



BELGIAN
SOCIETY FOR
OCCUPATIONAL
HYGIENE

Beoordelen van de binnenluchtkwaliteit aan de hand van koolstofdioxide

...en de rol van modellen en metingen hierin

dr. ir. Tom Geens

Wetenschappelijk Medewerker Provikmo – Voorzitter BSOH

26^{ste} Symposium NVvA Beriepziekten; beroepsziekten verleden tijd?!

Sessie E, Binnenluchtkwaliteit

12/04/2017 - 13:30 tot 14:30

Provikmo

Externe dienst voor Preventie en Bescherming op het Werk

- www.provikmo.be
- Ruwe structuur:
 - Afdeling medisch toezicht
(+110 bedrijfsartsen voor +35000 bedrijven)
 - Afdeling risicobeheersing (vele PA veiligheid niv. 1 & 2 of andere specialisten: +50 ~~ings~~, ~~irs~~, psychologen/sociologen, ergonomen, arbeidshygiënisten, veiligheidsdeskundigen,...)
 - Team ergonomie, psychosociaal, veiligheid
 - **Team bedrijfshygiëne**
 - **Team metingen**
 - Studie- en documentatiedienst (stafdienst)
 - **Team studiedienst**
 - **Team documentatiedienst**



BSOH

- bevorderen kennis, competentie en beroepseer
- bevorderen en handhaven vakbekwaamheid
- stimuleren van wetenschappelijke en professionele ontwikkeling
- verspreiding en uitwisseling van kennis
- naambekendheid arbeidshygiëne vergroten
- nationale en internationale samenwerkingen
- meer info en contact: www.bsoh.be

Contact

dr. ir. Tom Geens

voorzitter/président BSOH

tom.geens@bsoh.be

twitter.com/tgeens

linkedin.com/in/tomgeens



BSOH vzw/asbl

Maatschappelijke zetel/Siège social

Kapucijnenvoer 35/5 B-3000 Leuven

info@bsoh.be

www.bsoh.be

dr. ir. Tom Geens

Wetenschappelijk medewerker

t +32 (50) 474 805

tom.geens@provikmo.be

Provikmo vzw – Studie- en documentatiedienst

Dirk Martensstraat 26 – B-8200 Sint-Andries (Brugge)

Disclaimer: De inhoud van deze e-mail en de bijlagen is strikt vertrouwelijk en enkel bestemd voor gebruik door de geadresseerde. Indien dit bericht niet voor u bestemd is, dient u dit aan de afzender te melden, de e-mail te verwijderen en kan de inhoud in geen geval gevallen ressorteren. Groep ADMB streeft ernaar advies te verlenen op een zorgvuldige manier, gebaseerd op de huidig beschikbare informatie. Het verleende advies is louter informatief en kan op geen enkele wijze enige aansprakelijkheid van een juridische entiteit, onderdeel van Groep ADMB, tot gevolg hebben.



Inhoud

- Binnenluchtkwaliteit
- Ventilatie beoordelen
- De hamvraag
- Ventilatie meten
- CO₂ als tracer
- Toetsingskader
- Rekenmodellen
- Problemen en oplossingen
- CO₂ sim en CO₂ ana

Binnenluchtkwaliteit (1)

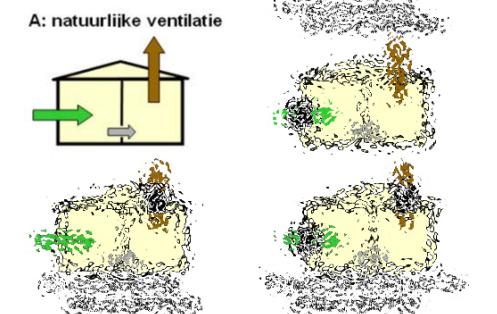
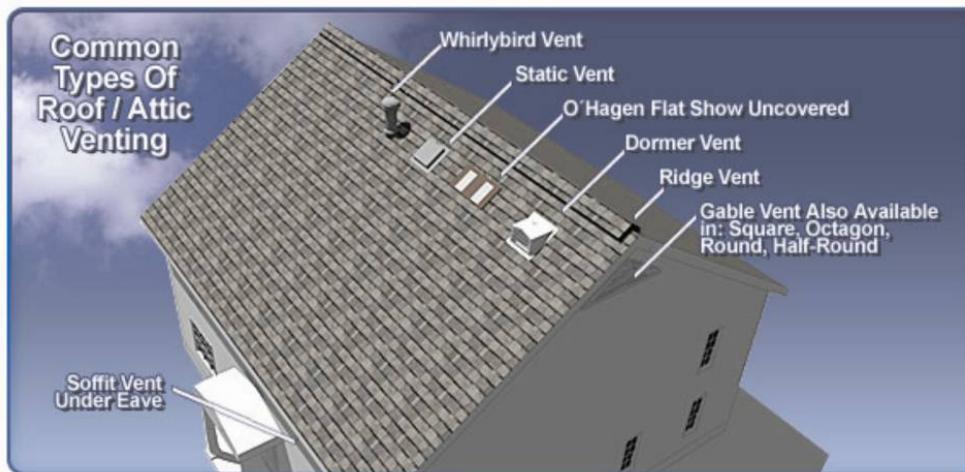
- in en rond gebouwen en structuren
- behartigt gezondheid en comfort van mensen
- te *objectiveren* via samenspel van factoren
 - chemische (CO, CO₂, Radon, Ozon, VOCs,...)
 - biologische (bacteriën, schimmels,...)
 - fysische (Temp, RV, luchtsnelheid,...)
- ... en het *subjectieve oordeel van de mensen?*
- eerder *comfortbenadering* dan toxicologische

Binnenluchtkwaliteit (2)

- neemt af naarmate
 - emissies toenemen (VOCs uit vaste stoffen of vloeistoffen, CO₂ uit verbranding, ademhaling mensen/dieren) ...
 - verdunning vervuilde lucht met niet-vervuilde lucht afneemt
- neemt toe naarmate
 - emissies afnemen
 - verdunning vervuilde lucht met niet-vervuilde lucht toeneemt
- relaties tussen emissie en dilutie, temp, RV,...

Ventilatie beoordelen (1)

- Kwalitatief
 - Natuurlijk (zonder mechanisch systeem, passief)
 - temperatuur-, druk- en vochtigheidsverschillen (o.a. stack effect) leidend tot **in- en exfiltratie (onbewust)**
 - ventilatie **systeem A (bewust)**, wind driven ventilation

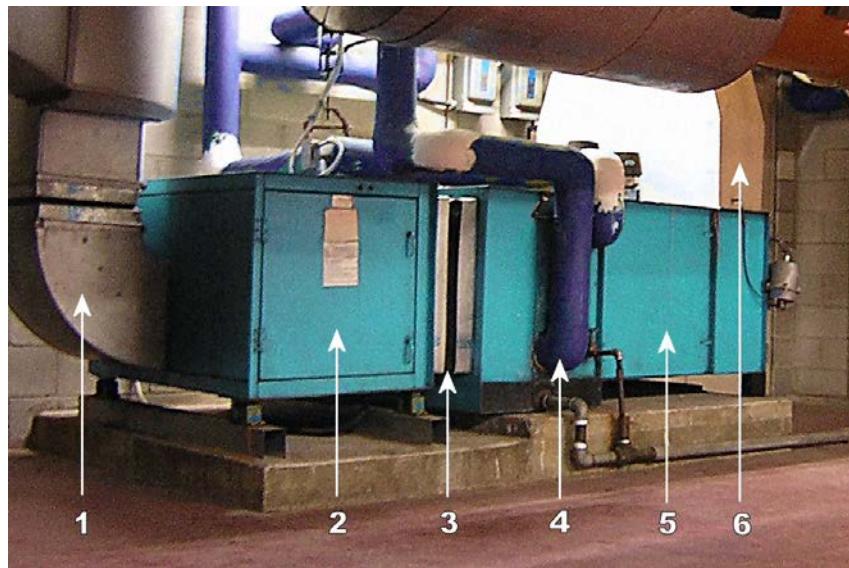


<http://y-tech.be/VentilatieSystemen.htm>

Jason Lien and Noor Ahmed (2011). Wind Driven Ventilation for Enhanced Indoor Air Quality, Chemistry, Emission Control, Radioactive Pollution and Indoor Air Quality, Dr. Nicolas Mazzeo (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/17059. Available from: <http://www.intechopen.com/books/chemistry-emission-control-radioactive-pollution-and-indoor-air-quality/wind-driven-ventilation-for-enhanced-indoor-air-quality>

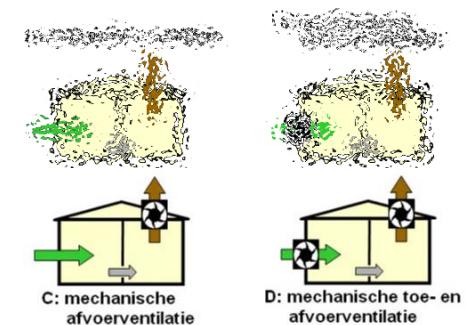
Ventilatie beoordelen (2)

- Kwalitatief
 - Geforceerd (met mechanisch systeem, actief)
 - vooral ventilatie **systeem C (roosters gecombineerd met extractie)** en **systeem D (balanssysteem)**



<https://nl.wikipedia.org/wiki/HVAC>

- 1 - Toevoerkanaal
- 2 - Ventilatorcompartment
- 3 - Trillingsmanchet
- 4 - Verwarming en/of koelelement
- 5 - Filtercompartment
- 6 - Buiteluchtaanzug/recirculatiekanaal



<http://y-tech.be/VentilatieSystemen.htm>

Ventilatie beoordelen (3)

- Kwantitatief: luchtdebit (**Q**)
 - aanvoer volume verse (en afvoer vervuilde) lucht in de ruimte per tijdseenheid (m^3/h , m^3/min , m^3/s , $\text{l/s}, \dots$)
 - relatie van **Q** met binnenluchtkwaliteit bepaald door
 - **vloeroppervlak** (O_r in m^2) en (standaard?) hoogte (**Q/O_r**)
 - **volume van de ruimte** (V_r in m^3) (**Q/V_r** is beter bekend als λ en geeft waarden **per tijdseenheid** zoals VV/KVH/ACH/ACR/AER (/h) en **V_r/Q** als **$1/\lambda$** of waarden in **tijden** zoals nL (h))

Airflow rate conversion table

volume m ³	flow m ³ /h	flow m ³ /min	flow l/sec	aer /h	aer /min	aer /sec	nL h	nL min	nL sec
60.0000	60.0000	1.0000	16.6667	1.0000	0.0167	0.0003	1.0000	60.0000	3600.0000

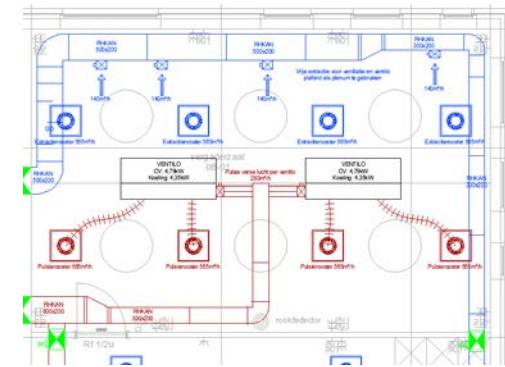
- **personen** (p in aantal) in de ruimte (**Q/p**) en de mate waarin ze de lucht vervuilen (emissie van bio-effluenten)

De hamvraag

- Krijgen de mensen “voldoende” verse lucht?
- Wordt de “werkelijk” geleverde hoeveelheid verse lucht ($Q_{\text{“werkelijk”}}$) per persoon (p) gehaald zoals geconcipieerd bij “ontwerp”?
 - $Q_{\text{“werkelijk”}} \geq Q_{\text{“ontwerp”}}$
 - $p_{\text{“werkelijk”}} \leq p_{\text{“ontwerp”}}$ en dus $Q_{\text{“werkelijk”}}/p \geq Q_{\text{“ontwerp”}}/p$
 - geen hercompartimenteringen van ruimtes?
 - wel degelijk onderhoud van ventilatiesystemen?
- Hoe beide Q waarden kwantificeren?

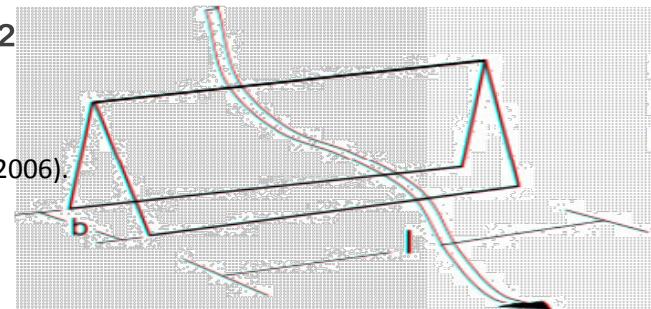
De hamvraag

- Hoe moeten we $Q_{\text{"ontwerp"}}$ inschatten?
 - plannen van het ventilatiesysteem (m^3/h)
 - documentatie van de fabrikant
 - bv. roostertypes in combinatie met drukverschillen: ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$)
 - natuurlijke ventilatie vuistregel geopend oppervlak
 - in tegenovergelegen gevels $1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$
 - in zelfde gevel $0,2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$
- GGD-RICHTLIJN BEOORDELEN VAN VENTILATIE SCHOLEN. Habets T et al (2006).
<https://www.rvo.nl/sites/default/files/bijlagen/GGD-richtlijn%20beoordeelen%20van%20ventilatie%20scholen.pdf>
- natuurlijke ventilatie stack effect
https://en.wikipedia.org/wiki/Stack_effect
- Hoe moeten we $Q_{\text{"werkelijk"}}$ meten?



technische waarden < Inl

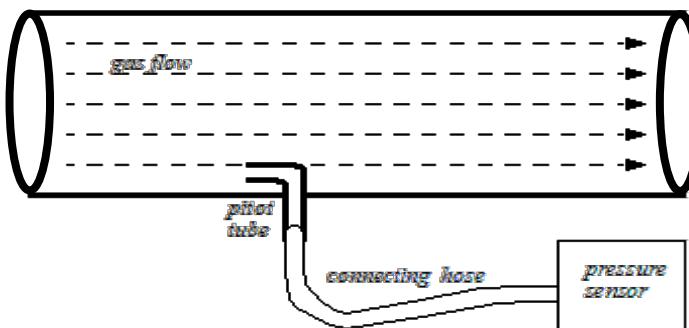
Pagina	Debit q_1 bij 2 Pa ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$)	Debit q_1 bij 10 Pa ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$)	L0 2Pa	L0 10Pa	Debit Q bij 2 Pa ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$)	Debit Q bij 10 Pa ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$)
8	53,0	53,0	0,10	0,11	51,3	47,1
10	67,0	60,0	0,08	0,09	66,6	59,2
12	58,0	56,0	0,04	0,01	57,2	64,4
14	44,0	43,0	0,06	0,03	41,7	50,4



WHO Moisture control and ventilation
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK143947/>

Ventilatie meten (1)

- eenvoudig in een buis (luchtsnelheid) ... (€)
 - debiet = snelheid * oppervlak of $Q = v * a$
 - bv. luchtsnelheid $v = 1 \text{ m/s}$ of 100 cm/s en $a = 100 \text{ cm}^2$
 - $Q = v * a$ of $10000 \text{ cm}^3/\text{s}$ of 10 l/s



https://www.researchgate.net/publication/227622496_Airflow_Measurement_Techniques

<https://nl.wikipedia.org/wiki/Pitotbuis>

Ventilatie meten (2)

- iets moeilijker buiten de buis (debiet) ... (€€)
 - directe aflezing van debieten



https://www.researchgate.net/publication/227622496_Airflow_Measurement_Techniques

<https://www.bsria.co.uk/instrument/sales/airflow/air-capture-hood-sets/>

<http://www.ivytools.com/Air-Flow-Capture-Hoods-s/1976.htm>

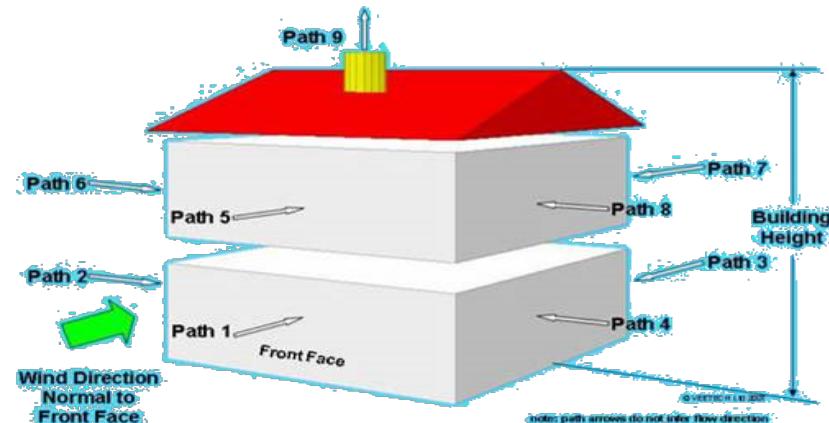
<http://acin.nl/product/flowfinder-mk-2/>

Ventilatie meten (3)

- complex voor een (deel van) een gebouw...
 - locatie (stad/platteland)
 - klimatologische omstandigheden (temperatuursverschillen binnen/buiten, drukverschillen (windrichting en -snelheid), vochtigheidsverschillen)
 - ventilatiepaden (tussen ruimte onderling en naar buiten)

**luchtsnelheidsmetingen
in venster- en
deuropeningen
onbruikbaar!**

Hoe Q afleiden???



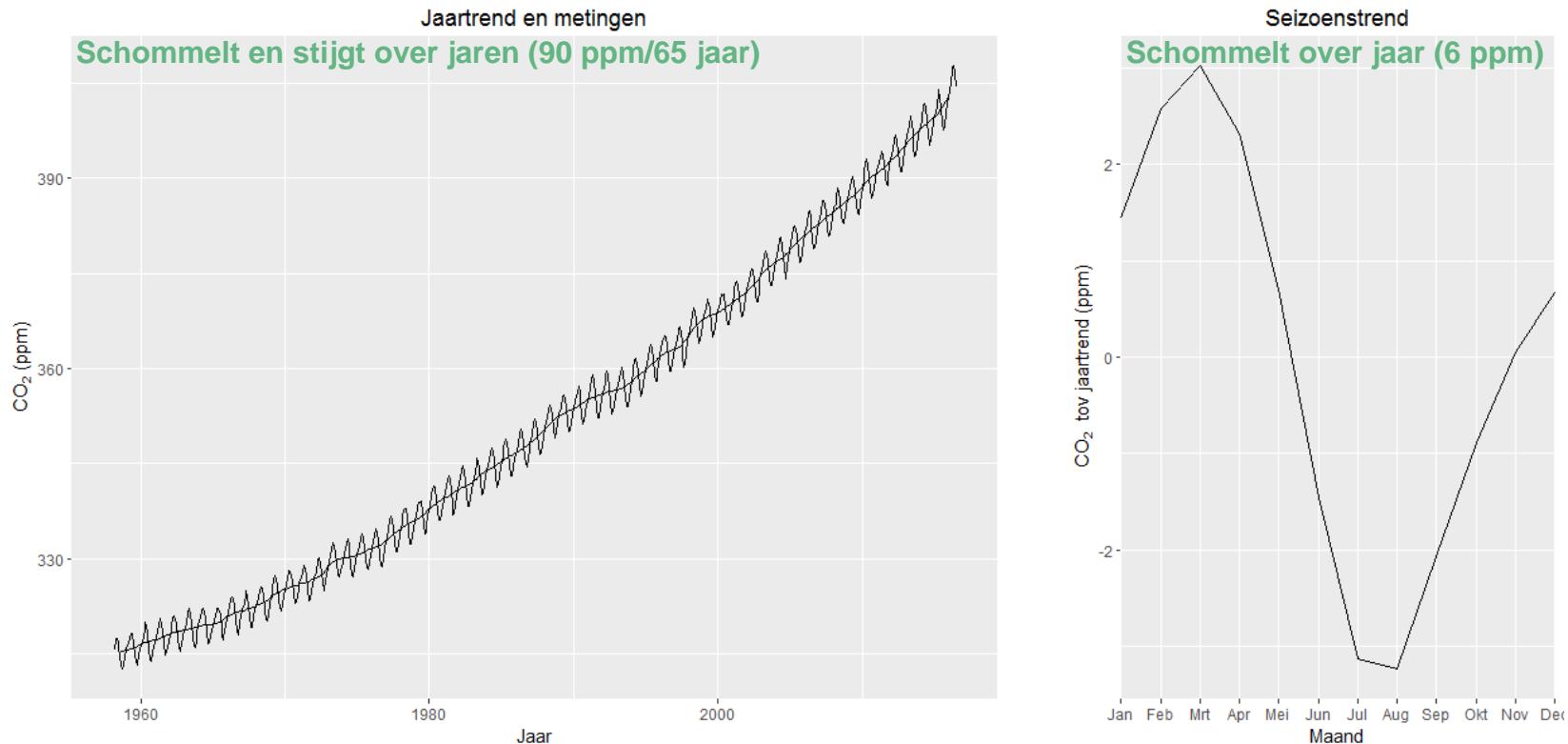
CO₂ als tracer

- Mensen zijn een sterke (maar zeker niet de enige) bron van binnenluchtverontreiniging:
 - Ze ademen lucht in van grofweg 400 ppm CO₂
 - Ze ademen lucht uit van grofweg 40000 ppm CO₂

Gassen	Concentratie in lucht voor inademen (%)	Concentratie in lucht bij uitademen (%)
O ₂	20,94	17,04
CO ₂	0,04	3,94
N ₂	78,09	78,09
edelgassen	0,93	0,93

CO₂ als tracer

- Ademen lucht in van grofweg 400 ppm CO₂

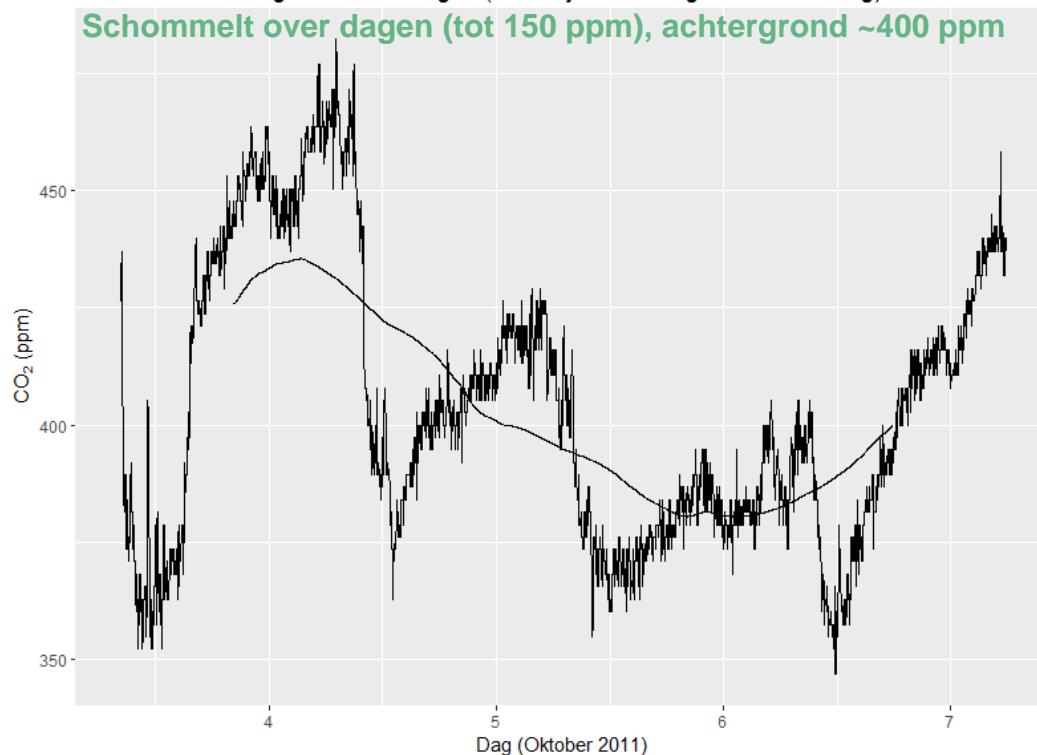


<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>

CO₂ als tracer

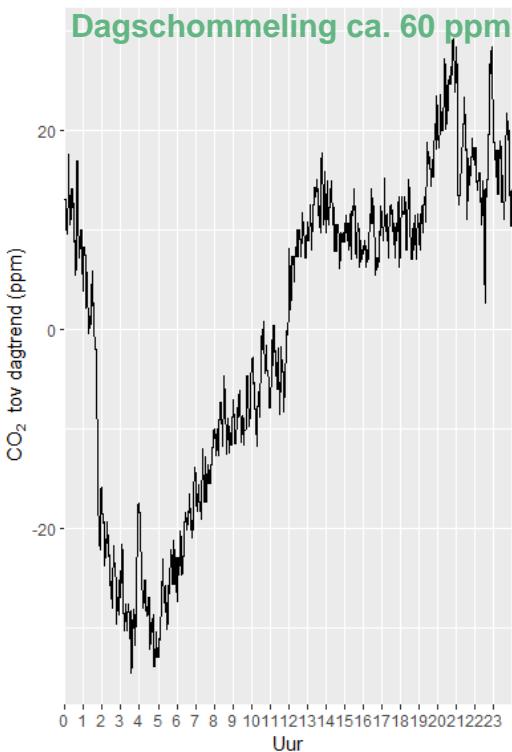
- Ademen lucht in van grofweg 400 ppm CO₂

Dagtrend en metingen (schooltje in ruraal gebied in Limburg)



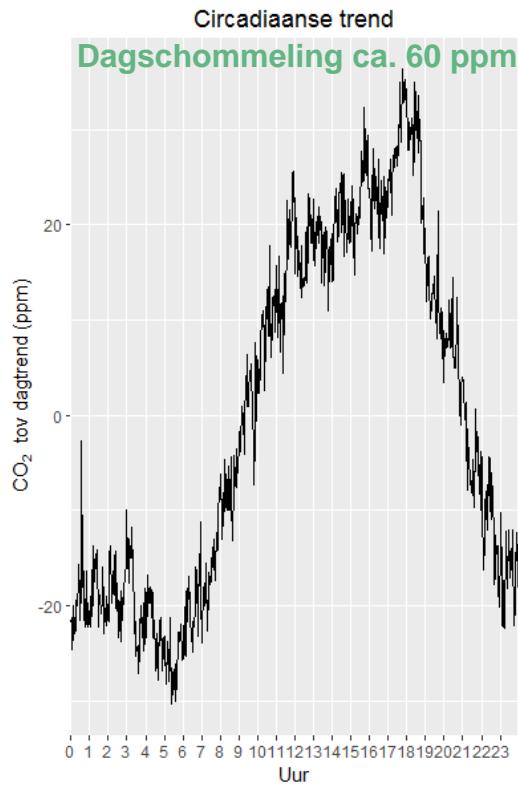
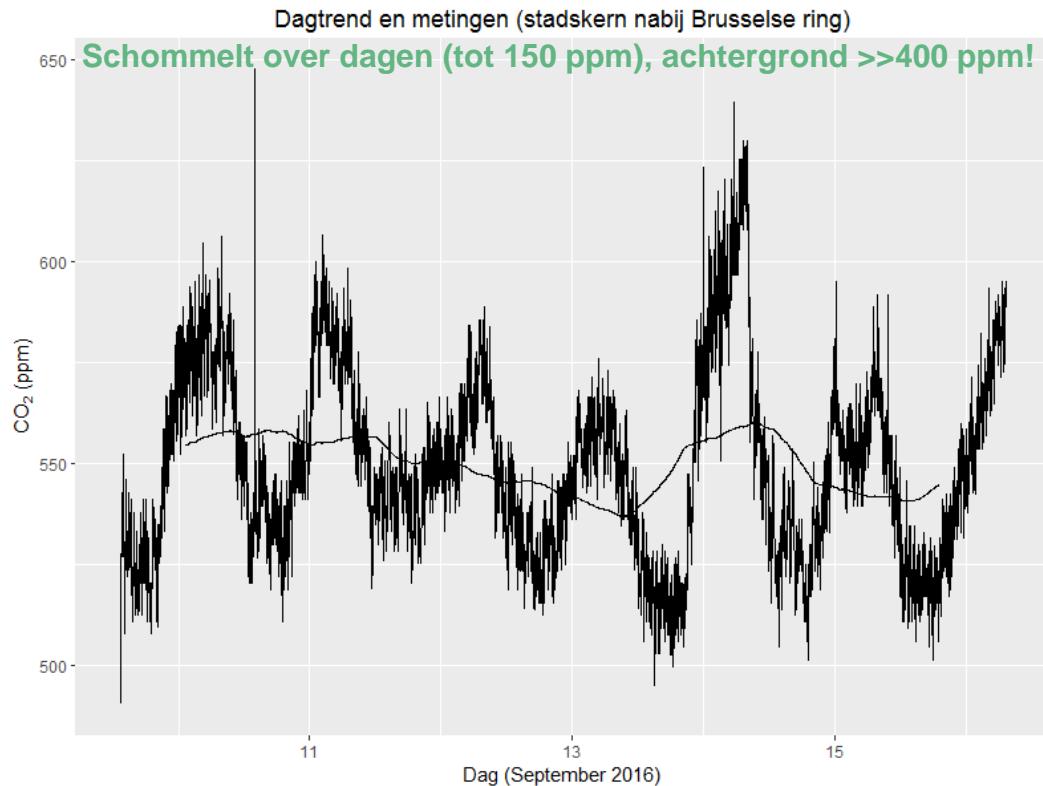
Data ter beschikking gesteld door dr. M. Stranger (VITO)

Circadiaanse trend



CO₂ als tracer

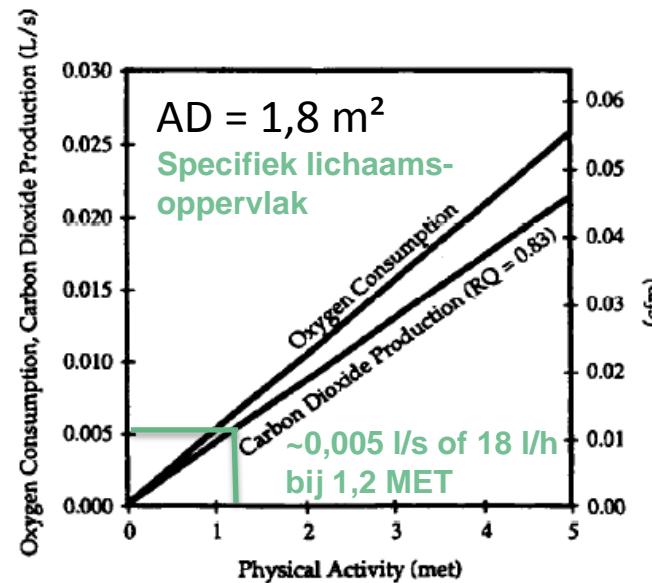
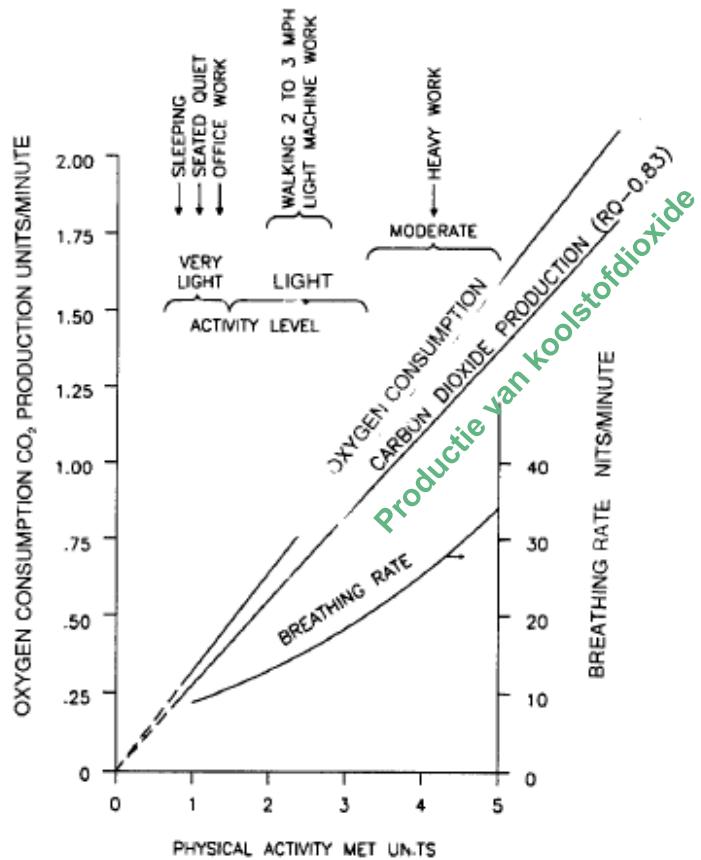
- Ademen lucht in van grofweg 400 ppm CO₂



Data ter beschikking gesteld door prof. F. Descamps (VUB, Daidalos Peutz)

CO₂ als tracer

- Ademen lucht uit van grofweg 40000 ppm CO₂



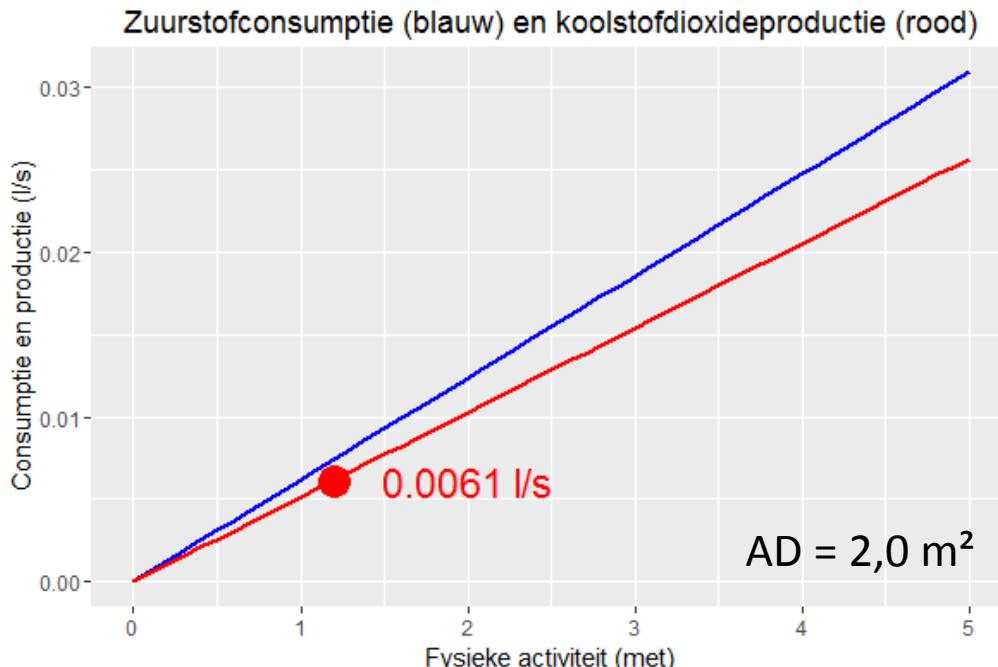
Persily (1994) <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build97/art044.html>

$$P_{CO_2} = 1.589 \times 10^{-4} (94.4 A_D + 83.9 Met + 21.0 C_g - 149.7)$$

Tajima (2014) <http://www.aivc.org/sites/default/files/79.pdf>

CO₂ als tracer

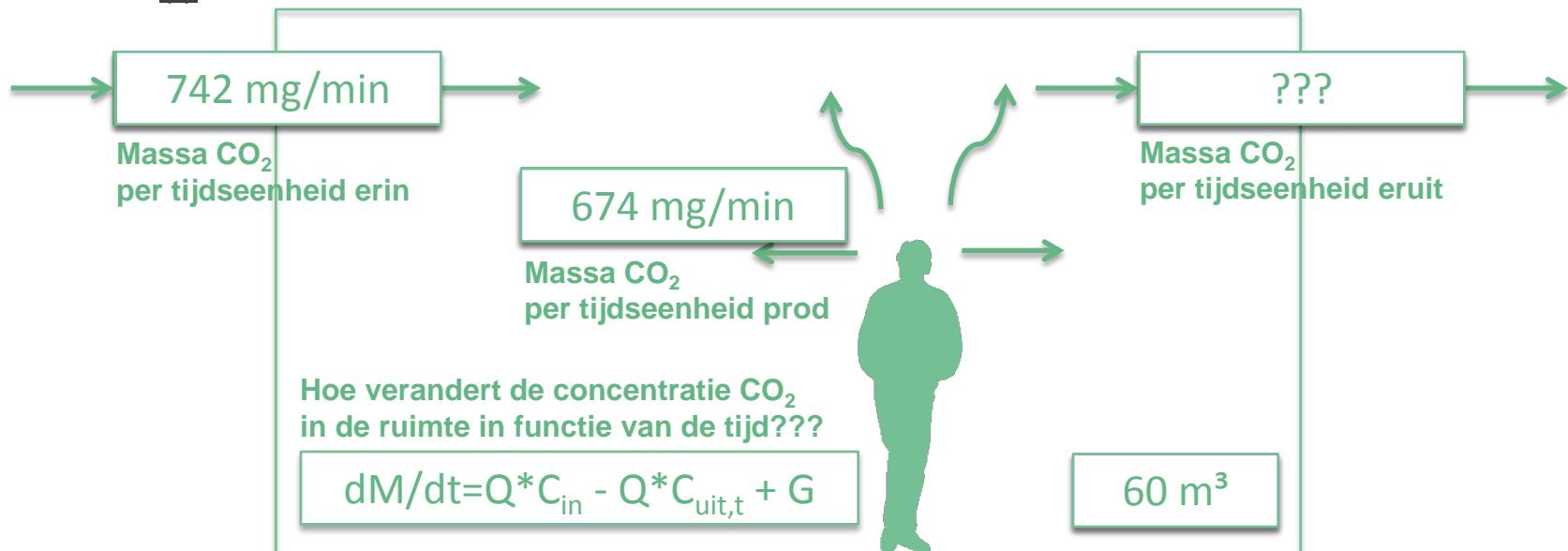
- Ademen lucht uit van grofweg 40000 ppm CO₂
 - Standaard (AD=1,8 m², 0 °C en 1013 hPa): 0,005 l/s
 - Belg van 1,8 m en 80 kg (AD=2,0 m², 21 °C en 1013 hPa): 0,006 l/s of als massaflow 674 mg/min



parameter	waarde	eenheid	grootte
H	1,8 m		lengte
W	80 kg		gewicht
AD	2,001621 m ²		dubois lichaamsoppervlak
RQ	0,83 /		respiratoire quotient
fac	0,005749 /		factor
			metabolisme per eenheid
M	1,2 MET		lichaamsoppervlak
VO2st	0,006899 l/s		zuurstofverbruik
VCO2st	0,005726 l/s		koolzuurproductie
p	101325 Pa		luchtdruk
t	21 °C		temperatuur
VO2am	0,00743 l/s		zuurstofverbruik
VCO2am	0,006167 l/s		koolzuurproductie
nCO2	0,000255 mol/s		deeltjesproductie (PV=nRT)
gCO2	0,011241 g/s		koolzuurproductie
gCO2	674,4863 mg/min		koolzuurproductie

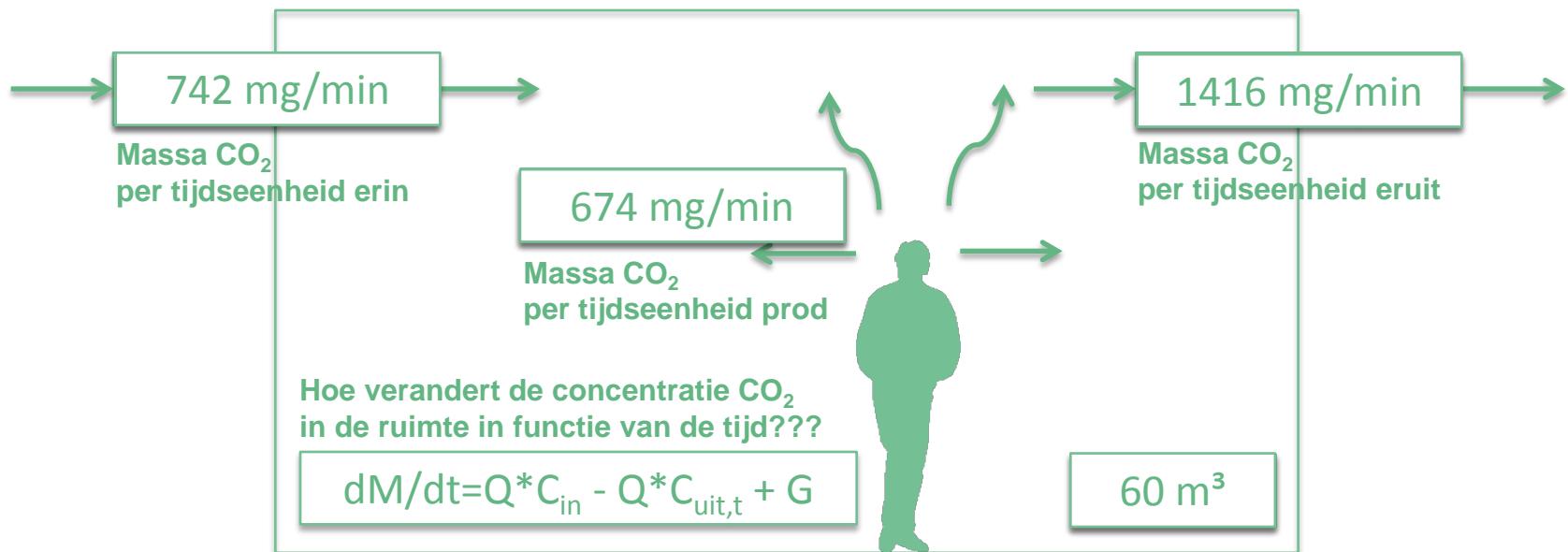
CO₂ als tracer

- Een eenvoudige massabalans voor CO₂
 - $dM/dt = V_r * dC_{uit,t}/dt = Q * C_{in} - Q * C_{uit,t} + G$
 - $V_r = 60 \text{ m}^3$, $Q_{in,t} = Q_{uit,t} = Q = 60 \text{ m}^3/\text{h}$ of $1 \text{ m}^3/\text{min}$
 - $C_{in(t)} \sim 400 \text{ ppm}$ of 742 mg/m^3 , $C_{uit,t} = ???$
 - $G(t) \sim 0,006 \text{ l/s}$ of 674 mg/min



CO₂ als tracer

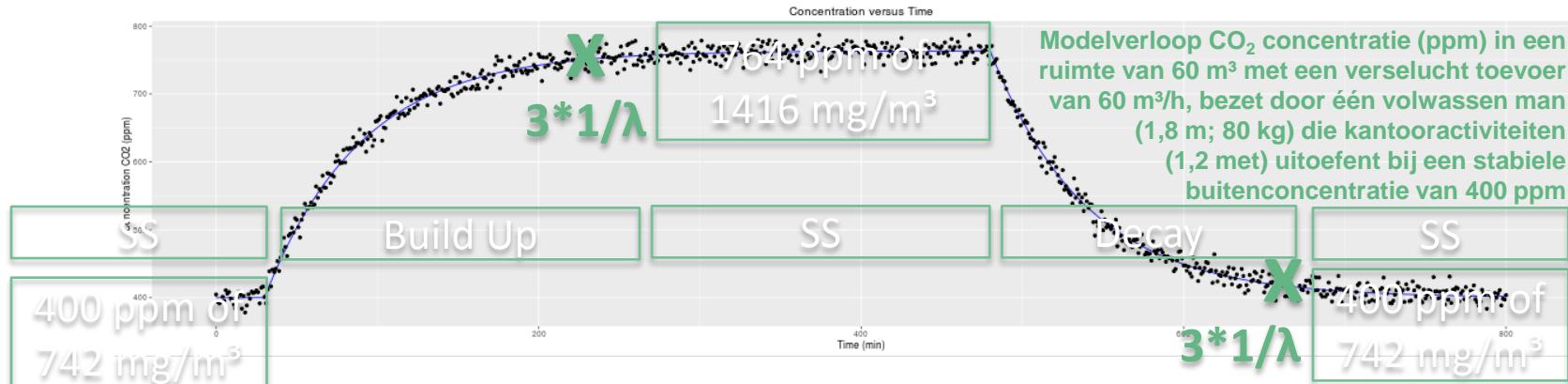
- Een eenvoudige massabalans voor CO₂
 - in steady state (systeem is in evenwicht) is $dM/dt=0$
 - $0 = Q \cdot C_{in} - Q \cdot C_{uit, \text{steady state}} + G$
 - $Q = G / (C_{uit, \text{steady state}} - C_{in})$ of $674 / (1416 - 742) = 1 \text{ m}^3/\text{min}$



CO₂ als tracer

- Een eenvoudige massabalans voor CO₂
 - in steady state is $dM/dt=0$ en vinden we $Q=1 \text{ m}^3/\text{min}$
 - vuistregel om steady state te bereiken: **95% na $3*1/\lambda$**
 - voor een AER van 1/h ($60 \text{ m}^3/\text{h} / 60 \text{ m}^3$) is dit 3h
 - voor een AER van 0,5/h ($30 \text{ m}^3/\text{h} / 60 \text{ m}^3$) is dit 6h
 - **Q berekenen met de SS formule vóór SS bereikt is leidt tot (soms grove) overschattingen van het werkelijke debiet!**

Combined plot



volume m3	flow m3/h	flow m3/min	flow l/sec	aer /h	aer /min	aer /sec	nL h	nL min	nL sec
60.0000	60.0000	1.0000	16.6667	1.0000	0.0167	0.0003	1.0000	60.0000	3600.0000

CO₂ als tracer

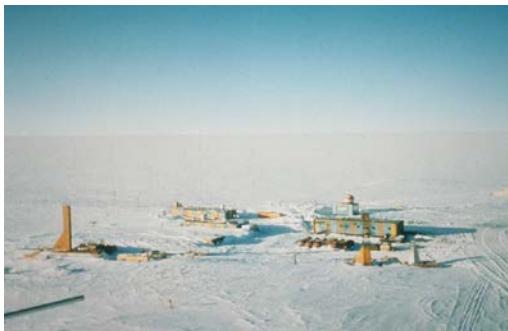
Steady State Analysis
Equilibrium Analysis
Constant Injection Analysis

- Een eenvoudige massabalans voor CO₂
 - Q afleiden uit steady state CO₂ meting (bij bezetting)
 - 674 mg/min / (1416 mg/m³ binnen - 742 mg/m³ buiten)=1 m³/min
 - 0,0061 l/s / (0,000764 binnen - 0,000400 buiten)=16,7 l/s
 - SS CO₂ kan een maat zijn voor verluchting als
 - toevoer/afvoerdebit (Q), buitenluchtconcentratie CO₂ (C_{in}) en aantal personen (n) niet wijzigen in de tijd
 - de productie CO₂ per persoon (G) niet wijzigt in de tijd en er géén andere CO₂ bronnen dan personen aanwezig zijn
 - er géén gradiënten of kortsluitingen zijn (goede menging)
 - er géén luchtuitwisseling is met ruimtes (anders equivalent Q)
 - de concentratie CO₂ (C_{uit}) niet meer wijzigt: C_{uit} = C_{SS} of C_{eq}
 - SS dus niet evident... DC en BU???

Toetsingskader

- Schade versus hinder

Vostok, Antarctica, 21/07/1983:
-87,9 °C



https://en.wikipedia.org/wiki/Lowest_temperature_recorded_on_Earth

Je (ideale?) (regelbare?) bureau:
20-24 °C 's zomers en 22-26 °C 's winters



[JEP! Concept \(Van Delft group\)](#)

Death Valley, 10/07/1913:
+56,7 °C



https://en.wikipedia.org/wiki/Highest_temperature_recorded_on_Earth

- Toxicologische limieten worden opgesteld om gezondheidsschade te vermijden
- Comfort limieten worden opgesteld om te zorgen dat we ons optimaal voelen (en presteren)

Toetsingskader

- CO₂ als proxy voor ventilatie of CO₂ op zich?
- Vele bestaande limieten voor CO₂ dienen onrechtstreeks om ventilatie te beoordelen
 - er zijn veel verbanden beschreven tussen ventilatievoud, CO₂, prestaties en klachten
 - ventilatie en CO₂ omgekeerd evenredig:
<10 l/s/p en >1000 ppm CO₂ zijn risicofactoren

Klasse	Verschil in CO ₂ -concentratie tussen de binnen- en buitenlucht
IDA1	< 400 ppm
IDA2	tussen 400 en 600 ppm
IDA3	tussen 600 en 1000 ppm
IDA4	> 1000 ppm

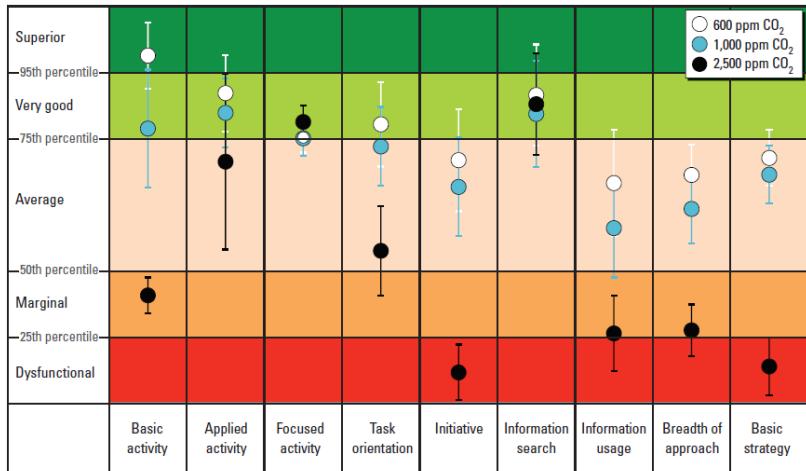
NBN EN 13779 – Tabel 9

ppm binnen	m ³ /h.pers	l/s.pers	Kwaliteit
< 800	> 54	> 15	hoog
800 / 1000	36 - 54	10 - 15	midden
1000 / 1400	22 - 36	6 - 10	aanvaardbaar
> 1400	< 22	< 6	laag

NL LCM 2006, GGD
<650 streefdoel nieuw
<800 streefdoel bestaand
acceptabel
tijdelijk
acceptabel
onacceptabel

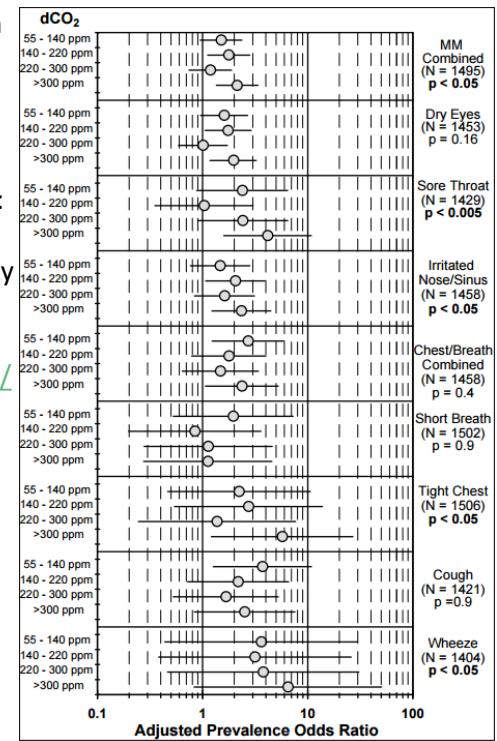
Toetsingskader

- CO₂ als proxy voor ventilatie of CO₂ op zich?
- Sommige onderzoeken wijzen op directe effecten van CO₂
 - 200 - 300 ppm > achtergrond



Direct Effects of Low-to-Moderate CO₂ Concentrations on Human Decision-Making Performance. Satish U et al (2012)
<http://ehp.niehs.nih.gov/wp-content/uploads/120/12/ehp.1104789.pdf>

Associations Between Indoor CO₂ Concentrations and Sick Building Syndrome Symptoms in US Office Buildings: An Analysis of the 1994-1996 BASE Study Data. Apte M, 2000.
 Available from:
<https://indoor.lbl.gov/sites/all/files/lbnl-44385.pdf>



Toetsingskader

- Issues bij CO₂ metingen
 - drift: check vóór en na de meting (span gas challenge)
 - opwarmperiode sensor: tijdig aanzetten
 - invloed temperatuur en druk op sensor: verifiëren
 - impact buitenomstandigheden: tegelijk meten aan inlaat, corrigeren voor (al dan niet stabiele) achtergrond (fout op verschil?), impact t verschil binnen/buiten op sensor?
 - mengkwaliteit: kortsluitingen (meten afzuigroosters)? mensen te dicht bij (< 2m), blazen in sensor (>40 000 ppm stoot), ongelijk verdeeld (meten in ruimte zelf)?
 - random fout op de uitgelezen waarde

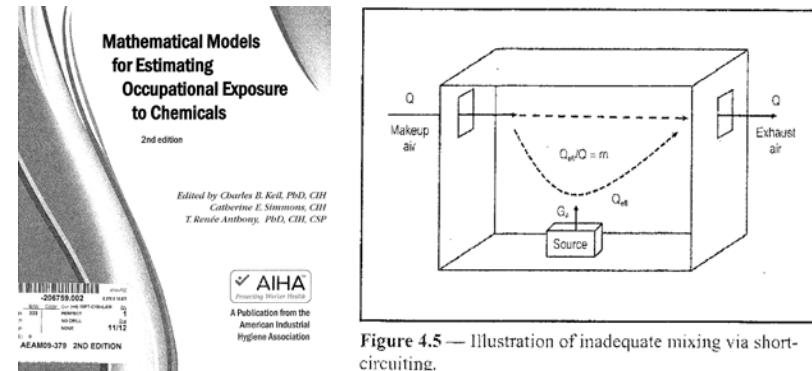


Figure 4.5 — Illustration of inadequate mixing via short-circuiting.

Toetsingskader

Enkele voorbeeld limieten	Minimaal verse lucht debiet / persoon (l/s/p)	Minimaal verse lucht debiet / persoon (m³/h/p)	Maximale CO ₂ -concentratie binnen boven achtergrond (ppm)	Maximale CO ₂ -concentratie binnen inclusief achtergrond 500 [400] (ppm)*
Toxicologische limieten				
VS (ACGIH)	1,4 (1,3)	4,9 (4,8)	4500 [4600]	5000 (STEL 30000)
VS (OSHA)	1,4 (1,3)	4,9 (4,8)	4500 [4600]	5000 (STEL 35000)
België (KB chemische agentia)	1,4 (1,3)	4,9 (4,8)	4500 [4600]	5000 (KT 30000)
Comfort limieten				
België (Binnenmilieubesluit)	-	-	-	493 (900 mg/m ³)
België (KB ap, na april 2016)	20 (14,8)	72 (53)	verdubbeling	300 [400]
België (KB ap, voor april 2016)	8,3	30	↑	730
België (EPB)	6,1	22	1000	1500 [1400]
Nederland	6,9	25	900	1400 [1300]
Nederland (leerling)	5,5	19,8	600**	1100 [1000]**
Nederland (leraar)	10	36	600	1100 [1000]
Duitsland	10	36	600	1100 [1000]
VS (ASHRAE 62)	8,6 (7,5 bij 170 cm, 68 kg)	31 (27 bij 170 cm, 68 kg)	700	1200 [1100]
EN 13779 IDA1 (inform. annex)	15	54	400	900 [800]
EN 13779 IDA2 (inform. annex)	10 – 15	36 – 54	400 – 600	900 – 1100 [800 – 1000]
EN 13779 IDA3 (inform. annex)	6 – 10	22 – 36	600 – 1000	1100 – 1500 [1000 – 1400]
EN 13779 IDA4 (inform. annex)	< 6	<22	> 1000	> 1500 [>1400]

* Op basis van een achtergrond CO₂ concentratie van 500 (400) ppm

** Op basis van CO₂ generatie door een 10-jarig kind (141 cm, 33 kg) of volwassen man (180 cm, 80 kg)

naar een tabel van prof. F. Descamps
(VUB, Daidalos Peutz)

De hamvraag

- Krijgen de mensen “voldoende” verse lucht?
- Blijven we onder de limietwaarde?
 - $Q_{\text{“ontwerp”}}$ om altijd <800 ppm te hebben
 - $p_{\text{“ontwerp”}}$ om altijd <800 ppm te hebben
 - CO_2 gemeten is <800, wat is de bijhorende $Q_{\text{“werkelijk”}}$ en wanneer kunnen we wel >800 ppm hebben (Q en p ?)
 - CO_2 gemeten is >800, wat is de bijhorende $Q_{\text{“werkelijk”}}$ en wanneer kunnen we wel <800 ppm hebben (Q en p ?)
- Rekenmodellen kunnen helpen om verschillende scenario’s uit te testen en te beredeneren

Rekenmodellen

- concentratie CO₂ simuleren obv design ventilatie
- ventilatie analyseren obv gemeten concentratie

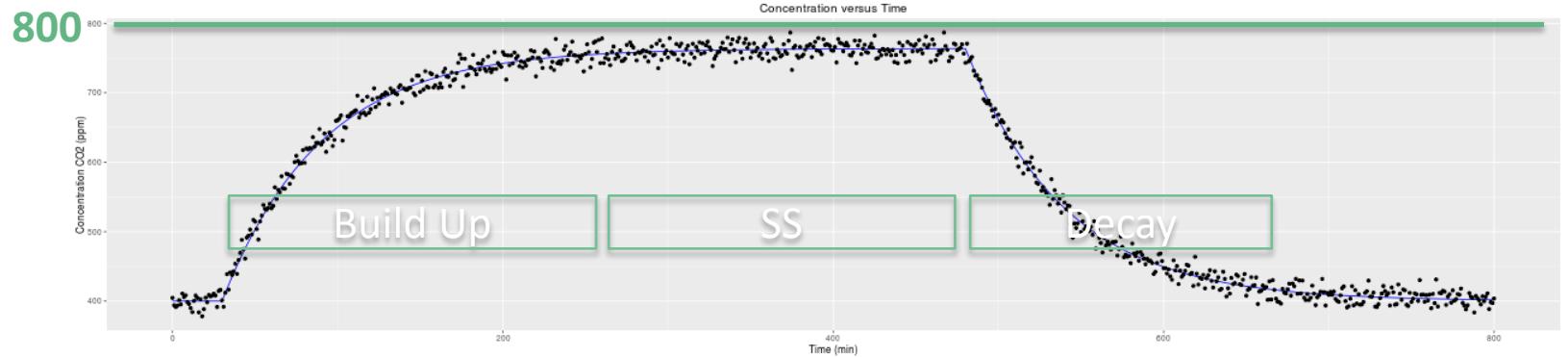
Current simulation input

Adults n	Adults length m	Adults weight kg	Adults RQ	Adults MET	Children n	Children length m	Children weight kg	Children RQ	Children MET	Ambient temp deg C	Ambient pres Pa	Room volume m3	Room ventilation m3/min	Outdoor CO2 ppm	Indoor initial CO2 ppm	Sim start min	Sim stop min	Sim int min	Sim len n	
1	0.0000	1.8000	80.0000	0.8300	1.2000	0.0000	1.0000	35.0000	0.8300	1.2000	21.0000	101325.0000	60.0000	1.0000	400.0000	402.0000	800.0000	1120.0000	1.0000	320.0000

Current simulation output

Adults AD m2	Adults CO2 prod l/s	Adults CO2 prod mg/min	Children AD m2	Children CO2 prod l/s	Children CO2 prod mg/min	Total CO2 prod l/s	Total CO2 prod mg/min	CO2 eq ppm	CO2 eq req delta mg/m3 /h	CO2 eq req delta ppm /h	Qeq m3/min	Qeq l/sec
1	2.0016	0.0062	674.4863	0.9199	0.0028	309.9676	0.0000	0.0000	745.2438	402.0000	0.0000	0.0000

Combined plot



Rekenmodellen

- “All models are wrong but some are useful ”
(George Box)
- Een grove opsplitsing:
 - complexe modellen, bij design:
 - waaier aan algoritmes rekening houdend met luchtdruk- en temperatuurgradiënten rond gebouwen als drijvende krachten
 - “get the whole picture”, voor ingenieurs en architekten
 - eenvoudige modellen, na oplevering:
 - het geupdate KB arbeidsplaatsen reikt enkel een plafondwaarde voor CO₂ als ventilatieparameter aan
 - beredeneren of deze waarde gerespecteerd wordt op basis van metingen en/of berekeningen, o.a. voor preventiewerkers

Bijvoorbeeld EnergyPlus
<https://energyplus.net/downloads>

Rekenmodellen

- moeten een klein beetje kunnen rekenen...
 - $V_r * dC_{uit,t} / dt = Q * C_{in} - Q * C_{uit,t} + G$ (dif vgl herschikken)
 - $dC_{uit,t} / dt = -(C_{uit,t} - C_{in}) * Q / V_r + G / V_r$ ($\lambda = Q / V_r$, integreren)
 - $C_{uit,t=i} = C_{in} + G / (\lambda * V_r) + [C_{uit,t=0} - C_{in} - G / (\lambda * V_r)] * \exp(-\lambda t_i)$
 - $C_i = C_{in} + (C_0 - C_{in}) * \exp(-\lambda t_i) + G / (\lambda * V_r) [1 - \exp(-\lambda t_i)]$ (*)
 - C_{in} , λ en G : geven = simuleren \Leftrightarrow afleiden = analyseren
 - (*) is te vereenvoudigen voor de drie scenario's:

$$C_{BU,i} = C_{in} + G / (\lambda * V_r) * [1 - \exp(-\lambda * t)] \quad C_{SS,i} = C_{in} + G / (\lambda * V_r) \quad C_{DC,i} = C_{in} + (C_0 - C_{in}) * \exp(-\lambda * t)$$

Build Up

SS

Decay

Rekenmodellen

- Simuleren: IHMod (AIHA, Armstrong & Drolet)
 - help & download: <https://www.aiha.org/get-involved/VolunteerGroups/Pages/Exposure-Assessment-Strategies-Committee.aspx>
 - blog: <http://ihmod.org/index.html>
 - uitgebreid, volledige curves, ook andere modellen, niet specifiek voor CO₂, alle nodige parameters eerst manueel berekenen (G van personen en C_{in} in mg/min)

$$C_{BU,i} = C_{in} + G/(\lambda * V_r) * [1 - \exp(-\lambda * t)]$$

$$C_{SS,i} = C_{in} + G/(\lambda * V_r)$$

$$C_{DC,i} = C_{in} + (C_0 - C_{in}) * \exp(-\lambda * t)$$

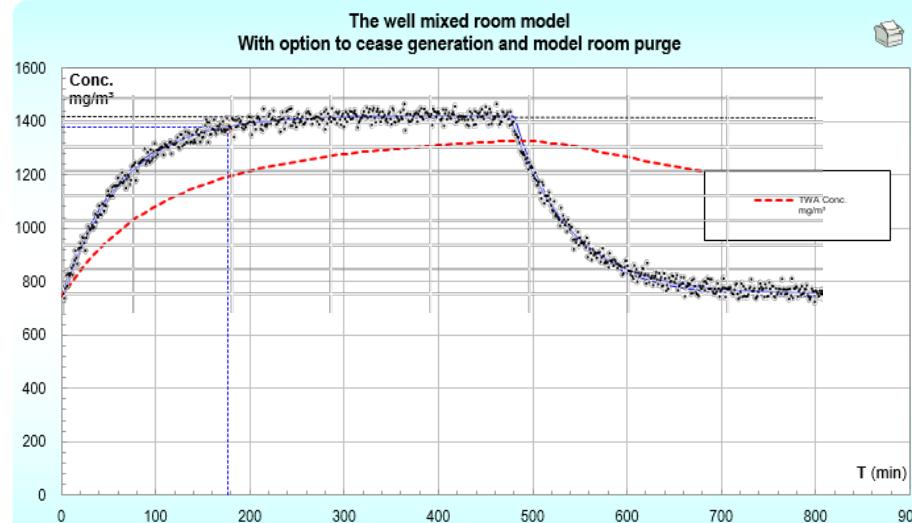
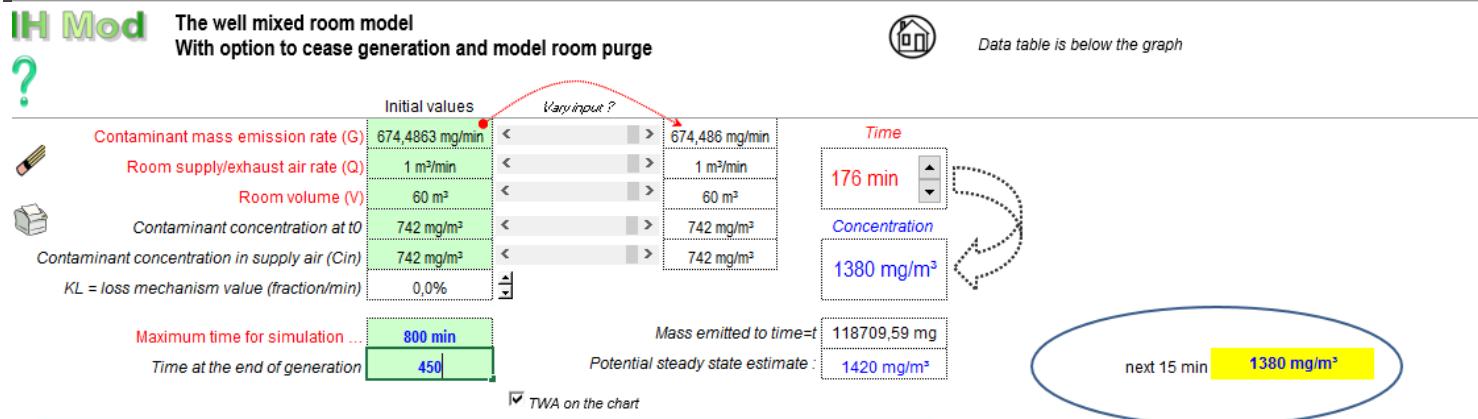
Build Up

SS

Decay

Rekenmodellen

- Simuleren: IHMod (AIHA, Armstrong & Drolet)



Units conversion

inches → centimeters



Equation for generation phase

$$C_t = \frac{G + C_{in} \cdot Q}{Q + k_L \cdot V} \left[1 - \exp \left(-\frac{Q + k_L \cdot V}{V} \cdot t \right) \right] + C_0 \cdot \exp \left(-\frac{Q + k_L \cdot V}{V} \cdot t \right)$$

Equation for decay phase

$$C(t) = C_0 \cdot \exp \left(-\frac{Q}{V} \cdot t \right)$$

$$\ln(C(t) - C_a) = \ln(C_0 - C_a) - \lambda * t \quad (6a)$$

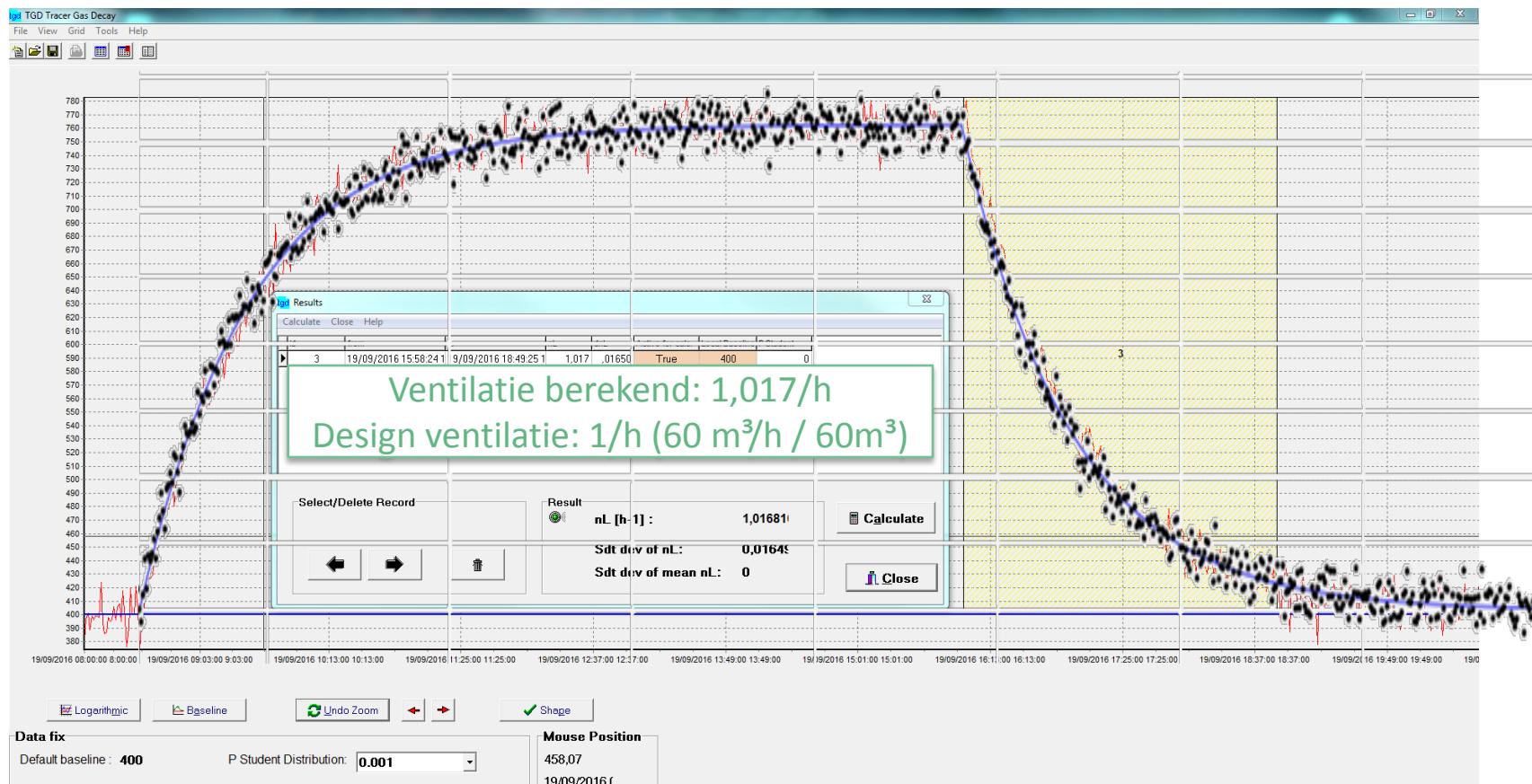
Rekenmodellen

- Analyseren: TGD (IJOV, Roulet & Foradini)
 - project: <http://leso.epfl.ch/page-39254-en.html>
 - niet vrij beschikbaar (aan te vragen bij de auteurs)
 - uitgebreid, inclusief rapportage, specifiek voor CO₂, platte tekstfiles (tab delim) met meetresultaten eerst bewerken (blanco laatste lijn wissen) vóór inladen, decay curves selecteren en ventilatiegraad afleiden
 - statistische inschatting meest waarschijnlijke ventilatie adhv meerdere decay curves $C_{DC,i} = C_{in} + (C_0 - C_{in}) * \exp(-\lambda * t)$
 - correcte C_{in} = cruciaal

Decay

Rekenmodellen

- Analyseren: TGD (IJOV, Roulet & Foradini)



C_0 : initial concentration, C_a : concentration in the ambient air (i.e. background concentration)
It is possible to examine the linearised curve when the background concentration is subtracted before linearising. Therefore, the background concentration must be determined by an additional measurement.

$$\ln(C(t) - C_a) = \ln(C_0 - C_a) - \lambda^*t \quad (6a)$$

Rekenmodellen

- Analyseren: Ventialc (Provikmo/BSOH, Geens)
 - SS en Decay analyse, niet vrij beschikbaar
 - decay versie vrij beschikbaar via BSOH, als je handig bent in excel kan je dit makkelijk namaken
 - zeer tricky om manueel de juiste vervalreeksen (begin/eindpunten) en juiste achtergrond te selecteren
 - correcte C_{in} = cruciaal, erg voorzichtig mee zijn!!!

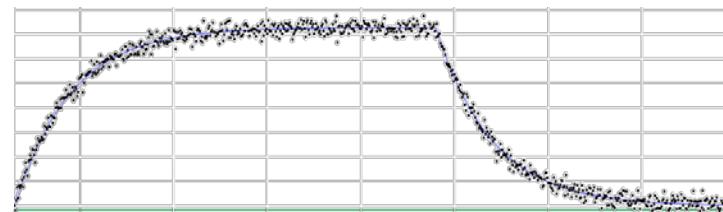
$$C_{SS,i} = C_{in} + G/(\lambda^*V_r) \quad C_{DC,i} = C_{in} + (C_0 - C_{in}) * \exp(-\lambda^*t)$$

SS

Decay

Rekenmodellen

- Analyseren: Ventialc



Ventilatie berekend SS: 0,997/h

Ventilatie berekend DC: 1,064/h

Design ventilatie: 1/h (60 m³/h / 60m³)

0. Voldaan aan steady state voorwaarde? 0=nee, 1=ja						0				
1. Puntmeting. Op basis van een gemeten steady state concentratie.										
MET act (W)	grootte ruimte (m³)	Aantal personen	conc buiten (ppm)	conc binnen (ppm)	delta (ppm)	vent (l/s/p)	vent (l/s)	AER (/h)		
120	60	1	400	761	361	361	16,62	16,62	16,62	0,997
100 kantoor	opp x h	Iln + leraar (+ meter)								
240 licht	I x b x h									
400 matig										
560 zwaar										
online bron	http://phpc02.veetech.org.uk/phpc02.php				(blz 4 Federal Tech. Alert)					

2. Datalogging. Op basis van een berekende AER adhv CO2 vervalreeks(en) overnacht als er geen ventilatie is (lokaal in natuurlijke afgesloten toestand).

MET act (W)	grootte ruimte (m³)	Aantal personen	conc buiten (ppm)	conc binnen (ppm)	delta (ppm)	vent (l/s/p)	vent (l/s)	AER (/h)		
120	60	1	400	738	338	338	17,73	17,73	17,73	1,064
100 kantoor	opp x h	Iln + leraar (+ meter)					ok voor iedereen			
240 licht	I x b x h									
400 matig										
560 zwaar										
online bron	http://phpc02.veetech.org.uk/phpc02.php				overnertilatie		IDA1: zeer goed			

3. AER berekening. Op basis van maximum 5 vervalreeksen CO2 wanneer niet aan steady state voldaan.

tijdsbasis (min)	verval 1 vanaf	verval 2 vanaf	verval 3 vanaf	verval 4 vanaf	verval 5 vanaf	minimum achtergrond (ppm)	kamerverversingsrate of AER (/h)	
1	761					399	1,064	
tijdstip nummer	vervalreeks 1	vervalreeks 2	vervalreeks 3	vervalreeks 4	vervalreeks 5			
1	761							gele vakken: INPUT
2	753							groene vakken: OUTPUT
3	749							
4	738							
5	736							
6	731							
7	729							
8	731							
9	697							
10	720							
11	687							
12	694							
13	699							
14	709							
15	693							
16	691							
17	681							
18	666							
19	661							
20	674							

Principe:
Genormaliseerde concentratie $\bar{C}_t = \frac{C_t - C_{t0}}{C_{t0}}$

Concentratie $C_t = C_{t0}$

Minimum achtergrond = C_{t0}

Verval vanaf = C_{t0}

$C_{Nt} = \frac{(C_{t0} - C_{t0})}{(C_{t0} - C_{t0})}$

logaritme van C_{Nt} vervalt lineair in de tijd
helling van deze rechte is maat voor luchtverversing
rico corrigeren met tijdsbasis levert kamerverversingsrate

Problemen en oplossingen (1)

- Simuleren
 - geen specifieke CO₂ simulator, IHMod niet eenvoudig maar wel buildup, steady state én decay, publiek
 - geen realistisch dagverloop te construeren waarin je de menselijke bezettingsgraad in rekening kan brengen
- Analyseren
 - specifieke CO₂ analyser TGD lastig om data te importeren, enkel lineaire decay analyse, niet publiek
 - (excel) tools waarin je lineaire fit doet op decay curves zijn erg gevoelig voor gebruikersfouten
 - geen enkele eenvoudige tool werkt ook bij bezetting (buildup en decay waarbij niet iedereen direct weg is)

Webapps

BSOH heeft enkele webapps ter beschikking

• [CO2ana](#): een model om gemeten koolstoelconcentraties en lokaalparameters te analyseren (met het oog op het afleiden van vaste regels)• [BSOH CO2 simulator](#)• [BSOH CO2 analyser](#)

Algemene Tools

Asbest

Biologische agentia

Chemische agentia

Fysische agentia

Webapps

• [BSOH CO2 simulator](#)• [BSOH CO2 analyser](#)

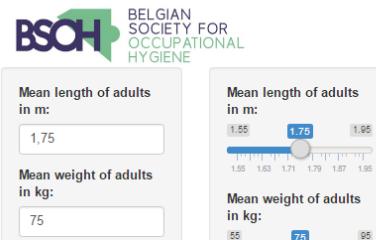
Problemen en oplossingen (2)

- Simuleren: nieuwe BSOH tool CO₂sim
 - biometrische gegevens in rekening brengen
 - gebouwbezettingen simuleren in de tijd
- Analyseren: nieuwe BSOH tool CO₂ana
 - biometrische gegevens in rekening brengen
 - gebouwbezettingen analyseren in de tijd
 - niet alleen SS, maar ook decay analyse aanbieden (achtergrond = cruciaal!) via lineaire modellen
 - ook niet-lineaire modellen inzetten voor decay (en buildup) om fouten door linearisatie te vermijden (achtergrond = minder cruciaal)

CO₂sim

- Simuleren

- Subjects: biometrische gegevens volwassenen/kinderen
- Room: kamervolume en designventilatie, conversies
- Simulate:
 - **bezetting**, achtergrond, startconcentratie, random error meetapparatuur, starttijd, startpunt, tijdsbasis, en lengte
 - sliders om wijzigingen te visualiseren
 - concateneren van situaties met wisselende bezetting (en reset)
- Download:
 - dataset (.csv tijdsreeks, te openen met MS Excel)
 - rapport (.docx, te openen met MS Word)



Carbon dioxide production from subjects

Adults length m	Adults weight kg	Adults RQ	Adults MET	Adults AD m ²	Adults CO ₂ prod l/s	Adults CO ₂ prod mg/min	Children length m	Children weight kg	Children RQ	Children MET	Children AD m ²
1.7500	75.0000	0.8300	1.2000	1.9081	0.0059	642.9704	1.0000	35.0000	0.8300	1.2000	0.9199

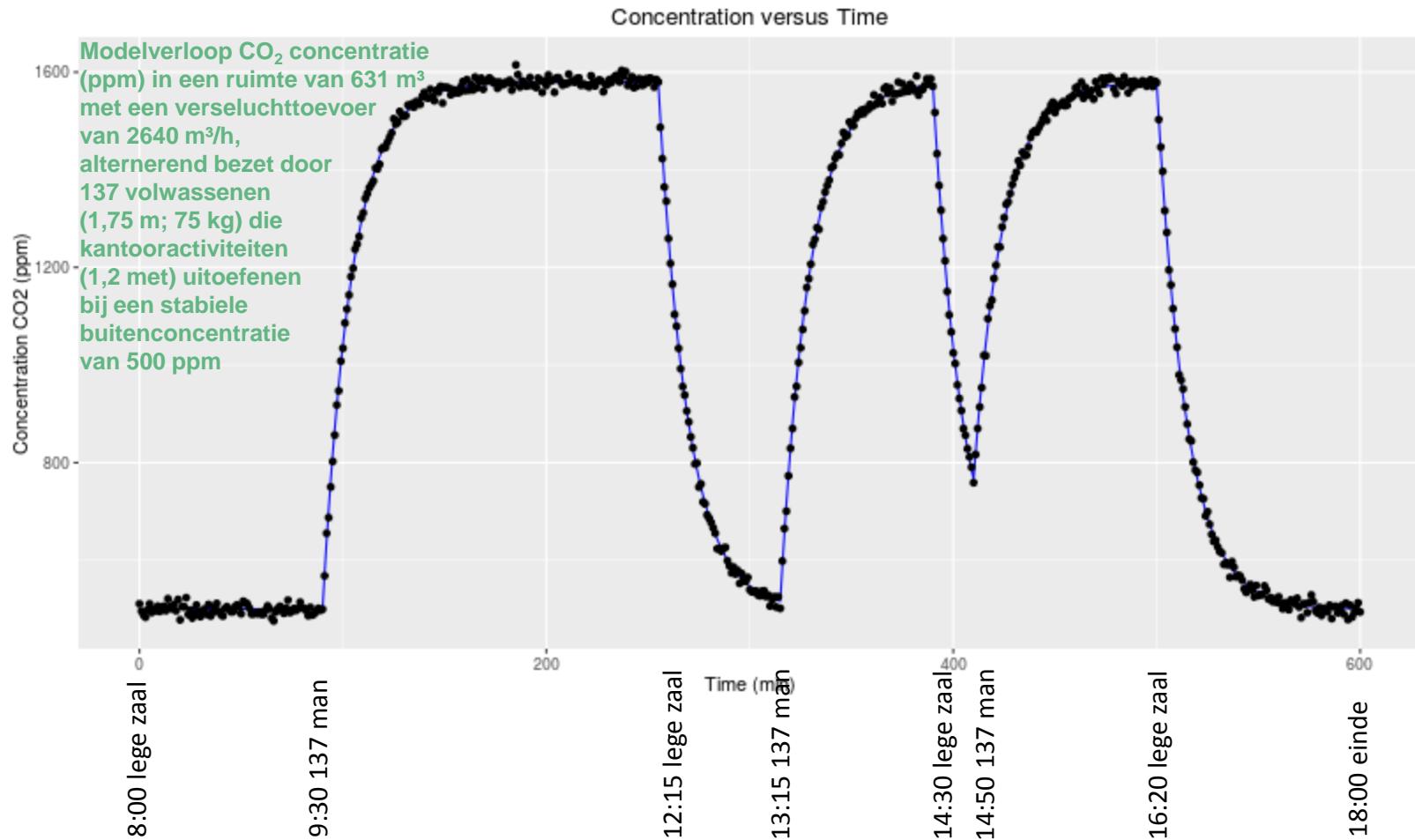
631 m³

2640 m³/h

137 p

CO₂sim

- Simulatie van een BSOH studiedag



Programma

- 9:00 Ontvangst met koffie.
9:30 Introduction de la Journée. Véronique Crutzen, DG Humanisation du travail, SPF ETCS.
9:40 De nieuwe bepalingen rond verluchting en verlichting. Dr. Maurits de Ridder, AD HUA, FOD WASO en secretaris van BSOH.
10:10 Binnenvochtigheid. Dr. Marianne Stanger, VITO
11:00 La ventilation, outil d'assainissement de l'air : entre théorie et pratique. Dr. Valérie Rooryck, Attentia et maître de conférence à l'ULB.
11:30 Rekenmodel en metingen voor de evaluatie van de verluchting. Dr. Ir. Tom Geens, Provirkmo en voorzitter van BSOH.
12:00 Vragen en discussie
12:15 Broodjes
13:15 Les normes NBN EN 12464-1 et 12464-2: éclairage des lieux de travail intérieurs et extérieurs. Ir. Arnaud Deneyer, BBRU Laboratoire lumière et bâtiment.
14:10 Is blauw (LED)licht een gezondheidsprobleem? Dr. Maurits De Ridder, Valkgroep maatschappelijke gezondheidscunde Universiteit Gent.
15:35 Casus. Problemen bij het vervangen van een klassieke verlichting door LED lampen. Karl Creemers, Varda.
16:00 Vragen en discussie
16:20 Einde

CO₂sim

- Simulatie van een BSOH studiedag

	A	B	C	D	E	F
1	datetime	time	ymgm3	yppm	yppmn	
2	2016-09-23 08:00:00		0	926,9201	500	488,6438
3	2016-09-23 08:01:00		1	926,9201	500	501,0114
4	2016-09-23 08:02:00		2	926,9201	500	517,3716
5	2016-09-23 08:03:00		3	926,9201	500	518,1898
6	2016-09-23 08:04:00		4	926,9201	500	503,7018
7	2016-09-23 08:05:00		5	926,9201	500	499,0884
8	2016-09-23 08:06:00		6	926,9201	500	490,6153
9	2016-09-23 08:07:00		7	926,9201	500	490,6291
10	2016-09-23 08:08:00		8	926,9201	500	497,785
11	2016-09-23 08:09:00		9	926,9201	500	502,9433
12	2016-09-23 08:10:00		10	926,9201	500	509,7685
13	2016-09-23 08:11:00		11	926,9201	500	492,7315
14	2016-09-23 08:12:00		12	926,9201	500	499,5378
15	2016-09-23 08:13:00		13	926,9201	500	493,8317
16	2016-09-23 08:14:00		14	926,9201	500	510,3261
17	2016-09-23 08:15:00		15	926,9201	500	504,5394
18	2016-09-23 08:16:00		16	926,9201	500	506,7748
19	2016-09-23 08:17:00		17	926,9201	500	499,7473
20	2016-09-23 08:18:00		18	926,9201	500	509,0752
21	2016-09-23 08:19:00		19	926,9201	500	518,4947
22	2016-09-23 08:20:00		20	926,9201	500	489,1271

CO2mod Carbon Dioxide Simulator

Introduction

Report date
2016-09-19 10:32:59

Disclaimer

In no event shall the developer Tom Geens (BSOH), or the Belgian Society for Occupational Hygiene (BSOH) be liable for any direct, indirect, special, incidental, or consequential damages of any kind, or any damages whatsoever, including without limitation loss of profit, loss of use, savings or revenue, or the claims of third parties, whether or the developer or the BSOH has been advised of the possibility of such loss, however caused, and on any theory of liability, arising out of or in connection with the possession, use, or performance of this software.

Simulator principles

This simulator is based on the well-mixed room model. It assumes a constant outdoor CO₂ background value, a constant CO₂ mass generation rate and a constant ventilation in the room. The mass generation rate in the room is estimated using the relation between oxygen consumption/CO₂ production and physical activity and size of human beings (through the DuBois surface area). Concentration in time is predicted using a solution of a CO₂ mass balance ordinary differential equation.

Programma

9:00 Ontvangst met koffie.

9:30 Introduction de la Journée. Véronique Crutzen, DG Humanisation du travail, SPF ETCS.

9:40 De nieuwe bepalingen rond verlichting en verluchting. Dr. Maurits de Ridder, AD HUA, FOD WASO en secretaris van BSOH.

10:10 Binnenluchtqualiteit. Dr. Marianne Stanger, VITO

11:00 La ventilation, outil d'assainissement de l'air : entre théorie et pratique. Dr. Valérie Rooryck, Attentia et maître de conférence à l'ULB.

11:30 Rekenmodel en metingen voor de evaluatie van de verluchting. Dr. Ir. Tom Geens, Provikmo en voorzitter van BSOH.

12:00 Vragen en discussie

12:15 Broodjes

13:15 Les normes NBN EN 12464-1 et 12464-2: éclairage des lieux de travail intérieurs et extérieurs. Ir. Arnaud Deneyer, BBRI Laboratoire lumière et bâtiment.

14:10 Is blauw (LED)licht een gezondheidsprobleem? Dr. Maurits De Ridder, Valkgroep maatschappelijke gezondheidskunde Universiteit Gent.

14:30 Koffiepauze

14:50 Hoe een verluchting kiezen? Catherine Lootens. Laboratorium voor lichttechnologie, KU Leuven, Technologiecampus Gent.

15:35 Casus. Problemen bij het vervangen van een klassieke verluchting door LED lampen. Karl Creemers, Varda.

16:00 Vragen en discussie

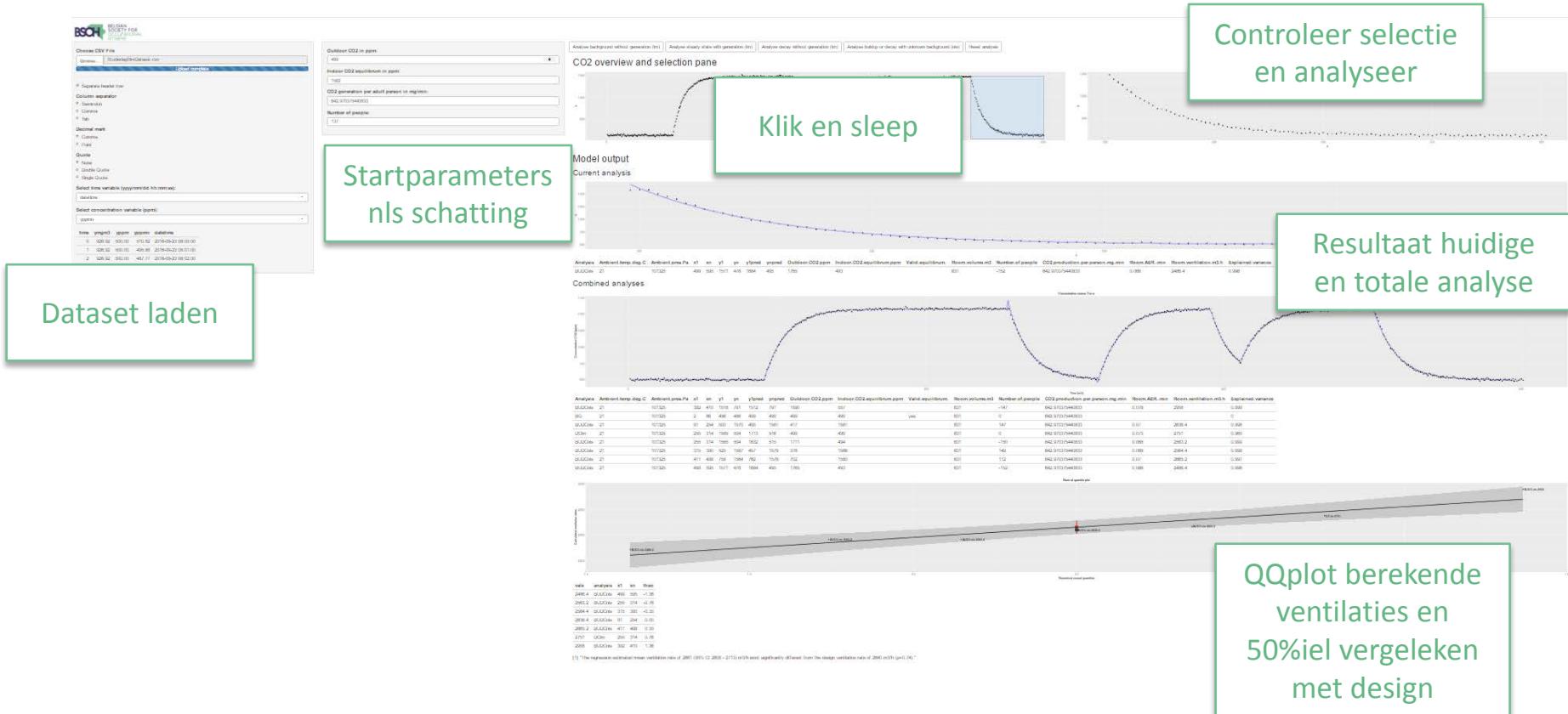
16:20 Einde

CO₂ana

- Analyseren
 - Subjects: biometrische gegevens volwassenen/kinderen
 - Room: kamervolume en designventilatie, conversies
 - Analyse:
 - upload dataset (enkele eigenschappen zijn instelbaar)
 - maximum bezetting 137 p
 - klik-sleep interactie en rekenknoppen achtergrond, steady state, decay en buildup/decay (nls schatting inclusief generatie), reset
 - Download:
 - dataset (.csv tijdsreeks, te openen met MS Excel)
 - rapport (.docx, te openen met MS Word)

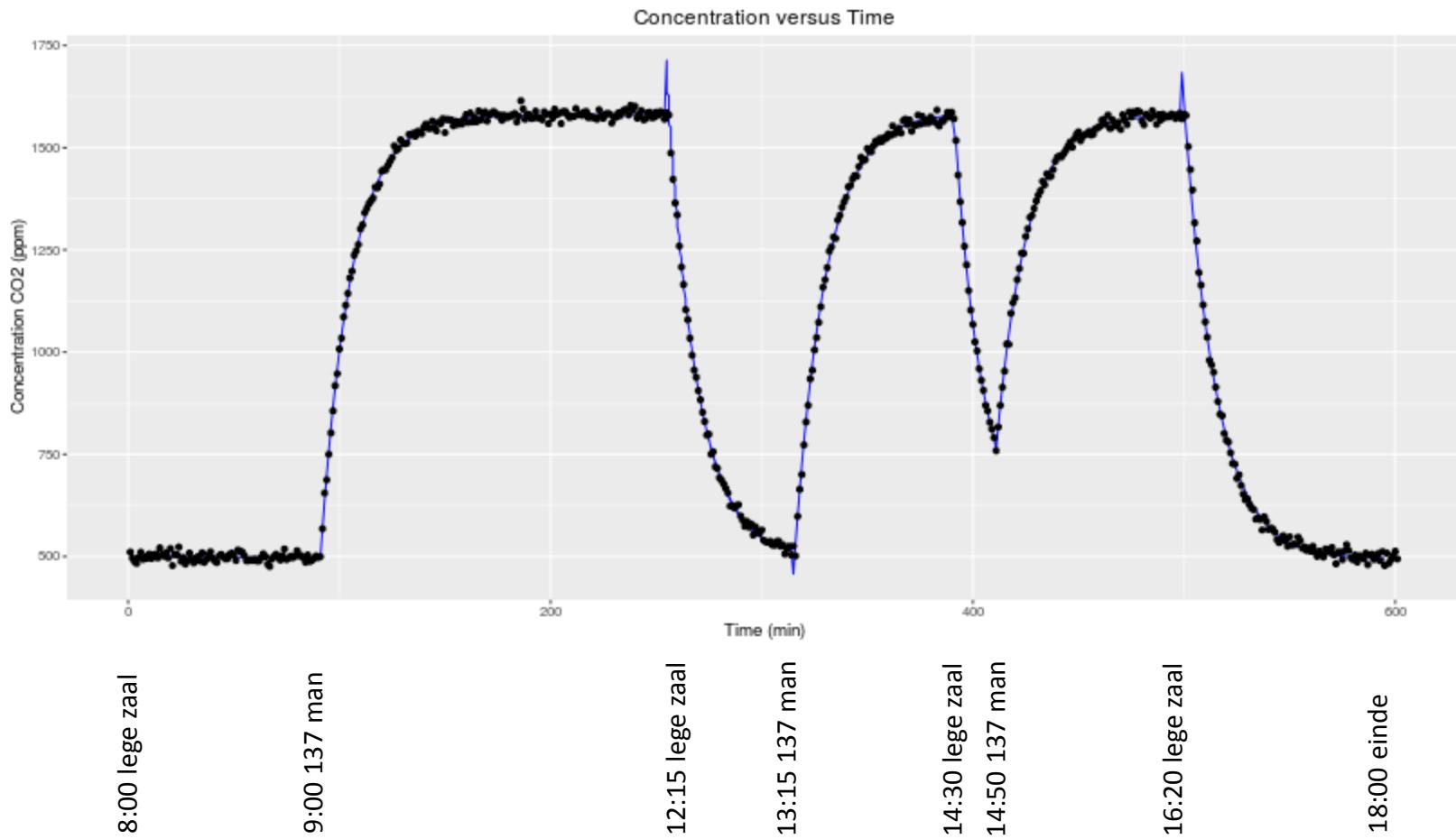
CO₂ana

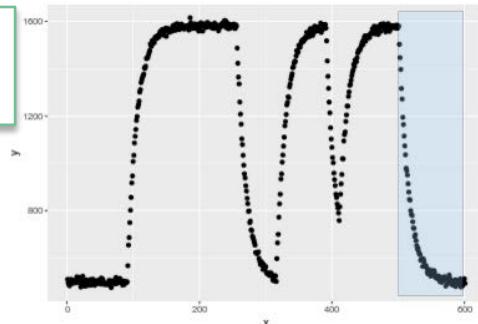
- Analyse simulatie van een BSOH studiedag



CO₂ana

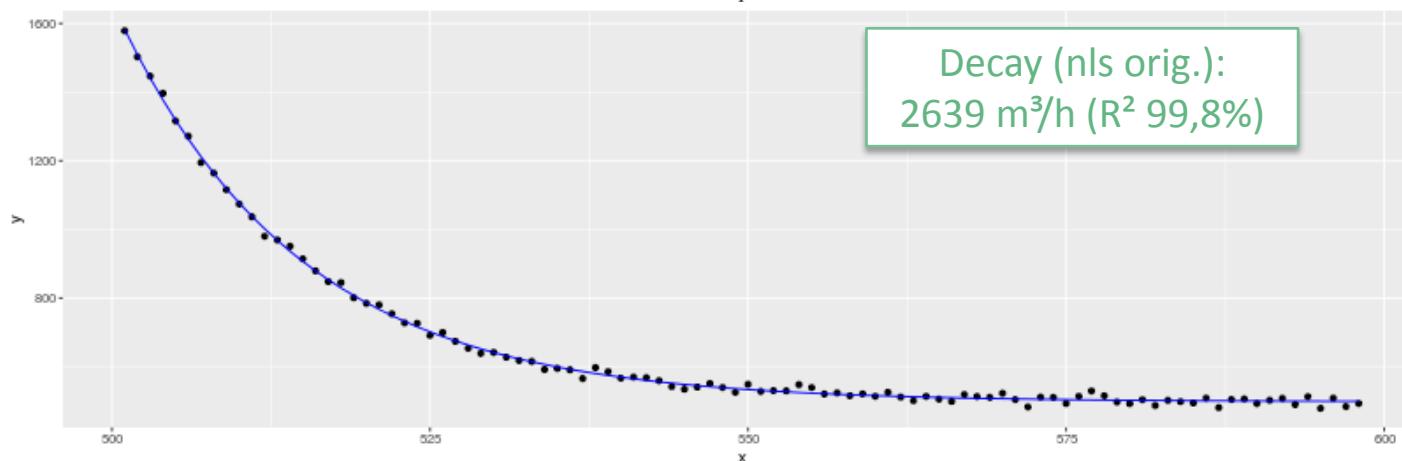
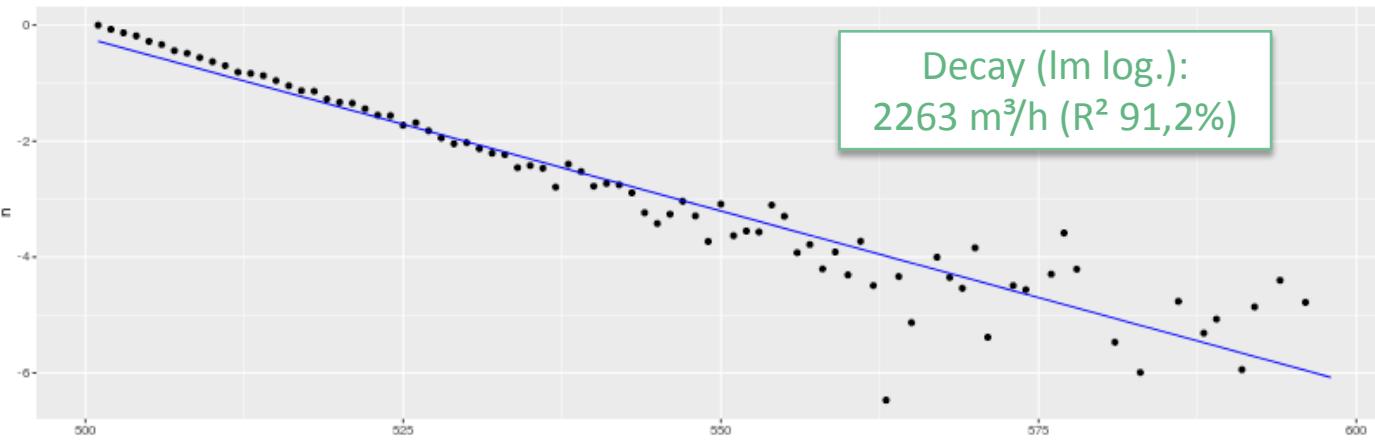
- Analyse simulatie van een BSOH studiedag



Design:
 $2640 \text{ m}^3/\text{h}$ 

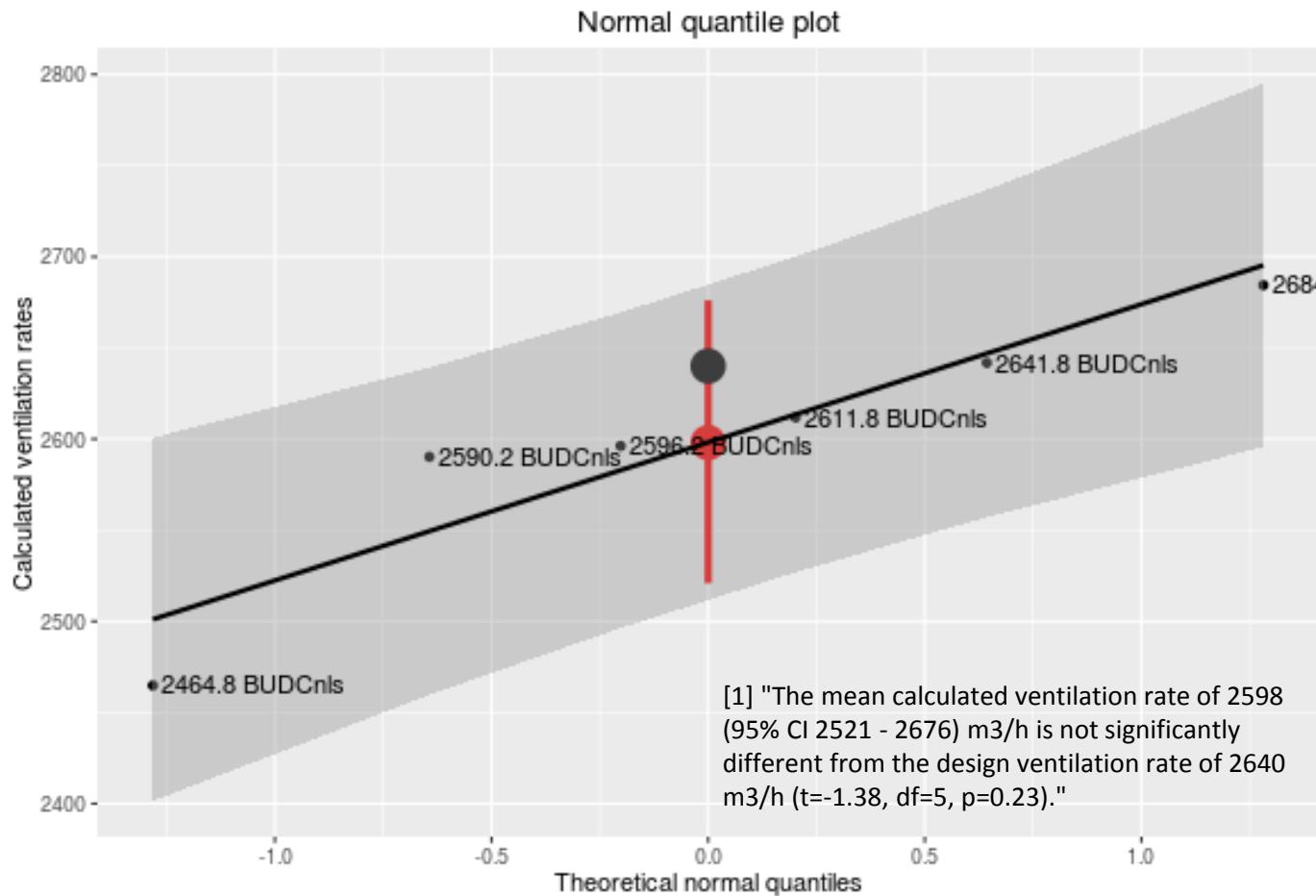
CO₂ana

- Analyse simulatie van een BSOH studiedag



CO₂ana

- Analyse simulatie van een BSOH studiedag



CO₂ana

- Analyse meting van een BSOH studiedag

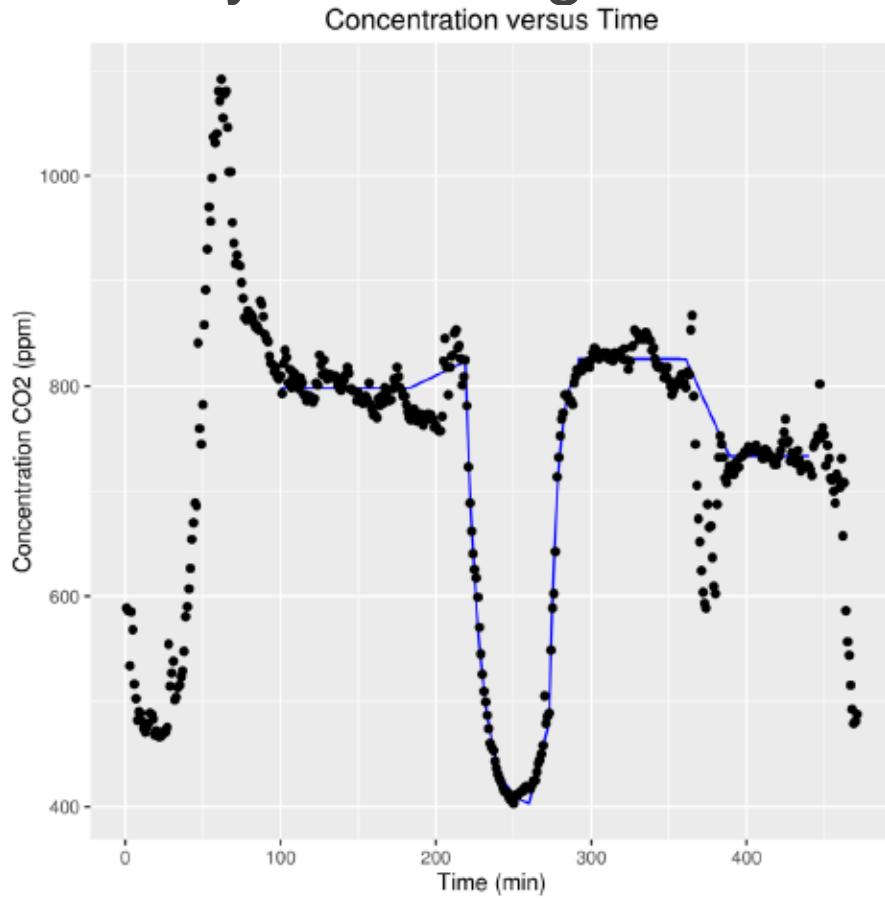


Figure 1 CO2ana plot of the IAQ 920 measurement series during the seminar



Figure 3 Morning position of the iaq (left) and one sensair device (right)

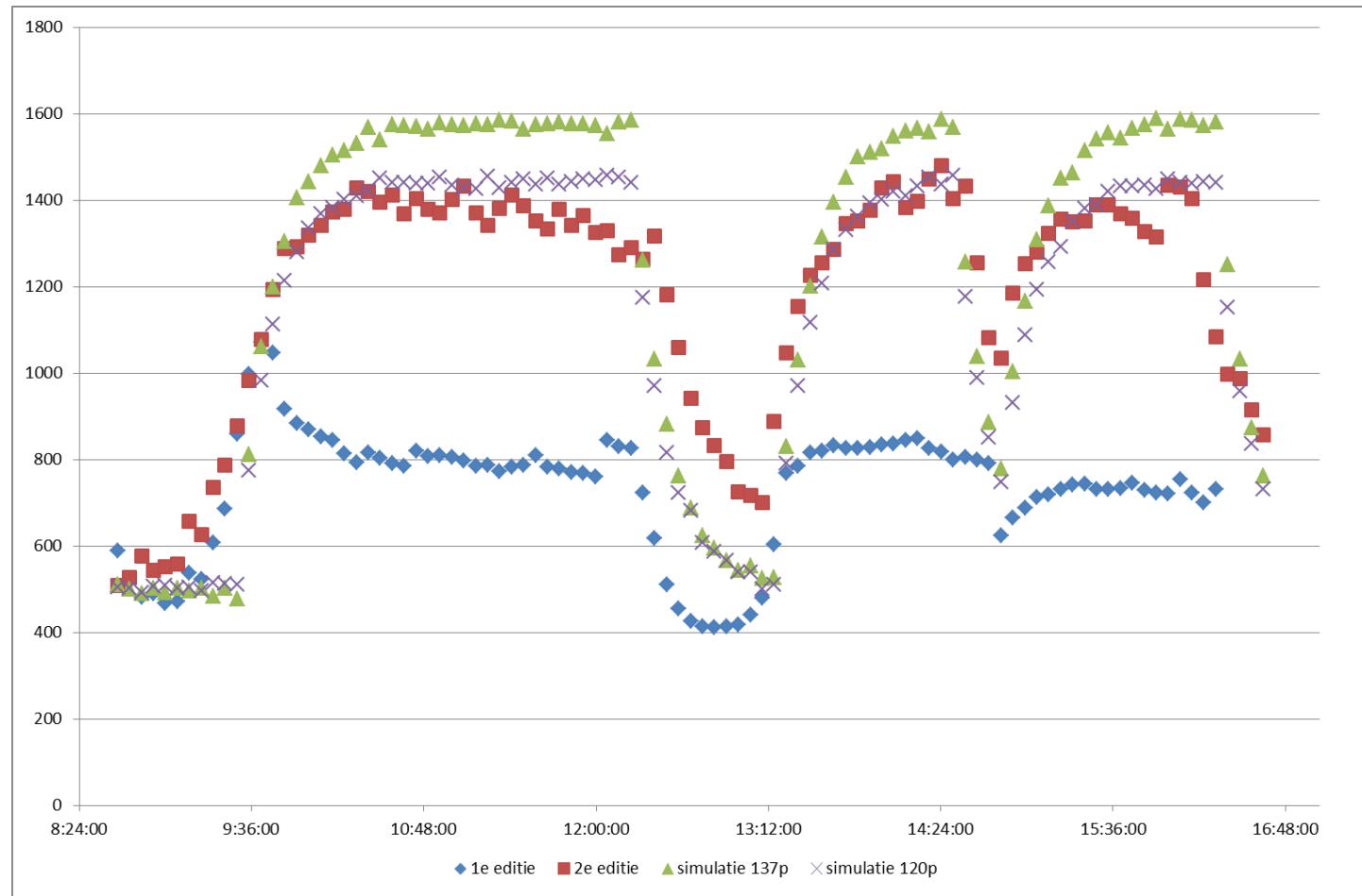


Figure 4 afternoon position of one sensair device In front of the air inlet

CO₂ana

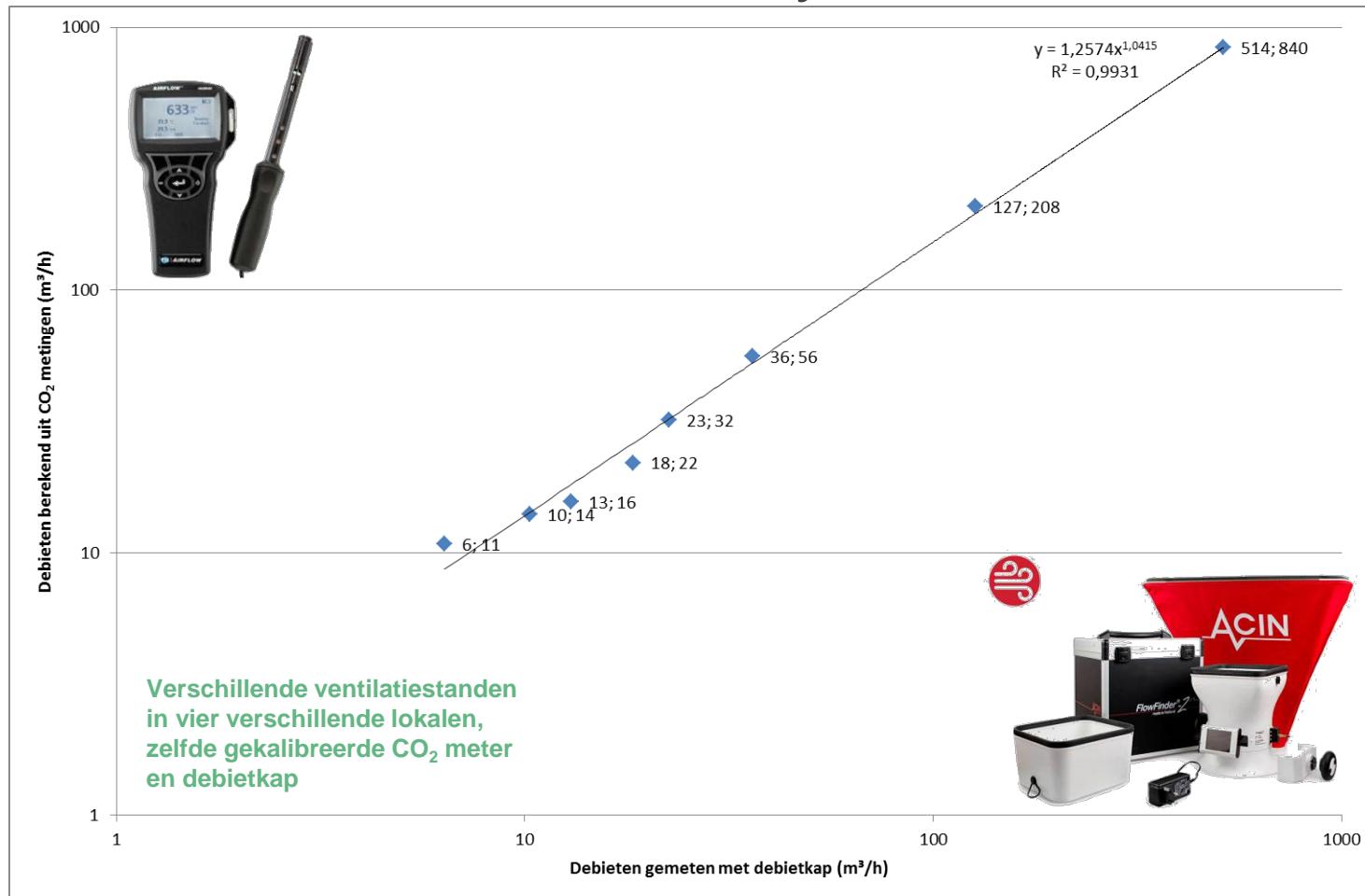


- Analyse hermeting van een BSOH studiedag



CO₂ana versus de debietkap

- Sterk verband, maar een systematisch verschil...



Conclusie

- De aanpassing van het KB streeft een belangrijke verbetering van de binnenluchtkwaliteit na
- Het invoeren van CO₂ als parameter voor verluchtning geeft ons een praktisch handvat
- Wie deze parameter gebruikt dient bewust te zijn van de mogelijkheden en beperkingen ervan
- Wie simuleert, meet en analyseert dient zich bewust te zijn van de randvoorwaarden
- Een praktijktoelichting bij het KB inzake verluchtning en beoordeling dmv CO₂ is wenselijk