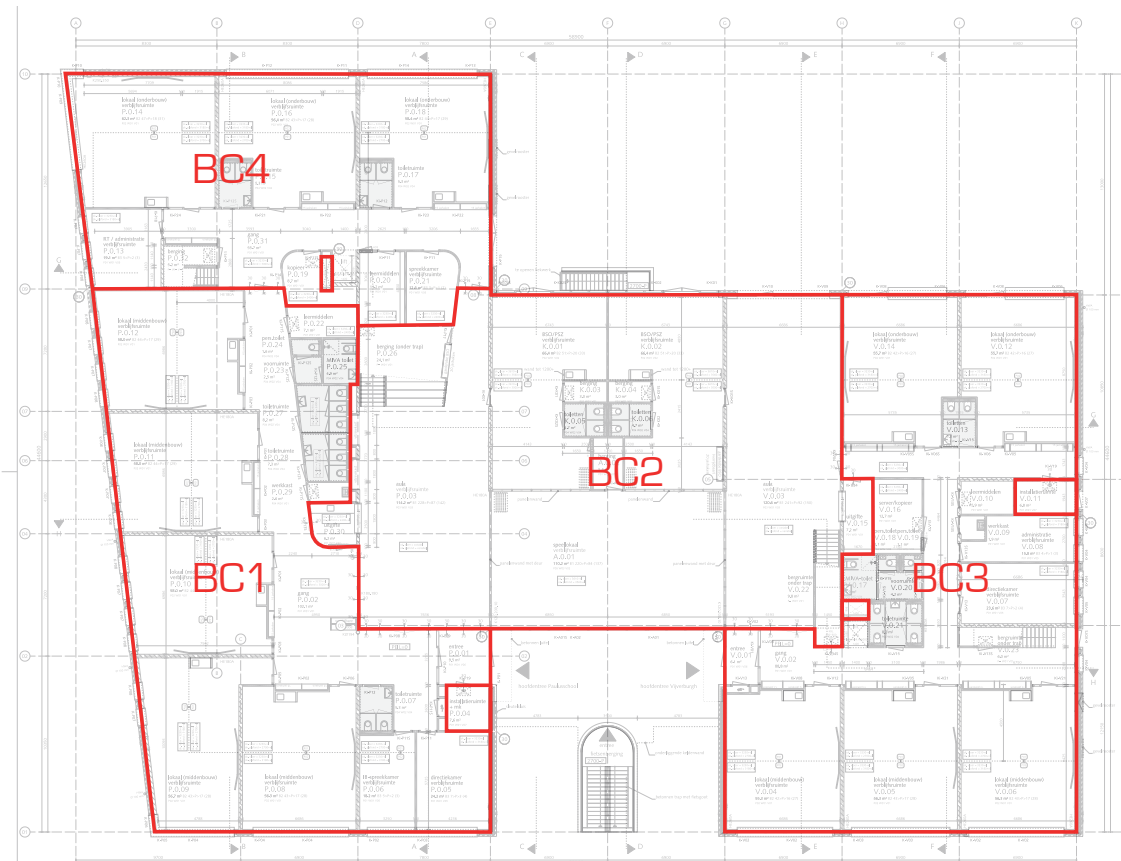
De indeling van de brandcompartimenten is te zien op de afbeeldingen hiernaast en onder:

BC1: Omvat het achterste gedeelte van de Paulusschool en loopt door op de eerste verdieping.

BC2: Omvat de twee aula's en het middelste stuk (speellokaal etc.). De aula's staan elk in open verbinding met een stuk gang en enkele lokalen en deze horen dus ook nog bij BC2.

BC3: De begane grond van De Vijverburgh valt onder BC3, deze loopt vervolgens door tot een gedeelte van de eerste verdieping, waar zich o.a. de bibliotheek en de teamkamer bevinden.

BC4: Het voorste gedeelte van de Paulusschool bevindt zich in BC4, doordat anders de maximale grootte van 1000 m² overschreden werd.



Afbeelding 9.1 - 9.3: Indeling brandcompartimenten

9.2. Gestelde maatregelen doorvoeringen

Afhankelijk van de benodigde WBDBO-eis zijn de doorvoeringen te maken voor minimaal 30 minuten, 60 minuten en nog langer. Het aantal minuten WBDBO staat altijd vermeld bij de brandwerende producten. De volgende maatregelen zijn benodigd indien een kanaal, leiding of kabelgoot door een brandscheiding heen gaat.

9.2.1. Kunststof leidingen

- Diameter < 25 mm: Geen brandwerende maatregelen.
- Diameter tussen 25 en 50 mm: Steenwol en opschuimende kit + brandwerende coating.
- Diameter > 50 mm: brandwerende coating + brandmanchet (afbeelding 9.4).

9.2.2. Metalen leidingen

- Diameter < 60 mm: Steenwol en opschuimende kit of een brandmanchet + brandwerende coating.
- Diameter > 60 mm: Steenwol en opschuimende kit + brandwerende coating of steenwol isolatieschalen.

9.2.3. Kabelgoten

- Steenwol en opschuimende kit + brandwerende coating.

9.2.4. Ventilatiekanalen

- Steenwol en opschuimende kit + brandwerende coating + brandklep (afbeelding 9.5).

Onafhankelijk van de brandwerende maatregel worden kanalen, leidingen of kabelgoten altijd afgedicht met steenwol, met daarop opschuimende kit (afbeelding 9.6). Vervolgens wordt ook het kanaal, leiding of kabelgoot bedekt met een brandwerende coating (afbeelding 9.7). De opschuimende kit en de brandwerende coating hebben allebei als eigenschap dat deze uitzetten bij een hoge temperatuur. Op deze manier wordt de doorvoering afgesloten.

Ook een brandmanchet gaat bij hogere temperatuur opzwellen. Bij een brandklep brandt bij een hoge temperatuur het smellood door, waardoor de brandklep dicht zal gaan.

Opmerking 9.2.1: Op de volgende pagina's wordt door middel van foto's duidelijk of er bij de doorvoeringen en deuren wordt voldaan aan de gestelde brandveiligheid. Hiermee wordt duidelijk wat er precies mis is en wat de reden daarvan is. Dit is bedoeld om te kijken of wat er theoretisch wordt bedacht voor het onderdeel brandveiligheid, ook daadwerkelijk aan wordt voldaan in de praktijk.



Afbeelding 9.4 Aanbrengen brandmanchet
[Bron: www.firecare.nl]



Afbeelding 9.5 Brandklep

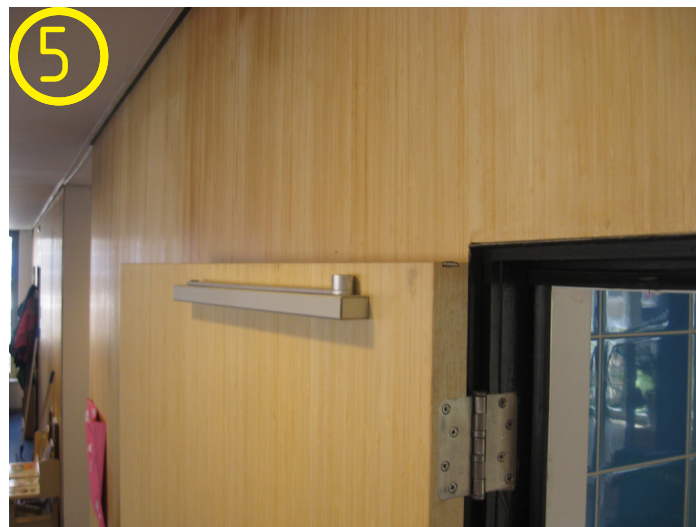


Afbeelding 9.6 Afdichting doorvoering met steenwol en opschuimende kit
[Bron: www.firecare.nl]



Afbeelding 9.7 Aanbrengen brandwerende coating.
[Bron: www.firecare.nl]

9.3. Brandwerende maatregelen deuren



Afbeelding 1:(GOED)
Bij gang P.O.02 is de (zelfsluitende) deur van de uitgiftebalie netjes dicht en is de brandscheiding van 30 minuten WBDBO gesloten. De deuren voor de brandscheidingen zijn in dit gebouw 30 minuten brandwerend.

Afbeelding 2:(GOED)
Bij gang P.O.02 is de (zelfsluitende) deur naar aula P.O.03 netjes dicht en is de brandscheiding van 30 minuten WBDBO gesloten.

Afbeelding 3: (GOED)
Bij gang P.O.02 zijn de deuren van de lokalen open, maar dit is geen onderdeel van een brandscheiding en is dus toegestaan.

Afbeelding 4:(GOED)
Bij aula P.O.03 is het dezelfde zelfsluitende deur als bij BC1, welke altijd netjes dichtzit en ook niet belemmerd wordt.

Afbeelding 5 : (FOUT)
De brandwerende en zelfsluitende deur tussen uitgiftebalie V.O.15 en gang V.O.02 is onklaar gemaakt door het zelfsluitende element los te schroeven. Dit is waarschijnlijk doordat deze deur vaak gebruikt wordt en voor het gemak daardoor is losgeschroefd.

Opmerking 9.3.1: De brandcompartimenteringen en de plaats waar de foto's gemaakt zijn, zijn te vinden in bijlage D1 - D3.

9.3. Brandwerende maatregelen deuren



Afbeelding 6: (FOUT)
Bij gang P.O.02 staat eind van de hal een brandwerende en zelfsluitende deur constant open. Deze deur is niet voorzien van een deurdranger of kleefmagneet. Dit zorgt ervoor dat de brandscheiding van 30 minuten WBDBO niet voldoet.

Afbeelding 7 : (FOUT)
De brandwerende en zelfsluitende deur tussen aula P.O.03 en gang P.O.31 staat constant open. Deze deur is niet voorzien van een deurdranger of kleefmagneet.

Afbeelding 8: (FOUT)
De brandwerende en zelfsluitende dubbele deuren tussen aula V.O.03 en gang V.O.02 staat constant open. Deze deurdrangers zijn waarschijnlijk losgeschroefd.

Afbeelding 9: (FOUT)
De brandwerende en zelfsluitend deur tussen aula V.O.03 en gang V.O.02 (BC3) staat constant open. Deze staat open door middel van een deurstop, wat bij een brandscheidende deur ongewenst is, bij brand zal deze bij het vluchten ook niet gesloten worden, waardoor de brand zich kan verspreiden van BC2 naar BC3 en andersom.



Afbeelding 10 & 11 : (FOUT)
De beide brandwerende en zelfsluitende deuren tussen gang P.1.01 en gang P.1.13 staan constant open en niet voorzien van een deurdranger of kleefmagneet. Hierdoor kan brand zich verspreiden van BC2 naar BC4 en andersom.

Afbeelding 12: (FOUT)
De brandwerende en zelfsluitende deur tussen gang V.1.01 en gang V.1.11 staat ook hier weer constant open. Deze deur is voorzien van een deurdranger, echter gaat deze niet vanzelf dicht. Waarschijnlijk is deze dus losgeschroefd.

Afbeelding 13: (FOUT)
De brandwerende deur en zelfsluitende deur tussen technische ruimte P.2.01 en de aparte brandwerende ruimte voor de CV-ketel zit niet goed dicht. Bij brand bij de CV-ketel kan zich dus verspreiden naar de rest van de technische ruimte.

9.4. Brandwerende maatregelen doorvoeringen



Afbeelding 14: (FOUT)

In de doorvoering van het ventilatiekanaal van lokaal V.O.14 naar aula V.O.03 is er een brandklep toegepast, deze is bedekt met een brandwerende coating, echter loopt deze niet door tot de brandklep, en voldoet dus niet.

Afbeelding 15: (GOED)

Op dezelfde plek is achter de kabelhooft te zien dat er een ventilatiekanaal bedekt is met brandwerende coating.

Afbeelding 16: (GOED)

In het ventilatiekanaal tussen berging V.O.22 en Toilet V.O.17 is een brandklep te zien, die volledig bedekt is met brandwerende coating tot de brandklep.

Afbeelding 17: (GOED)

Dezelfde plek, maar dan van dichtbij. Er is te zien dat de doorvoering gedicht is met steenwol.

Afbeelding 18: (GOED)

In het ventilatiekanaal tussen aula V.O.03 en gang V.O.02 is weer de brandklep te zien met de brandwerende coating.

Afbeelding 19: (GOED)

De resterende roosters in de aula zijn ook voorzien van brandkleppen.

Afbeelding 20: (GOED)

Brandklep van dichtbij in aula V.O.03.

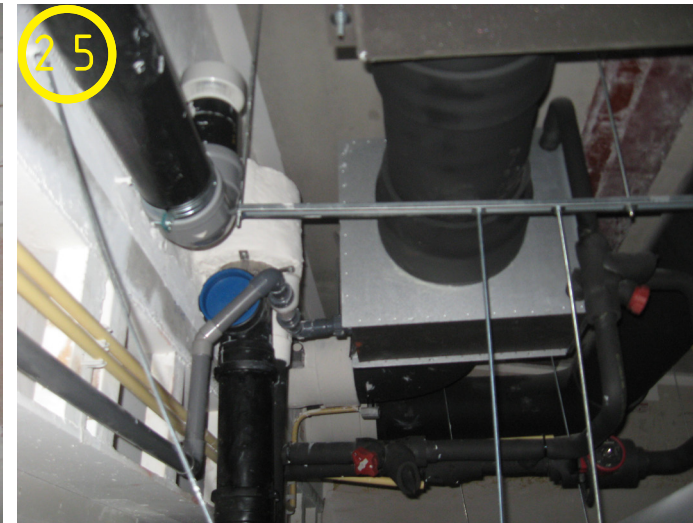
Afbeelding 21: (GOED)

In ruimte V.1.07 is er een brandmanchet toegepast bij de rioolbuis van 120 mm, vervolgens bedekt met een brandwerende coating.

Afbeelding 22: (GOED)

In ruimte V.1.07 is ook de kabelgoot bedekt met een brandwerende coating.

9.4. Brandwerende maatregelen doorvoeringen



Afbeelding 23:(FOUT)
Naast de kabelgoot van net op de vorige afbeelding is te zien dat de binnenriolering niet is voorzien van een brandwerende coating.

Afbeelding 24:(GOED)
De rioleringsbuis heeft een grotere diameter dan 120 mm en is voorzien van een brandmanchet. Echter de metalen leiding links op de foto is heeft niet een volledig bedekte brandwerende coating.

Afbeelding 25:(GOED)
De rioleringsbuis is voorzien van een brandwerende coating met een manchet.

Afbeelding 26:(GOED)
De vierkante ventilatiekanalen zijn bedekt met isolatie om condensering tegen te gaan, doordat hier gekoelde lucht doorheen gaat. Voor de brandveiligheid is deze voorzien van brandklep en brandwerende coating.

Afbeelding 27:(GOED)
De elektrische draden zijn bedekt met brandwerende coating.

Afbeelding 28:(GOED)
De rioleringsbuis is voorzien van een manchet en brandwerende coating.

Afbeelding 29:(GOED)
Ventilatiekanaal van dichtbij.

Afbeelding 30:(GOED)
De metalen leidingen zijn voorzien van een brandwerende coating.

Afbeelding 31:(GOED)
De drie ventilatiekanalen in aula P.O.03 zijn niet voorzien van een brandklep. Dit komt doordat de kanalen omhoog lopen in hetzelfde brandcompartiment.

9.4. Brandwerende maatregelen doorvoeringen



Afbeelding 32:(GOED)
De rioleringsbuizen zijn voorzien van een brandwerende coating.

Afbeelding 33:(GOED)
Het ventilatiekanaal (ongeïsoleerd) is voorzien van een brandklep (aan andere zijde) en brandwerende coating.

Afbeelding 34:(GOED)
De rioleringsbuis naar boven is voorzien van brandwerende coating en een manchet (op deze foto niet te zien).

Afbeelding 35:(GOED)
De metalen leiding (50 mm) voldoet met alleen een brandwerende coating.

Afbeelding 36:(GOED)
Het kanaal voor ventileren van de technische ruimte is in open verbinding met de lucht (wel voorzien van een kap) en is dus brandwerend uitgevoerd.

Afbeelding 37:(GOED)
De metalen leiding voor het cv-water is voorzien van een steenwol isolatieschaal. De leiding eronder ook, maar deze is wel erg kort.

9.4. Brandwerende maatregelen doorvoeringen



Afbeelding 38:(GOED)
De cv-leidingen naar de technische ruimte zijn voorzien van een brandwerende coating.

Afbeelding 39:(GOED)
De rookgasafvoer is voorzien van een brandwerende coating.

Afbeelding 40:(GOED)
De ventilatieschacht is voorzien van een brandwerende coating.

Afbeelding 41:(GOED)
De binnenriolering is voorzien van een brandwerende coating.

Afbeelding 42:(GOED)
De binnenriolering is voorzien van een brandwerende coating.

Afbeelding 43:(GOED)
Binnenriolering die achteraf niet nodig was is afgezaagd, wel afgedicht met een manchet. Deze is vermoedelijk helemaal afgedicht.

Afbeelding 44:(GOED)
De binnenriolering is voorzien van een brandwerende coating.

Afbeelding 45:(GOED)
De binnenriolering is voorzien van een brandwerende coating.

Afbeelding 46:(GOED)
De kabelgoot is brandwerend uitgevoerd. Een opening die achteraf niet nodig was is opgevuld en brandwerend afgedicht.

9.5. Brandwerende maatregelen kozijnen/beglazing



Afbeelding 47:(GOED)

Er is 30 minuten brandwerend glas te vinden in de kozijnen tussen alle brandcompartimenten. De kozijnen zijn zelf vastgeschroefd, zodat bij een ontploffing het raam niet uit het kozijn schiet.

Afbeelding 48:(GOED)

Ook het glas en de kozijnen tussen de ingangen en de aula's zijn brandwerend uitgevoerd.

Afbeelding 49:(GOED)

In het speellokaal is tegen brandoverslag het glas als 30 minuten brandwerend uitgevoerd met een brandwerend kozijn.

Afbeelding 50:(GOED)

Elke deur tussen de brandcompartimenten zijn voorzien van een opschuimende laag aan de zijkanten.

Afbeelding 51:(GOED)

30 minuten brandwerend kozijn speellokaal, van dichtbij.

Afbeelding 52:(GOED)

De kozijnen van gang P.O.31 aan de buitenzijde is brandwerend uitgevoerd voor de beperking van brandoverslag.

Conclusie brandveiligheid

Naar aanleiding van deze inspectie is te zien dat de doorvoeringen in het gebouw is uitgevoerd zoals het bedacht is, en dat deze voldoen. De brandwerende voorzieningen m.b.t. kozijnen en glas zijn goed uitgevoerd.

Wel zijn er enkele aandachtspunten m.b.t. het gebruik van brandwerende deuren. Er is te zien dat deze in sommige gevallen inklaar zijn gemaakt door de deurdranger los te schroeven of voorzien van een deurstop. Ook zijn de deuren zonder deurdranger niet voorzien van een kleefmagneet. Voor projecten zou het handig zijn indien de eindgebruikers bekend zijn met de voorzieningen die in het gebouw zijn getroffen. Aannemelijk is dat er bij de eindgebruikers niet genoeg bekend is over de getroffen voorzieningen m.b.t. brandveiligheid, daardoor worden deze onbedoeld op een verkeerde manier gebruikt. Dit kan in sommige gevallen de brandveiligheid in gevaar brengen.

G e v o l g e n C O ₂ - s t u r i n g

10

10.1. Gevolgen CO₂-sturing

Gevolgen

In afbeelding 10.1 en 10.2 is het verschil te zien qua ventilatiesysteem. Bij het toepassen van CO₂-gestuurde ventilatie is er weinig verschil met constante ventilatie. Er kan worden gewerkt met hetzelfde ventilatiesysteem indien er een drukgeregelde ventilator in de luchtbehandelingskast aanwezig is. In plaats van de CAV-units die zich in de luchtkanalen bevinden, bevinden zich hier VAV-units. Bij afwezigheid van personen stuurt de CO₂-sensor een signaal door naar de ventilator (lager ventilatiedebiet) en naar de VAV-units. In dat geval gaat de VAV-unit dicht zodat er in het betreffende lokaal geen ventilatielucht meer komt. De brandkleppen zijn in beide situaties sowieso benodigd.

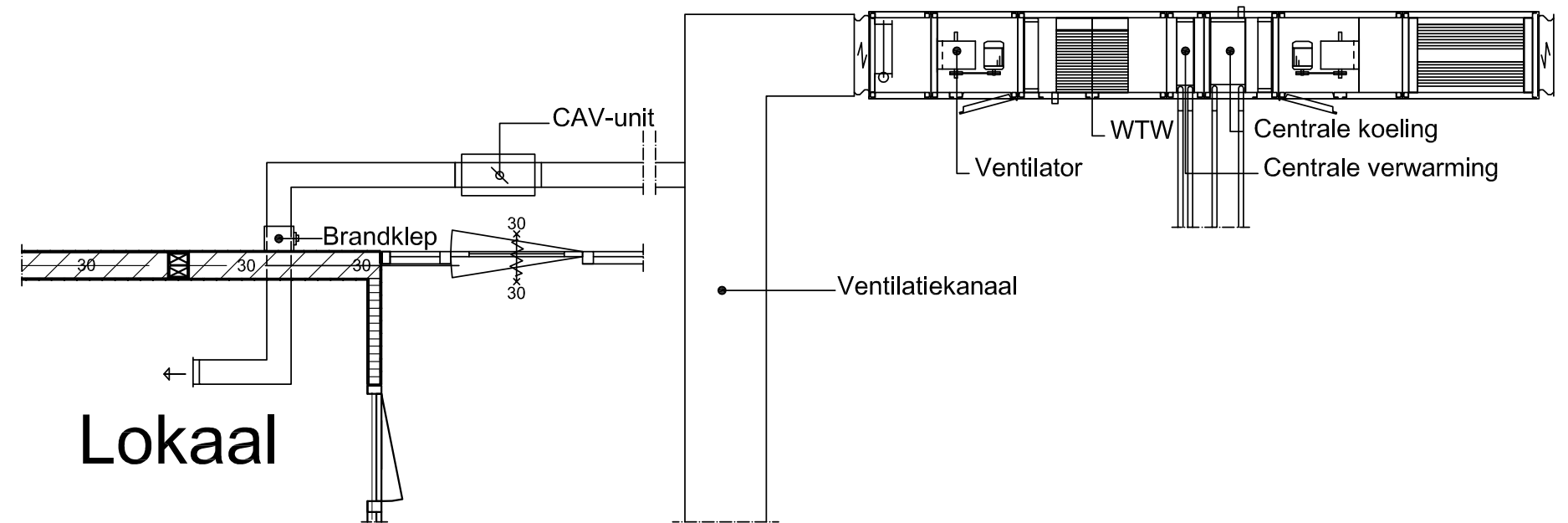
Bouwkundig

Indien er vraaggestuurde ventilatie op basis van CO₂-sturing toegepast wordt, heeft dit geen effect op de bouwkundige schil. Het gaat hier dan om CO₂-sturing bij nieuwbouw van scholen. Oude bestaande scholen hebben minder grote kanalen doordat de ventilatie-eisen vroeger lager waren. Op deze manier waren er minder grote kanalen benodigd. Wanneer er in deze oude bestaande scholen op CO₂ wordt gestuurd, kan het benodigd debiet worden geleverd. Echter doordat de diameter van de kanalen kleiner is, neemt de druk toe, en is er meer energie benodigd om de lucht te verplaatsen.

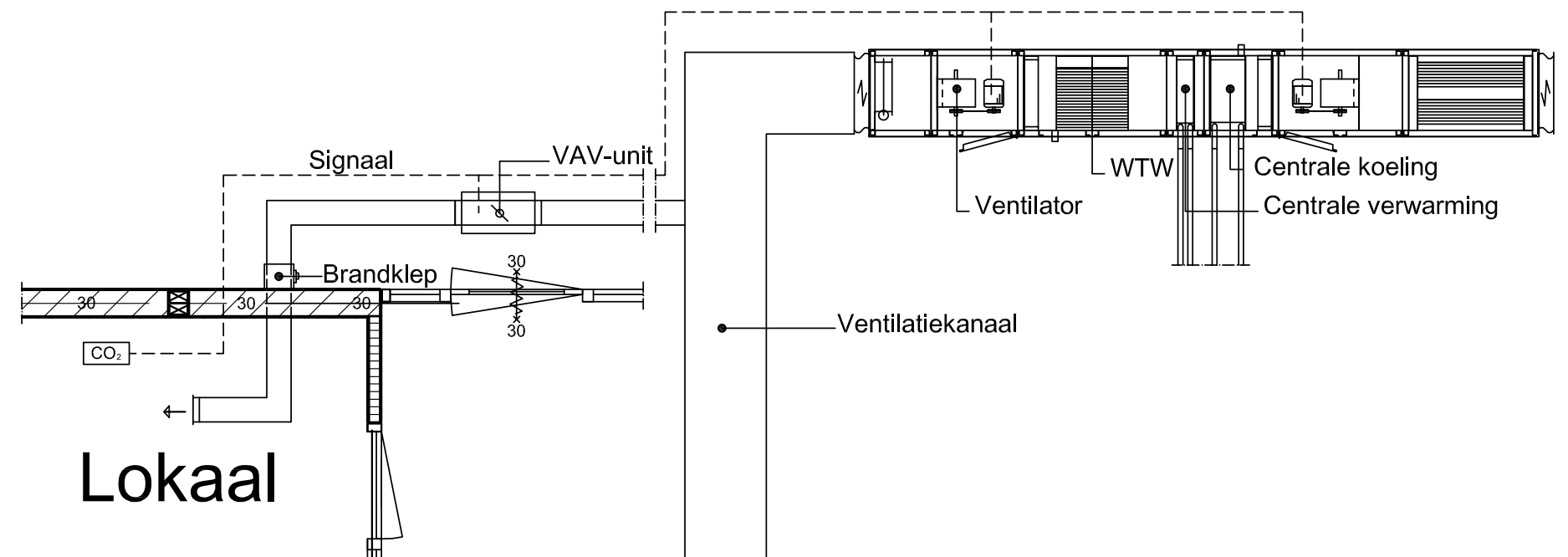
Installatie

Zoals hierboven wordt genoemd, is het enige extra onderdeel de CO₂-sensor en de VAV-unit. Doordat deze gekoppeld is aan de ventilator en VAV-unit, is de enige bijkomstigheid dat het debiet gekoppeld moet worden aan een goede setpoint. Er zijn verschillende typen signalen die verwerkt kunnen worden, het is dan ook nodig dat de CO₂-sensor hetzelfde type signaal verzendt als de printplaat van de luchtbehandelingskast kan ontvangen. Indien deze niet gelijk aan elkaar zijn is er altijd nog de mogelijkheid om een signaalomvormer hiertussen te plaatsen.

Voor het instellen van het goede debiet en de goede setpoints voor de CO₂-concentratie is het belangrijk dat achteraf wordt gecontroleerd of de CO₂ op een goede manier wordt geregeld. Bij het instellen hiervan is het belangrijk dat de meest efficiënte manier om te besparen is om gedurende een korte tijd met een relatief hoog debiet te ventileren. Dit betekent dat de setpoint voor de hoogste stand ongeveer 50 tot 75 ppm onder het gewenste CO₂-concentratie dient te zitten.



Afbeelding 10.1 Benodigheden constante ventilatie

Afbeelding 10.2 Benodigheden variabele ventilatie op basis van CO₂-sturing

Conclusie

Door CO₂-sturing toe te passen zorgt dit bij aanwezigheid van leerlingen met verschillende leeftijden tussen de 4 en 12 jaar ervoor dat er 46 % minder geventileerd hoeft te worden. Daardoor wordt er 42 % minder energie verbruikt door de aandrijfmotor van de ventilator.

Dit heeft de volgende effecten op het thermisch energieverbruik:

Thermische energiebesparing

- 1. Het centraal verwarmen: -51 %
- 2. Het centraal koelen: -45 %
- 3. Het lokaal verwarmen: -4 %
- 4. Het lokaal koelen: +58 %

Elektrische energiebesparing

Bovenstaande besparingen geven een goed inzicht in de onderdelen, echter kan dit voor de uiteindelijke besparing niet bij elkaar opgeteld worden. Dit komt doordat de opwekking van warmte en koude een verschillend rendement hebben. Voor het leveren van het thermisch energieverbruik zijn er verschillende installaties benodigd voor de opwekking.

Er is daarom gekeken naar twee installaties:

Installatie 1:

- Verwarmen: HR-107 cv-ketel (rendement = 0,975)
- Koelen: Compressie koelmachine (COP = 3)

Installatie 2:

- Verwarmen: Warmtepomp (COP = 4,81; Bétafactor = 0,80)
HR-107 cv-ketel (rendement bijstook = 0,95)
- Koelen: Warmtepomp (COP = 4,81; Bétafactor = 0,80)

Totale energiebesparing

Er is te zien dat naar verhouding in percentage dezelfde besparing te behalen valt, ongeacht de installatie. Hiernaast zijn de uitkomsten voor de onderdelen verwarmen, koelen en ventileren te zien voor beide installaties. Deze percentages zijn dan ook representatief voor de potentiële energiebesparing van andere gebouwen, met andere typen installaties.

De besparingen per variant zijn hiernaast te zien in tabel 11.1 - 11.2. Het energieverbruik van deze onderdelen is bij elkaar op te tellen, voor installatie 1 komt er dan een totale energiebesparing van 21 % uit. Bij installatie 2 is dat 26 %, in dit geval komt dat doordat het aandeel verwarming en koelen een minder groot deel omvat dan bij installatie 1.

Verband afname ventilatie & thermische energiebesparing

- Bij de afname van de ventilatie gaat ongeveer evenredig het energieverbruik voor centrale verwarming en koeling omlaag, oftewel bij elke 10 % afname in ventilatie gaat het centraal verwarmen en koelen ook 10 % omlaag. (lineair verband)
- Bij lokaal verwarmen gaat dit bij elke 10 % afname in ventilatie 1% omlaag. (lineair verband)
- Bij lokaal koelen gaat dit sterk omhoog. Bij elke 10 % afname in ventilatie gaat de lokale koeling 12 % omhoog. (lineair verband)

Installatie 1	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4	Var 5
E _{verwarmen}	371884	371884	348882	314051	299745
	0%	0%	-6%	-16%	-19%
E _{koelen}	36778	36778	38274	43444	45085
	0%	0%	4%	18%	23%
E _{ventilatie}	100534	100534	90565	64789	58364
	0%	0%	-10%	-36%	-42%
E _{totaal}	509196	509196	477720	422284	403195
	0%	0%	-6%	-17%	-21%

Tabel 11.1: Totale energiebesparing per onderdeel installatie 1

Installatie 2	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4	Var 5
E _{verwarmen}	82116	82116	77037	69346	66187
	0%	0%	-6%	-16%	-19%
E _{koelen}	22938	22938	23872	27096	28120
	0%	0%	4%	18%	23%
E _{ventilatie}	100534	100534	90565	64789	58364
	0%	0%	-10%	-36%	-42%
E _{totaal}	205589	205589	191473	161231	152671
	0%	0%	-7%	-22%	-26%

Tabel 11.1: Totale energiebesparing per onderdeel installatie 2

Aanbevelingen

Algemene aanbevelingen

Dit onderzoek heeft zich gericht op de potentiële energiebesparing door het gebruik van CO₂-sturing. Er is gekeken naar de energiesparing die te behalen is door op basis van CO₂ te sturen bij kinderen van 11 jaar. Ook is hierbij gekeken wat het effect is wanneer een schoolgebouw leerlingen heeft met verschillende leeftijden. Er is hierbij gekeken naar een gemiddeld verbruik, wat ertoe leidde dat het ventilatiesysteem 6,5 uur aanging t.o.v. 9 uur in de situatie bij constante ventilatie. Ook is hierbij meegenomen dat het ventilatiesysteem op woensdag drie uur draait door afwezigheid in de middag. Dit leverde uiteindelijk een totale besparing van 21 %, zoals vermeld in de conclusie. Bij een installatie met een minder grote verhouding in verwarmen en koelen kan dit oplopen tot 26 %.

1. Het toepassen van CO₂-gestuurde ventilatie wordt aangeraden bij schoolgebouwen voor basisonderwijs. Op deze manier valt er veel energie te besparen door de aanwezigheid van leerlingen met verschillende leeftijden. Bij lagere leeftijden valt er meer besparing te behalen dan bij hogere leeftijden, door het verschil in CO₂-productie.

2. Bij het toepassen van CO₂-gestuurde ventilatie in het voortgezet onderwijs, valt ook een besparing te behalen, maar in mindere mate dan bij het basisonderwijs, door de CO₂-productie. Er valt wel veel te behalen indien het gebruik door aanwezigheid van personen in een ruimte op een dag veel korter is dan dat een lokaal de hele dag in gebruik is.

3. In oudere gebouwen is CO₂-sturing niet efficiënt toe te passen doordat deze door lagere ventilatie-eisen doorgaans smallere kanalen hebben. Op deze manier wordt er meer energie verbruikt om de lucht door de smalle kanalen te verplaatsen, doordat er meer drukverschil is. Ook zijn de ventilatoren in oude gebouwen hierbij niet vaak geschikt voor CO₂-sturing.

Aanbevelingen vervolgonderzoek

Er zou nog meer besparing kunnen optreden door het volgende mee te nemen:

1. Vakanties.
2. Te openen ramen/te openen deuren.
3. Afwezigheid door ziekte/gym.
4. Jongens/meisjes verhouding.

1. In sommige scholen wordt er in de vakantie met dezelfde luchthoeveelheid doorgeventileerd. In andere scholen is er een vakantiestand, waardoor er op dat moment met een lager debiet wordt geventileerd. De verwachting is dat er nog een besparing te behalen is wanneer er op CO₂ in de vakantie wordt gestuurd, waardoor deze in de vakantie nooit zal aan gaan.

2. Door het gebruik van te openen ramen en deuren gaat de CO₂-concentratie in een lokaal sneller omlaag dan een situatie zonder open ramen of deuren. Op deze manier zal de CO₂-gestuurde ventilatie minder snel aangaan. Dit levert een energiebesparing op doordat de ventilatoren minder hard gaan draaien, waardoor op zijn beurt de centrale verwarming en koeling ook omlaag gaat. Voor de lokale koeling heeft dit naar verwachting het effect dat er ook lokaal minder gekoeld hoeft te worden, doordat de warme binnenlucht sneller afgevoerd worden. Voor de lokale verwarming heeft dit niet veel effect, doordat te openen ramen meestal alleen in de lente en zomer open staan.

3. Door afwezigheid door ziekte is het op sommige dagen mogelijk dat er minder geventileerd hoeft te worden doordat er enkele leerlingen afwezig zijn. In dit onderzoek is aangehouden dat dit voor elke dag hetzelfde is. Wanneer dit zou worden meegenomen zou dit nog een kleine besparing opleveren.

Een grotere besparing is te behalen door te kijken naar afwezigheid door gym. In dit schoolgebouw bleek dit zo afwisselend te zijn dit niet op een constante manier kon worden meegenomen. Echter was hier te zien dat voor elke groep per week zo'n 3,5 uur afwezig zijn door gym. De tijdstippen hiervan waren echter zeer verschillend. Wanneer dit meegenomen zou worden zou dit nog een relatief grote energiebesparing opleveren.

4. In dit onderzoek is de groepsamenstelling niet meegenomen doordat er niet een verhouding tussen meisjes en jongens waren die constant zijn voor alle groepen. Er is hier met de CO₂-productie van jongens gerekend. Doordat meisjes zo'n 30 % minder produceren aan CO₂ zal ook hier een potentiële energiebesparing te realiseren zijn.

Discussie

Uitgangspunten

1. Als uitgangspunt is een CO₂-productie van jongens aangehouden, uit bronnen blijkt dat meisjes zo'n 30 % minder aan CO₂ produceren. In het geval van dit onderzoek is de CO₂-productie van jongens aangehouden omdat dit een potentiële energiebesparing oplevert die sowieso te halen is.

2. Als metabolisme van de leerlingen is 1,2 met aangehouden. Dit komt overeen met een zittende activiteit. Op basis van het metabolisme is de CO₂-productie bepaald. Bij een leeftijd van 8-12 is het naar verwachting een goede aanname dat deze leerlingen dit metabolisme hebben. Echter vooral bij jongere leerlingen is dit minder aannemelijk dat dit een metabolisme van 1,2 is. Doordat jongere leerlingen moeilijk stil kunnen zitten is het niet raar wanneer deze op sommige momenten een metabolisme van 1,6 halen door een verhoogde activiteit. Dit kan ervoor zorgen dat op die momenten een hogere CO₂-productie wordt gehaald.

3. De CO₂-productie is in de praktijk niet de gedurende de gehele tijd constant. Voor dit onderzoek is dit wel aangehouden omdat een variabele waarde geen goede indicatie van de potentiële energiebesparing kan geven.

Uitkomsten

1. De genoemde besparingen zijn berekend in het geval van een schoolgebouw, waarin groepen voorkomen met variërende leeftijden. Deze lopen uiteen van 5 tot 11 jaar. In het basisonderwijs is de besparing op CO₂-sturing het grootst doordat er veel verschil zit in CO₂-productie.

2. Besparing d.m.v. CO₂-sturing levert voor onderwijs de grootste besparing op voor het basisonderwijs. Op het middelbare onderwijs, universiteiten en hogescholen zal een minder grote besparing te behalen zijn doordat de CO₂-productie bij hogere leeftijden minder verschilt dan bij lagere leeftijden. Naar verwachting zal hier wel een besparing optreden, maar minder dan bij het basisonderwijs.

Verklarende woordenlijst

Bio-aërosol: Bacteriën en virussen die zich door de lucht verplaatsen.

Bétafactor: Geeft aan hoeveel de desbetreffende opwekker aan nominaal vermogen levert, wanneer er sprake is van een bijstook.

CO₂: Koolstofdioxide. De hoeveelheid CO₂ geeft een betrouwbare indicatie aan van bio-aërosol die zich in de lucht bevonden.

Convectief vermogen: Het deel van het afgegeven vermogen wat daadwerkelijk als warmte wordt afgegeven.

Conventioneel voorschakelapparaat: Wordt gebruikt om het stroomverbruik zo te begrenzen dat dit geschikt is om door een TL-buis sturen. Dit voorschakelapparaat gebruikt tevens energie.

COP: Coëfficiënt Of Performance: De verhouding tussen de geleverde energie en de benodigde energie. Een COP van 5 levert 5 kwh aan energie, en verbruikt daarbij 1 kWh.

Elektrische energie: De energie die een installatie verbruikt voor het opwekken van bijvoorbeeld thermische energie.

g-waarde: Verhoudingsgetal van glas tussen binnenkomende en opvallende zoninstraling, oftewel hoeveel aan zoninstraling door het glas naar binnen gaat. Vroeger werd dit ook wel de ZTA-waarde genoemd.

Lambda-waarde: Geeft de warmtegeleiding aan van een materiaal. Dit is uit te drukken in W/(m.K).
Metabolisme: Het activiteitsniveau waarbij het lichaam een bepaald aantal warmte uitstraalt naar de omgeving, uitgedrukt in W per m² lichaamsoppervlak of met.

Nominaal vermogen: Het maximaal te leveren vermogen door een installatie.

ppm (parts per million): Het aantal moleculen van een stof die per miljoen moleculen aanwezig zijn in de lucht.

Sick Building Syndrome: Omvat alle gebouwgerelateerde klachten die kunnen ontstaan door een slecht binnenklimaat in een gebouw.

Thermische energie: Te omschrijven als warmte-energie. Dit is de energie die een installatie aan warmte of koude levert.

T_i: Binnenluchttemperatuur.

T_{inblaas}: De temperatuur van de lucht die via het ventilatiekanaal wordt ingeblazen.

Transmissie: Transport van warmte binnen een constructie.

Voelbaar warmtevermogen: Het totale warmtevermogen wat wordt afgegeven.

WBDBO: Weerstand tegen branddoorslag en brandoverslag, uitgedrukt in minuten.

Zoninstraling: Warmte-energie die via de zon afgegeven wordt.

Bronnen

Bronnen - literatuur

- Duijm, F. (2006) *Toetswaarden voor ventilatie van scholen en kindercentra*. Utrecht, GGD Nederland Werkgroep Binnenmilieu.

- de Gids, W.F. (2007). *Het effect van ventileren op de cognitieve prestaties van leerlingen op een basisschool*. TNO-rapport.

- de Gids, W.F. (2011). *Ventilatie van ruimten ten behoeven van personen, achtergrond van de eisen*. TNO-rapport.

- Li Y., Leung G.M., Tang J.W., Yang X., Chao C.Y.H., Lin Z., Lu J.W, Nielsen P.V., Niu J., Qian H., Sleigh A.C., Su H.J.J., Sundell J., Wong T.W., Yuen P.L., *Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment – a multidisciplinary systematic review*.

- Pavlovas, V., (2003) *Demand Controlled Ventilation. A Case Study for Existing Swedish Multifamily Buildings, Licentiate thesis D2003:06*, Chalmers University of Technology, Sweden.

- Versteeg, H. (2007). *Onderzoek naar de kwaliteit van het binnenmilieu in basisscholen*. Ministeries van VROM, OCW, SZW en VWS.

Bronnen - Publicaties

- Bouwbesluit 1992

- Bouwbesluit 2003

- Bouwbesluit 2012

- Vabi Software bv. (2012) *Handleiding Vabi Elements*.

- ISSO publicatie 32 (1994) *Uitgangspunten temperatuursimulatieberekeningen*.

- ISSO publicatie 73 (2005) *Ontwerp en uitvoering van verticale bodemwisselaars*.

- ISSO publicatie 75.2 (2007) *Energieprestatie advies utiliteitsgebouwen*.

- Jacobs, P.,Dijken, F. van & Boersma, A., (2007) *Prestatie-eisen van ventilatie in klaslokalen*. VV Magazine (juli-augustus 2007) pag.780-783.

- Joosten L., Boxem G, Pernot C, Cloquet R. (2005) *Gezond en tochtvrij ventileren op school onderzocht*. TVVL Magazine 2005 (10): pag. 8-13.

- NEN 7120 (2011) *Energieprestatie van gebouwen - Bepalingsmethode*.

- Agentschap NL (2008, 2010, 2012) *Programma van Eisen Frisse Scholen*.

- Rudnick, S.N., Milton, D.K., (2003) *Risk of airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration*. Indoor Air 13(3): pag. 237-245.

- Shaughnessy, R.J., Havinen-Shaughnessy, U., Nevalainen, A., Moschandreas, D.(2006). *A preliminary study on the association between ventilation rates in classrooms and student performance*. Indoor Air 16(6): pag. 465-468.

- Shendell, D.G., Prill, R., Fisk, W.J., Apte, M.G., Blake, D. Faulkner, D., (2004) *Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho*, Indoor Air 14(5): pag. 333-341.

- Wargocki, P., Wyon, D.P., Matysiak, B., Irgens, S., (2005) *The effects of classroom air temperature and outdoor air supply rate on the performance of school work by children*, Indoor Air: Proceedings of the 10th international conference on indoor air quality and climate, Beijing China, pag. 368-372.

- Wijsman, A.J.Th.M., Kok, V., Plokker, (2007). ISSO/REHVA handleiding 901 *Binnenmilieu en productiviteit in kantoren*

- Woodcock, R.C. (2000) *CO₂ measurements for IAQ analysis*. Occup Health Safety ;69: pag. 56-69.

Bronnen - Internet

- www.firecare.nl

Bronnen - Personen

Peutz bv:

- ir. J.A. (Jérôme) Eijsackers (Senior adviseur bouwfysica & duurzaamheid)

- ir. M. (Marco) van Beek (Adviseur bouwfysica & duurzaamheid)

Hogeschool Utrecht:

- ir. K. (Karin) Grooten (docent bouwfysica)

- ing. V. (Vincent) Frowijn M.Arch (docent bouwtechniek/architect)

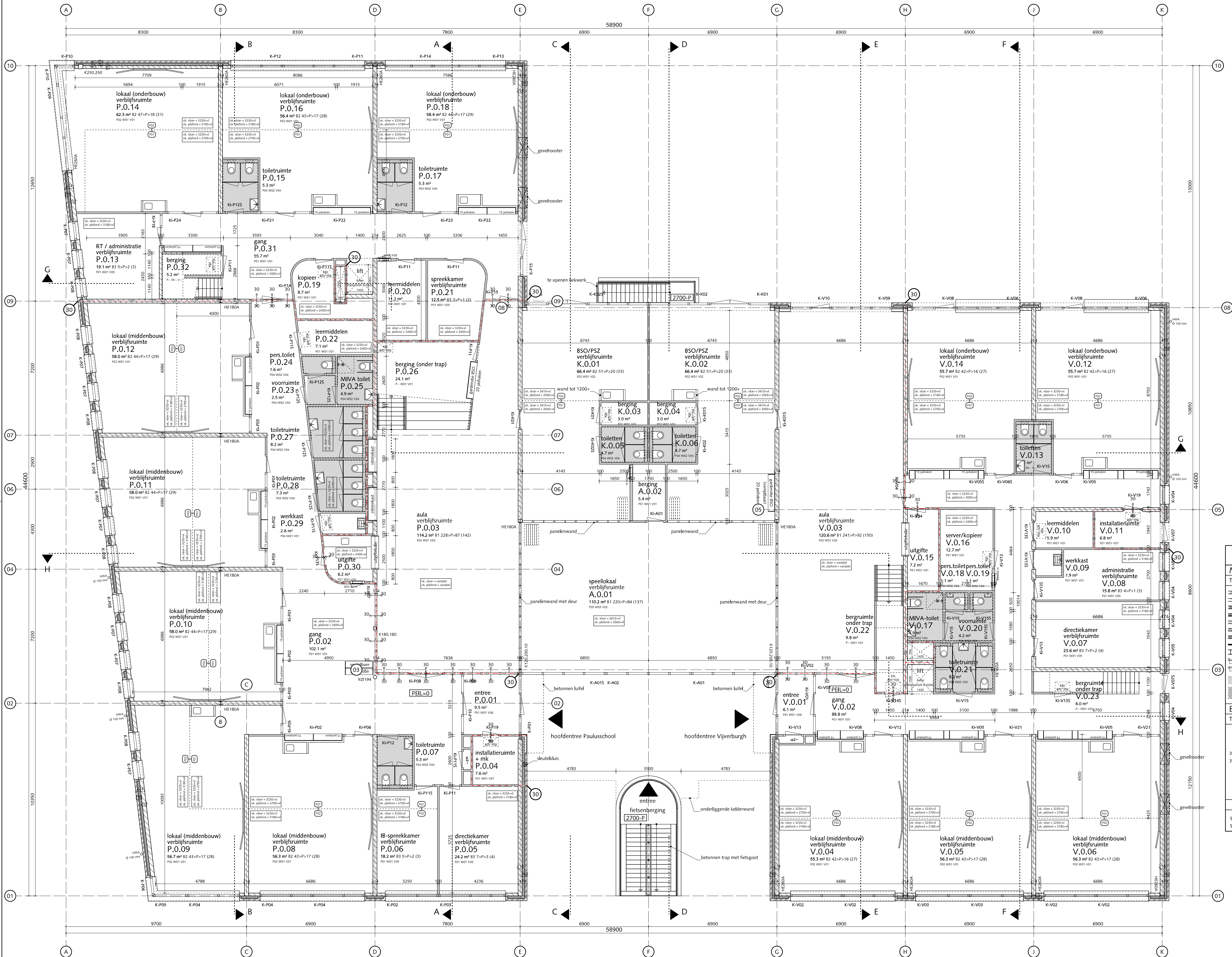
B i j l a g e n

Inhoud:

- Bijlage A1: Plattegrond begane grond [niet op schaal]
- Bijlage A2: Plattegrond 1^e verdieping [niet op schaal]
- Bijlage A3: Plattegrond 2^e verdieping [niet op schaal]
- Bijlage A4: Gevelaanzicht Zuid & West [niet op schaal]
- Bijlage A5: Gevelaanzichten Noord & Oost [niet op schaal]
- Bijlage B1: Ventilatie 12-jarigen
- Bijlage B2: Ventilatie 8-jarigen
- Bijlage B3: Ventilatie 5-jarigen
- Bijlage C: Ventilatorgrafiek
- Bijlage D1: Brandveiligheid begane grond
- Bijlage D2: Brandveiligheid 1^e verdieping
- Bijlage D3: Brandveiligheid 2^e verdieping

1 1

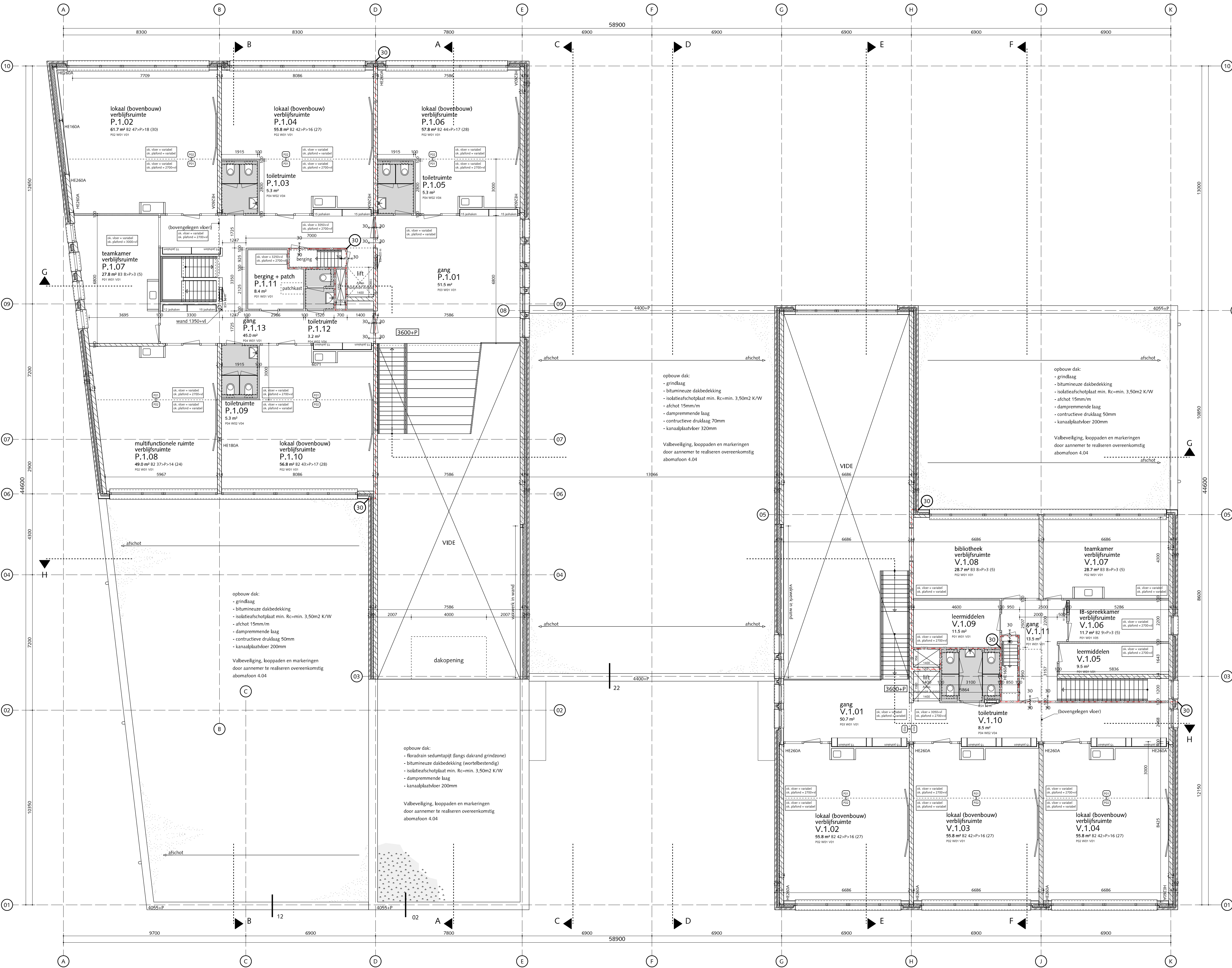
Bijlage A1: Plattegrond begane grond



RENVOOI PLATTEGROND			
MATERIAALISERING		AANDUIDINGEN	
TYPE	OMSCHRIJVING	TYPE	OMSCHRIJVING
	baksteen		opstelplaats kooktoestel
	kalkzandsteen		opstelplaats koelkast
	systeemwand -12 db		opstelplaats vaatwasser
	H.S.B. wand		opstelplaats wasmachine
	in het werk gestort beton		opstelplaats wasdroger
	pefab beton		aanrechtblok
	isolatie		wandcloset
	gevelbekleding		MIVA toilet
	staalconstructie volgens opgave constructeur		fontein / wastafel
	houten kozijnen met dagmaat		uitstortgootsteen
	stalen kozijnen met dagmaat		kruipruik
	bolidit vloer		hemelwaterafvoer
	sedum-dak		noodoverstort
BRANDVEILIGHEID			
TYPE	OMSCHRIJVING		
	brandscheiding 30 min. WBDBo		
	30 min. WBDBo		
	30 min. WBDBo en zelfsluitend		
OPMERKINGEN			
SCHEIDINGSWANDEN TUSSEN VERBLIJFSRUIMTEN min. lucht-geluid isolatie lju = -5 Dba			
SCHEIDINGSWANDEN TUSSEN VERBLIJFSRUIMTEN + VERKEERSRUIMTEN min. lucht-geluid isolatie lju = -10 Dba			

PROJECT	Onderwijscluster Paltelaan	DATUM	10 juli 2009
OPDRACHTGEVER	Gemeente Zoetermeer	GEWIJZGD	
OMSCHRIJVING	Plattegrond Begane grond	GEWIJZGD	
FASE	Bouwvoorbereiding	AFMETING	A1
		SCHAAL	1:100
		WERKNUMMER	3201
		FILENAAM	BV-100.DRW
		BLAD	BV-100
		print/report datum	28-08-2009

Bijlage A2: Plattegrond 1e verdieping



BVO 1e verdieping Paulusschool
524 m²

BVO 1e verdieping Vijverburgh
400 m²

RENVOOI PLATTEGROND

MATERIAALISERING		AANDUIDINGEN	
TYPE	OMSCHRIJVING	TYPE	OMSCHRIJVING
	baksteen		opstelplaats kooktoestel
	kalkzandsteen		opstelplaats koelkast
	systemewand -12 db		opstelplaats vaatwasser
	H.S.B. wand		opstelplaats wasmachine
	in het werk gestort beton		opstelplaats wasdroger
	prefab beton		aanrechtblok
	isolatie		wandcloset
	gevelbekleding		MIVA toilet
	staalconstructie volgens opgave constructeur		fontein / wastafel
	houten kozijnen met dagmaat		uitstortgootsteen
	stalen kozijnen met dagmaat		kruipluik
	bolidd vloer		hemelwaterafvoer
	sedum-dak		noodoverstort

BRANDVEILIGHEID

TYPE	OMSCHRIJVING
	brandscheiding 30 min. WBDBO
	30 min. WBDBO
	30 min. WBDBO en zelfsluitend

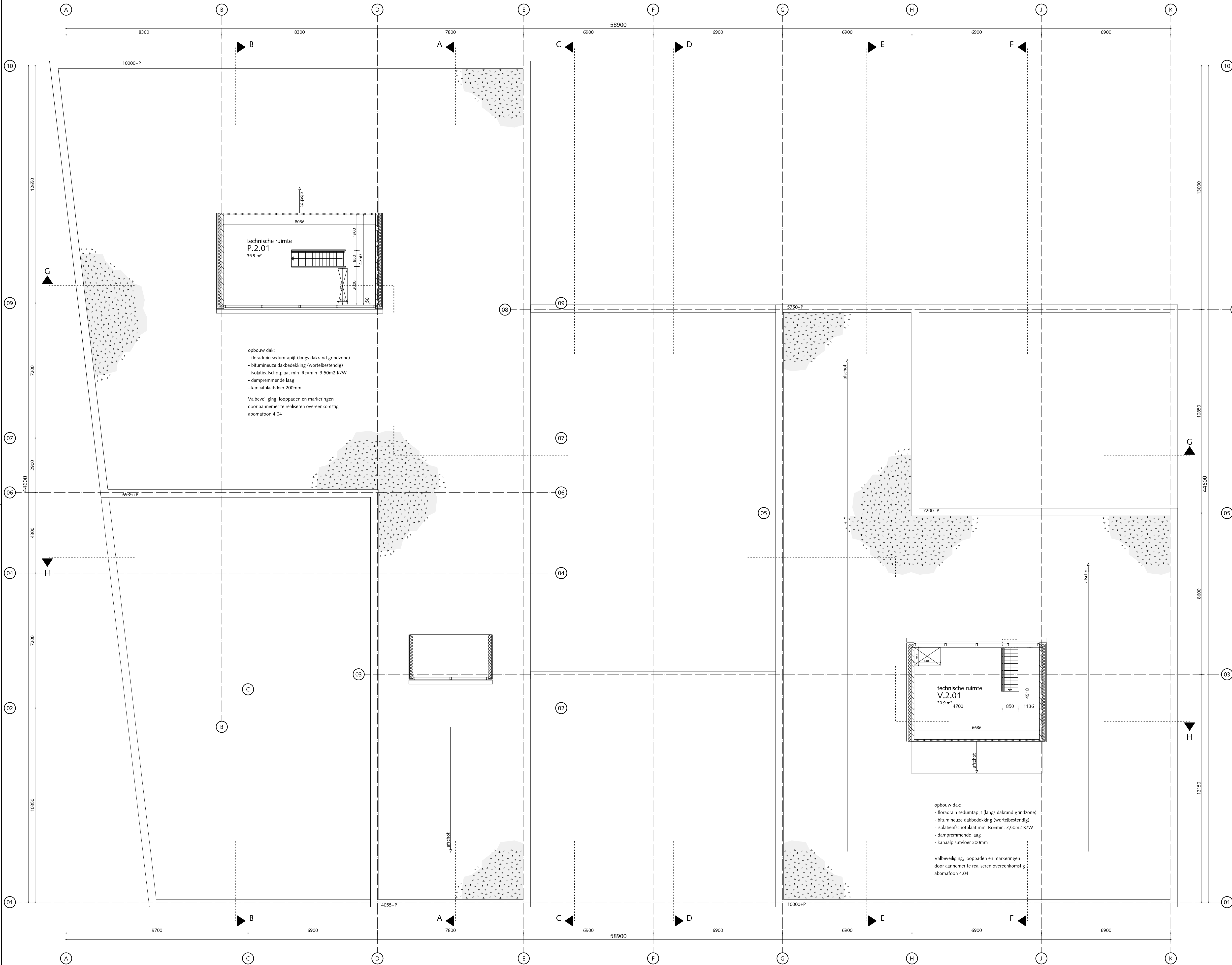
OPMERKINGEN

SCHEIDINGSWANDEN TUSSEN VERBLIJFSRUIMTEN min. lucht-geluid isolatie ltu = -5 Dba
SCHEIDINGSWANDEN TUSSEN VERBLIJFSRUIMTEN + VERKEERSRUIMTEN min. lucht-geluid isolatie ltu = -10 Dba

PROJECT Onderwijscluster Paltelaan
OPDRACHTGEVER Gemeente Zoetermeer
OMSCHRIJVING Plattegrond 1e verdieping
FASE Bouwvoorbereiding

DATUM 10 juli 2009
GEWIZIGD
GEWIZIGD
AFMETING A1
SCHAAL 1:100
WERKNUMMER 3201
FIJLNAAM BV-101.DRW
BLAD BV-101
print report datum 28-08-2009

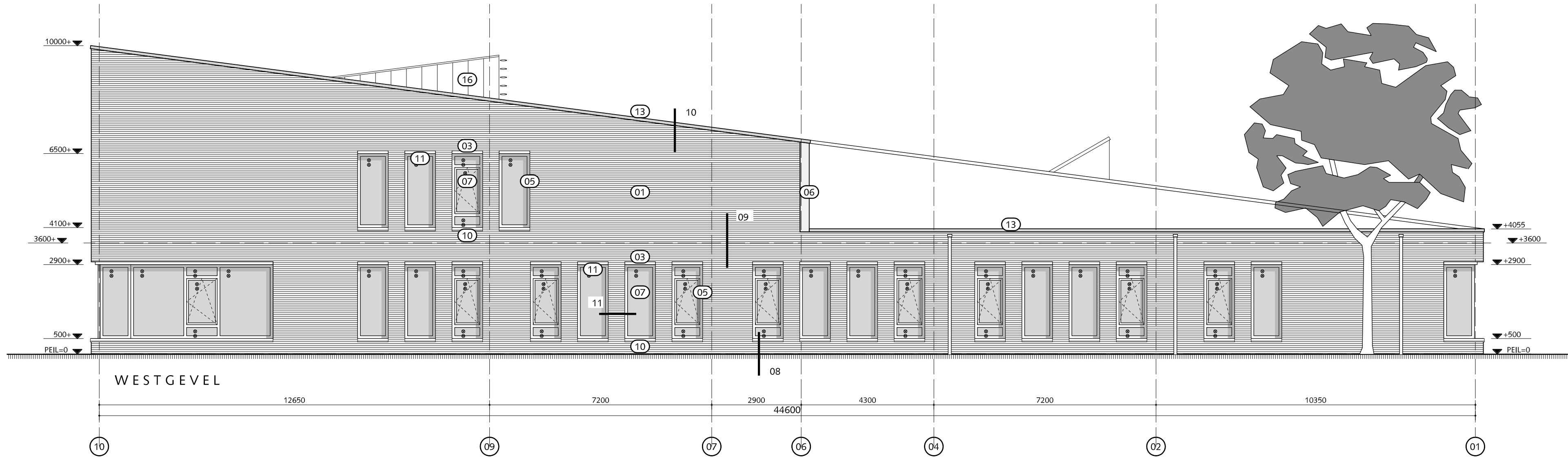
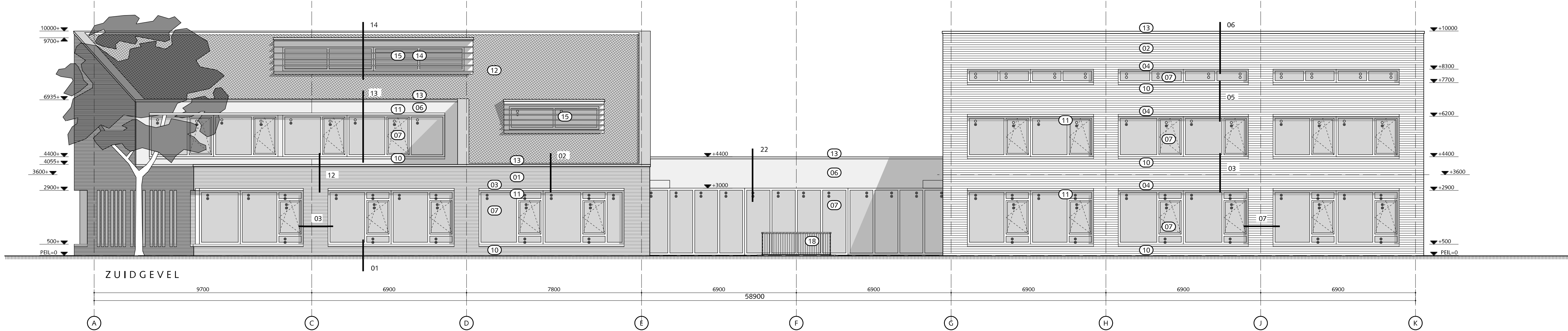
Bijlage A3: Plattegrond 2e verdieping



RENVOOI PLATTEGROND			
MATERIALIZERING		AANDUIDINGEN	
TYPE	OMSCHRIJVING	TYPE	OMSCHRIJVING
	baksteen		opstelplaats kooktoestel
	calciumsilicaatwand		opstelplaats koelkast
	H.S.B. wand		opstelplaats vaatwasser
	in het werk gestort beton		opstelplaats wasmachine
	prefab beton		opstelplaats wasdroger
	isolatie		aanrechtblok
	gevelbekleding		wandcloset
	staalconstructie volgens opgave constructeur		MIVA toilet
	houten kozijnen met dagmaat		fontein / wastafel
	stalen kozijnen met dagmaat		uitstortgootsteen
	bolide vloer		kruipruimte
	sedum-dak		hemelwaterafvoer
BRANDVEILIGHEID			noodoverstort
TYPE	OMSCHRIJVING		
	brandscheiding 30 min. WBDBO		
	30 min. WBDBO		
	30 min. WBDBO en zelfsluitend		
OPMERKINGEN			
SCHEIDINGSWANDEN TUSSEN VERBLIJFSRUIMTEN min. lucht-geluid isolatie I _{lu} = -5 Dba			
SCHEIDINGSWANDEN TUSSEN VERBLIJFSRUIMTEN + VERKEERSRUIMTEN min. lucht-geluid isolatie I _{lu} = -10 Dba			

PROJECT	Onderwijscluster Paltelaan	DATUM	10 juli 2009
OPDRACHTGEVER	Gemeente Zoetermeer	GEWIJZIGD	
OMSCHRIJVING	Plattegrond dak	GEWIJZIGD	
FASE	Bouwvoorbereiding	AFMETING	A1
		SCHAAL	1:100
		WERKNUMMER	3201
		FILENAAM	BV-102.DRW
		BLAD	BV-102
		print/ingepikt datum	28-08-2009

Bijlage A4: Gevelaanzicht Zuid & West



RENVOOI GEVELS	
MATERIALIZERING	
CODE	OMSCHRIJVING
01	metselwerk baksteen waalformaat halfsteens verband kleur 1
02	metselwerk baksteen waalformaat halfsteens verband kleur 2
03	metselwerkdragers staal kleur 1
04	metselwerkdragers staal kleur 2
05	keimwerk in neggekant
06	gevelement beton microbeton
07	kozijnen hout FSC keur
08	entreeduren hout FSC keur
09	deur met glasopening hout FSC keur
10	waterslag aluminium
11	zonwering uitvalscher
12	dakbedekking floradrain sedumtapijt
13	afdekap zink op klang
14	buitenluchtroosters aluminium achter lamellen
15	lamellen aluminium
16	gevelbekleding zink fellsysteem
17	zitelement onder kozijn prefab beton
18	lamellenhekwerk staal
19	
20	
OPMERKING	
verdeling plaatmateriaal , leien , conform tekening	

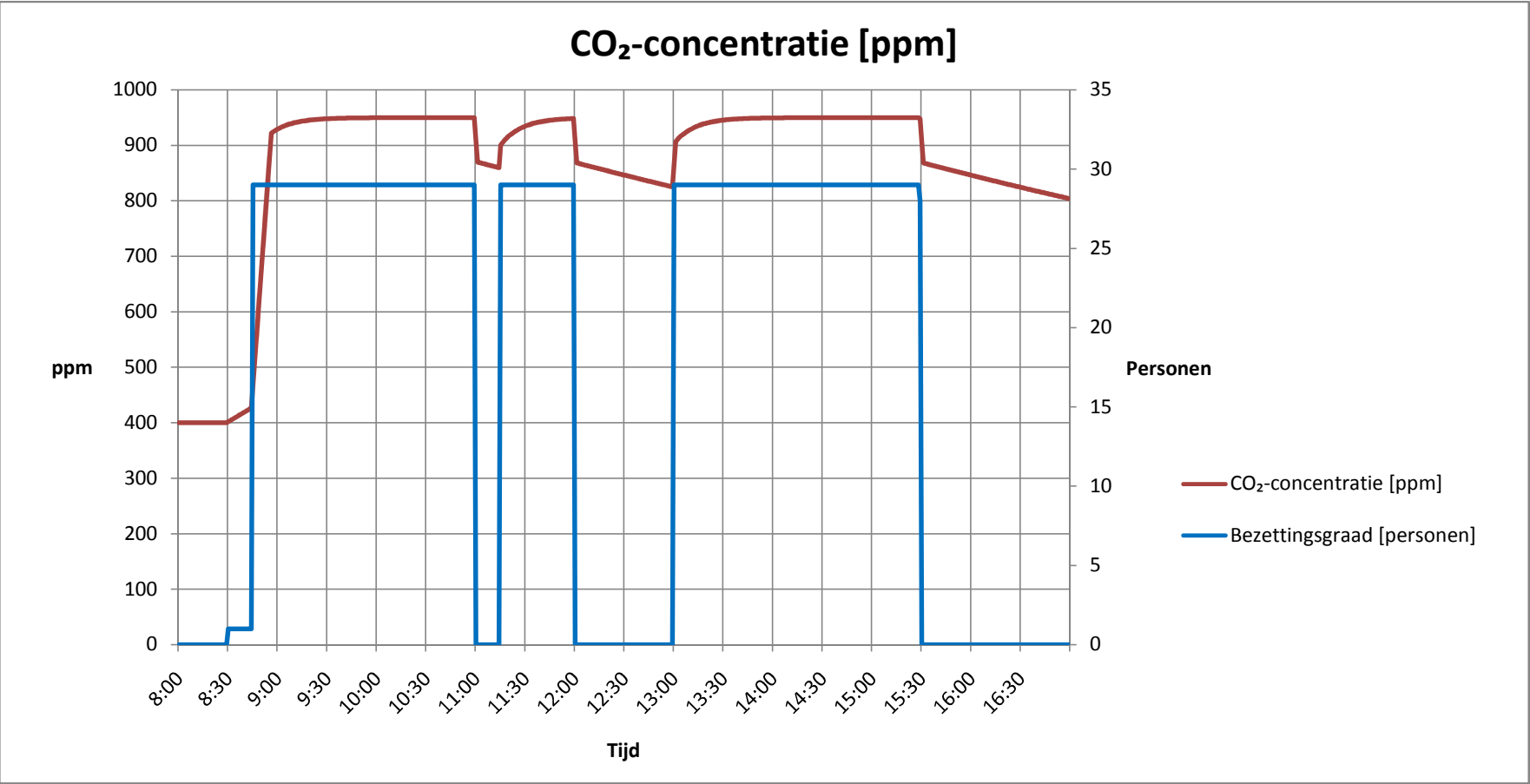
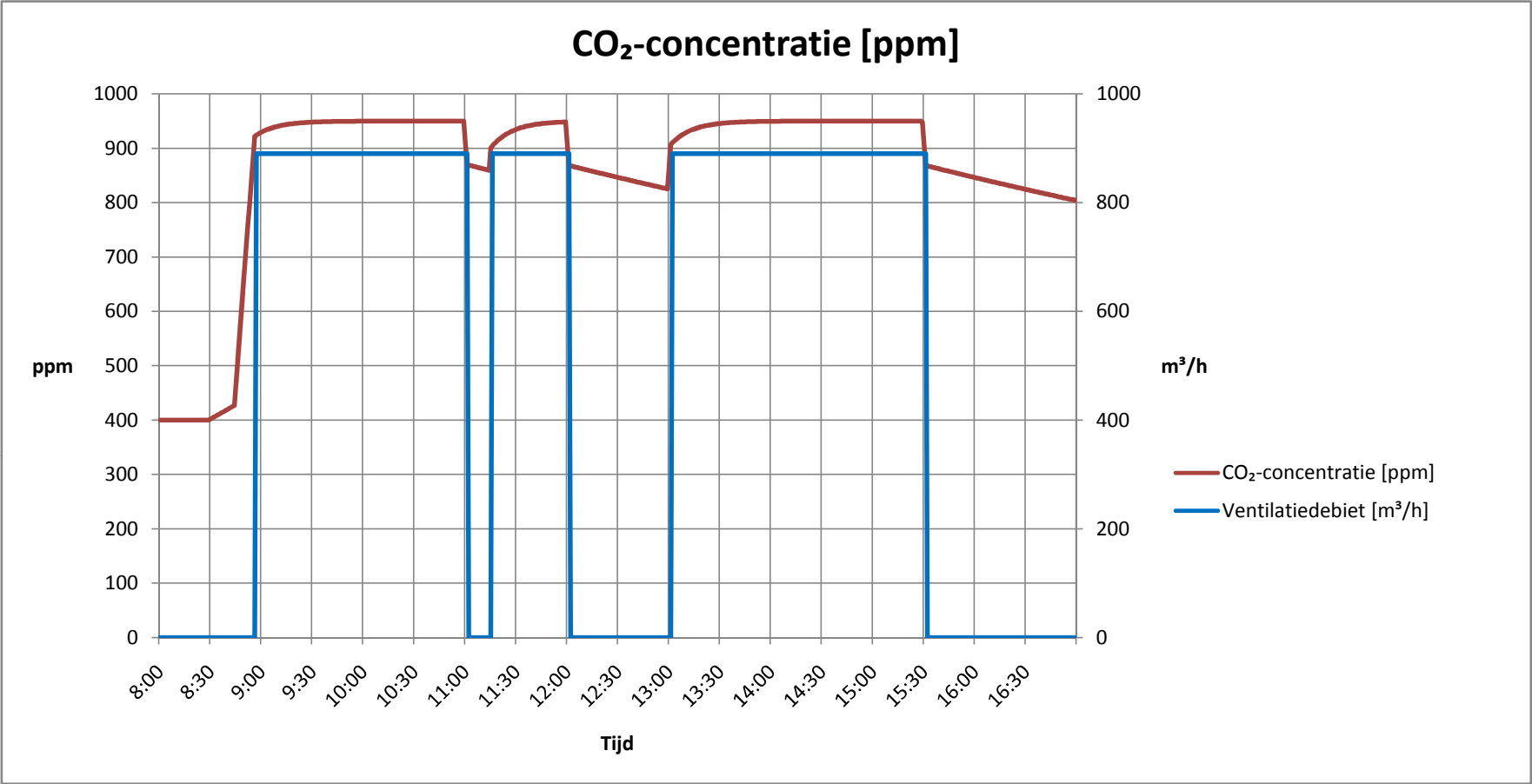
PROJECT Onderwijscluster Paltelaan
OPDRACHTGEVER Gemeente Zoetermeer
OMSCHRIJVING Gevelaanzichten Zuid + West
FASE Bouwvoorbereiding

DATUM 10 juli 2009
GEWIZIGD
GEWIZIGD
AFMETING A1
SCHAAAL 1:100
WERKNUMMER 3201
FLENAAM BV-200.DRW
BLAD BV-200
print/rapport datum 28-08-2009

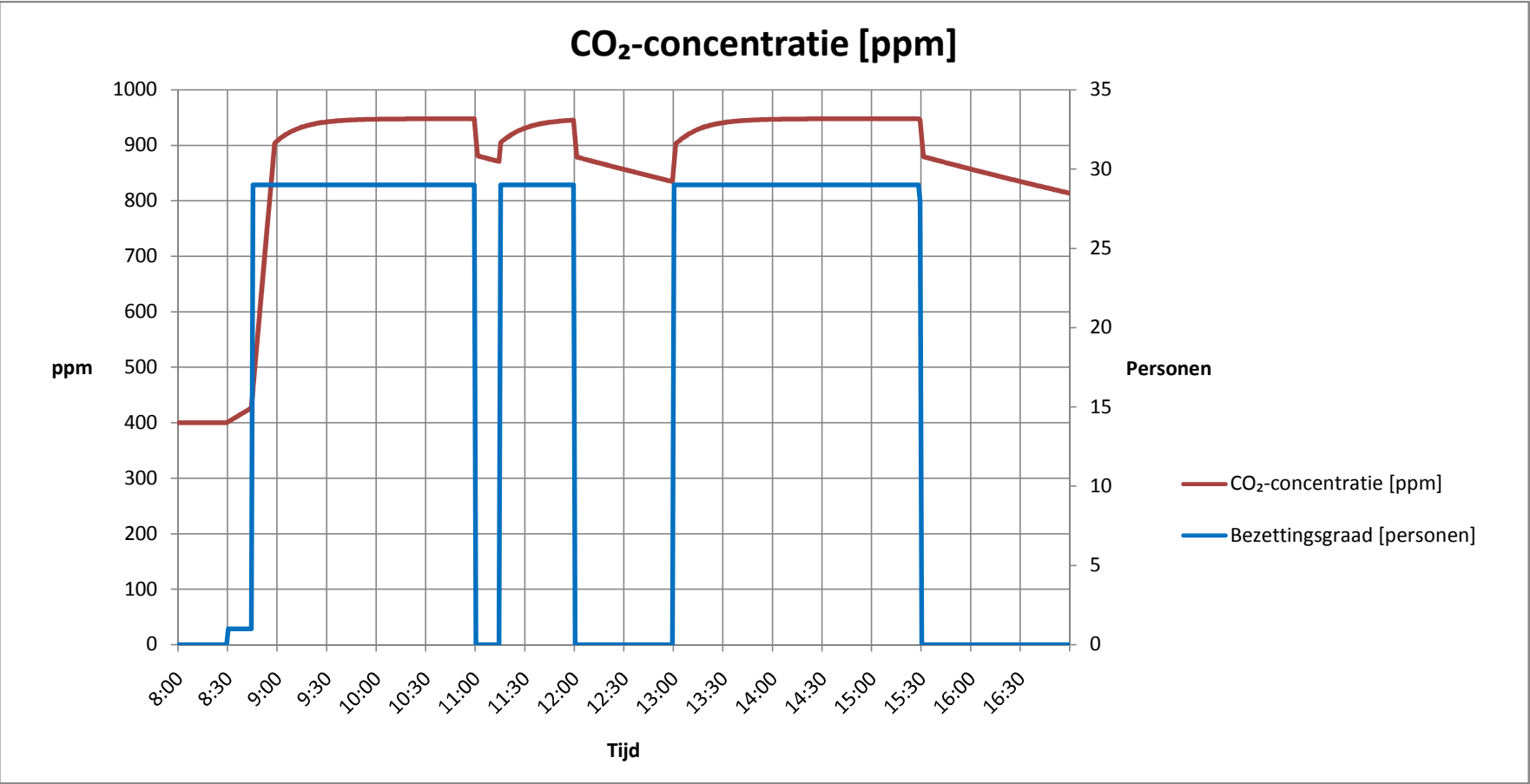
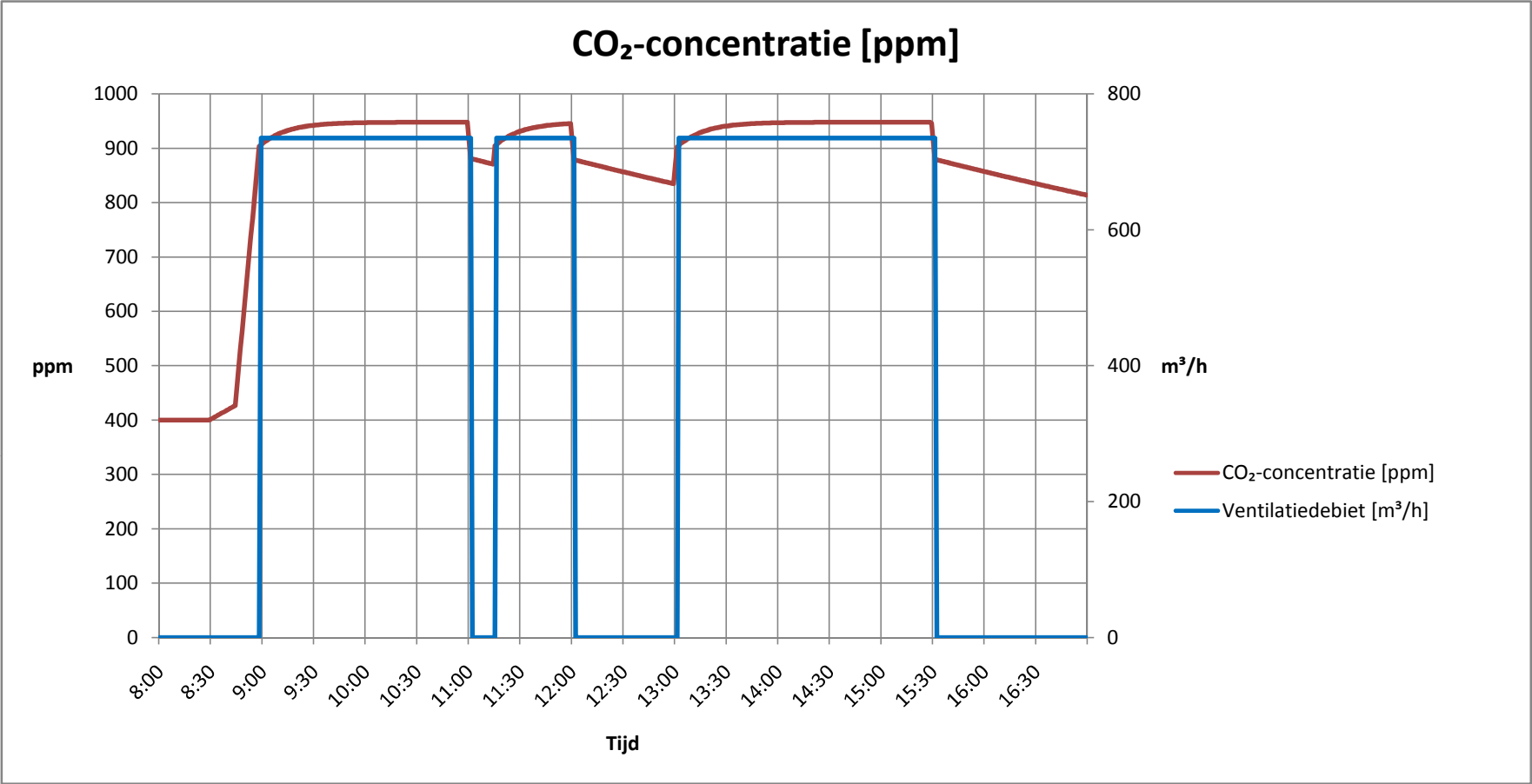
Bijlage A5: Gevelaanzichten Noord & Oost



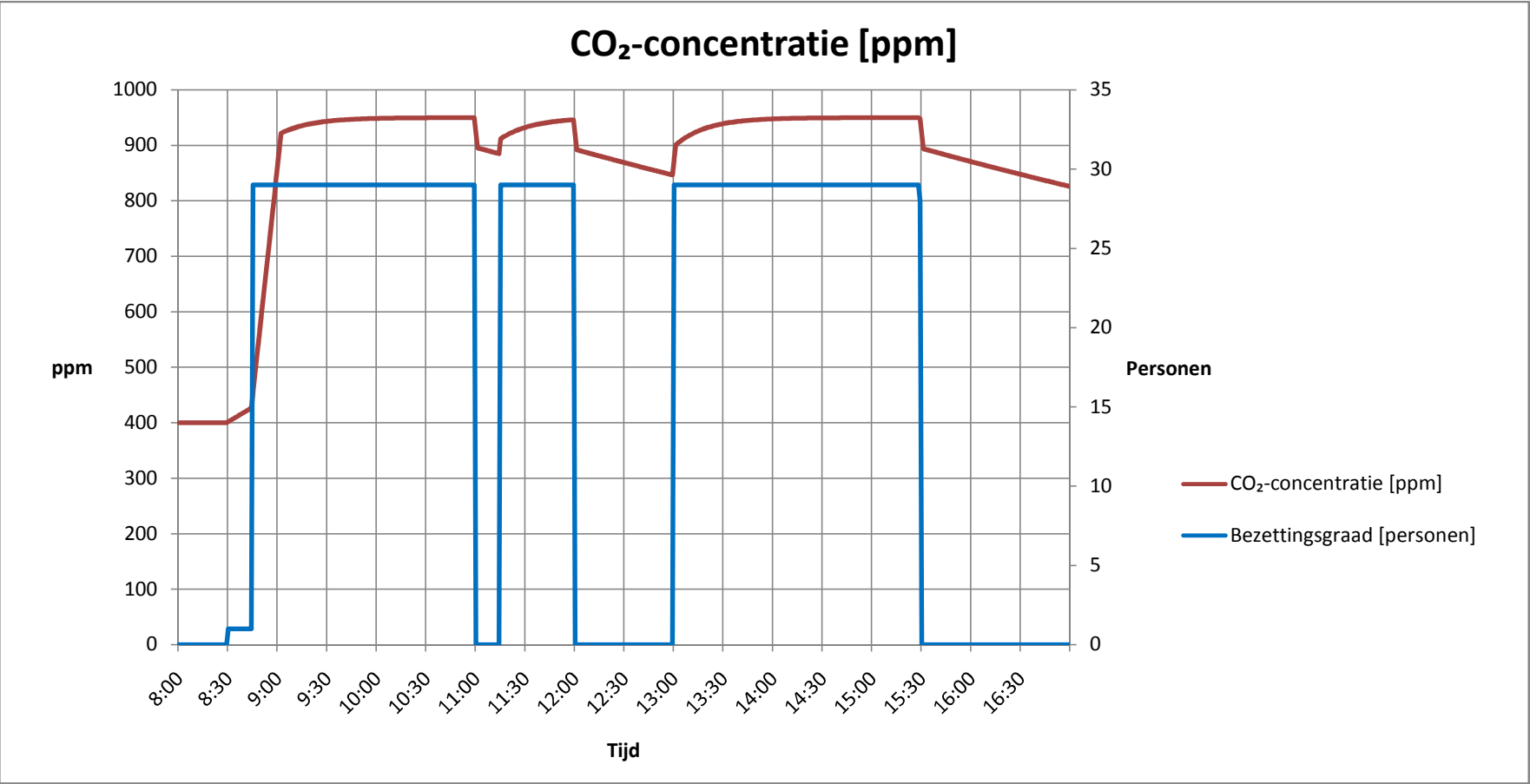
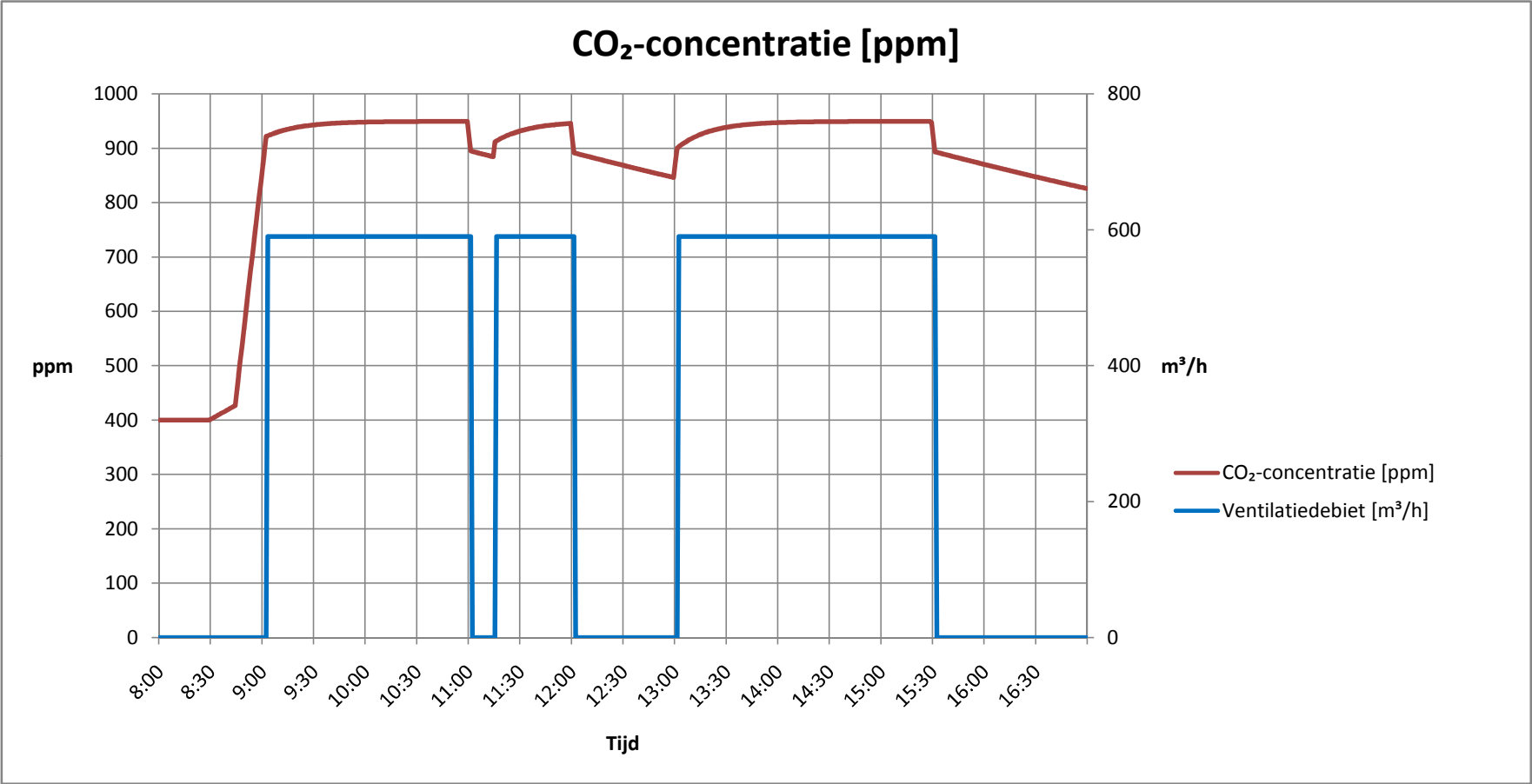
Bijlage B1: Ventilatie 12-jarigen



Bijlage B2: Ventilatie 8-jarigen



Bijlage B3: Ventilatie 5-jarigen

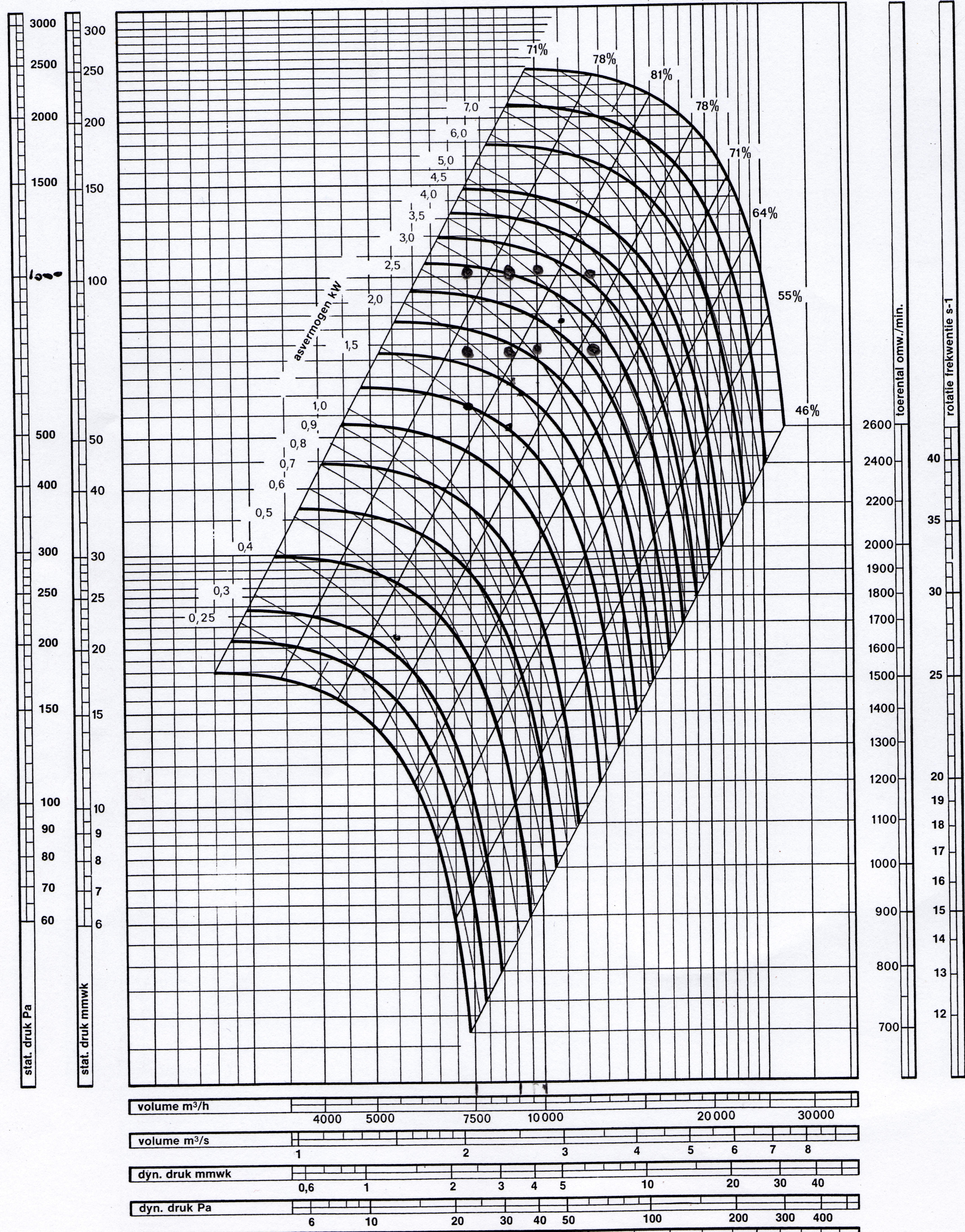


Ventilator type: **hbw-bc 1825 d**
Dubbelaanzuigende ventilator, achterovergebogen

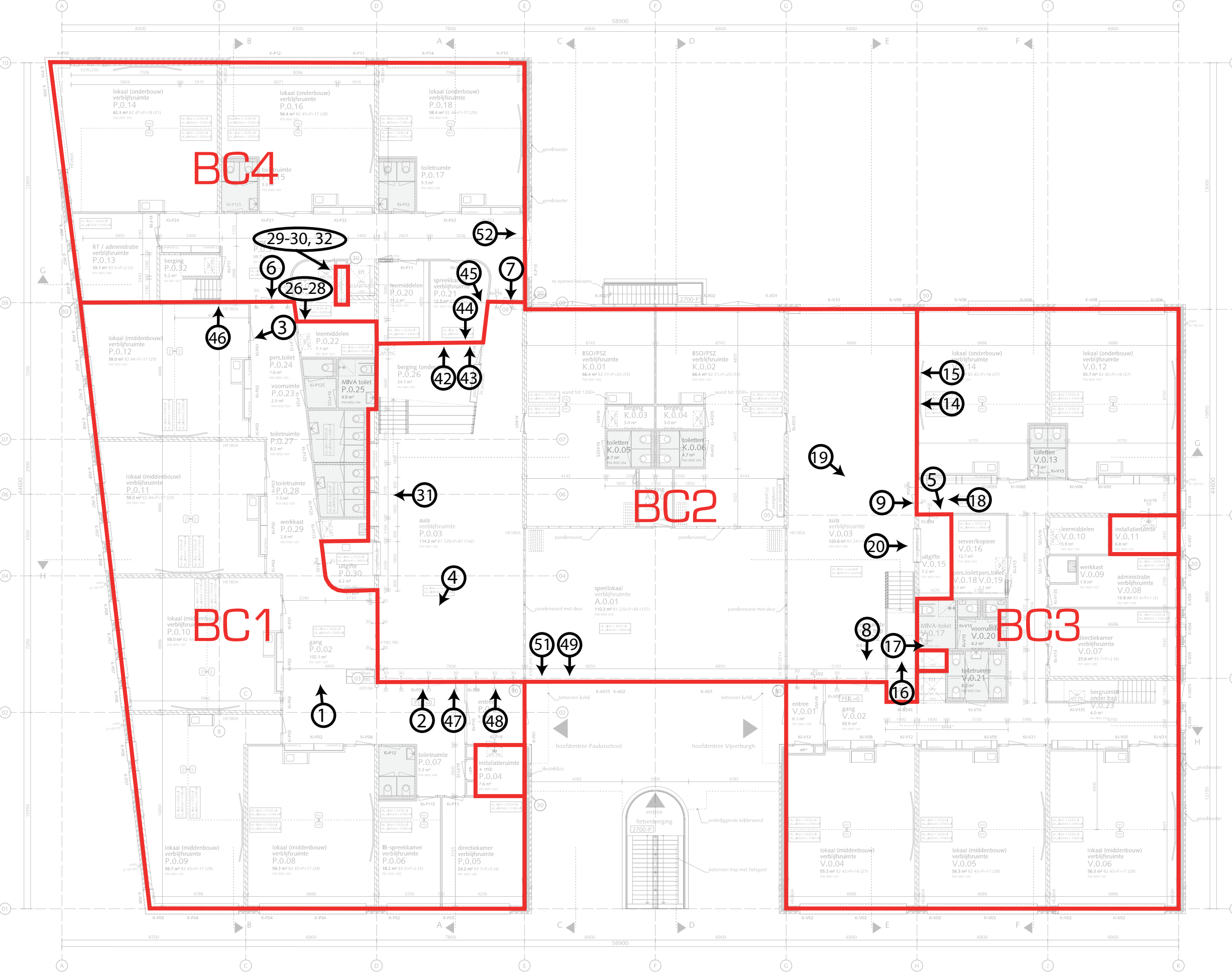
Bijlage C: Ventilatorgrafiek

Max. rotatiefrekwentie : 47 s⁻¹
Omtreksnelheid : 1,456 x rot. frekwentie m/s
Massatraagheidsmoment : 0,396 kgm²
Inbouwmogelijkheden : Kasttype IIIC + IIIC2 + IVC + IVC2

max. selectie type IIIC2 max. selectie type IVC
max. selectie type IIIC max. selectie type IVC2



Bijlage D1: Brandveiligheid begane grond



RENVOOI PLATTEGROND			
MATERIAALISERING		AANDUIDINGEN	
TYPE	OMSCHRIJVING	TYPE	OMSCHRIJVING
	baksteen		opstelplaats kooktoestel
	alkazandsteen		opstelplaats koelkast
	systemewand -12 db		opstelplaats vaatwasser
	H.S.B. wand		opstelplaats wasmachine
	in het werk gestort beton		opstelplaats wasdroger
	prefab beton		aanrechtblok
	isolatie		wandcloset
	gevelbekleding		MIVA toilet
	staalconstructie volgens opgave constructeur		fontein / wastafel
	houten kozijnen met dagmaat		uitstortgootsteen
	stalen kozijnen met dagmaat		kruipluik
	bolide vloer		hemelwaterafvoer
	sedum-dak		noodoverstort
BRANDVEILIGHEID			
TYPE	OMSCHRIJVING		
	brandscheiding 30 min. WBD80		
	30 min. WBD80		
	30 min. WBD80 en zelfsluitend		
OPMERKINGEN			
SCHEIDINGSWANDEN TUSSEN VERBLIJFSRUIMTEN min. lucht-geluid isolatie I _{lg} = -5 Dba			
SCHEIDINGSWANDEN TUSSEN VERBLIJFSRUIMTEN + VERKEERSRUIMTEN min. lucht-geluid isolatie I _{lg} = -10 Dba			

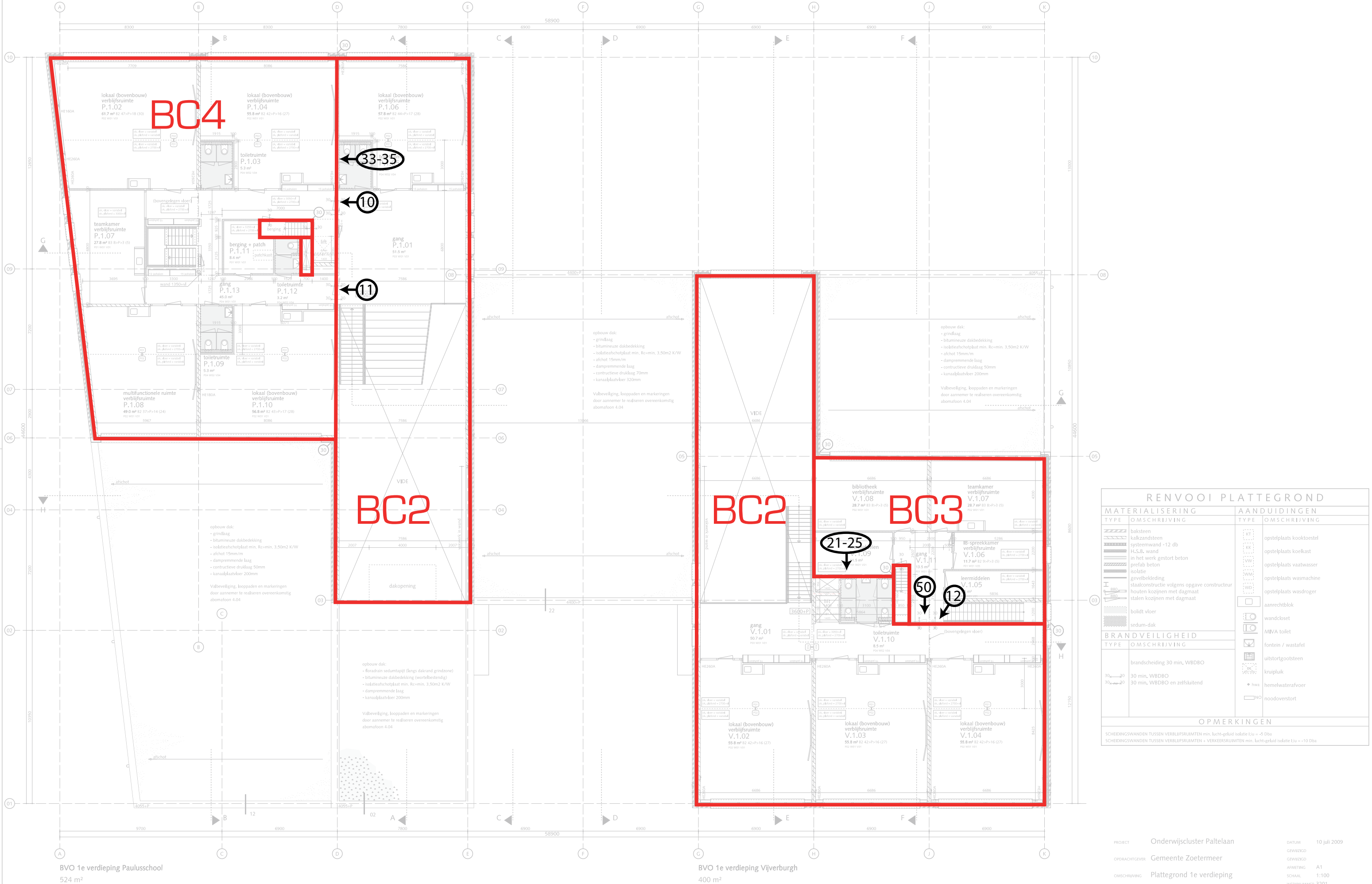
BVO begane grond Paulusschool
1030 m²

BVO begane grondvloer BSO/PSZ
276 m²

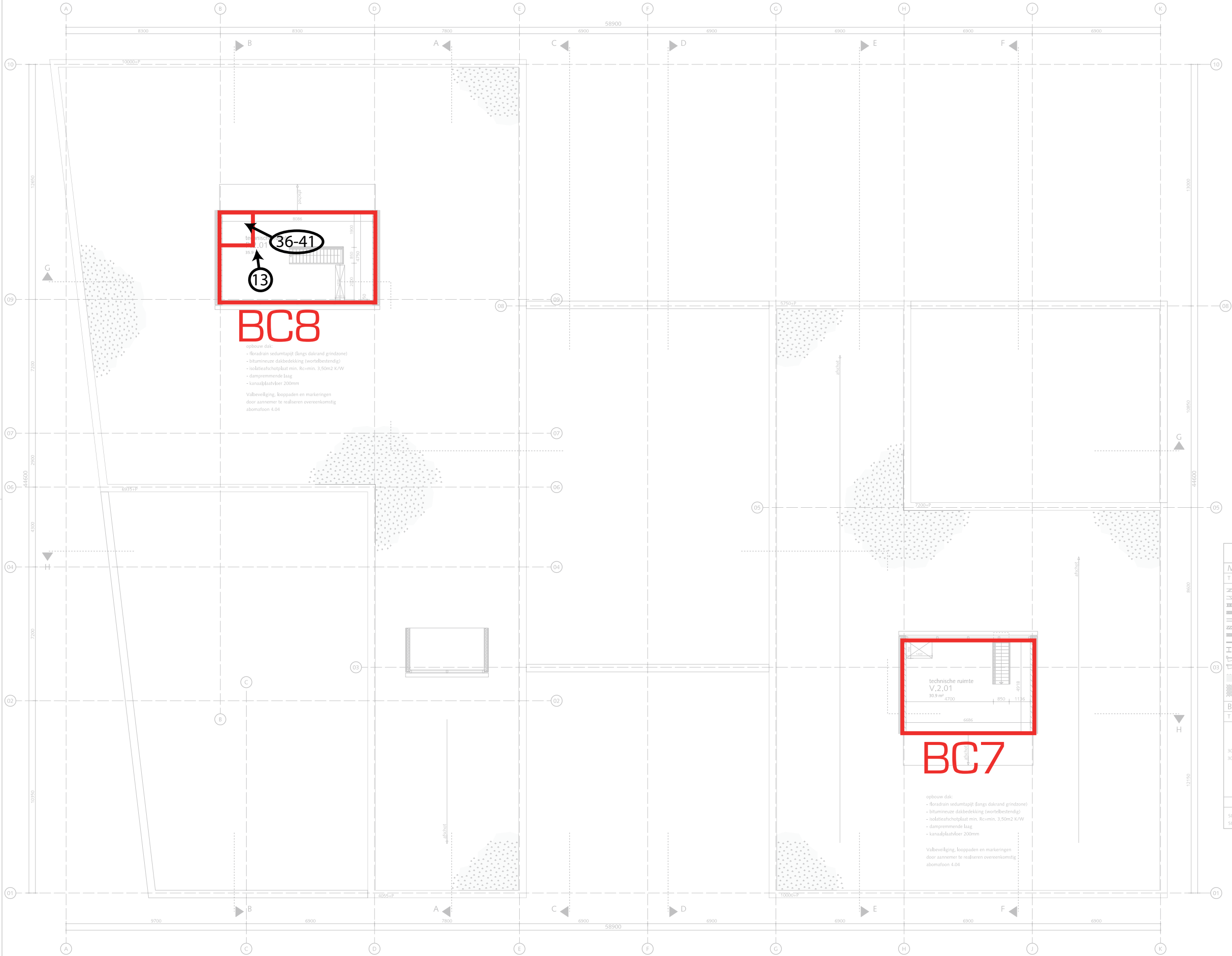
BVO begane grond Vijverburgh
681 m²

PROJECT	Onderwijscluster Paltelaan	DATUM	10 juli 2009
OPDRACHTGEVER	Gemeente Zoetermeer	GEWISZGD	
OMSCHRIJVING	Plattegrond Begane grond	GEWISZGD	
FASE	Bouwvoorbereiding	ARMETING	A1
		SCHAAL	1:100
		WERKNUMMER	3201
		FILENAAM	BV-100.DRW
		BLAD	BV-100
		printdatum	10-07-2009

Bijlage D2: Brandveiligheid 1e verdieping



Bijlage D3: Brandveiligheid 2e verdieping



RENVOOI PLATTEGROND			
MATERIALISERING		AANDUIDINGEN	
TYPE	OMSCHRIJVING	TYPE	OMSCHRIJVING
	baksteen		opstelplaats kooktoestel
	kalkezandsteen		opstelplaats koelkast
	systeemwand -12 db		opstelplaats vaatwasser
	H.S.B. wand		opstelplaats wasmachine
	in het werk gestort beton		opstelplaats wasdroger
	prefab beton		aanrechtblok
	isolatie		wandcloset
	gevelbekleding		MIVA toilet
	staalconstructie volgens opgave constructeur		fontein / wastafel
	houten kozijnen met dagmaat		uitstortgootsteen
	stalen kozijnen met dagmaat		kruipluik
	boliddt vloer		hemelwaterafvoer
	sedum-dak		noodoverstort
BRANDVEILIGHEID			
TYPE	OMSCHRIJVING		
	brandscheiding 30 min. WBDBO		
	30 min. WBDBO		
	30 min. WBDBO en zelfsluitend		
OPMERKINGEN			
SCHEIDINGSWANDEN TUSSEN VERBLIJFSRUIMTEN min. licht-geluid isolatie I(La) = -5 Db			
SCHEIDINGSWANDEN TUSSEN VERBLIJFSRUIMTEN + VERKEERSRUIMTEN min. licht-geluid isolatie I(La) = -10 Db			

PROJECT	Onderwijscluster Paltelaan	DATUM	10 juli 2009
GEWENZIGD		GEWENZIGD	
OPDRACHTGEVER	Gemeente Zoetermeer	AFMETING	A1
OMSCHRIJVING	Plattegrond dak	SCHAAL	1:100
WERKNUMMER	3201	WERKNUMMER	3201
FILENAAM	BV-102.DRW	FILENAAM	BV-102.DRW
BLAD	BV-102	BLAD	BV-102
Bouwvoorbereiding		print report datum: 28-05-2009	